

**Energie ist knapp – das hört man heute an allen Orten. Die Reichweiten fossiler Energien haben ein Ende, und viele von uns werden es erleben. Obwohl wir im Alltag noch nicht allzu viel davon merken, steht ein Paradigmenwechsel an, meint Andreas Manthey. Immerhin überhäuft uns die Sonne äußerst freigiebig mit Energie. Höchste Zeit, diesen Überfluss endlich effektiv zu nutzen.**

Wie nie zuvor stehen heute die Energiequellen unseres Planeten weltweit im Zentrum der Diskussionen. Man sorgt sich wegen der Knappheit, der wirtschaftlichen Macht und der Gefährdung der Umwelt durch die sogenannten fossilen Energien wie Kohle, Erdöl, Erdgas. Erneuerbare Energien, wie Sonne, Wind und Wasserkraft, gelten als Hoffnung, doch als relativ kleines Segment. So zeigt das Tortendiagramm über den Welt-Primärenergieverbrauch bei den fossilen Energiequellen jeweils große Tortenstücke, während die erneuerbaren Energien meist nur in einem gemeinsamen, kleinen Tortenstück zusammengefasst werden. Wenn man Energieexperten fragt, ob dieses Diagramm die Wahrheit repräsentiert, so wird man selbst von deren ökologisch angehauchten Vertretern hören: „Ja das ist so, diese Zahlen repräsentieren die Verteilung der Energieträger am Gesamtverbrauch“. Angesichts dieser Übermacht der ökologisch bedenklichen Energiequellen könnte man beinahe den Mut verlieren. Aber es gibt auch eine andere, enorm ermutigende Betrachtungsweise über die Verteilung der Energieträger, nämlich die „natürliche Welt-Energiebilanz“.

### Die natürliche Welt-Energiebilanz

Wenn wir uns die tatsächliche physikalische Energiebilanz der Primärenergiequellen auf der Erde ansehen, kommen wir zu einem völlig anderen Resultat. An der durchschnittlichen Raumtemperatur in mitteleuropäischen Breiten von 20 Grad Celsius sind die fossilen Energieträger nämlich nur zu einem sehr kleinen Prozentsatz beteiligt. Hätten wir keine Energieeinwirkung auf den Raum, dann würde das Thermometer -273,15 Grad Celsius oder 0 Grad Kelvin anzeigen – den absoluten Temperatur-Nullpunkt. Wenn in dem Raum, in dem wir uns befinden, nun wohlige 20 Grad Celsius sind, dann in erster Linie deshalb, weil die Sonne etwa 1000 Watt Solarstrahlung auf jeden Quadratmeter unserer senkrecht zur Sonne stehenden Erdoberfläche einstrahlt.

Die gesamte auf die Erde eingestrahlte Solarleistung beträgt somit: Fläche  $F$  ( $\pi$  mal  $r^2$ ) eines Kreises mit dem Radius  $r = 6000$  km (Erdradius) mal 1000 Watt. Die eingestrahlte Jahres-Sonnenenergie ergibt sich aus der momentanen Leistung mal 24 Stunden pro Tag mal 365 Tage, da die Erde der Sonne immer die gleiche Fläche entgegenhält, nur nicht dieselbe Oberfläche. Es geht also um folgende Größenordnungen:

- Angestrahlte Fläche der Erde (senkrecht zur Sonne): 113,22 Millionen Quadratkilometer;
- eingestrahlte Solarleistung: 113,22 Billionen Quadratmeter mal 1000 Watt/m<sup>2</sup> = 113,22 Billionen kW;

# Von der Sonne bewegt

Andreas Manthey plädiert für den Umstieg auf solare Mobilität.

