

Klaus-Wilhelm Köln



# Einfach Strom

am besten von der Sonne

## Einfach Strom - am besten von der Sonne

**In zwei Sätzen:** Im Zeitalter von Sonne und Wind müssen wir die bisherige Energieversorgung auf den Kopf stellen, damit alles sicher funktioniert. Der Verbrauch sollte geregelt werden, nicht die Kraftwerke.

**Genre:** Sachbuch, das für interessierte Laien verständlich sein soll, aber auch Fachleute zu einer Diskussion herausfordern will.

**Zielgruppe:** Alle, die heute schon eine Ahnung haben wollen, was an Veränderungen der Energielandschaft auf uns zukommt und die bei Entscheidungen nicht nur Fachleuten vertrauen wollen, denen sie inhaltlich kaum folgen können.

### Worum geht es?

Die erneuerbaren Energien wachsen schnell und werden billiger als die anderen Energietechniken. Das wird unsere Zukunft prägen, und wir sollten sie gerecht und sicher gestalten. Das Stromnetz ist schon ein Netz, vieles was daran angeschlossen ist, muss nicht zusätzlich vernetzt werden. Alle angeschlossenen Geräte können dazu beitragen, es stabil zu halten. Dann ist es flexibel genug für erneuerbare Energien.

Energie aus Sonne und Wind sind nicht mit problematischen Emissionen verbunden und können die herkömmliche Stromerzeugung ersetzen, ohne das Klima immer weiter aufzuheizen und die Umwelt zu sehr zu belasten. Weil sie immer wieder neu zur Verfügung stehen, gibt es auch auf die Dauer genug davon. Zudem wird diese Energiebereitstellung immer billiger, sogar billiger als Strom aus Kohle und Kernkraft. Sie wird sich daher auch dort durchsetzen, wo ökologische Gründe nicht im Vordergrund stehen. Es wird viel von „Digitalisierung“ gesprochen, also davon, diese neuen Energiequellen und sogar unsere Haushaltsgeräte zu „vernetzen“ um sie effizienter steuern und an die Stromerzeugung anpassen zu können. Dies ist zum großen Teil mit hohem Aufwand verbunden und mit großen Risiken. Es ist aber oft nicht notwendig. Alles, was am Stromnetz angeschlossen ist, ist schon vernetzt, und zwar mit dem Stromnetz selbst. Das klingt vielleicht banal, aber tatsächlich könnten alle am Stromnetz betriebenen Geräte auf einfache Weise dazu beitragen, dass die Versorgung immer stabiler und sicherer wird, und das automatisch, aber ohne digitale Fernsteuerung. Dann wird das Stromnetz flexibel genug, sogar für eine vollständige Versorgung durch erneuerbare Energien.

**Inhalt:**

Es wird erklärt, „wie Strom funktioniert“ und warum wir Wechselstrom haben, warum die Stabilität im Netz wichtig ist und wie sie bisher erreicht wurde. Die Struktur des jetzigen Strommarkts ist ein Grund dafür, dass der private Kunde einen immer höheren Preis bezahlen muss, obwohl Energie aus Wind und Sonne den Strom billiger machen. Diese Tendenz birgt ein hohes Risiko für die Netzbetreiber, wenn Kunden sich in Zukunft mit ihrer Solaranlage und einer Batterie selbst versorgen und vom Netz abmelden. Sogar der Zusammenhalt unserer Gesellschaft könnte durch einen solchen Trend gefährdet werden.

Ein kurzer Überblick über die Geschichte der erneuerbaren Energien wird gegeben. Werden wir in Zukunft 100% erneuerbare Energie haben oder sogar noch mehr? Und welche Risiken sind zu erwarten, wenn wir uns auf die erneuerbaren Energien verlassen?

Es wird ein Konzept vorgestellt, nach dem das Netz nicht durch Fernsteuerung, sondern dezentral geregelt wird. Dabei können fast alle angeschlossenen Geräte und Anlagen beteiligt werden, vor allem aber die kleinen Batteriespeicher der Solaranlagen und die Antriebsbatterien der Elektroautos.

Es geht auch um Hindernisse und Umwege, die am Ende dann aber doch zum Ziel führen.

***Im Zeitalter von Sonne und Wind müssen wir die bisherige Energieversorgung auf den Kopf stellen, damit alles sicher funktioniert. Der Verbrauch sollte geregelt werden, nicht die Kraftwerke.***



### **Zum Autor**

Klaus-Wilhelm Köln wurde 1954 geboren und hat in Westberlin Nachrichtentechnik und Soziologie studiert. Die 1978 gegründete Umweltfreundliche Energieanlagen GmbH war damals wichtiger als der Abschluss eines Studiums. Bei der UfE wurden zunächst Sonnenkollektoren von Hand zusammengelötet und später an den ersten netzgekoppelten Solaranlagen gearbeitet. Die Wechselrichter dafür wurden selbst entwickelt. Später spezialisierte sich ein Teil des Unternehmens auf Sicherheitsaspekte bei der Netzkopplung von dezentralen Energieanlagen.

Ein Thema hat sich über Jahrzehnte gehalten – die Frage, wie eine Zukunft mit erneuerbaren Energien am besten aussehen könnte.

Klaus Köln lebt heute in Lübeck.

## Inhalt

|   |     |
|---|-----|
| Vorwort.....  | 6   |
| Wie funktioniert Strom? .....   | 11  |
| Das Stromnetz .....   | 14  |
| Eine kurze Geschichte .....   | 17  |
| Die Regelung.....   | 27  |
| Warum ist Stabilität wichtig? .....   | 29  |
| Der Strommarkt.....   | 35  |
| Erneuerbare Energien .....  | 54  |
| Die Stromversorgung der Zukunft.....  | 68  |
| 100 Prozent – oder darf es etwas mehr sein? .....   | 83  |
| Die solare Strompreisbremse.....  | 97  |
| Die Risiken in der Zukunft.....   | 109 |
| Störung der automatischen Kommunikation und Fernsteuerung –<br>ein verborgenes Risiko ..... | 118 |
| Die Sonne geht auf .....  | 121 |
| Alles geregelt? Nein!.....  | 134 |
| Es gibt eine Lösung .....   | 139 |
| Und wie kommen wir da hin? .....  | 150 |
| Ein neuer Strommarkt – aber wie? .....  | 154 |
| Umwege führen auch zum Ziel .....   | 162 |
| Anmerkungen.....  | 166 |

## **Vorwort des Autors**

Ich gebe es lieber gleich zu: Ich war in Gorleben mit dabei – und habe mich am 4. Juni 1980 von der Polizei wegtragen lassen. Wenn dieses Bekenntnis Leser abschrecken sollte, wäre es vermutlich später auch geschehen. Neutral bin ich nicht.

Und ich gebe zu, und zwar nicht ohne Stolz, dass ich mit dabei war, als der erste Strom aus Solarzellen ins Netz eingespeist wurde. „Mit dabei“ ist vielleicht etwas untertrieben. Damit soll es von meiner Person erst mal genug sein.

Was möchte dieses Buch? Es will zu einer mutigen Gestaltung unserer Zukunft beitragen, aber auch unterhalten. Bücher werden meist freiwillig gelesen und das ist auch gut so, denn die Freiheit, die ein Buch bietet, ist ein hohes Gut. Bücher kann man weglegen, wenn man sie nicht lesen mag. Viele Bücher, die nicht freiwillig gelesen wurden, haben schon Unheil gebracht. Ich wünsche mir Leserinnen (und auch Leser), die nicht lesen müssen, sondern genug Interessantes und vielleicht etwas Unterhaltung finden, um das Buch einfach so in der Hand zu behalten.

Drei kurze sprachliche Klarstellungen: Wenn ich „man“ schreibe, meine ich natürlich alle Menschen jeden Geschlechts. Mit „Energie“ meine ich in der Regel das, was früher mit dem physikalischen Begriff „Arbeit“ bezeichnet wurde. Also

etwas, das man messen kann. Kraft mal Weg oder Leistung mal Zeit, um zwei Beispiele zu nennen.

Strom ist meist das, was aus der Steckdose kommt – und manchmal auch die physikalische Stromstärke, die in Ampere gemessen wird.

Ich möchte in diesem Buch fundierte Informationen zum Thema Energie und Energieversorgung anbieten und zeigen, dass in Zukunft alles gut werden könnte, was mit unserem Energiebedarf zusammenhängt. Das ist eigentlich naheliegend, denn wir sind auf der Erde ja schon seit vielen Millionen Jahren mit Energie gut genug versorgt worden – auf den anderen Planeten sieht es nicht so komfortabel aus.

Trotzdem stellte sich der Wunsch nach noch mehr Komfort bei uns Menschen ein und führte zur Zähmung des Feuers und zur Herstellung von Kleidung und Häusern. Dafür haben wir einen großen Teil unserer Haare gelassen – war ja nicht mehr so wichtig.

Dieses soll kein Buch für Energieexperten sein. Damit meine ich, dass hier kein besonderes Vorwissen erwartet wird. Ich werde sogar erklären, was Strom ist. Falls Experten dieses Buch in der Hand halten sollten: Bitte legen Sie es nicht gleich wieder weg. Ich lege großen Wert auf Ihre Kritik und bin dankbar, wenn Sie mir einen Fehler in meinen Gedanken aufzeigen. Ich möchte auch Menschen ansprechen, die in Sachen Energieversorgung zu entscheiden haben. Vielleicht könnten ein paar ungünstige Entwicklungen vermieden werden?

Zum Aufbau: Zunächst wird es um eine Beschreibung dessen gehen, was unser Stromnetz ist, um seine Geschichte und seine Funktion. Auch um die größte analoge Uhr der Welt und wie sie gestellt wird.

Um wichtige Funktionen des Stromnetzes und eine bestimmte Kontroverse in der Geschichte zu begreifen, ist es notwendig, den Unterschied zwischen Wechselstrom und Gleichstrom zu verstehen. Obwohl es dazu schon tausend Erklärungsversuche gibt, werde ich einen weiteren hinzufügen.

Leider werden noch ein paar weitere Grundlagen benötigt, um eine Basis für ein tieferes Verständnis zu schaffen. Hier werde ich es bei einer Einführung belassen, die zumindest eine Ahnung der wichtigsten Zusammenhänge vermitteln will. Alles Weitere findet sich in einschlägigen Schulbüchern und Fachbüchern auf unterschiedlichem Niveau. Natürlich liefert auch das Internet eine Fülle von entsprechenden Informationen in Form von Texten, Bildern und Videos. Einige entsprechende Hinweise und Tipps finden Sie am Ende des Buchs.

Im Zusammenhang mit der Erörterung dieser Grundlagen werde ich auch eine Spezialität von mir mit ins Spiel bringen, die uns sehr helfen kann: Das Schätzen. Diese heute viel zu wenig gepflegte Kunst kann zentrale Fehler sichtbar machen, bevor es zu spät ist – etwa der Text gedruckt ist oder die Arbeit abgegeben. Dazu gehört auch ein anschauliches Verständnis von Größenordnungen und großen Zahlen. Die Schwestern Kilo, Mega, Giga und Tera werden uns dabei unterstützen, und ich hoffe, dass wir sie bald nicht mehr verwechseln. Wenn das gelingen sollte, wäre ich froh. Leider werden uns auch ihre kleinen Brüder auf die Nerven gehen: Milli, Mikro, Nano und Pico. Es gibt sogar noch mehr Leute in dieser weitverzweigten Familie, aber zum Glück treten sie nur selten auf.

Nach der Beschäftigung mit diesen theoretischen Grundlagen werden wir einen Blick von oben auf das europäische Verbundnetz und andere Netze werfen und eine Spur von Ahnung entwickeln, wie das alles funktioniert, vielleicht sogar Respekt. Beim

Blick auf die Geschichte wird deutlich werden, wie sehr es dabei von Anfang an (auch) ums Geschäft ging – und wie der erbitterte Streit um Gleichstrom oder Wechselstrom fast grausame Auswüchse annahm.

Die Regelung und Stabilisierung des Netzes wird uns beschäftigen und in diesem Zusammenhang die Frage, wie es funktionieren kann, dass in einem Stromnetz immer genau so viel elektrische Leistung erzeugt wird, wie gerade gebraucht wird.

Ich werde auch über etwas schreiben, was seit dem Krieg zum Glück noch nie passiert ist: ein Zusammenbruch der Stromversorgung und die damit verbundenen Risiken. Und über die Möglichkeiten, diese zu verhindern oder abzumildern.

Natürlich geht es auch um Geld: um Strompreise und um Strommärkte. Und um die Frage, warum der private Kunde am Ende der Nahrungskette immer den höchsten Preis zahlt.

Hat das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), diese Entwicklung zu verantworten? Was haben wir davon, wenn auf Kosten der Stromkunden erneuerbare Energien gefördert werden? Werden wir sehen.

Heizen und fahren wir in Zukunft nur noch elektrisch? Das wäre denkbar. Ob es auch vernünftig wäre, hängt natürlich davon ab, woher die Energie dafür kommen wird. Vermutlich wäre es akzeptabel, wenn wir genügend erneuerbare Energien hätten. Also 100 Prozent oder mehr. Mehr als 100 Prozent geht nicht? Ich meine, es geht und hat sogar große Vorteile.

Natürlich muss Energie gespeichert werden, wenn wir auf Kohle und andere fossile Energieträger verzichten wollen. Auch diese enthalten ja gespeicherte Sonnenenergie in chemischer Form, für deren Umwandlung die Natur viele Millionen Jahre gebraucht hat. Und nebenbei ist bei dieser Arbeit der Sauerstoff frei geworden,

der unserem Planeten seine blaue Farbe gibt. Mit den heute noch verbleibenden Ressourcen an Kohle, Öl und Gas werden wir uns nicht lange aufhalten. Wir dürfen sie, wie schnell deutlich werden wird, ohnehin nicht bis zur Neige verbrennen.

Eine zentrale Frage der Zukunft der Energieversorgung hat mit Regelung und Betriebssicherheit zu tun, gerade, wenn es um die Umstellung auf erneuerbare Energien geht. Und auch hier tobt wieder ein Kampf um das größere Geschäft, der dazu führen könnte, dass die einfachere, sicherere Lösung außen vor bleibt – und das nur, weil nicht die „richtigen“ Leute genug daran verdienen könnten.

Eine solche einfache, sichere Lösung möchte ich in diesem Buch vorstellen. Bei ihr wird genau das genutzt, was die Stabilität eines Netzes ausmacht. Es wird dafür gesorgt, dass Spannung und Frequenz stabil bleiben. Diese Größen können an jedem Punkt des Netzes gemessen und auch beeinflusst werden, wenn es die Möglichkeit gibt, die Leistung an diesem Punkt zu verändern. Es ist ganz einfach: Wenn die Frequenz absinkt, ist das Gleichgewicht zwischen Verbrauch und Erzeugung nicht mehr gegeben. Das bedeutet: Es muss mehr Strom erzeugt werden – oder weniger verbraucht. Oder beides gleichzeitig. Und die letzten beiden Optionen werden derzeit kaum genutzt. Nur die Erzeugung wird geregelt.

Auch die Spannung liefert wichtige Informationen – vor allem über den lokalen Zustand im Netz. Die Messung von Frequenz und Spannung ist natürlich nicht neu, aber heute durch moderne Elektronik so einfach und günstig zu realisieren, dass sie praktisch in jedem Elektrogerät möglich wäre.

Besonders wirkungsvoll jedoch ist sie bei Batteriespeichern und Ladegeräten für Autos. Die Mikroprozessoren, mit denen

solche Messungen heute mit minimalem Aufwand möglich sind, können sogar noch mehr: Muster und Regelmäßigkeiten erkennen, aus ihnen „lernen“ und Regelstrategien automatisch verbessern. Diese Art der Regelung beruht nicht auf digitaler Fernsteuerung und deshalb ist sie immun gegen externe Angriffe und sehr robust sogar im Falle von Naturkatastrophen, Sabotage oder Krieg.

Nachdem so viele verheißungsvolle Ideen und Möglichkeiten aufgezeigt worden sind, stellt sich die Frage, wie all dies praktisch umzusetzen wäre. Hier liegt der bekannte Einwand nahe, dass es doch schon längst so sein müsste, wie es sein könnte, wenn dies alles technisch möglich und bezahlbar wäre, wie hier behauptet.

Um zu verstehen, an welchem Punkt wir uns befinden und warum, ist die Einsicht hilfreich, dass auch ein Umweg ein Weg ist, der zum Ziel führt. Und nicht nur das – vielleicht sind Umwege sogar notwendig, um voranzukommen? Wenn es um die persönliche Entwicklung eines Menschen geht, hat sich diese Erkenntnis längst durchgesetzt, und ich könnte mir vorstellen, dass es bei der Entwicklung einer menschlichen Gesellschaft, die für einen ganzen Planeten verantwortlich sein muss, genauso ist: Wir sind viele Umwege gegangen, haben uns fast verirrt. Doch noch ist es nicht zu spät. Noch können wir einen guten Weg in die Zukunft finden.

## **Wie funktioniert Strom?**

Elektronisch natürlich, also mit Elektronen. Erinnern Sie sich? Elektronen sind Elementarteilchen, die jedes Atom enthält und die sehr klein und leicht sind. Erstaunlich leicht: die Ruhemasse eines einzelnen Elektrons beträgt gerade einmal  $9,1 \cdot 10^{-28}$  Gramm, also nur 0,0000000000000000000000000091 Gramm (da gibt es niemanden mehr aus der Zahlenfamilie, der seinen Namen für eine solche Winzigkeit zur Verfügung stellt.) Die Elektronen sind

beweglich, und wenn diese Bewegung eine Richtung hat, strömen sie sozusagen. Das ist der Strom.

Um Elektronen in eine Richtung zu bewegen, sie strömen zu lassen, ist eine „Kraft“ nötig: die Spannung. Wie Wasser, wenn es unter Druck steht. Solange der Wasserhahn zu ist, passiert noch gar nichts. Der Druck ist aber da. Erst wenn der Hahn geöffnet wird, kommt das Wasser in Bewegung, es strömt. Wenn das strömende Wasser auf Widerstand stößt, wird Energie freigesetzt, es kann im Fluss Steine zum Rollen bringen oder im Kraftwerk eine Turbine antreiben.

Ob die Elektronen sich bewegen oder nicht, ob sie strömen, wird auch durch die Materie beeinflusst, in der sie sich befinden. Es gibt leitende und nicht leitende Stoffe. Metalle etwa, wie Kupfer oder Aluminium, sind sehr gute Leiter, sie setzen dem Fluss der Elektronen kaum Widerstand entgegen, während Glas oder Kunststoffe nicht leitend sind (oder, genauer gesagt, nur sehr schwach leitend). Stoffe, die nicht oder nur sehr schwach leiten, nennen wir Isolatoren. Ein mit nichtleitendem Kunststoff isolierter Draht aus Kupfer ist wie ein Wasserschlauch: Die Elektronen müssen in seinem Inneren bleiben und werden so dorthin geleitet, wo sie „arbeiten“ sollen.

Und sie können arbeiten! Zum Beispiel etwas erwärmen – sogar so sehr, dass es glühend hell leuchtet, zum Beispiel eine Glühbirne oder einen Heizdraht. Sie können aber auch etwas bewegen (Elektromotoren) oder Signale weitergeben, und das sehr schnell, nämlich fast mit Lichtgeschwindigkeit, wie in der guten alten Telefonleitung. Man könnte noch viele Bereiche aufzählen, in denen die Elektronen auf diese Weise „arbeiten“.

In der Regel ist der Strom ein Kreislauf, der von einer „Kraft“, der sogenannten Spannungsquelle, in Bewegung gehalten wird.

Vergleicht man den Strom mit einem Wasserkreislauf, wäre die Spannungsquelle eine Pumpe, die das Wasser umwälzt, es in Bewegung hält. Einen solchen Kreislauf gibt es zum Beispiel in jeder Zentralheizung. Ein Schalter kann den Kreislauf der Elektronen unterbrechen und wieder einschalten – so wie ein Schieber oder Hahn, der den Wasserkreislauf regelt. Der Lichtschalter an der Wand ist ein solcher Hahn.

Der Strom der Elektronen kann gemessen werden. Die Stromstärke ist die Menge an Elektronen, die in einer bestimmten Zeit durch einen Draht fließt. Erinnern Sie sich? Sie wird in der Einheit Ampere gemessen. Sie steht zum Beispiel auf den Sicherungen, die den Strom abschalten, wenn er zu groß wird.

Die Stromstärke gibt also die absolute Menge des Stroms an, der in einer Leitung fließt – beim Wasser wären es so und so viel Liter pro Sekunde. Es gibt aber auch noch eine Einheit, die, um bei unserem Beispiel zu bleiben, den Druck des Stroms angibt, seine Intensität: die Spannung. Sie wird, wie Sie sicher wissen, in Volt gemessen.

An einer normalen Steckdose im Haushalt haben wir 230 Volt zur Verfügung, während die Elektrik des Autos kleinerer Spannung arbeitet, 12 Volt.

Der Mensch ist nicht das erste Wesen, das den elektrischen Strom für sich nutzt! Einige Fische tun dies schon seit Millionen von Jahren, der Zitteraal zum Beispiel, der mit seinem elektrischen Organ Beutefische töten und Feinde vertreiben kann. Große Exemplare können für kurze Zeit 800 Volt und 1 Ampere erzeugen – genug, um größere Tiere und sogar Menschen zu bedrohen.

## Das Stromnetz

In Europa gibt es zwei bedeutende Energienetze: das Stromnetz und das Gasnetz. Sie haben eine enorme wirtschaftliche Bedeutung, die aber vor allem beim Gasnetz weit über Europa hinausgeht.

Die Desertec-Pläne, nach denen Europa mit Solarstrom aus der Sahara versorgt werden sollte, sind zunächst wieder Geschichte. Vielleicht ist das auch besser so? Technisch hätte es sogar funktionieren können, auch wenn es sehr teuer geworden wäre. Wenn aber in Nordafrika Bürgerkrieg, Not und Korruption herrschen, ist es den Menschen dort vermutlich kaum vermittelbar, dass das reiche Europa jetzt auch noch Energie von ihnen haben will. Ein erster, notwendiger Schritt wäre es gewesen, den Menschen dort Sicherheit, eine Perspektive und natürlich auch eine gute Versorgung mit Energie zu bieten.

Wieviel Strom ist in Europa eigentlich so unterwegs? Eine zentrale Zahl: Der Umsatz von Energie im Stromnetz innerhalb der Vereinigung ENTSO-E betrug im Jahr 2016 3.322 Terawattstunden.

Tera ist ein Monster und hat zwölf Nullen. Sie steht in der Mitte der großen Schwestern, soweit sie bei Wikipedia bekannt sind. Allerdings nimmt sie die noch größeren (Peta, Exa, Zetta und Yotta) nicht ganz für voll. Warum? Nun, erstens, weil die gar nicht älter sind. Und zweitens, weil deren Namen nur die Anzahl von Dreiernullen bezeichnen, die diese mit sich herumschleppen.

Hier sind die Schwestern:

| Symbol | Name  | Ursprung  | Wert      |                                   |             |
|--------|-------|---|-----------|-----------------------------------|-------------|
| Y      | Yotta | ital. <i>otto</i> = acht  | $10^{24}$ | 1.000.000.000.000.000.000.000.000 | Quadrillion |
| Z      | Zetta | ital. <i>sette</i> = sieben                                       | $10^{21}$ | 1.000.000.000.000.000.000.000     | Trilliarde  |
| E      | Exa   | gr. <i>hex</i> = sechs  | $10^{18}$ | 1.000.000.000.000.000.000         | Trillion    |
| P      | Peta  | gr. <i>petannynai</i> = alles umfassen / gr. <i>penete</i> = fünf | $10^{15}$ | 1.000.000.000.000.000             | Billiarde   |
| T      | Tera  | gr. <i>teras</i> = Ungeheuer / gr. <i>tetrakis</i> = viermal      | $10^{12}$ | 1.000.000.000.000                 | Billion     |
| G      | Giga  | gr. <i>gigas</i> = Riese  | $10^9$    | 1.000.000.000                     | Milliarde   |
| M      | Mega  | gr. <i>mega</i> = groß  | $10^6$    | 1.000.000                         | Million     |
| k      | Kilo  | gr. <i>chilioi</i> = tausend                                      | $10^3$    | 1.000                             | Tausend     |
| h      | Hekto | gr. <i>hekatón</i> = hundert                                      | $10^2$    | 100                               | Hundert     |
| da     | Deka  | gr. <i>deka</i> = zehn  | $10^1$    | 10                                | Zehn        |

Mit einfachen Wattstunden (Watt mal Stunde) haben die wenigsten Menschen Erfahrung, wenn es um den Verbrauch von Energie geht. Daher wandeln wir die Zahl in Kilowattstunden um – die kennen wir alle von unserer Stromrechnung. Dazu müssen wir nur drei Nullen wegnehmen. Die angesprochene Menge beträgt also 3322.000.000.000 oder 3.322 Milliarden Kilowattstunden – eine Einheit, mit der die meisten etwas anfangen können.

Wenn wir einmal annehmen, dass ein mittlerer Endverkaufspreis von zehn Cent pro Kilowattstunde realistisch ist, nehmen wir einfach noch eine Null weg und haben den Umsatz in Euro: 332.200.000.000 Euro, also 332 Milliarden Euro. Eigentlich hätte jetzt Giga übernehmen können, die riesige, die ja für die Milliarden zuständig ist! Geld scheint man den Schwestern aber nicht anvertrauen zu wollen. Gigaeuro sind unüblich ...

In Europa wird also viel gezahlt für elektrische Energie? Stimmt und stimmt nicht. Der größte Teil dieser Summe wird nämlich nicht für die Energie selbst aufgewendet, sondern dafür, dass sie zur Verfügung steht, wo und wann immer wir sie gerade brauchen – also für die Versorgung mit Energie und für die Bereitstellung einer ausreichenden Leistung. Dazu aber später mehr.

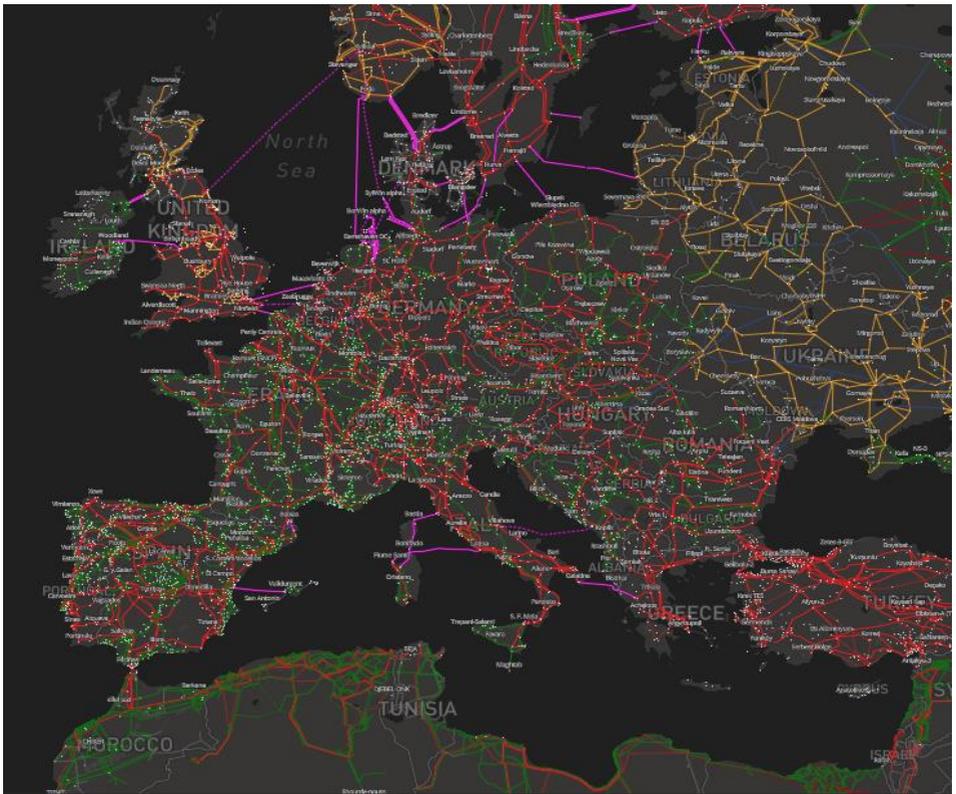


Abb. 1: Das Stromnetz Europas (2006), Quelle: entso-e

Auf diesem Bild, das das Stromnetz Europas im Jahr 2006 zeigt, sind nur die Übertragungsleitungen mit den höchsten Spannungen (220 Kilovolt und mehr) dargestellt. Hätte man alle Leitungen

ingezeichnet, wäre das Netz so dicht, dass man kaum noch etwas erkennen könnte.

Dieses Stromnetz ist ein erstaunliches von Menschen geschaffenes Gebilde. Ein Netz aus Metall, das von Afrika bis Norwegen reicht und das dabei praktisch mit jedem Haus verbunden ist. Wie ist es entstanden?

## **Eine kurze Geschichte**

Die Nutzung des elektrischen Stroms begann mit Batterien aus galvanischen Zellen. Diese waren zunächst nicht aufladbar, sie mussten vollständig ersetzt werden, wenn sie verbraucht waren. Daher war elektrische Energie am Anfang sehr teuer und wurde entsprechend sparsam eingesetzt. Diese Batterien lieferten gerade genug Gleichstrom für die Telegrafie – eine erste wirtschaftlich relevante Nutzung. Später wurden Motoren und Generatoren erfunden, und erst mit den Generatoren, die am Anfang auch Gleichstrom erzeugten, konnte genug Strom produziert werden, um ihn auch für Beleuchtung und Antriebe zu nutzen. Ein Nachteil des Gleichstroms war, dass er sich ohne nennenswerte Verluste nur über kleine Entfernungen leiten ließ. Dieses Problem wurde mit dem Wechselstromgenerator und dem Transformator gelöst, denn Wechselstrom kann ohne größere Verluste über weitere Strecken transportiert werden, wenn mit Hilfe des Transformators die Übertragung bei einer deutlich höheren Spannung erfolgt. Die Übertragung über Hunderte von Kilometern mit Hochspannung war etwa ab 1890 die überlegene Lösung. Trotzdem begann ein erbitterter Kampf um die Frage, welche Art von Strom sich durchsetzen sollte. In den USA ging er so weit, dass Thomas Alva Edison (1847-1931), um die größere Gefährlichkeit des von seinem Rivalen George Westinghouse (1846-1914) propagierten Wechselstroms zu demonstrieren,

öffentlich Tiere damit zu Tode quälen ließ und den elektrischen Stuhl als Hinrichtungsmethode empfahl.

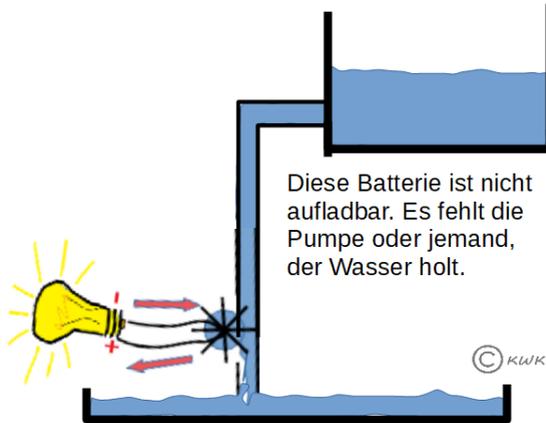
Wechselstrom ist bei einer Berührung tatsächlich gefährlicher als Gleichstrom bei gleicher Spannung. Warum eigentlich? Wenn Wechselstrom durch den menschlichen Körper fließt, kann es zu Herzkammerflimmern kommen, das Herz wird aus dem Rhythmus gebracht. Eine Wechselspannung ab 50 Volt wird als gefährlich eingestuft, eine Gleichspannung erst ab 120 Volt.

### **Was ist Wechselstrom?**

Stellen wir uns zwei Wasserbecken vor, die unterschiedlich hoch und untereinander mit einem Rohr verbunden sind: Ist das Rohr geöffnet, fließt Wasser vom oberen Becken in das untere. Die dabei fließende Wassermenge pro Zeiteinheit entspricht dem Strom.

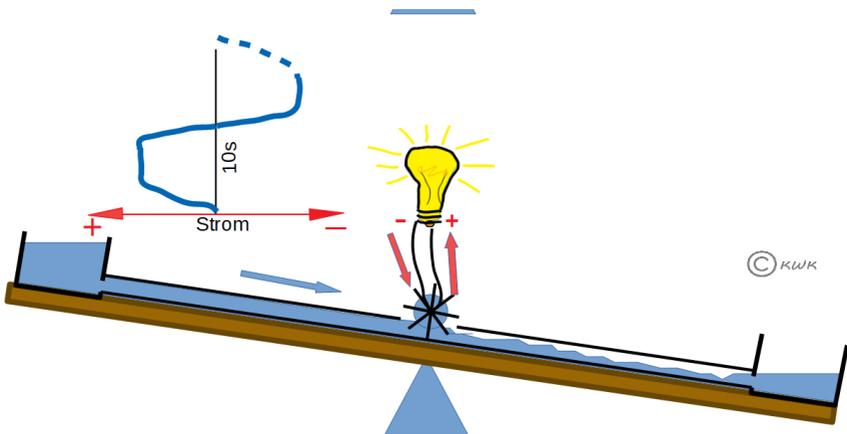
Diese Anordnung von zwei Becken mit einem Rohr dazwischen entspräche einer Gleichspannungsquelle, zum Beispiel einer Batterie. Und zwar einer, die nicht wieder aufgeladen werden kann. Es gibt nur ein Rohr nach unten, keine Pumpe, die das Wasser wieder ins obere Becken befördern kann. Man könnte mit dieser Anordnung eine kleine Wassermühle antreiben, und mit einem kleinen Generator eine Lampe zum Leuchten bringen, aber irgendwann ist das Wasser unten und die „Batterie“ leer.

Gleichstrom fließt nur in eine Richtung



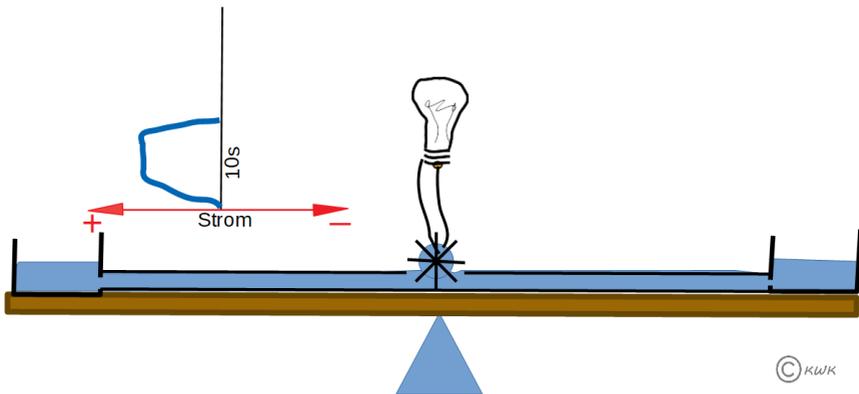
Jetzt montieren wir die zwei Wasserbecken auf eine Wippe, auf jeder Seite eines. Dazwischen, auf den Balken, kommt das Rohr und die Wassermühle. Damit es in beiden Richtungen funktioniert, nehmen wir ein sogenanntes unterschlächtiges Wasserrad, bei dem die Schaufeln unten in den Kanal tauchen.

Bevor wir fertig mit dem Aufbau sind, ist das Wasser vermutlich schon nach unten gelaufen. Macht aber nichts. Wir heben



einfach die Seite der Wippe mit dem vollen Wasserbecken hoch, und schon geht's los: Das Wasser läuft, die Mühle dreht sich.

Wenn das ganze Wasser unten ist, heben wir die andere Seite, und die Mühle dreht sich wieder, jetzt im Wechsel-Strom. Und man kann immer so weiter machen.



Beim Hochheben der Wippe gibt es natürlich ein Moment, in dem der Wasserstrom zum Stillstand kommt und die Mühle nicht mehr angetrieben wird, bevor das Wasser wieder in die andere Richtung fließt. Unsere Lampe erlischt dann für einen Moment. Beim elektrischen Wechselstrom, wie wir ihn aus der Steckdose bekommen, ist das der sogenannte Nulldurchgang. Bei der guten alten Glühlampe ist der Strom dann auch tatsächlich Null, aber sie geht dabei nicht aus, denn der Nulldurchgang ist nur sehr kurz. Wenn man die Helligkeit sehr genau nachmessen würde, käme man zu dem Ergebnis, dass sie tatsächlich etwas dunkler wird – allerdings hundert Mal pro Sekunde, zu schnell für unsere Augen.

In unserem europäischen Stromnetz haben wir eine Frequenz von 50 Hertz, das ist einfach so festgelegt worden. 60 Hz würde auch gehen, wie in Amerika. 50 Hz bedeutet, dass der Strom innerhalb von einer Sekunde 50 mal in der einen und 50 mal in der anderen Richtung fließt. In einer grafischen Darstellung oder auf einem Messgerät (Oszilloskop) wechseln sich dann 50 Wellenberge und 50 Täler ab, und bei jedem Wechsel gibt es einen Nulldurchgang.

Wenn Sie es in unserem Modell (wo der „Strom“ des Wassers natürlich sehr viel langsamer fließt) schaffen, die eine Seite der Wippe einmal pro zehn Sekunden hochzuheben, hat ihr Wechselstrom eine Frequenz von 0,1 Hertz.

Zurück zum elektrischen Strom, der Bewegung von Elektronen in einem leitfähigen Stoff, etwa einem Metall: Immer, wenn Strom durch einen Leiter fließt, entsteht Wärme, und zwar umso mehr, je dünner („enger“) der Leiter ist. In der Glühlampe bringt diese Wärme den dünnen Draht zum Glühen. Nach dem ohmschen Gesetz ist die Wärmeleistung abhängig von Stromstärke und Widerstand. Diese Wärme ist Nutzwärme, wenn damit etwas geheizt oder erhitzt werden soll. In den Stromleitungen des Netzes aber – vor allem, wenn sie draußen verlegt sind – sind es Verluste, die die nutzbare Energie schmälern, denn ein Teil von ihr geht als Wärme verloren. Sie heizt nur das Feld oder den Wald, keine Heizplatte oder einen Glühdraht. Und diese Verluste lassen sich praktisch nicht vermeiden, denn Wärme in einem Leiter entsteht immer. (Fast immer, die Supraleitung bei sehr tiefen Temperaturen ist eine Ausnahme und wird auch schon technisch genutzt.)

Dieser ärgerliche Umstand begrenzte anfangs die Entfernung, über die sich Strom effizient nutzen ließ, auf wenige hundert Meter. Die Verluste in den Drähten wurden einfach zu hoch, wenn man längere Leitungen verlegte – am Ende kam kaum noch etwas an.

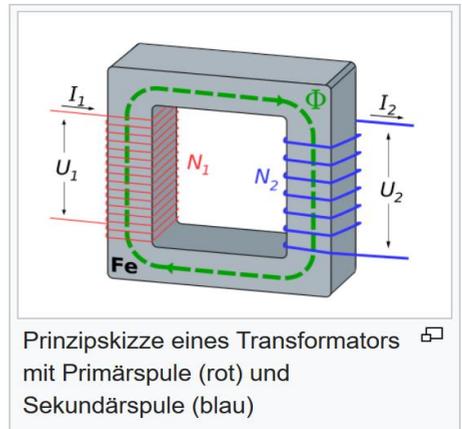
Eine Lösung dieses Problems besteht in der Übertragung von Strom mit einer sehr hohen Spannung. Denn: Die Verluste sind dann erheblich geringer. Bei gleicher Leistung verringern sie sich im Quadrat der Spannungserhöhung.

Das hat erhebliche Auswirkungen. Bei zehnfacher Spannung lässt sich schon die hundertfache Strecke überwinden, ohne dass der Anteil der Leitungsverluste ansteigt.

Leider ist Hochspannung im Haushalt nicht praktikabel. Unsere Lampen und anderen Geräte sind dafür nicht geeignet, und sie wäre auch zu gefährlich. Also muss die Spannung am Ende der langen Leitung wieder verringert werden, um die elektrische Energie nutzbar zu machen.

Dies alles wäre übrigens auch mit Gleichstrom möglich gewesen – allerdings mit hohem Aufwand und unter hohen Verlusten. Heute gibt es die Möglichkeit, Gleichstrom ohne große Verluste in andere Spannungen umzuwandeln. Hätte man diese technischen Möglichkeiten damals schon gehabt, wäre der Streit wohl zugunsten des Gleichstroms ausgegangen.

Wie eigentlich funktioniert der Wechsel von einer Spannung in eine andere?



<https://de.wikipedia.org/wiki/Transformator>

Damals wurde er mit der Erfindung des Transformators möglich, wie Sie ihn in klein vielleicht noch von Ihrer elektrischen Eisenbahn kennen. Doch auch jedes „Netzgerät“ ist nichts anderes als ein Trafo.

Ein klassischer Transformator funktioniert nur mit Wechselstrom. Man kann ihn sich wie einen Hebel vorstellen: Auf einem Eisenkern befinden sich zwei Wicklungen von Kupferdraht (Abb. X). Durch den Eisenkern wird das gemeinsame magnetische Wechselfeld der beiden Wicklungen eng miteinander gekoppelt, und so wird durch Induktion elektrische Leistung von einer auf die andere Wicklung übertragen.

Die Anzahl der Windungen des Drahtes jeder Wicklung entspricht dabei der Länge eines Hebelarms, die Stromstärke entspricht der Kraft, und die Spannung entspricht dem Weg des Hebels. Stehen die Anzahl der Windungen untereinander im Verhältnis 1:10, wird auch die Spannung in diesem Verhältnis übertragen, der Strom im umgekehrten Verhältnis.

Damit bleibt die Leistung (Strom mal Spannung) gleich, und die Physik ist zufrieden. Natürlich entstehen bei einem Trafo auch Verluste, –sowohl in den Drähten als auch im Eisenkern. Der Trafo wird warm und muss oft sogar gekühlt werden, damit er sich nicht überhitzt.

Ein wichtiger Vorteil des Wechselstroms ist die Tatsache, dass Wechselstromgeneratoren weitaus billiger und robuster sind als Gleichstromgeneratoren. Auch Motoren, die mit Wechselstrom (vor allem Drehstrom) angetrieben werden, sind einfacher aufgebaut. Der Nachteil der Gleichstrommotoren ist die Tatsache, dass sie einen Kommutator, einen Polwender, benötigen. Schleifkontakte aus Metall oder einem Graphit-Metallgemisch (Kohlebürsten) polen während der Drehung ständig die Ankerwicklung um. Das ist mit Reibung und Verschleiß verbunden. Daher müssen bei einem Gleichstrommotor nach längerer Laufzeit die Kohlebürsten erneuert werden. Es gibt aber noch einen weiteren Vorteil des Wechselstroms, der damals entscheidend war: Schaltet man einen

Gleichstromkreis von mehr als 50 Volt und ein paar Ampere aus, bildet sich ein Funke, ein Lichtbogen. Der Strom springt dabei regelrecht durch die Luft, von einem Kontakt zum anderen! Das ist nicht lustig, denn der Schalter kann dabei in Flammen aufgehen – und das ganze Haus mitnehmen. Man braucht sehr große Schalter mit einem Abstand von einigen Zentimetern beim Öffnen der Kontakte, um den Lichtbogen zu verhindern, und selbst das genügt bei größeren Strömen kaum. Heute könnte dieses Problem mit Hilfe elektronischer Schalter gelöst werden.

