

# Die Welt hinter der Steckdose

## Wie funktioniert unsere Stromversorgung?

von Denise Nüssle

**S**tecker rein und los geht's: Seit rund einhundert Jahren gibt es die Steckdose in ihrer heutigen Form. Sie elektrifiziert unseren Alltag. Brenzlich wird es erst, wenn für längere Zeit kein Strom aus ihr kommt. Spätestens dann rückt der Gedanke ins Bewusstsein, dass hinter dem kleinen rechteckigen Kasten in der Wand mit der runden Aussparung ein komplexes System mit vielen Akteuren, Hightech und Herausforderungen steckt. Mit Prof. Patrick Jochem vom DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme hat das DLRmagazin Antworten auf grundlegende Fragen zusammengestellt – und gibt einen Einblick in die Forschung des DLR für das Stromsystem von morgen.

### Was ist ein Stromsystem und welche Komponenten hat es?

Ein Stromsystem hat die Aufgabe, elektrische Energie zu erzeugen, zu speichern und dorthin zu transportieren, wo sie gebraucht wird. Dafür gibt es in Deutschland fast zwei Millionen Kilometer Leitungen auf unterschiedlichen Spannungsebenen, sowohl ober- als auch unterirdisch. Für weite Strecken gibt es das Übertragungsnetz mit Höchst- und Hochspannungsleitungen. Diese hohen Spannungen sind wichtig, um beim Transport wenig Verluste zu haben. Auf einer Distanz von Nord- nach Süddeutschland gehen trotzdem circa fünf Prozent des Stroms verloren. Für die regionale Verteilung kommen Mittelspannungsnetze zum Einsatz. Hier sind auch viele größere Erzeugungsanlagen, etwa Solar- und Windkraftanlagen, angeschlossen sowie Unternehmen mit einem höheren Verbrauch. Das Niederspannungsnetz liefert den Strom dann zu den einzelnen Haushalten und kleineren Betrieben.

Umspannwerke sind wichtige Knotenpunkte zwischen den unterschiedlichen Ebenen. Gleich-

zeitig können sie dabei helfen, das Stromsystem zu regeln. Weitere Bestandteile des Stromsystems sind zum Beispiel Stromspeicher. In der Regel sind das Batteriespeicher oder Pumpspeicherkraftwerke. Letzteres sind Anlagen, die den Strom speichern, indem sie Wasser in ein höher liegendes Becken pumpen und bei Bedarf wieder ablassen, um über Turbinen Strom zu erzeugen.

Das Transportnetz in Deutschland teilen sich vier Akteure auf. Auf lokaler und regionaler Ebene gibt es aber mehr als 800 Stromnetzbetreiber. Die Netzbetreiber sind marktwirtschaftliche Unternehmen – teilweise aber mit öffentlicher Eigentümerstruktur. Sie werden streng regulatorisch überwacht durch die Bundesnetzagentur. Ein Großteil ihrer Einrichtungen gehört zur kritischen Infrastruktur und muss gegen Ausfälle und unbefugte Eingriffe geschützt werden.

Bilder: Freepik (S. 18), DLR (S. 19)



### Wieso kommt immer Strom aus der Steckdose?

Rund 40 Gigawatt – das ist die Mindestmenge an elektrischer Leistung, die das Stromsystem rund um die Uhr liefern muss, die sogenannte Grundlast. Vor 20 Jahren kam diese Strommenge vor allem von Kern- und Kohlekraftwerken, die im Dauerbetrieb liefen. Benötigte man mehr Strom, wurden nach und nach weitere Kraftwerke hochgefahren, die sich dynamischer steuern ließen, zum Beispiel Steinkohle-, Gas- und Ölkraftwerke. Der Begriff Spitzenlast bezeichnet den maximalen Strombedarf. Sie liegt in Deutschland bei circa 80 Gigawatt und wird nur einige Male im Jahr für wenige Stunden abgerufen. Entsprechend teuer war es schon immer, die Kapazitäten für die Spitzenlast vorzuhalten und die Netze dafür auszubauen.

