

# Infrastrukturbedarf von Energieverteilungsnetzen für eine weitgehend CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung

DIRK UWE SAUER



v.l. Dr. Peter Schossig, Prof. Dirk Uwe Sauer auf der IRES 2007

Um die globale Klimaerwärmung auf 2°C zu begrenzen, ist ein radikaler Umbau des Energieversorgungssektors notwendig. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kopf müssen z.B. in Deutschland auf weniger als 10 % des heutigen Wertes gesenkt werden. Dies kann erreicht werden, wenn als Endenergieträger Strom aus CO<sub>2</sub>-freier Produktion, Gas mit hohem Biogas- oder Wasserstoffanteil, flüssige Biotreibstoffe und Wärme aus solaren und geothermischen Quellen eingesetzt werden. Die Betrachtung verschiedener Bereiche des urbanen Energieverbrauchs zeigt, dass die Umstellung ohne die Errichtung neuer, paralleler Energieverteilungsinfrastrukturen möglich ist und dabei eine hohe Effizienz des Energieeinsatzes erreicht wird. Die intelligente Doppelnutzung von Infrastruktur (z.B. Batteriespeicher in Fahrzeugen oder Blockheizkraftwerke mit Wärmespeicher) zusammen mit Energiemanagement- und Kommunikationssystemen ermöglicht auch die Integration von großen Strommengen aus fluktuierenden Stromerzeugern wie Wind und Sonne.

Insgesamt wird die hohe Bedeutung von Strom im zukünftigen Energieversorgungssystem deutlich. Selbst bei der Realisierung von Einsparpotentialen von 50 % in Bezug auf den Gesamtenergieverbrauch, ist beim Strom auch in absoluten Zahlen mit einem Anstieg zu rechnen. Alle Techniken und Systemkonzepte, die eine direkte Nutzung von Strom vorsehen, werden durch die hohe Gesamteffizienz der Energienutzung erhebliche Systemvorteile erlangen.

Die auf Klimamodellen basierenden Vorhersagen für den weltweiten Temperaturanstieg zeigen mit hoher Evidenz, dass ein Temperaturanstieg von 2°C gegenüber dem Beginn der 20. Jahrhunderts nur dann nicht überschritten wird, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre 450 ppm nicht überschreitet. Aus den Klimamodellen geht des Weiteren hervor, dass diese Konzentration dann nicht überschritten wird, wenn der globale Ausstoß von anthropogenen CO<sub>2</sub> auf etwa 10 Gt/Jahr begrenzt wird. Geht man von diesem Ziel aus, lässt sich daraus das persönliche Emissionsrecht für jeden einzelnen Menschen für das Jahr 2050 aus den Klimamodellen ableiten. Berücksichtigt man den für 2050 prognostizierten Anstieg der Weltbevölkerung auf etwa 10 Milliarden Menschen, ergibt sich daraus ein persönliches Emissionsrecht von 1 t CO<sub>2</sub> pro Kopf. Im weltweiten Mittel werden heute 4 t CO<sub>2</sub> pro Kopf emittiert, in Deutschland sind es 11 t und in den USA nahezu 20 t.

Da es keine moralische oder technische Begründung dafür gibt, dass in einigen Jahrzehnten Men-

schen in unterschiedlichen Ländern unterschiedliche viele Emissionsrechte haben, muss man davon ausgehen, dass auch in den OECD-Ländern die Emission auf das mittlere Niveau in der Welt gesenkt werden muss. In der Konsequenz heißt dies, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 1 t pro Jahr und Kopf bis 2050 abgesenkt werden muss. Das bedeutet z.B. für Deutschland eine Reduktion auf weniger als 10 % und für die Schweiz auf etwa 15 % des heutigen Niveaus. Führt man sich diese Zahlen vor Augen, wird deutlich, dass es nicht um graduelle Veränderungen der Energieverbrauchs im Vergleich mit heute geht, sondern um eine grundlegende Änderung. Diese wird erzwungen durch die Auswirkungen der gegenwärtigen Nutzungsweise von fossilen Energieträgern. Da weltweit gesehen davon auszugehen ist, dass der Gesamtenergieverbrauch gegenüber heute auch bei Nutzung von Energieeffizienzpotentiale durch das globale Bevölkerungswachstum und der Entwicklung von heute noch unterentwickelten Gegenden, weiter ansteigt, wird die begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Energieträger zu akzeptablen Preisen diesen Wandel zusätzlich vorantreiben.

