

20. Besserer Transport

Modern vehicle technology can reduce climate change emissions without changing the look, feel or performance that owners have come to expect.

California Air Resources Board

Etwa ein Drittel unserer Energie wird für Transport verbraucht. Kann Technologie diesen Verbrauch reduzieren? In diesem Kapitel behandeln wir die Möglichkeiten, um folgende zwei Ziele zu erreichen: Die größtmögliche Reduktion des Verbrauches zu erzielen und fossile Treibstoffe aus dem Transportwesen zu eliminieren.

Fig.20.1: Der Ausgangspunkt: ein Luxus-Traktor. Der durchschnittliche englische Wagen verbraucht 8,5 l/100km, das sind 80 kWh pro 100km. Geht es besser?



Den Transport haben wir bereits in drei der Verbrauchs-Kapitel von Teil I behandelt: Kapitel 3 (Autos), Kapitel 5 (Flugzeuge) und Kapitel 15 (Straßen- und Seefracht). Es gilt, zwei Arten des Transports zu unterscheiden: Passagiertransport und Fracht. Unsere Einheit für Passagiertransport ist der Passagier-Kilometer (p-km). Wenn ein Auto eine Person 100 km weit trägt, leistet es 100 p-km Transport. Trägt es vier Personen dieselbe Strecke, leistet es 400 p-km. Analog ist unsere Einheit des Frachttransports der Tonnen-Kilometer (t-km). Wenn ein LKW 5t Ladung 100 km befördert, dann leistet er 500 t-km Frachttransport. Wir werden den Energieverbrauch des Passagiertransports in „kWh pro 100 p-km“ und den Verbrauch der Fracht in „kWh pro t-km“ messen. (Diese Messungen sind gerade anders herum als die in England gebräuchliche Angabe „miles per gallon“ (mpg): Während wir Fahrzeuge bevorzugen, die *vielen* mpg liefern, wollen wir für den Energieverbrauch *wenige* kWh pro 100 p-km.)

Wir wollen dieses Kapitel mit der Diskussion des Transportes an Land beginnen. Um zu verstehen, wie man dabei Energie sparen kann, müssen wir verstehen, wohin die Energie beim Transport an Land geht. Hier sind drei Schlüsselkonzepte wichtig, die in Anhang A ausführlicher beschrieben sind.

1. Im Kurzstreckenverkehr mit vielen Starts und Stopps geht die Energie vorrangig in das Beschleunigen des Fahrzeugs und seines Inhalts. Die Schlüsselstrategie zum Energiesparen in dieser Art des Transports ist daher, *wenig zu wiegen* und *weite Strecken zwischen den Stopps* zurückzulegen. Regeneratives Bremsen, das beim Verlangsamen Energie zurückgewinnt, kann zudem helfen. Allgemein hilft es, *langsamer* und *weniger* zu fahren.

2. Im Langstreckenverkehr bei konstanter Geschwindigkeit, mit Zug oder Automobil, verbraucht man die meiste Energie durch das Verwirbeln von Luft, denn Sie müssen das Fahrzeug ja nur einmal beschleunigen. Bei dieser Art des Verkehrs sind daher die Schlüsselstrategien zum Energiesparen, *langsamer zu fahren, weniger zu fahren und lange, dünne Fahrzeuge* zu verwenden.
3. In allen Arten der Fortbewegung gibt es eine Energie-Umwandlungs-Kette, die Energie aus einer Art von Treibstoff entnimmt und sie zum Anschieben des Fahrzeugs benutzt. Diese Energiekette hat unausweichlich Ineffizienzen. In einem normalen Benzinauto werden z.B. nur 25% der Energie zum Antrieb verwendet, etwa 75% gehen verloren und heizen nur Motor und Kühler. Eine letzte Strategie zur Verbrauchsreduktion ist also, diese Energie-Umwandlungs-Kette effizienter zu machen.

Diese Betrachtungen führen uns zu sechs Prinzipien für Fahrzeugdesign und Fahrzeugeinsatz, die die Energieeffizienz des Transports an Land verbessern: a) reduziere die Aufstandsfläche pro Person; b) reduziere das Fahrzeuggewicht pro Person; c) reise bei konstanter Geschwindigkeit und vermeide Bremsen; d) fahre langsamer; e) fahre weniger; f) mach die Energie-Umwandlungs-Kette effizienter. Wir werden jetzt eine Vielzahl von Anwendungen dieser Prinzipien diskutieren.

