

Stromversorgung in Deutschland (Zustand Anfang 2018)

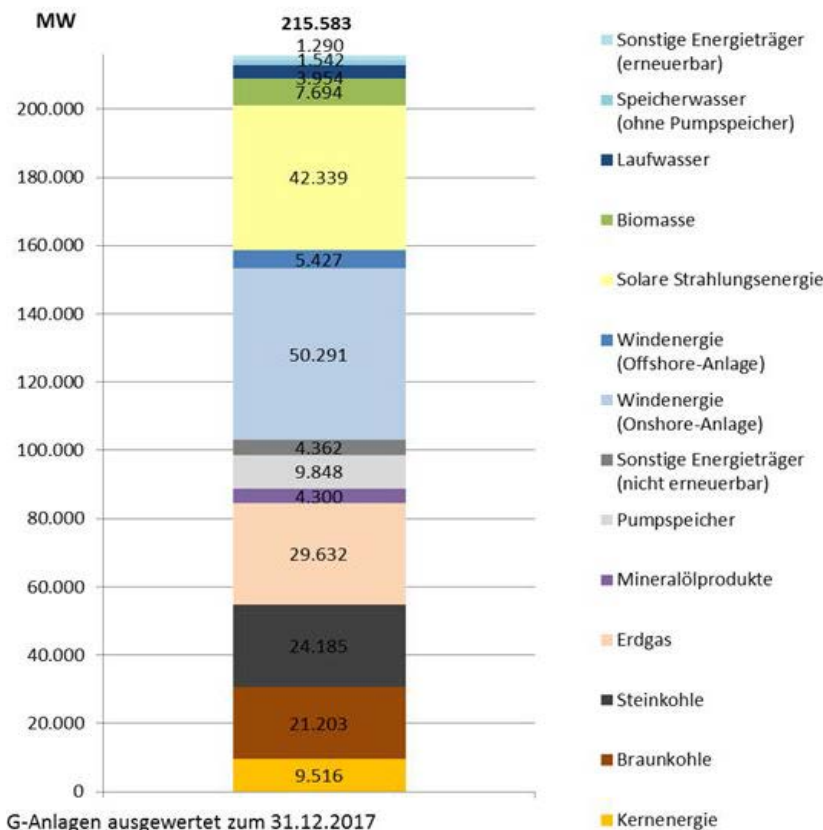
R.Schieder, Ertstadt

Der derzeitige Zustand der Stromversorgung Deutschlands gibt Anlaß, sich große Sorgen darüber zu machen, wie es damit in Zukunft weitergehen soll. Die heutige Planung, wenn man es denn so nennen will, der alternativen Versorgung ist nach meiner Meinung vollkommen unausgegoren, da in keiner Weise darüber nachgedacht wird, wie die Sache ökonomisch, technisch oder nachhaltig längerfristig funktionieren soll. Deshalb hier einige Gedanken zu dem Thema.

Überkapazitäten

Deutschland hat höhere Kapazitäten für Ökostrom als für die konventionelle Stromerzeugung, beide Systeme allein sind theoretisch also mehr als vollständig ausreichend für die gesamte Stromversorgung Deutschlands, allerdings bei Ökostrom nur dann, wenn Sonne und Wind gleichzeitig vollen Strom liefern. Da dies dauerhaft nie gegeben ist, muß permanent zwischen konventionellen und Ökostrom-Versorgern hin und her geschaltet werden. In der Summe führt dies zu enormen Überkapazitäten. In Deutschland haben wir einen durchschnittlichen jährlichen Brutto-Verbrauch von knapp 600 TWh, das entspricht einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von ca. 68,5 GW, allerdings liegt der Spitzenbedarf deutlich darüber. Zusätzliche Reservekapazitäten zur Deckung des Spitzenbedarfs und Wartung etc. erhöhen den derzeitigen Bestand konventioneller Kraftwerke auf etwa 103 GW (siehe Grafik unten: ‚Installierte Netto-Nennleistung in DEU‘ vom Monitoring Referat der Bundesnetzagentur). Inzwischen haben wir außerdem eine Ökostromkapazität von insgesamt etwa 112 GW, also deutlich mehr als konventionell. Wegen der insgesamt weit mehr als doppelten Kapazität ist die Stromversorgung naturgemäß sehr teuer im Unterhalt und äußerst kompliziert in der Handhabung!

Installierte Netto-Nennleistung in DEU



Je mehr Solar- bzw. Windstrom produziert wird, desto größer ist die Gefahr für einen Zusammenbruch des Stromnetzes, da die normalerweise recht schnellen Schwankungen des Ökostroms ohne genügend Speicherkapazität kaum zu planen und nur unter Schwierigkeiten durch konventionelle Kraftwerke auszugleichen sind. Hinzu kommt, daß es bisher nicht gelungen ist, zusätzliche Stromtrassen einzurichten, die den Transport von Windstrom von Nord nach Süd übernehmen können dank einiger eifriger Beschützer ihrer eigenen Privilegien. Das führt zu einem erhöhten Bedarf an konventionell erzeugten Strom trotz eventuell verfügbarem Ökostrom oder zu erheblichen Kostensteigerungen z.B. beim Bau von unterirdischen Stromtrassen. Erstaunlicherweise stagniert derzeit die deutsche CO₂-Bilanz trotz ständig wachsender Ökostromkapazität! Zum Teil ist dies der erzwungenen verminderten Effizienz der konventionellen Kraftwerke zu

verdanken, da der Ökostrom nach dem politischen Willen grundsätzlich Priorität hat, denn bei niedrigem Erzeugungsniveau bleibt deren Effizienz auf der Strecke. Natürlich spielt insgesamt auch die Abschaltung der Atomkraftwerke eine Rolle, da sie durch konventionelle Kraftwerke ersetzt werden müssen.

Stand der Ökostromgewinnung

Grundsätzlich bestimmen hauptsächlich drei Ökostromsysteme die derzeitige Situation in Deutschland, die Windenergie, der Solarstrom und Stromgewinnung aus Biomasse. Es lohnt sich, deren gegenwärtige Situation genauer unter die Lupe zu nehmen. Die Erzeugung von Strom durch regenerative Energien wird in Deutschland laut dem ‚Erneuerbare Energien Einspeisegesetz‘ (EEG) gefördert. Die Vergütungen werden von Zeit zu Zeit angepaßt und sinken deutlich. Jedoch sinken die derzeitigen Gesamtvergütungssummen wegen der großen Zahl von Altverträgen kaum oder steigen sogar noch. Entsprechend hoch ist und bleibt der Anteil der Ökostromumlage in unseren Stromrechnungen.