Alle weiteren Betrachtungen basieren also auf den folgenden drei Axiomen:

1. Der Anstieg der globalen Temperatur soll 2°C nicht überschreiten.
2. Um dies zu erreichen, muss die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf 450 ppm beschränkt werden.
3. Bei einem Anstieg der Weltbevölkerung auf 10 Mrd. Menschen in 2050 steht jedem Mensch ein Emissionsrecht von einer Tonne CO<sub>2</sub> pro Jahr zu, um das 2. Axiom erfüllen zu können.

### Energieträgermix unter Berücksichtigung der Klimaziele

Basierend auf den vorhergehenden Betrachtungen ist die Frage zu beantworten, wie eine derart drastische Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden kann und welche Folgen sich daraus für die Energieversorgungsinfrastrukturen ergeben. Skiz-

ziert werden hier Szenarien am Beispiel Deutschlands für den Zeitpunkt, an dem das Ziel einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emission auf 10 % des heutigen Wertes erreicht sein muss. Es ist klar, dass es auf dem Weg dorthin auch noch Übergangstechniken gibt, die hier nicht beschrieben werden. Auch werden von den Szenarien nur einige Aspekte erfasst und andere Bereiche (z.B. Gütertransport) nicht diskutiert. Allerdings würden sich bei Einbeziehung aller Sektoren der Energienutzung keine wesentlichen Änderungen in den zentralen Aussagen ergeben.

Eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 10 % des heutigen Wertes kann im Wesentlichen gleich gesetzt werden mit der Forderung nach einer weitgehend CO<sub>2</sub>-freien Energieversorgung. Selbstverständlich müssen alle Potentiale zur Effizienzsteigerung ausgenutzt werden. Verschiedene Studien zeigen, dass eine Verdoppelung der Energieeffizienz möglich ist.

Als Energieträger für den Endnutzer können in einer quasi-CO<sub>2</sub>-freien Energieversorgung Strom, Wärme, Gas und Treibstoffe zum Einsatz kommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine effiziente CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Lagerung beim Endverbraucher (z.B. Fahrzeug) nicht möglich ist.

Eine CO<sub>2</sub>-freie Stromerzeugung kann grundsätzlich über die Nutzung Erneuerbarer Energien wie Wind, Photovoltaik, Solarthermische Kraftwerke, Wellen- und Strömungsenergie, Geothermie, Wasserkraft oder Biomasse erfolgen. Kohle- und Erdgaskraftwerke können nur beim Einsatz einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung (Sequestrierung) eingesetzt werden.

Das Konzept ist zumindest umstritten, wird aber auch von den Befürwortern als Übergangstechnik angesehen, die in den kommenden Jahrzehnten die schnelle Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ermöglicht, langfristig aber durch begrenzte Speichervolumen keine Option darstellt. Kernspaltung und Kernfusion sind theoretisch weitere Optionen, die allerdings aus ökonomischen Gründen, wegen des technischen Risikos, der ungelösten Entlagerfrage

und auch wegen der Begrenztheit von Kernbrennstoffen keine nachhaltige Lösung darstellen. Bei der Kernfusion sind Zeitpunkt und Kosten für die zivile Nutzung noch völlig unklar. Sicher scheint, dass sehr große Kraftwerkseinheiten mit sehr hohen Investitionskosten notwendig sind, um eine positive Energiebilanz zu erzielen, was zu einem hohen Betriebsrisiko für die Netzstabilität führen wird.