Wie man besser rollt

Eine oft zitierte Statistik sagt in etwa „nur ein Prozent der verbrauchten Energie geht in die Bewegung des Fahrers“ - was impliziert, dass wir sicherlich, wenn wir es nur klug genug anstellten, Autos 100 mal effizienter machen könnten? Die Antwort ist ja, fast, doch nur, wenn wir die oben genannten Prinzipien für Fahrzeugdesign und Fahrzeugeinsatz in *extremer* Weise anwenden.

Ein Vorbild extremen Fahrzeugdesigns ist das Eco-Auto, das eine kleine Aufstandsfläche und eine geringe Höhe ausweist und – sofern es um das Aufstellen neuer Rekorde geht – vorsichtig bei einer geringen und gleichmäßigen Geschwindigkeit gefahren wird. Das *Team Crocodile Eco-Auto* (Fig.20.2) braucht bei 24 km/h gerade mal 0,13 l/100km (1,3 kWh pro 100 km). Mit 50 kg Gewicht und weniger Höhe als ein Verkehrshütchen bietet es komfortabel Platz für einen jugendlichen Fahrer.

Hmmm. Ich denke, der Fahrer des City-Traktors aus Fig.20.1 würde eine Veränderung im „Look and Feel“ und in der Performance bemerken, wenn wir ihn in ein Eco-Auto setzen würden und ihn anweisen, seine Geschwindigkeit auf maximal 24 km/h zu beschränken. So gesehen ist es ein Märchen, dass Autos leicht 100mal energie-



Fig.20.2: Das Team Crocodile Eco-Auto verbraucht **1,3 kWh pro 100 km**. Foto mit freundlicher Genehmigung von Team Crocodile www.teamcrocodile.com



Fig.20.3: „Baby an Bord“ Diese Art des Transports hat Energiekosten von **1 kWh pro 100 Personen-km**.



Fig.20.4: Dieser 8-Waggon-Zug verbraucht bei seiner Höchstgeschwindigkeit von 161 km/h **1,6 kWh pro 100 Passagier-km**, wenn er voll ist.

effizienter sein könnten. Wir werden auf die Herausforderung, energieeffiziente Autos zu bauen, in Kürze zurückkommen. Doch lassen Sie mich zuerst noch andere Ansätze ansehen, die den Prinzipien des effizienteren Transports an Land genügen.

Fig.20.3 zeigt ein Mehrpersonenfahrzeug, das mindestens 25mal effizienter als das Standard-Auto ist: das Fahrrad. Die Performance des Fahrrads (in Energie pro Strecke) ist etwa dieselbe wie die des Eco-Autos. Seine Geschwindigkeit ist die gleiche, seine Masse geringer (weil der Mensch Tank und Motor ersetzt), und seine effektive Aufstandsfläche ist höher, weil der Radfahrer nicht so stromlinienförmig ist wie das Eco-Auto.

Fig.20.4 zeigt einen anderen möglichen Ersatz für das Benzinauto: ein Zug, dessen Energiekosten, wenn er voll besetzt ist, bei **1,6 kWh pro 100 Passagier-km** liegen. Im Gegensatz zu Eco-Auto und Radfahrer erreichen Züge ihre hervorragende Effizienz nicht durch geringe Geschwindigkeit und nicht durch geringes Fahrzeuggewicht pro Person. Züge machen ihre hohe Geschwindigkeit und ihr hohes Gewicht durch Anwendung des Prinzips kleiner Aufstandsfläche pro Person wieder wett. Wo ein Radfahrer oder ein Standard-Auto Aufstandsfläche von 0,8 m² bzw. 0,5 m² pro Person besitzen, bringt es ein voll besetzter Pendlerzug von Cambridge nach London auf eine Fläche von 0,02 m² pro Person.