Ein besonderes Merkmal des Stromsystems ist, dass es zu jeder Sekunde im Gleichgewicht sein, also das Angebot an Strom der Nachfrage entsprechen muss. In der Vergangenheit mit hauptsächlich fossilen Energiequellen war das vergleichsweise einfach. Denn die Versorgungsunternehmen hatten eine gute Ahnung, wie hoch der Stromverbrauch sein würde – über den Tag verteilt bis hin zum Jahresverlauf. Die Kraftwerke konnten entsprechend eingeplant werden.

Je mehr Strom aus erneuerbaren Ressourcen erzeugt wird, desto flexibler müssen das Stromsystem und seine Komponenten werden: Sonne und Wind stehen umsonst zur Verfügung, sind aber fluktuierende Quellen – also nicht regelmäßig und langfristig planbar. Das Strom-Angebot ist abhängig vom Wetter und den Jahreszeiten und wird von immer mehr und auch kleineren Akteuren bereitgestellt. Gleichzeitig werden mehr Speicher, Reserven und weitere Flexibilisierungsoptionen benötigt.

### Wie funktioniert der Strommarkt?

Um Strom möglichst effizient zu erzeugen und preisgünstig zu machen, ist der Stromhandel in Deutschland und vielen weiteren Ländern nach marktwirtschaftlichen Prinzipien organisiert. Man kann sich diese Märkte als Großmärkte vorstellen. Die dort erzielten Preise sind nicht die Endpreise für die individuellen Verbraucher. Der Strommarkt hat mehrere Teilmärkte. Sie unterscheiden sich darin, mit welchem zeitlichen Vorlauf dort Strom gehandelt wird. Beispielsweise kann man Strom schon ein Jahr im Voraus kaufen und dann weiterverkaufen. Je näher der Tag der Lieferung kommt, desto genauer lässt sich sagen, wie groß Angebot und Nachfrage tatsächlich sein werden – was über den Preis entscheidet. Beim „Day-ahead-Markt“ wird der Strom für den nächsten Tag gehandelt. Merkt

man als Stromanbieter, dass man für denselben Tag beispielsweise zu viel Strom zur Verfügung hat, kann man versuchen, diesen auf dem „Intra-Day-Markt“ noch zu verkaufen. Hat man für den Tag zu wenig Strom, kann man hier kurzfristig nachkaufen.

Zudem gibt es den Regelenergiemarkt: Hier wird in Notfällen – zum Beispiel bei Engpässen durch unvorhergesehene Ereignisse wie einen Kraftwerksausfall – das Stromsystem noch in Echtzeit ausgeglichen. Auf dem Regelenergiemarkt wird Strom angeboten, der bei Bedarf sehr kurzfristig bereitgestellt werden muss. Der Anbieter wird bereits für die bloße Bereitstellung bezahlt.

Für alle Märkte gibt es digitale Plattformen. Akteure müssen sich erst qualifizieren, um dort handeln zu dürfen. In der Vergangenheit waren die Strommärkte überwiegend national organisiert. Aktuell gibt es in Europa starke Bestrebungen, die Märkte miteinander zu verbinden und sie so effizienter und



PROF. PATRICK JOCHEM

**Position:** Abteilungsleiter Energiesystemanalyse und Professor am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

**Hintergrund:** Studium der Volkswirtschaft und Promotion im Bereich Transportökonomie

**Letzter Stromausfall:** Vor rund zwei Jahren beim Arbeiten von zu Hause. Circa 15 Minuten und zum Glück nur sehr lokal, sodass das Mobilfunknetz noch funktionierte. Weiterarbeiten am Laptop mit Internetzugang war über mobile Daten möglich – und auch das Eisfach hat die kurze Unterbrechung gut weggesteckt.

**Findet besonders spannend:** Die Umsetzung der Energiewende angesichts geopolitischer Herausforderungen: Ausbau der Infrastruktur, Resilienz und Sicherheit sowie Ressourcenbeschaffung; die Weiterentwicklung von Strommärkten.