In der folgenden Betrachtung wird die Situation im Jahre 2017 nachvollzogen. Einigermaßen schwierig gestaltet sich die Analyse dadurch, daß man zwischen Bruttostromerzeugung und Stromverbrauch unterscheiden muß. Die Bruttostromerzeugung enthält die von den Kraftwerken selbst verbrauchte Strommenge und die beim Stromtransport entstehenden Verluste. Wesentlich ist aber noch der exportierte Strom, dessen Anteil seit der Energiewende kontinuierlich steigt, was auf die weiter wachsenden Überkapazitäten zurück zu führen ist. Was dann für den Verbrauch in Deutschland selbst zur Verfügung steht, liegt deutlich unter der erzeugten Menge. Unklarheiten entstehen schon allein dadurch, daß der Stromexport häufig allein den konventionellen Kraftwerken zugeordnet wird, was sicherlich nicht gerechtfertigt ist angesichts der Tatsache, daß Überflußstrom meistens durch die Spitzen des Ökostroms besonders von Wind und Sonne verursacht wird. Im Jahr 2017 lag der Netto-Stromverbrauch bei 530 TWh, während dies Brutto rund 600 TWh ausmachte. Insgesamt betrug die die Brutto-Stromerzeugung jedoch etwa 654 TWh. Die Differenz wurde häufig zu Schleuderpreisen, manchmal sogar zu negativen Preisen exportiert.

Nach EEG geförderte Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2017

(siehe ‚EEG in Zahlen‘, Bundesnetzagentur)

| | <i>Wind on-sh.</i> | <i>Wind off-sh.</i> | Wind gesamt | Sonne | Bio-Masse | Wasser | Summe/Mittel |
|--|--------------------|---------------------|--------------------|--------------|------------------|---------------|---------------------|
| Zahl von Anlagen: | 27.255 | 1.166 | 28.721 | 1.692.746 | 14.328 | 7.074 | 1.742.869 |
| Maximale Kapazität: GW | 50,291 | 5,427 | 55,718 | 42,339 | 7,568 | 1,586 | 107,211 |
| Erzeugte Jahres-Strommenge: TWh | 86,293 | 17,414 | 103,707 | 35,428 | 41,056 | 5,777 | 185,968 |
| Effizienz | 20,0% | 37,8% | 21,8% | 9,55% | 62,7% | 41,6% | 19,8% |
| Vergütung: Mrd. € | 5,720 | 2,770 | 8,490 | 10,236 | 6,772 | 0,440 | 25,938 |
| Durchschnittliche Vergütung: Ct/kWh | 6,6 | 15,9 | 8,2 | 28,9 | 16,5 | 7,6 | 13,95 |

Es ist etwas schwierig, die realen Anteile der verschiedenen Energieträger in Prozent zu berechnen, da die Zahl der nach EEG geförderten und der insgesamt vorhandenen Anlagen differiert. Die geförderten und die tatsächlichen Strommengen unterscheiden sich besonders bei der Wasserkraft, aber auch bei Solarenergie und Biomasse sind gewisse Unterschiede feststellbar. So findet man für den Anteil erneuerbarer Energien nach EEG an der Bruttostromerzeugung in Deutschland einen Prozentsatz von 28,7%, während unter Berücksichtigung aller Erzeuger etwa 33,1% herauskommen. Die auf den verschiedenen Webseiten (Bundeswirtschaftsministerium, Bundesnetzagentur, Fraunhofer Gesellschaft, Wikipedia) zu findenden Zahlen sind ziemlich uneinheitlich. Wichtig bleibt jedoch für uns Verbraucher, was laut EEG produziert und finanziert wird, da sich diese Zahlen bei uns auf der Stromrechnung in Form der Ökoumlage auswirken.

Die Situation im Jahre 2017 ist in obiger Tabelle dargestellt. Weitere Stromlieferanten wie Geothermie sind nicht aufgeführt, da sie nur geringfügig (insgesamt 0,9%) zur Ökostromproduktion beitragen. Zunächst einmal fällt auf, wie unterschiedlich die Effizienz der verschiedenen Methoden ist. Die höchste Effizienz wird von der Biostromgewinnung erreicht. Allerdings gibt es doch einige Einwände gegen dieses System. Man sollte nicht vergessen, daß die so genutzte landwirtschaftliche Fläche der Nahrungsmittelproduktion entzogen wird, was sicherlich angesichts der Entwicklung der Weltbevölkerung problematisch sein dürfte. Inzwischen kann man die Folgen überall in Deutschland beobachten, wo in großem Umfang Mais- und

Rapsfelder das Landschaftsbild prägen. Hinzu kommt, daß die Nachhaltigkeit der Biostromerzeugung umstritten ist, da der Einsatz von künstlichem Dünger, Pestiziden und Maschinen die ökologische Bilanz deutlich verschlechtert. Da jedoch die Vergütung für Strom aus Biomasse relativ hoch ist, bleiben solche Anlagen recht attraktiv für die Landwirte.

a.) Windenergie

Die insgesamt vergüteten kWh der Windkraftanlagen (WKA) entsprechen einer durchschnittlichen Leistung von 12,17 GW entsprechend einer Effizienz von 21,8%. (Die mittlere ‚Leistung‘ errechnet sich aus der erzeugten Jahresstrommenge in GWh dividiert durch die Zahl von Stunden eines Jahres. Die Effizienz errechnet sich dann aus dem Verhältnis von tatsächlich erzeugter mittlerer Leistung und der installierten Maximalleistung.) Die Vergütung pro kWh für on-shore Windstrom ist insgesamt die niedrigste von allen Ökostromanlagen, sie macht aber knapp 22% der anfallenden Kosten aus. Interessant ist ein Vergleich zwischen on- und off-shore Anlagen. Offensichtlich ist die Windbilanz auf dem Meer fast doppelt so hoch wie an Land. Ein weiterer Ausbau dieser Anlagen erscheint somit sinnvoller, allerdings sind die Kosten dort auch erheblich höher, wie man an der Vergütung auch ablesen kann.