Erdgas stellt heute in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen die effizienteste Nutzung von fossilen Energieträgern da. Daher wird in vielen Szenarien eine Umstellung auf Gas anstelle von Öl oder Kohle angestrebt. Allerdings steht dabei auch in Frage, inwieweit die steigende Erdgasnachfrage gedeckt werden kann. Die vorhandene Gasinfrastruktur kann ohne Technologiesprung weiter genutzt werden, wenn dem Erdgas steigende Anteile Biogas und Wasserstoff bis zur vollständigen Ersetzung beigefügt werden. Biogas kann dezentral erzeugt und nach Aufbereitung ins Gasnetz eingespeist werden. Wasserstoff könnte durch zentrale Reformierung aus fossilen Energieträgern gewonnen werden und das anfallende CO<sub>2</sub> analog zu den „CO<sub>2</sub>-freien“ fossilen Kraftwerken sequestriert werden. Langfristig ist die Erzeugung von Wasserstoff aus Stromüberschüssen aus CO<sub>2</sub>-freier Produktion durch Elektrolyse oder die direkte Erzeugung von Wasserstoff aus z.B. biologischen oder photo-chemischen Prozessen die einzig nachhaltige Option. Damit kann Gas mit einer sich im Laufe der Jahre wechselnden Zusammensetzung als Energieträger für zukünftige Energiesysteme eingeplant werden. Wenn im Weiteren von „Gas“ gesprochen wird, ist immer die beschriebene Mischung mit einem langfristig zu null gehenden Erdgasanteil gemeint.

Flüssige Kraftstoffe sind für mobile Anwendungen für mittlere bis große Distanzen eine Notwendigkeit, auf die aus heutiger Sicht auch langfristig nicht verzichtet werden kann. Dazu gehören z.B. auch Schiffe, Flugzeuge, Güterverkehr auf der Straße oder lange Autofahrten. Flüssige Treibstoffe können z.B. flüssiges Gas der oben genannten

Zusammensetzung, flüssiger Wasserstoff und insbesondere synthetische Biokraftstoffe der 2. Generation (BTL) sein. Dabei nehmen insbesondere die Biokraftstoffe eine zentrale Stellung ein. Im Gegensatz zu den heutigen Pflanzenölen oder Alkoholen, die zu Monokulturen und schlechter Effizienz führen, versprechen die „biomass to liquid (BTL)“-Prozesse eine deutlich höhere Effizienz (bis Faktor 4) und eine flexible Nutzung von Biomasse aller Art.

Niedertemperaturwärme kann im Gebäudebereich passiv durch die Sonneneinstrahlung, aktiv durch Wärmekollektoren, durch Oberflächen- und Tiefengeothermie oder durch Biomasse bereitgestellt werden. Passive Maßnahmen sind z.B. geeignet ausgerichtete und dimensionierte Fensterflächen. Die Geothermie, ggf. in Kombination mit Wärmepumpen kann kontinuierlich Wärme sowohl für Heizungssysteme als auch über Absorptionskältemaschine Kälte zur Verfügung stellen.

Grundsätzlich ist aus Effizienzgründen die Zahl der Energiewandlungsprozesse immer auf ein Minimum zu beschränken. Liegt Strom vor, sollte eine Umwandlung in chemische Energieträger, insbesondere Wasserstoff, nur stattfinden, wenn eine direkte Nutzung des Stroms nicht möglich ist.

Zusammenfassend kann von Strom, Gas, flüssigen Biotreibstoffen und Wärme als Energieträger für die Endnutzer in einer CO<sub>2</sub>-freie Zukunft ausgegangen werden. Für die weiteren Betrachtungen sind die Anteile der verschiedenen oben diskutierten Technologien z.B. zur Stromerzeugung nicht von Bedeutung, sofern sie die Randbedingung der CO<sub>2</sub>-Freiheit erfüllen.

## Energienutzung und Infrastrukturbedarf in urbanen Gebieten in 2050

Im Folgenden sollen vier Bereiche des Energieverbrauchs im urbanen Bereich betrachtet werden. Dabei werden Änderungen des Energiebedarfs, der eingesetzten Endenergieträger sowie der damit ein-

hergehenden Konsequenzen für die Versorgungsinfrastruktur diskutiert.