### Was erforscht das DLR im Bereich des Stromsystems?

Das DLR betrachtet die Stromversorgung als System von Technologien und erforscht, wie es für zukünftige Herausforderungen fit gemacht werden kann. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Sektorenkopplung. Darunter versteht man, dass die Sektoren Elektrizität, Verkehr, Wärme und Industrie miteinander vernetzt sind, gemeinsam gedacht und optimiert werden. Aus einer wirtschaftswissenschaftlichen Perspektive untersucht es das Design von Strommärkten und Strompreisen sowie die Entwicklung von Stromsystemen. Hier liegt der Fokus darauf, wie man eine resiliente, sichere, erneuerbare und für alle finanzierbare Energieversorgung gewährleisten kann.

Darüber hinaus modellieren die DLR-Forschenden Strommärkte mit der selbst entwickelten Open-Source-Software AMIRIS. Diese berücksichtigt das strategische Handeln unterschiedlicher Marktteilnehmer und deren Beweggründe – vom unternehmerischen Eigeninteresse bis hin zu einer unvollständigen Informationslage. Auf diese Weise lassen sich die Folgen bestehender oder zukünftiger Marktdesigns möglichst realitätsnah untersuchen,

zum Beispiel, wie sich regulatorische Rahmenbedingungen auf das Stromsystem auswirken. Dieses Wissen kann Entscheidungen in Politik, Verwaltung und Wirtschaft unterstützen. Unternehmen auf dem Strommarkt können mit den Szenarien des DLR ihre strategische Positionierung weiterentwickeln oder die Tarife für Endkunden intelligenter und flexibler machen.

Was die Technologie für Stromnetze betrifft, beschäftigt sich die DLR-Forschung mit den technischen Herausforderungen, welche die erneuerbaren Energien mit sich bringen – eine steigende Dynamik und viel mehr, vorwiegend dezentral organisierte Akteure. Im Mittelpunkt stehen dabei neue Netztechnologien und Netzarchitekturen, Regelungen für intelligente Netze und Maßnahmen, um Fehler oder Störungen im Stromnetz zu vermeiden oder möglichst schnell zu beheben. Dafür kann auch künstliche Intelligenz zum Einsatz kommen.

**Denise Nüssle** ist Presseredakteurin im DLR und berichtet vorwiegend über die Forschungsbereiche Energie und Verkehr. Sie nahm diesen Artikel zum Anlass, ihrer lokalen Strominfrastruktur einen Besuch abzustatten – natürlich mit gebührender Entfernung.

wirtschaftlicher zu machen. Auf dem Day-ahead-Markt arbeiten bereits die Märkte der meisten europäischen Länder zusammen. Zwischen den nationalen Stromnetzen gibt es Kuppelleitungen, die vermehrt auch für den Stromhandel genutzt werden.

### Wie setzt sich der Strompreis von Verbrauchern zusammen?

Der Strompreis hat viele Komponenten: Grob gesprochen macht die Stromerzeugung selbst 40 Prozent aus, 30 Prozent entfallen auf das Netzentgelt und noch mal 30 Prozent auf sonstige Abgaben und Steuern, zum Beispiel die Mehrwertsteuer. Tendenziell werden die Netzentgelte pro Kilowattstunde mittelfristig weiter steigen: Denn je mehr erneuerbare Energien für die Stromerzeugung genutzt werden, desto komplexer und flexibler muss die Infrastruktur des Stromsystems sein und desto mehr Speicherkapazitäten werden benötigt. Obgleich die Gesamtstromnachfrage durch die Elektrifizierung von Pkw und Wärmebereitstellung wohl steigen wird, werden die Energiemengen, die durch das Netz bewegt werden, tendenziell abnehmen. Unternehmen und private Haushalte werden zwar weiterhin einen Netzanschluss haben, erzeugen und nutzen dann aber vermehrt ihren eigenen Strom. Diejenigen Haushalte, die keine Photovoltaik-Anlage mit Batteriespeicher haben, zahlen dann für jede verbrauchte Kilowattstunde Strom höhere Netzentgelte.