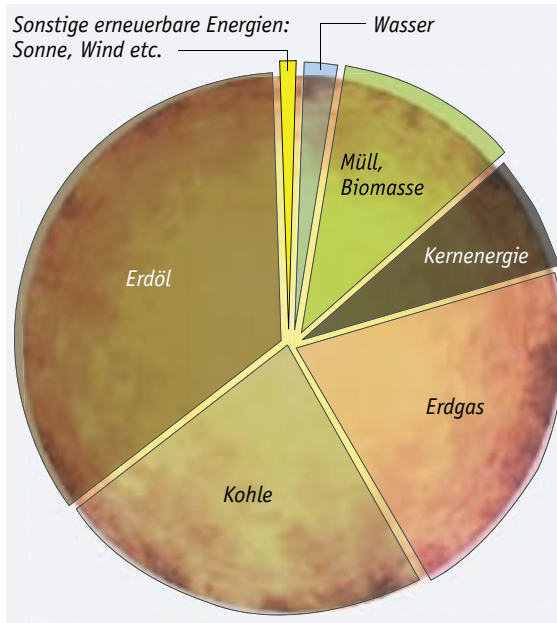


Diagramm 1: Die Welt-Primärenergie-Bilanz.

- eingestrahlte Solarenergie pro Tag: 2,72 Billionen kWh;
- eingestrahlte Solarenergie pro Jahr: 991 Billionen kWh oder  $991 \times 10^{15}$  kWh/a bzw.  $10^{18}$  kWh/a.

Besonders in Deutschland wird die Kernenergie als umweltfreundliche Energielösung dargestellt. Weltweit nimmt sie aber nur einen vergleichsweise kleinen Prozentsatz von 7,8 % ein. Wollte man die Kernenergie zu einer nennenswerten Option ausbauen (und wer will das schon?), müsste man alle paar Wochen ein neues Kernkraftwerk einweihen. Da die Reichweite der bekannten Uranvorkommen bei gleichbleibender Förderung etwa 42 Jahre beträgt, würde sie bei einer steigenden Zahl von Kraftwerken weiter sinken, so dass die Kernbrennstoff-Produktion für die Lebensdauer der Kraftwerke bei weitem nicht ausreichen würde.

Setzt man nun die auf die Erde auftreffende Solarstrahlung und die auf der Erde pro Jahr verbrauchten Energiemengen an Kohle, Öl und Gas in ein zweites Tortendiagramm ein, so ergibt sich ein völlig neues Bild, das den Sachverhalt buchstäblich umkehrt: Hatten eben noch die erneuerbaren Energien nur eine marginale Bedeutung, so machen nun die fossilen Energien fast schon zu vernachlässigende 0,85 Promille aus! Hinzu kommt, dass die Sonne noch schätzungsweise weitere fünf bis zehn Milliarden Jahre scheinen wird, während die Kohle mit der bei weitem größten zeitlichen Reichweite aller fossilen Energieträger bei gleichbleibender Förderung nur noch etwa 200 Jahre reicht.

Wie sieht es im Vergleich mit den erneuerbaren Energien aus? Die Sonne strahlt in nur 63 Minuten die Ener-