Nach diesem Prinzip funktioniert übrigens auch die Bogenlampe, bei der das elektrische Licht zum ersten Mal vorführte, wie hell es sein kann!

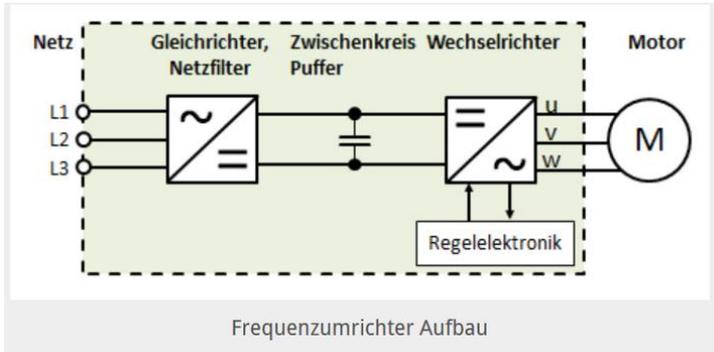
Beim Wechselstrom ist dieses Problem erheblich geringer, denn der Lichtbogen erlischt immer, wenn der Nullpunkt durchschritten wird, bei 50 Hz also nach höchstens zehn Millisekunden. In dieser kurzen Zeit kann er keinen großen Verschleiß und kaum eine Erwärmung verursachen. Die Schalter für Wechselstrom sind daher viel kleiner, einfacher und billiger. Das Gleiche gilt für Sicherungen, die bei einem Kurzschluss den Stromkreis unterbrechen müssen.

Und was ist der Drehstrom, der oben schon kurz erwähnt wurde? Nun, Drehstrom ist einfach Wechselstrom mit drei Drähten statt nur zwei. Die Phasenlage der Spannungen und Ströme in den drei Leitern ist jeweils um 120 Grad versetzt. Natürlich ist es nicht ganz so einfach, aber die Details kann man überall nachlesen, wir brauchen sie hier nicht. Mit dem Drehstrom kann man, wie der Name schon sagt, etwas drehen lassen, also gut Elektromotoren antreiben, die sehr zuverlässig sind und fast ohne Verschleiß arbeiten. Das gilt auch für Drehstromgeneratoren, die im Prinzip nichts

anderes sind als Motoren, die durch eine äußere Kraft gedreht werden. Drehstromgeneratoren sind zuverlässig und günstig.

Und hier sind wir schon bei einem wichtigen Detail angelangt: Die Umwandlung von elektrischer Energie in eine drehende Bewegung ist umkehrbar – und das sogar höchst effizient. Beim Elektroauto wird dieses Prinzip genutzt, um den Motor beim Bremsen oder Bergabfahren als Generator zu nutzen und die Antriebsbatterie wieder zu laden. Das hat gleich mehrere Vorteile: Weniger Energieverbrauch, höhere Reichweite und die Bremsen werden auch geschont – weniger Verschleiß und weniger Feinstaub in der Luft.

Moderne Antriebstechnik funktioniert heute aber nicht mit Drehstrom direkt aus dem Netz, sondern mit Frequenzumrichtern. Hier wird mit Hilfe von Leistungselektronik aus Netzstrom (Frequenz: 50 Hz) ein eigener Drehstrom mit beliebiger Frequenz und Spannung erzeugt. Auch die Drehrichtung kann ohne mechanische Schalter gewechselt werden. Mit einem passenden Umrichter kann ein Motor fast alles – sogar fliegen, wenn man einen Propeller daran befestigt. Er kann sich in unterschiedlichen Geschwindigkeiten drehen, links- oder rechtsherum, kann beschleunigen und abbremsen und dabei wieder elektrische Energie aus der Bewegung erzeugen. Die Technik ermöglicht unter anderem Hybridautos und moderne elektrische Lokomotiven ohne Schaltgetriebe und Kupplung.



<https://www.precifast.de/frequenzumrichter-funktion/>

Dazu ist, neben einem Gleichrichter und elektronischen Schaltern, ein sogenannter Gleichstromzwischenkreis notwendig. Das kann auch eine Batterie sein. Dabei wird aus dem Wechselstrom oder Drehstrom erst Gleichstrom gemacht, um dann wieder Drehstrom mit einer anderen Frequenz erzeugen zu können.

Also ist Gleichstrom doch der bessere Strom? Warum aber haben wir dann den weniger guten Wechselstrom? Der Grund ist die moderne Leistungselektronik, die heute viel leistungsfähiger ist, als man es zu Siemens' Zeiten zu träumen wagte. Selbst ein einfacher Gleichrichter – das simpelste Bauteil der Leistungselektronik – war damals ein wahres Monstrum und machte einen großen Teil der Energie bei der Umwandlung zu (meist nutzloser und störender) Wärme.

Würden wir heute einen Planeten ganz neu elektrifizieren wollen, würden wir ohne Zögern auf Gleichstrom setzen. Unser Wechselstromnetz hat also einen historischen Hintergrund – ebenso wie die im Grunde beschämende Tatsache, dass wir in Europa immer noch unterschiedliche Steckdosen und verschiedene

Spurweiten bei der Eisenbahn haben. Sachliche Vorteile wird man in diesem Zusammenhang auch mit der Lupe nicht finden.

## **Die Regelung**

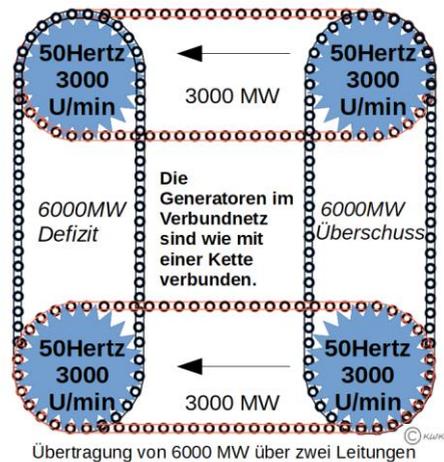
Das europäische Verbundnetz ist eines der besten der Welt. Wie komme ich zu dieser positiven Bewertung?

Ein Netz ist dann gut, wenn es eine stabile und sichere Versorgung bietet. Stabil bedeutet, dass möglichst genau das drin ist, was draufsteht: 230 Volt und 50 Hertz. Stabil bedeutet weiterhin, dass es nur zu wenig Ausfällen kommt. In Deutschland sind das, statistisch betrachtet, bei einem Endkunden 2,4 Stromausfälle in zehn Jahren und nicht mehr als insgesamt zwölf Minuten pro Jahr, in denen die Versorgung unterbrochen ist. Diese beachtlichen Ergebnisse haben sich bislang Jahr für Jahr verbessert. Die zuweilen gehörte Behauptung, der wachsende Anteil erneuerbarer Energien gefährde die Stabilität der Stromversorgung, lässt sich daraus also nicht ableiten. Es kann aber Risiken geben, die sich nicht aus Statistiken ableiten lassen. Ich komme noch darauf zurück.

Wie schon im Vorwort erwähnt, wird in Europa immer genau so viel Strom erzeugt, wie gerade gebraucht wird. Ein Kunststück, Magie? Wohl kaum. Aber wie funktioniert es genau?

Ein zentrales Element dabei sind sogenannte Synchrongeneratoren in den Kraftwerken. Sie heißen so, weil die Rotoren der riesigen Generatoren europaweit synchron mit 3.000 Umdrehungen pro Minute rotieren, als wären sie mit einer Kette verbunden. Diese Kette ist das Stromnetz selbst. Ist ein Generator mit diesem Netz

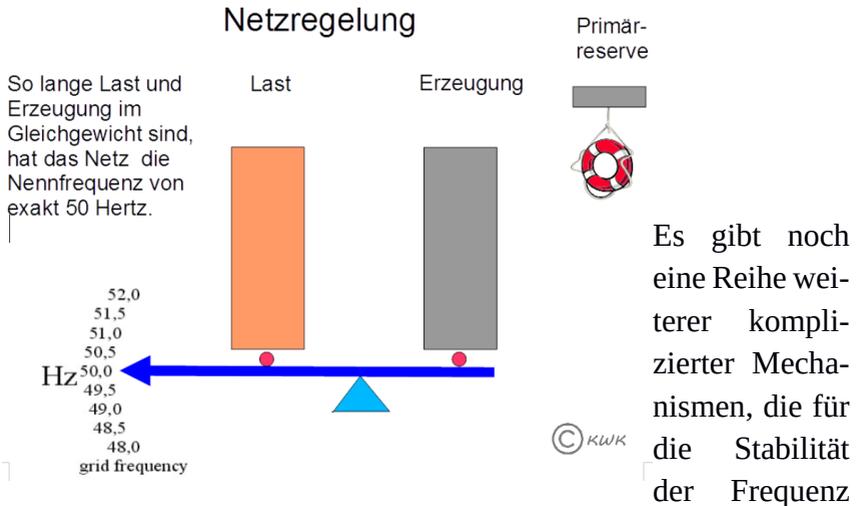
verbunden, wird er mit gewaltigen Kräften zu dieser gemeinsamen Drehzahl gezwungen. Fällt in einem Kraftwerk die Dampfturbine aus, dreht sich der Generator einfach weiter – und wird dabei zu einem Motor, der vom Netz angetrieben wird.



Geben bei einem Kraftwerk die Ingenieure mehr Dampf, erhöhen sie also die Leistung, dreht sich der Generator kaum schneller – nur so viel, wie die zusätzliche Dampfmenge für das gesamte Netz und alle Generatoren zusammen bewirkt. In der Realität bewirkt sie sogar noch viel weniger, denn die automatischen Regler der anderen Kraftwerke registrieren sofort den winzigen Anstieg der Netzfrequenz und reduzieren innerhalb von wenigen Sekunden ihre Dampfmenge etwas, sodass die Frequenz schnell wieder den Sollwert von 50 Hertz erreicht. Damit ist das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch wieder hergestellt

Ebenso reagieren die automatischen Regler auf jede Veränderung der Last im Netz. Auf diese Weise wird die Stromerzeugung immer innerhalb von Sekunden dem Verbrauch angepasst. Diesen Regelkreis kann man wie eine sich selbst regulierende Wippe

darstellen, wobei die Seite, die die Stromerzeugung darstellt, Wasserventile an ihrem Behälter hat. Wenn die Lage der Wippe von der Waagerechten abweicht, wird Wasser abgelassen oder zugeführt, bis die Wippe wieder in waage ist.



im Netz sorgen. Diese genauer zu erklären, will ich Ihnen hier ersparen.

## Warum ist die Stabilität wichtig?

Früher gab es Plattenspieler, die mit sogenannten Synchronmotoren angetrieben wurden: Der Motor (und damit der Plattenteller) drehte sich immer synchron mit der Netzfrequenz. Diese ist normalerweise so genau geregelt, dass Schwankungen der Tonhöhe kaum zu bemerken sind.

Es gibt auch immer noch Synchronuhren, die direkt mit die Netzfrequenz angetrieben werden. Daher gibt es im Netz eine zusätzliche Ebene der Regelung, Quartärregelung genannt.

Diese hat nichts mehr mit der Stabilität des Netzes zu tun, sondern dient nur dazu, den Verlauf der Netzfrequenz wie eine Uhr zu

betrachten und bei einer Abweichung von mehr als 20 Sekunden bezogen auf die Weltzeit (UTC) die riesige „Uhr“ des Netzes wieder zu stellen. Dann gehen alle Synchronuhren wieder richtig. Diese spezielle Aufgabe wird – natürlich – durch ein Kraftwerk in der Schweiz erledigt. Dabei wird dabei das sogenannte Totband von 49,99 – 50,01 Hz genutzt. Innerhalb dieser schmalen Grenzen halten sich alle anderen Frequenzregler im Netz zurück, sodass die größte analoge Uhr der Welt langsam mit ein paar Megawatt wieder gestellt werden kann.

Doch weder netzsynchron betriebene Plattenspieler noch Uhren werden in Zukunft eine große Rolle spielen. Daher wären geringfügige Frequenzänderungen ein kleineres Problem. Schnelle Spannungsschwankungen führen allerdings auch zu flackernden Glühlampen, technisch auch Flicker genannt. Da die klassische Glühlampe jedoch immer mehr durch LED-Lampen abgelöst wird, die auf solche Schwankungen nicht merklich reagieren, werden auch solche kleinen Schwankungen der Spannung eine geringere Bedeutung haben.

### **Worauf es ankommt**

Für eine stabile Versorgung mit Strom ist die Einhaltung von Grenzen nötig, die durch die Funktion der netzbetriebenen Geräte vorgegeben ist. Die Grenzen sind hier relativ weit. Typische Haushaltsgeräte, Werkzeuge und Maschinen etwa arbeiten bei Spannungen von 180-260V ohne Probleme. Moderne Waschmaschinen haben schon Gleichrichter oder Umrichter für den Motor der Trommel, diese sind unempfindlich, was Schwankungen von Frequenz und Spannung betrifft. Viele Geräte funktionieren intern ohnehin mit Gleichstrom und haben einen elektronischen Netzadapter

(„Netzteil“), der universell für alle möglichen Arten von Stromnetzen ausgelegt ist.

Das bedeutet, dass alle Spannungen zwischen 90 und 260V und jede Frequenz, selbst Gleichstrom, angeschlossen werden können. Für die verschiedenen Länder muss ein Hersteller nur den passenden Stecker mitliefern, Schwankungen im Netz haben dann keinen Einfluss mehr.

Wir dürfen uns in dieser Hinsicht also mehr erlauben, solange die Versorgung gut funktioniert. Diese Möglichkeit, mit etwas größeren Schwankungen von Frequenz und Spannung zu leben, eröffnet hervorragende Möglichkeiten, um durch automatische Reaktion auf die Abweichungen das Netz dezentral zu unterstützen. Dazu später mehr.

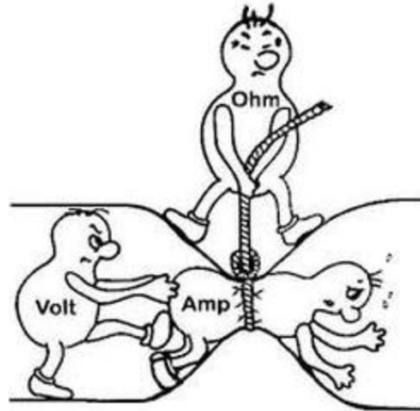
Die schönen neuen Geräte, die bei jeder Spannung und jeder Frequenz gleich gut funktionieren, haben aber einen Haken, was die Stabilität des Gesamtsystems betrifft: Sie halten sich nicht an das ohmsche Gesetz. Sie sind sozusagen Outlaws – und damit gefährlich für die Stabilität des Systems.

## Der Selbstregelleffekt

Das ohmsche Gesetz schreibt der Glühlampe und dem Heizlüfter vor, dass die Stromstärke direkt abhängig von der Spannung zu sein hat (natürlich ist das ohmsche Gesetz kein solches, sondern nur die Beschreibung einer physikalischen Tatsache.)

Oh, jetzt hätte ich fast eine Formel verwendet und die Hälfte meiner Leser verschreckt!

Stattdessen also vielleicht lieber ein Bild, das die wesentlichen Zusammenhänge von Widerstand (Ohm),



[georgsimonohm.weebly.com](http://georgsimonohm.weebly.com)

Spannung (Volt) und Stromstärke (Ampere) anschaulich macht.

Sinkt die Spannung in einem Stromkreis um zehn Prozent, wird damit auch der Strom um zehn Prozent geringer. Die Leistung sinkt sogar um fast zwanzig Prozent. Der gesamte Verbrauch der sogenannten ohmschen Lasten, deren Widerstand sich nicht ändert – das sind die Gesetzestreuen – lässt sich, durch eine Absenkung der Spannung um zehn Prozent, um etwa zwanzig Prozent verringern, ohne dass im Land das Licht ausgeht. Es wird nur etwas dunkler – und das ist vielleicht die letzte Warnung und eine Chance, den Heizlüfter doch lieber auszumachen, bevor das Licht ganz ausgeht!

Die Outlaws allerdings verhalten sich an dieser Stelle nicht fair. Sie verändern einfach ihren Widerstand. Die moderne Energiesparlampe leuchtet genauso hell wie zuvor, und natürlich braucht sie dafür die gleiche Leistung. Wenn die Spannung aber um zehn Prozent sinkt, holt sie sich die fehlende Leistung

rücksichtslos aus zehn Prozent mehr Strom! Der wunderbare Selbstregeleffekt des Netzes wird damit sabotiert. Die Lampen leuchten scheinheilig wie immer, und niemand ahnt, dass das Netz schon auf dem letzten Loch pfeift. Dieses unverantwortliche Verhalten legen übrigens auch alle Computer, Umrichterantriebe und sonstigen Geräte an den Tag, die mit jedem Strom der Welt betrieben werden können. Wir werden die Gesetzlosen später noch ins Gebet nehmen und uns die mildernden Umstände anhören, die sie immer wieder vorbringen.

Einen Selbstregeleffekt haben übrigens auch viele Geräte, deren Leistungsaufnahme frequenzabhängig ist. Dazu gehören konventionelle Elektromotoren, die noch nicht mit einem Umrichter funktionieren. Sinkt die Netzfrequenz, sinkt automatisch auch ihr Verbrauch und wirkt dadurch dem Absinken der Netzfrequenz entgegen. Diese stabilisierende Wirkung ist aber schon daher begrenzt, als für die Netzfrequenz enge Grenzen notwendig sind.

In Zukunft wird es daher nötig sein, diese Regeleffekte künstlich zu verstärken. Denn der „natürliche“, durch die Physik bedingte Selbstregeleffekt wird nicht mehr ausreichen. Ein künstlicher, durch eine einfache Regelung in den Geräten erzeugter, kann aber sogar viel wirkungsvoller sein.

Ein stabiles Netz wird zukünftig also eins sein, das flexibel reagiert aber vor allem nicht zusammenbricht.

## Was riskieren wir bei einem Zusammenbruch der Stromversorgung?

### Beispiele für große Stromausfälle

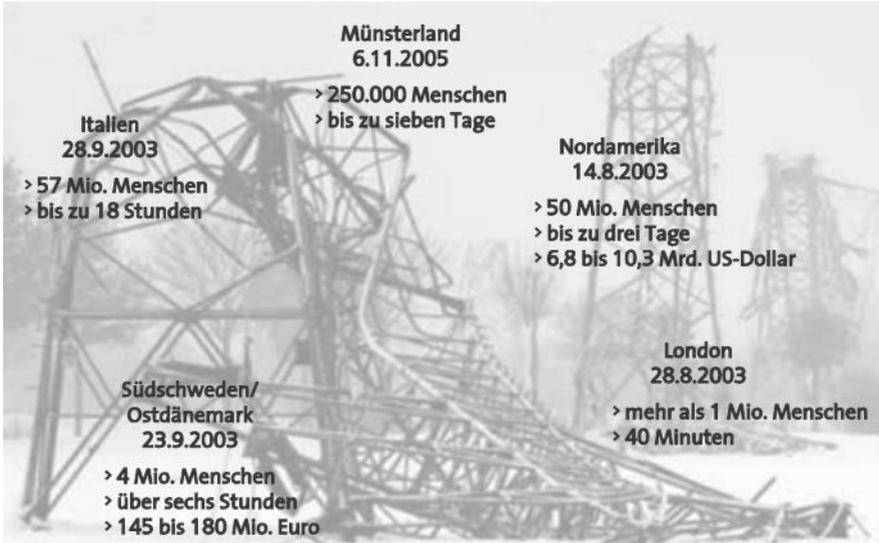


Abb. X: *Beispiele für große Stromausfälle*, Quelle: „Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften - am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung“, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Die Auswirkungen eines Zusammenbruchs der Stromversorgung in Deutschland wären vermutlich verheerend – vor allem im Winter. Nicht zuletzt deshalb, weil uns kaum entsprechende Erfahrungen zur Verfügung stehen, aus denen wir hätten lernen können. Seit dem letzten Weltkrieg hat ja immer alles funktioniert, wenigstens fast. Im November 2005 hat es das Münsterland erwischt: Nach heftigem Schneefall, vereisten Leitungen und starkem Wind brachen die Masten der Stromleitungen zusammen. 250.000

Menschen waren drei Tage lang ohne Strom, teilweise sogar länger. Der wirtschaftliche Schaden wird auf über 100 Millionen Euro geschätzt.

Im November 2006 dann kam es zu einem weiteren großen Stromausfall in Europa. Ursache war die schlecht geplante Abschaltung einer 380kV-Leitung über die Ems, um ein Schiff durchzulassen. Es folgte eine Kettenreaktion von Abschaltungen, das Verbundnetz teilte sich in drei Teile, und in vielen Ländern gab es bis zu zwei Stunden lang keinen Strom.

Eine solche Aufspaltung des europäischen Verbundnetzes wird auch als Systemsplit bezeichnet und gilt als ein Risiko, für das nicht immer genug Regelreserven bereitstehen, die schnell genug reagieren könnten. Später werde ich zeigen, wie dieses Problem mit dezentralen Mitteln verringert werden könnte.

## Der Strommarkt

Kennen Sie den europäischen Strommarkt? Stellen sie sich einen orientalischen Basar vor, der aus Platzgründen in einem Hochhaus untergebracht werden muss. Das macht alles sehr unübersichtlich. Um den Fahrstuhl nicht zu überlasten, wird ohne physisch anwesende Waren und Kunden gehandelt. Damit der Marktplatz ohne Waren und bunte orientalische Trachten aber nicht ganz farblos wirkt, gibt es eine



überwältigende Anzahl von Bildschirmen mit bunten Grafiken.

Wir sind in Leipzig, in der EEX, der Strombörse European Energy Exchange, in einem futuristisch anmutenden Hochhaus. Hier riecht es nicht nach orientalischen Gewürzen, sondern nach Kaffee und Schreibtischarbeit. Wer hier einkaufen will, muss nicht selbst vorbeikommen. Energie wird online gekauft und geliefert. Alle möglichen Arten von Strom werden hier gehandelt, die trotz der bunten Grafiken nur eine Farbe haben – grau.

Es ist wirklich so: An der Strombörse wird nur sogenannter Graustrom gehandelt, Strom also, dessen Herkunft und Erzeugungsart nicht unterschieden wird.

Es gibt einen sogenannten Spotmarkt, wo man Energie kaufen kann, die schon am nächsten Tag vor der Haustür abgeliefert wird, aber auch einen Terminmarkt, an dem bis zu sechs Jahre im Voraus Strom zu festen Preisen bestellt werden kann. Man muss Energie auch nicht an der Börse kaufen, es geht auch OTC, also über den Ladentisch, wie man Over The Counter übersetzen könnte. Im Prinzip direkt beim Erzeuger also, und meist geht es dann um größere Mengen.

Ein Detail dabei lohnt es sich zu erklären, weil an ihm grundlegende Geheimnisse und Widersprüche deutlich werden.

### **Das Merit-Order-Schema**

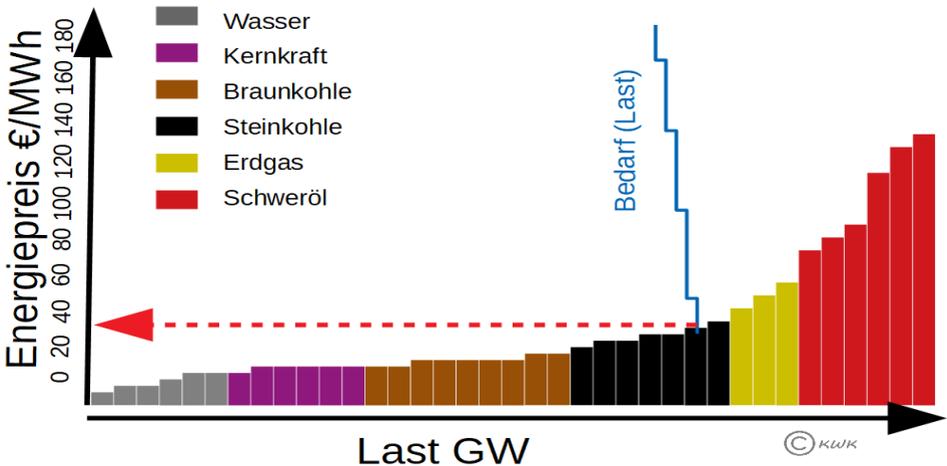
Es geht um das sogenannte Merit-Order-Prinzip, nach dem Stromerzeugung und Preisbildung heute zum großen Teil organisiert sind. Um es zu verstehen, müssen wir uns an die entsprechenden Grafiken heranwagen. Keine Angst, sie sind hilfreich, und wer das Prinzip einmal verstanden hat, bekommt eine Ahnung davon, wie der Hase läuft. Und warum der Igel immer schon zuerst da ist.

Merit Order ist ein Schema, das Stromerzeuger nach der Leistung sortiert. Genauer gesagt, nach dem Preis-Leistungsverhältnis

bei der Lieferung von Energiemengen. Dabei geht es vor allem um die sogenannten Grenzkosten eines Kraftwerks. Das ist der Kostenunterschied, der dadurch entsteht, dass mehr oder weniger Energie produziert wird.

Die Kraftwerke, bei denen die Reduzierung der Leistung am wenigsten Kosten einspart, haben die geringsten Grenzkosten und bieten ihre Energie daher zum günstigsten Preis an. Nach dem Merit-Order-Schema werden sie daher zuerst eingesetzt. Daher hat das Verbrennen von Braunkohle, die direkt ausgebaggert und ohne Zwischenlagerung per Förderband ins Kraftwerk transportiert wird, zunächst Vorrang. Ohne Rücksicht auf den schlechten Heizwert dieses Brennstoffs, die hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen und all die anderen Schadstoffe, die bei der Verbrennung von Braunkohle entstehen. Der technische Hintergrund: Man kann bei diesen Kraftwerken kaum etwas einsparen, wenn das Förderband langsamer läuft. Ebenso verhält es sich mit alten, schon längst abgeschriebenen Kernkraftwerken. Anders ausgedrückt: Billigstrom kommt zuerst.

Werfen wir jetzt ein Blick auf das Schema:



Auf der waagerechten Achse sehen wir die verfügbaren Kraftwerke und deren Angebote. Links sind die Igel, die immer zuerst am Ziel sind und sofort zum Einsatz kommen: Laufwasserkraftwerke, Kernkraft und Braunkohle. Rechts dagegen liegen die teuersten Kraftwerke, die zuletzt zum Einsatz kommen und daher sehr selten in Betrieb sind: Erdgas und Schweröl.

Die blaue, von oben kommende Linie, stellt den Leistungsbedarf da. Die Stufen in ihr gibt es deshalb, weil einige Großkunden nur zu einem maximalen Preis kaufen und eher den Verbrauch reduzieren, wenn der Preis höher ist.

Dort, wo die Nachfragelinie auf die Balken trifft, wird der Preis ermittelt. Dieser Preis gilt dann für *alle* Anbieter – in dieser Darstellung also etwa 38 Euro pro Megawattstunde.

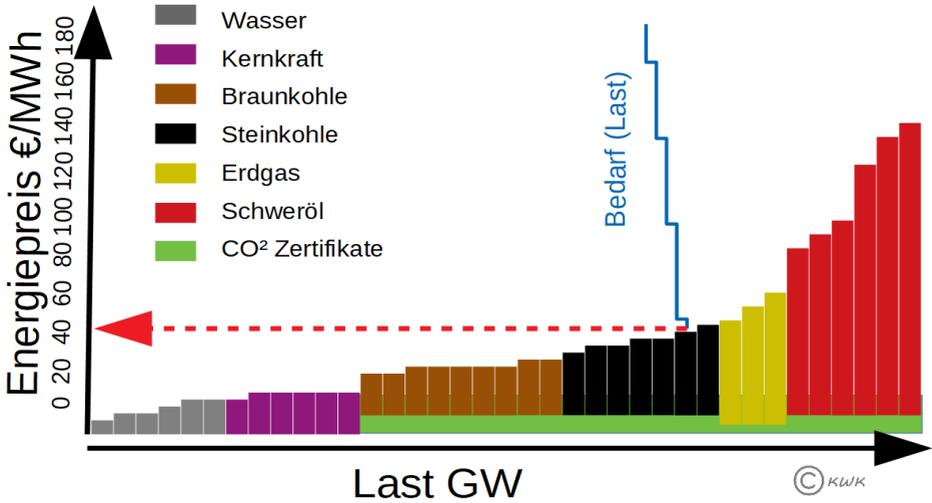
Ein Kraftwerksbetreiber, der Energie für zwanzig Euro pro Megawattstunde oder weniger anbietet, rechnet also tatsächlich mit einem höheren Preis, den er real erzielen wird. Er bietet nur deshalb so günstig an, weil die zwanzig Euro immer noch besser für ihn wären, als die Bagger und das Braunkohlekraftwerk nur auf

halber Leistung laufen zu lassen. Besser für den Kraftwerksbetreiber, wohlgemerkt.

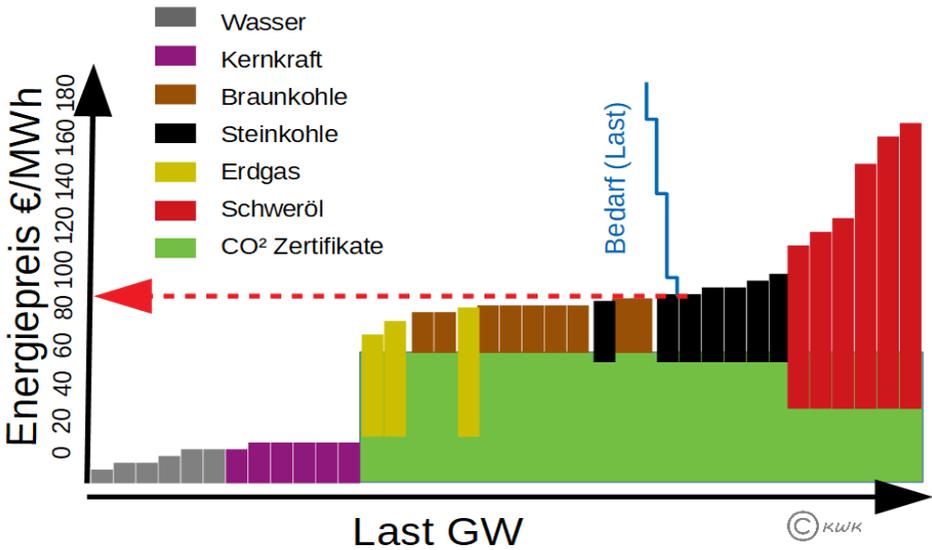
Hier zeigt sich eine Schwäche dieses Prinzips: Es ist durchaus geeignet, immer den billigsten Strom zur Verfügung zu stellen. Es berücksichtigt aber nicht die externen Kosten, also den Schaden für die Allgemeinheit. Zum Beispiel den Anstieg der Kosten durch Umweltverschmutzung und Klimawandel, der beim Einsatz von Braunkohle höher wäre als bei Erdgas.

Inzwischen gibt es eine Reihe von Ansätzen, um diese Schwäche zu korrigieren; einer davon war die Einführung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten, die einen Teil der externen Kosten kompensieren sollten. Bei der Einführung war davon ausgegangen worden, dass der Preis in einigen Jahren etwa

50 € pro Tonne emittiertem CO<sub>2</sub> betragen könnte. Dieser Preis hätte eine gewisse steuernde Wirkung gehabt. Allerdings wurden viele der Zertifikate kostenlos an Kraftwerke und Industrie ausgegeben, um die Wirtschaft zu entlasten. Anfang 2018 lag der Preis immer noch zwischen sechs und sieben Euro und war damit viel zu gering, um die damals beabsichtigte Wirkung zu erzeugen. Bis zum August 2018 ist der Preis allerdings auf etwa 20 Euro gestiegen und Experten erwarten einen weiteren Anstieg. Und: Immer noch wird ein Teil der für den Betrieb eines Kraftwerks benötigten Zertifikate kostenlos verteilt.

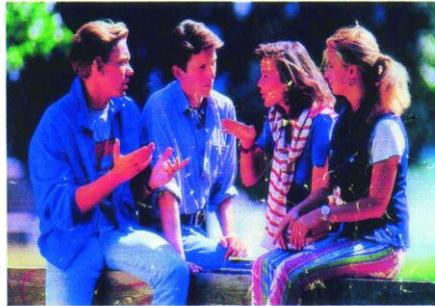


Die CO<sub>2</sub> -Zertifikate sind also zu billig, um eine echte Veränderung in der Struktur der Stromerzeugung bewirken zu können, wie man an dieser Grafik sieht.



Erst bei einem deutlich höheren CO<sub>2</sub>-Preis verschiebt sich die Einsatzreihenfolge der Kraftwerke, wie wir in Abb. X sehen: Die Erdgaskraftwerke kommen jetzt früher zum Einsatz, weil sie deutlich weniger CO<sub>2</sub>-emittieren als die Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke. Die Energiekosten steigen allerdings in diesem Beispiel auf über 80€ pro MWh. Man kann davon ausgehen, dass bei einer Erhöhung der Börsenpreise die Mehrkosten an den Endverbraucher weitergegeben werden. Allerdings würde sich die EEG-Umlage deutlich verringern, was den Preisanstieg theoretisch abmildern würde. Mit der

## Wer kritisch fragt, ist noch längst kein Kernkraftgegner.



Viele junge Leute empfinden Kernkraftwerke als bedrohlich. Wir, die deutschen Stromversorger, haben ihre Kritik nie leichtfertig abgetan. Im Gegenteil: Wir stellen uns dieselben Fragen, die sie bewegen.

Kann Deutschland aus der Kernenergie aussteigen? Ja. Die Folge wäre allerdings eine enorme Steigerung der Kohleverbrennung, mithin der Emissionen des Treibhausgases CO<sub>2</sub>. Denn regenerative Energien wie Sonne, Wasser oder Wind können auch langfristig nicht mehr als 4 % unseres Strombedarfs decken.

Können wir ein solches Vorgehen verantworten? Nein. Der steigende Energiebedarf der dritten Welt verpflichtet die reichen Staaten, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen zu mindern.

Schaffen wir das ohne Kernkraft, allein durch Energiesparen? Nein. Kernkraftwerke liefern 34 % des deutschen Stroms und ersparen der Atmosphäre jährlich 160 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> – bei einem international vorbildlichen Sicherheitsstandard. Also: Treibhaus oder Kernkraft? Das ist hier die Frage!

Viele junge Leute stellen kritische Fragen. Wir auch. Denn unsere schärfsten Kritiker sind wir selbst.

Ihre Stromversorger

Weitergabe von Vorteilen an Endkunden wird aber gern sparsam umgegangen ...

Es gibt allerdings noch einen Haken: Die international gehandelten CO<sub>2</sub>-Zertifikate sind nur sehr schwer auf ihre Echtheit, also eine tatsächliche Reduzierung von Emissionen hin, zu überprüfen. Bei einem deutlich höheren Preis kommt auch deutlich mehr kriminelle Energie ins Spiel, und der Missbrauch könnte steigen. Schon jetzt wird davon ausgegangen, dass ein großer Anteil der Zertifikate zweifelhaft oder gefälscht sind.

Wer hat hier eine Idee für eine wirklich unbürokratische Lösung?

Nun zu den erneuerbaren Energien. Bislang haben wir nur die großen Wasserkraftwerke in der Betrachtung auf dem Schema dabei.

Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) wurde wirkungsvoll und schnell eine Entwicklung gefördert, die vieles übertrifft, was Skeptiker der Energiegewinnung aus Sonne und Wind diesen Energiequellen je zugetraut hätten.

Leider wurden die einschlägigen Aussagen der Stromversorger, wie sie in dieser Anzeige von 1993 zum Ausdruck kommen (Abb. X) von vielen geglaubt. Sie wurden ungeprüft sogar von namhaften Politikern übernommen, die wissenschaftlich gut ausgebildet waren.

In anderen Anzeigen wurden von diesen Stromversorgern neue Mitarbeiter gesucht – mit der expliziten Aufgabenbeschreibung, den Umsatz der Unternehmen dadurch zu sichern, indem sie das Bild der erneuerbaren Energien in der öffentlichen Darstellung diskriminieren sollten. So wollten die etablierten Stromversorger in Zukunft ihr Geschäft sichern. Dabei gelang ihnen eine interessante Wortschöpfung: das Erkennen von „Eigenerzeugungsgefahrenpotentialen.“

020 VERKAUF/VERTRIEB – INNENDIENST

ENERGIE



Wir sind ein modernes Energie-Dienstleistungsunternehmen und versorgen Kommunen, Industrie und Gewerbe, Landwirtschaft und private Haushalte im westlichen Teil des Landes Brandenburg mit Strom: sicher, bedarfsgerecht, umweltverträglich, wirtschaftlich und so kostengünstig wie möglich.

Unsere weitere Geschäftstätigkeit erstreckt sich auf neue Dienstleistungen. Dazu zählen Wärmeversorgung, Straßenbeleuchtung, Abfallwirtschaft und Recycling, Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Gebäudemanagement, Verbraucherschutz sowie Telekommunikation.

Für unsere Abteilung Marketing/Vertrieb Großkunden suchen wir:

### Vertriebsmitarbeiter

Sie sind zuständig für alle mittelspannigen und bauen partnerschaftliche Kundenbeziehungen auf. Ihre Aufgaben umfassen Vertragsverhandlungen zum Abschluss einer mittel- oder langfristigen Vertragsvereinbarung, Sie überprüfen Sie Stromrechnungen aus und zur Prognose der Verbrauchsentwicklung bei der Bearbeitung von Vergleichsrechnungen in Ihrem Aufgabenbereich.

sowie eine/n

### Sachbearbeiter/in Wettbewerbsangebots

Der Schwerpunkt Ihrer Tätigkeit liegt zum einen in der Sicherung des Umsatzes durch Verhinderung von Stromerzeugungsgefahrenpotenzialen (z.B. Erkennen von Eigenzeugungsgefahrenpotenzialen). Desweiteren sind Sie verantwortlich für das Geschäftsfeld Stromdurchleitung. Dazu gehören:

- Mitwirkung bei der Kostensträgerrechnung zur Bestimmung der Durchleitungsentgelte;
- Verhandlung und Abschluss von Durchleitungsverträgen.

Für diese anspruchsvollen Aufgaben setzen wir eine abgeschlossene Fachhochschul- bzw. Hochschulbildung in den Fachrichtungen Elektrotechnik oder Elektroenergieanlagen voraus. Sie verfügen über kaufmännische Kenntnisse und bringen Verhandlungsgeschick mit. Kontaktfreudiges und sicheres Auftreten sind für Sie selbstverständlich.

Wenn Sie diese Tätigkeiten herausfordern, senden Sie bitte Ihre vollständigen Bewerbungsunterlagen mit Angabe des möglichen Eintrittstermins bis zum 11.04.1997 an:

MEVAG  
Abteilung Personal- und Sozialbetreuung, 14464 Potsdam

Für Erstinformationen steht Ihnen Frau Zimmermann unter der Telefonnummer 0331/ 2 34 34 02, Berliner Str. 10, 14467 Potsdam, zur Verfügung.

**MEVAG**  
MÄRKISCHE ENERGIEVERSORGUNG AG

## Wollen Sie echten Erfolg mitmachen

Zur Verstärkung unseres er  
suchen wir eine/n

... Der Schwerpunkt  
Ihrer Tätigkeit liegt zum  
einen in der Sicherung des  
Umsatzes durch Verhinderung  
von Stromerzeugungsg-  
anlagen (z.B. Erkennen von  
Eigenzeugungsg-  
efahrenpoten-  
tialen) ...

030 TECHNISCHE BERU

Architektur-/Ingenieurbüro  
sucht für den Bereich

### BAULEITUNG

Architekten / Bauingenieure  
mehrfähriger Berufserfahr-  
spruchsvolle Neu- und Altbau  
Die Fähigkeit zur Durchführun-  
gung von Bauleitungsteam  
wie die vollständige Kenntnis d  
§ 15, Lph. 6-9.

Wir bieten neben der Perspekt-  
verhältnisses gute berufliche E  
eine leistungsgerechte Bezahl-  
Interessierte Architekten/-inn-  
richten ihre schriftliche Bewer-

**BÜRO AM LÜ  
KRAFT SCHEI  
ARCHITEKTEN, BER/  
Lützowplatz 7 · 107**

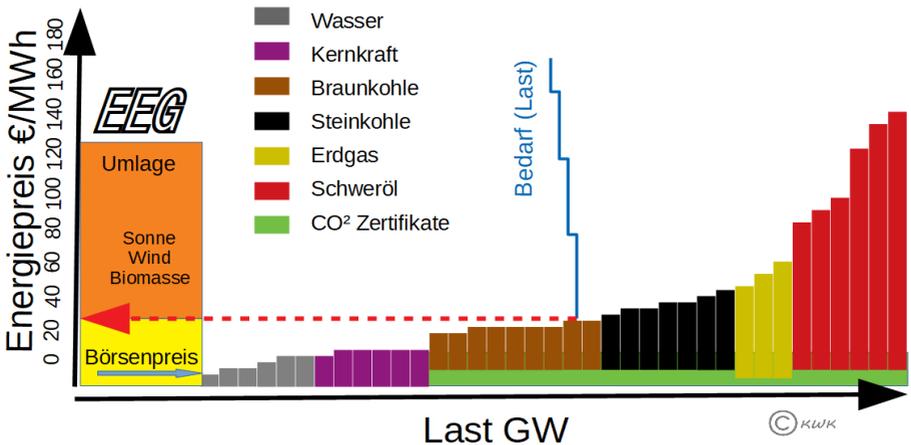
Kühlschrank

Quelle: Solarenergie Förderverein Aachen

## Neue Igel im Spiel

Aber zurück zu unserem Schema: Nach dem EEG haben erneuerbare Energien Vorrang im Netz und sollen die konventionelle

Stromerzeugung ersetzen. Die Differenz zu den Börsenpreisen wird durch eine Umlage auf den Strompreis ausgeglichen. Diese EEG-Umlage war zunächst Jahr für Jahr angestiegen und wird in Zukunft wieder fallen. Durch die Vorrangstellung in diesem Gesetz übernahmen Sonne, Wind und Biomasse die Rolle der Igel, die immer zuerst da sind. In unserem Merit-Order-Schema sieht das so aus:



Die neuen Igel sind also schon da, bevor die anderen Kraftwerke zum Zuge kommen – selbst, wenn sie Energie verschenken würden. Die konventionellen Kraftwerke werden einfach nach rechts verschoben und der Börsenpreis der Energie (und damit der Ertrag für alle Kraftwerke) sinkt. Ein unfaires Spiel mit gezinkten Karten?

Ja, und das mit gutem Grund: Hier wird nicht nur um Geld gespielt, sondern um unsere Zukunft. Und in Zukunft muss Strom anders erzeugt werden, wenn wir unseren Planeten nicht verheizen wollen.

Die Dampfmaschine hat gegen die Solarzelle verloren und muss sich mit dem ehrenvollen Platz im Museum abfinden. Wer

will heute noch Dampflokomotiven haben, außer für eine Museumsfahrt? Dabei sollte übrigens auch das Rauchen im Zug erlaubt sein – es war damals ebenfalls erlaubt, und der Zug rauchte sogar richtig.