Theoretisch könnten die nach EEG geförderten Windanlagen insgesamt 488 TWh pro Jahr liefern, wenn permanent ausreichend Wind wehen würde. Das entspräche einer Netto-Stromversorgung Deutschlands von über 80%. Das gilt effektiv aber leider nur zu etwa 22% der Zeit, es gibt eben nicht genügend Wind. Man könnte zwar den Eindruck haben, daß doch fast immer ein ‚Lüftchen‘ weht und die Windräder sich doch drehen, jedoch darf man dabei nicht vergessen, daß die tatsächliche Leistung einer Windkraftanlage von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit abhängt. Es muß schon kräftig wehen, damit volle Leistung erreicht wird. Halbe Windgeschwindigkeit führt zu einer Reduktion der Stromleistung auf magere 12,5% relativ! Das erklärt, warum auf See mit deutlich höheren Ausbeuten zu rechnen ist, während im Landesinneren der Betrieb einer Windanlage vergleichsweise weniger lohnend ist. Die Effizienz an Land hat sich zwar seit 2009 von 17% auf 20% gesteigert, ist aber trotz massiver Investitionen in wesentlich größere Anlagen mit inzwischen enormen Bauhöhen nicht gerade beeindruckend. Die Werte der Effizienz finden sich in den Zahlen der häufig genannten ‚Volllaststunden‘ wieder, also in den Stunden eines ganzen Tages (manchmal auch eines Jahres), während derer bei angenommener voller Leistung bei gleichem Gesamtergebnis Strom verfügbar wäre. Für den on-shore Strom sind das nicht mal 5 Stunden. Für die restlichen 19 Stunden müssen andere Versorger einspringen! Das zeigt, wie weit wir noch von einer wirklich tragfähigen Ökostromversorgung entfernt sind.

Insgesamt liegt der Anteil der Windkraft an der Bruttostromerzeugung Deutschlands bei knapp 16,1% (siehe Graphik unten), ist also angesichts der enormen Kapazität und der inzwischen exorbitanten Investitionen immer noch vergleichsweise bescheiden. Ein Abschalten von konventionellen Anlagen ist auch bei weiter forciertem Ausbau der Windenergie praktisch unmöglich, da diese ohne verfügbare Speicherkapazitäten weiterhin ständig in Betrieb bleiben müssen. Solange Speicher im nötigen Umfang nicht zur Verfügung stehen, und dafür sind die Perspektiven ziemlich dunkel, wird ein weiterer Ausbau der Windkraft nicht mehr wesentlich zur Erhöhung ihres Anteils bei der Deckung des Strombedarfs Deutschlands beitragen können, denn die dann häufigere Überschussproduktion wird für den momentanen tatsächlichen Bedarf nicht mehr nutzbar sein mit der Konsequenz, daß es zu immer häufigeren Abschaltungen von Windkraftanlagen kommen muß. Gegenwärtig hat das zwar laut EEG keinen negativen Effekt für die Windparkbetreiber, da auch ungenutzter Windstrom vergütet wird, trägt aber zu der oben erwähnten Kostenproblematik durch Überkapazität noch zusätzlich bei (Die Aufwendungen betragen immerhin etwa 550 Mio. Euro in 2017). Wir finanzieren nicht nur eine übermäßige Erzeugungskapazität, sondern zusätzlich auch einen immer weiter steigenden Überschuß, von dem ein Teil dann ins Ausland zu Schleuderpreisen verkauft wird.

b.) Solarenergie

Die in der Tabelle oben genannte erzeugte Solarstrommenge entspricht einer durchschnittlichen Leistung von 4,045 GW bei einer Effizienz von 9,55%. Gegenüber den Zahlen im Jahre 2009 mit 7,6% Effizienz hat sie sich relativ gesehen einigermaßen deutlich um etwa 25% verbessert dank einiger Fortschritte bei den Solarpaneelen, allerdings bleibt sie doch erheblich unter der der Windenergie. Die Effizienz der Solarstromerzeugung entspricht etwa 2,3 Volllaststunden, also einer Situation, bei der für durchschnittlich knapp 21,7 Stunden pro Tag kein Strom geliefert würde! Insofern kann der Solarstrom bestenfalls als Ergänzung dienen, besonders da, wo ein Stromanschluß per Kabel problematisch wäre. Gleichzeitig sind die Investitionskosten deutlich höher, was sich auch in der grundsätzlich höheren Vergütung niederschlägt, obwohl die Kosten der Solarpaneele inzwischen deutlich gesunken sind. Pro m² kann man in Deutschland mit den besten Solarzellen im Jahresmittel von einem Ertrag von knapp 12 W/m² ausgehen. Das ergibt einen Jahresertrag von nur etwa 13 €/m² bei dem Vergütungssatz des Jahres 2017 (12,3 Ct/kWh, Tendenz sinkend).

Die vorhandenen Solaranlagen könnten theoretisch insgesamt 371 TWh pro Jahr liefern, wenn permanent die Sonne mit maximaler Intensität scheinen würde. Das entspräche einer Versorgung Deutschlands von über 60%, ist aber effektiv leider nur zu etwa 10% der Zeit möglich. Tatsächlich liegt der Anteil des Solarstroms an der Bruttostromversorgung Deutschlands bei nur knapp 6,1%. Natürlich ist dies dem Umstand zu verdanken, daß die Sonne nachts nicht scheint und im Winter nur wenig Energie liefert. Ein Abschalten von konventionellen Anlagen ist deshalb auch bei weiter forciertem Ausbau des Solarstroms praktisch unmöglich. Da Solaranlagen im Vergleich zu Windanlagen auch erheblich teurer sind, ist ein weiterer Ausbau einigemaßen sinnlos! Das Ergebnis der Solaranlagen betrug nur ein Drittel der Windstromanlagen, allerdings waren die Ausgaben dafür mit insgesamt 10,236 Mrd. € dennoch höher als die für den Windstrom. Dementsprechend lag die Vergütung des Solarstroms mit 28.9 Cent/kWh im Durchschnitt weit über der aller anderen alternativen Stromquellen. Allerdings entstehen diese hohen Kosten durch die vielen Altverträge, bei denen z.B. für im Jahre 2004 errichtete Anlagen noch über 57 Ct/kWh vergütet werden. Selbst im Jahre 2011 lag der Satz noch bei dem jetzigen Durchschnittswert von obigen 29 Ct/kWh. Für Anlagen aus dem Jahr 2017 sind es dann nur noch 12,3 Ct/kWh. Da jedoch die Höhe der Vergütung auf dem Niveau des bei der Installation gültigen Wertes für eine Laufzeit von 20 Jahren garantiert ist, sind die zur Zeit entstehenden Kosten weitaus höher als man bei der derzeit gültigen Vergütung vermuten könnte.