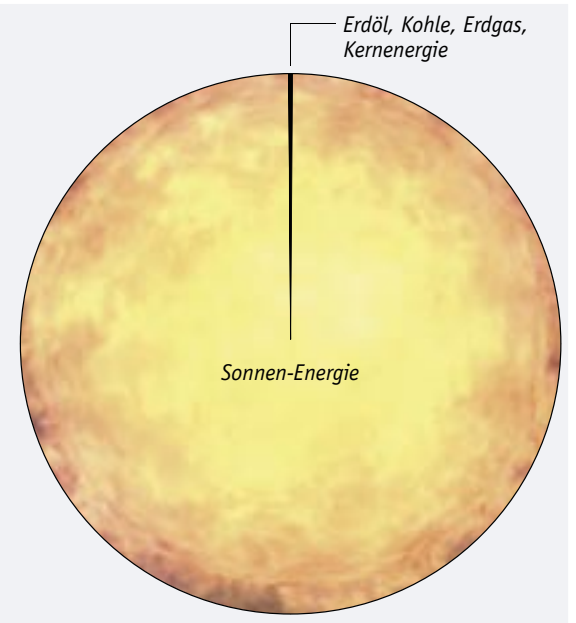
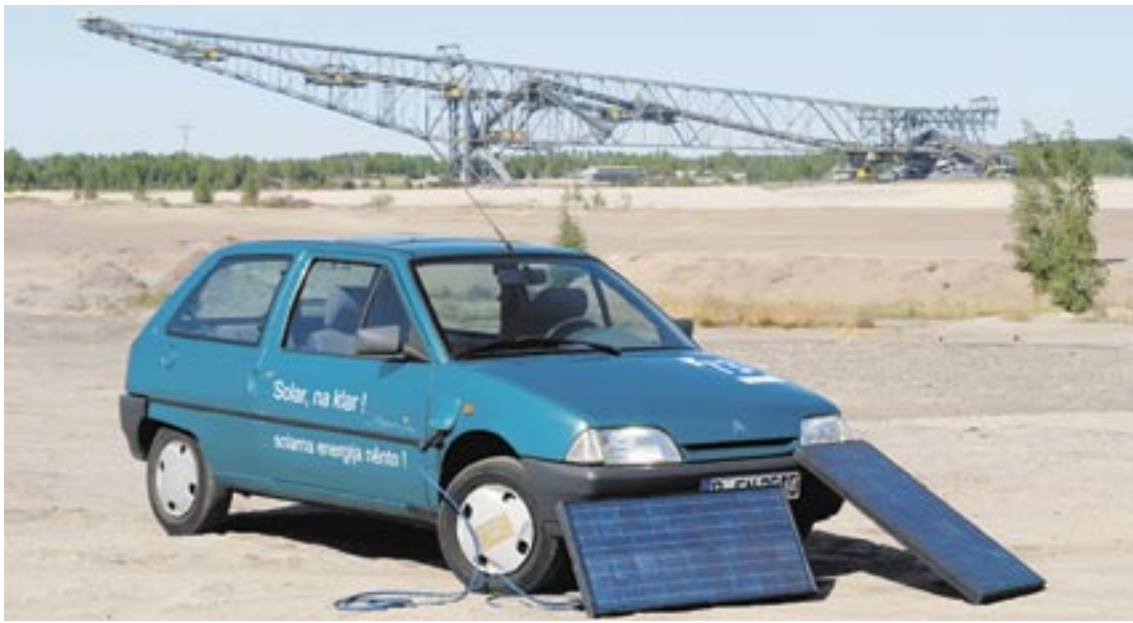


Diagramm 2: Die natürliche Welt-Energiebilanz.

giemenge auf die Erde, die die Menschheit pro Jahr (!) an (größtenteils fossilen) Energien verbraucht. Insofern kann man im Hinblick auf die Nutzung der Kernenergie sagen: Kernfusion (die als Versuch der Reproduktion der Energieumwandlungsprozesse in der Sonne gilt und als große Energiehoffnung derzeit mit Milliardenbeträgen erforscht wird) ist akzeptabel – aber bitte mit einem Sicherheitsabstand von 150 Millionen Kilometern, dem mittleren Abstand zwischen Sonne und Erde!

Jeder kann heute etwas dazu beitragen, dass hoffentlich in nicht allzu ferner Zukunft die Sonne auch im ersten Tortendiagramm des Primärenergieverbrauchs das größte Tortenstück ausmacht. Wer an einer eigenen Solarstromanlage interessiert ist, kann mit Unterstützung des EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) die Kosten seiner per KfW-Kredit über die Hausbank finanzierten Solarstromanlage innerhalb von 20 Jahren über eine Vergütung der eingespeisten Solarstrommenge mehr als refinanziert bekommen. Wer kein eigenes Dach hat, kann sich mit mehreren anderen Interessierten zu einer Bürger-Solaranlage zusammenschließen.

Außerdem haben wir in Deutschland eine sehr einfache Möglichkeit, unseren Willen nach mehr erneuerbaren Energien im Stromnetz auszudrücken: Wir können unseren Stromanbieter frei wählen. Mehrere Umweltverbände haben sich zur Aktion „Atomausstieg selber machen“ ([www.atomausstieg-selber-machen.de](http://www.atomausstieg-selber-machen.de)) zusammengesetzt und empfehlen, auf einen der folgenden vier unabhängigen Öko-Stromanbieter umzusteigen: Elektrizitätswerke Schönau EWS, Greenpeace



Citroën AX électrique vor dem „liegenden Eiffelturm“, der F60, einer stillgelegten Braunkohle-Förderanlage im IBA-Projekt „Fürst-Pückler-Park“ in der Lausitz.