### Öffentlicher Personennahverkehr

Für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) gibt es eine Reihe von Optionen, die zu einem CO<sub>2</sub>-freien Betrieb führen. Davon sind viele heute bereits realisiert oder wurden in manchen Städten früher bereits betrieben und dann zurückgebaut. Dazu gehören die Strassen-, U- und S-Bahnsysteme ebenso wie oberleitungsgebundenen Busse, wie sie heute in Deutschland nur noch an wenigen Orten zu finden sind. Diese Systeme greifen alle direkt auf Strom zurück.

Weitere Optionen für leitungsungebundene Fahrzeuge sind Brennstoffzellen aber auch batteriebetriebene Fahrzeuge. In letzterem Fall können Systeme mit Schnellladeoption interessant sein, bei denen an jeder Haltstelle und den Endpunkten der Strecken die Speicher bei hohen Ladeleistungen nachgeladen werden können.

Der notwendige Infrastrukturbedarf liegt hier je nach Option in den Schienenwegen, den Oberleitungen oder den Hochleistungsladestationen. Hochtemperaturbrennstoffzellen können in den Betriebsstätten mit Gas, Niedertemperaturbrennstoffzellen mit Wasserstoff oder Alkoholen betankt werden. Die Herausforderungen liegen hier also weniger in der Energieversorgung, sondern den städtebaulichen Maßnahmen für die ÖPNV-Infrastruktur.

### Individual-Personenverkehr

Um die persönliche Mobilität in ähnlicher Weise wie heute aufrecht zu erhalten, sind neue Antriebssysteme oder Kraftstoffe notwendig. Wie oben ausgeführt wurde, steht in einer CO<sub>2</sub>-freien Energiewirtschaft insbesondere Strom zur Verfügung, der wann immer möglich direkt ohne Wandlungsprozesse eingesetzt werden sollte. Die Umwandlung von Strom z.B. in den Energieträger Wasserstoff

zum Betrieb von Brennstoffzellen ist mit erheblichen Energieverlusten verbunden. Daher sind batteriegetriebene Fahrzeuge sowohl in Bezug auf die lokalen Emissionen als auch die Gesamteffizienz der Energienutzung natürliche Lösungen. Da Batterien relativ hohe Kosten und auch Gewicht mit sich bringen, ist es sinnvoll, Strom vor allem für Distanzen unter 100 km einzusetzen. Dies ist aber völlig ausreichend für alle Stadtfahrten und mehr als 90 % aller Fahrten die durchgeführt werden. Die mittlere statistische Fahrleistung von Fahrzeugen in Deutschland beträgt rund 36 km/Tag.

Plug-in Hybrid-Fahrzeuge sind eine Option, die sowohl das Fahren mit elektrischer Energie im Bereich von 30 bis 70 km am Tag als auch das Fahren über lange Distanzen ermöglicht. Dazu wird ein elektrischer Antrieb mit Batterie kombiniert mit einem Verbrennungsmotor, der entweder zum Antrieb eines Stromgenerators oder zum direkten mechanischen Vortrieb des Fahrzeugs verwendet werden kann. Dadurch kann eine unveränderte Mobilität aufrechterhalten werden. Der Verbrennungsmotor wird dann mit flüssigen Biokraftstoffen (BTL) betrieben, so dass der Gesamtbetrieb CO<sub>2</sub>-frei wird. Grundsätzlich kann der Verbrennungsmotor auch durch eine Brennstoffzelle oder durch einen anderen Stromgenerator ersetzt werden. Hier wird es einen Wettbewerb der Konzepte und Technologien geben.

Die Batterien der Plug-in Hybride werden aus dem Stromnetz nachgeladen. Bei einer Batteriekapazität von 10 kWh kann das Fahrzeug 50 bis 70 km fahren. Die Nachladung kann mit Ladegeräten von 5 kW erfolgen, die ohne Änderungen der Infrastruktur in jedem Haushalt angeschlossen werden können. Auch ein bidirektionaler Energiefluss ist basierend auf der bestehenden Infrastruktur möglich. So können heute in Deutschland z.B. Photovoltaikanlagen bis 4,6 kW einphasig ans Netz angeschlossen werden und entsprechende Einspeiseleistung bereitstellen. Allerdings werden auch Nachladestationen an öffentlichen oder Unternehmensparkplätzen benötigt, um z.B. während der

Arbeit oder dem Stadtbummel die Batterie wieder aufladen und gleichzeitig die Batterie auch für die Netzregelung nutzen zu können.