Doch, oh weh, jetzt haben wir ein böses Thema angestochen – die Aussicht, ein Fahrzeug mit „all diesen schrecklichen Menschen“ zu teilen. Doch Schwamm drüber, und lassen Sie uns fragen: Um wie viel könnte man den Verbrauch reduzieren, wenn man von privaten Spritschluckern auf exzellent integrierte öffentliche Verkehrsmittel wechseln würde?



4.4 kWh per 100 p-km, if full



3-9 kWh per 100 seat-km, if full

Fig.20.5: Einige öffentliche Transportmittel und ihre Energie-Effizienz, im besten Fall. U-Bahnen, von außen und von innen. Zwei Hochgeschwindigkeitszüge. Der elektrische benötigt **3 kWh pro 100 Sitz-km**, der Diesel **9 kWh**. Oberleitungsbusse in San Francisco. Vancouver SeaBus. Foto von Latty.



7 kWh per 100 p-km, if full



21 kWh per 100 p-km, if full

Öffentliche Verkehrsmittel

Im besten Fall ist öffentlicher Transport weitaus energieeffizienter als der Individualverkehr. Ein **Diesel-Reisebus**, der 49 Passagiere bei 100 km/h mit 28 l/100km befördert, braucht **6 kWh pro 100 p-km** – 13mal besser als ein Einpersonenkraftwagen.

Die **Oberleitungsbusse** von Vancouver brauchen 270 kWh pro 100 Fahrzeug-km bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 15 km/h. Hat ein solcher Bus 40 Passagiere an Bord, kostet eine Fahrt mit ihm **7 kWh pro 100 p-km**. Der **SeaBus** in Vancouver braucht 83 kWh pro Fahrzeug-km bei 13,5 km/h. Er kann 400 Menschen befördern, also kostet

der Personentransport bei Vollbesetzung **21 kWh pro 100 p-km**. Die Londoner **U-Bahnen** fahren in Spitzenzeiten mit **4,4 kWh pro 100 p-km** – 18mal besser als Individualautos. Auch **Hochgeschwindigkeitszüge**, die zwei Prinzipien verletzen, da sie doppelt so schnell wie ein Auto fahren und eine Menge wiegen, sind viel effizienter: Wenn ein elektrisch betriebener Hochgeschwindigkeitszug voll besetzt ist, liegen seine Energiekosten bei **3 kWh pro 100 p-km** – das ist 27 mal geringer als beim Auto.

Aber wir sollten schon realistisch bleiben bei unseren Planungen. Einige Züge oder Busse sind nicht voll (Fig.20.6). Daher ist der mittlere Energieverbrauch der öffentlichen Transportmittel größer als das oben erwähnte Best-Case-Szenario. Wo liegen die mittleren Energiekosten der öffentlichen Transportsysteme und was ist eine realistische Abschätzung dessen, wie gut sie sein könnten?



32 kWh per 100 p-km



9 kWh per 100 p-km

Fig.20.7: Einige öffentliche Transportmittel und ihr mittlerer Energieverbrauch. Links: Rote Busse, Rechts: Croydon Tramlink. Foto von Stephen Parascandolo

Energieverbrauch (kWh pro 100 p-km)	
Auto	68
Bus	19
Eisenbahn	6
Luft	51
Schiff	57

Fig.20.6: (rechts) Einige Züge sind nicht voll. Drei Männer und ein Cello – die einzigen Reisenden in diesem Waggon des 10:30 Hochgeschwindigkeitszugs von Edinburgh nach Kings Cross.

Tabelle 20.8: (links) Gesamt-Transport-Effizienz nach Transportarten in Japan (1999)



Im Zeitraum 2006-7 lagen die gesamten Energiekosten der Londoner U-Bahnen einschließlich Beleuchtung, Aufzüge, Depots und Wartung bei **15 kWh pro 100p-km** – fünfmal besser als unser Vergleichs-Auto. Die Energiekosten der Londoner Busse in demselben Zeitraum waren **32 kWh pro 100p-km**. Natürlich sind Energiekosten nicht das einzig Ausschlaggebende. Passagiere wissen Geschwindigkeit zu schätzen: und die U-Bahnen liefern höhere Geschwindigkeiten (33 km/h im Mittel) als Busse (18 km/h). Die Manager haben die finanziellen Kosten im Blick: die Kosten für die Belegschaft, pro Passagier-km, sind bei U-Bahnen geringer als bei Bussen.