Bereits 1902 gab es ein Elektrofahrzeug von Porsche-Lohner mit elektrischen Radnabenmotoren, ja sogar das erste Fahrzeug, das schneller als 100 km/h fuhr, war ein Elektrofahrzeug.

### Wirkungsgrad im Vergleich

Vergleicht man den Wirkungsgrad von Fahrzeugantrieben mit demjenigen von Leuchtmitteln, entspricht der Verbrennungsmotor dem Wirkungsgrad der Glühbirne, das Elektrofahrzeug hingegen der Energiesparlampe. Umweltminister Sigmar Gabriel hat vorgeschlagen, Glühbirnen zu verbieten, weil sie so wenig effizient sind.

Ein weiteres Beispiel sind unsere Wohnungen. In Deutschland ist der Heizwärmebedarf pro Quadratmeter Wohnfläche in den letzten 20 Jahren erheblich gesunken. Durch die Energie-Einsparverordnung (EnEV) dürfen Häuser heute nur noch einen Bruchteil der Heizenergie benötigen wie vor 20 Jahren. Die Wirkungsgradverbesserung von etwa 1 zu 4, die den Unterschied zwischen Glühbirne und Energiesparlampe oder zwischen konventionell gebautem Haus der 80er-Jahre und modernem Niedrigenergiehaus darstellt, trifft auch für den Unterschied zwischen Verbrennungs- und Elektromotor zu.

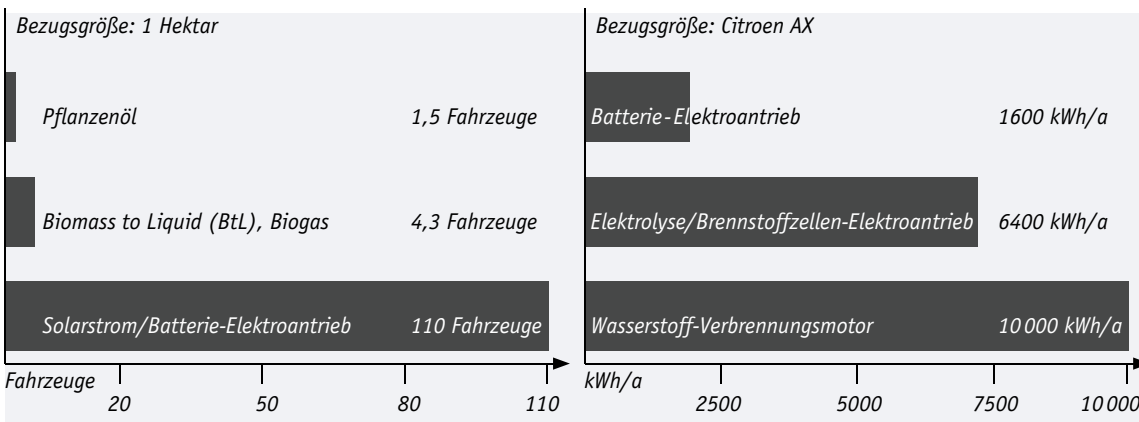
In der hiesigen öffentlichen Diskussion zum Thema Klimaschutz und Verkehr werden Biokraftstoffe derzeit als Alternative bevorzugt. Die Beimischung von Biokraftstoffen zum normalen Otto- und Dieselmotorkraftstoff ist inzwischen sogar gesetzlich vorgeschrieben. Um Antriebsenergien auf der Basis erneuerbarer Energien bereitzustellen, benötigt man erhebliche Flächen, und diese sind in der Bundesrepublik nicht unbegrenzt vorhanden und konkurrieren mit den Flächen zur Nahrungsmittelproduktion. Daher folgender Vergleich:

Vom Energie-Ertrag eines Hektars Fläche (10 000 m<sup>2</sup>) sollen umweltfreundliche Autos angetrieben werden, die jeweils 15 000 km pro Jahr zurücklegen.