c.) Biomasse

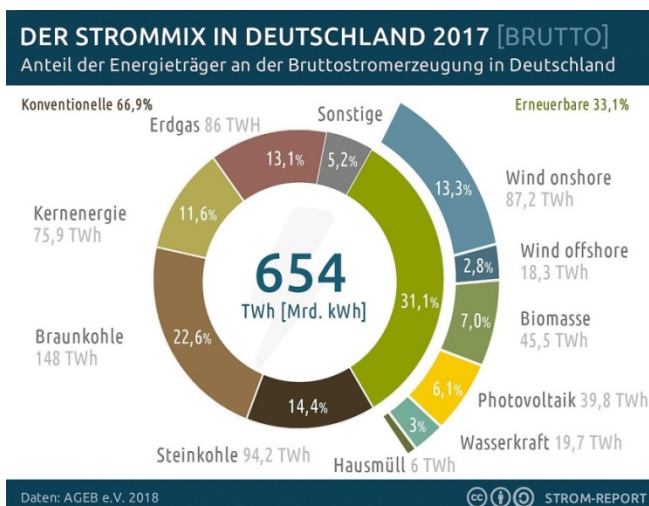
Es ist erstaunlich, wieviel Strom inzwischen aus Biomasse gewonnen wird, auch wenn es auffällig ist, daß überall Mais auf großen Flächen angebaut wird, der dann anschließend verstromt wird. Immerhin gab es 14.328 solcher Anlagen im Jahr 2017. Die installierte Leistung betrug 7.694 GW, während sich die gelieferte Strommenge auf 45.5 TWh belief. Das entspricht einer recht hohen Effizienz von 67,5%, was deutlich über der von Wind- und Solarstrom liegt. Insbesondere ist hier die Stromgewinnung nicht so direkt von den Launen von Wind und Sonne abhängig, man kann das System steuern und ist nicht auf aufwendige Stromspeicher angewiesen, die Biomasse ist bereits der Speicher. Allerdings ist unklar, wie der Anbau der verstromten Pflanzen in die Berechnung der Effizienz eingehen könnte.

d.) Sonstige (Wasserkraft, Geothermie, Deponie, Klär- und Grubengas)

Diese Beiträge sind gering (unter 3,9%, allein 3% entfallen auf die Wasserkraft.). Sie spielen insgesamt bei der Umsetzung der Energiewende kaum eine Rolle.

Die Gesamtsituation

Insgesamt haben Solar- und Windstrom zusammen eine Maximalkapazität von 859 TWh pro Jahr. Nimmt man noch Biogas und Wasserkraft hinzu, dann sind es insgesamt 974 TWh. Das ist über 150% der für Deutschland notwendigen Kapazität, wenn sie denn permanent zur Verfügung stehen würde. Tatsächlich aber liefern sie lediglich 33% der Brutto-Strommenge. Für die von diesen Anlagen zusammen erzeugten förderbaren Strommengen in Höhe von 186 TWh wurden nach EEG insgesamt 25,9 Mrd. Euro bezahlt. Das sind im Schnitt knapp 14 Cent/kWh! Um das zu finanzieren wurde eine Ökostromumlage in Höhe von 6,88 Cent/kWh + 19% Umsatzsteuer = 8.19 Cent/kWh erhoben. Das ist ein erheblicher Anteil (28,1%) des derzeitigen durchschnittlichen Brutto-Verbrauchspreises von insgesamt 29.16 Cent/kWh.



Ein besonderes Problem entsteht dadurch, daß manchmal Wind und Sonne beide gleichzeitig maximale Strommengen produzieren, wodurch ein enormes Überangebot entsteht. Da einmal erzeugter Strom nicht einfach verschwindet, wird häufig überschüssiger Strom zu negativen Preisen (!) an das Ausland ‚verschertelt‘, und das natürlich zu Lasten der deutschen Stromkunden. Unsere Nachbarländer wie z.B. Polen ergreifen inzwischen Maßnahmen, die verhindern sollen, daß deutscher Strom in deren Stromnetze ‚hineingedrückt‘ werden kann. Das bringt dort sonst deren Netzkontrolle durcheinander. Andererseits geschieht es durchaus häufig, daß fast kein Wind- und Solarstrom produziert wird. Dann müssen die konventionellen Kraftwerke die volle Stromversorgung übernehmen.

men, und das jederzeit zu unvorhersehbaren Zeiten. Inzwischen wird auch berichtet, daß es gelegentlich sogar zur Abschaltung der Stromversorgung von Fabriken mit hohem Strombedarf wie z.B. Aluminiumwerken kommt, wenn andere Maßnahmen bei Erzeugungsmangel aufgrund von plötzlich abflauendem Wind z.B. nicht mehr greifen. Das ist existenzbedrohend für diese Industriezweige. Bei guten Ökostromergebnissen andererseits laufen die konventionellen Kraftwerke bei stark verminderter Leistung, was sie in zunehmendem Maße unwirtschaftlich macht, da laut EEG Ökostrom Vorrang hat. Auch diese dabei entstehenden und eigentlich nicht gerade sinnvollen Kosten werden auf die Stromkunden abgewälzt. Insgesamt schlagen alle sogenannten ‚Systemdienstleistungen‘ zur Steuerung der sicheren Stromversorgung mit fast 2 Mrd. € in 2017 zu Buche! Ein komplettes Abschalten dieser Kraftwerke allerdings würde zu einer erhöhten Abhängigkeit von Importstrom führen, z.B. aus Frankreich (Atomstrom) oder aus Polen (Kohlestrom). Insgesamt entstünden so weitere Kosten, die wiederum von den Stromkunden getragen werden müßten. Außerdem wird die CO₂-Bilanz auch nicht gerade besser, wenn dafür in anderen Ländern Kohle verfeuert wird.