### Einzelwohnhäuser

Wohnhäuser werden im Jahr 2050 eine sehr gute thermische Isolierung haben, so dass der thermische Energiebedarf für die Heizung sehr gering sein wird. „Dreiliter“-Häuser oder „Null-Energie“-Häuser werden für Neubauten Standard sein. Es ist mehr als realistisch von einem thermischen Energiebedarf von weniger als 20 kWh pro m<sup>2</sup> Wohnfläche und Jahr auszugehen. Diese Energie kann durch ein oberflächennahes Erdwärmepumpensystem bereitgestellt werden. Bei einer Arbeitszahl von 4 wird dabei für die Beheizung einer Wohnfläche von 120 m<sup>2</sup> 600 kWh elektrische Energie für die Wärmepumpen gebraucht. Der Einsatz einer Gas- oder Ölheizung ist unter diesen Bedingungen nicht sinnvoll. Warmes Wasser wird zu einem hohen Anteil über thermische Solarkollektoren bereitgestellt.

Der elektrische Energiebedarf für die heutigen durch Strom bereitgestellten Energiedienstleistungen wird sich gegenüber dem heutigen Stand problemlos auf 50 % der heutigen Werte senken lassen. Statistisch verbraucht ein 4-Personenhaushalt heute in Deutschland etwa 3500 kWh elektrische Energie. Geht man von einem Auto mit Plug-in-Hybrid-Konzept aus (siehe oben) und einer Fahrleistung von 12.000 km bei einem Verbrauch von 10 kWh/60 km, benötigt der Haushalt 2000 kWh elektrische Energie für den Betrieb eines Fahrzeugs. Addiert man den „konventionellen“ Stromverbrauch, das Einsparpotential, die zusätzliche Wärmepumpe und ein Elektroauto, dann resultiert ein Anstieg des Strombedarfs des Modellhaushalts um etwa 25 %. Dieser Anstieg ist problemlos über die bestehenden Infrastrukturen darstellbar und auch der Leistungsbedarf wird gegenüber heute bei Einsatz intelligenter Steuerungs- und Managementsysteme z.B. zur Nachladung der Fahrzeugbatterien nicht größer.

### Mehrfamilienhäuser und Funktionsgebäude

In größeren Gebäuden (Mehrfamilienhäuser, Büro- oder Verwaltungsgebäude, Krankenhäuser, Schulen etc.) lohnt sich durch den hohen Wärme- und Strombedarf der Einsatz von Blockheizkraftwerken (BHKWs). Da bei steigender Anzahl von sehr warmen Sommertagen auch von einer steigenden Nachfrage nach Kühlsystemen für den Sommer ausgegangen werden kann, kann die Wärme über Absorptionskältemaschinen auch im Sommer gut eingesetzt und damit ein hoher Jahreswirkungs- und Auslastungsgrad erreicht werden. Wärmeüberschüsse aus den Sommermonaten können über Energiepfähle auch im Erdboden zwischengespeichert und im Winter genutzt werden. Die BHKWs können mit Gas betrieben werden und entsprechend der oben beschriebenen Änderung in der Zusammensetzung sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen immer weiter ab.