Erneuerbare Energien haben im Prinzip keine Grenzkosten, die bei den anderen Kraftwerken durch den Verbrauch von Brennstoffen entstehen, allerdings hohe Kosten bei der Errichtung der Anlagen. Das EEG finanziert diese Anfangsinvestitionen über eine erhöhte und für zwanzig Jahre festgelegte Vergütung – vermutlich die beste Technologieförderung, die es je gab.

Nach zwanzig Jahren kann ein Anlagenbetreiber nur noch den Börsenpreis für die gelieferte Energie beanspruchen – oder einen Preis, den er mit seinem Netzbetreiber vereinbart hat. Dann haben wir günstigen Solarstrom für alle, denn die Anlage hat sich für den Betreiber bereits rentiert und muss nicht mehr gefördert werden. Wer den Strom selbst nutzen kann, hat dann Vorteile, weil er weniger von seinem Netzbetreiber kaufen muss.

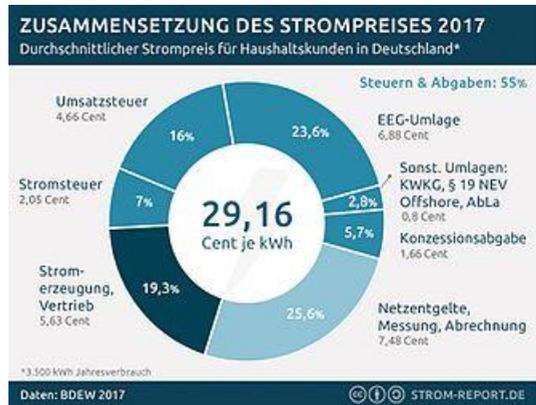
Trotzdem sind die neuen Igel an ihrem sicheren Startplatz: Das EEG schreibt ihre bevorzugte Verwendung vor. Die ist auch sinnvoll, genauso wie der Betrieb der vorhandenen Wasserkraftwerke. Noch ist er sinnvoll, obwohl man langfristig in diesem Bereich vermutlich umdenken wird: Es könnte eine Zeit kommen, in der man die gewaltigen Staudämme wieder einreißen und die Flüsse renaturieren wird. Wenn Sonnenenergie im Überfluss genutzt und gespeichert werden kann, ist Wasserkraft nicht mehr notwendig, und es wird noch andere Veränderungen geben. Dazu später mehr.

## Geschenkt!

Bei geringer Netzlast, gutem Wind und reichlich Sonne kommt es vor, dass der Strompreis an der Börse auf null fällt oder sogar negativ wird. Gut für die Großabnehmer von Energie wie Industrie und Stadtwerke, aber leider

kein Vorteil für den Endverbraucher, denn: Die Börsenpreise werden nicht an die privaten Endkunden weitergegeben. Der Strompreis, den wir bezahlen, hat nur zu einem geringen Teil mit den realen (variablen) Kosten der Erzeugung zu tun. Daher werden sie bislang kaum berücksichtigt.

Allerdings ist ein zeitweiliger Überschuss von Strom im Moment ein unbefriedigender Zustand. Und zwar deshalb, weil gleichzeitig noch Strom aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird. Leider werden die Kohlekraftwerke dann nicht für ein paar Stunden abgeschaltet, dafür sind sie nicht flexibel genug. Sie sind für Dauerbetrieb auf möglichst voller Leistung angelegt. Heute kann man zwar bereits Steinkohlekraftwerke mit moderner Feuerung bauen, die deutlich flexibler sind, aber sinnvoll ist das nicht. Ein neues Kraftwerk lohnt sich nur, wenn es für dreißig bis vierzig Jahre betrieben werden kann. Eine weitere Verbrennung von Kohle in den nächsten dreißig Jahren aber wäre ein Fehler und nicht zu vertreten. Es gibt schon viele Leute, die sich damit beschäftigen, wie man den Kohlenstoff aus der Atmosphäre wieder unter die Erde bringen kann. Das ist allerdings sehr kompliziert und teuer.



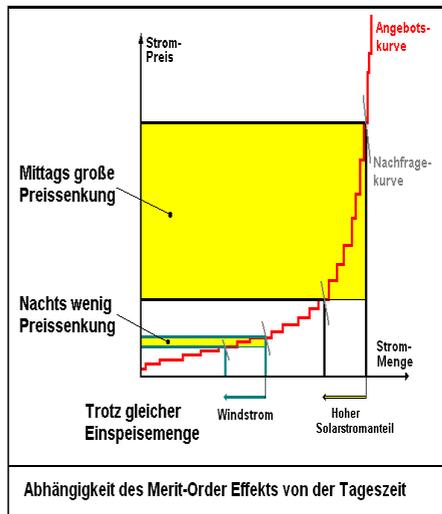
Die auf jeden Fall günstigere Lösung ist es, die Verbrennung von Kohle so schnell wie möglich zu beenden. Das bedeutet, so schnell, wie sie durch saubere Energiequellen ersetzt werden können. Das sollte einfacher und schneller zu erreichen sein als die Besiedlung des Mondes.

Es stehen genug Alternativen zur Verfügung, die ich später noch beschreiben werde. Bislang haben wir nur die Energiepreise beachtet. Doch das ist längst nicht alles, worum es beim Strommarkt geht.

### **Strom ist keine Lagerware**

Wie oben schon dargestellt, muss immer genau so viel Strom erzeugt werden, wie gerade verbraucht wird. Früher bedeutete das regelmäßig einen besonders hohen Verbrauch zur Mittagszeit, wenn überall gekocht wurde.

Der ansteigende Bedarf führte zu hohen Spitzenpreisen durch den dann nötigen Einsatz von teuren Gas- und Ölkraftwerken – sehr zur Freude der anderen Kraftwerksbetreiber, die ebenfalls von diesem hohen Preis profitierten. Wenn heute die Sonne scheint, liefert sie weit mehr als mittags für das Kochen benötigt wird. Inzwischen gibt es solche Spitzenpreise daher nur selten: dann nämlich, wenn weder ausreichend Wind- noch Sonnenenergie zur Verfügung steht und gleichzeitig eine hohe Last im Netz vorliegt. Es gibt inzwischen an den meisten Tagen ausreichend Erzeugungskapazitäten, sodass die teuren Öl- und



Gaskraftwerke kaum noch zum Einsatz kommen. Die Tage, an denen Sonne und Wind so wenig zur Versorgung beitragen, dass der Börsenpreis hoch wird, sind selten geworden. Die zeitweilig auftretenden Spitzenpreise waren für die Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerks früher von großer Bedeutung.

Bislang haben wir den Stromhandel als Energy-only-Markt betrachtet, bei dem es nur um die Preise für die gelieferten Energiemengen geht. Das teure Vorhalten von Reserven rentiert sich für den Betreiber nur dann, wenn diese oft genug zu hohen Preisen eingesetzt werden. Da dies in Zukunft fraglich ist, besteht das Problem, dass Betreiber ihre Kraftwerke außer Betrieb nehmen, weil sie unrentabel sind. Es kann aber sein, dass diese Reservekapazitäten einmal gebraucht werden. Wir sollten dies nicht der vielbeschworenen „Intelligenz des Marktes“ überlassen. Es geht vielmehr um Verantwortung, Versorgungseinheit und Katastrophenschutz. Hier ist der Staat gefordert.

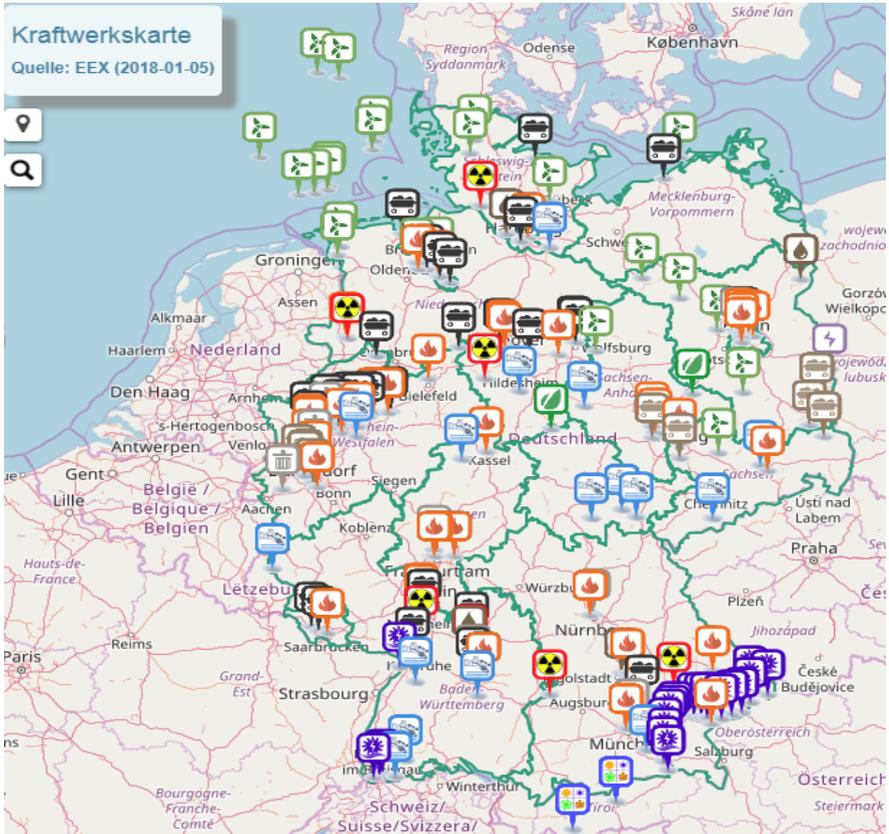
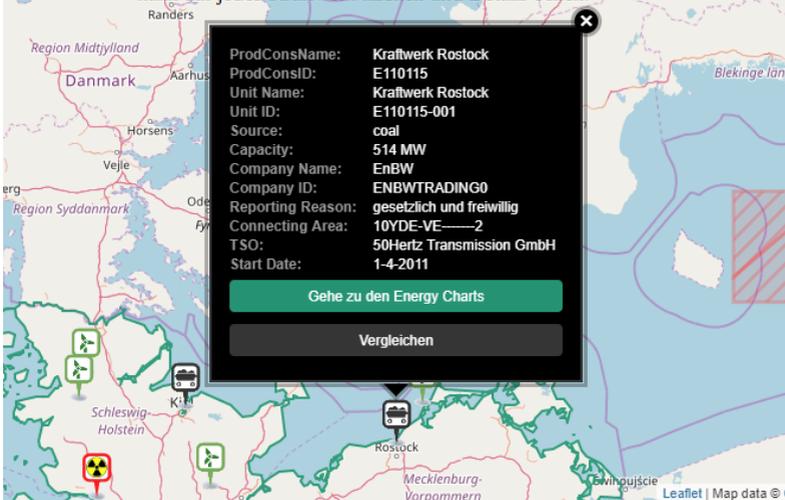


Abb. X: Interaktive Karte der Standorte der Kraftwerke in Deutschland, Quelle: [https://www.energy-charts.de/osm\\_de.htm?country=DE](https://www.energy-charts.de/osm_de.htm?country=DE). Man kann auf jedes Kraftwerk klicken und Details sehen.



## **Was ist ein Kapazitätsmarkt?**

Zur Lösung dieses Problems wird die Einführung eines sogenannten Kapazitätsmarkts diskutiert. Was verbirgt sich hinter dem abstrakten Begriff? Bei einem Kapazitätsmarkt würde ein Betreiber schon für die reine Bereithaltung eines Kraftwerks bezahlt werden und nicht nur für gelieferte Energiemengen. Es geht also darum, bestimmte Leistung von Kraftwerken zu bestimmten Zeiten bereit zu halten, und auch wenn sie nicht zum Einsatz kommen, wird diese Bereithaltung bezahlt. Um die Einführung eines solchen Kapazitätsmarktes gibt es seit längerer Zeit Kontroversen in Deutschland. Man befürchtet weitere Kostensteigerungen und geht davon aus, dass die Kraftwerkskapazitäten bisher noch ausreichen. Aber immer, wenn gefordert wird, die Kohleverstromung zu verringern, reichen sie plötzlich nicht mehr aus!

Auch eine sogenannte „Kaltreserve“ kann dabei eine wichtige Rolle spielen. Kraftwerke in Kaltreserve sind normalerweise nicht mehr in Betrieb, werden aber nicht endgültig stillgelegt. Bei Bedarf können sie wieder hochgefahren werden, was je nach Bauart und Brennstoff einige Stunden oder Tage dauert.

Eines der Kernziele bei der Stromversorgung sollte Versorgungssicherheit sein. Die wichtigsten Risiken für eine sichere Versorgung liegen in einer selten vorkommenden sogenannten Dunkelflaute im Winter: Macht sich in weiten Teilen Europas für längere Zeit eine stabile Hochdruckwetterlage mit feuchter, kalter Luft breit, gibt es nur sehr wenig Windenergie und kaum Solarenergie bei einem gleichzeitig hohen Bedarf für Heizungen: Es kommt zu einem Engpass.

In dem kalten Winter 2012 etwa mussten in Deutschland einige Kohlekraftwerke aus der Kaltreserve wieder in Betrieb genommen werden. Sie konnten die Versorgung mit absichern – und lieferten zusätzlich sogar dringend benötigten Strom nach Frankreich.

Daher liegt die Zukunft der Steinkohlekraftwerke vor allem in der Kaltreserve.

Besonders moderne Kohlekraftwerke sind durchaus für einen Teillastbetrieb geeignet und können gerade bei dieser Betriebsweise das Netz stabilisieren. Oft wird angenommen, dass sie dafür nicht flexibel genug sind. Aus den technischen Daten ergibt sich aber, dass sie ihre Leistung um drei bis vier Prozent ihrer Nennleistung pro Minute verändern können. Das ist bei Weitem genug, um auf Wetteränderungen oder Prognosefehler zu reagieren. Ihre vermeintliche mangelnde Flexibilität beruht eher auf dem Geschäftsmodell und den Rahmenbedingungen der Stromerzeugung. Auch die Kraft-Wärme-Kopplung ist in diesem Zusammenhang ein Aspekt, der berücksichtigt werden muss: Mit der Abregelung von Kraftwerken reduziert sich auch deren Wärmeleistung. Der Vorteil dieser Nutzung von Kohlekraftwerken und als Kaltreserve liegt darin, dass die Emissionen erheblich reduziert werden können und gleichzeitig eine hohe Reserveleistung verfügbar ist.

|  | 2013<br>(Durchschnitt<br>Bestand)                                  | 2023<br>(Flexibilisie-<br>rung Be-<br>standsanla-<br>gen) | 2023<br>(Neuanlagen) | 2050<br>(Neuanlagen) |
|--|--|---|----------------------|----------------------|
| Netto-Wirkungsgrad in % (Bestpunkt)                              | 40   | 43  | 46                   | 50                   |
| Netto-Minimallast-Wirkungsgrad in %                              | 36   | 38  | 42                   | 44                   |
| Minimallast in %PN   | 40   | 25  | 17,5                 | 15                   |
| Lasttransient in %PN/min   | 3  | 4   | 6                    | 7                    |
| Anfahrzeit kalt <sup>8</sup> in h                                | 4  | 4   | 3,5                  | 3                    |
| Anfahrzeit heiß in h<br>(Vorhaltezeit maximal 8 h)               | 2  | 2   | 1,5                  | 1                    |
| Lebensdauer in a   | 50   | 50  | 50                   | 50                   |
| Verfügbarkeit in h/a   | 7.500  | 7.500   | 7.500                | 7.500                |
| Vollastbenutzungsstunden in h/a                                  | 4.500<br>(4.000 BDEW<br>im Mittel aller<br>Steinkohle-<br>Anlagen) | 3.500   | 4.000                | 1.500–4.500          |
| Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen in t/(GW h) <sub>t</sub> | 342 <sup>9</sup>   |   |                      |                      |

Tabelle 3: Technische Daten Dampfturbinenkraftwerke – Steinkohle 600-MW-Klasse

Abb. X: Durchschnittliche Anfahrzeit kalt / heiß und Laständerungspotential in Prozent der Nennleistung pro Minute von Dampfturbinenkraftwerken Steinkohle der 600-MW-Klasse

Die Voraussetzung für eine solche Nutzung eines Kraftwerks ist ein wirtschaftlicher Betrieb. An dieser Stelle wären Anpassungen notwendig. Wenn Kohlekraftwerke in der Leistung reduziert werden, um die Abschaltung von Windparks zu vermeiden, ist das sinnvoller als die Ausgleichszahlungen für die Abschaltung der Windkraft, die die EEG-Umlage erhöhen und damit von privaten Stromkunden und der mittelständigen Wirtschaft bezahlt werden müssen.

Was in diesen Situationen helfen kann, ist der Einsatz von Speichern. Der Kohlevorrat eines Kraftwerks ist nichts anderes als gespeicherte Energie. So gesehen ist die Abregelung eines Kohlekraftwerks zugunsten der Wind- oder Solareinspeisung eine sinnvolle Speichernutzung.

Ein Problem in diesem Zusammenhang ist allerdings die Frage, wer für die Systemdienstleistungen im Netz am Ende bezahlt: Wenn eine Maßnahme dazu führt, dass der Strompreis steigt, geht auf allen Seiten sofort das Geschrei los. Zum Teil scheint mir das übertrieben zu sein. Es ist zwar richtig, dass die Strompreise für den Endverbraucher gestiegen sind – allerdings auch die Energieeffizienz von Lampen und anderer Haushaltsgeräte. Damit werden die Mehrkosten bei konsequenter Nutzung moderner Haushaltstechnologien (LED-Lampen, stromsparende Waschmaschinen etc.) durchaus kompensiert. Steigt der Energieverbrauch dennoch an, hat das eventuell (auch) mit höheren Komfortansprüchen zu tun: Ein Wäschetrockner ist gegenüber der Wäscheleine natürlich bequemer, aber auch ein Stromfresser. Ein Fernsehgerät im

Scheunentorformat verbraucht natürlich mehr Energie als ein kleineres Gerät.

Für größere Industriekunden sind die Strompreise eher gesunken, und das Leiden der Wirtschaft würde wohl geringer ausfallen, als das regelmäßige Gezeter beim Thema Energiepreise es vermuten lässt.

Im Moment wurde politisch unter anderem folgende Strategie vereinbart: Bis zum Jahr 2019 sollen fünf Braunkohlekraftwerke mit insgesamt 2,7 Gigawatt für vier Jahre in eine sogenannte „Sicherheitsbereitschaft“ überführt werden – das heißt: Bei Bedarf müssen sie in zehn Tagen einsatzbereit sein. Für diese Bereitschaft erhalten die Betreiber die stolze Summe von 1,61 Milliarden Euro. Und: Bei vorzeitiger endgültiger Stilllegung erhalten sie noch einmal ein bis zwei Milliarden.

Es darf die Frage gestellt werden, ob es für diese dreieinhalb Milliarden nicht auch andere Möglichkeiten zur Bereitstellung von Reserven gegeben hätte, die sogar schneller einsatzbereit wären. Zum Beispiel könnte ich mir vorstellen, dass die Kraftwerke auf Ölfeuerung umgebaut würden. Öl ist gut speicherbar und friert im Winter nicht ein, was bei der Braunkohle in der DDR schon einmal zu einer Katastrophe geführt hat: Im Januar 1979 musste die Volkarmee in der DDR die gefrorene Kohle mit Spitzhacken aus dem Boden schlagen, und Millionen von Menschen saßen einige Tage lang bei Kerzenlicht in der Kälte.

Die höheren Brennstoffkosten sind kein Problem, wenn diese Reserven nur sehr selten eingesetzt werden.

## Erneuerbare Energien

### Der Feuerteufel

Wie lange nutzen wir eigentlich schon erneuerbare Energien? Leider gibt es dazu keine genauen Überlieferungen. Mit der unbewussten Nutzung haben wohl die Algen angefangen: „Es ward Licht“, und nach einigen hundert Millionen Jahren entstanden im sonnendurchfluteten Wasser die ersten Algen, die mithilfe der Photosynthese Energie aus Licht produzierten. Vielleicht sind sie auch tiefgefroren aus dem Weltall ins Wasser gefallen?

Die Erfindung – oder besser: Nutzung – des Feuers hingegen sollte eine Domäne des Menschen werden: Kein Tier hat sich bislang an seine Nutzung gewagt. Auch wenn unsere Katze sich gern vor den Ofen legt, ist sie doch weit davon entfernt, sich dafür zu interessieren, wie es funktioniert. Der Mensch hat also etwas, das ihn definitiv von allen Tieren unterscheidet. Nicht der Gebrauch von Werkzeugen ist das Besondere an ihm – es ist das Feuer, das Prometheus den Göttern gestohlen hat. Nehmen wir das ernst, so ist der Mensch der Feuerteufel unter all den Tieren um ihn herum, die die offenen Flammen fürchten – und genau dadurch Mensch.

Nachdem dieses verwegene Wesen es gelernt hatte, das Feuer – Feuer, das zufällig in der Natur vorkam, z. B. durch Blitzeinschlag – zu bändigen, lernte es bald seinen Komfort (Wärme) und seine kulinarischen Möglichkeiten zu schätzen. Das mag eine Million Jahre oder etwas länger her sein.

Bis zur Kunst des systematischen Feuermachens war es sicher noch weit. Es ist auch heute noch schwierig (sogar für einen Physiker), wenn er nur die „Hausmittel“ des Waldes zur Verfügung hat. Auf jeden Fall ging es dabei um Autonomie, um Unabhängigkeit und Flexibilität. Was für ein Vorteil, wenn man in der Lage war, nach einer langen Wanderung ein wärmendes Feuer zu entzünden!

So funktioniert es offensichtlich, wenn man die richtigen Sachen findet und weiß, wie es geht:

Wie machten die Steinzeitmenschen Feuer?



Wie machten die Steinzeitmenschen Feuer?

Der Experimentalarchäologe Rudolf Walter demonstriert, wie Steinzeitmenschen schon vor 40.000 Jahren Feuer entzünden konnten.

Quelle:

<http://www.planet-schule.de/sf/php/sendungen.php?sendung=10145>

Es gibt noch andere Methoden, wie etwa das berühmte „Feuerbohren“ mit einem runden Stab, das viele von uns aus einschlägigen Illustrationen über Steinzeitmenschen kennen. Im Winter kann man ferner aus einem Stück Eis ein behelfsmäßiges Brennglas (Sammellinse) formen und mit Sonnenlicht zündeln. Diese Methode ist für die Steinzeit aber nicht belegt.

Der Feuerteufel war ein Erfolgsmodell auf der Erde und hat sich weiter ausgebreitet als jedes andere ihm verwandte Wesen. Er hat jeden natürlichen Feind bezwungen und viele davon ausgerottet. Die noch übrig gebliebenen sind inzwischen auf seinen Schutz angewiesen.

Der größte Teil dieser dramatischen Entwicklung, die massiven Veränderungen der Natur und die unwiederbringliche Ausrottung von Arten, hat sich in den letzten Jahrhunderten ereignet. (Auch wenn die Jäger der Steinzeit schon vor 20.000 Jahren die ersten

Tiere ausgerottet hatten.) Die schnell wachsende Anzahl der Menschen führte auch dazu, dass er seit einigen tausend Jahren damit begann, die entsprechenden Ressourcen (Holz, Wälder) nicht nur zu nutzen, sondern durch Kahlschlag zu dezimieren. Vorher war „die Welt noch in Ordnung“: Der Brennstoff Holz wuchs immer wieder nach, und es war eine Heldentat, ein Stück Wald gerodet und Ackerland oder Weidefläche gewonnen zu haben. Im Laufe der Zeit aber gab es immer mehr Menschen – und darum gab es immer öfter nicht genug Holz. Schon im 16. Jahrhundert machten sich die ersten klugen Köpfe in Europa Sorgen um den Erhalt der Wälder und, vermutlich unabhängig, etwa gleichzeitig in Japan.– Allerdings mit bescheidenem Erfolg

### **Nicht genug Holz**

Der Bedarf an Brennstoff wuchs bald noch schneller als die Menschheit selbst, denn Techniken wie die Salzsiederei oder später gar die Dampfmaschine verbrauchten Unmengen an Holz. Und auch Schiffe versenken war schon in der Antike ein beliebtes Spiel, das nicht nur Menschenleben kostete, sondern auch große Mengen von allerbestem Holz. Auch die Herstellung von Eisen verbrauchte im Mittelalter viel: etwa 1.000 Tonnen Holz für eine Tonne Eisen. Daher war Eisen früher so wertvoll.

### **Die fossilen Retter der Wälder**

Bald wurde das Holz so knapp, dass man auf die eigentlich ungeliebte Kohle zurückgreifen musste: Das Zeitalter der fossilen Brennstoffe hatte begonnen (Fossilis ist lateinisch und bedeutet ausgegraben, man bezeichnet damit Zeugnisse vergangenen Lebens, die mindestens 10.000 Jahre alt sind). Zumindest in Europa und Nordamerika hat die Kohle wohl die letzten Wälder gerettet. Allerdings hat die Nutzung der fossilen Energieträger auch Folgen.

Zunächst schien – endlich! – ein riesiger Energievorrat verfügbar zu sein, und nicht nur das, was regelmäßig nachwächst. Damit konnte sich eine Wirtschaftsform entwickeln, in der die menschliche Muskelkraft keine große Rolle mehr spielte. Die neue, weitaus stärkere Kraft, kam aus der reichlich verfügbaren Kohle und trieb Lokomotiven, Dampfschiffe und Fabriken an. Bald kam das Erdöl dazu, und auch das Gas aus der Erde, das man zunächst nur an den Ölquellen „abgepackelt“ hatte, wurde genutzt.

1945 wurde eine noch gewaltigere Kraft entfesselt als das chemische Feuer – die Kernenergie. Mit einer einzigen Bombe konnte man nun eine Großstadt zerstören und hunderttausend Menschen töten. Was für eine Waffe! Jeder wollte sie so schnell wie möglich haben, bevor der Feind sie hätte. Es dauerte nur zwei Jahrzehnte, bis reihenweise Bomben getestet wurden, die sogar noch viel schrecklicher waren. Man musste sich Sorgen machen und begann gleichzeitig die Kernkraft auch friedlich zu nutzen. Sie war nicht ungefährlich, aber ihr hohes Energiepotential erschien so vielversprechend. Sogar so sehr, dass man bald davon träumte, Energie verschenken zu können, weil sie so billig zu werden versprach, dass sich das Zählen von Kilowattstunden nicht mehr lohnte. Das erste große Kraftwerk zur elektrischen Energieerzeugung wurde 1954 in Obnisk bei Moskau in Betrieb genommen. Wenig später begann auch in den USA die Energieerzeugung aus Kernenergie. In den siebziger Jahren gab es einen großen Zuwachs an Kernkraftwerken, insbesondere nach der ersten Ölkrise 1973. Aber auch Kritik an der Kernkraft kam auf.

Gleichzeitig ließ der berüchtigte saure Regen (verursacht durch Verbrennung des in Kohle und Öl enthaltenen Schwefels) die Wälder absterben und vergiftete Flüsse und Seen – ein Argument mehr für die vermeintlich „saubere“ Kernkraft.

Etwas später gab es endlich wirkungsvolle Filter für Kraftwerke und Katalysatoren für die Autos, aber um ihre Einführung und Anwendung musste heftig gestritten werden. Es ist gerade einmal 35 Jahre her, dass die Automobilindustrie mit Nachdruck verkündete, der Katalysator könne nicht eingesetzt werden, weil das dafür notwendige bleifreie Benzin die Motoren zerstören würde. Gleichzeitig wurden die Katalysatoren im Geheimen schon getestet – zum Beispiel in den Fahrzeugen der Polizei.

Inzwischen haben wir mit Tschernobyl und Fukushima schreckliche Katastrophen durch Kernkraftwerke erleben müssen – allerdings noch keine im Zusammenhang mit Windkraft oder Sonnenenergie.

### **Das Ende des Feuerzeitalters**

Versuchen wir einmal, uns in zukünftige Historiker hineinzusetzen. Wie werden sie unsere heutige Zeit betrachten? Vermutlich werden sie sie aus der Distanz als Epoche eines fundamentalen Wandels begreifen, von dem der Beginn des digitalen Zeitalters ein wichtiger Aspekt ist. Aber auch unsere Art und Weise, mit Energie umzugehen, sie zu gewinnen und zu nutzen, steht vor nachhaltigen Veränderungen. Wir erleben heute das Ende eines langen Zeitalters, das etwa eine Million Jahre gedauert hat, der Feuerzeit. Wo brauchen wir in Zukunft noch Feuer? Der Verbrennungsmotor, ob nun Benzin oder Diesel, ist ebenso auf dem Rückzug wie jede Form des Heizens, die mit direktem Feuer zu tun hat, also Öl- oder Gasheizung oder noch konventionellere Formen wie die Verfeuerung von Kohle oder Holz. Die Wärmepumpe, einst kritisiert als bessere Stromheizung, setzt sich zunehmend durch, und je mehr Flexibilität wir im Stromnetz benötigen, desto mehr kann die Wärmenutzung von Strom ihre Vorteile ausspielen, da Wärme leichter und günstiger zu speichern ist als elektrische Energie. Das

Argument, dass in den Kraftwerken dafür Kohle verbrannt werden muss und eine Stromheizung immer einen viel höheren Primärenergieeinsatz erfordert, wird mit dem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung immer schwächer.

Zugleich wird in vielen Kommunen aus ökologischen Gründen schon über ein Verbot von Holzöfen (Kaminen) gestritten, da sie die Luft zu sehr mit Schadstoffen belasten. Meiner Meinung nach ist dies nicht der richtige Weg – die Holzöfen müssen nur richtig konstruiert und bedient werden. Dann sind sie durchaus ein Mittel, um die im Holz gespeicherte (und „nachwachsende“, also nachhaltige) Sonnenenergie als Reserve zu nutzen. Die Frage ist nur, wie lange wir so etwas noch brauchen und wann das prasselnde Feuer im Kamin zu reinem Luxus wird.

Auch bei der elektrischen Beleuchtung „brennt oder glüht“ bald nichts mehr: moderne LED-Lampen leuchten nur noch, werden aber kaum noch warm – und nutzen daher die elektrische Energie viel effizienter aus. Wir werden in Zukunft zwar wohl noch ein paar Kerzen haben, aber eher aus dekorativen Gründen. Die

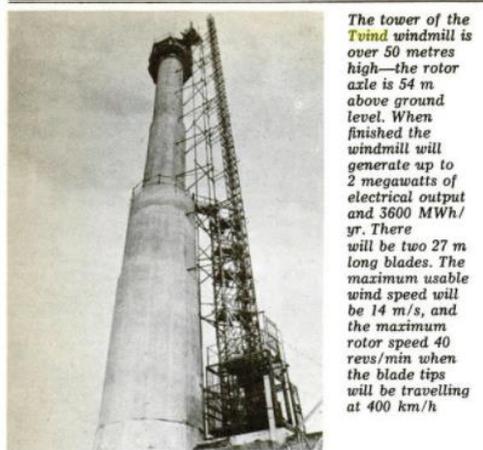
Zukunft führt ganz klar weg vom Feuer: Wind und Sonnenenergie arbeiten ohne jegliche Verbrennung und alle elektrischen Antriebe (die Zukunft des Autos) auch. Die meisten Züge fahren ohnehin längst elektrisch. Bleibt im Grunde nur noch die Raumfahrt: Ohne das Feuer der Raketentriebwerke werden wir die Erde auch zukünftig kaum verlassen können. Doch insgesamt gilt: Die Solarzelle leitet das Ende des Feuerzeitalters ein – und begräbt fast alle Verbrennungsantriebe, nicht nur die Dampfmaschine.

## Das EEG

Wie viele andere Dinge, hat das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gleich mehrere Vorgeschichten: Kalter Krieg, Ölkrise, Tvind, Gorleben, Wackersdorf, Tschernobyl ...

Einige davon kann ich selbst bezeugen, und diese hier ist vielleicht nicht so bekannt: Mitte der achtziger Jahre hatte sich der Solarenergieförderverein Aachen (SFV)

das ehrgeizige Ziel einer Förderung von Photovoltaikanlagen in den Kopf gesetzt. Es haperte allerdings noch an der Technik für die netzgekoppelte Nutzung, mit der ich mich zu dieser Zeit



The tower of the Tvind windmill is over 50 metres high—the rotor axle is 54 m above ground level. When finished the windmill will generate up to 2 megawatts of electrical output and 3600 MWh/yr. There will be two 27 m long blades. The maximum usable wind speed will be 14 m/s, and the maximum rotor speed 40 revs/min when the blade tips will be travelling at 400 km/h

Not surprisingly, Denmark's most advanced wind project is not government sponsored. If Copenhagen lacks decisiveness, there is no lack of it at Tvind, a college community near the west coast of Jutland. When it is finished later this year, it will have the largest windmill in the world. Five kilometres from the town of Ulfborg, the Tvind tower is 54 metres high; it dominates the flat farmland for 10 kms in any direction.

beschäftigte. So kam es, dass ich bei einer Vorführung im Garten des Wohnungsbauministeriums in Bonn mit dabei war.

Die Veranstaltung war mehrfach vertagt worden und fand schließlich am 24. November des Jahres 1988 statt. An diesem trüben Tag, an dem ein leichter Nieselregen niederging, war es so dunkel, dass schon nachmittags die Straßenlaternen angingen – alles andere als ideale Voraussetzungen, um die Macht der Sonnenenergie vorzuführen. Außerdem hatte der Minister kurzfristig abgesagt und „nur“ einen Staatssekretär als Vertretung bestellt. Trotz der widrigen Bedingungen gelang es uns, mit den zahlreichen im Garten aufgestellten Solarmodulen eine handelsübliche Stichsäge zu betreiben. Mit dem frisch zusammengesraubten Netzeinspeisegerät, das wir aus Göttingen mitgebracht hatten, konnten wir etwa 50 Watt in die Steckdose einspeisen, bevor es endgültig dunkel wurde – damals eine Sensation. Unser mitgebrachter Stromzähler drehte sich tatsächlich rückwärts! Der Staatssekretär gab sich beeindruckt, meinte aber, hier sei wohl noch etwas Forschungsbedarf nötig. Vermutlich war es gar nicht so abwertend gemeint, wie wir es in dem Moment empfanden.

Dennoch: Wir hatten es geschafft, im trüben Dämmerlicht fünfzig Watt ins Netz einzuspeisen! Dabei wussten wir: Bei voller Sonne hätten unsere Solarmodule ausgereicht, um die Stichsäge in die Hölle zu schicken oder tausend Watt ins Netz zu liefern.

Ich war zunächst enttäuscht, trotzdem waren wir stolz auf unsere Leistung. Wir machten im SFV also erst einmal weiter mit dem „Solarpfennig“ – einer durch private Spenden finanzierten, kostendeckenden Vergütung für kleine, netzgekoppelte PV-Anlagen.

Im Mai 1990 dann kündigte der damalige Bundesforschungsminister Riesenhuber das 1000-Dächer-Programm an, ein Forschungsprogramm, das private PV-Anlagen auf Dächern mit einem

siebzigprozentigen Zuschuss fördern sollte. Plötzlich gab es ein breites Interesse an den wenigen Anlagen, die wir schon gebaut hatten – und neugierige Fernsehteams, die unbedingt rückwärts drehende Stromzähler aufnehmen wollten.

Das erste Förderprogramm für netzgekoppelte Solaranlagen war in Vorbereitung. Die Idee, das Stromnetz selbst als grenzenlosen, praktisch verlustfreien Speicher zu verwenden, war damals völlig neu. Photovoltaik hatte bis dahin als eine höchst spezielle, besonders teure Art der Stromversorgung gegolten, die umso sinnvoller war, je weiter ein Netzanschluss entfernt war – also in der einsamen Berghütte oder am besten gleich im Weltraum. Praktisch jede wissenschaftliche Abhandlung über Photovoltaik begann damals mit einer ähnlichen Feststellung.

Im Zuge der deutschen Wiedervereinigung dann wurde das 1.000-Dächer-Programm auf über 2.000 Anlagen erweitert, um auch den Osten Deutschlands mit einzubeziehen. Die Nachfrage war groß – nur etwa jeder vierte Antrag hatte Erfolg. Damals wurde sehr viel improvisiert und gelernt. Weder gab es Dachhaken noch Untergestelle für die Montage der Solarmodule. Man ging mit einer Zeichnung zum örtlichen Schlosser und ließ sich die Teile anfertigen, von denen man hoffte, dass sie funktionieren würden.

Schon nach etwa drei Jahren waren alle Anlagen errichtet. Nun war der Forschungsminister allerdings für die Forschung zuständig und nicht für Wirtschaftsförderung. Für die neuen Firmen, die gerade das Geschäft mit den Solaranlagen aufgebaut und neue Wechselrichter entwickelt hatten, kam erst einmal eine kalte Dusche: Das Forschungsministerium würde nun zunächst erst einmal fünf Jahre lang Daten sammeln und auswerten, wäre danach fertig und für wirtschaftliche Fragen nicht zuständig, hieß es.

1990 wurde das Stromeinspeisegesetz (StromEinspG) beschlossen, das immerhin schon die Abnahme von Strom aus

erneuerbaren Energien sicherstellte. Die vorgeschriebene Vergütung war zunächst nur für Windenergieanlagen ausreichend, führte aber zu einer bedeutenden Entwicklung auf diesem Gebiet.

Dann folgte das 100.000-Dächer-Programm, eine Vorstufe des EEG, bei der PV-Anlagen mit zinsgünstigen KfW-Krediten gefördert wurden.

Im Jahr 2000 schließlich wurde das Erneuerbare-Energie-Gesetz eingeführt und Vergütungen für Windenergie, Photovoltaik, Wasserkraft, Deponie- und Klärgas festgelegt. Für die Photovoltaik war eine Absenkung der geltenden Einspeisevergütung von 5 Prozent pro Jahr vorgesehen, und es wurde eine bundesweite Obergrenze von 350 MWp festgelegt<sup>1</sup> – eine Leistung, die heute ein großes Solarkraftwerk schon allein erreicht. Für 2001 angeschlossene PV-Anlagen sollte zwanzig Jahre lang eine Vergütung von 50,6 Cent pro Kilowattstunde gezahlt werden.

Doch schon 2003 war die Grenze von 350 Megawatt überschritten, sodass 2004 keine kostendeckende Vergütung mehr gezahlt worden wäre. Daher wurde am 22. Dezember eine Novelle des Gesetzes zur Erweiterung verabschiedet und eine weitere im Juli 2004.

2008 und 2009 gab es weitere Anpassungen. Die Förderung über die gesetzlich festgelegte Vergütung der eingespeisten Energiemengen war außerordentlich erfolgreich. Sie führte zu großen Investitionen, einer beschleunigten Entwicklung von Solarzellen, entsprechender Produktionstechnik und hoch effizienter Wechselrichter. Die Solarbranche in Deutschland wurde zu einer bedeutenden Wirtschaftskraft, und das Modell der Förderung wurde in vielen Ländern kopiert. Deutschland war innerhalb weniger Jahre weltweit führend auf dem Gebiet der Solartechnik geworden.

---

<sup>1</sup> Wp: Watt peak, Leistung einer Solaranlage unter idealen Bedingungen.

Das blieb nicht ohne Folgen: Bald wurde ein erheblicher Anteil der weltweiten Produktion von Solarmodulen importiert und hier eingesetzt. Die deutschen Hersteller hatten mit höheren Umweltauflagen und anderen Kosten zu kämpfen und gerieten mehr und mehr unter Druck, während in China die Produktion von Solarmodulen staatlich subventioniert wurde – auch, wenn zunächst kaum ein Modul in China selbst zum Einsatz kam. Am Anfang war die Qualität der aus Fernost importierten Module noch so bescheiden, dass sie kaum eine ernsthafte Konkurrenz für die deutschen Hersteller darstellten. Doch es dauerte nicht lange, bis sich dies änderte, nicht zuletzt durch Maschinen und Fertigungsverfahren aus Deutschland. Die Solarindustrie in Europa kam immer mehr unter Druck.

Der Maschinenbau in Deutschland profitierte noch etwas länger von dem Boom, aber bald wurden auch hochwertige Solarmodule aus dem Ausland importiert. Vieles lief damals noch nicht nach Plan: Die Solarzellenhersteller waren es gewohnt, günstiges, qualitativ hochwertiges Silizium oder sogar fertige Wafer<sup>2</sup> aus Überbeständen der Elektronikindustrie zu verwenden. Viel zu spät wurden Produktionskapazitäten für den Siliziumbedarf der Solarbranche aufgebaut, obwohl eine bekannte Fachzeitschrift längst vor der Verknappung des recycelten Materials gewarnt hatte, denn die Errichtung von neuen Siliziumfabriken dauert bis zu drei Jahre. Die fast zeitgleich beginnende Finanzkrise brachte weitere Probleme, vor allem in der Elektronikindustrie. Wichtige Bauteile für Solarwechselrichter waren eine Zeit lang Mangelware. Leider erhielt die Solarbranche kaum staatliche Unterstützung, wie die Automobilbranche. Im Gegenteil sah die Politik die Notwendigkeit,

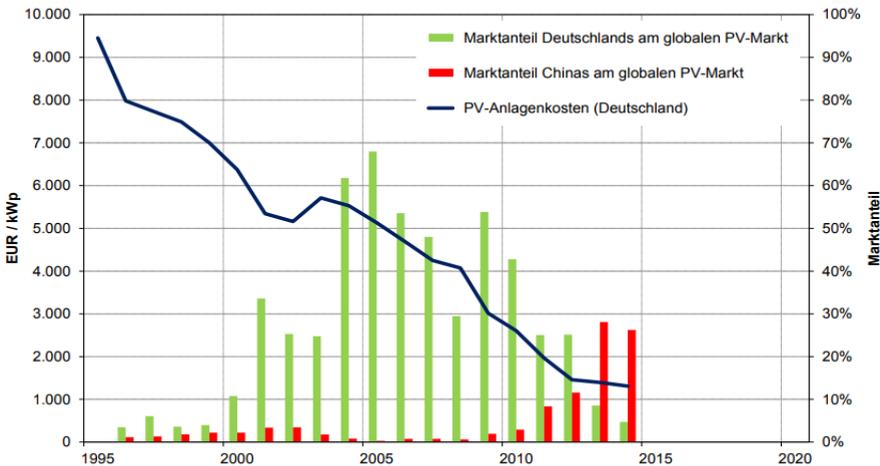
---

<sup>2</sup> Wafer sind dünn geschnittene Siliziumplatten aus denen elektronische Bauelemente, aber auch Solarzellen gefertigt werden.

den Ausbau der Photovoltaik zu begrenzen. Das gelang auch und wurde sogar als Erfolg verkauft. Die Folgen: Von der einst glänzenden Stellung der Solarwirtschaft in Deutschland blieb nicht viel übrig. Modernste, gerade neu errichtete Fabriken kamen unter den Hammer und wurden zu Spottpreisen versteigert. Die Käufer waren natürlich Solarfirmen aus dem Ausland.