- Wird von dem Hektar Pflanzenöl (Raps, Sonnenblumen etc.) gewonnen, dann können mit dem Ertrag von dieser Fläche 1,5 Fahrzeuge versorgt werden.
- Wird die ganze Pflanze verwendet, um z. B. BtL oder Biogas herzustellen, können 4,3 Fahrzeuge mit dieser Fläche versorgt werden.
- Stellen wir aber auf dem Hektar Solarstromanlagen auf (zwischen denen noch Schafe ökologisch weiden können) und speisen mit dem Strom Elektrofahrzeuge mit Batteriespeicherung, versorgt der Ertrag dieser Fläche 110 Fahrzeuge mit Antriebsenergie für je 15 000 km!

Eine immer wieder zitierte Option für zukünftige Kraftfahrzeuge ist der Antrieb mit Wasserstoff. Wasserstoff kann sauber mit Hilfe erneuerbarer Energien hergestellt werden. Wenn er in einer Brennstoffzelle eingesetzt wird und einen Elektromotor antreibt, hat man ein völlig emissionsfreies Antriebssystem. Soweit so gut.

Was bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wird, ist der Energieaufwand pro Fahrzeugkilometer. Während ein Batterie-Elektrofahrzeug bei einer Jahresfahrleistung von ca. 15 000 Kilometern ab Steckdose etwa 2400 kWh verbraucht, muss man beim Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeug mit dem vierfachen Wert rechnen. Durch die verschiedenen Energieverluste bei der Elektrolyse von Wasser, bei der Kompression zu Druckwasserstoff oder der Kühlung zur Kryo-Speicherung bei -253 Grad Celsius, beim Wasserstoff-Transport von der Raffinerie zur Tankstelle und schließlich auch



Flächenbedarf nachhaltiger Fahrzeuge: Anzahl der Kraftfahrzeuge mit einer Jahreslaufleistung von 15 000 km, die mit dem Ertrag einer Fläche von 1 ha mit Antriebsenergie versorgt werden können.

Elektroenergiebedarf verschiedener nachhaltiger Antriebssysteme für ein Kraftfahrzeug (z. B. Citroën AX) bei einer Laufleistung von 10 000 km pro Jahr.

Energy, Naturstrom oder Lichtblick. Keines dieser vier Unternehmen hat eine Verbindung zu einem der vier großen deutschen (Atom-)Stromanbieter.

### Energieverbrauch von Kraftfahrzeugen

Einer der größten Welt-Energieverbraucher ist der Verkehr. Wie können wir nun die schier unbegrenzte Energiereserve der Sonne für die individuelle Mobilität, für den Antrieb von Kraftfahrzeugen einsetzen?

Weltweit werden die meisten Kraftfahrzeuge von einem Otto-Verbrennungsmotor angetrieben. Der Dieselmotor ist weniger verbreitet, wegen seines im Vergleich zum Ottomotor etwas höheren Wirkungsgrads aber auf dem Vormarsch. Andere fossile Kraftstoffe wie Erdgas und Flüssiggas oder Biokraftstoffe, wie Methanol, Pflanzenöl, Biodiesel und Biogas, sind aus globaler Sicht bisher bei Fahrzeugantrieben nur marginal vertreten. In Zukunft müssen insbesondere die nachhaltigen Biokraftstoffe der zweiten Generation (Biomass-to-Liquid, BtL, bei denen nicht nur die Samen, sondern die ganzen Pflanzen verwendet werden) und Biogas weiter betrachtet werden, speziell für Fahrzeuge mit höheren Leistungen (Busse, LKW, Baumaschinen etc.).

Ein Verbrennungsmotor ist zum Antrieb eines Kraftfahrzeugs denkbar schlecht geeignet. Nicht nur, dass er einen eigenen Elektromotor (Anlasser) braucht, um überhaupt zum Leben erweckt zu werden, er hat auch eine ungünstige Leistungs- und Drehmomentcharakteristik, die durch ein Schalt- oder Automatikgetriebe an das Fahrzeug angepasst werden muss. Der geringe Wirkungsgrad eines Verbrennungsmotors beträgt nur ca. 10–15% im Alltagsbetrieb eines PKWs. Der Rest der im Kraftstoff enthaltenen Energie wird vom Motor in

Wärme umgewandelt. Verbrennungskraftmaschinen sollte man folglich nur in solchen Fällen einsetzen, in denen auch ein Wärmebedarf vorhanden ist. Durch Kraft-Wärme-Kopplung kann man beispielsweise mit einem Blockheizkraftwerk (BHKW) gleichzeitig Strom und Wärme gewinnen. Mit dem Strom lädt man z. B. ein Elektrofahrzeug oder speist ihn in das öffentliche Stromnetz ein, und die Wärme nutzt man in einem Gebäude für die Heizung oder die Warmwasserversorgung. Allerdings sind Wärmedämmung und solare Wärmebereitstellung einem BHKW immer vorzuziehen.