Infrastrukturänderungen sind hierfür kaum nötig. Gasversorgungen sind weitgehend vorhanden, müssen aber für den ansteigenden Anteil von Wasserstoff ertüchtigt werden. Die Stromanschlüsse werden sowohl die eingespeiste als auch die verbrauchte elektrische Leistung aufnehmen bzw. abgeben können. Allerdings müssen in Folge der größeren Leistungen auch die Übergänge und Sicherheitskonzepte zwischen den Spannungsebenen für bidirektionalen Leistungsfluss angepasst werden. Die Errichtung von lokalen Nahwärmenetzen um z.B. mehrere Gebäude oder Siedlungen von Wohnhäusern von einem BHKW aus zu versorgen, ist eine jeweils entsprechend des jeweiligen Standorts zu untersuchende Option. Ein Kommunikations- und Energiemanagementsystem ist zudem für die Steuerung der BHKWs notwendig, um deren Einsatz in Bezug auf das Gesamtsystem und die jeweiligen Anwendung energetisch und wirtschaftlich zu optimieren. Derzeit wird die überwiegende Zahl von KWK-Anlagen „wärmegeführt“ betrieben, was bedeutet, dass die Anlagen immer dann gestartet werden, wenn ein Wärmebedarf besteht. Der dabei anfallende Strom wird dann ins Stromnetz abgegeben, unabhängig davon, ob

dafür gerade Bedarf besteht oder nicht. Dies führt z.B. dazu, dass beim Hochfahren typischer Gebäudeheizungssysteme in den frühen Morgenstunden zur Beendigung der Nachtabenkung der Gebäudetemperatur bei Einsatz von KWK-Anlagen Strom zu einem Zeitpunkt minimalen Bedarfs erzeugt wird. Eine Speicherung des elektrischen Stroms und die nachfolgende Abgabe ans Netz zu Zeiten hohen Bedarfs ist aufwändig und teuer. Dagegen ist es wesentlich ökonomischer, die Wärme zu speichern und dafür die KWK-Anlage zu Zeiten des höchsten Strombedarfs im Netz zu betreiben („stromgeführter“ Betrieb). Die Wärme kann dann zum Bedarfszeitpunkt entnommen werden.

### Stromverteilung über Netze

Die Speicherung von elektrischer Energie ist immer mit Wirkungsgradverlusten und teilweise nicht unerheblichen Kosten verbunden ist. Daher sind alle Maßnahmen zur direkten Nutzung von Energie durch intelligente Verbraucher- und Erzeugersteuerung sowie der Transport von elektrischer Energie vom Ort der Erzeugung zu den Verbraucherzentren typischerweise ökonomisch und effizient. Dazu gehört insbesondere auch der Ausbau von Stromnetzen zur langreichweitigen Energieübertragung. Mit der HVDC (Hochspannungsgleichstrom)-Übertragungstechnik zusammen mit moderner Leistungselektronik stehen effiziente Techniken zur Verfügung, die auch eine unterirdische Trassenführung möglich machen und damit auch ohne signifikanten Landschaftsverbrauch realisiert werden können. Bei Verlusten von weniger als 5 % pro 1000 km ist auch der Transport elektrischer Energie über große Distanzen effizient gegenüber der Speicherung. Durch den massiven Ausbau der nationalen und insbesondere der transnationalen Übertragungskapazitäten können regionale Unterschiede in der Windkraftherzeugung oder der solaren Einstrahlung ausgeglichen werden. Transeuropäische Netze hoher Übertragungsleistung sind technisch eine realistische Option. Die heutigen länderübergreifenden Übertragungskapazitäten reichen dazu bei weitem nicht aus.