Auch die Kraftwerksbetreiber in Deutschland gerieten in dieser Zeit unter Druck. Bislang hatte es regelmäßig einen hohen Bedarf am Mittag gegeben, der die Strompreise antrieb und gute Gewinne brachte. Die Photovoltaikanlagen aber lieferten genau dann am meisten, und aus der Spitze im Verlauf der Strompreise wurde an sonnigen Tagen ein Tal mit besonders niedrigen Strompreisen. Die

**Abbildung 2: Preise für PV-Anlagen sowie deutscher und chinesischer Anteil am weltweiten PV-Absatz, 1995-2014**



Quelle: BP, DGS, photovoltaikumfrage.de, BSW, eigene Berechnungen

inzwischen reichlich vorhandenen Windenergieanlagen verdrängten noch größere Anteile an der Stromerzeugung und bedrohten das Geschäft der etablierten Stromerzeuger ebenso. Es war klar,

dass diese sich nun wehrten. Sie hatten schon immer eine starke Lobby gehabt und auch ihre Methoden, die Presse zu beeinflussen. Regelmäßig erschienen jetzt teure, doppelseitige Anzeigen in Tageszeitungen und Magazinen, und auch die redaktionellen Beiträge beschäftigten sich nun auffällig oft mit vermeintlichen Nachteilen der erneuerbaren Energien und deren verheerende Auswirkungen auf die Strompreise. Die positiven Effekte hingegen – milliarden-schwere Einsparungen bei Energieimporten und über 100.000 neue Arbeitsplätze – fanden kaum Erwähnung.

Im Ausland gibt es heute immer noch das Bild einer von Deutschland ausgehenden weltweiten Verbreitung der Solarenergie – allerdings kaum Verständnis für die Haltung der Politik zur Solarbranche, die anfänglich so vielversprechend erschien.

### **Die Bilanz des EEG**

Die Auswirkungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes sind insgesamt nur schwer abzuschätzen. Auf der einen Seite gibt es die Summe der EEG-Kosten, von denen in der „Welt“ behauptet wurde, sie würden bis 2025 auf 520 Milliarden Euro ansteigen.<sup>3</sup> Auf der anderen Seite stehen erhebliche Einsparungen bei den Energieimporten. Nicht zuletzt wären erhebliche Neuinvestitionen in fossile Kraftwerke nötig gewesen, wenn diese nicht durch erneuerbare Energien ersetzt worden wären. Nur die erneuerbaren Energien ermöglichen den Ausstieg aus der Kernkraft und den Verzicht auf einen Neubau von Reaktoren. Die Kostenschätzungen für das neue Kernkraftwerk Hinkley Point in England liegen inzwischen bei 33 Milliarden Euro, und werden vermutlich weiter steigen. Betriebskosten, Kosten für Entsorgung von radioaktiven

---

<sup>3</sup> Quelle: Welt vom 10.10.2016

Material und Rückbau, sind noch nicht in dieser Rechnung enthalten. Preisgünstige Energie wird diese Anlage niemals liefern.

Was bei all diesen Vergleichen fast immer unter den Tisch fällt, ist die Frage, wie sich die Preise für Öl und Gas entwickelt hätten, wenn es die weltweit sichtbare Alternative der erneuerbaren Energien nicht gäbe. Schon die Frage, wie hoch die Preise bei einer Nachfrage wären, die um die Anteile der erneuerbaren Energien von heute erhöht wäre, ist kaum zuverlässig zu beantworten. Doch eins steht fest: Die erneuerbaren Energien und natürlich auch der Klimawandel, setzen die Länder mit großen Reserven an fossilen Brennstoffen (Öl, Gas und Kohle) unter Druck. Wer diese Bodenschätze nicht bald verwertet, wird vermutlich das Nachsehen haben. In Zukunft wird der Preis für fossile Energie allein schon deshalb sinken, weil Windenergie und Sonnenenergie immer günstiger zu haben sind und weniger Abhängigkeit bedeuten. Dazu kommt für diese Länder das Problem, dass Kohle langfristig vielleicht gar nicht mehr verbrannt werden darf. In den Niederlanden ist die Verfeuerung von Kohle ab 2029 schon verboten. Es wird nicht lange dauern, bis andere Länder nachziehen.

Dies alles drückt die Preise für fossile Energieträger schon jetzt und macht langfristige Investitionen in die Kohleindustrie zu einem wirtschaftlichen Desaster. Die Lebensdauer eines Kohlekraftwerks ist auf 50 Jahre ausgelegt – und man kann annehmen, dass es dann längst nicht mehr laufen wird. Aus nationaler und europäischer Sicht muss nicht zuletzt der Aspekt betrachtet werden, dass die Mehrkosten der Energiewende zum großen Teil als Wertschöpfung im Lande bleiben, also als Kaufkraft wirksam werden, während die Kosten für Energieimporte keineswegs diese positive Wirkung haben.

So viel zur wirtschaftlichen Bilanz. Aber die wesentlichen Punkte sind die ökologische Bilanz und die weiteren Aussichten.

Die erneuerbaren Energien haben schon jetzt einen erheblichen Beitrag zur Entlastung der Umwelt geleistet, und sind die vielleicht die einzige realistische Option, unseren Planeten weiter als einen Lebensraum mit Milliarden von Menschen zu erhalten.

Aus alledem folgt: Wir müssen langfristig denken. Und wir dürfen nicht nur lokal denken, sondern weltweit. Wir müssen unsere globale Zukunft im Blick haben. Dafür müssen wir zunächst unsere Möglichkeiten überblicken:

## **Die Stromversorgung der Zukunft**

Was haben wir eigentlich? Welche Formen der Energieerzeugung stehen uns zur Verfügung, und wie kann ihr Potential vor dem Hintergrund des beschriebenen technischen und kulturellen Wandels eingeschätzt werden?

### **Fossile Energieträger**

#### **Kohle**

Die weltweiten Kohlevorkommen der Erde würden nach heutigen Schätzungen bei gleichbleibendem Verbrauch zwar noch weit über 100 Jahre reichen – allerdings spielt die Atmosphäre nicht mit. Das CO<sub>2</sub>-freie Kohlekraftwerk gibt es nun einmal nicht – und wenn, wäre es vermutlich viel zu teuer. Schon jetzt kann ein neu zu bauendes Kohlekraftwerk wirtschaftlich kaum mit den erneuerbaren Energien konkurrieren und die Technik für CO<sub>2</sub>-Abscheidung könnte die Kosten verdoppeln. Beim amerikanischen Vorzeigeprojekt Kemper Coal Power Plant sind die veranschlagte Kosten mit CO<sub>2</sub> Abscheidung auf über das dreifache angestiegen, daher wurde

es verworfen und soll jetzt mit Gas betrieben werden. (The Guardian, 2.3.2018)

Es gibt, aus meiner Sicht, technisch nichts, was die Kohle als Energiequelle retten könnte.

## **Öl**

Das fossile Öl ist in Bezug auf den Klimaschutz genauso problematisch wie die Kohle – nur die Vorräte sind geringer. Der derzeitige Versuch, die schwer zugänglichen Vorräte aus dem Sand und dem Eismeer zu holen, könnten uns ökologisch teuer zu stehen kommen, sprich: verheerende Auswirkungen auf die Umwelt haben – vor allem dann, wenn der Preisdruck steigt und immer billiger produziert werden muss. Den Preis für die Zerstörung der natürlichen Landschaften zahlen wir alle.

## **Gas**

Gas könnte eine wichtige Reserve bleiben oder werden, wenn im Winter nicht genug Erneuerbare Energien zur Verfügung stehen. Leider gibt es immer wieder Probleme mit Abhängigkeiten und politische Machtspiele, wenn es um fossile Energieträger wie Gas geht. Ein weiteres Problem sind immer noch die unkontrolliert entweichenden Mengen bei der Förderung und dem Transport in Pipelines. Methan ist ein Gas, das sehr stark den Klimawandel verstärkt. Die weit reichenden Gasnetze sollten verantwortlicher genutzt werden. Der wachsende Einsatz von verflüssigtem Erdgas (LNG), das mit Schiffen transportiert werden kann, könnte die Abhängigkeiten durch Gaspipelines verringern. Die Schiffe könnten auch mit dem LNG als Kraftstoff betrieben werden, ein vergleichsweise sauberer Antrieb. Und damit vielleicht eine Übergangslösung, bis Wasserstoff, aus Sonnenenergie und Windenergie gewonnen, auch das Erdgas abgelöst hat.

## **Methaneis**

Der Abbau und die Nutzbarmachung dieses neuen Energieträgers ist noch weitgehend unerforscht und die ökologischen Folgen sind nicht absehbar. Bei einem zügigen Ausbau der Erneuerbaren Energien in Verbindung mit chemischen Langzeitspeichern (vgl. unten) ist die Nutzung von Methaneis wirtschaftlich und ökologisch vermutlich kaum vertretbar. Eine langfristige Lösung ist Methan ohnehin nicht, da bei der Verbrennung immer noch fossiler Kohlenstoff im Spiel ist und bei der Produktion eine erhebliche Menge Methan in die Atmosphäre entweicht und dadurch das Klima dreißig Mal stärker anheizt als Kohlendioxid .

## **Kernspaltung**

Die Kernenergie ist, wie wir heute aus leidvollen Erfahrungen wissen, mit großen Risiken verbunden und nur noch bei der Nutzung alter, abgeschriebener Reaktoren wirtschaftlich vertretbar. Doch diese sind ohnehin bald am Ende ihrer geplanten Nutzungsdauer angelangt. Eine verlängerte Nutzung wäre mit ständig steigenden Risiken verbunden. Ein Neubau ist unwirtschaftlich und unnötig – auch, wenn es immer noch Zeitgenossen gibt, die das Gegenteil behaupten. Wenn man dafür neue Anlagen bauen muss, es eine der teuersten Möglichkeiten für eine Energieversorgung. Nicht zuletzt ist die Frage möglicher Endlager immer noch völlig ungelöst. Fest steht aber, dass eine sichere Endlagerung langfristig mit hohen Kosten verbunden sein wird.

## **Kernfusion**

Die Erzeugung von Energie durch Kernfusion ist eine bewährte und zuverlässige „Technologie“ – in der Sonne und bei allen anderen Sternen, die ja nichts anders sind als gigantische Kernfusionsreaktoren. Für bewohnte Planeten allerdings ist diese Technik bislang unrealistisch und zu teuer. Seit etwa 30 Jahren wird regelmäßig verkündet, dass es in 30 Jahren endgültig soweit wäre, die Kernfusion als Energiequelle zu nutzen. Das wird wohl so weiter gehen. Auch die Sciencefiction-Variante mit Helium 3 vom Mond, ist kaum erfolgversprechend auf der Erde, wenn man sich genauer damit befasst. Vielleicht einmal im Weltraum, wenn man zu weit weg von der Sonne ist?

## **Erneuerbare Energien**

Bei der Prognose der künftigen Nutzung Erneuerbarer Energien haben schon viele Experten weit danebengelegt. Meine eigenen Prognosen von 2003 waren gar nicht so schlecht, daher werde ich sie noch einmal hervorholen.

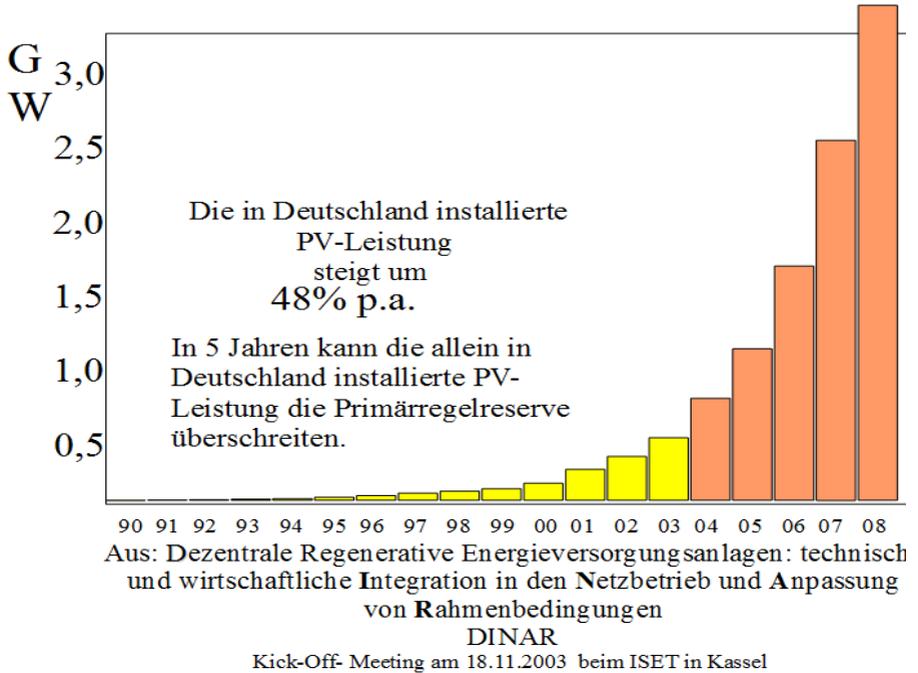
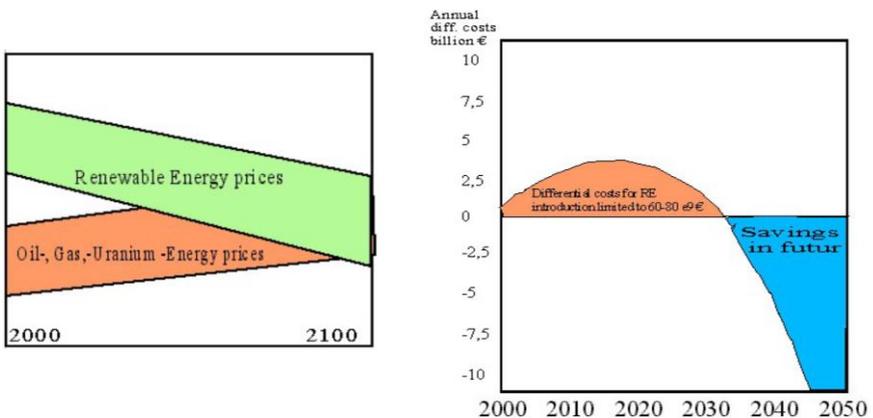


Abb. X zeigt das von mir damals prognostizierte exponentielle Wachstum der Photovoltaik. Wollte die Grafik die Zahlen für das Jahr 2017 darstellen, wäre der rechte Balken etwa 1,5 Meter hoch.



Meine Methode bei solchen Abschätzungen berücksichtigt neben den Potentialen auch begrenzende Faktoren wie Flächenbedarf, Emissionen und Rohstoffe. Die Bilder stellen eher qualitativ die Entwicklungen dar. Die Kosten der erneuerbaren Energien sinken kontinuierlich und unterbieten die steigenden Kosten der fossilen Energieerzeugung. Diese Entwicklung ging noch schneller, als ich erwartet hatte. Der schnellere Zuwachs an erneuerbaren Energien war natürlich mit höheren Investitionen verbunden, allerdings kommen wir so auch früher in den Genuss der Einsparungen.

## **Windenergie**

Bei der Windenergie gibt es einerseits noch erhebliche Potentiale, aber immer auch noch Akzeptanzprobleme im Zusammenhang mit Faktoren wie Landschaftsschutz oder Ästhetik. Ähnlich wie bei der Photovoltaik, wurde der Fehler gemacht, deutschlandweit gleiche Einspeisevergütungen festzulegen. Dadurch haben wir jetzt in Süddeutschland zu wenig Windenergie und in Norddeutschland zu wenig Sonnenenergie.

Offshore-Windanlagen haben zwar ein großes Potential, aber eine buchstäblich „lange Leitung“ zu den Verbrauchszentren im Süden. Daher gibt es bei stürmischem Wetter im Norden manchmal für einige Stunden mehr Windenergie, als genutzt werden kann, während im Süden Energie benötigt wird. Ein Vorteil der Anlagen im Meer liegt darin, dass dort der Wind nur selten so schwach ist, dass keine Energie gewonnen werden kann. Interessant ist in diesem Fall auch, dass kaum über die hohen Kosten gesprochen wird, die weit über denen von Windenergie an Land und Photovoltaik liegen.

Wer Böses denkt, könnte auf die Idee kommen dass in diesem Fall deshalb nicht darüber geklagt wird, weil dort nicht Bauern und

kleine Hausbesitzer im Geschäft sind, sondern die ganz großen Energieunternehmen ...

Physikalisch gesehen ist Wind sekundäre Sonnenenergie, denn die Bewegung der Luft entsteht ja durch von der Sonne verursachte lokal unterschiedliche Erwärmungen von Luftmassen. Deshalb ist nur ein kleiner Teil der Sonnenenergie im Wind enthalten, und daher ist das Potential von Windkraft bei weitem nicht so groß wie das der Photovoltaik, der direkten Nutzung des Sonnenlichts. Allerdings spielt das kaum eine Rolle, das nutzbare Potential an Windenergie übertrifft den Bedarf immer noch bei weitem. Insbesondere auf See in den hohen südlichen Breitengraden sind die ständigen Westwinde (roaring fourties, furios fifties) eine noch ungenutzte Energiequelle mit riesigem Potential. Leider weit weg von allen Orten an denen Energie gebraucht wird. Vielleicht gibt es einmal Schiffe, auf denen Windenergie gewonnen und in Form von Wasserstoff gespeichert werden kann. Das Gute am Wind ist vor allem, dass er auch im Dunkeln und im Winter weht.

Ich denke, die heute installierte Leistung der Windenergie in Deutschland ließe sich noch einmal verdoppeln. Der notwendige Rohstoffeinsatz für die Errichtung von Windenergieanlagen ist nicht sehr hoch, und vieles davon (Stahl) kann am Ende der Nutzungsdauer wiederverwendet werden. Es gibt allerdings einschränkende Faktoren, was die Standorte betrifft. Zu beachten sind etwa Aspekte wie Lärmschutz, Schattenwurf oder Vogelschutz.

Bei Offshore-Anlagen gibt es Unterwasserlärm beim Bau der Anlagen, der Meeressäuger schädigen kann. Eine interessante Möglichkeit wären schwimmende Anlagen, die in einer Werft gebaut und dann auf See geschleppt werden und so dieses Problem vermeiden. Für die deutschen Werften wäre das ein warmer Regen und auch eine Chance für internationale Geschäfte. Es gibt auch

noch andere Verfahren, die Anlagen im Meeresgrund zu verankern, bei denen der Lärm vermieden wird.

Windparks im Meer könnten sogar positive Auswirkungen auf den Fischbestand haben, da die Fischerei mit Netzen dort nicht möglich ist und so geschützte Rückzugsgebiete für die Vermehrung entstehen.

Photovoltaik ist inzwischen längst nicht mehr die teuerste der Erneuerbaren Energien – Offshore-Windenergie ist im Moment teurer. Wichtig ist vor allem die gegenseitige Ergänzung verschiedener Energieformen, denn mit so ist eine verlässliche Versorgung leichter zu realisieren.

### **Wasserkraft**

Das Potential der Wasserkraft ist in Deutschland weitgehend ausgeschöpft. Es gibt einige wenige Standorte mit kleinem Potential, die noch erschlossen werden könnten. Die Stauseen haben einen weiteren bedeutenden Nutzen als Trinkwasserspeicher. Ein Vorteil von Wasserkraftwerken an Stauseen ist die regelbare Leistung der Energieerzeugung.

Der Bau eines Stausees stellt einen weitreichenden Eingriff in die natürliche Landschaft dar und hat zum Teil gravierende Auswirkungen auf die Ökologie der Gewässer. Größere Projekte stehen in Deutschland im Moment nicht zur Debatte. Wasserkraft ist, wie die Windenergie, eine sekundäre Form von Sonnenenergie, denn indirekt beruht der Wasserkreislauf auf den durch die Sonne verursachten natürlichen Verdunstung von Wasser, vor allem in den Meeren. Nur ein kleiner Anteil der Sonnenenergie ist in dem Wasser, das von den Bergen herabfließt, als potentielle Energie enthalten und auch nur wenig davon ist nutzbar. Daher ist ihr

Potential sehr begrenzt im Vergleich zu direkter Nutzung der solaren Strahlung.

### **Sonnenenergie**

Sonnenenergie ist die Mutter aller erneuerbaren Energien. Ich denke, in diesem Fall hat dieses strapazierte Wort seine Berechtigung: Zunächst allein deshalb, weil ihr Potential vielfach größer ist als das der anderen Erneuerbaren, viel größer sogar als alles, was je auf der Erde an Energie benötigt werden könnte. In Deutschland beträgt die Jahressumme der Globalstrahlung etwa 1.100 Kilowattstunden pro Quadratmeter. In Spanien sind es etwa 2000 und in der Sahara 2500. Mit modernen Photovoltaikanlagen kann ein Anteil von über 15 Prozent davon genutzt werden. Demnach reichen 15-30 Quadratmeter, um rein rechnerisch den Strombedarf eines Haushalts vollständig zu decken, wenn man von einem Verbrauch von 2500-5000 kWh pro Jahr ausgeht. Ein Hausdach hat etwa viermal diese Fläche und nicht nur eine nach Süden weisende Seite ist nutzbar. Wenn auch die nach Osten oder Westen zeigenden Dachflächen genutzt werden, verteilt sich die Stromerzeugung besser im Verlauf des Tages. Ein Problem ist die ungleiche Verteilung über die Jahreszeiten.

Sonnenenergie ist die einzige Erneuerbare Energie, die auch schon auf dem Mond und im Weltraum genutzt wird. Diese Nutzung steht noch ganz am Anfang. Sie ist die Quelle und Ursache aller anderen (sekundären) erneuerbaren Energien – mit Ausnahme der tiefen Geothermie und der Gezeitenenergie.

Früh angezogen und fasziniert von dem Potential der solaren Energie, habe ich schon in den siebziger Jahren damit angefangen, solarthermische Anlagen (Sonnenkollektoren) zu bauen und mit ihnen zu experimentieren. Damals war es noch sehr primitiv:

Kupferrohr, Blech, Glas, Isoliermaterial, schwarze Farbe. Selektiven Solarlack gab es noch nicht.

Das Geschäft lief am Anfang mäßig. Schon damals faszinierten mich daneben Solarzellen, und ich fragte mich, was den breiten Einsatz dieser wunderbaren blauen Dinger in der Zukunft wohl aufhalten könnte. Silizium gab es genug, und das damals Teure, war nur der relativ energieaufwendige, komplizierte Herstellungsprozess. Energie erzeugten die Solarzellen jedoch selbst. Es blieb nur Arbeit, die nur einmal getan werden musste, dann könnten Solarzellen viele Jahre lang Strom erzeugen. Gesellschaftlich und ökologisch sinnvolle Arbeit für viele Menschen, ohne sichtbare Nachteile! Keine Emissionen, kein Verschleiß! Und Solarzellen waren sogar in jeder Größe verwendbar. Damals kamen die ersten Armbanduhren mit Solarzellen auf den Markt. Ich hatte die Vision einer neuen Energietechnik, die noch gar nicht als solche erkannt war.

Aus derartigen Überlegungen entstand die Idee, Solarzellen mit dem Stromnetz zu verbinden, egal wie klein die Leistung auch sei. Natürlich hatte ich von anderen Experimenten auf diesem Gebiet, die etwa zeitgleich stattfanden, auch etwas gehört. Die Leistung war tatsächlich klein bei meinen ersten Versuchen – etwa 70 Watt. Einfach nur Watt, nicht Kilowatt oder Megawatt! Doch heute wären 70 Watt gar nicht so wenig, denn durch die hocheffizienten LED-Lampen kann man damit schon eine ganze Wohnung beleuchten ...

Zurück in die Gegenwart, inzwischen ist die Solartechnik erwachsen geworden und wird ernst genommen: Für einen breiten Ausbau der Photovoltaik gibt es heute eigentlich kaum noch Hindernisse. Allerdings wäre bei einem weiteren Ausbau auf eine bessere Verteilung zu achten. So könnten in Norddeutschland noch viele

Photovoltaikanlagen installiert werden, ohne dass dafür ein Netzausbau oder zentrale Speicher notwendig wären. Das Gleiche gilt für Städte, in denen bislang weit mehr verbraucht als erzeugt wird. Daher wäre es ein sinnvolles Instrument der Steuerung, wenn die Einspeisevergütung in Norddeutschland und in der Stadt etwas höher wäre als bei einer bayrischen Scheune.

Da Solarzellen im Betrieb keine Emissionen verursachen, ist ihre Anwendung kaum eingeschränkt und eine mehrfache Nutzung von Flächen möglich. Das beste Beispiel sind Hausdächer und Fassaden. Aber noch viele weitere Möglichkeiten sind denkbar: befestigte Wege und Plätze etwa, denn Solarzellen können technisch durchaus so eingebettet werden, dass sie begehbar sind. Auch die landwirtschaftliche Nutzung von teilbeschatteten Flächen ist vielversprechend. Insgesamt wäre sicher eine Verzehnfachung der heute installierten Leistung im dicht besiedelten Deutschland denkbar, ohne dass es zu Konflikten mit der Flächennutzung kommen würde – allerdings nicht ohne Speicher. Diese müssten zum größten Teil direkt bei den Solaranlagen installiert werden, um das Netz mittags nicht zu überlasten.

Eine entscheidende Rolle dabei könnte die Elektromobilität spielen: Die Batterie eines Elektro-PKW ist deutlich größer und leistungsfähiger als die meisten Batterien, die heute mit den Solaranlagen im Haus installiert werden. Und Elektro-PKWs brauchen nun einmal Strom – oft genug wird ja angeführt, sie seien nicht wirklich ökologisch, so lange ihre Energie aus fossilen Energieträgern (Kraftwerke) stamme. Dieses Problem könnte man durch den breiten Ausbau der Solarenergie elegant lösen und damit zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen.

In Deutschland gibt es heute etwa 46 Millionen PKW. Wenn in Zukunft elektrisch gefahren wird und eine intelligente Möglichkeit zur Verbindung der Antriebsbatterien mit dem Netz vorhanden

ist, haben wir eine große Speicherkapazität für überzählige Sonnenenergie, denn ungefähr 90 % seiner „Lebenszeit“ steht ein PKW ja herum.<sup>5</sup> Technisch sieht es nicht so aus, als gäbe es nennenswerte Hindernisse. Wieviel wäre es tatsächlich? Wenn alle Autos, die gerade nicht fahren, in dieser Zeit geladen werden könnten, wären es tagsüber vielleicht 30 Millionen. Jeweils mit 50 Kilowattstunden Kapazität, hätten wir dann 30 mal 50, also 1500 Millionen Kilowattstunden oder 1500 Gigawattstunden (die mit den neun Nullen). Die Gesamtlast in Deutschland liegt bei 50 GW. Also in 24 Stunden bei 1200 GWh (Gigawattstunden). Die Batterien könnten also leicht für einen Ausgleich zwischen hoher Solarleistung am Mittag und dafür und fehlender Leistung am Abend sorgen. Die Schwierigkeiten liegen eher darin, vorhandene Strukturen abzulösen, bürokratische Hindernisse abzubauen und eine entsprechende Infrastruktur zu schaffen, auch für die Elektromobilität. Dies ist ohne entschlossene politische Steuerung nicht möglich.

## **Biomasse**

Biomasse hat einen wichtigen Vorteil: Sie ist Sonnenenergie in gespeicherter Form und kann bei Bedarf genutzt werden. In Form von Bäumen hat sie noch viele weitere Vorteile. Sie wächst, wenn man sie wachsen lässt und speichert CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre – und das solange, bis das Holz energetisch genutzt oder natürlich zersetzt wird. Ein Baum stellt gespeicherte Sonnenenergie bereit, bietet Schatten, zum Teil essbare Früchte, holt das CO<sub>2</sub> aus der Luft und liefert uns den nötigen Sauerstoff. Solange er nicht geerntet wird, wächst er weiter, wird immer größer und speichert dabei CO<sub>2</sub>, das der Atmosphäre für Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte entzogen wird. Noch etwas? Er stabilisiert den Boden, speichert Wasser,

---

<sup>5</sup> Wert geschätzt

verhindert Erosion, wirkt ausgleichend auf das Mikroklima und bietet Lebensraum für unzählige Pflanzen und Tiere ...

Als schnöde Energiequelle betrachtet, gibt es natürlich die oben schon erwähnte Einschränkung, dass Biomasse als Energieträger nur einen kleinen Teil der Sonnenenergie enthält. Ihr Potential ist also begrenzt.

Halt, ein Einwand: Jede andere Nutzung der Erdoberfläche, sei sie technisch oder landwirtschaftlich, ist ein Eingriff in den natürlichen Zustand unseres Planeten. Bewaldetes Land ist aber der natürliche Zustand unserer Welt, also unproblematisch, was Nebenwirkungen betrifft. Daher ist das Potential des Waldes doch recht groß.

Holz ist allerdings fast zu schade zum Verbrennen. Es sind daraus die großartigsten Dinge hergestellt worden: Möbel, Kunst, Häuser, Paläste, Schiffe, Werkzeuge. Alle Dinge aus Holz enthalten Kohlendioxid, das aus der Biosphäre wenigstens eine Zeit lang entfernt wurde und sogar noch nützlich ist.

Bisher wird Biomasse noch häufig zur Abdeckung eines Grundlastbedarfs an Energie genutzt. Dies sollte korrigiert werden. Wenn Biomasse in Zukunft gezielt zum Ausgleich von Defiziten bei Wind- und Sonnenarmen Wetterlagen genutzt würde, hätte sie einen höheren Wert und auch langfristige großes Potential. Wir sollten den Blick mehr auf eine sichere Versorgung als auf billigste Energie richten.

Bei der Nutzung von Biogas wird der Vorteil, dass wir hier speicherbare Energie haben, noch zu wenig genutzt. Flexible Biogasanlagen, die das Gas für einige Stunden speichern können, um dann später Strom einzuspeisen, haben Vorteile für den Netzbetrieb. Dazu ist aber nicht nur ein Gasspeicher, sondern auch zusätzliche Nennleistung des Gasmotors, des Generators und auch des Stromanschlusses nötig. Dann kann mit variabler Leistung

gearbeitet werden. Dadurch können die Anlagen eine Reihe stabilisierenden Leistungen für das Netz anbieten, Primärregelenergie, Minutenreserve und andere. Gleichzeitig kann das Netz bei hoher Wind- oder Solareinspeisung entlastet werden, in dem die Biogasverstromung zeitlich etwas verschoben wird. Biogasanlagen, die vorwiegend mit Mais „gefüttert“ werden, sind zu Recht dem Vorwurf ausgesetzt, dass sie eine Reihe von ökologischen Nachteilen haben: Die Monokulturen von Mais benötigen eine große Menge von Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln, Pestiziden und auch Wasser. Sie bieten kaum Nahrung und Lebensraum für Insekten und andere Tiere, nur die Wildschweine fühlen sich dort wohl und werden teilweise zur Plage. Eine Alternative ist der Anbau von Insektenfreundlichen Pflanzenmischungen, die besser an die Standorte angepasst sind und weitgehend ohne Dünger, chemischen Pflanzenschutz und mit weniger Wasser auskommen. Der Energieertrag in der Biogasanlage ist zwar etwas geringer, dafür ist die Bodenbearbeitung weniger aufwendig. Es gibt eine Reihe von Projekten, bei denen der Strom der Biogasanlagen unter dem Stichwort „Bienenstrom“ als Ökostrom vermarktet wird. Ein Cent zusätzlich auf der Stromrechnung ist ausreichend, um die etwas geringere Leistung beim Betreiber der Biogasanlage zu kompensieren. Die Anlagen haben so eine wesentlich höhere Akzeptanz in der Öffentlichkeit.

### **Geothermie**

Heute noch am teuersten ist die tiefe Geothermie, also die systematische Nutzung der natürlichen Erdwärme zur Energieerzeugung. Hier gibt es noch große technische Herausforderungen, und auch der Aufwand für Standorterkundung, Genehmigung und Planung ist sehr hoch. Die Zusammenhänge zwischen Geothermieprojekten und Erdbeben müssten weiter erforscht werden. Wenn

häufige schwache Erdbeben ausgelöst werden, bedeutet das nicht, dass auch die Wahrscheinlichkeit von größeren Erdbeben steigt. Die Energie, die bei einem Erdbeben frei wird, stammt aus Spannungen in der Erde und wird kaum durch geothermische Bohrungen eingebracht. Die Frage wäre zu klären, welchen Einfluss die leichten, durch Druckaufschluss von Gesteinsschichten (Fracking) ausgelösten leichten Erdbeben auf die Schwere und Wahrscheinlichkeit von großen Erdbeben haben. Seit aber überhaupt ein Zusammenhang zwischen Geothermie-Projekten und Erdbeben vermutet wird, gibt es große juristische Problem bei der Nutzung von tiefer Geothermie, wenn dafür Fracking nötig ist.

Die Grenzen hängen sehr davon ab, welche Technologien sich weiterentwickeln werden. Ein weiteres Hindernis sind die hohen Investitionskosten und moderate Energiepreise. Interessant könnte die Geothermie zukünftig werden, wenn sie als das eingesetzt wird, was sie ist: gespeicherte Energie, die bei Bedarf (vor allem im Winter) in Verbindung mit Wärmenutzung eingesetzt werden kann. In weitere Forschung zu investieren kann nicht so verkehrt sein – vor allem, weil sich die dabei zu entwickelnde Technologie und Erfahrungen auch im Ausland einsetzen ließen.

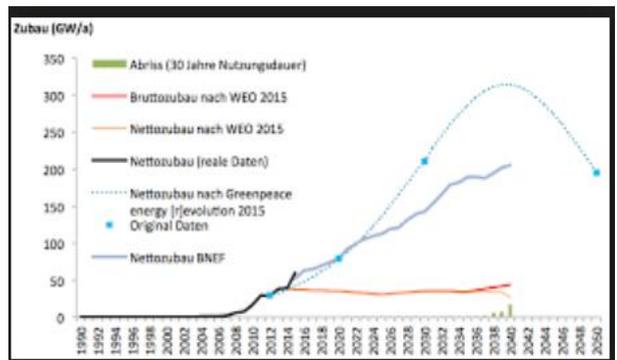
### **Gezeitenenergie**

In der Rotation der Erde um sich selbst ist eine ungeheuer große Energiemenge gespeichert. Es ist genau genommen, keine erneuerbare Energie und auch keine sekundäre Sonnenenergie, wie die der Wellen, die der Wind verursacht. Tatsächlich wird die Rotation der Erde durch die Wirkung der Gezeiten langsam abgebremst. Die Erdrotation verlangsamt sich allerdings nur um 17 Mikrosekunden pro Jahr. Sie wird uns also noch viele Millionen Jahre erhalten bleiben, ohne dass uns die Tage länger vorkommen. Ein Teil dieser Energie wird in den Wasserbewegungen von Ebbe und Flut wirksam und kann genutzt werden. Dazu müssen Meeresbuchten, die

normalerweise dem Wechsel der Gezeiten ausgesetzt sind, durch Sperrwerke abgetrennt werden, um bei Durchfluss des Wassers durch Turbinen elektrischen Strom zu erzeugen. Ein Vorteil ist die zeitliche Zuverlässigkeit dieser Nutzung. Einige Großprojekte, etwa das Severn Barrage in Großbritannien, das einmal eine Leistung 8500 Megawatt haben sollte, wurde wegen hoher Kosten aufgegeben. Es gab natürlich auch ökologische Bedenken und Proteste gegen dieses Projekt, die einen erheblichen Eingriff in außergewöhnliche Lebensräume verursacht hätte. Neuerding wird versucht, nicht mehr mit Staudämmen zu arbeiten, sondern Turbinen in der freien Strömung am Meeresgrund, ähnlich wie Windräder an Land, zu errichten.

## 100 Prozent – oder darf es etwas mehr sein?

Viele Szenarien, die sich mit der Ablösung der fossilen Energieträger durch erneuerbare Energien beschäftigen, haben ein paradoxes Problem mit dem Erreichen des 100-Prozent-



Ziels: Was soll aus der Industrie und den vielen Arbeitsplätzen werden, wenn dieses Ziel endlich erreicht ist? Massenarbeitslosigkeit und wirtschaftlicher Niedergang drohen dann scheinbar, weil wir dann „fertig“ sind und nur noch ein gewisser Ersatzbedarf für ältere Anlagen besteht. Brauchen wir also ein Wachstum, das so groß

ist, dass wir immer mehr Energie brauchen und an der 100-Prozent-Grenze trotzdem immer weitermachen können? Einer solchen Logik folgend, wäre es vermutlich besser, wenn wir uns nur ganz langsam an die Hundert annäherten, dann wird es nicht so gefährlich, könnte man meinen.

War das politische Ausbremsen der erneuerbaren Energien sogar weit vorrausschauende und kluge Wirtschaftspolitik, um den in der Zukunft drohenden Zusammenbruch dieser neuen Industrie ein paar Jahre weiter in die Zukunft zu verschieben und etwas abzumildern? Das wäre eine interessante Begründung gewesen, auch wenn ich sie so nie gehört habe.

Und so sieht der Verlauf in den Grafiken der Prognosen dann auch aus. Bei Greenpeace (blau) geht es ab 2040 bergab, weil dieses Szenario am mutigsten mit dem Solarzeitalter loslegen will, mit einem harten Rückgang auf etwa die Hälfte innerhalb von zehn Jahren wird dort gerechnet. Keine rosigen Aussichten für die Zeit nach 2040. Die anderen Prognosen trauen sich gar nicht über diese Zeit hinauszudenken, so düster scheint die Zukunft auszusehen. Die Grafik der WEO (rot + orange) endet weit vor einem Erreichen von 100 Prozent und erwartet auch kaum eine Steigerung im Zuwachs. Interessant ist auch hier, dass der tatsächliche Zuwachs selbst die Greenpeace-Erwartungen bisher übertroffen hat.

Sollten wir also etwa 2035 gezwungen sein, die Produktion von neuen Solaranlagen zu begrenzen, wenn wir gerade so schön „richtig warm geworden“ sind und dieser Wirtschaftszweig endlich bedeutend geworden ist? Bei Greenpeace scheint man das zu befürchten. Vermutlich auch bei anderen, denen aber dieses Problem vermutlich noch weit entfernt scheint. Die WEO scheint weiter davon zu träumen, dass auch noch in hundert Jahren Öl, Gas und Kernenergie dominieren. Sie rechnen offensichtlich sogar damit, dass nach 2040 bald mehr Solaranlagen abgerissen, als dazu gebaut

werden und damit der Kelch des Solarzeitalters an der Menschheit doch noch vorübergehen könnte!

Hier stehen wir vor dem grundlegenden Problem der Sättigung in der ökonomischen Theorie. Wir erleben immer wieder, welche Auswirkungen es unter gegebenen Bedingungen haben kann: Ist der Preis einer Ware nur von Angebot und Nachfrage abhängig, kann er sehr schnell auf ein Niveau sinken, bei dem der Produzent verhungern müsste. Droht dieses Schicksal auch der Solarwirtschaft, wenn einst die heute sehnlichst erhofften 100 Prozent erreicht sind? Und ist dieses Problem etwa nur durch Wachstum von Bevölkerung und steigenden Konsum zu lösen? Das könnte fatal werden!

Es könnte aber auch anders aussehen:

Wir sollten über die hundert Prozent hinausdenken! Wenn wir es erreicht haben, unseren Strombedarf fast vollständig aus erneuerbaren Energien zu bestreiten, gibt es keinen Grund zur Verzweiflung. Es gibt viele Möglichkeiten, die Welt durch weiteren Einsatz von Sonnenenergie noch besser zu machen. Besser könnte vieles sein: Der Anteil der Biomasse, also des Anbaus von Energiepflanzen, an der Energieerzeugung könnte reduziert werden, da diese Produktion Landflächen benötigt. Diese könnten entweder für Nahrungsmittelproduktion genutzt oder wieder der natürlichen Entwicklung überlassen werden. Auch der ersatzlose Rückbau von Windenergieanlagen an bestimmten Standorten wäre möglich, wenn wir genug Solarenergie und genug Langzeitspeicher hätten. Das Potential von Solarenergie ist kaum begrenzt: Wir können damit Treibstoff für Autos, Flugzeuge und Raumschiffe in Form von Wasserstoff herstellen, auch für Schiffe hätte Wasserstoff als Treibstoff große Vorteile.

Wäre das gefährlich?

Kaum. Im Gegenteil: Wasserstoff ist nicht nur der sauberste Treibstoff, selbst bei einem Brand ist er weniger gefährlich als andere, da dieses Gas so leicht ist, dass es beim Ausströmen sofort nach oben steigt. Auch die Flamme strahlt weitaus weniger Hitze ab, als eine Flamme mit kohlenstoffhaltigen Brennstoffen. Und wenn ein Wasserstofftanker strandet, bleibt statt gefährlichem Öl nur vergleichsweise sauberer Schrott in Form von Stahl usw. zurück. Der Wasserstoff kann abgelassen werden und wäre schnell und ohne Schaden anzurichten, in die Stratosphäre aufgestiegen, die zum großen Teil schon daraus besteht. Ein solcher Tanker könnte auch mit Wasserstoff angetrieben werden und dabei die notwendigerweise verdampfenden Mengen des verflüssigten Gases als Treibstoff nutzen.

Doch nicht nur Treibstoff könnten wir produzieren, wenn wir genügend saubere Energie zur Verfügung haben. Wir könnten Kohlenstoff aus der Luft gewinnen, um ihn als universellen Werkstoff zu nutzen und nebenbei den Klimawandel ausbremsen oder sogar umkehren. Bisher verbrennen wir Kohlenstoff vor allem, um Energie zu erzeugen. Das Ergebnis ist, wie wir wissen, ein bedrohlicher Anstieg von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, der uns noch teuer zu stehen kommen wird. Mit der Produktion von solarem Kohlenstoff aus der Luft könnten wir den Spieß endlich umdrehen: Wir reduzieren durch industrielle oder natürliche Produktion den CO<sub>2</sub>-Anteil und können mit dem Kohlenstoff die leistungsfähigsten Werkstoffe herstellen, die bisher denkbar sind. Wenn es um die Einsparung von Gewicht geht, sind Kohlefaserwerkstoffe bisher nicht zu übertreffen, nur noch durch neue Kohlenstoffwerkstoffe, wie Nanoröhren oder Graphen, in denen der Kohlestoff eine regelmäßige Anordnung von Atomen, ähnlich wie im Diamant erhält. Ebenso könnten wir mehr Aluminium einsetzen, das den Stahl ersetzen kann. Das gilt im noch höheren Maße für Titan, dessen Erze

reichlich vorhanden sind, dessen Herstellung aber eine energieintensive Verarbeitung erfordert. Allein die Stahlherstellung in Deutschland ist für etwa sechs Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Der dort bisher eingesetzte Koks könnte durch Wasserstoff aus erneuerbaren Energien ersetzt werden. Seit Sommer 2018 ist der Coradia iLint im Einsatz, der weltweit erste Zug, der im Linienbetrieb mit Wasserstoff und Brennstoffzellen angetrieben wird. Er kann eine Geschwindigkeit von 140 kmh erreichen und etwa 1000km weit, ohne nachzutanken. In den nächsten Jahren sollen weitere Wasserstoffzüge eingesetzt werden.

Selbst Wasser kann mit Hilfe von Solarenergie gewonnen werden –

nicht nur an der Küste aus Meerwasser durch Entsalzungsanlagen, sondern sogar aus der Luft. Luft muss nur genügend abgekühlt werden, dann wird das darin vorhandene Wasser durch Kondensation frei. Dafür ist nur Energie nötig. Die Entsalzung von Meerwasser erfordert allerdings einen etwas geringeren Energieeinsatz.