Das Stromverteilungsmanagement ist allein dadurch besonders erschwert, daß man die konventionellen Kraftwerke nicht einfach auf Null herunterfahren und dann bei Bedarf augenblicklich wieder hochfahren kann. Sie müssen immer bei einer gewissen Mindestleistung laufen, damit sie auch einigermaßen schnell wieder hochgefahren werden können. (Bei Kohlekraftwerken ist das sicherlich ohne weiteres einsichtig.) Es bleibt jedoch essentiell trotz des extrem schwankenden Angebots von Wind- und Solarstrom, aber auch angesichts des stark fluktuierenden Verbrauchs, daß die Stromerzeugung jederzeit genau der Nachfrage entspricht. Bei zu niedriger Stromerzeugung spüren wir das alle bei Stromausfällen, aber auch bei zu hoher Stromerzeugung gibt es Probleme, denn wohin mit dem Überschuß? Auch das kann zu einem Zusammenbruch des Stromnetzes führen. Insgesamt riskieren wir also, mit häufigeren Stromausfällen leben zu müssen mit allen negativen Konsequenzen für unsere praktisch vollständig vom Strom abhängige Zivilisation.

Eine schnelle Regulierung der Stromerzeugung ist unbedingt notwendig und bei Windkraftanlagen und Solaranlagen auch durchaus möglich. Allerdings ist das bei Solaranlagen nicht so ganz trivial, da z.B. die Feuerwehr Probleme bekommt, wenn sie beim Löschen eines Brandes durch entstehende Überspannung heftigen Stromschlägen ausgesetzt sein könnte, denn die Solarpaneele erzeugen weiterhin hohe Spannungen solange die Sonne scheint, auch wenn sie vom Netz getrennt werden. Die schnelle Regulierung des Wind- und Solarstroms durch eventuelle Abschaltung einzelner oder auch aller Anlagen ist praktisch das einzige Mittel, um schnelle Öko-Produktionsspitzen glätten zu können. Das wird häufig von den Ökostrom-Enthusiasten kritisiert, ist aber unvermeidlich. Ein gewisses Potential für schnelle Reaktion haben die häufig erwähnten Gaskraftwerke, allerdings muß man sowohl die zusätzlichen Kosten als auch die Versorgungsabhängigkeit vom Gas z.B. aus Rußland berücksichtigen.

Speicher?

In Konsequenz leisten wir uns in Deutschland derzeit über 200% der notwendigen Stromerzeugungskapazität. Bei einem weiteren Ausbau von Ökostrom wird die Überkapazität zunehmen, denn es erlaubt praktisch kaum eine Abschaltung von konventionellen Kraftwerken. Die Frage, wie man mit dem bereits heute gelegentlich überschüssigen Strom umgehen soll, bleibt da noch offen. Manchmal hört man von Studien, die beweisen sollen, daß Deutschland komplett auf Ökostrom umsteigen könnte. Man kann sicherlich die Ökostromkapazität so weit erhöhen, daß auch bei Wind- und Sonnenschein-schwachen Zeiten meistens noch genügend Leistung vorhanden ist, um den laufenden Bedarf zu decken. Allerdings bedeutet das, daß grundsätzlich ein Überangebot besteht, das zumeist entsprechend abgeregelt werden muß. Denkt man dieses Szenario ein wenig weiter, dann bedeutet dies, daß die Zahl von Windanlagen mindestens um einen Faktor 10 oder mehr erhöht werden muß, die dann allerdings meistens gar keinen Strom liefern dürfen. Die heute gültige Vergütung von nicht abgenommenem Strom wird man dann wohl kaum noch aufrecht erhalten werden können, würde doch der zu vergütende, aber gar nicht erzeugte Strom die Kosten explodieren lassen.

Ein gewisser Bedarf für Speicherkapazität bleibt dann aber immer noch übrig. Geht man davon aus, daß man Speicher für den Strombedarf nur eines Tages bereitstellen wollte, dann bleibt die Frage, was für Speicher sollten das sein? Es wird zwar von Pumpspeicherkraftwerken geredet, die z.B. in Norwegen eingerichtet werden könnten oder auch in den Alpen. Aber wer sollte durchsetzen können, daß die dort lebende Bevölkerung den zahlreichen erforderlichen Stauseen auch ohne Murren weicht? Gegenwärtig haben wir in Deutschland 25 solcher Kraftwerke mit nennenswerten Kapazitäten, die zusammen insgesamt 37,7 GWh liefern können. Gemessen an einem durchschnittlichen Tagesbedarf von etwa 1650 GWh ist das nur ein Tropfen auf den heißen Stein. Hinzu kommt, daß die geographischen Gegebenheiten in Deutschland oder sogar in Europa nun mal nicht so sind, daß für den vorhandenen Bedarf auch nur annähernd genügend geeignetes Terrain verfügbar ist. Immerhin müßten zur vollen Deckung nur eines Tagesbedarfs an

die 1000 Pumpspeicherkraftwerke mit entsprechenden Stauseen eingerichtet werden. Man muß dabei bedenken, daß der durchschnittliche Zeitraum, über den ein Pumpspeicherkraftwerk Strom liefern kann, meistens bei nur wenigen Stunden liegt. Längere Windstille bleibt also immer noch ein Problem.

Manchem erscheint es naheliegend, Batterien – oder genauer Akkumulatoren – einzusetzen, aber das ist auch eine Illusion, denn Akkus besitzen keine akzeptable Kapazität! Die derzeit erhältlichen Akkumulatoren speichern etwa 0,1 kWh Energie pro kg Eigengewicht, man könnte also gerade mal für 2 Stunden mit einem kleineren Gerät fernsehen. Viel bessere Leistungen kann man auch in Zukunft aus grundsätzlichen physikalischen Gründen nicht erwarten - vielleicht ist da noch ein Faktor zwei Verbesserung langfristig drin, aber viel mehr wohl nicht. Man stelle sich einmal vor, man wollte den mittleren Strombedarf in Deutschland für nur einen Tag in solchen Batterien speichern. Diese hätten dann ein Gewicht von sage und schreibe 16,8 Millionen Tonnen! Das ist mehr als das Fünfzigfache des Gewichts des Kölner Doms! Außerdem müßten dafür bei den gegenwärtigen Preisen über 400 Mrd. Euro aufgebracht werden (derzeitiger Preis: ca. 250 Euro pro kWh)! Woher die dafür benötigten knappen Rohstoffe, insbesondere Lithium und Kobalt, und natürlich auch die notwendigen finanziellen Mittel kommen sollen, ist dabei gänzlich unklar. Zumindest sind weltweit keine Lagerstätten mit abbauwürdigen Konzentrationen dieser Rohstoffe bekannt, die den entstehenden weltweiten Bedarf längerfristig decken könnten.