### Synergien zwischen Individualverkehr und Stromversorgung

Von besonderem Interesse sowohl für die Reduktion der Emissionen im Individualverkehr als auch für die Stabilisierung der Netze durch zusätzliche Speicher bei hohen Anteilen fluktuierender Stromerzeuger, sind Plug-in Hybridfahrzeuge und voll-elektrische Fahrzeuge. Voll-elektrische Fahrzeuge sind sehr gute Lösungen für Nutzer, die das Fahrzeug vor allem für tägliche Wege zur Arbeit, Schule, etc. und im Stadtverkehr einsetzen, für lange Strecken aber entweder auf öffentliche Verkehrsmittel oder Mietwagen zurückgreifen. Batterien, die eine Reichweite von 50 bis 100 km ermöglichen, sind verfügbar und dies bei entsprechenden Marktvolumina in den kommenden Jahren auch zu akzeptablen Kosten. Wenn Fahrzeuge aber wir heute auch für längere Strecken eingesetzt werden sollen oder die Nutzer zumindest auf diese Option nicht verzichten wollen, sind Plug-in Hybride eine interessante Alternative. Dabei wird eine Batterie mit einer Reichweite für 30 bis 70 km mit einem Zusatzantrieb kombiniert. Der Zusatzantrieb kann eine Brennstoffzelle oder auch ein Verbrennungsmotor in einer Serien- oder Parallelhybridkonfiguration sein. Die Batterie wird aus dem Netz geladen („Plug-in“) und bei großen Distanzen kann der Zusatzantrieb die Vortriebsenergie bereitstellen. Der Vorteil aus Sicht der Nutzer ist, dass solche Fahrzeuge keine Einschränkung der Mobilität gegenüber heutigen Konzepten bedeuten und daher eine gute Akzeptanz am Markt finden sollten. Für die nachfolgenden Betrachtungen ist es nicht von Bedeutung, ob der Zusatzantrieb eine Brennstoffzelle oder ein Verbrennungsmotor ist. Um den Verbrennungsmotor CO<sub>2</sub>-frei betreiben zu können, muss ein entsprechender Biotreibstoff der 2. Generation (BTL, „biomass to liquid“) eingesetzt werden. Ein systemimmanenter Vorteil von Plug-in Hybriden ist auch, dass das Fahrzeug jederzeit einsatzbereit ist. Ist die Batterie gerade nicht voll geladen und das Fahrzeug wird benötigt, wird entsprechend früher auf den Zusatzstromerzeuger umgestellt und die Reichweite ist nicht beschränkt.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird von einer Batterie mit 10 kWh nutzbaren Energieinhalt, was für eine rein elektrische Fahrdistanz für ein typisches Stadtfahrzeug von 50 bis 70 km ausreicht, und einem Ladegerät mit einer Leistung von 5 kW ausgegangen. Eine derartige Batterie wird in moderner Lithium-Ionen-Technologie etwa 100 kg wiegen und muss eine Vollzyklenlebensdauer von mindestens 3.000 Zyklen aufweisen. Ein Ladegerät von 5 kW Leistung kann im Prinzip nach heutigen Standards in allen Haushalten ans Netz angeschlossen werden. Das Ladegerät kann unidirektional oder bidirektional ausgelegt werden.

Statistisch gesehen wird ein Fahrzeug in Deutschland eine halbe Stunde pro Tag bewegt. Die Nachladung der Batterie dauert 2 bis 3 Stunden. Damit ergeben sich im statistischen Mittel mindestens 20 Stunden am Tag, an denen über die Nutzung der Batterie noch frei entschieden werden kann. Wird ein unidirektionales Ladegerät verwendet, kann durch ein Steuersignal des Netzbetreibers oder Stromversorgers die Ladung der Batterie gestartet werden, wenn der Strom günstig oder im Überfluss vorhanden ist (z.B. starke Windkrafteinpeisung). Dies ist in gewisser Weise analog zu den in den 1960er und 1970er Jahren eingeführten elektrischen Nachtspeicherheizungen, die auch durch Rundsteuersignale gezielt gestartet werden können. Bei der anzustrebenden Verwendung von bidirektionalen Netzteilen, können die Batterien sowohl ge- als auch entladen werden. Damit stehen die Batterien sowohl für positive als auch negative Regelenergie zur Verfügung.

Da das Fahren mit elektrischem Strom aus Gründen der CO<sub>2</sub>-Vermeidung aber auch aus ökonomischen Gründen sowieso notwendig wird, können in kurzer Zeit große Mengen von Plug-in Hybriden in den Markt kommen. Werden nur 4 Millionen PKW in der oben genannten Konfiguration ausgelegt, was bei einem PKW-Bestand in Deutschland von 46 Millionen Stück weniger als 10 % aller Fahrzeuge sind, dann ergibt sich bereits eine dezentral verteilte Speicherkapazität von 40 GWh mit 20 GW Anschlussleistung. Diese Speicher sind räumlich

proportional zu den Verbrauchsschwerpunkten verteilt und können durch geeignete Steuerung so eingesetzt werden, dass das Netz an jedem Punkt ideal unterstützt wird. Die genannte Speicherkapazität und -leistung entspricht mehr als der in Deutschland zur Verfügung stehenden Kapazität der Pumpspeicherkraftwerke (weniger als 5 GW für 8 Stunden). Würde man 40 Millionen Fahrzeuge in Deutschland derart ausstatten, könnte unter Annahme voller Batterien das ganze Land rund 8 Stunden aus den Fahrzeugbatterien versorgt werden.