Wir sehen also: Es wäre gut, noch viele Jahre lang Solarzellen zu produzieren und zu verwenden, denn mit sauberem Strom können wir uns bestimmte industrielle Prozesse erlauben, deren größter Nachteil heute ihr hoher Energieaufwand ist. Viele solcher Prozesse sind auch ohne Probleme regelbar und damit eine gute Möglichkeit der Netzstabilisierung durch Anpassung des Verbrauchs an die momentan erzeugte Leistung.

Diese positiven Perspektiven werden sich allerdings nicht durch die vielbeschworene „Intelligenz der Märkte“ einstellen – im Gegenteil, wir sollten von dieser Seite (auch) mit Dummheit rechnen. Es empfiehlt sich, die betreffenden Entscheidungen auf verantwortungsbewusstere Schultern zu legen. Geeignete Regeln und Normen könnten helfen, auch, wenn es bei ihrer Einführung immer wieder Reibungsverluste gibt.

**Wäre das zu viel für die Netze?**

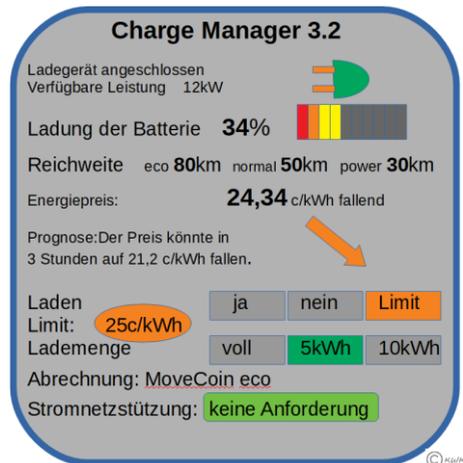
Meine Antwort ist schon wieder: ja und nein. Es gibt einige Stellen, an denen ein Netzausbau lohnend ist. Vor allem ist es vorteilhaft, wenn das Übertragungsnetz an weiteren Stellen durch moderne HGÜ-Leitungen ergänzt wird. Was verbirgt sich hinter dieser Abkürzung?

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung ist ein modernes technisches Verfahren, das früher praktisch unmöglich oder zumindest unrealistisch war. Aus Wechselstrom wird dabei zunächst Gleichstrom von sehr hoher Spannung gemacht, also zwei Mal 500 Kilovolt oder sogar noch mehr. Dieser Gleichstrom kann nun über längere Leitungen und mit bedeutend geringeren Verlusten übertragen werden als der übliche dreiphasige Wechselstrom. Beim Wechselstrom spielt nicht nur der ohmsche Widerstand eine Rolle, sondern auch die Tatsache, dass die Leitungen auch sogenannte induktive und kapazitive Eigenschaften haben, die zu Verlusten und anderen Problemen führen. Bei Gleichstromleitungen entfällt das elektrische Wechselfeld, das von den üblichen Hochspannungsleitungen abgestrahlt wird. Es gibt also auch kaum eine Abstrahlung, die beim Wechselstrom zum Teil als gesundheitlich schädlich betrachtet wird. Das elektrostatische Gleichspannungsfeld, das diese Leitungen umgibt, ist deutlich schwächer als das natürliche Feld bei einem Gewitter, und darf daher als unbedenklich gelten. Ab einer Leitungslänge von 400 Kilometern sind HGÜ-Leitungen zu Zeit günstiger zu betreiben als konventionelle Leitungen. Bei Seekabeln ist dies schon ab 80 Kilometern Länge der Fall; daher ist diese Technik bei der Anbindung der Offshorewindparks sehr wichtig. Auch in dem oben schon beschriebenen Systemsplit-Szenario, bei dem unser Verbundnetz in verschiedene Teile zerfällt, die vorübergehend verschiedene Frequenzen haben, ist diese Technik

in der Lage, weiterhin Energie zu übertragen und das System so zu stabilisieren. Es kann auch sehr günstig Blindleistung damit bereitgestellt werden. Bei Umrüsten der Stromtrassen wäre es möglich, einen Teil der vorhandenen Leiterseile mit Gleichstrom zu betreiben und die Übertragungsleistung so deutlich zu erhöhen. Eine neue Übertragungsstrasse mit HGÜ-Technik benötigt deutlich weniger Landschaftsfläche als eine Drehstromleitung gleicher Leistung. Vor allem ist es auch möglich, Kabel anstelle von Freileitungen zu verlegen, ohne dass dadurch die Verluste steigen.

Schon oben habe ich es betont: Es gibt nur wenige Länder auf der Welt mit einem so gut ausgebauten Stromnetz wie Deutschland.

Das hat natürlich auch mit der relativ hohen Besiedlungsdichte in Europa zu tun. Das Netz hat an den meisten Stellen und zur meisten Zeit genügend Kapazitäten. An einigen Stellen wird man noch etwas tun müssen, etwa wenn es um die Lademöglichkeiten für elektrische Fahrzeuge geht. Aber hier gibt es auch Chancen: Die Ladeleistung ist relativ hoch, aber die Elektromobilität steckt noch in den Kinderschuhen. Hier können im Rahmen von neuen Normen relativ leicht Methoden genutzt werden, die das Netz entlasten und stabilisieren, indem die Ladeleistung auch nach dem Zustand des Netzes geregelt wird. Die verschiedenen Möglichkeiten werden später noch beschrieben. Das wichtigste Prinzip dabei: Jede Batterie ist ein Energiespeicher – und nicht ein



Verbraucher. Verbraucht wird erst beim Fahren! Hier wäre die Chance für ein technisch ausgeklügeltes Spiel von Angebot und Nachfrage: Wenn ich noch 50 Kilometer in meinen Stromtank habe und heute nur noch 10 Kilometer weit fahren will, kann ich mein Ladegerät so einstellen, das nur geladen wird, wenn der Preis günstig ist. Und damit nur dann, wenn die anderen, die noch eine weitere Strecke fahren wollen oder die einen leeren Tank haben, schon fertig sind mit dem Laden. So kann eine Überlastung vermieden werden. Zur Förderung der Elektromobilität gibt es bisher an bestimmten Stellen „Strom und Parken umsonst“. Das kann es aber nur in der Anfangsphase geben, wo fast alle noch mit Benzin oder Diesel fahren. Allerdings gibt die Möglichkeit, sein Fahrzeug kostenlos zu laden, auch Anreize, den Parkplatz von Kaufhäusern zu nutzen und dabei auch etwas zu kaufen, wenn man schon „umsonst“ fahren kann. Auch die Bahn bietet zum Teil Lademöglichkeiten für Elektrofahrräder am Bahnhof oder auch im Zug selbst an. Eine große Zukunft haben batteriegetriebene Elektrobusse, vor allem in der Stadt. Es wird interessant werden, wenn Elektroautos auch Strom verkaufen können – und unsere Versorgung könnte dadurch sicherer werden.

### **Netzausbau oder Speicher?**

Ein Dauerthema bei der Suche nach dem besten Weg für die Energiewende ist die Frage: Brauchen wir mehr Übertragungsleitungen oder mehr Speicher? Die Antwort ist JA! Wir können beides gebrauchen. Es lässt sich ohne Schwierigkeiten nachweisen, dass wir neue Leitungen brauchen, um den Windstrom aus dem Norden nach Süddeutschland zu transportieren, wenn wir die Kernkraftwerke abschalten werden. Es lässt sich aber auch nachweisen, dass die vorhandenen Leitungen durch den Strom aus Braunkohlekraftwerken oft so sehr belastet werden, dass für größere Mengen

zusätzlicher Windenergie die Kapazität nicht ausreicht. Außerdem lösen die Leitungen nicht das Problem, dass es Tage gibt, an denen Wind und Sonne nicht genug Leistung bringen – vor allem im Winter. Wir brauchen also gespeicherte Energie, allerdings nicht immer in Form von Strom. Auch Häuser und Wohnungen, die nicht nur mit einem Energieträger beheizt werden können, sind das auch hilfreich, um eine Dunkelflaute zu überstehen. Ein Kaminofen im Wohnzimmer, zusammen mit einem Holzstapel hinter dem Haus, ist ein günstiger Langzeitspeicher. Er hat nicht nur ein paar Kilowattstunden gespeichert, sondern weit mehr: Ein Kubikmeter Holz hat etwa eine Megawattstunde nutzbare Wärme – und sie ist sogar dann verfügbar, wenn es bei Schneesturm einen Stromausfall gibt. Noch viel hilfreicher natürlich, wenn diese Reserve früh genug eingesetzt wird um das Stromnetz zu entlasten und Stromabschaltungen im Winter zu vermeiden. Neuerdings kommen auch Langzeitspeicher für den Hausgebrauch auf den Markt, die mit Wasserstoff und Brennstoffzellen arbeiten.

### **Netzausbau und Speicher**

Wir brauchen also Speicher. Oder Kraftwerke, die aus dem Winterschlaf geweckt werden können. Wenn wir über Energiespeicher reden, ist eine wichtige Größe die Kapazität, das Fassungsvermögen der Speicher. Jetzt geht es wieder um Zahlen.

Der Stromverbrauch eines Haushalts mit vier Personen beträgt etwa 4.000 Kilowattstunden pro Jahr. Also etwa 11 kWh durchschnittlich am Tag, ohne die Heizung. Das wird im Winter etwas mehr und im Sommer weniger sein. Ein Batteriespeicher, wie er inzwischen zusammen mit Solaranlagen gerne gebaut wird, hat etwa 6-8 kWh. Das reicht aus, um das zu schaffen, was die meisten davon erwarten, nämlich den Eigenverbrauch von Solarstrom zu

erhöhen: Ein Teil des Stroms wird am Tag gespeichert und erst abends verbraucht, wenn die Sonne nicht mehr liefert.

Allerdings reicht das nicht für mehrere Tage. Um eine Dunkelflaute von zwei Wochen zu überstehen, müssten es etwa 11 kWh mal 14, also etwa 154 kWh sein. Das wäre in Form von Batterien groß und teuer, außerdem nur selten benötigt. Große, zentrale Speicher wie Pumpspeicherkraftwerke haben zwar stattliche 8,5 Gigawattstunden Kapazität (Goldisthal, das größte in Deutschland) und eine Leistung von einem Gigawatt, aber das bedeutet, dass bei voller Leistung nach achteinhalb Stunden die Kapazität erschöpft ist – und angesichts einer Gesamtlast von 60 Gigawatt in Deutschland – ist ein GW nicht viel. Für weitere hundert Pumpspeicherkraftwerke fehlen geeignete Standorte, wenn man nicht erhebliche Eingriffe in die Landschaft zulassen möchte

Die kleinen Speicher in den Häusern mit Solaranlage, die ich eben thematisiert habe, könnten sehr nützlich sein, wenn es um den weiteren Ausbau von Sonnenenergie in Zukunft geht. Denn: Sie können eine Überlastung der Netze verhindern und dafür sorgen, dass wir auch nachts mit Solarstrom versorgt sind. Wie sieht das konkret aus?

Das Hauptproblem bei der Sonnenenergie ist die Gleichzeitigkeit. Wenn bei mir die Sonne scheint, ist es bei den Nachbarn auch so. Der Stromanschluss eines Einfamilienhauses ist zwar für eine Leistung von etwa 40 Kilowatt ausgelegt und die 10 Kilowatt, die maximal vom Dach kommen, sind eigentlich kein Problem. Allerdings ist das Ortsnetz für eine mittlere Last von etwa 40 mal 0,08 ausgelegt, weil ein Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,08 davon ausgeht, dass in allen Häusern NICHT gleichzeitig alle Elektrogeräte angeschaltet werden. Also rechnet man etwa mit 3,5kW pro Haus im Durchschnitt für die zu erwartende Last.

Wenn jetzt die Sonne, wie es gewöhnlich der Fall ist, auf alle Dächer gleichzeitig scheint und jeder sein Dach mit einer Solaranlage bedeckt hätte, gäbe es ein Problem: Die Sonnenenergie kommt gleichzeitig. Schon das Ortsnetz wäre überlastet, wenn tagsüber wenig verbraucht und viel eingespeist wird. Denn die eingespeiste Leistung könnte den Bedarf zum Kochen bei weitem übertreffen. Auch die nächsthöhere Netzebene kann durch die gleichzeitige Einspeisung von Strom überlastet sein. Da die kleinen Speicher ihre Energie direkt am Ort der Erzeugung speichern und auch wieder abgeben, werden dadurch auch die höheren Netzebenen entlastet. Daher sind die kleinen Batteriespeicher hilfreich, wenn sie tagsüber Energie speichern, später nutzbar machen und die Leistungsspitzen so abschwächen. Doch sie reichen nicht aus – wir brauchen auch, noch weit mehr als bisher schon, Speicher mit größerer Kapazität.

### **Große Speicher**

Große Speicher sind dort sinnvoll, wo vorübergehend zu wenig oder zu viel Leistung im Netz vorhanden ist und gleichzeitig ein genügend leistungsfähiger Stromanschluss verfügbar ist. Das sind auf jeden Fall alle Standorte von Windparks und großen Solaranlagen. Genau dort könnten Speicher gebaut werden, die sehr wirksam das Netz entlasten und Versorgungssicherheit schaffen. Die großen Speicher sind auch sinnvoll an Standorten, an denen es kurzzeitig zu einer Überlastung kommen könnte, die sie begrenzen würden. Standorte, an denen alte Kraftwerke stillgelegt worden sind, eignen sich zum Teil dafür, weil dort schon ein starker Netzknoten vorhanden ist. Auch genügend große Gelände sind dort vorhanden, groß genug sogar, um den Speicher mit einer Solaranlage und Windrädern zu kombinieren und die Versorgungssicherheit weiter zu erhöhen.

Es gibt schon einige solcher Speicher auf Batteriebasis und sie könnten auch durch Anlagen zur Langzeitspeicherung mit Wasserstoffelektrolyse und Brennstoffzellen ergänzt werden.

Die großen Speicher werden schon heute oft für eine ganze Reihe von Funktionen im Netz verwendet, neben Leistungsausgleich können sie Blindleistung, Primärregelreserve, Momentanreserve und Schwarzstartfähigkeit bieten. Das bedeutet, dass bei einem großen Stromausfall eine Weiterversorgung mit Energie von diesem Speicher aus möglich wäre, besonders, wenn er mit einem Windpark und Solaranlagen verbunden betrieben wird. Allerdings ist unser Netz kaum dafür ausgelegt. Es fehlen automatische Trennstellen und ein ausreichendes Lastmanagement, um kleinere Gebiete unabhängig zu versorgen. Aber es gibt ein großes Potential auf diesem Gebiet.

### **Kleine Speicher**

Kleine Speicher funktionieren im Prinzip genauso wie große. Allerdings werden sie nicht so verwendet.

### **Was tun die kleinen Speicher bisher?**

Bisher werden die Speicher in privaten Solaranlagen vor allem zur Erhöhung des Eigenverbrauchs eingesetzt. Das sieht in der Praxis dann so aus, dass ein Speicher jeden Tag schuftet, um Energie in die Abendstunden zu verschieben – unabhängig davon, ob das für den Netzbetrieb überhaupt nötig ist. Es wird nur deshalb gemacht, weil der private Betreiber dann weniger Energie zu einem teuren Preis aus dem Stromnetz kaufen muss und auch weniger Energie zu einem weit geringeren Preis einzuspeisen braucht. Für den Betreiber eine zunächst positive Rechnung: Wenn alles glatt läuft, bleib vielleicht etwas Geld übrig.

Allerdings sollte man die Feinheiten beachten: Ich habe schon Batterieanlagen im Keller gesehen, die so viel Verlustwärme produziert haben, dass der ganze Keller ständig überhitzt war und die Batterien durch die hohe Temperatur geschädigt wurden, abgesehen von dem Verschleiß durch tägliche Beanspruchung. Es wird bei dieser Betriebsweise also viel Energie verschwendet und Material verschlissen. Ob sich das für den Betreiber auf die Dauer lohnt, hängt davon ab, wie lange die Batterie das aushält. Nachteilig ist diese Betriebsweise für den Netzbetreiber: Ihm entgeht ein vielfach höherer Betrag, da der Betreiber einer Batterieanlage weniger Strom dazukaufen muss. Nutzen hat der Netzbetreiber von dieser Betriebsweise kaum, da die Funktion der Speicher sich nicht an den momentanen Bedingungen des Netzes orientiert.

Man kann das jetzt nicht dem Betreiber vorwerfen – das Problem ist, dass eine vernünftige Nutzung von Speicherbatterien nicht honoriert wird und dass daher auch keine dafür brauchbare Technik auf dem Markt zu finden ist. Anhänger von Verschwörungstheorien könnten an dieser Stelle auf die Idee kommen, dass die ganzen Einschränkungen und Rahmenbedingungen nur ein Ziel haben: zu beweisen, dass Solarenergie mit Speichern kombiniert noch teurer und ökologisch problematischer ist, als Solaranlagen allein. Warum soll man sich tonnenweise Blei oder brandgefährliche Hochleistungsbatterien ins Haus holen? Nur um ein paar Cent bei der Stromrechnung zu sparen, für die dann auch noch andere geradestehen müssen?

### **Wo liegt bisher der persönliche Nutzen?**

Wenn man Glück hat, und die Solaranlage hält, was der Anbieter verspricht und man vielleicht noch in den Genuss einer Förderung kommt, hat man nach zwanzig Jahren vielleicht doch etwas

gespart. Unter der Annahme allerdings, dass der Strompreis in dieser Zeit weiter steigen würde.

Mit einer Notstromfunktion – die allerdings mit zusätzlichen Kosten verbunden ist – sitzt man wenigstens bei Katastrophen nicht im Dunkeln und kann bei den Nachbarn Heldenpunkte sammeln, wenn man die Kabeltrommel über den Zaun reicht und etwas Strom abgibt. Eine Notstromfunktion ist aber auch darüber hinaus sinnvoll und in einigen Bereichen sogar lebenswichtig. Oft werden solche Speicheranlagen mit dem verheißungsvollen Begriff „Autonomie“ beworben und verkauft – allerdings wird er in den seltensten Fällen genauer definiert. Er verspricht Unabhängigkeit, doch um welche Abhängigkeiten und Risiken es geht, wird kaum genauer beschrieben. Ein solches Risiko könnte in weiter steigenden Energiepreisen für private Endkunden liegen.

### Börsenstrompreis am Terminmarkt der EEX von Jan. 2007 – Jul. 2018



Abb. X: Börsenstrompreis am Terminmarkt der EEX, Januar 2007 bis Juni 2018, Quelle: IWR, Daten EEX, eigene Berechnung.

Für die Industrie und an der Börse ist der Strompreis in den letzten Jahren nicht gestiegen, sondern eher gefallen, erst seit 2018 steigt er wieder an. Doch bei den privaten Stromkunden wird der Preis bisher immer höher ...

Wie weit kann das noch gehen? Gibt es kein Kraut, das dagegen gewachsen ist?

Es wächst schon. Bald wird es größer sein und die Spielregeln gründlich verändern. Doch wir sollten früh genug über die neuen Regeln nachdenken, sonst könnte es viele Verlierer geben.

### Die solare Strompreisbremse

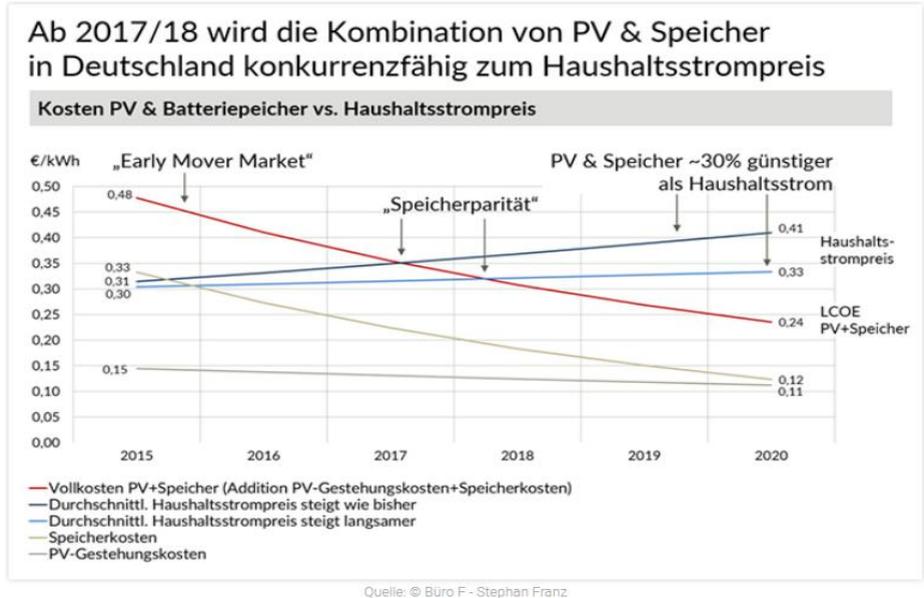
Wer nur einen normalen Stromanschluss und keine eigene Stromquelle hat, ist so abhängig, dass er auch einen höheren Preis

akzeptiert, denn er hat ja kaum eine Wahl – was natürlich gerne ausgenutzt wird.

Allerdings kann sich Frau Mustermann mit Energiesparen und noch mehr Energieeffizienz teilweise schadlos halten. Wie schon festgestellt, macht die eingekaufte und weiter geleitete Energie aber nur den kleinsten Teil der Kosten für den Stromanbieter aus. Der größte Teil der Kosten entsteht durch Netzbetrieb und Bereitstellen der Leistung. Ein Netzbetreiber hat nicht viel davon, wenn die Kunden Energie einsparen, es sei denn, die Leitungen und Anlagen wäre schon fast überlastet und er könnte eine teure Verstärkung oder Erneuerung einsparen. Er müsste also, als Reaktion auf Sparbemühungen seiner Kunden, entweder die Grundgebühr erhöhen oder den Energiepreis, um auf seine Kosten zu kommen. So dreht sich die Spirale immer weiter, und der Strompreis für die privaten Endkunden steigt. Allerdings machen die Leute mit den Solaranlagen und Speichern sich davon unabhängig, weil sie immer weniger Strom kaufen. Einfach, weil sie es können und auf die Dauer billiger dabei wegkommen. Sie freuen sich vielleicht sogar über die steigenden Energiepreise, den scheinbar hat sich ihre teure Investition dann gelohnt. Die Kosten für den Betrieb einer Solaranlage mit Speicher sinken so schnell, dass sie es in Deutschland bald mit den Stromversorgern aufnehmen und ihnen die Suppe versalzen können.

Von diesem Punkt dann ist es nur noch ein kleiner Schritt, auch noch den Stromanschluss zu kündigen, die Grundgebühr auch mit einzusparen und sich vollständig unabhängig zu machen. Dieser Schritt kommt vermutlich mit den Hybridspeichern, die im Sommer Wasserstoff für den Winter speichern. Noch sind sie teuer, aber sie befinden sich schon in den Startlöchern. Die Technik dafür ist keine Hexerei, und mit der Verbreitung werden die Preise sinken.

Für einen Stromversorger, der mit dieser Entwicklung nicht rechnet, kann es böse enden, wie diese Prognose andeutet:



Danach wird die Kombination von Solarstromanlage und Speicher in Deutschland schon 2017/18 konkurrenzfähig gegenüber dem Haushaltsstrompreis. Mit anderen Worten: Wer sich selbst versorgt, kommt auf die Dauer billiger davon, und das mitten in einem gut versorgten Gebiet.

Was wären die Folgen? Wenn es so weit käme, könnte der Strom für alle, die eben keine Solaranlage haben oder haben können (Stichwort: Mietshäuser, Ballungsräume), noch teurer werden. Vielleicht gibt es bald raffinierte Sondertarife, wie bei der Bahn, die sich genau daran orientieren, was die Konkurrenz des Automobils kann? Wer dort mit mehreren Personen gleichzeitig zum gleichen Ziel fährt, fährt wesentlich billiger. Oder darf sogar zusätzlich vier Leute mitfahren lassen, als hätte er ein Auto.

Analog dazu könnte ein Stromversorger auf die Idee kommen, Solaranlagenbesitzern den Strom günstiger anzubieten, damit sie nicht etwa in Versuchung kommen, sich noch mehr selbständig zu machen und auch noch einen Energiespeicher anzuschaffen, oder gar ihren Stromanschluss ganz abzumelden! Wollte jemand Zwist und Politikverdrossenheit in der Gesellschaft säen, wäre dies ein gutes Rezept ...

Soweit sollte es nicht kommen! Und das ist auch nicht nötig. Stromversorger und Solaranlagenbetreiber mit Batteriespeichern könnten gut miteinander ins Geschäft kommen, ohne dass jemand Nachteile hätte. Der Netzanschluss muss sich für beide Seiten lohnen! Ich werde die Möglichkeiten noch genauer beschreiben.

### **Wo liegt bisher der gesellschaftliche Nutzen kleiner Batteriespeicher?**

Man kann annehmen, dass mit der Förderung und Verwendung von Speichern die Entwicklung der Batterietechnologie vorangetrieben wird. Das wird noch sehr nützlich werden, wenn wir die Batterien dringend und in großer Menge brauchen. Tatsächlich werden durch die Speicher schon Netze entlastet – vor allem in ländlichen Gebieten im Süden Deutschlands, wo die Netzspannung mittags aufgrund der Solareinspeisung höher werden kann als erwünscht.

Ist ein Speicher mit einer Notstromfunktion ausgerüstet, hilft er in der Not. Leider sind die günstigsten und effizientesten Batterieanlagen dazu meist nicht in der Lage. Dort gibt es noch Entwicklungspotential, das im Moment aber durch den Preisdruck behindert wird. Einzelne Notstromsysteme können im Fall von Katastrophen sehr hilfreich sein und sollten gefördert werden.

### **Speicher könnten noch viel mehr**

Zunächst einmal könnten sie viel länger halten, wenn sie sinnvoll eingesetzt würden und nur dann arbeiten, wenn es etwas sinnvolles

zu tun gibt. Der regelmäßige Betrieb zur Erhöhung des Eigenverbrauchs ist selten sinnvoll und führt zu Verlusten und Verschleiß, da die Notwendigkeit für das Verschieben von Energie technisch gar nicht immer gegeben ist. Was gäbe es für die Batterien sinnvolleres zu tun, neben der zweifelhaften Erhöhung des Eigenverbrauchs?

### **Spannung stabilisieren**

Das Umschauen von Energie kann schon sinnvoll sein, aber nicht an jedem Tag. Wenn das Netz die Solarenergie direkt aufnehmen und sie gleichzeitig woanders genutzt werden kann, wäre es besser die Batterien zu schonen, um Verschleiß und Verluste zu vermeiden. Es gibt inzwischen erste Ansätze, wie durch Förderung „netzdienlicher Einsatz“ der Speicher erreicht werden soll. So wird etwa ein Speicher zusätzlich gefördert, wenn er in der Lage ist, über eine Internetverbindung Wetterprognosen zu berücksichtigen. Wenn mittags sonniges Wetter zu erwarten ist, wird der Speicher nicht schon morgens, sondern erst am späten Vormittag geladen. Damit wird am Morgen, wenn der Energiebedarf hoch ist, die ganze Einspeiseleistung der Solaranlage im Netz nutzbar, erst mittags der Speicher geladen und dadurch Einspeiseleistung entsprechend reduziert. Es geht dabei aber immer noch um den Betrieb des Speichers zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils, der oft kaum netzdienlich ist, aber zu Verlusten führt.

Das Verschieben von Sonnenenergie vom Tag zur Nacht

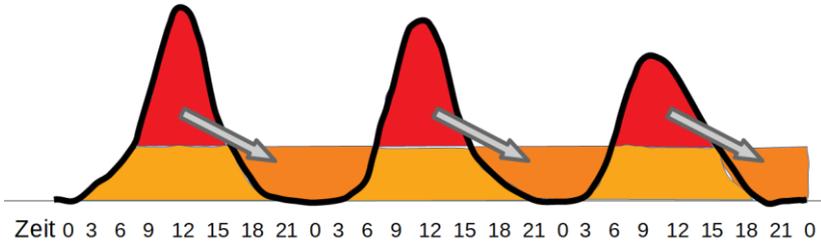


Abb. X: XXX, Quelle: eigene Darstellung

Ein Speicher kann helfen, die Spannungsschwankungen in einem Netz zu begrenzen, wenn es notwendig ist. Das ist im Prinzip einfach und muss nicht ferngesteuert werden. Eine intelligente Steuerung würde die Netzspannung und ihren Verlauf ständig messen und könnte genau dann zusätzlichen Strom aus der Batterie liefern, wenn diese im Netz niedrig ist. Umgekehrt könnte sie genau dann Energie aufnehmen und speichern, wenn viele Solaranlagen Strom einspeisen und die Spannung daher hoch ist. Beides würde die Schwankungen reduzieren, wenn es sinnvoll und nötig ist.

Einen echten Nutzen brächte diese Technik vor allem dann, wenn sich die Spannung immer wieder den zulässigen Grenzen nähert oder diese gar verletzt. Ein Netzbetreiber müsste das Netz dann mit kostspieligen Maßnahmen verstärken, damit weitere Solaranlagen oder leistungsstarke Lademöglichkeiten für Autos angeschlossen werden können. Die Speicher könnten dies bei entsprechender Nutzung entbehrlich machen. Mit spannungsgeregelten Speichern wäre es sogar möglich, ein Ortsnetz zu erweitern und zusätzliche Häuser anzuschließen, ohne dass Trafo und Kabel verstärkt werden müssten. Ebenso gäbe es weniger Probleme, wenn viele in einer Straße Elektroautos nutzen und diese zu Hause laden wollen.

Eine solche Technologie hätte für den Netzbetreiber also einen großen Nutzen und brächte gleichzeitig eine Erhöhung der Qualität der Versorgung. Es stünden zwar noch andere Möglichkeiten zur Verfügung, etwa der Einsatz geregelter Trafos, allerdings gibt es dann oft auch Probleme auf den nächsthöheren Ebenen des Netzes, etwa im Mittelspannungsnetz, da ein Trafo nur Leistung übertragen, aber nicht speichern kann. Die Nutzung der Batterien zur Stabilisierung hingegen wirkt auch dort – die Regeltrafos oder eine Verstärkung des Ortsnetzes nicht.

Der Netzbetreiber sich aber auf die Funktion der privaten Speicher verlassen können, und hier gibt es noch ein paar technische und nicht zuletzt rechtliche Hürden zu überwinden. Dabei könnten Normen hilfreich sein, in denen die netzstabilisierenden Eigenschaften genauer definiert wären. Trotzdem wäre der spannungsgeregelte Betrieb von Speichern etwas, das sich vergleichsweise einfach in einem Ortsnetz modellhaft realisieren und untersuchen ließe. Speicher lassen sich, ebenso wie Solaranlagen nicht nur im typischen Einfamilienhaus einsetzen, sie sind auch in einer Stadt mit dichter Bebauung sinnvoll. Auch wenn die Dachflächen nur ausreichen, um etwa die Hälfte des Energiebedarfs eines Mehrfamilienhauses zu gewinnen, wäre damit schon viel gewonnen. Mit Energieeinsparung und den immer besser werdenden Solarzellen, kann der Anteil noch weiter steigen. Geeignete Speicher könnten ohne Probleme untergebracht werden, sie nehmen nicht viel Platz weg. Im Notfall wären solche Häuser vollständig mit Energie zu versorgen.

## **Frequenz stabilisieren**

Unter diesem Begriff verbergen sich mehrere Funktionen. Wie oben schon ausgeführt, hängt die Stabilität des gesamten Verbundnetzes daran, dass ständig ein Gleichgewicht zwischen Energieerzeugung und Verbrauch gehalten wird.

Die erste Instanz, die dafür sorgt, ist die sogenannte Momentanreserve – also die in der Schwungmasse der Stromgeneratoren gespeicherte Energie. Sie bremst die Frequenzabweichungen in den ersten Sekunden ab. Wenn zu wenig erzeugt wird, werden Sie langsamer und geben dabei Energie ab, umgekehrt nehmen sie Energie auf und beschleunigen, wenn gerade zu viel erzeugt wird. Und das ist sehr wichtig, denn die Dampfbremser in den Kraftwerken reagieren leicht verzögert und es dauert 30 Sekunden, bis die Primärreserve der Kraftwerke voll aktiviert ist. Da die Momentanreserve durch die rotierenden Massen der Kraftwerke bereitgestellt wird, hat es Auswirkungen, wenn die Anzahl solcher Kraftwerke in Zukunft durch Erzeugungsanlagen ersetzt werden, die nicht direkt, sondern über Leistungselektronik gekoppelt werden. Also bei vielen Windenergieanlagen und allen Solaranlagen. Es gibt bei diesen keine direkt gekoppelten Schwungmassen. Daher ist zu erwarten, dass bei einem Ungleichgewicht im Netz die Geschwindigkeit einer Frequenzänderung in Zukunft weitaus größer ausfallen kann. Dafür sind viele Sicherheitseinrichtungen nicht ausgelegt.

Das ist ein Problem, das Speicher lindern könnten: Ausgestattet mit einer schnellen Frequenzmessung und der richtigen Steuerung, könnten sie im Bruchteil einer Sekunde reagieren und zusätzlich Leistung abgeben oder aufnehmen, je nachdem, was gerade benötigt wird. Die Speicher haben zwar eine kleine Leistung, aber die Masse macht es: Bis zur Mitte des Jahres 2018 waren schon 100.000 kleine Speicher an den Solaranlagen allein in Deutschland

installiert Das sind bei einer mittleren Leistung von 3 kW immerhin 300 MW, die im Bruchteil einer Sekunde reagieren könnten, wenn es darauf ankommt. Und: Diese schnelle Reaktion ist ohne jede Fernsteuerung möglich. Es wird nur eine Steuerung mit schneller Frequenzmessung im Speicher benötigt.

Die nächste Instanz ist die sogenannte Primärreserve, die im Verbundnetz stets bereitstehen muss, um im Notfall das Netz zu stabilisieren. Nach einer Störung muss sie für mindestens für die ersten fünf Minuten bereitstehen . Sie wird vor allem dadurch erreicht, dass die Kraftwerke eine automatische, durch die Netzfrequenz geregelte Leistungsreserve aktivieren. Diese wird bei einer Abweichung von 0,2 Hertz vom Nennwert ausgelöst und erreicht linear ansteigend nach 30 Sekunden die volle Leistung. Diese Reserve ist auf +3000 MW und -3000 MW für das gesamte europäische Verbundnetz bemessen, unter der Annahme, dass ein Doppelblock eines großen Kraftwerks ausfällt. Nicht viel, angesichts der Tatsache, dass heute weit größere Leistungen über weite Strecken transportiert werden. Die Batteriespeicher wären ebenfalls in der Lage, diese Reserve zu verstärken. Bei den größeren Batterien, die mit Mittelspannung angeschlossen sind, wird diese Möglichkeit schon genutzt. Es gibt aber für die Teilnahme an entsprechenden Ausschreibungen für die Bereitstellung von Primärreserve ein sogenanntes Präqualifikationsverfahren. Hat man es erfolgreich absolviert, erhält man die Möglichkeit, nicht nur Gutes zu tun, sondern sich dafür auch von den Netzbetreibern bezahlen zu lassen.

Bislang ist es allerdings noch auf Kraftwerke zugeschnitten und daher für Betreiber kleiner Batterien nicht gerade einfach zugänglich. Nicht zuletzt, wird eine volle Verfügbarkeit der Anlagen verlangt: Die angebotene Leistung muss 24 Stunden jeden Tag bereitstehen, was realistisch kaum zu erreichen ist. Sinnvoll ist das gar nicht unbedingt, denn eine doppelte Reserve bei halber

Verfügbarkeit hätte insgesamt die gleiche Wirkung, weil es auf die Summe der im ganzen Netz verteilten Reserve ankommt.

### **Blindleistung**

Die Bereitstellung von Blindleistung ist immer dort vorteilhaft, wo sie gerade gebraucht wird, denn Blindstrom belastet die Leitungen und führt zu zusätzlichen Verlusten. Daher ist eine dezentrale Bereitstellung sehr günstig, denn sie belastet die Leitungen kaum. Batteriespeicher könnten Blindleistung zur Verfügung stellen – aber auch hier fehlt im Moment wieder eine angemessene Vergütung.

### **Notstromversorgung und Netzersatzbetrieb**

Eine Notstromversorgung lässt sich nicht nur für das Eigenheim mit Solaranlage realisieren, sondern unter Umständen sogar für größere Bereiche, Mietshäuser, ganze Siedlungen oder Blöcke in der Stadt. Selbst eine ganze Stadt könnte im Notstrombetrieb weiter laufen, wenn dafür nur einige technische Details berücksichtigt würden: Die Speicher müssten koordiniert nach geeigneten Regeln zusammenarbeiten, ebenso Stromquellen und Verbraucher. Und: Der Netzbetreiber müsste damit rechnen, dass der Strom nicht immer „aus“ ist, wenn er die Versorgung einstellt. Wie das technisch möglich wäre, wird später noch erklärt.

### **Glättung der Einspeiseleistung**

Der Verlauf der Einspeisung von Solarenergie könnte so weit geglättet werden, dass ein Mehrfaches der heute schon installierten Leistung eingespeist werden kann. Das Problem der hohen Spitzenbelastung der Netze durch die gleichzeitige Einspeisung am Tag könnte so behoben werden. Also wäre ein Zubau von vielen

Solaranlagen ohne Verstärkung der Netze möglich, wenn ein Teil der gespeicherten Energie nachts eingespeist würde.

### **Nutzung von Windenergieüberschuss**

Beim Durchzug eines Sturms gibt es regelmäßig Situationen, in denen ein Teil der Windparks abgeschaltet oder in der Leistung begrenzt werden muss. Diese überschüssige Leistung fällt meistens für einige Stunden an und könnte von den Speichern aufgenommen werden. Der zeitweise auftretende Überschuss führt bisher zu extrem niedrigen oder sogar negativen Preisen an der Strombörse. Windparkbetreiber erhalten eine Entschädigung für den Ausfall, wenn sie die Leistung ihrer Anlagen begrenzen müssen. Mit den Kosten wird die EEG-Umlage belastet, die dadurch ansteigt und damit auch der Strompreis für private Kunden und kleinere Betriebe. Bisher müsste ein Speicherbetreiber den vollen Haushaltspreis zahlen, wenn er den überschüssigen Strom aus der Windenergie speichern wollte, denn er müsste den Strom über seinen normalen Zähler beziehen. Das wäre fast fünfmal so teuer, wie die reguläre Einspeisevergütung von neuen Windenergieanlagen, obwohl der Strom zu diesen Zeiten eigentlich besonders günstig sein könnte. Natürlich wird das deshalb nicht getan, und so müssen Windparks weiter in der Leistung begrenzt werden. Die Aufnahme von Spitzenleistung aus Windenergie kann Übertragungsleitungen entlasten und eventuell nötigen Ausbau ersparen. Daher wäre der Bau von Speichern direkt in Windparks besonders wirkungsvoll und sollte unverzüglich gefördert werden. Gleichzeitig wäre es denkbar, die Ausgleichszahlungen nach einer Übergangsfrist von zwei Jahren auslaufen zu lassen, um den Bau von Speichern zu beschleunigen.

## **Dämpfung von Schwingungen**

Das europäische Verbundnetz ist im Laufe der Zeit immer weiter gewachsen. Durch die räumliche Ausdehnung kommt es zu niederfrequenten Schwingungen, in denen elektrische Energie zwischen den Grenzen des Netzes hin- und herpendelt: Sogenannte Netzschwingungen oder Frequenzpendelungen. Diese können durch größere Schaltvorgänge ausgelöst werden und müssen gedämpft werden, um die Stabilität im Netz zu erhalten. Batteriespeicher könnten effektiv und kostengünstig dazu beitragen, solche Schwingungen zu reduzieren, ebenso entsprechend geregelte Ladegeräte für Elektroautos.

## **Wer soll das alles bezahlen?**

Das ist eine schwierige Frage. Denn: Bei den verschiedensten Optionen gibt es immer die Angst, dass der Strom in Deutschland teurer werden könnte. Und das ist problematisch, weil in den meisten anderen Ländern Energie jetzt schon billiger zu haben ist. Für die Industrie ist also immer die Drohung naheliegend, in solche Länder auszuweichen. Die weitere Belastung der Privatkunden mit Umlagen auf den Strompreis hat auch wenig Freunde. Die Netzbetreiber müssen den Betrieb des Netzes und die notwendigen Investitionen in Erhaltung und Erneuerung kostendeckend durchführen können. Zusätzlicher Kostendruck könnte bewirken, dass an notwendigen Investitionen und Wartungsarbeiten gespart wird, mit dem Ergebnis einer schlechter werdenden Versorgung. Das will keiner.

Wir müssen uns an dieser Stelle darüber klarwerden, dass Sonnenenergie uns zwar prinzipiell günstig (nämlich gratis!) zur Verfügung steht – dass wir aber nicht sofort Geld mit ihr sparen können. Wir müssen zunächst sogar investieren, um später dann in den Genuss der Einsparungen kommen zu können. Das ist eigentlich nichts Neues. Umso dreister ist es, wenn Vertreter der alten

Energetechnik ausgerechnet die Sonnenenergie mit Forderungen nach Marktfähigkeit konfrontieren, während sie gleichzeitig Billigstrom aus alten, abgeschriebenen Kraftwerken produzieren und die Umwelt belasten.

Sollte der Staat mit Steuermitteln einspringen, etwa mit breiten Förderprogrammen? Vielleicht. Allerdings wäre genau zu prüfen, auf welche Weise – und ob es auf der anderen Seite nicht vielleicht Möglichkeiten gäbe, auch staatliche Einnahmen zu erzielen, die einen Lenkungseffekt hätten. Dazu später mehr.

## **Die Risiken in der Zukunft**

### **Dunkelflaute: kein Licht, kein Wind**

Die gefürchtete „Dunkelflaute“, von der ich oben schon gesprochen habe, tritt auf, wenn im Winter kalte und feuchte Luft unter stabilen Hochdruckeinfluss kommt. Trübes Winterwetter also, bei dem ein zäher Hochnebel der Sonne keine Chance lässt. Hier wird auch von Inversionswetterlage gesprochen, weil die Luft unten kälter ist als oben: Die kalte Luft steigt – physikalisch bedingt – nicht nach oben, und der Nebel an der Grenze der Luftschichten bleibt stabil und reflektiert das wärmende Sonnenlicht zurück in den Weltraum. So kann sich der Boden, und erst mit dem Boden auch die darüberliegenden Luftschichten, kaum erwärmen. Eine solche Situation kann in Mitteleuropa einige Wochen anhalten. Wind und Sonnenenergie sind dann knapp – während gleichzeitig aufgrund des Heizbedarfs und der langen nächtlichen Dunkelheit ein hoher Energiebedarf vorliegt. Damit müssen wir rechnen und wir sollten auch in Zukunft darauf vorbereitet sein.

## **Die Probleme**

Der Ausstieg aus der Kernenergie ist in vielen Ländern in Europa beschlossene Sache, lediglich die Atommächte Frankreich, England und Russland halten, neben einigen anderen, daran fest. Das hängt natürlich damit zusammen, dass sie auch langfristig einen eigenen Zugang zu Kernwaffen behalten wollen. Dafür werden Kernreaktoren und entsprechende Fachleute benötigt. Es gibt aber viele Kernkraftwerke, die in einigen Jahren das Ende ihrer technische Nutzungszeit erreicht oder sogar schon überschritten haben. Von einem nennenswerten Neubau, der diese Lücke schließen könnte, kann nicht die Rede sein. Denn die wenigen in Planung oder Bau befindlichen Anlagen sind schon heute ein finanzielles Desaster, und der Strom aus diesen Anlagen wird teurer sein als jeder Strom aus erneuerbaren Energien. Der einzige Vorteil, der bei dieser Technik bleibt, ist ihre Funktionsfähigkeit im Winter, wenn es nicht genug Sonnenenergie und Windenergie gibt.