Was bleibt also? Es gibt diverse teilweise recht abstruse Vorschläge für Stromspeicher. Der interessanteste und eventuell auch realistischste ist dabei die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger. Wenn man alle bekannten Zahlen zu Rate zieht, dann benötigt man für die Herstellung von einem kg Wasserstoffgas eine Strommenge von ca. 52 kWh, kostet also mehr als 4 Euro bei der gegenwärtigen mittleren Vergütung von Windstrom. (Man sollte hier nicht mit dem Preis des Kohlestroms argumentieren, denn dort wäre die CO₂-Bilanz katastrophal.) Allerdings muß man hier noch eventuelle Kosten für Transport, Lagerung und Verteilung hinzurechnen. Der Wirkungsgrad bei der Herstellung Wasserstoff liegt höchstens bei etwa 65%, wenn man die aufgewendete Energie mit dem Heizwert des Gases in Höhe von 33,3 kWh/kg vergleicht. Das wäre noch akzeptabel, wenn dieses wieder effektiv in Strom umgewandelt werden könnte. Der Umweg über Verbrennung zum Antrieb von Turbinen mit angeschlossenen Dynamos scheidet wohl aus, ist er doch relativ ineffektiv und dürfte problematisch sein wegen sehr hoher Verbrennungstemperaturen mit entsprechender Stickoxid-Erzeugung. Der Weg über eine Brennstoffzelle ist da wahrscheinlich sinnvoller allein wegen des geringeren Gewichts im Vergleich zu Batterien, allerdings fehlt es noch an genügend technischer Entwicklung, obwohl solche Zellen z.B. in U-Booten oder in der Weltraumfahrt bereits erfolgreich eingesetzt werden. Für PKW sind sie immerhin schon im Angebot einiger asiatischer Hersteller. Zu klären bleibt, wie es mit den Kosten, den verfügbaren Rohstoffen etc. aussieht. Eine Schlußfolgerung bleibt in jedem Fall: Der Ökostrom muß ganz erheblich preiswerter werden, um alle zusätzlichen Kosten aufzufangen. Auch wenn sich abzeichnet, daß die Vergütungen in den kommenden Jahren sich deutlich verringern werden, müssen da noch erhebliche zusätzliche Veränderungen wirksam werden.

Ein Beispiel

Betrachten wir einmal die Situation beim Elektroauto, denn dort wird die Dimension des Problems besonders sichtbar: Ein kg Benzin besitzt einen Energieinhalt von etwa 11,5 kWh/kg, pro Liter entspricht das etwa 9,3 kWh/l. Das ist über hundertmal höher als der der besten Lithium-Ionen-Batterien. Um ein Auto mit Elektro-Antrieb in seiner Reichweite mit einem Benziner mit einem Tank von 50 l Inhalt vergleichbar zu machen, braucht man Batterien von weit über einer Tonne Eigengewicht! Das ist schon allein wegen des hohen Gewichts nicht mehr sinnvoll, da bekanntermaßen schwere Autos besonders im Stadtverkehr auch erheblich mehr Energie verbrauchen. Die Gewichtsfrage beschränkt Elektroautos somit prinzipiell auf den Kurzstreckenverkehr, wenn man auf niedriges Gewicht achtet. Aber, woher kommt der Strom für diese Autos? Siehe oben! Natürlich bleibt die Frage nach den notwendigen Rohstoffen ebenfalls ein Thema.

Gelegentlich wird auch die Wasserstofftechnologie unter Einsatz von Brennstoffzellen diskutiert. Als Benzinersatz ist Wasserstoff durchaus attraktiv, auch wenn es schwierig erscheint, damit umzugehen. Immerhin hat er pro kg den dreifachen Energieinhalt im Vergleich zu Benzin. Eine zu 1 kg Wasserstoff äquivalente Menge Diesel-Kraftstoff mit gleichem Energieinhalt wäre etwa 3,0 l und kostet gegenwärtig etwa 1,40 Euro vor Steuern, also knapp ein Drittel des Wasserstoff-Preises. Insofern ist die Wasserstofftechnologie derzeit noch nicht konkurrenzfähig, das wird aber allein durch die Kosten des Ökostroms bestimmt. Aber bei der Anwendung für den Elektroantrieb sähe es deutlich besser aus obwohl die Effizienz bei der Erzeugung von Strom in der Brennstoffzelle lediglich bei 60% liegt. Jedoch entfallen die Verluste bei einer Verbrennung im Motor. Allerdings muß man berücksichtigen, daß das Gefahren-Potential bei Wasserstoff wegen Explosionsgefahr außerordentlich hoch ist. Man erinnere sich nur an die Explosionen in Tschernobyl oder Fukushima, wo der explodierende Wasserstoff die eigentliche Ursache für die katastrophalen Folgen der Reaktorunfälle war! Uran oder Plutonium ist da nicht explodiert!

Grundsätzlich könnte der Wasserstoff jedoch eine Lösung des Mobilitätsproblems der Zukunft sein. Die Brennstoffzelle, ist nach meiner Einschätzung die einzig sinnvolle Option für die Mobilität der Zukunft, allerdings muß man wohl noch verstärkt über die Sicherheitsaspekte der Wasserstofftechnologie nachdenken. Immerhin lassen sich dabei die Probleme der Reichweite als auch des Zeitaufwands beim Tanken befriedigend lösen. Die Kostenfrage bleibt natürlich ein Thema. Auch ist der Verbrauch von seltenen Materialien wie Platin u.ä. als Katalysator durchaus ein wichtiger Punkt. Derzeit muß die Schlußfolgerung aber lauten, daß vorläufig nur chemische Energie, wie in Benzin oder Gas verfügbar, die einzige tragbare Lösung für den mobilen Energiebedarf ist, zumindest im Langstreckenbereich. Insgesamt wird aber in Zukunft Autofahren auf jeden Fall viel teurer werden müssen, nachdem ein dauerhaftes ‚weiter so‘ sicherlich kaum in Frage kommt.

Wie könnte es weiter gehen?