Da es sich um eine sehr große Zahl kleiner und verteilter Speicher handelt, ist die Betrachtung einer Einzeleinheit nicht notwendig. Für die Planungen muss nur das statistische Kollektiv herangezogen werden. Wichtig ist aber, dass die Infrastruktur für einen Anschluss ans Netz möglichst flächendeckend an Parkplätzen, Garagen und Parkhäusern bereitgestellt wird.

Eine ausführlichere Darstellung zu alternativen Speichertechnologien für elektrische Energie findet sich z.B. in D.U. Sauer, „Optionen zur Speicherung elektrischer Energie“, Solarzeitalter 4/2006, Seiten 12-34.

## Zusammenfassung

Nimmt man den Klimaschutz als eine zentrale Herausforderung unserer und der kommenden Generationen ernst, ergeben sich mit einer Perspektive bis 2050 erhebliche Herausforderungen für die Umstellung auf eine weitgehend CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung. Jedem Menschen werden noch Emissionsrechte von einer Tonne CO<sub>2</sub> zustehen; selbstverständlich beinhaltet diese Menge anteilig auch alle industriellen, ökonomischen und landwirtschaftlichen Aktivitäten. Für die US-Amerikaner bedeutet dies eine Reduktion auf etwa 5 %, für Deutsche auf weniger als 10 % und für Schweizer auf etwa 15 % der heutigen Emissionen. In allen Fällen geht es also nicht um eine graduelle Änderung, sondern um einen grundlegenden Wandel in der Energieversorgung. Um dies zu erreichen, wer-

den als Energieträger vor allem Strom, Gas mit hohem Biogas oder Wasserstoffanteil, Wärme und flüssige Biotreibstoffe (BTL) zur Verfügung stehen. Verschiedene Technologien werden für die Bereitstellung von CO<sub>2</sub>-frei erzeugtem Strom genutzt werden können. Für die Betrachtung der Auswirkung auf die Endenergienutzung und die Energieverteilungsinfrastrukturen ist die Verteilung auf die Technologien nicht von Relevanz. Es wurde gezeigt, dass die notwendigen Strukturen durch eine evolutionäre Weiterentwicklung der heutigen Verteilinfrastrukturen erreicht werden können. Die notwendigen Verstärkungen der Infrastruktur können weitgehend im Rahmen der regulären Wartungs- und Erneuerungsarbeiten umgesetzt werden. Strom wird der wichtigste Endenergieträger in fast allen Anwendungsbereichen werden und der Gesamtverbrauch auch bei Nutzung der Sparpotentiale eher zu- als abnehmen.

Zukünftige Energieversorgungssysteme werden wesentlich stärker als heute aus einer Vielzahl

unterschiedlicher Technologien bestehen, die über intelligente Leitsysteme miteinander verknüpft sind. Dadurch können auch fluktuierende Stromerzeuger ins Netz eingebunden und ausgeregelt werden. Insbesondere im Bereich der Individualmobilität mit Fahrzeugen, die auf einer starken elektrischen Komponente basieren, entstehen große Energiespeicherkapazitäten bzw. ein sehr hohes Potential für steuerbare Lasten. Zusammen mit Blockheizkraftwerken mit Wärmespeichern lassen sich über intelligente Steuerung stabile Energieversorgungen durch virtuelle Kraftwerke mit positiver und negativer Regelleistung aufbauen.

*Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer, hat eine Juniorprofessur für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen und ist wissenschaftlicher Leiter der von EUROSOLAR und dem Weltrat für Erneuerbare Energien veranstalteten Konferenzserie „Speicherung Erneuerbarer Energien“ (International Renewable Energy Storage Conference (IRES)).*