Einen weit besseren Wirkungsgrad als der Verbrennungsmotor bei Fahrzeugantrieben hat der Elektromotor. Bei schienengebundenen Fahrzeugen ist er schon sehr weit verbreitet: Fernzüge, S- und U-Bahnen und auch Oberleitungsbusse fahren schon lange elektrisch. Der Elektromotor hat die ideale Drehmoment-Kennlinie für den Antrieb eines Kraftfahrzeugs: ein hohes Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen, das dann bei höheren Drehzahlen abflacht. Daher kommen Elektrofahrzeuge auch ohne Getriebe und ohne Kupplung aus. Weiterhin können sie beim Bremsen und Bergabfahren die Batterie wieder aufladen oder bei netzgebundenen Fahrzeugen den Strom zurück ins Stromnetz speisen. Hierzu wird die im Fahrzeug gespeicherte Bewegungsenergie durch Umschalten des Elektromotors zum Generator in Strom gewandelt.

Die zahlreichen Verschleißteile beim Verbrennungsmotor, wie Kupplung, Auspuff, Luftfilter, Zündkerzen etc., entfallen beim Elektroantrieb völlig. Elektromotoren besitzen viel weniger Bauteile und sind daher auch weniger wartungsanfällig und zuverlässiger im Betrieb. Sie sind die optimalen Antriebe für ein Kraftfahrzeug.

bei der Umwandlung in Strom durch die Brennstoffzelle bleibt nur noch ein Viertel des ursprünglich vorhandenen Stroms übrig. Der Energiebedarf des Wasserstoff-Fahrzeugs ist also viermal so hoch wie derjenige des Elektrofahrzeugs mit Batteriespeicher.

### Auf dem Weg zum Niedrigenergieauto

Ich beschäftige mich seit über 20 Jahren mit dem Thema Energiesparfahrzeuge und nachhaltige Fahrzeugantriebe und habe viele Konzepte und Antriebssysteme getestet. Heute fahre ich ein Fahrzeug, von dem ich denke, dass es eines der umweltfreundlichsten Kraftfahrzeuge ist, die je in Serie gebaut wurden. Es handelt sich um einen leichten Großserien-PKW, der bereits ab Werk als Elektrofahrzeug ausgeliefert wurde. Der Citroen AX gilt aber auch in der verbrennungsmotorischen Version als das sparsamste Großserien-Fahrzeug der 90er-Jahre.

Das elektrische Antriebskonzept stammt vom Anfang der 90er-Jahre. Damals haben sich die drei französischen Autohersteller zusammengesetzt und bei der Batteriefirma SAFT einen einheitlichen Batterieblock bestellt, der damals auf dem Gebiet der Elektrofahrzeuge in puncto Energiedichte einmalig war. Während die bis dahin (und auch heute noch) verbauten Blei-Batterien eine Energiedichte von ca. 30 Wattstunden pro Kilogramm Batteriegewicht hatten, lag diese bei der im Citroen AX électrique verbauten Nickel-Cadmium-Batterie bei etwa 50 Wh/kg. Das ergab in Verbindung mit dem relativ leichten Chassis ein viersitziges Elektrofahrzeug mit einem Leergewicht von nur 950 kg. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 91 km/h, die Reichweite liegt zwischen 80 und 100 km pro Ladung, die weiteste je von mir erreichte Strecke auf der Eco Tour de Ruhr

2003 betrug 130 km. Die Ladezeit von ganz leer bis ganz voll beträgt 4 Stunden an einer herkömmlichen Steckdose. Die Ladezeit wird durch die Maximalleistung einer Haushalts-Steckdose von ca. 3 kW begrenzt, es könnte auch schneller gehen. Mit der „Ladegeschwindigkeit“ eines Benzin-Tankschlauchs kann dies freilich nicht konkurrieren. Gehen wir von einer Durchflussgeschwindigkeit von 50 Litern Kraftstoff in 3 Minuten aus, so haben wir hier eine Energie-Übertragungsrate (Leistung) von 500 kWh in 3 Minuten oder 10 000 kWh pro Stunde bzw. 10 Megawatt. Das ist einerseits mehr als der Faktor 3000 gegenüber der 230-V-Haushaltssteckdose, unterstreicht andererseits aber auch die Sparsamkeit des elektrischen Antriebs.