Wenn in einigen Jahren ein großer Teil der alten Kernkraftwerke vom Netz geht, müssen sie durch andere Erzeugungskapazitäten ersetzt werden. Daher ist es unverzichtbar, den Ausbau von erneuerbaren Energien wieder zu steigern. Meist haben wir durchaus Wind- und Sonnenenergie zur Verfügung – nur nicht immer genug. Der Vorteil von Windenergieanlagen und Solaranlagen ist es, dass sie in relativ kurzer Zeit und auch dort, wo sie am dringendsten benötigt werden, gebaut werden können. Das gilt auch für Batteriespeicher. Bei Windparks an Land ist die Inbetriebnahme innerhalb eines halben Jahres möglich, wenn die Genehmigungen vorliegen, und kleine Solaranlagen lassen sich sogar in wenigen Tagen errichten! Neu in Betrieb gehende Anlagen belasten die EEG-Umlage weit weniger, da die Einspeisevergütungen deutlich gesunken sind. Oft sind diese gar nicht höher, als die Erzeugungskosten anderer Kraftwerke. Sie können günstigen Strom liefern. Wir können

uns das also leisten. Die garantierte Einspeisevergütung nach dem EEG ist aber immer noch wichtig, um das Risiko für Investoren und Banken abzusichern, selbst dann, wenn meistens der Strom aus anderen Kraftwerken teurer ist. Dann ist die garantierte Einspeisevergütung nur eine Art Versicherung, die keine Kosten verursacht. Kurzfristig müssen wir allerdings genügend fossile Kraftwerke in Bereitschaft halten, um Lücken in der Versorgung schließen zu können. So könnte Deutschland die zugesagten Klimaschutzziele noch erreichen, denn solange Kraftwerke nur für den seltenen Fall der Dunkelflaute bereitgehalten werden, verursachen sie kaum Emissionen. Und die Einhaltung der Ziele, hilft nicht nur den Klimawandel zu begrenzen, sondern auch hohe Kosten durch drohende Ausgleichzahlungen zu vermeiden.

### **Ausstieg aus der Braunkohleverstromung**

Der Ausstieg aus der Braunkohle sollte so schnell wie möglich erfolgen, um den Klimawandel nicht noch weiter zu beschleunigen. Übergangsweise ist ein Teillastbetrieb möglich – auf diese Weise kann ein erheblicher Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen verhindert werden. Einige Kraftwerke sind flexibel genug, um zusammen mit zusätzlichen Windenergie- und Solaranlagen die Versorgung sicherzustellen. Einige der ältesten und am wenigsten flexiblen Kraftwerke können kurzfristig außer Betrieb genommen werden. Für die Renaturierung der Abbaugelände sind viele Arbeitskräfte notwendig. Dies ist eine Möglichkeit, den aus der Braunkohleindustrie entlassenen Menschen eine sinnvolle Perspektive zu geben. Die Kosten sollten auf die Stromkosten der verbleibenden Anlagen aufgeschlagen werden. Damit wäre auch das Problem des viel zu billigen Braunkohlestroms verringert.

Ein weiteres Mittel, um Engpässe zu überstehen, wäre die gezielte Reduzierung der Last. Wir kommen noch darauf zurück.

### **Zu viel Strom?**

Kann es das geben: zu viel Strom? Nun, ich denke, es gibt schlimmere Luxusprobleme. Bei einem zügigen Ausbau der erneuerbaren Energien hätten wir vermutlich bald mehr installierte Leistung, als es unserem Bedarf entspricht. Wäre das ein Problem? Nein, denn bei Windenergie und Sonnenenergie entstehen praktisch keine Grenzkosten. Deshalb kann es günstiger sein, einfach eine höhere Leistung zu installieren und in Kauf zu nehmen, dass einige Stunden lang, wenn viel Wind, viel Sonne und wenig Verbrauch zusammenkommen, nicht alles genutzt werden kann. Oft wird argumentiert, dass der Ausbau von Windenergie und Solaranlagen begrenzt werden muss, weil Windenergie abgeregelt werden muss. Das ist nicht haltbar. Im Gegenteil, wir brauchen sogar mehr davon, damit es nicht nur bei einem Sturm genug Windenergie gibt. Die Tatsache, dass der Preis an der Börse dann gegen Null geht oder sogar negativ wird, zeigt nur, wie sehr dieses Marktinstrument versagen kann – und dass es reformiert bzw. modifiziert werden sollte.

Energie ist nicht einfach wertlos, nur weil es einmal ausreichend davon gibt. Die gleichen Probleme gibt es regelmäßig in der Landwirtschaft, wenn der Markt alles regeln soll und Weizen billiger als Brennholz und daher verheizt wird. Das ist kein schlechter Witz, es gibt sogar speziell dafür entwickelte Getreideheizkessel.

Bei mittleren Windgeschwindigkeiten oder bedecktem Himmel bringt die zusätzliche Leistung von Wind und Sonne unter Umständen weit mehr, als ein Speicher leisten könnte, der den seltenen Überschuss später nutzbar machen soll. Technisch gibt es ein Optimum, an dem ein sinnvoller Speicheranteil und eine genügende installierte Leistung an erneuerbaren Energien eine gute

Versorgung sicherstellen kann. In Zukunft werden Langzeitspeicher mit Wasserstoff eine große Rolle spielen, auch, weil der Wasserstoff in Fahrzeugen als Kraftstoff genutzt werden kann.

### **Sektorenkopplung – eine mögliche Lösung**

Hinter dem etwas sperrigen Begriff „Sektorenkopplung“ verbergen sich unterschiedliche Möglichkeiten der Energieumwandlung. Dabei geht es auf der einen Seite um den Sektor Strom, während mit den anderen Sektoren im Prinzip sämtliche anderen Energieträger gemeint sind. So kann, zum Beispiel, Strom in Wärme umgewandelt werden, die einfachste Art der Umwandlung, die auch ständig von selbst passiert: Bei der elektrischen Energieübertragung und Nutzung von Strom entsteht Wärme (Kabel und Leitungen erwärmen sich), die meist allerdings nicht nutzbar ist. Im Wohnbereich schon, denn während der Heizperiode tragen alle elektrischen Geräte, solange sie nicht im Keller stehen, zur Heizung der Wohnung bei. Was vor allem im Zeitalter der klassischen Glühbirnen gar nicht wenig Leistung umfasste, oft einige hundert Watt. Bei Passivhäusern, die so gut gegen Wärme gedämmt sind, dass kaum eine Heizung erforderlich ist, wird dieser Effekt sogar mit eingerechnet. Das kann dann dazu führen, dass ein Passivhaus nach dem Skiurlaub erst einmal recht kalt ist, weil in dieser Zeit niemand da war, der im Haus gekocht, gebacken, Wäsche gewaschen oder die Spülmaschine betätigt hat. Die direkte Umwandlung von Strom in Wärme ist technisch sehr einfach zu haben. Am besten allerdings wäre es, wenn die Wärme wenigstens für einige Stunden speicherbar wäre. Das könnte schon reichen, um die bei einem Sturm entstehende überschüssige Windenergie nutzbar zu machen. Ein elektrischer Heizstab im Pufferspeicher der Heizung oder in der Fernwärmanlage und eine geeignete Steuerung würden ausreichen. Eine noch bessere Umwandlung allerdings wäre

die Wärmenutzung mit Hilfe von Wärmepumpen, die bei gleichem Stromeinsatz die drei- bis vierfache Wärmemenge gewinnen können. Allerdings nur auf einem recht niedrigen Temperaturniveau – und es wird zusätzlich ein Medium benötigt, dem Wärme entzogen werden kann, etwa die Außenluft.

Die Investitionskosten für Wärmepumpen sind allerdings höher und verlangen einen Einsatz von mehr als 500 Stunden im Jahr.

Eine weitere Möglichkeit ist die Umwandlung von Strom in Treibstoff. Die einfachste Umwandlung dieser Art ist die Elektrolyse, bei der Wasser durch Strom in Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten wird. Der brennbare Wasserstoff kann entweder unmittelbar als Treibstoff verwendet werden oder es können mit ihm andere Treibstoffe hergestellt werden, etwa Methan, Methanol oder auch synthetisches Benzin. Wasserstoff selbst ist allerdings gar nicht so schlecht wie sein Ruf.

### **Was hat der Wasserstoff sich zuschulden kommen lassen?**

Eine Reihe von Explosionen. Rechnen Sie sich an den Chemieunterricht? Hier lernen wir den Wasserstoff meist als das berüchtigte „Knallgas“ kennen. Dabei gibt es eine Reihe von anderen Gasen, mit denen man es auch ordentlich knallen lassen kann, sogar noch lauter, wenn man es richtig anstellt.

Dann gibt es natürlich die Wasserstoffbombe, die die verheerendsten künstlich erzeugten Explosionen zu verantworten hat und die uns durch ihre bloße Existenz und ihr Vernichtungspotential weiterhin bedroht.

Und natürlich haben wir auch diese Bilder im Kopf: Am 6. Mai 1937 wird der gigantische Zeppelin LZ 129, die „Hindenburg“, bei seiner Landung in Lakehurst (New Jersey, USA) zerstört, als sich seine brennbare Hülle und die Wasserstofffüllung entzündet. Doch die Luftschiffskatastrophe von Lakehurst war

eigentlich gar keine Explosion, sondern „nur“ ein heftiger Brand, bei dem 35 der 97 Menschen an Bord ums Leben kamen. Die Ursachen sind bis heute nicht vollständig geklärt, aber seit diesem Unglück wird als Traggas von Ballonen und Luftschiffen kein Wasserstoff mehr verwendet, sondern das unbrennbare Helium.

Abb.: X: Das Luftschiff D-LZ129, die „Hindenburg“ (19XX),



Diese Datei ist im Bestand der [National Archives and Records Administration](#) verfügbar, katalogisiert unter dem National Archives Identifier (NAID) [518856](#).

### Quelle:

So viel zu den Sünden des Wasserstoffs. Allerdings hat er auch ein paar handfeste Vorteile: Er verbrennt mit Sauerstoff oder Luft rückstandsfrei zu reinem Wasser. Kein anderer Treibstoff kann da mithalten. Und sein massebezogener Energieinhalt ist ebenfalls einsamer Rekord: fast das Dreifache von Dieseltreibstoff!

Leider lässt sich Wasserstoff nicht so einfach speichern. Spielt das Gewicht keine Rolle, dann genügen die bewährten Druckflaschen aus Metall. Wasserstoff kann sehr gut in Brennstoffzellen verwendet werden, um elektrische Energie zu gewinnen. Ein Fahrzeug, das mit Brennstoffzellen und einem Elektromotor angetrieben wird, ist effizient und produziert keine Abgase. Besonders attraktiv wäre ein Hybridfahrzeug, das eine genügend große Batterie besitzt, die zusätzlich an einer Steckdose aufgeladen werden kann. So muss man für kurze Strecken keinen Wasserstoff verwenden und

kommt auch mit Strom weiter, wenn keine Wasserstofftankstelle auf der Strecke liegt. Steckdosen gibt es fast überall.

Die Herstellung von Wasserstoff ist eine Möglichkeit, elektrische Energie in chemische umzuwandeln, um später dann wieder Strom zu erzeugen. Wasserstoff als Treibstoff kann bei einem Unfall sogar sicherer sein als Benzin, denn er ist so leicht, dass er sofort nach oben in die Luft entwindet. Selbst, wenn er in Brand gerät, ist er weniger gefährlich als allgemein angenommen: Die Flamme brennt ohne große Abstrahlung von Wärme direkt nach oben.

Wasserstoff ist also ein hocheffizienter Treibstoff, den man in Zukunft weit mehr nutzen könnte. Für große Fahrzeuge ist er tiefgekühlt und verflüssigt verwendbar und hat dann eine hohe Energiedichte, da keine Drucktanks benötigt werden. Schon mit einfachen Drucktanks auf dem Dach, hat der erste Wasserstoffzug eine Reichweite von 1000 Kilometern. Auch in der Luftfahrt wäre ein Antrieb ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich – und das sogar bei höheren Reichweiten.

Bei der Elektrolyse, also der Herstellung von Wasserstoff mit Hilfe von Strom, aber auch bei der Verstromung des Wasserstoffs mit Brennstoffzellen, gibt es Verluste in Form von Wärme. Wird im Winter Strom aus Brennstoffzellen gewonnen, lässt diese Wärme sich gut zum Heizen nutzen. Auch die meisten Fahrzeuge müssen im Winter geheizt werden: Ein Wasserstoff-Hybridauto könnte schon vor Beginn der Fahrt die Batterie mit der Brennstoffzelle laden, mit der Abwärme das Fahrzeug aufheizen und die Scheiben abtauen. Das wäre effizient und komfortabel zugleich.



Abb. X: XXXX, Quelle: Netzwerkagentur Erneuerbare Energien Schleswig-Holstein

Wasserstoff kann unter Umständen auch dem Erdgas beigemischt werden, das Gasheizungen und Gasherde verwenden. Das früher verwendete Stadtgas enthielt zur Hälfte Wasserstoff. Es gibt also schon Erfahrungen mit wasserstoffhaltigem Mischgas. Wir können davon ausgehen, dass Wasserstoff in Zukunft eine große Rolle als sauberer Energieträger spielen wird.

Eine andere Möglichkeit, ist die Herstellung von Methan aus Wasserstoff und Kohlendioxid oder die Herstellung von Methanol, das einfach in Tanks gespeichert werden könnte. Methanol lässt sich mit speziellen Brennstoffzellen wieder verstromen. Das Kohlendioxid kann sogar aus der Luft entzogen werden.

## **Störung der automatischen Kommunikation und Fernsteuerung – ein verborgenes Risiko**

Um die Energieversorgung in Zukunft effizienter zu machen, sollen kleine Stromquellen zu „virtuellen Kraftwerken“ verbunden werden. So soll ein SmartGrid, also ein schlaues Stromnetz, entstehen, bei dem auch die Lasten digital beeinflusst werden können. Diese Konzepte basieren auf einer digitalen Kommunikationstechnik, die im Prinzip versagen oder missbraucht werden kann, und sind daher mit erheblichen Risiken verbunden. Beruht sie zum Beispiel auf einer Internetverbindung, kann das gesamte Energiesystem instabil werden. Der Hintergrund: Die Stromversorgung kann gefährdet werden, wenn die Regelung und Koordinierung der „virtuellen Kraftwerke“ und anderer Systemen ohne Internet nicht mehr richtig funktioniert.

Unter virtuellen Kraftwerken versteht man einen Zusammenschluss von vielen kleinen Erzeugungseinheiten, die über eine Kommunikationsverbindung zusammen wie ein großes Kraftwerk gesteuert werden. Beim Ausfall des Kommunikationsnetzes kann die Funktion der einzelnen Energiequellen nicht mehr gesteuert werden. Basiert die Versorgung weitgehend auf solchen Systemen, kann es zu weitreichenden Störungen der Energieversorgung kommen, obwohl technisch genug Energie verfügbar wäre.

### **Angriff auf IT-Steuerung**

Die weitaus größere Gefahr aber könnte darin liegen, dass das Internet *funktioniert* –, aber missbraucht wird, und genau dadurch die Stromversorgung gefährdet wird. Wenn viele virtuelle Kraftwerke, steuerbare Lasten und Stromquellen durch „feindliche Kontrolle“ so gesteuert werden, dass eine Destabilisierung des Systems

das Ziel ist, kann die Versorgung gefährdet werden. Hier ist ein wirksamer Schutz schwierig:

Selbst wenn die Gefahr eines Fehlers im System der Steuerungsprogramme durch sorgfältige Qualitätsüberwachung in Grenzen zu halten wäre, gibt es Risiken. Denn: Es ist denkbar, dass die Steuerungen der unzähligen Anlagen und Geräte, die mit dem Stromnetz verbunden sind, durch einen digitalen Angriff auf die Software destruktiv ferngesteuert werden. Ein solcher Angriff wäre nicht mit Sicherheit abzuwehren und könnte fatale Folgen haben – oder uns alle erpressbar machen.

Der Roman „Blackout“ von Marc Elsberg beschreibt ein solches Szenario als Thriller: Ein Angriffsziel dort sind die modernen Stromzähler, die Smart Meter. Viele dieser Zähler verfügen über die Möglichkeit einer ferngesteuerten Abschaltung der angeschlossenen Verbraucher. Sie wird von den Versorgungsunternehmen gerne verwendet, um säumige Kunden an die Zahlung ihrer Stromrechnung zu erinnern. Wirkt auf den ersten Blick smart, ist aber problematisch: Werden nämlich über einen digitalen Angriff gleichzeitig alle Zähler ferngesteuert abgeschaltet, käme es zu einer sehr riskanten Situation. Diese gleichzeitige Abschaltung würde nicht nur die Versorgung der angeschlossenen Haushalte unterbrechen, sie könnte auch das Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch so stören, dass das Stromnetz instabil wird.

Ich denke: Ein Zähler ist ein Messgerät und sollte kein ferngesteuerter Schalter sein, nur weil diese Funktion auch nebenbei möglich ist. Noch problematischer sind viele Anlagen in der Stromverteilung, die auch über digitale und vernetzte Steuerungen funktionieren.

Wer sich die geplanten Abwehrstrategien für solche Bedrohungen ansieht, wird kaum ruhiger schlafen können. Die

Empfehlungen der Forschungsgruppe FRI der Hochschule Bremen zum Beispiel (Zusammenfassung relevanter Informationssicherheitsstandards für deutsche Verteilnetzbetreiber) listet Maßnahmen auf, die nicht einfach nebenbei realisiert werden können, sondern sehr viel zusätzliches und hochqualifiziertes Personal benötigen, wenn sie tatsächlich umgesetzt werden sollen. Außerdem könnte der Alltagsbetrieb eines Netzbetreibers dadurch in einer Weise beeinträchtigt werden, die bei den Mitarbeitern nicht gerade auf Begeisterung stoßen dürfte. Das wiederum gefährdet die Umsetzung und damit die Wirksamkeit solcher Maßnahmen.

Es ist natürlich verständlich, wenn der Bock seine Expertise anbietet, wenn es ums Gärtnern geht – aber es ist naheliegend, ihm auch eigene Interessen zu unterstellen.

Smart Home?

Es geht nicht nur um „intelligente“ Zähler. Die geplante Digitalisierung der Energieversorgung und gesetzliche Einführung der „Smart Meter“, der digitalen Zähler, ist erst der Anfang. Im Moment haben die Zähler kaum Funktionen, die über das Messen des Energieverbrauchs hinausgehen. Gut, der eigene Verbrauch soll später über eine Smartphone-App jederzeit und überall ablesbar sein und damit zum Energiesparen anregen. Wir werden sehen, was das bringt. Ein weiterer Schritt ist es, auch die Haushaltsgeräte digital mit dem Zähler zu vernetzen, um dann einmal, wenn es variable Tarife gibt, automatisch die Waschmaschine oder den Geschirrspüler genau dann starten zu lassen, wenn der Strom billiger ist. Wenn die Geräte aber einmal digital vernetzt sind, ist es auch möglich, zu erfassen, wann sie benutzt werden.

Das Problem ist aber, dass über die Daten des Energieverbrauchs, also der Funktion von Heizung, Waschmaschine, Geschirrspüler und Fernseher unser privates Leben ausspioniert werden könnte. Sicher, das geht auch schon über die Computer und die

Smartphones, die wir täglich benutzen, allerdings wäre es noch etwas anderes, wenn fast alle Haushaltsgeräte vernetzt wären. Für eine sichere Energieversorgung wäre eine solche Vernetzung nicht notwendig, sondern sogar gefährlich.

Ein militärischer Angriff auf ein über Internet vernetztes Energiesystem wäre eine schwerwiegende Bedrohung der Sicherheit. Die Energieversorgung eines Landes ist schon immer eins der militärischen Lieblingsziele gewesen. Gerade bei den Kernkraftwerken sollte man dieses Risiko beachten. Auch das Übertragungsnetz ist ein leichtes Ziel für verschiedene Arten von Angriffen.

Jetzt aber genug mit der Schwarzmalerei!

## **Die Sonne geht auf**

Mit den dezentralen erneuerbaren Energien, vor allem mit der Solarenergie, vollzieht die Menschheit den Schritt in ein neues Zeitalter. Bisher haben wir uns den Luxus von Licht, Wärme und anderen Annehmlichkeiten teuer erkaufen müssen – nicht zuletzt durch Landschaftszerstörung und Umweltverschmutzung. Viele alte Olivenbäume im Mittelmeerraum stammen noch aus einer Zeit, in der Olivenöl sehr wertvoll war – nicht als Nahrungsmittel, sondern für den Luxus der Beleuchtung! Auch das Wachs der Bienen war ein kostbares Gut, weil es für Kerzen gebraucht wurde. Dann kam John D. Rockefeller mit dem Erdöl, das er den amerikanischen Farmern am Anfang mit geschenkten Lampen schmackhaft machte. Nun war eine Lichtquelle am Abend kein Luxus mehr, den nur wenige sich leisten konnten.

Das „Rockefellerprinzip“ ist inzwischen ein Begriff in der Wirtschaftslehre und wird vielfach erfolgreich angewandt: Ein Tintenstrahldrucker kostet, wie wir alle wissen, kaum mehr als ein Satz dazugehöriger Tintenpatronen des Herstellers. Mit den tatsächlichen Herstellungskosten des Geräts hat er nicht viel zu tun; sein Ziel ist ein anderes: Er soll es uns verführerisch leicht machen, einen neuen Drucker zu kaufen. Die Tinte kostet dann langfristig am meisten – und nur an ihr verdient der Hersteller, so wie Rockefeller mit dem Erdöl.

Besonders geschickt ist eine Variante dieses Prinzips bei Verträgen für Smartphones: Für den Abschluss eines zweijährigen Vertrags bekommt man das neueste (und attraktivste) Gerät fast umsonst. Alle Preise werden so gestaltet, dass auf den ersten Blick nicht viel gegen einen Vertragsabschluss zu sprechen scheint. Über zwei Jahre gerechnet, scheint der Gesamtpreis für das neue Gerät und die Nutzung akzeptabel, wenn man sich ansieht, wie teuer ein vertragsfreies Gerät gleicher Art angeboten wird.

Dumm nur, wenn es noch ein Jahr dauert, bis ein schon laufender Vertrag gekündigt werden kann. So fängt man Kunden, die eigentlich schon gut „bedient“ sind ...

Energieversorgung ist schon immer ein besonders geeignetes Feld für dieses Prinzip gewesen. Daher ist es umso beunruhigender für die in diesem Geschäft Etablierten, wenn es genau an dieser Stelle auf den Kopf gestellt werden soll. Man hätte damit rechnen können, dass dieser Wandel nicht ohne erbitterten Widerstand geschehen würde ...

## **Sonnenenergie vom Dach ins Netz: Umkehr des Rockefellerprinzips**

Bei den Solarzellen auf dem Einfamilienhaus geschieht nämlich Folgendes: Konsumenten werden plötzlich unabhängig von ihren Lieferanten und steigen sogar selbst in das Geschäft mit der Energie ein: Sie beliefern jetzt die Stromnetzbetreiber. Wir können mit der Solaranlage auf dem Dach mehr erzeugen, als im Haus darunter verbraucht wird. Leider ist das Sonnenlicht nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt, aber selbst im Winter würde es für eine großzügige Beleuchtung ausreichen, nicht zuletzt durch effiziente LED-Lampen.

Die langfristigen Auswirkungen dieses Wandels sind noch gar nicht abzusehen. Es gibt schon viele Regionen der Erde, vor allem in Afrika, wo vermutlich nie in herkömmlicher Weise eine umfassende zentrale Elektrifizierung stattfinden wird. Stattdessen wird es dort kleine, unabhängige Solarsysteme geben, die vielleicht einmal mit dem jeweiligen Nachbarsystem vernetzt werden könnten, wenn es Vorteile gibt. Daraus kann auch ein größeres Netz entstehen, aber ohne konventionelle Kraftwerke.

Auch in Europa werden wir in Zukunft einen großen Teil des Stroms dort gewinnen, wo er gerade gebraucht wird. Man kann sich etwa Parkhäuser oder überdachte Parkplätze mit Solardächern vorstellen, in denen Elektroautos beim Parken mit Sonnenenergie aufgeladen werden. Gleichzeitig könnten die Batterien in den Autos als Reserve für das Netz dienen, wenn die Leistung der Stromerzeugung einmal nicht ausreicht. Wohnhäuser und andere Gebäude hätten Batteriespeicher im Keller und wären in der Lage, sich selbst und zum Teil noch andere zu versorgen. Allein die Tatsache, dass in Norddeutschland ein Einfamilienhaus mit großer

Solaranlage das Doppelte des eigenen Verbrauchs erzeugen kann, beweist, dass es in anderen Ländern, die mehr Sonnenlicht und auch mehr Fläche pro Einwohner haben, umso besser gehen muss. Nicht nur auf Einfamilienhäusern könnte noch viel mehr Solarstrom erzeugt werden, sondern auch auf Parkplätzen, an Fassaden und Lärmschutzwänden, selbst öffentliche Plätze könnten mit begehbaren Solarmodulen gepflastert werden. Am Anfang der energetischen Nutzung von Kernreaktoren träumte manch einer davon, Strom könnte so billig werden, dass man ihn gar nicht mehr zählen und abrechnen müsste. Dieser Traum ist heute ausgeträumt, was die Kernenergie betrifft – aber die Solarenergie könnte ihn ablösen. Schon heute gibt es Ausschreibungen für Solarkraftwerke in sonnenreichen Ländern, bei denen ein Strompreis von etwa 2,5 Cent pro Kilowattstunde geboten wurde. Also weniger als ein Zehntel dessen, was wir für den Strom aus der Steckdose bezahlen.

Es ist klar, dass es Widerstand gibt, wenn die Solarenergie vieles auf den Kopf stellen will, womit früher gut verdient werden konnte. Aber nicht aussichtslose Abwehr wird die etablierten Energieerzeuger und Netzbetreiber retten, sondern eher ein Einlenken und Annehmen der neuen Chancen, die sich ihnen bieten. Denn: Die sind gar nicht so gering.

Systematische Vernetzung von Energie etwa, kann ein sehr lukratives Geschäft sein – vor allem, wenn das Netz schon da und zudem in der Hand der Netzbetreiber ist. Aber es ist wieder kaum der freie Markt, der das alles schon regeln wird. Im Gegenteil: Es ist eine übergeordnete Leitung und Lenkung dieser Entwicklung notwendig. Und dabei muss sich auch die Politik darauf einlassen, einmal dickere Bretter zu bohren. Etwa, bestehende Besitzstände und Privilegien anzutasten und für die Allgemeinheit vernünftige Rahmenbedingungen in der Energieversorgung zu schaffen.

Die politische Begrenzung des Zubaus an Solaranlagen hat einen wachsenden Wirtschaftszweig in Deutschland ruiniert – angeblich, um einen Anstieg der Strompreise zu begrenzen. Die wirklichen Gründe sind vermutlich eher dort zu suchen, wo vorher an überhöhten Strompreisen zur Mittagszeit verdient wurde. Doch der Schaden für die Wirtschaft, der durch den Ausverkauf der Solarindustrie verursacht wurde, ist vielfach höher als die versprochenen Einsparungen.

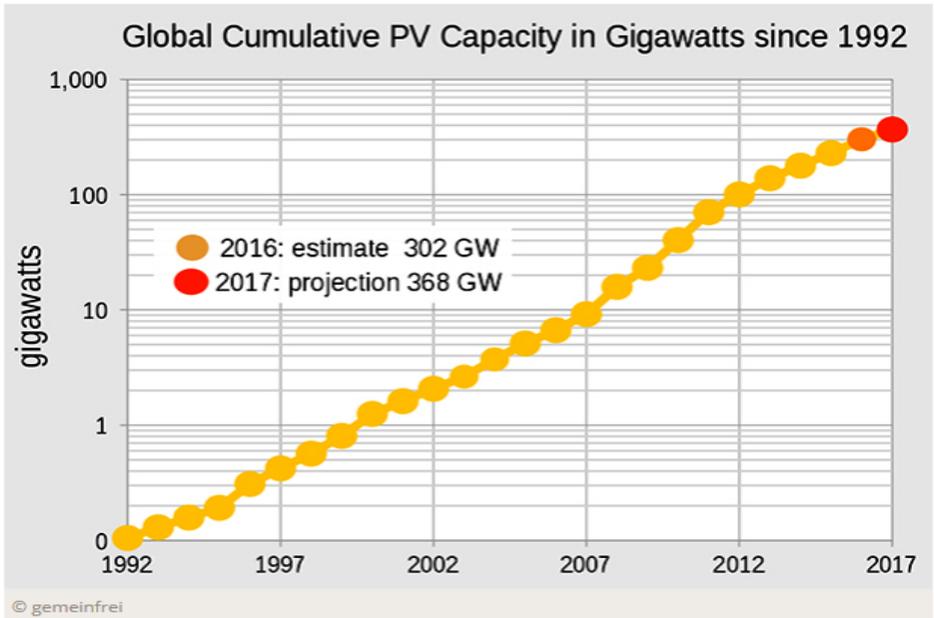
Selbst wenn jetzt wieder ein Ausbau der Solarenergie erfolgen sollte, wird davon kaum ein Hersteller in Deutschland profitieren, sondern höchstens Handel und Handwerk. Für einen erneuten Aufbau einer Solarindustrie in Deutschland ist die Zeit vermutlich längst abgelaufen und die historische Chance verspielt, denn heute kommen moderne, effiziente Solarzellen aus China und anderen Ländern des fernen Ostens. Und wer würde es erneut wagen, mit diesen Erfahrungen und mit der inzwischen etablierten Konkurrenz aus Asien erneut hier in den Aufbau einer Solarindustrie zu investieren?

### **Ist also alles im Eimer? Nein, im Gegenteil!**

Wir müssen nur lernen, über den nationalen Tellerrand hinauszusehen: Die Solarwirtschaft wächst weltweit mit einer erstaunlichen Geschwindigkeit und Dynamik. Bald wird dieser Zuwachs an neu installierter Leistung in der Lage sein, den wachsenden Energiebedarf der Menschheit auszugleichen.

## Solarenergie wurde drastisch unterschätzt

### Wachstum und Rentabilität der Photovoltaik übertreffen Prognosen bei weitem



Exponentielles Wachstum: installierte PV-Leistung weltweit

Abb. X. XXXX, Quelle: XXXX

Man beachte die exponentielle Skala: Zwischen 1997 und 2017 ist die weltweit installierte Photovoltaik-Leistung, gemessen in Gigawatt, um das Tausendfache gestiegen!

Und: Bisher nimmt die neu installierte PV-Leistung, im Vergleich zum Vorjahr, um fast vierzig Prozent zu – weit mehr als bei irgendeiner anderen Energietechnik, bei denen diese Zahlen eher rückläufig sind. Der weltweite Energiebedarf hingegen wird nach Schätzungen der IEA bis 2040 um etwa ein Drittel wachsen, also um etwa 1,5 Prozent pro Jahr. Das bedeutet: Die Solarenergie kann schnell genug wachsen, um den Energieverbrauch einzuholen.

Um zu zeigen, was dies für unsere zukünftige Energieversorgung bedeuten kann, habe ich in den folgenden Grafiken die Zahlen des Anteils von Sonnen- und Windenergie mit der gesamten Stromerzeugung verglichen. Dabei habe ich angenommen, dass die neu installierte Leistung von Solarstromkraftwerken nur um 30 Prozent und die von Windkraftwerken nur um 20 Prozent pro Jahr weiter anwächst – eine Abschätzung also, die etwa dem historischen Zuwachs entspricht und damit im Rahmen des Möglichen wäre.

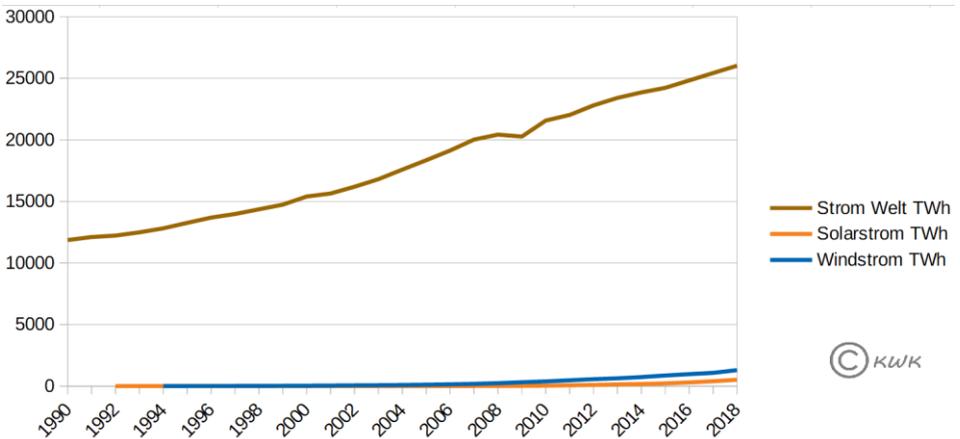


Abb. X: XXX, Quelle: eigene Darstellung

Seit 2014 ist die weltweite Stromerzeugung aus Sonne und Wind im Vergleich zur Gesamtstromerzeugung in der linearen Skala immerhin schon zu erkennen, und 2018 deckt sie schon fast den gesamten Zuwachs des Stromverbrauchs ab. Soweit der historische Verlauf der Grafik.

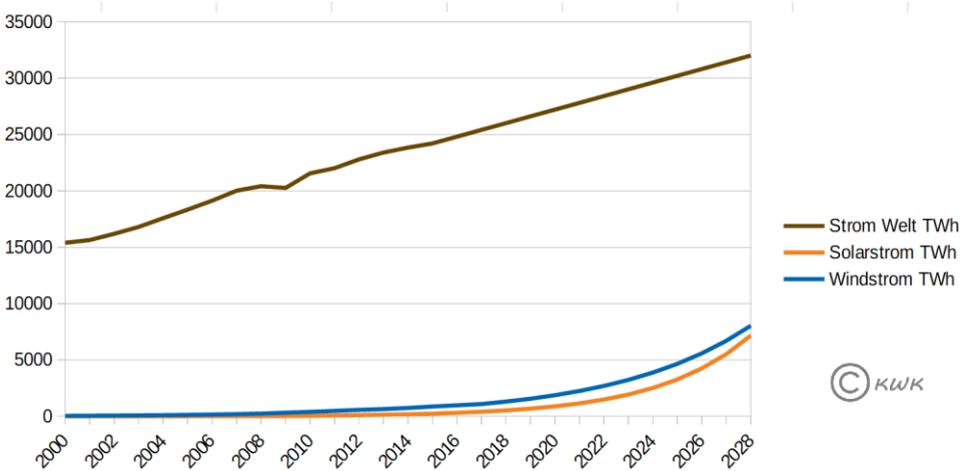


Abb. X: XXX, Quelle: eigene Darstellung

Wenn der Zubau von Solarstromanlagen weiter um 30 Prozent, und der Windenergie um 20 Prozent wachsen würde, ergäbe sich folgendes Bild:

Im Jahr 2028 könnte es so aussehen: Praktisch die Hälfte der Stromerzeugung wird dann durch diese erneuerbaren Energien geleistet. Ein großer Teil der fossilen Kraftwerke wird nun nicht mehr benötigt oder deckt nur die Engpässe ab, solange es noch nicht genug Speicher gibt.

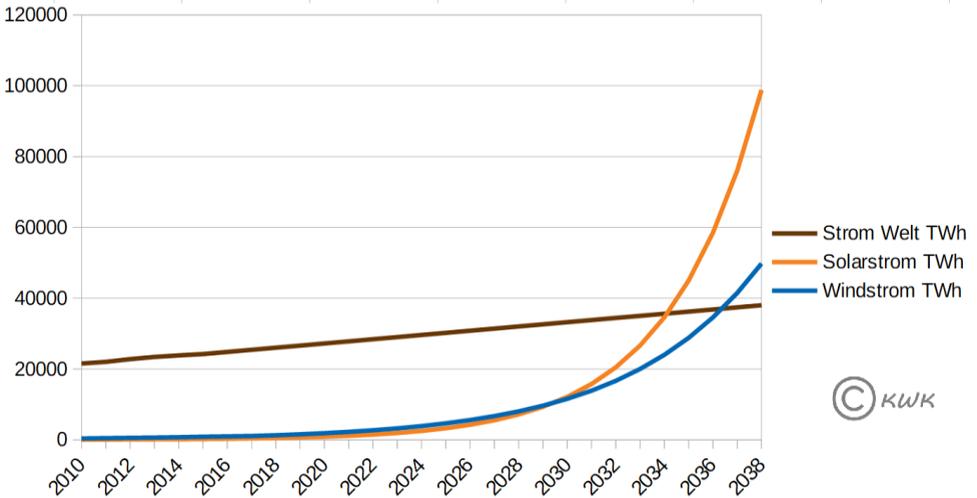


Abb. X: XXXX, Quelle: eigene Darstellung

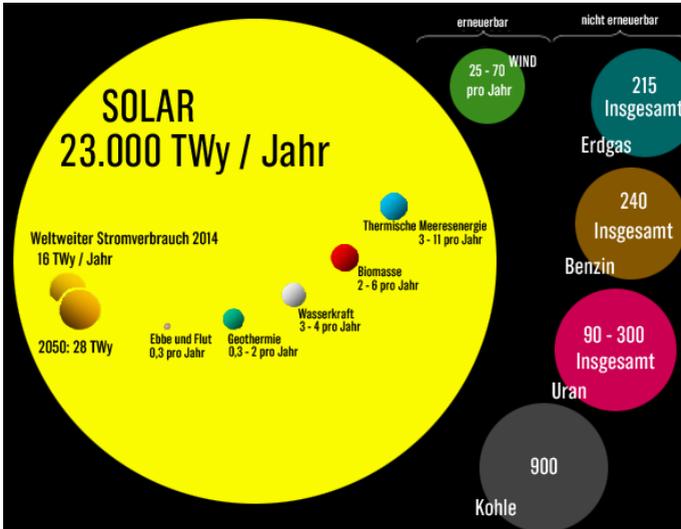
Etwa 2030 hätte der Solarstrom nach meiner Prognose den Wind überholt, wenn es bei dem angenommenen Zuwachs bleiben sollte, Sonne und Wind gemeinsam könnten fast den gesamten Bedarf an elektrischer Energie liefern. Weitere fünf Jahre später könnten wir mehr als genug Energie allein aus Wind und Sonne beziehen. Wir könnten damit in Zukunft nicht nur den Strombedarf abdecken, sondern alle unsere Bedürfnisse nach Energie.

Dies ist der weltweite Trend, soweit er nicht politisch begrenzt würde. Bleiben wir in Deutschland allerdings bei den bisher beschlossenen Plänen, dann bestreiten wir bis 2040 nur 60 Prozent des Strombedarfs aus Wind und Sonne – und hätten uns, als ehemalige Weltmeister der erneuerbaren Energien, gründlich blamiert.

Warum sollten Sie den von mir erstellten Prognosen jetzt mehr trauen als denen der Internationalen Energie Agentur? Es gibt mindestens zwei gute Gründe: Meine Prognosen waren bisher relativ

richtig, während die der IEA regelmäßig völlig daneben lagen, was die erneuerbaren Energien Wind und Sonne betrifft. Auch im aktuellen Energy Outlook von 2017 wird ein Anteil von nur 40 Prozent von allen erneuerbaren Energien weltweit für das Jahr 2040 erwartet.

Jetzt könnte man allerdings hinterfragen, ob ein exponentielles Wachstum, also ein Anstieg um etwa den gleichen Faktor in diesem Zeitabschnitt, überhaupt haltbar ist. Eine solche Annahme ist in der Tat nur solange haltbar, wie ausreichend Ressourcen verfügbar sind und begrenzende (störende) Einflüsse keine wichtige Rolle spielen. Was die Sonnenenergie angeht, steht zumindest eins fest: Die Ressource Sonnenlicht selbst wird immer als ausreichend zur Verfügung stehen. Genügend Silizium für die Herstellung der Solarzellen gibt es rein geologisch auch – es gibt kaum etwas, was in der Erdkruste häufiger zu finden ist. Begrenzende Faktoren könnten Emissionen sein oder der Flächenbedarf. Doch hinsichtlich beider Aspekte sind im Rahmen meiner Abschätzung keine Probleme zu erwarten. Hierzu eine kleine Grafik, die die Größenordnungen zeigt.



Quelle: Energieinitiative.org

Auch politische Einflussnahme könnte ein begrenzender Faktor sein, sogar gegen jede Vernunft. Da entsprechende Prognosen hier schwierig sind, möchte ich den Punkt ausklammern, doch es liegt auf der Hand, dass Szenarien wie Krisen, Kriege oder Handelskriege eine positive Entwicklung beeinträchtigen können.

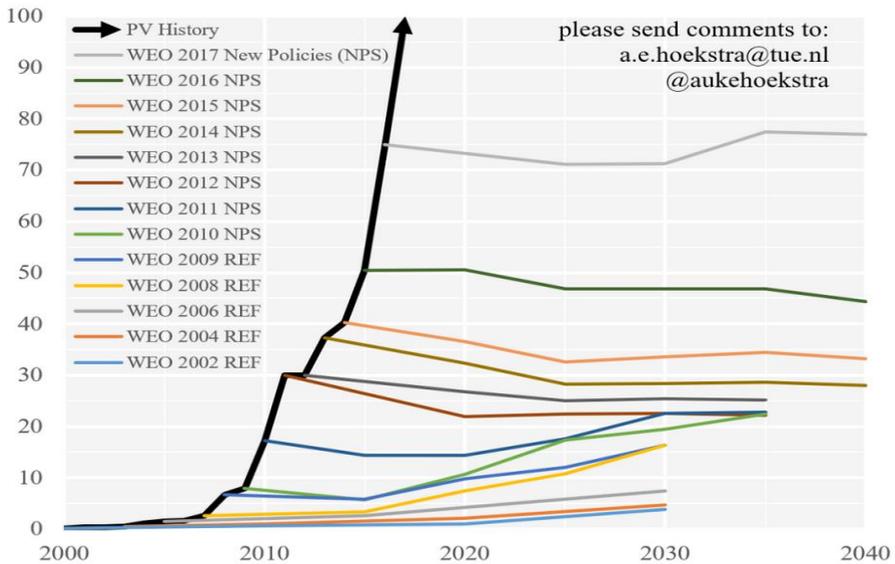
Bleibt noch die Nachfrage nach Energie. Hierbei geht es auch um den Preis und um die Leistung. Die Preisentwicklung von Solaranlagen kennt nur eine Richtung: nach unten. Auch die Kosten für Windenergie, Batteriespeicher und Wasserstoffelektrolyse sinken weiter. Und mir sind keine Gründe bekannt, warum sich daran etwas ändern sollte. Der Preis fossiler Energieträger ist zwar Schwankungen unterworfen, aber er kann den erneuerbaren Energien schon heute nicht standhalten, wenn man die Investitionskosten mit einbezieht. Dabei werden die externen Kosten, die das Verbrennen von Öl und Kohle verursacht, bislang kaum berücksichtigt. Wenn wir genug Energie aus Wind und Sonne haben, könnte

sich das aber ändern und die Verbrennung fossiler Rohstoffe wäre dann sehr schnell Geschichte.