Die wichtigste Frage bleibt also: Wie könnte denn eine dauerhafte und zuverlässige Energieversorgung insgesamt bei Strom oder auch Wärme in Zukunft aussehen? Beim jetzigen Stand der Technik gibt es überhaupt noch keine realistische Lösung des Problems. Im Augenblick verschwenden wir die vorhandenen Rohstoffe und reichern damit gleichzeitig den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre an. Ob dies wesentlich zur Klimaerwärmung beiträgt oder nicht, sei dahingestellt, aber eins ist klar, diese Rohstoffe sind endlich und unwiederbringlich verloren. Deshalb ist es zwingend, daß wir mit höchster Priorität an allen denkbaren Alternativen arbeiten. Das einzige Konzept für eine umfassende Energieversorgung in Zukunft, das im Augenblick erfolversprechend und wohl auch realisierbar erscheint, ist die Kernfusion. Die benötigten Rohstoffe sind in dafür ausreichenden Mengen vorhanden - Lithium und Deuterium, falls Lithium nicht anderweitig für Batterien verschwendet wird, während Deuterium im Meer allerdings beliebig vorhanden ist. Das Lithium Isotop ${}^6\text{Li}$ liefert zunächst einmal das für die Fusion benötigte Tritium, das dann mit Deuterium zu einem Helium Atom fusioniert und ein schnelles Neutron dabei hinterläßt. Mit einem 1 kg ${}^6\text{Li}$ können etwa 30 GWh Energie erzeugt werden, während in einer Batterie 1 kg Lithium lediglich für vielleicht 10 kWh gut ist, und setzt man 1000 mögliche Ladezyklen voraus, dann werden es mal gerade 10 MWh, also nur 0,033%. Effektives Recycling wäre hier zumindest zwingend!

Leider ist in der Vergangenheit lediglich die Bombe auf der Basis der Wasserstoff-Fusion realisiert worden, ganz ähnlich wie es mit der Kernspaltungsbombe während des 2-ten Weltkrieges geschah. Immerhin wird an der Technologie in einem internationalen Forschungsverbund gearbeitet. Das Projekt ‚ITER‘ (International Thermonuclear Experimental Reactor) ist derzeit das größte Forschungsprojekt auf diesem Gebiet. Es wird als gemeinsames Projekt von sieben gleichberechtigten Partnern - Europäische Atomgemeinschaft, Japan, Rußland, Volksrepublik China, Südkorea, Indien und USA - entwickelt, in Cadarache in Südfrankreich gebaut und irgendwann einmal hoffentlich auch betrieben. Man hofft, im Jahre 2026 erstmalig die kontrollierte Fusion unter dauerhafter Gewinnung von Energie nachweisen zu können. Aber das ist erst der Anfang, denn ein im großen Stil Strom produzierender Fusionsreaktor ist dann immer noch nicht fertig. Das soll dann der nächste Schritt werden. Die Bundesregierung fördert die Fusionsentwicklung hauptsächlich über den EU-Haushalt mit derzeit unter 250 Mio. Euro im Jahr, soweit feststellbar. Dies ist im Vergleich zum 100-fachen Volumen der Vergütungen des Ökostroms angesichts der elementaren Bedeutung dieser Forschung geradezu beschämend. Wenn man bedenkt, daß diese Forschung spätestens ab dem Beginn des 22-ten Jahrhunderts zu praktikablen Ergebnissen führen muß, dann fragt man sich, ob in den politischen Gremien überhaupt eine Vorstellung davon existiert, mit welchen Prioritäten die Zukunft der Energieversorgung und damit die Existenz und der Fortbestand unserer jetzigen Zivilisation sichergestellt werden soll. Kohleverstromung oder Kernspaltung stellen ohnehin nur eine vorübergehende Überbrückung dar, längerfristig ist die Entwicklung von anderen Lösungen ohnehin zwingend.

Meine Schlußfolgerung lautet hier insgesamt, daß die Kernfusion und die Brennstoffzelle die wirklichen Optionen für eine machbare Zukunft der Energieversorgung darstellen, auch wenn es nicht gerade billig wird. Ich hoffe, dies wird auch möglichst bald in der Öffentlichkeit und besonders in der Politik realisiert werden. Dabei dürfte natürlich die Windenergie weiterhin eine gewichtige Rolle spielen, aber das Speicherproblem muß noch irgendwie gelöst werden. Ob das dann zu vertretbaren Kosten möglich sein wird, ist vorläufig noch eine Unbekannte.

Anhang: Das Auto

Derzeit haben wir es in der Bundesrepublik mit etwa 46,5 Mio. PKW (Stand Anfang 2018) zu tun. Stellt man alle diese PKW in einer Reihe hintereinander auf, dann ergibt dies etwa eine Strecke von über 230.000 km, also eine Autoschlange, die fast sechsmal um die Erde herumreicht! (Das überall spürbare Parkplatzproblem und die ständigen Verkehrsstaus sind demzufolge kaum verwunderlich!) Diese PKW erbringen laut Kraftfahrtbundesamt alle zusammen eine Jahresfahrleistung von rund 630 Mrd. km. (Das ist das unglaubliche 1,64 Mio.-fache des mittleren Mondabstands von der Erde!) Sie entsprechen einer Jahresfahrleistung von etwas mehr als 13.500 km pro PKW und Jahr. Rechnet man für ein Elektroauto einen realistischen Strombedarf von etwa 20 kWh pro 100 km, dann würde die insgesamt für alle PKW benötigte zusätzliche Strommenge etwa 126 TWh/Jahr betragen. (Natürlich sollte man dabei auf SUVs und aufgeblasene Kraftpakete als Auto verzichten.) Das ist erstaunlich wenig und erscheint auch praktikabel, solange nur der fluktuierende Ökostrom zur Anwendung kommt. Immerhin hat der Elektromotor die rund dreifache Effizienz beim Energieverbrauch im Vergleich zum Benzinmotor. Es verlangt eine zusätzliche Stromerzeugung von etwas mehr als die derzeit von WKAs in Deutschland erzeugte Strommenge. Rechnet man noch die unvermeidlichen Stromverluste bei Übertragung und Ladung der Akkumulatoren und andere Verluste wie für die Heizung im Auto während des Winters hinzu, dann erhöht sich diese Zahl auf vielleicht 150%. Das würde den derzeitigen Bestand an Windrädern praktisch verdreifachen, wenn man noch zusätzlichen Bedarf für den LKW, Bus- und Zugverkehr oder Schiffstransport hinzurechnet.