Analog zu Niedrigenergiehäusern, die einen Grenzwert an Heizenergieverbrauch pro Quadratmeter Wohnfläche nicht überschreiten dürfen, möchte ich den neuen Begriff „Niedrigenergieauto“ prägen. Der Energieverbrauch eines effizienten Kraftfahrzeugs darf ein Äquivalent von 0,5 Liter Kraftstoff für das Auto und zusätzlich 0,3 Liter pro Sitzplatz nicht übersteigen. Ein Liter Benzin enthält 9 Kilowattstunden (kWh) Energie. Damit dürfte ein Einsitzer nicht mehr als 0,8 Liter Benzin oder 7 kWh Strom pro 100 km verbrauchen, um als Niedrigenergieauto eingestuft zu werden. Ein Zweisitzer darf noch 1,1 Liter oder 10 kWh verbrauchen, ein 5-Sitzer 2 Liter oder 18 Kilowattstunden.

Gegenwärtig bin ich dabei, ein solches Fahrzeug zu konzipieren, das noch alltagstauglicher und sparsamer sein soll als mein Citroen AX. Animiert durch das Konzept „Hypercar“ des US-amerikanischen Energiesparpapstes Amory Lovins (Co-Autor des Buchs „Faktor vier“, Droemer Knauer), habe ich die Annahmen auf

europäische Verhältnisse übertragen. Sein Vorschlag von 1990 sagt: Ein Hypercar ist leicht, hat eine sehr gute Aerodynamik und fährt elektrisch. Die Kriterien für mein Niedrigenergieauto sind: Platz für eine Familie (5 Sitze plus Gepäck), 120 km/h Höchstgeschwindigkeit, Elektroantrieb mit Stromgenerator für weitere Strecken (sogenannter serieller Hybrid), 100 km Reichweite rein elektrisch, bis zu 400 km pro Tag je nach Generatorleistung, durch Tausch des Generators können verschiedene Kraftstoffe genutzt werden. Das leere Fahrzeug darf bei hoher Crashesicherheit nur 500 kg wiegen. Über den Fortschritt des Projekts wird demnächst auf der neuen Website [www.niedrigenergieauto.de](http://www.niedrigenergieauto.de) berichtet werden.

Was aber können wir heute schon tun, wo noch keine Niedrigenergieautos in Großserie hergestellt werden? Besonders umweltfreundlich ist es selbstverständlich, mit Fahrrad, Bus und Bahn seine Wege zurückzulegen. Wer ein Auto braucht, sollte sich fragen, ob es ein eigenes Auto sein muss, oder ob es mit anderen Menschen geteilt werden kann. Man kann einen Spritsparkurs mitmachen, mit Energiesparreifen fahren, den Reifendruck erhöhen und die Geschwindigkeit senken.

Elektrofahrzeuge gibt es heute immerhin schon als Elektrofahrräder, Elektroroller, ein- und zweisitzige PKW und kleine Transporter. Eine Übersicht zu neuen und gebrauchten Fahrzeugen bietet die Internetseite [www.solarmobil.net](http://www.solarmobil.net). ♣

*Dipl.-Ing. Andreas Manthey ist Dozent an verschiedenen Hochschulen, Träger des Europäischen Solarpreises und mehrfacher Deutscher Solarmobilmeister. Er ist Vorstandsmitglied des Bundesverbands Solare Mobilität und leitet das Berliner Institut für innovative Energie- und Antriebstechnologien. Ein Porträt von ihm ist in Kurskontakte Ausgabe 142 ([www.kurskontakte.de](http://www.kurskontakte.de)) erschienen.*