### Wie wahrscheinlich ist ein Blackout?

Der Begriff Blackout beschreibt einen großflächigen und über längere Zeit andauernden Stromausfall. In Deutschland ist die Wahrscheinlichkeit dafür

äußerst gering, weil sehr viel in die Netzinfrastruktur investiert wird. Statistisch gesehen erlebt jeder Mensch in Deutschland pro Jahr einen meist nur lokalen Stromausfall von knapp 13 Minuten. Weltweit gesehen entstehen Blackouts oft durch die unzureichende Reaktion von Akteuren wie Netzbetreibern und Energieversorgern auf erhöhte Schwankungen in der Spannung oder Frequenz des Stromsystems. Das Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage gerät durcheinander und kann sich gegebenenfalls in einem eng vernetzten Stromsystem sehr schnell ausbreiten.

### Sind Wechselrichter von Photovoltaikanlagen ein Risiko für das Stromnetz?

Wechselrichter haben eine wichtige Funktion: Sie wandeln den von Solarmodulen gewonnenen Gleichstrom in Wechselstrom um. Damit kann dieser direkt genutzt oder ins öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Zudem verfügen sie normalerweise über einfache Funktionen, um die Netzqualität zu überwachen und zu steuern. Zum Beispiel regeln sie bei einem Ungleichgewicht im Netz die Einspeisung ab. Machen das allerdings alle Wechselrichter gleichzeitig, weil zu viel Solarstrom verfügbar ist, kann sich ein Ungleichgewicht verschärfen. Deshalb geht die Entwicklung hin zu intelligenten Wechselrichtern und Ortsnetztransformatoren. Sie können von außen angesteuert werden und das Gleichgewicht im Stromsystem wesentlich besser und zeitlich viel kleinteiliger regeln. Je intelligenter diese Komponenten werden, desto wichtiger ist es, sie gegen unbefugten Zugriff zu schützen.

Mit dem NESTEC-Labor untersucht das DLR das Verhalten realer Verteilnetze und testet Komponenten in einem realitätsnahen Umfeld.

## STROM-INSIDER-WISSEN



**Stromstärke:** Menge an Strom (elektrischer Ladung/Elektronen), die sich pro Sekunde durch eine Leitung bewegt, gemessen in Ampere. Analog: Wassermenge in einer Leitung.



**Elektrische Spannung:** Druck, mit dem Strom durch eine Leitung fließt, gemessen in Volt. Analog: Wasserdruck in einer Leitung.



**Elektrische Leistung:** Beschreibt, wie viel Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt erzeugt oder verbraucht wird. Produkt aus Stromstärke und elektrischer Spannung. Gemessen in Watt.



**Strom- oder Netzfrequenz:** Gibt an, wie oft der Wechselstrom pro Sekunde seine Richtung ändert. Gemessen in Hertz. Entscheidender Faktor für Stabilität des Stromnetzes. Die Höhe der Schwankungen ist ein Indikator, ob Strom-Angebot und Strom-Nachfrage im Gleichgewicht sind. Netzbetreiber müssen die Frequenz ihrer Netze genau beobachten und in engen Grenzen halten. Ansonsten können technische Geräte Schaden nehmen.



**Redispatch:** Bezeichnet das Management von regionalen Engpässen im Stromsystem, nachdem der Handel auf den Strommärkten bereits abgeschlossen ist. Netzbetreiber passen die Einspeisung von Strom ins Netz an, um Engpässe zu vermeiden, zu beseitigen und so für ein stabiles Netz zu sorgen. Auch erneuerbare Energien werden verstärkt miteinbezogen.



**Brownout:** Eine kontrollierte, lokale Absenkung der Spannung im Stromnetz um 10 bis 25 Prozent durch Netzbetreiber. Letzte Maßnahme, um bei Engpässen oder drohender Überlastung einen Blackout zu verhindern. Darf in Deutschland in der Regel vier Stunden nicht überschreiten.



**Kapazitätsmarkt:** Abkehr vom bisherigen Marktprinzip: Nicht nur die gelieferte Strommenge, sondern auch die gesicherte Bereitstellung wird vergütet, egal ob der Strom dann abgenommen wird oder nicht. Mit diesem Prinzip kann die sichere Versorgung, vor allem bei einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien, besser gewährleistet werden. Kapazitätsmärkte gibt es beispielsweise bereits in Belgien, Großbritannien und Italien.