Sehen wir uns an dieser Stelle einmal eine Zusammenstellung der historischen Prognosen der International Energy Agency (IEA) an, die die Voraussagen des jährlichen Zubaus von Solaranlagen beschreibt.

### Annual PV additions: historic data vs IEA WEO predictions

In GW of added capacity per year - source International Energy Agency - World Energy Outlook



Leider fünfzehnmal hintereinander weit daneben! Es drängt sich die Frage auf, ob von dieser Seite noch einmal etwas Vernünftiges zu erwarten ist. Schade um das Geld, das hier verschwendet wurde! Noch mehr zu bedauern allerdings, sind die Fehlentscheidungen, die dadurch entstanden sind, dass die Politik sich anhaltend an diesen Prognosen orientiert hat – und das vermutlich sogar weiter tun wird. Der dadurch entstandene und noch auf uns zukommende Schaden ist kaum zu ermessen.

Nur ein kleiner Teil der neuen Solarzellen wird in Deutschland installiert und kaum etwas davon wird hier noch produziert.

Aber wo liegt das Problem, wenn wir günstige und qualitativ hochwertige Solarmodule aus China geliefert bekommen können? Wir haben uns doch auch bei anderen Konsumgütern (außer Lebensmitteln) daran gewöhnt, dass sie kaum noch aus dem eigenen Land stammen. In großen schwedischen Möbelhäusern findet man auch nicht sehr viele Möbel, die in Schweden hergestellt worden sind. Die Themen Arbeitsbedingungen und Umweltschutz dürfen allerdings nicht ausgeblendet werden, auch wenn bei Investitionen der Preis oft die Hauptrolle spielen will. Trotzdem wäre es mir lieber, wenn es auch hier in Zukunft noch eine kleine Solarindustrie gäbe, die die technologischen Fähigkeiten bewahren und weiter entwickeln könnte.

Ich bin davon überzeugt: Wir werden (bald) genug Sonnenenergie für alle haben. In den meisten Ländern wird es genügen, einen kleinen Teil davon für die Nacht zu speichern; die Sonne scheint fast jeden Tag. Der größte Teil der Energie kann zeitgleich am Tag und auch in der Nähe genutzt werden. In diesen sonnigen Ländern wird also nicht allzu viel in Speicher investiert werden müssen, sondern vor allem in den nördlicheren Regionen. Ein großer Teil des weltweit erzeugten Stroms von der Sonne wird für den wachsenden Bedarf an Klimatisierung in südlicheren Ländern benötigt. An dieser Stelle gibt es oft keine Notwendigkeit zur Speicherung. Der Energiebedarf für Klimatisierung wird weltweit ansteigen, allein schon als eine Folge des Klimawandeln. Weiterer Bedarf in trockenen Ländern entsteht durch die Gewinnung von Trinkwasser durch Meerwasserentsalzung oder andere Verfahren. Dafür ist ebenfalls keine Speicherung nötig. Das Wasser lässt sich am besten speichern. Die technische Möglichkeit der Wassergewinnung durch

Sonnenenergie könnte eins der größten Probleme des Klimawandels mildern. Sie könnte Wasser genau dort zur Verfügung stellen, wo es dringend gebraucht wird.

Die Fortschritte bei der Speichertechnologie sind sehr beeindruckend – nicht zuletzt, weil sie seit kurzem auch von der Automobilindustrie vorangetrieben werden. Und was für eine Automobil oder einen elektrischen Bus ausreichend ist, genügt für ein Wohnhaus schon lange.

Die Kapazität von 40 kWh, die bei sparsamer Fahrt mit einem PKW für etwa 300-400 Kilometer reicht, kann einen durchschnittlichen Haushalt drei Tage lang vollständig versorgen. Mit geringfügigen Einschränkungen kommt man sogar zehn Tage über die Runden. Aber auch im Winter gibt es etwas Sonnenlicht. Vier Kilowattstunden pro Tag kann man von einer großen Solaranlage auf dem Dach selbst im dunkelsten Monat erwarten. Also wird die Batterie selbst im Winter nicht leer.

Wir werden daher über genügend Sonnenenergie und auch über genügend Speicher verfügen. Auch zum Autofahren reicht der Strom vom Dach, wenn wir nur wollen. Und wenn das bei uns möglich ist, geht es auch woanders auf der Welt – jedenfalls, was die klimatischen und technischen Bedingungen betrifft. Natürlich müssen Solaranlagen zunächst finanziert werden, damit sie dann quasi kostenlos Strom liefern können.

### **Alles geregelt? Nein!**

Genau in der Regelung liegt das Problem: Die wichtigsten Energiequellen Sonne und Wind ergänzen sich zwar ganz gut bei uns. Es reicht aber nicht aus für eine stabile Versorgung. Es wird immer wieder Lücken geben, die durch andere Quellen geschlossen werden müssen, wenn wir nicht mit Einschränkungen und Produktionsausfällen leben wollen. So, wie das Stromnetz bisher geregelt

wird, könnten wir nur schlecht damit leben, weil wir befürchten müssten, dass es zusammenbricht, wenn nicht genug Sonnenenergie und Windenergie zur Verfügung stehen und die Reservekapazitäten einmal nicht ausreichen.

### **Warum ist das so?**

Die bisherige Regelung des Stromnetzes regelt die Leistung von Kraftwerken und ist so ausgelegt, dass immer genügend Kraftwerke für die höchste vorkommende Last in Betrieb sind. Es gibt nur wenige Möglichkeiten, die Last anzupassen. Bei Elektroheizungen ist das zwar vorgesehen; sie können ferngesteuert für einige Zeit abgeschaltet werden, genauso, wie einige Industrieanlagen. Das ist aber nicht ausreichend.

Doch es gibt unzählige andere Möglichkeiten, den Verbrauch kurzfristig zu reduzieren, die zusätzlich nutzbar wären. Das Problem ist besonders ausgeprägt im Winter, wenn es tatsächlich einmal richtig kalt wird. Wenn die Wärmepumpe dann per Fernsteuerung abgeschaltet wird, kann es ungemütlich werden. Allerdings kommt es auch darauf an, wie gut ein Haus gedämmt ist und wie gut es Wärme speichern kann. In einem modernen, energiesparenden Haus dauert es viel länger, bis es wirklich kalt wird. Bei anderen Gebäuden ist das früher der Fall, und manch einer wird dann vermutlich den alten Heizlüfter herausholen. Damit ist es vorbei mit dem Stromsparen.

Der Heizlüfter schafft es zwar, wenigstens ein paar Räume warm zu halten, allerdings verbraucht er dafür wesentlich mehr als die Wärmepumpe bei gleicher Heizleistung, genau wie der Backofen, wenn man damit die Küche heizt. Die vielen Zusatzheizgeräte, die im Keller oder im Abstellraum schlummern, stellen eine Gefahr für die Versorgung mit elektrischer Energie dar. Sie werden sogar, besonders bei kaltem Wetter, palettenweise im Baumarkt

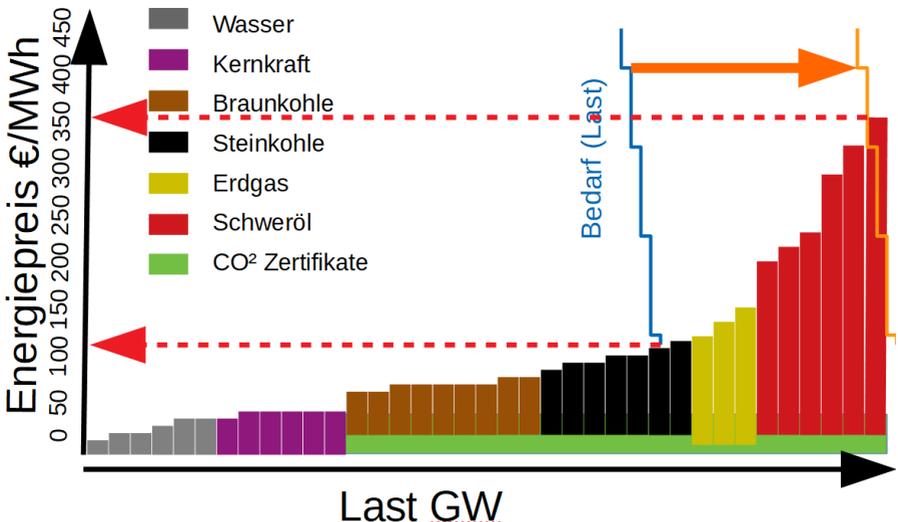
angeboten. Das ist nicht weit vom Tatbestand der versuchten Sabotage an der Energieversorgung entfernt.

### Wieder das Rockefeller-Prinzip

Der Strom, den ein solches Gerät an nur zwei Tagen verbraucht, kostet oft schon mehr als das billig gebaute Gerät selbst. Doch das ist nicht das Problem. Die große Gefahr liegt darin, dass elektrische Zusatzheizungen bei extrem kaltem Wetter oft alle gleichzeitig und über längere Zeit laufen.

Ein kleines Zahlenspiel macht das Problem deutlich: Nimmt nur jeder zehnte Bundesbürger seinen Stromfresser in Betrieb, haben wir acht Millionen mal zwei Kilowatt: Das macht stattliche sechzehn Gigawatt zusätzlich! Allein dafür müssten 15 bis 20 große Kraftwerke mit höchster Leistung laufen!

Ich bin nicht dafür, diese Geräte zu verbieten. Die Stromerzeuger



übrigens vermutlich auch nicht. Warum? Ein Blick auf unser Merit-Order-Schema (Abb. X) macht das deutlich: Hier sieht man den zusätzlichen Bedarf durch die gleichzeitige Verwendung der

Heizlüfter: Die Linie der Last wird nach rechts verschoben, und der Strompreis an der Börse, den alle Kraftwerke erhalten, vervierfacht sich. Allerdings ist dann die letzte Reserve an Kraftwerken in Betrieb. Ein – lukratives – Spiel mit unserer Versorgungssicherheit! Und kommt es dann zu Stromabschaltungen, liegen sofort wieder die alten Argumente für den Bau zusätzlicher Kohlekraftwerke und gegen erneuerbare Energien auf dem Tisch ...

Was ist zu tun? Viel besser wäre es, eine langfristig sichere Versorgung als Basis eines Geschäfts für die Energieversorger zu haben. Davon könnten alle profitieren.

Technisch ist das Problem verblüffend einfach zu lösen: Es wäre sehr hilfreich, wenn die Heizlüfter und Elektroradiatoren eine kleine Steuerung integriert hätten, die es bei einer kritischen Situation im Netz einfach abschaltet. Freiwillig würde sich vermutlich kaum jemand ein solches Gerät anschaffen, das womöglich fünf Euro teurer wäre als ein einfaches. Der Markt allein hilft hier also wieder einmal nicht weiter – und der Baumarkt schon gar nicht.

Meine Empfehlung an dieser Stelle wäre eine neue Norm in Verbindung mit einer Abwrackprämie für alte Heizlüfter. Einige Luft-Wasser-Wärmepumpen haben eine elektrische Zusatzheizung, die ausgerechnet dann aktiv wird, wenn es sehr kalt ist und die auch sehr viel verbraucht. Das ist nicht optimal und fast ebenso so riskant wie die Heizlüfter, aber wenigstens durch den Netzbetreiber abschaltbar.

Allerdings gibt es in vielen Häusern eine zweite Heizmöglichkeit, einen Holzofen zum Beispiel. Der kann bei sehr kaltem Wetter und knappem Strom hilfreich sein, besonders wenn es um eine länger anhaltende Flaute im Winter geht. Es fehlt aber auch hier der Anreiz, diese Möglichkeit zu nutzen. Wir sind es einfach gewöhnt, nur die Heizung aufdrehen zu müssen, wenn es uns zu kalt

wird. Wir wollen nicht darüber nachdenken müssen, ob wir die Heizung aufdrehen können oder drosseln sollten. Auch öffentliche Aufrufe zum Energiesparen sind unbeliebt, vermutlich auch bei den Energieversorgern, denn sie verdienen am Umsatz, und wenn Energie knapp wird steigt der Ertrag erheblich.

Hier wäre ein flexibler Strompreis eine Möglichkeit, das Ausweichen auf den Holzofen attraktiv zu machen. Dazu müsste man allerdings ständig den Strompreis wissen und entsprechend heizen oder auf andere Weise darauf reagieren. Das ist umständlich. Die frühen Experimente mit „Stromampeln“ an den Zählern, die drei verschiedene Tarife anzeigen konnten, waren kaum erfolgreich.

Eine naheliegendere Idee ist es daher, möglichst viele Geräte über eine digitale Schnittstelle fernsteuerbar zu machen und zum Beispiel mit einem Stromzähler zu vernetzen, der unterschiedliche Preise über das Internet empfangen und verrechnen kann.

Gute Idee – und es wird ja angeblich auch schon daran gearbeitet! Der sogenannte Rollout, also der planmäßige Einsatz von elektronischen Zählern, die später mit dem Internet verbunden werden sollen, läuft seit 2018. Später soll dann die Möglichkeit bestehen, diese Zähler per Fernabfrage alle 15 Minuten auszulesen.

Soweit der Plan – oder das, was als solcher bezeichnet wird. Alles andere ist allerdings völlig unklar, aber wir müssen ja etwas tun, um in Sachen Digitalisierung nicht komplett abgehängt zu werden. Hauptsache, digital und mit Internet! Dieses Konzept soll vermutlich weitergeführt werden und nach und nach alle Haushaltsgeräte mit dem Internet verbinden. Meine Meinung zu dieser Vorgehensweise ist eher kritisch, um es höflich zu formulieren.

Batteriespeicher und Elektroautos mit dem Internet zu steuern, wäre noch am ehesten sinnvoll. Bei entsprechenden Verträgen ist auch ein Betrieb in beiden Richtungen denkbar: Das Auto könnte

Strom verkaufen, wenn man gerade nicht weit fahren will und sich das Geschäft lohnt. Diese Konzepte gibt es schon länger. Der Haken an ihnen ist die Unsicherheit, die dadurch entsteht, dass ein digital vernetzte System immer angreifbar ist. Vielleicht sollte man an dieser Stelle noch einmal einen Blick in den Roman von Marc Elsberg werfen – morgen könnte es zu spät sein.

Was können wir solchen Gefahren entgegensetzen? Digitale Abwehrmechanismen, Firewalls, Virens Scanner? Wohl kaum. Der Stuxnet-Angriff hat gezeigt, dass sogar Nuklearanlagen digital angreifbar sind. Wie wollen wir dann erst den „smarten“ Zähler in unserem Haus schützen? Digitale Angriffe durch digitale Abwehrmechanismen abzuwehren ist ein ständiger Wettlauf um die besseren, neueren Waffen. Und wir Menschen verlieren dabei immer mehr die Kontrolle. Es geht aber auch anders:

## **Es gibt eine Lösung**

Um diese zu erklären, komme ich noch einmal darauf zurück, was ein stabiles Stromnetz ausmacht: Dort, wo der Strom gebraucht wird, also an der Steckdose, sollten Spannung und Netzfrequenz stabil sein, wenigstens so stabil, dass alle Geräte einwandfrei funktionieren. Und das Netz sollte vor allem nicht ausfallen, wenn mal etwas nicht nach Plan läuft. Wenn also ein oder zwei Kraftwerke, eine Übertragungsleitung oder der Wind ausfallen.<sup>6</sup> Das Netz sollte also robust und flexibel reagieren.

---

<sup>6</sup> Wobei das völlige Ausfallen des Windes nicht überraschend kommt, sondern sich durch eine besondere Wetterlage einige Tage vorher ankündigt. Die Wetterprognosen sind in dieser Hinsicht inzwischen sehr zuverlässig.

**Und zwar das ganze Netzwerk von Stromerzeugung, Leitungen und allen Geräten, die am Netz betrieben werden.**

Das ganze Netz, nicht nur die Kraftwerke! Hier liegt der wesentliche Unterschied.

Im Zusammenhang mit internetbasierter Fernsteuerung wird oft von Schwarmintelligenz gesprochen und damit geworben. Was ist das?

Offenbar nichts, was einem Fischernetz gewachsen ist, wie uns ein Blick in diese Büchse zeigt ...



Die Fernsteuerung der Stromverbraucher und kleinen Erzeuger über das Internet wäre im Übrigen etwas völlig anderes: Sie wäre zentral gesteuert, was für keinen natürlichen Schwarm zutrifft.

Inzwischen hat man eine recht gute Vorstellung davon, wie sich ein Schwarm von Fischen oder Vögeln in der Bewegung koordiniert. Es geht dabei vor allem um die Einhaltung bestimmter Abstände vom Nachbarn und um andere einfache Regeln, die eingehalten werden. Bei den Bienen und anderen Insekten, die Staaten bilden, ist es weitaus komplizierter.

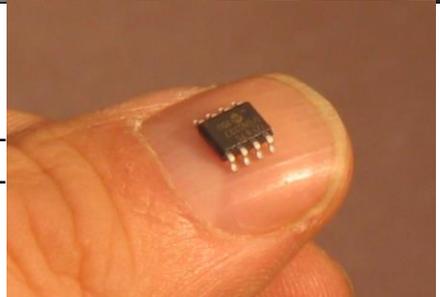
**Nach welchen Regeln könnte sich ein Energienetz selbst stabil halten, ohne zentral gesteuert und damit angreifbar zu sein?**

Beim Stromnetz ist es relativ einfach: An jedem Stromanschluss kann man die Spannung und die Frequenz messen, zum Beispiel mit einem Messgerät. Für die moderne Elektronik ist eine solche Messung ein Kinderspiel. Ein kleiner Mikroprozessor, wie er in vielen Elektrogeräten und praktisch in jeder Art von Steuerung enthalten ist, könnte diese Aufgabe nebenbei erledigen. Selbst, wenn dafür zusätzliche Elektronik nötig wäre, würde sie in der Massenfertigung kaum mehr als einen Euro pro Gerät kosten.

Etwas ältere Messgeräte, mit denen man Netzspannung und Frequenz messen kann, sehen etwa so aus (Abb. X). Heute geht es mit viel weniger Aufwand: Ein Mikroprozessor und ein paar andere Bauteile reichen aus, um Spannung und Frequenz nicht nur zu messen, sondern auch aufzuzeichnen und regelmäßige Muster zu erkennen. Aus diesen Mustern kann der Mikroprozessor Strategien entwickeln, um das Gerät noch besser zu steuern.

Abb.: X: Messgerät XXX, Chip,

Quelle: Autor



Wir könnten also Elektrogeräte haben, die selbst messen, wie der Zustand des Stromnetzes an dieser Stelle und auch im Ganzen ist, und das Gerät könnte automatisch darauf reagieren. Aber wie?

Es geht also um die Regeln, nach denen eine automatische Steuerung arbeiten sollte. Dabei sollte es natürlich demokratisch und gerecht zugehen: Die Elektrogeräte sollen ihren Dienst tun, die Lampen sollen leuchten, der Heizlüfter soll heizen. Dafür haben wir den Strom. Und wenn ich mein Elektroauto an die Steckdose anschlieÙe, soll die Batterie geladen werden. Aber nur, wenn das alles im Moment nicht zu einer Überlastung des Stromnetzes führt. In diesem Fall möchte ich – und vermutlich die meisten anderen – dass wenigstens das Licht an bleibt und das Telefon funktioniert, während das Laden meines Autos warten kann. Es ist klar, dass auch Krankenhäuser, Wasserwerke, Feuerwehr, Polizei und viele andere Einrichtungen bevorzugt versorgt werden sollten.

An dieser Stelle komme ich noch einmal auf die oben erwähnten „Outlaws“ zu sprechen – jene modernen Elektrogeräte, die sich nicht wie die gute alte Glühbirne an das ohmsche Gesetz halten, und so leider den Selbstregelleffekt des Netzes sabotieren. Diese Geräte arbeiten schon jetzt mit einer elektronischen Steuerung, die die Leistungsaufnahme regelt, allerdings nicht demokratisch, sondern nach der egoistischen Regel: *Ich nehme mir, so viel ich will!* Was sie als mildernde Umstände angeben, ist die Tatsache, dass sie viel effizienter sind als ältere Geräte. Das muss man anerkennen, aber es löst das Problem nicht. Bei diesen ohnehin schon elektronisch gesteuerten Geräten wäre es sehr leicht, noch ein paar Funktionen zur Stabilisierung des Netzes mit einzubauen. Oft wären nur ein paar Zeilen Programmcode nötig, um sie zu verantwortlichen, ja sogar vorbildlichen Mitgliedern der Energiegesellschaft zu machen: Bestimmte Geräte, die weniger wichtig sind und eher dem Komfort dienen, etwa Terrassenheizstrahler, könnten zuerst

nachgeben und den Betrieb zu Gunsten der Versorgungssicherheit einstellen.

Das Problem an dieser Stelle: Die einzelne Initiative eines Herstellers bringt ihm und seinem Kunden nur Kosten und keine Vorteile. Heißt: Es passiert erstmal gar nichts. Hier wäre Verantwortung des Gesetzgebers und vielleicht eine Norm nötig, damit sich etwas bewegt. Aber zunächst natürlich ein Verständnis für die Zusammenhänge und gegensätzlichen Interessen, die der Einführung eines solchen Systems entgegenstehen. Technisch wäre es keine große Herausforderung. Die Regeln wären einfach, weder für Programmierer noch für die Elektronik eine Herausforderung. Wenn es tatsächlich einmal knapp wird, könnten der Heizlüfter und das Auto mal ein paar Stunden warten, aber nur, wenn es sein muss. Danach möchte ich das Auto wieder aufladen, wenigstens zum Teil. Aber wer entscheidet jetzt, wann mein Auto wieder geladen wird? Das könnte davon abhängen, welchen Strompreis ich dafür zu zahlen bereit wäre – und welchen anderen dringenderen Bedarf es in diesem Moment gibt, etwa die Versorgung der Bahn, Straßenbeleuchtung oder bestimmte Prozesse in der Industrie.

**Autonomes Energiemanagement funktioniert nach folgendem**

## *Grundgesetz:*

### **Präambel:**

**Je stabiler ein Stromnetz ist, desto weniger weichen Frequenz und Spannung vom Nennwert ab. Die Abweichungen sollen genutzt werden, um über Angebot und Nachfrage Erzeugung und Verbrauch zu regeln.**

### **§1**

**Die Nennspannung ist 230 (400) V.  
Bei Abweichungen wird so geregelt, dass die Abweichungen verringert werden.**

### **§2**

**Die Nennfrequenz ist 50 Hz.  
Bei Abweichungen wird so geregelt, dass die Abweichungen verringert werden.**

### **§3**

**Aus „Erfahrungen wird „gelernt“, um das Energiemanagement zu optimieren.**

### **§4**

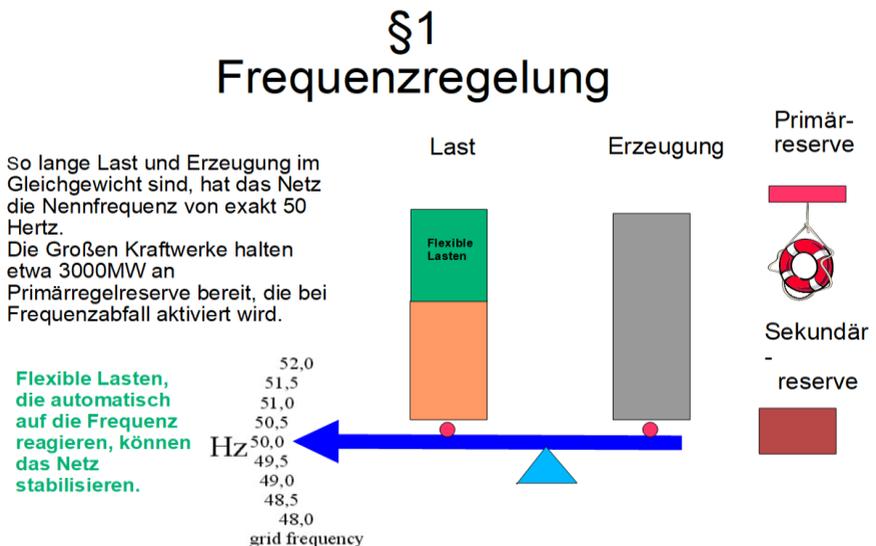
**Der Strompreis wird mit Faktoren bewertet, die von der momentanen Größe dieser Abweichungen abhängig sind.**

Abb. X: Entwurf eines ... Quelle: eigene Darstellung

Im Prinzip entscheidet das „Grundgesetz“ (Abb. X). In ihm stehen die Regeln, die mein Ladegerät beachten muss und die Grenzen, die zu respektieren sind. Wenn die Frequenz des Netzes im Moment unter 49,9 Hertz ist und weiter abfällt, ist das eine Notstandssituation für das gesamte Verbundnetz. Vermutlich ist ein

Kraftwerk oder eine Übertragungsleitung ausgefallen, und das Gleichgewicht zwischen Stromerzeugung und Verbrauch ist gestört.

Das rechtfertigt Sofortmaßnahmen, um die Stabilität wiederherzustellen. Hier geht es tatsächlich um Sekunden. Wie bei einem Herzinfarkt muss sofort reagiert werden: Heizlüfter und Ladegerät des Autos reduzieren den Verbrauch. Batteriespeicher liefern Energie an das Netz. Auch die Kraftwerke reagieren: Sie akti-



vieren die Reserveleistung.

Abb. X.: XXX, Quelle: eigene Darstellung

Dabei gibt es ein paar technische Details, die beachtet werden müssen, damit sich die verschiedenen Regelungen nicht in die Quere kommen. Die lasse ich hier weg.

Eine schnelle Reaktion der leistungsstarken Verbraucher auf Störungen im Netz kann uns große Probleme ersparen. Ein System

hingegen, das darauf basiert, dass die Last über das Internet oder andere Kommunikationswege geregelt wird, wäre viel zu langsam.

Umgekehrt kann es auch eine Situation geben, in der die Netzfrequenz plötzlich ansteigt. Das kann etwa geschehen, wenn ein großer Anteil der Last plötzlich vom Netz getrennt ist – etwa durch Ausfall einer stark belasteten Übertragungsleitung. Dann muss die plötzlich ansteigende Frequenz ebenfalls in wenigen Sekunden stabilisiert werden. Die Kraftwerke benötigen unter Umständen einige Minuten, bis sie die Leistung genügend reduziert haben. Hier können automatisch gesteuerte Geräte ebenfalls sekundenschnell einspringen. So kann etwa die elektrische Heizung für kurze Zeit anspringen, oder Klimaanlage, die eigentlich in diesem Moment nicht benötigt werden. Es geht dabei ja oft nur um wenige Minuten. Wenn die Sonne scheint, wird übrigens eine solche Situation leichter bewältigt werden: Solaranlagen können ihre Leistung frequenzgesteuert reduzieren und stabilisieren schon heute im Fall von Überfrequenz in erheblichem Ausmaß das Netz.

Die Geräte, die am besten auf solche Situationen reagieren können, sind die Batteriespeicher der Solaranlagen und die Ladegeräte für Elektroautos. Ich komme noch darauf zurück.

### **Spannungsregelung**

Auch die Netzspannung lässt sich dezentral stabilisieren. Sie ist mehr eine lokale Größe und kann sich schon innerhalb eines Ortsnetzes stark unterscheiden. Wenn in einem Ortsnetz in allen Häusern viel verbraucht wird, sinkt dadurch die Spannung. Sie ist in der Nähe des Transformators noch am höchsten, vielleicht über 230V. Am letzten Haus der Leitung jedoch wird sie deutlich niedriger sein. Das ist bei der Auslegung schon berücksichtigt, indem schon am Anfang eine höhere Spannung verwendet wird. Wenn

jetzt zusätzliche Verbraucher, wie Elektroautos etwa, angeschlossen werden, die regelmäßig am späten Nachmittag geladen werden, kann es zu einer hohen Netzbelastung kommen. Vor allem, wenn das Laden schnell gehen soll und auch noch gleichzeitig, weil zu dieser Zeit viele aus dem Büro zurückkommen.<sup>7</sup> Die Belastung ist unter Umständen so hoch, dass die Spannung am Ende der Straße unter die zulässige Grenze sinkt. Der Netzbetreiber müsste dann eigentlich das Ortsnetz verstärken, was mit erheblichen Kosten verbunden ist..

Es geht aber beim Aufladen der Autos nicht darum, dass alle sofort die Energiemenge wieder aufladen, die gerade verbraucht wurde, sondern eher darum, dass das Auto am nächsten Morgen wieder einsatzbereit ist. Einsatzbereit ist es meist auch mit halbvoller Batterie, und es reicht fast immer aus, mit dem Laden erst in der Nacht zu beginnen. Dies könnten die Ladegeräte allein anhand der gemessenen Netzspannung und der typischen Muster im Verlauf dieser Größe regeln. Wenn jemand am Abend noch eine größere Tour geplant hat, kann er vom Ladegerät auch das sofortige Laden zu jedem Preis verlangen – kein Problem, so lange nicht alle gleichzeitig solche Ansprüche stellen. Damit wäre die Stabilität der Spannung verbessert und es gäbe keine Probleme, selbst, wenn alle auf elektrische Autos umsteigen wollten.

Natürlich hätten an dieser Stelle auch die Batterien der Solaranlagen die Möglichkeit zu zeigen, was sie können: Sie können genau dann Strom liefern, wenn die Spannung im Netz besonders niedrig ist.

Etwas weiter in die Zukunft geblickt, könnten die angeschlossenen Elektroautos ihre gespeicherte Energie auch für das Netz zur

---

<sup>7</sup> Hier gilt mal wieder die Vorstellung, dass Otilie Normalverbraucherin immer in einem Büro arbeitet.

Verfügung stellen. Auch das wäre ohne ständige Internetverbindung denkbar. Es reicht aus, wenn sich ein Energiezähler im Ladegerät zunächst einmal merkt, wann und bei welcher Spannung und Frequenz wieviel geliefert wurde. Abrechnen kann man später.

Wichtig in dem Zusammenhang ist, dass dadurch die Möglichkeit besteht, die Solarenergie weiter auszubauen, ohne die Netze zu überlasten, da spannungsgeregelte Batterien genau dann Energie aufnehmen könnten, wenn die Aufnahmefähigkeit im Netz an die Grenzen kommt.

Es gibt noch viele Beispiele, wie durch intelligente Regelung die Stabilität des Stromnetzes verbessert werden könnte.

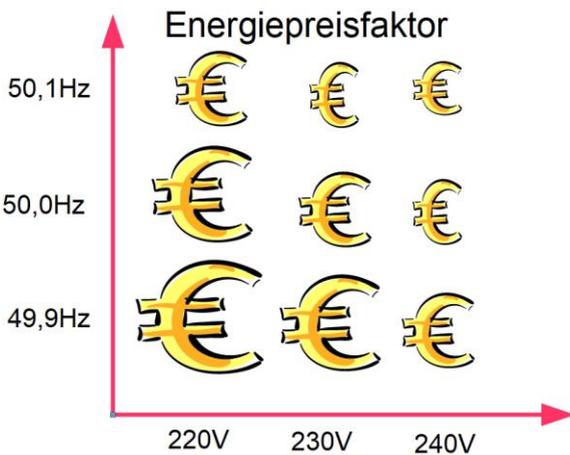
### **Flexible Strompreise**

Eine entscheidende Frage ist allerdings, wie diese Möglichkeiten eingeführt und umgesetzt werden können. Was wir mit Sicherheit brauchen, sind flexible Strompreise, die das Verhältnis von Angebot und Nachfrage abbilden und von den Zählern automatisch berücksichtigt werden. Dabei kann man sogar die bisherige Messung grundsätzlich in Frage stellen. Im Moment bezahlen wir die Energie, gemessen in Kilowattstunden. Also Stromstärke mal Spannung mal Zeit.

Die Energie macht aber nur einen kleinen Teil der privaten Stromrechnung aus, etwa dreißig Prozent. Der Rest vergütet die Versorgung als solche. Eine niedrige Spannung zeigt an, dass Energie knapp und die Nachfrage hoch ist. Die Spannung geht aber genau umgekehrt in die Rechnung ein. Wenn wir die Spannung nun gar nicht berücksichtigen, sondern einfach annehmen, dass sie die vorgeschriebenen 230 Volt hat, hätten wir schon von selbst einen leichten dynamischen Faktor in der Rechnung: Bei niedriger Spannung bekommen wir die Energie zu einem etwas höheren Preis, was der hohen Nachfrage entspricht. Umgekehrt wäre sie bei hoher

Spannung, also hohem Angebot, etwas günstiger. Der Effekt ist zwar nicht ausreichend, allerdings wäre die Messung einfacher und billiger. Besser wäre es, den Energiepreis mit wirksameren Faktoren zu berechnen: Wenn jetzt der Stromzähler funktional genug wäre, solche Faktoren zu berücksichtigen, wäre man schon einen ganzen Schritt weiter.

Aber das reicht noch nicht aus: Auch die angeschlossenen Anlagen sollten wissen, wie der Strompreis ist, um den Betrieb zu optimieren. Das genau ist ja der Vorteil dieses Verfahrens: Die Waschmaschine muss gar nicht mit dem Zähler und dem Internet vernetzt sein, um intelligent zu reagieren. Sie ist schon längst vernetzt, und zwar über das Stromnetz selbst. Sicher, zuverlässig, ohne zusätzliche Kosten und vor allem ohne Risiko. Ein digitaler



Angriff ist nicht möglich. Die

Waschmaschine der Zukunft weiß, was sie zu tun hat, wenn sie die Wäsche in einer vorgegebenen Zeit fertig haben soll. Sie hat den Verlauf von Netzspannung und

Netzfrequenz eines typischen Tages kennengelernt und muss nicht erst Alexa oder Cortana fragen, ob der Strom heute noch billiger wird. Diese beiden müssen auch nicht wissen, wann ich meine Wäsche wasche oder unter die Dusche gehe. Mein Zähler könnte es wissen, aber er vergisst es gleich wieder; er merkt sich pragmatisch nur den Verbrauch und berücksichtigt dabei den Faktor zur

Anpassung des Preises zu den entsprechenden Zeiten, abhängig von Frequenz und Spannung

Natürlich lässt dieses Verfahren sich auch mit internetbasierter Fernsteuerung kombinieren. Der Zähler könnte zum Beispiel den aktuellen Preis an der Strombörse als weiteren Faktor verwenden. Der Stromspeicher könnte die Wettervorhersage berücksichtigen und im richtigen Moment entladen sein, um die Energie des angesagten Sturms zu nutzen. Wenn die Kommunikation gestört sein ist, funktioniert trotzdem alles nach den vereinbarten Regeln. Das Netz bleibt stabil.

### **Und wie kommen wir da hin?**

Noch einmal zurück zum Ladegerät für Elektroautos und zum Batteriespeicher im Haus: Beides sind Technologien, die nicht wirklich neu sind. Das Elektroauto war sogar schon vor der Verbreitung des Verbrennungsmotors da. Wussten Sie es? Schon 1839 baute der schottische Erfinder Robert Anderson den vermutlich ersten Elektrowagen. Wie seine Nachfolger, musste er sich mit ziemlich schweren und unpraktischen Batterien zufriedengeben, die nicht aufladbar und vermutlich auch teuer waren. Erst 1859 dann erfand Gaston Plante die aufladbaren Blei-Säure-Akkumulatoren. Das war ein großer Fortschritt, und daher dauerte es noch bis etwa 1910, bis der Benzinmotor aufholen konnte. Vorher gewann aber der erste „Porsche“ (P1) 1899 einen Wettbewerb bei der Internationale Motorwagen-Ausstellung in Berlin. Mit einem Elektromotor. Ferdinand Porsche arbeitete damals aber noch als Entwickler bei Egger-Lohner in Österreich. Am Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts waren Elektrowagen weitverbreitet; in New York etwa gab es Ladestationen überall in der Stadt (Abb. X).

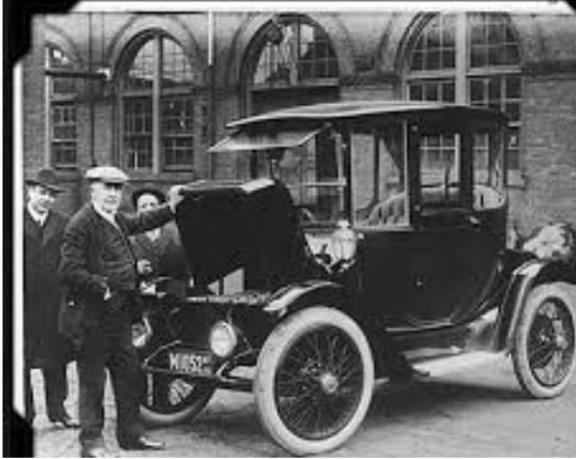


Abb.: X

Elektroauto (19XX), Quelle: wikipedia.org, Robert Anderson

Henry Ford und Thomas Edison arbeiteten in den USA gemeinsam an einem neuen Elektroauto, das noch besser für lange Strecken geeignet sein sollte. Sie stießen jedoch bald an die Grenzen der damaligen Batterietechnik. Das Projekt musste verworfen werden. Die damals beliebten *Detroit Electric* schafften immerhin schon eine Strecke von 80 Meilen mit einer Batterieladung. Edison selbst und auch Henry Fords Frau, Clara, fuhren einen solchen Wagen, und Clara hatte angeblich keine Lust, auf Fords T-Modell umzusteigen. Für die Farmer auf dem Land war der neue billige Wagen aber von Vorteil: Er hatte eine höhere Reichweite und zur Not Platz für ein paar Reservekanister. Krach und Gestank waren damals auf dem Land nicht so wichtig. Heute allerdings sind wir an einem Punkt angekommen, wo Elektromobilität genauso wenig aufzuhalten sein wird wie die Stromerzeugung mit Solarzellen und Batteriespeichern. Von Flugzeugen bis hin zu Schiffen wird vieles elektrisch fahren bzw. fliegen – die Frage ist nur, wieviel Energie dabei aus Batterien und wieviel aus Brennstoffzellen kommen wird. Bei den modernen Schiffen, die mit elektrisch angetriebenen

Propellern und Generatoren für die Stromerzeugung fahren, ist es nur ein kleiner Schritt, eine Batterie mit einzubauen und den Generator nur auf langen Strecken ohne Lademöglichkeit zu verwenden.

Die zunehmende Verbreitung elektrischer Fahrzeuge ist mit der Notwendigkeit der Einführung neuer Normen verbunden. Hier bietet sich eine gute Gelegenheit, etwas für eine nachhaltige Versorgung mit Elektrizität zu tun. Normen könnten diesen Weg erschließen, denn aus ihnen ergeben sich Entwicklungsvorgaben für alle Konkurrenten gleichzeitig. Ein Problem bei der Normungsarbeit in Deutschland ist es leider, dass sie nicht bezahlt wird. Es wird den Unternehmen, auch Hochschulen und Instituten überlassen, dafür kompetente Mitarbeiter freizustellen und die Spesen zu bezahlen. Daher haben die großen Unternehmen einen entsprechenden Einfluss auf die Normenarbeit und die Möglichkeit, Normen zu gestalten – nicht immer im Interesse aller.

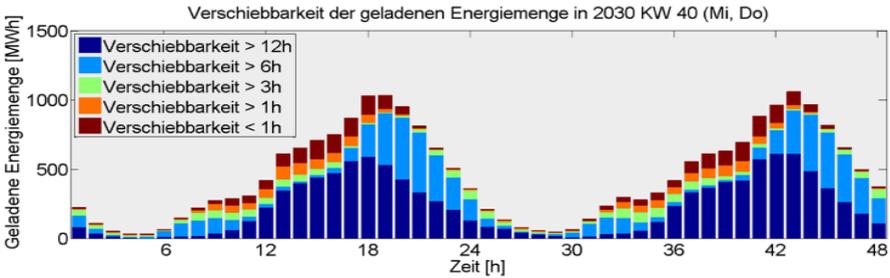
Schon jetzt wird angenommen, dass es in den USA nur noch zehn Jahre dauern wird, bis ein Solarkraftwerk, kombiniert mit einer Batterie, es bezüglich des Preises gegen ein neues Gaskraftwerk aufnehmen kann, und die unzähligen ökologischen Vorteile sind dabei noch gar nicht berücksichtigt.

Der derzeitige Erdgasboom in den USA durch das problematische Fracking-Verfahren wird daher nicht mehr lang dauern – der amerikanische Traum vom Energieexport in Form von Gas wird vermutlich ein Traum bleiben.

Die Einführung geeigneter Normen hat den Vorteil, dass sie eine vergleichsweise günstige und gerechte Methode der Etablierung notwendiger Regeln darstellt. Für die schon existierenden Batteriespeicher stellt sich die Frage, ob eine Nachrüstung von netzstabilisierenden Funktionen sinnvoll ist und wie sie finanziert werden

kann. Die Technik zur dezentralen Stützung und Stabilisierung des Netzes gleich bei der Entwicklung zu berücksichtigen, ist ein viel günstigerer Weg. Trotzdem bleibt die Frage, wie mit schon existierenden Anlagen und Geräten umgegangen werden könnte. Bei den Batteriespeichern ist eine Nachrüstung sicher zu vertreten, wenn es dafür eine angemessene Förderung gäbe.

Hier stellt sich wieder einmal die Frage, wer das bezahlen soll. Da die deutschen Strompreise im europäischen Vergleich eher im oberen Bereich liegen, sollten die Kosten für eine solche Förderung nicht den Strompreis erhöhen. Allerdings ergibt sich für die Netzbetreiber zusätzlicher Spielraum im Zusammenhang mit der Elektromobilität. Er entsteht ein zusätzlicher Umsatz, den der Bedarf an Antriebsenergie darstellt, und die in der Regel mit den vorhandenen Ortsnetzen und Hausanschlüssen geliefert werden kann. Die eigentliche Energie macht aber, wie schon festgestellt, nur ein Drittel des Strompreises aus. Daher bleibt für den Netzbetreiber ein großer Wertschöpfungsanteil, für den kaum Aufwand anfällt. Auf der anderen Seite ist eine stabile und sichere Stromversorgung im Interesse des Staates und kann auch mit öffentlichen Mitteln gefördert werden. Die Tatsache, dass eine dezentral und flexibel aufgebaute Stromversorgung auch im Falle eines Krieges kaum Angriffsfläche bietet, könnte sogar den Einsatz von Mitteln aus dem Verteidigungshaushalt rechtfertigen.



**Abb. 4:** Pro Kalenderwoche geladene Energiemenge in 2015, 2020 und 2030 (MOS-2030)

Es zeigt sich, dass ein Großteil der geladenen Energie ein hohes Flexibilisierungspotenzial aufweist. Grund dafür ist das Ladeverhalten der Nutzer, die meistens nach der letzten Fahrt des Tages die Fahrzeugbatterie laden und erst wieder am nächsten Morgen nutzen. Im Mittel ergibt sich dadurch eine Verschiebbarkeit der Ladevorgänge um etwa 11 h. Durch eine intelligente Ladesteuerung, etwa durch Verschiebung der Lastspitzen in Schwachlastzeiten, könnten folglich negative Netzrückwirkungen deutlich reduziert werden.

Abb. X: Belastung der Stromnetze durch Elektromobilität,  
Quelle: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.