Natürlich sollte man nicht vergessen, daß bei der heute überwiegend konventionellen Stromerzeugung die Aufladung der Batterien zu praktisch identischem Ausstoß von CO₂ im Kraftwerk führt, wie es der Automotor bei der Verbrennung von Benzin verursacht. Hier endlich wären jedoch Wind- und Solarenergie wirklich hilfreich, da man nicht unbedingt Wind oder Sonne braucht, während man Auto fährt, da Batterien jederzeit geladen werden können. Das Elektroauto könnte also tatsächlich eine Option für die Zukunft sein, allerdings mit der oben genannten Einschränkung der Reichweite und der Rohstoff- und Kostenproblematik bei der Herstellung der Akkumulatoren. Allerdings bleibt ein gewichtiges Hemmnis die lange Ladezeit von Batterien. Damit die Fahrzeuge jederzeit fahrbereit sind, müßten zu jedem Fahrzeug mindestens zwei Batteriesätze gehören, damit der eine geladen werden kann, während der andere in Gebrauch ist. Damit wäre auch ein schneller Austausch mit zuvor geladenen Akkus möglich. Geht man davon aus, daß nur geladen wird, wenn Wind- oder Solarstrom angeboten wird, dann würde der stark fluktuierende Ökostrom direkt genutzt ohne daß die übrigen Kraftwerke zum Ausgleich der sonst unvermeidlichen Schwankungen gezwungen sind. Folglich käme es dadurch zu einer wirklichen Verbesserung der Effizienz. Aber es bleibt nach wie vor unklar, wie die Kosten zur Herstellung der enormen Zahl von Akkumulatoren aufgebracht werden können. Beim gegenwärtigen Preis von ca. 150 €/kWh macht das etwa 12.000 Euro pro PKW für jeweils 2 Batteriesätze bei einer angenommenen Reichweite von 200 km. Zwar sind Elektromotoren deutlich billiger als Verbrennungsmotoren, aber es bleibt bei einer erheblichen Kostensteigerung. Sie ließe sich nur dadurch kompensieren, daß der Ökostrom praktisch umsonst zu haben wäre, was derzeit aber wenig wahrscheinlich ist.

Für die Reichweite einer Batterieladung von 200 km im Normalbetrieb hätte die Batterie ein Gewicht von von etwa 400 kg. Diese müßte bei einer angenommenen Jahreskilometerleistung von 13.500 km etwa alle 5½ Tage neu geladen werden. Wenn jeder PKW zwei solcher Batterien besäße, dann wäre allein das Gesamtgewicht aller Batterien etwa 37 Mio. Tonnen. Für 1 kWh Akkumulator-Kapazität wird so um die 100 g reines Lithium benötigt. Die Vorräte an abbauwürdigem Lithium liegen weltweit bei etwa 35 Mio. Tonnen. Um alle PKW nur in Deutschland mit einem doppelten Batteriesatz obiger Kapazität auszustatten, werden also bereits mehr als 1% des Weltvorrats an Lithium benötigt. Elektrifiziert man den derzeitigen weltweiten Bestand an PKW von etwa 1,6 Mrd. unter den genannten Voraussetzungen, dann ist bereits ein Drittel des verfügbaren Lithiums verbraucht. Dabei haben wir aber noch keinen einzigen Speicher für die Stromversorgung installiert. Dazu kommen noch die unzähligen kleinen Akkus in Handys, Fotoapparaten, Laptops, Tablets etc. Praktisch genauso ist die Situation beim Kobalt, einem weiteren wichtigen Material für diese Akkus. Auch wenn man konsequentes Recycling in Betracht zieht, eine dauerhafte Lösung für die Mobilität ist der Lithium-Ionen-Akkumulator auf keinen Fall. Es bleibt auch noch das Problem der Verfügbarkeit von seltenen Erden, die für die Herstellung von effizienten Elektromotoren (und leider auch von Generatoren in den Windkraftanlagen) benötigt werden. Falls diese knapp werden, ist es vorbei mit dem äußerst effizienten Elektromotor. Auch das muß noch sorgfältig in die Kalkulation einbezogen werden.

Die Alternative zu Batterien, die Brennstoffzelle, verdient durchaus ebenfalls eine nähere Betrachtung. Der offensichtlich schleppende Absatz von Batterie-Autos hängt sicherlich einmal mit dem relativ hohen Preis solcher Autos, der Reichweitenproblematik, aber ganz besonders auch mit der erzwungenen überlangen ‚Kaffee-Pause‘ beim Nachladen zusammen. So wie es derzeit aussieht, wäre möglicherweise die Einführung der Brennstoffzelle ein besserer Vorschlag, sowohl für den Verkehr als auch für die Sicherstellung

einer kontinuierlichen Stromversorgung. Immerhin kann mit Strom erzeugter Wasserstoff gespeichert und in vielfacher Weise, also auch zur Stromerzeugung anschließend genutzt werden. Auch wenn die als Gegenargument häufig zitierte mangelnde Effizienz dabei sicherlich zutrifft, dann ist es doch nur entscheidend, welche Kosten am Ende für den automobilen Verbraucher entstehen. Die Erzeugungskosten für Windstrom liegen heute schon teilweise bei unter 4 Cent/kWh, so daß bei einer durchaus realisierbaren Gesamteffizienz von 40% über den Umweg einer Brennstoffzelle und bei einem angenommenen Verbrauch von 20 kWh/100 km die Erzeugungskosten bei etwa 2 Euro/100 km liegen würden. Interessanterweise liegen die derzeitigen Kosten bei Nutzung eines Dieselfahrzeuges mit einem relativ günstigen Verbrauch von 6 l/100 km vor Steuern bei etwa 2,80 Euro, sind also durchaus vergleichbar. (Erdölförderung und anschließende Herstellung von Kraftstoff sind auch nicht gerade billig!) Dabei kann man durchaus erwarten, daß die Kosten für Windstrom sich noch weiter absenken dürften. Hinzu kämen natürlich noch Kosten für Lagerung und Verteilung von Wasserstoff. Insgesamt ist das zwar weniger effizient als bei einer Nutzung des Stroms über Batterien, aber bestimmt nicht teurer als heute beim Verbrennen von Kraftstoff im Automotor. Der Gewinn für uns Verbraucher läge in der verfügbaren Reichweite des Autos, die der eines PKW mit Verbrennungsmotor ebenbürtig ist, aber ganz besonders in dem vernachlässigbaren Zeitaufwand beim Betanken eines Fahrzeugs. Selbstverständlich sind die Kosten für die Herstellung von effizienten Brennstoffzellen, aber ganz besonders für ein flächendeckendes Wasserstoff-Tankstellennetz noch zu bedenken, aber dies sind Kosten, die langfristig bei entsprechender Nutzung und Förderung insgesamt gar nicht so sehr ins Gewicht fallen dürften. Man muß es nur wollen!