Bei elektrischen Heizlüftern (vgl. oben) wäre ein kostenloser Umtausch eine Lösung. Allerdings müsste zunächst einmal geklärt werden, wer überhaupt ein genügend großes Interesse daran hätte. So wie der Strommarkt strukturiert ist, wird man aufseiten der Kraftwerksbetreiber nicht viel Unterstützung erwarten können. Im Zweifelsfall hilft auch hier ein passendes Gesetz und eine Umstrukturierung des Strommarkts.

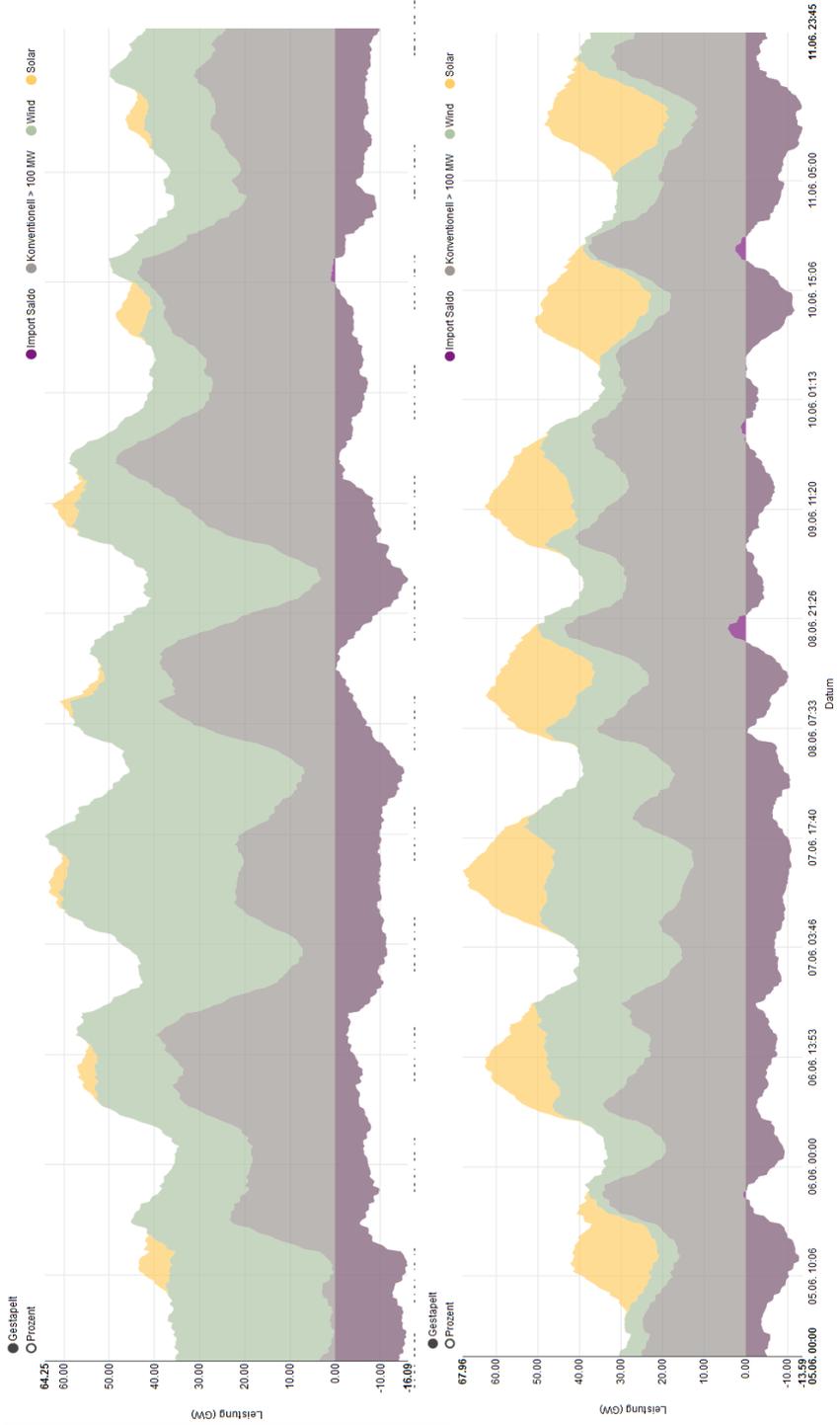
### Ein neuer Strommarkt – aber wie?

Selbstverständlich muss bei dieser Frage in europäischen Dimensionen gedacht werden; nationale Alleingänge können bestenfalls eine Übergangslösung sein. In jedem Fall haben wir die internationale Übereinkunft, dass der CO<sub>2</sub>-Ausstoß gesenkt werden soll. Damit sind Kohlekraftwerke mittelfristig auf die Reservebank verwiesen. Auch der Ausstieg aus der Kernkraft ist in Deutschland und anderen Ländern beschlossene Sache. Planungen für neue Kraftwerke werden aus ökonomischen Gründen und wegen der

Sicherheit fragwürdig bleiben. Also brauchen wir einen Strommarkt, der zu den erneuerbaren Energien passt.

Bisher haben wir die Erzeugungsleistung durch die Kraftwerke nach Bedarf geregelt. An dieser Stelle müssen wir umdenken: Außer der Wasserkraft, etwas geothermischer Energie und Biomasse haben wir vor allem Windenergie und Sonne. Das bedeutet, dass wir eine, in Bezug auf die Leistung, schwankende Erzeugung haben.

Das Klügste wäre es nun, den Bedarf an die Erzeugung anzupassen. Wenn das vollständig möglich wäre, müssten wir noch nicht einmal Energiespeicher haben. Wie sieht die Stromerzeugung heute aus? Wäre das denkbar? Betrachten wir Abbildung XX: Die Stromerzeugung in der ersten Woche des Jahres 2018. Gelb ist hier der kleine Anteil der Sonne (gefühlte war sie im Januar 2018 gar nicht vorhanden), grün die Windenergie und grau sind die konventionellen Kraftwerke einschließlich Wasserkraft und Bioenergie. Was nach unten in dunklerem Grau dargestellt ist, ist der Export von Energie. Die Spitzenlast beträgt 64,25 Gigawatt. Man sieht, dass die Windenergie immerhin 40 GW davon liefern kann, wenn der Wind weht. Am Neujahrstag hat es fast vollständig gereicht. Meistens gibt es zwischen 20 und 40 GW aus Sonne und Wind; nur am Nachmittag des 6. Januar lässt die Leistung dieser Elemente mit unter 10 GW zu wünschen übrig. Wie sieht es im Sommer aus? (untere Grafik)



Hier, im Juni 2017, ist deutlich zu erkennen, wie die Sonnenenergie die Mittagsspitzen der Last bedient. Sonne und Wind haben einen ähnlich hohen Anteil. Am Abend des 11. Juni gab es für wenige Stunden weder Sonne noch Windenergie zu ernten, und es wurde eine kleine Menge Energie importiert. Deutlich ist zu erkennen, dass wir auch im Sommer noch mehr Sonnenenergie gebrauchen könnten, denn es wird noch eine Menge Energie aus konventionellen Kraftwerken benötigt, die durch Sonnenenergie ersetzt werden könnte. Interessant ist auch die Leistung der Pumpspeicherkraftwerke in diesem Zeitraum (Abb. X):

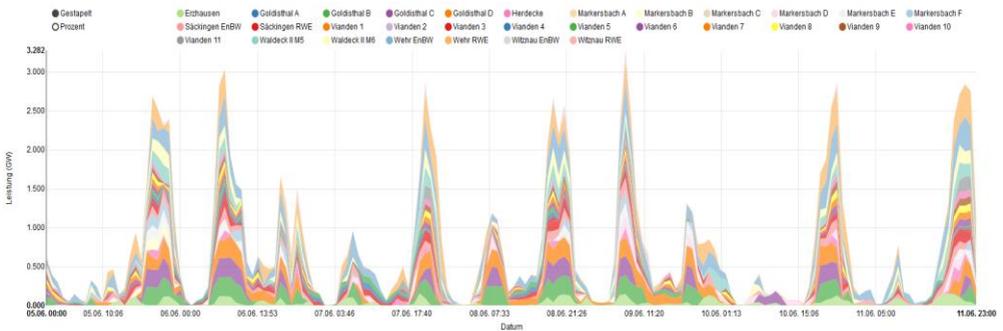


Abb. X: Leistung der Pumpspeicherwerke X in X, Quelle: X  
 Hier wird elfmal in dieser Woche Energie für wenige Stunden aus diesen Speichern geliefert. Das könnte auch ein sinnvoller Einsatz für Batteriespeicher der sein. Die Spitzenleistung der Pumpspeicherwerke liegt bei drei Gigawatt, doch wir könnten deutlich mehr Speicherleistung gebrauchen. Eine Million kleine Speicher mit je drei Kilowatt könnten noch einmal drei Gigawatt Leistung bereitstellen.

In welchem Rahmen müssten wir unseren Verbrauch anpassen, wenn wir weitgehend mit Windenergie und Sonnenenergie auskommen wollten? Zunächst einmal müssten wir mehr

installierte Leistung an Sonnenenergie und Windenergie haben, da nicht immer die volle Leistung der Anlagen zur Verfügung steht und auch noch Speicher geladen werden sollen. Dabei wird deutlich, dass wir den Anteil der Sonnenenergie nur etwa verdreifachen müssen, bis allein die Sonne den Bedarf mittags decken würde. Daher sind Batteriespeicher dringend nötig, wenn der Anteil an Sonnenenergie weiter als auf das Dreifache erhöht werden soll, weil sonst an sonnigen Tagen die solare Stromerzeugung am Mittag höher als die Last wäre. Bis dahin könnte er aber ohne große Probleme erhöht werden, was leider durch die Begrenzung der Einspeisevergütung verhindert wird. Noch mehr Sonnenenergie wäre nutzbar, wenn Langzeitspeicher zur Verfügung wären, die die überschüssige Sonnenenergie einiger Tage speichern können. Windenergie ist weitaus schwieriger zu speichern als Sonnenenergie – weil die windigen Phasen oft mehrere Tage dauern. Um diese Energie zu speichern, wäre eine viel größere Speicherkapazität nötig. An dieser Stelle wären Langzeitspeicher, etwa durch Elektrolyse und Produktion von Wasserstoff, einsetzbar.

### **Wie könnte unser künftiger Strommarkt aussehen?**

Zunächst einmal wäre ein flexibler Strompreis nötig, der in Echtzeit auf Angebot und Nachfrage reagiert und auch für Haushaltskunden flexibel sein müsste.

In der Vergangenheit hatten wir eine tendenzielle Verschiebung von den Grundkosten eines Stromanschlusses auf die Verbrauchskosten, also geringere Grundgebühren und dafür höhere Energiepreise. Man wollte damit einen Anreiz zum Energiesparen setzen. Ein richtiger Weg, solange nicht dezentral Strom aus sich erneuernden Quellen erzeugt wird. Vielleicht sollte heute wieder ein höherer Anteil für den Anschluss und die Leistungsbereitstellung auf der Stromrechnung stehen? Den realen Kosten jedenfalls

entspräche es mehr. Ein flexibler Arbeitspreis, der es lohnend macht, den eigenen Verbrauch an das Angebot anzupassen, könnte einiges bewegen.

Wenn so etwas langfristig eingerichtet wäre, gäbe es vermutlich bald auch Geräte, die den wechselnden Preis automatisch berücksichtigen. Dabei werden die Batteriespeicher an den Solaranlagen sicher eine Vorreiterrolle spielen. Schwankt der Strompreis etwa zwischen 10 und 40 Cent pro kWh, lässt sich ein Speicher wirtschaftlich gut betreiben, bald auch bei kleineren Schwankungen. Auch die Elektroautos würde man bevorzugt dann laden, wenn die Nachfrage geringer und der Strom günstig ist. Schon jetzt gibt es den Trend, sich mit einem Elektroauto auch gleich eine Solaranlage anzuschaffen, um günstig zu Hause tanken zu können.

Mit einem flexiblen Arbeitspreis wäre ein wichtiger Schritt zur geregelten Last erreicht. Die Kraftwerksbetreiber hätten nun einen Anreiz, Leistung in Reserve zu halten. Was niemandem hilft, sind gegen null gehende oder gar negative Börsenpreise. Besser wäre es, einen realistischen Energiepreis zu haben und, auf der anderen Seite, Strom aus alten Kohlekraftwerken nur dann zu verwenden, wenn tatsächlich ein Engpass besteht. Der Mechanismus der CO<sub>2</sub>-Zertifikate könnte dies im Prinzip leisten, allerdings müssten die Verschmutzungsrechte deutlich teurer sein und Missbrauch und Fälschung unterbunden werden. Die externen Kosten sollten mit in die Rechnung eingehen, auch wenn es darüber noch viele Kontroversen gibt. Sie einfach wegzulassen, ist jedenfalls keine Lösung.

Ich denke, das wäre aber nicht ausreichend. Es sollte auch eine wirtschaftlich realistische Umgangsweise mit den Risiken geben. Auch, wenn wir in Deutschland den Ausstieg aus der Kernenergie planen, werden Frankreich und England daran festhalten. Weiterhin sind neue Kernkraftwerke in Rumänien, Tschechien, Ungarn,

Finnland und Armenien geplant. Wir werden daher noch viele Jahre mit ihren Risiken leben müssen.

Daher wäre es wichtig, diese Risiken zu bewerten und abzusichern, auch, um sie besser zu kennen. Lassen sich keine privatwirtschaftlichen Versicherungen finden, die diese Risiken versichern, könnten Staaten dafür bürgen. Allerdings sollte dies in einem marktwirtschaftlichen System zu einem angemessenen Preis geschehen. Der Betrieb von Kernkraftwerken müsste hoch genug besteuert werden. Wie hoch eine realistische Prämie sein müsste, ist umstritten. Die Berechnungen gehen von 1,5 Cent bis 20 Euro pro KWh. Aber auch schon bei etwa 10 Cent pro KWh wäre die Kernenergie aus alten, abgeschriebenen Kernkraftwerken nicht mehr konkurrenzlos billig. Neue Kraftwerke wären dann wirtschaftlich kaum noch sinnvoll. Für Energieimporte aus Staaten mit Kernenergie müsste es dann Zölle geben, wenn im Ursprungsland die Risiken nicht angemessen bewertet werden...

Es wird vermutlich Ärger geben, wenn es darum geht, solche Forderungen durchzusetzen. Das ändert allerdings nichts daran, dass sie sinnvoll und gerecht wären.

Welche Rolle könnten die Netzbetreiber in einem neuen Energiemarkt spielen? Diese Frage ist sicher kompliziert, und bei ihr muss auch berücksichtigt werden, wohin die technische Entwicklung weitergehen wird. Die vorhandenen Leitungen und Anlage zu betreiben und zu warten ist das Eine – es kommen noch weitere Herausforderungen hinzu.

Da ist zum einen die Frage eines europaweiten HGÜ-Netzes, auch als Overlay-Netz bezeichnet, das die Übertragung von Energie über weite Strecken verbessern könnte. Hohe Investitionen sind dafür nötig.

Moderne Technik bei den Wandlerstationen, die die Gleichstromleitungen mit dem Wechselstromnetz verbinden, könnte aber erheblich zur Stabilisierung des Verbundnetzes beitragen. Die HGÜ-Systeme können Blindleistung bereitstellen und bei einem Systemsplit, dem Auseinanderfallen des Synchronlaufs, immer noch Leistung übertragen und ausgleichen.

Die nächste Frage ist, ob in Zukunft mehr Kabel anstelle von Freileitungen verwendet werden sollten. Erdkabel bedeuten gewiss mehr Aufwand, aber wir würden die Landschaft nicht weiter verbauen, und langfristig stellt sich sogar die Frage, ob vorhandene Freileitungen abgebaut und ersetzt werden können. Hier gibt es unterschiedliche Interessen zu berücksichtigen. Ob die Kosten den Strompreis immer weitertreiben müssen oder ob sie anders verteilt werden sollten, ist auch nicht einfach zu beantworten.

Wenn sich eine Technologie von Langzeitspeichern etabliert, sieht die Situation ohnehin anders aus: Im Sommer hätten wir dann europaweit genug Energie. Wir müssten sie nur speichern. Solche Speicher könnten eine Alternative zum Netzausbau darstellen. Vermutlich ist eine Kombination sinnvoll. Es gibt also eine Menge von Aufgaben, die über das Alltagsgeschäft hinaus gehen und zu bezahlen sind.

Feststeht, dass die Netzbetreiber unter wirtschaftlichen Druck geraten werden, wenn sie weitermachen wollen wie bisher. Wenn sich immer mehr Kunden von der Versorgung über das Netz abmelden und sich autark mit Energie versorgen, könnte dies den Zusammenhalt in der Gesellschaft belasten.

Daher ist es schon jetzt wichtig, die Betreiber von Solaranlagen und Speichern so in die Versorgung einzubeziehen, dass für beide Seiten eine erfolgreiche und dauerhafte Zusammenarbeit

entsteht. Und zwar ohne, dass Menschen, die keine Solaranlage betreiben, benachteiligt werden.

Diese Fragen werden sich auch für die Industrie stellen – vor allem, wenn Wasserstoff im Prozess der Produktion verwendet wird und es daher einfacher ist, in auch als Energiespeicher einzusetzen.

Eine sichere Versorgung mit Energie liegt im Interesse der Allgemeinheit und sollte auch von ihr gefördert werden. Die Frage aber, wie genau das geschehen soll, muss auch zu einer öffentlichen Debatte werden.

## **Umwege führen auch zum Ziel**

Wir kennen das von uns selbst. Wie oft sagen wir uns: Warum habe ich das nicht gleich so gemacht? Oder wir sind eine bedenklich lange Zeit damit beschäftigt, herauszufinden, was wir eigentlich im Leben erreichen wollen. Unterschiedliche Beschäftigungen, die nicht viel einbringen, abgebrochene Studiengänge und Ausbildungen sind noch eher harmlose Umwege. Es gibt auch solche, die existentiell bedrohlich sind und an denen ein Mensch scheitern kann. Doch auch eine gradlinige, schnelle Karriere ist keine Garantie für ein glückliches Leben.

Ähnlich, gibt es bei den technischen Entwicklungen Umwege, die uns später vor die Frage stellen, ob es nicht auch möglich gewesen wäre, sie zu umgehen, also einen Schritt zu überspringen. Doch möglicherweise sind die Erfahrungen eines Umwegs wertvoller als die beim Umweg verausgabten Ressourcen. Die bei solchen Umwegen angerichteten Schäden sind natürlich kritisch zu betrachten und sollen mit einer solchen Überlegung keineswegs gerechtfertigt werden. Es sollte auch schnell gehandelt werden, um weitere Schäden zu begrenzen. Dass es Geld kostet ist klar, aber der dadurch verausgabte Wert wäre gut angelegt.

Lange hatten wir die Kohle aus der Erde. Vielleicht hat sie uns davor bewahrt, die Welt so gründlich zu entwalden, wie es die Bewohner der Osterinsel aus noch immer rätselhaften Gründen getan haben. Heute aber, geht es darum, den Ersatz der Kohle als Energiequelle, der auf die Dauer unausweichlich ist, mit allen Mitteln zu beschleunigen. Je schneller das geschieht, desto *mehr* Arbeitsplätze werden geschaffen! An der Kohleverstromung festzuhalten, um Arbeitsplätze zu sichern, ist weder richtig, noch wird es erfolgreich sein. Dass damit noch Wahlen gewonnen werden können, sollte uns zu denken geben.

Nach der Kohle kamen das Erdöl, das Gas und schließlich die Kernenergie dazu, und trotz rasant steigender Energienutzung sind wir nicht ganz im Kohlenrauch erstickt, sicher haben auch diese neuen Energiequellen dazu beigetragen. Trotzdem hätten wir durch den sauren Regen fast wieder die Bäume auf dem Gewissen gehabt und dadurch gelernt, wie wir Schwefel- und Stickoxide aus dem Abgas filtern können. Aber auch sauber verbrannte Kohle heizt das Klima auf und wir wissen inzwischen, was das bedeuten kann, aber auch was zu tun ist. Die Kernenergie wird es nicht sein, die uns rettet, auch sie wird bald vollständig von der Sonne abgelöst werden.

Das elektrische Auto fuhr schon um 1910 gar nicht schlecht, wie wir gesehen haben. Der größte Nachteil gegenüber Fords T-Modell war vielleicht die Tatsache, dass diese Wagen damals praktisch von Hand und einzeln gefertigt wurden. Das Fließband war ein wesentlicher Faktor für Fords Erfolg mit dem Modell T. Das schnelle Geschäft mit dem leicht transportierbaren und speicherbaren Erdöl spielte natürlich auch eine entscheidende Rolle.

Jedenfalls haben wir den Umweg über den Verbrennungsmotor gewählt und haben dabei seine Grenzen und Nachteile kennengelernt. Leider haben wir dabei aber auch hundert Jahre lang

die Entwicklung des Elektroautos verschlafen, jedenfalls, was die konventionelle Autoindustrie betrifft. Kleinen Firmen, die es trotzdem elektrisch versuchten, wurde das Leben schwer gemacht.

Auch die Häuser mit Solarzellen auf dem Dach und Batterien im Keller hatten wir schon in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Das Problem waren die Speicher: Die damals üblichen Bleibatterien haben nicht allzu lange überlebt. Man hatte sich darauf eingestellt und die Waschmaschine eben nur dann eingeschaltet, wenn die Sonne schien.

Die ersten Netzeinspeiser für Solarstrom waren damals eine Sensation, weil endlich keine Batterien mehr nötig waren, wenn es einen Netzanschluss gab. Das Netz war ein scheinbar unendlicher Speicher. Allerdings wurden die Pioniere dieser Zeit zunächst höchst kritisch als „Geisterfahrer im Stromnetz“ betrachtet. Es ging dabei in erster Linie um eine Störung des Einbahnstraßenprinzips, denn an eine ernsthafte wirtschaftliche Konkurrenz gegenüber den Kraftwerken glaubte damals wohl kaum ein Stromversorger.

Diese Technik hat die Sonnenenergie aber weltweit zur günstigsten Stromquelle gemacht und dafür gesorgt, dass es für viele Menschen zum ersten Mal überhaupt elektrisches Licht gibt. Heute ist das Netz kein unendlicher Speicher mehr, so wie es damals, vor dem Siegeszug der Solarzelle, erschien. Wenn wir mehr Solarenergie nutzen wollen – und davon gibt es für viele Millionen Jahre genug – werden wir mehr Energie speichern müssen. Und dann wird das Stromnetz immer mehr auf Batterien und andere Speicher angewiesen sein.

Aber ohne diesen Umweg wären wir kaum so weit gekommen.

P. S.: Ich arbeite an einem Text, der sich ausführlicher mit den technischen Details beschäftigen wird, vor allem in Bezug auf kleine Batteriespeicher.

## Anmerkungen

### S.3 *Vorwort des Autors:*

### S.10 *Das Stromnetz*

Die SI-Dezimalpräfixe stehen bei Wikipedia natürlich als Tabelle. Ich wollte sie aber nebeneinander sehen.

### S.13 *Eine kurze Geschichte*

Die Geschichte ist hier sehr kurz und unvollständig. George Westinghouse hatte 1869 die Druckluftbremse für die Eisenbahn erfunden und arbeitete seit 1888 mit dem Erfinder Nicola Tesla zusammen um die Wechselstromtechnik zu etablieren. Gleichzeitig hatte Thomas Edison viel in die Gleichstromtechnik investiert und versuchte, diese durchzusetzen. Die Entscheidung im sogenannten Stromkrieg viel mit dem Zuschlag für die Beleuchtung der Weltausstellung 1893 in Chicago. Die Westinghouse Company erhielt ihn und baute später auch das erste Wasserkraftwerk an den Niagarafällen. Tesla hatte vorher auch einige Jahre bei Edison gearbeitet.

### S.21 *Die Regelung*

Die Tatsache, dass wir uns mehr Spannungs- und Frequenzabweichungen erlauben können, weil die Geräte, die wir heute verwenden, unempfindlich gegenüber solchen Schwankungen sind, könnte sehr gut genutzt

werden, um das Netz zu stabilisieren. Das hört sich vielleicht widersprüchlich an, aber der momentane Wert und der Verlauf von Spannung und Frequenz, der schon von sich aus viel über den Zustand des Netzes verrät, lässt sich noch weiter für die Übertragung von Informationen nutzen. Eine lokale Absenkung der Spannung würde anzeigen, dass Leistung im Moment knapp ist und könnte automatische Reduzierung der Last, über das Maß des Selbstregelleffekts hinaus, auslösen.

### S.23 *Warum die Stabilität wichtig ist*

Der teuflische Ohm ist von einer Website, deren Urheber ich leider nicht ermitteln konnte. Es fehlt das Impressum und jeder andere Hinweis, auch auf weiteren Websites, die sich mit anderen Forschern der Elektrotechnik befassen und vermutlich vom gleichen Urheber im Rahmen einer Studienarbeit erstellt wurden. Da keine Rechte auf diesen Seiten beansprucht werden, nehme ich an, dass sie zu freien Verfügung stehen sollen und danke dem unbekanntem Schöpfer.

### S.28 *Der Strommarkt*

Ein wichtiger Hintergrund, um die Struktur des Energiehandels zu verstehen, ist das Energiewirtschaftsgesetz von 1935. In der Präambel wird gefordert „die Energieversorgung so sicher und billig wie möglich zu gestalten“. Weiterhin sollten „volkswirtschaftlich schädigende Auswirkungen des Wettbewerbs“ verhindert werden. Die herrschende NSDAP wollte Großkraftwerke vermeiden, da diese ein Ziel für Luftangriffe darstellen könnten. (Wikipedia zum Thema Energiewirtschaftsgesetz)

In der letzten Neufassung von 2005 des Gesetzes, ist der Zweck folgenderweise formuliert:

„(1) *Zweck des Gesetzes* ist eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas.“

(*Bundesgesetzblatt 2005 Teil 1 Nr.42*)

Immerhin kommt jetzt das Wort „umweltverträglich“ vor, wenn auch an letzter Stelle.

Im zweiten Punkt des §1 kommt aber der ursprünglich als schädlich betrachtete Wettbewerb ins Spiel:

„ (2) *Die Regulierung* der Elektrizitäts- und Gasversorgungsnetze dient den Zielen der Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten Wettbewerbs bei der Versorgung mit Elektrizität und Gas und der Sicherung eines langfristig angelegten leistungsfähigen und zuverlässigen Betriebs von Energieversorgungsnetzen.“

Was uns fehlt ist offensichtlich eine belastbare Bewertung der Umweltverträglichkeit, um sie im Wettbewerb zu berücksichtigen.

#### S.44 Erneuerbare Energien

Nicht genug Holz

Eine erste Quelle dazu ist eine Forstordnung aus dem Bistum Speyer von 1442. In Japan, wo Häuser traditionell aus Holz gebaut wurden, rief ein Shogun der Togukawa-Zeit in einer Anordnung 1666 dazu auf, junge Bäume zu pflanzen. Bis 1700 war in Japan ein ausgeklügeltes Fortverwaltungssystem eingeführt.

(Quelle Wikipedia)

#### S.49 *Das EEG*

Auch vor dem Bund-Länder-1000-Dächer Förderprogramm gab es schon eine Handvoll Photovoltaikanlagen, die mit dem Netz gekoppelt waren. Die Anlagen hatten kleine Leistungen von unter einem Kilowatt und der Strom kam meistens direkt in die Steckdose. Die Folge war sogenanntes Netmetering, der Stromzähler drehte sich mal vorwärts, mal rückwärts. Das war spektakulär, aber für die Netzbetreiber sehr beunruhigend. Bald wurden Zähler mit Rücklauf Sperre eingesetzt. Inzwischen wird an einer Norm für diese Steckdoseneinspeisung von Solarstrom gearbeitet, die in einigen anderen Ländern schon zulässig ist. Ein Problem dabei ist eine mögliche Überlastung von Leitungen, wenn sich Strom aus dem Netz und Strom aus der Solaranlage addieren und die Sicherung nicht darauf reagieren kann.

#### S.55 *Die Stromversorgung in der Zukunft*

Im Juni 2018 wurde in den USA (Nevada) eine Ausschreibung für ein Solarkraftwerk von 300 MW zu einem Preis von 23,76 Dollar pro Megawattstunde vergeben. Zum Vergleich: das entspricht etwa 20 Euro pro Megawattstunde oder 2 Cent pro Kilowattstunde. Es werden in den USA auch große Batterieanlagen mit Solarkraftwerken kombiniert. Bei diesen Preisen hat Kohlekraft schon heute verloren, und in Zukunft erst recht. Egal, welche Versprechungen ein Präsident heute den Arbeitern in der Kohleindustrie macht, sie werden kaum zu halten sein.

#### S.64 *100 Prozent oder darf es etwas mehr sein?*

S. 75 *Spielverderber*

S.83

### **Dämpfung von Netzpendelungen durch steuerbare Lasten und Batteriespeicher.**

Die mathematischen und physikalischen Einzelheiten sind sehr komplex. Allerdings lässt sich eine solche Schwingung an jedem Punkt im Netz durch Messung und Analyse der Frequenz erkennen und durch aktive Dämpfung reduzieren. Aktive Dämpfung ist weitaus wirkungsvoller als passive, wie zum Beispiel Reibung. Sehr anschaulich ist die Erfahrung mit einer Schaukel oder einem anderen Pendel. Luftwiderstand und Lagerreibung sind passive Dämpfungselemente. Es dauert seine Zeit, bis die Schaukel oder das Pendel zum Stillstand gekommen ist. Wenn man mit der Hand die Schaukel aktiv abbrems, kommt sie nach wenigen Sekunden zum Stillstand, ebenso ein Pendel.

Bei Brücken werden aktive Dämpfer erfolgreich eingesetzt um Schwingungen zu begrenzen.

Bei den Schwingungen im Stromnetz ist



Die Franjo-Tudjman-Brücke bei Dubrovnik in Kroatien wurde 2005 an den 38 Schrägsellen mit aktiven Dämpfer ausgestattet

gemeinfrei

das ähnlich. Schon eine Regelleistung von  $\pm 20$  MW im ganzen Verbundnetz hat eine beachtliche Wirkung. Ein kleiner Batteriespeicher könnte typischerweise  $\pm 3$  KW

zur Verfügung stellen. Schon 1000 Speicher hätten +/- 30MW und könnten damit einen hohen Beitrag zur Netzstabilität liefern. Der Preis wäre sehr gering, es sind nur ein paar zusätzliche Softwarealgorithmen dafür nötig. Diese Möglichkeit ist für Ladegeräte von Elektrofahrzeugen schon untersucht und als realistisch bewertet worden. Bei Batteriespeichern besteht, im Vergleich zu anderen schaltbaren Lasten, der Vorteil, dass sie immer mit dem Netz verbunden sind.

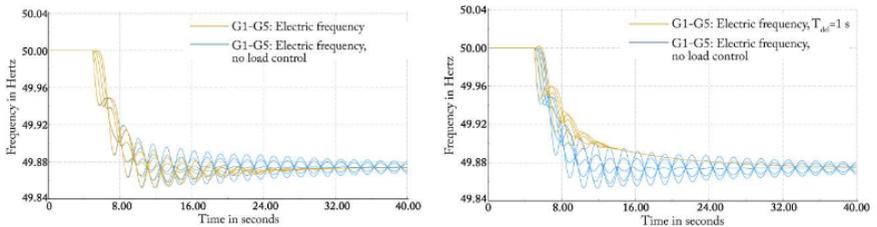
Diese Netzpendelungen treten vor allem auf, wenn zwei Dinge zusammenkommen: Ein Stromtransport mit hoher Leistung und über große Entfernungen. Durch einen Schaltvorgang wird die Schwingung angeregt und Energie pendelt zwischen entfernten Punkten des Verbundnetzes hin und her. Dabei werden viele Elemente des Netzes, auch die Generatoren in den Kraftwerken, zusätzlich belastet. Wenn diese Schwingung nicht innerhalb von wenigen Sekunden gedämpft wird und ausklingt, kann die Belastung zur Auslösung von Sicherungen im Netz führen. Das ist kritisch, weil die übertragene Leistung im Synchronbetrieb dann über andere Leitungen fließen muss, die dann ebenfalls überlastet werden können. Es droht eine Kettenreaktion, die zum Zerfall des Verbundbetriebs führen kann. Ein solcher Systemsplit ist, besonders wenn vorher große Leistungen übertragen wurden, eine sehr kritische Situation, bei der in den einzelnen Teilen des Netzes die Frequenz sehr schnell vom Sollwert abweichen kann.

Interessant ist in diesem Zusammenhang die DENA-Studie „Momentanreserve 2030, Bedarf und Erbringung von

## Momentanreserven. Analyse der dena-Plattform Systemdienstleistungen“

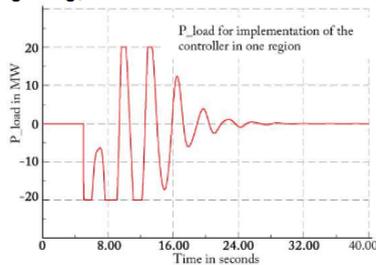
### Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse ohne Regelung in Blau und mit Regelung in Gelb. Auf der linken Seite ist dabei nur in einer der Netzregionen eine geregelte Last implementiert. Auf der rechten Seite sind in jeder Netzregion geregelte Lasten.



**Abb. 4** Einschwingverhalten mit gesteuerten Lasten in einer Netzregion (links) und in allen Netzregionen (rechts)

Es wird in beiden Fällen deutlich, dass die geregelten Lasten zu einer deutlichen Dämpfung von Frequenzpendelungen beitragen können. Bei Implementierung in nur einer Region ist die Pendelung nach in etwa 24 Sekunden abgeklungen. Bei Implementierung von regelbaren Lasten in allen Regionen ist das System bereits nach 14 Sekunden eingeschwungen. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Leistungseinsatz der Regelung, der auf  $\pm 20$  MW beschränkt ist.



**Abb. 5** Änderung der Verbrauchsleistung zur Dämpfung von Frequenzpendelungen

Quelle: Neuer Ansatz zur Dämpfung von Frequenzpendelungen im Übertragungsnetz durch Elektromobilität von Alexander Probst, Universität Stuttgart

## S.81 Biomasse

Unter <https://bienenstrom.de/innovative-saatgutmischungen-aus-wildpflanzen/> findet man Informationen über die Nutzung von Blühpflanzen für die Biogasproduktion und den Bezug von Ökostrom aus solchen Biogasanlagen. Es gibt eine große Anzahl von Bauern, die sich für dieses Konzept interessieren.

S.84 *Die Risiken in der Zukunft*

Nach einem Bericht des Tagesspiegels vom 22.6.2018 drohen Deutschland Zahlungen von 30 Milliarden Euro an andere EU-Länder, wenn es keine Kehrtwende in der Klimapolitik gibt.

Am 25.6.2018 berichtet Greenpeace, dass ein schneller Ausstieg aus der Braunkohleverstromung jährlich bis zu 28 Milliarden an Schäden und Zusatzkosten eingespart werden können. Das wäre ein hoher Preis für die Erhaltung weniger Arbeitsplätze, die in Zukunft ohnehin verloren wären.

S.87 Das Heizen mit Weizen ist leider kein Witz, sondern Realität. Es gibt dafür speziell entwickelte Getreidekessel und Regeln für deren Emissionen. Siehe [www.getreideheizung.de](http://www.getreideheizung.de)

S.89 Am 5.6.2018 brachte der Deutschlandfunk eine interessante Sendung zum Thema Luftschiffe und den neuesten Entwicklungen. Wasserstoff könnte demnach

die Grundlage für eine Renaissance der Luftschiffe sein.  
[http://www.deutschlandfunk.de/renaissance-der-luftschiffe-visionaere-schrauben-am.740.de.html?](http://www.deutschlandfunk.de/renaissance-der-luftschiffe-visionaere-schrauben-am.740.de.html?dram:article_id=387878)  
 dram:article\_id=387878

S.90

Die Firma Homepowersolutions aus Berlin bietet Hybridspeicher mit Wasserstoff an. Damit kann im Sommer überschüssige Sonnenenergie für den Winter gespeichert werden. <http://www.homepowersolutions.de/>

S.91 *Störung der automatischen Kommunikation und Fernsteuerung – ein verborgenes Risiko*

S.92

Marc Elsberg gilt inzwischen als Experte und gefragter Redner zu Themen wie Energie, IT-Sicherheit und moderne Gesellschaft. <http://www.marcelberg.com/vortraege.php>

S.93

Die Empfehlungen der Forschungsgruppe FRI der Hochschule Bremen haben mich sehr beeindruckt. Die praktische Umsetzung dieser Empfehlungen im Alltagsbetrieb eines Energieversorgers erschien mir schwierig bis unrealistisch. Es wird auf Seite 11 auch empfohlen selbst in „widrigen Situationen“, also Krisen und Katastrophen, die umfangreichen organisatorischen und technischen Maßnahmen für die IT-Sicherheit aufrecht zu halten. Man könnte auch von der Feuerwehr verlangen, bei einem Einsatz zunächst die Bedienungsanweisungen aller eingesetzten Geräte zu lesen.

C.-H. Genzel, O Hoffmann, R. Sethmann. Zusammenfassung relevanter Informationssicherheitsstandards für

deutsche Verteilungsnetzbetreiber. In: Forschungsgruppe Rechnernetze und Informationssicherheit, Hochschule Bremen (2017)

S.94 *Die Sonne geht auf.*

S. 99

Die Zahlen für die Erstellung dieser Grafiken habe ich unter anderem aus den Tabellen von Prof. Volker Quaschnig abgeschrieben. Sie sind unter <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/pv-welt/index.php> zu finden und sogar nach einzelnen Ländern gegliedert.

Im Jahr 2014 war Deutschland noch Weltmeister. 2017 nur noch auf dem vierten Platz hinter China, USA und Japan.

Anders als beim Fußball, ist es in der Solarwirtschaft viel schwieriger, nach einem Abstieg wieder nach vorne zu kommen.

S.105 *Alles geregelt? Nein.*

S.110 *Es gibt eine Lösung:*

S.115 Zu den Dingen, die bei einer dezentralen Stabilisierung zu beachten sind, gehört die Gefahr von Schwingungen. Diese haben mit Phasenverschiebungen und Reaktionszeiten zu tun und sind mit den klassischen Mitteln der Regelungstechnik zu beheben.

Ein solcher Fall ist die sogenannte 50,2-Hertz-Problematik:

Als die Netzgekoppelten Solaranlagen noch nicht so weit verbreitet waren, wurden enge Grenzen für die

Netzfrequenz vorgegeben, um bei einem lokalen Netzausfall das Risiko einer unkontrollierten Inselbildung zu verringern.

Später wurde klar, dass dadurch ein anderes Risiko entstand:

Alle mit einer solchen Funktion ausgestatteten Anlagen im gesamten Verbundnetz würden nach der damaligen Norm innerhalb von 0,2 Sekunden abschalten, wenn die Netzfrequenz 50 Hertz überschreitet. Das passiert nur dann, wenn zu Beispiel durch eine Leitungsunterbrechung ein sehr großer Anteil der Last wegfällt und die Primärregelung das nicht auffangen kann. Dann schalten alle PV-Anlagen europaweit gleichzeitig ab. Da sie zusammen eine Leistung von inzwischen über 100 Gigawatt haben, wäre das ein sehr großes Problem, selbst wenn nur ein kleiner Teil davon mit einer solchen Steuerung ausgestattet sind. Die Frequenz würde in wenigen Sekunden stark abfallen und alle für einen solchen Fall vorgesehenen Notfallmaßnahmen müssten aktiviert werden um den Frequenzabfall zu stoppen. Falls das gelingen sollte, würden nach etwa 30 Sekunden alle Solaranlagen wieder zuschalten und dann wäre viel zu viel Leistung im Netz. Die Frequenz steigt schnell an und bei 50,2 Hz schalten die Solaranlagen wieder ab. Das ganze System gerät in eine gefährliche Schwingung. Das Problem ist die Zeitverzögerung beim Wiedereinschalten und die enge Grenze von 0,2 Hz über Sollwert. Inzwischen ist die Norm nachgebessert und die Abschaltung erfolgt zwischen 50,5 und 51,5 Hz, verteilt auf die Leistung der Anlagen.

Ein paar Jahre vorher, als die Leistung aller PV-Anlagen noch weit unter drei Gigawatt lag, war ein enge Unterfrequenzgrenze von 49,8 Hz gültig. Ich selbst hatte bei der Überarbeitung der Vorschriften auf diesen Fehler hingewiesen und die Grenze wurde auf 47,5 Hz abgesenkt. Sonst hätte es erhebliche Probleme bei einem Frequenzeinbruch auf 49,8 Hz gegeben, weil alle Solaranlagen abgeschaltet und das Leistungsdefizit vergrößert hätten. Das war aber kein Schwingungsproblem, sondern eine Reaktion in die falsche Richtung. Bei zu geringer Erzeugungsleistung darf diese natürlich nicht noch weiter reduziert werden. Bei fallender Frequenz muss die Erzeugungsleistung erhöht werden, was PV-Anlagen ohne Speicher zwar nicht können, aber zumindest müssen sie weiterarbeiten. Die Abschaltung bei 49,8 Hz hatte nur den Zweck, eine unkontrollierte Inselbildung zu erkennen. Sie kam aus einer Zeit, als noch niemand daran gedacht hatte, dass die geringe Leistung der Solaranlagen einen Einfluss auf die Stabilität des Verbundnetzes haben könnte. Leider hatte damals niemand daran gedacht, dass es auch bei steigender Frequenz Probleme geben könnte. So mussten viele Anlagen später mit hohem Aufwand nachgerüstet werden.

S.122

Ich hatte zunächst von intelligenten Zählern und Waschmaschinen geschrieben, mich dann aber gegen diesen irreführenden Begriff entschieden. Es ist ärgerlich, was inzwischen mit diesem Begriff angestellt wird, wenn es um technische Geräte geht.

S.119 *Und wie kommen wir dahin?*

S.123 *Ein neuer Strommarkt - aber wie?*

S.126

Nach einer im Juli 2018 veröffentlichten Studie des Marktforschungsunternehmens Arthur D. Little „Futur of Batteries“ wird es nicht lange dauern, bis der Preis der Speichereinheiten auf 100 Dollar pro Kilowattstunde sinkt. Eine Lebensdauer von 5000 Zyklen und 20 Jahren ist heute leicht zu erreichen und wird in Zukunft überschritten werden. Dann kostet es weniger als 2 Cent pro KWh oder 20 Dollar pro MWh, wenn Energie für einige Tage gespeichert wird.

S.130 *Umwege führen auch zum Ziel.*

## **Impressum**

Klaus-Wilhelm Köln: *Einfach Strom, am besten von der Sonne*

© Klaus-Wilhelm Köln 2018

## **Anschrift des Autors:**

Klaus-Wilhelm Köln

An der Rothebek 29

23560 Lübeck

E-Mail: klaus.koeln@ufegmbh.de

Tel. 0451 2964800 / 0151 12715930

**Lektorat:**

Lektorat Dallmann  
Mitglied im Verband der Freien Lektorinnen  
und Lektoren (VfLL)  
Dipl.-Ing. Jonas-Philipp Dallmann  
Schollenhof 20  
D-13509 Berlin  
Tel.: (030) 3384 14 14  
Mobil: 0152 / 53556867  
Mail: [Lektorat-Dallmann@gmx.de](mailto:Lektorat-Dallmann@gmx.de)

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotografie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Autors reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Der Druck der Erstauflage von 50 Stück wurde von der UfE GmbH in Lübeck finanziert.