Die gesamte Energie (einschließlich Depot und Haltestellenbetrieb), die das Croydon Tramlink System (Fig.20.7) im Zeitraum 2006-7 verbrauchte, lag bei **9 kWh pro 100 p-km**, bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 25 km/h.

Wie gut könnte der öffentliche Transport sein? Vielleicht können wir einen groben Hinweis aus den Daten von Japan (Tabelle 20.8) erhalten. Bus mit **19 kWh pro 100p-km** und Bahn mit **6 kWh pro 100p-km** sehen vielversprechend aus. Die Bahn hat den netten Vorteil, dass sie unsere beiden Aufgaben löst – Reduktion des Energieverbrauchs und Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Busse haben offensichtliche Vorteile in Einfachheit und Flexibilität. Doch diese Flexibilität zu erhalten, wenn man Busse von fossilen Brennstoffen unabhängig machen will, das könnte eine Herausforderung sein.

Zusammenfassend scheinen öffentliche Verkehrsmittel (insbesondere elektrische Züge, Straßenbahnen und Busse) ein vielversprechender Weg für den Personentransport zu sein – besser im Sinne von Energie pro Passagier-km, vielleicht 5 oder 10 mal besser als Autos. Wenn Leute jedoch auf der Flexibilität des privaten Fahrzeugs bestehen, was sind dann unsere anderen Optionen?

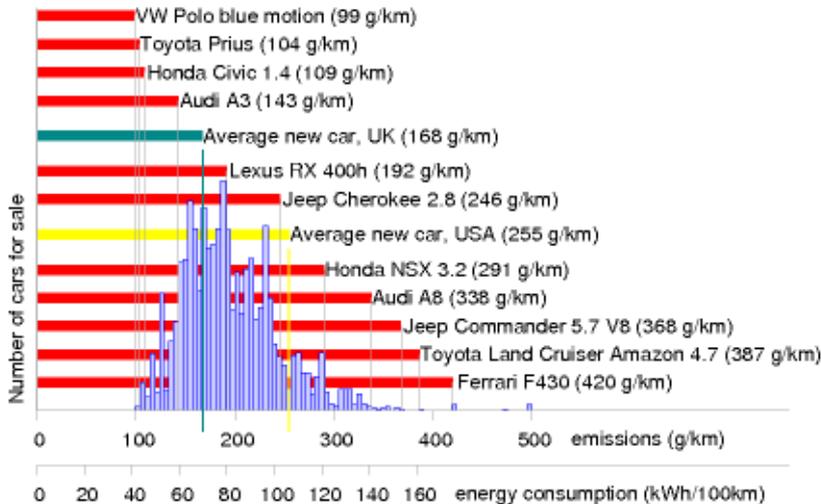


Fig.20.9: CO₂-Ausstoß, in g pro km, ausgewählter Autos, die in England verkauft werden. Die waagrechte Achse zeigt die Emissionsrate und die Höhe des blauen Histogramms zeigt die Verkäufe in 2006 für das entsprechende Modell. Quelle: www.newcarnet.co.uk. Die zweite waagrechte Achse zeigt den ungefähren Energieverbrauch, unter der Annahme, dass 240 g CO₂ etwa 1 kWh chemischer Energie entsprechen.

Privatfahrzeuge: Technologie, Vorschriften und Anreize

Der Energieverbrauch im Individualverkehr kann reduziert werden. Der weite Bereich der Energieeffizienz der angebotenen Autos beweist das. In ein und demselben Ausstellungsraum konnten Sie 2006 entweder einen Honda Civic 1.4, der etwa **44 kWh pro 100 km** verbraucht, oder einen Honda NSX 3.2, der **116 kWh pro 100 km** verbraucht (Fig. 20.9), besichtigen.



Fig.20.10: Besondere Parkplatz-Privilegien für Elektroautos in Ann Arbor, Michigan



Fig.20.11: Monsterautos sind groß genug, um die Sicht und die Sichtbarkeit von Fußgängern völlig abzudecken

Die Tatsache, dass Leute munter aus diesem breiten Angebot kaufen, beweist, dass wir zusätzlichen Ansporn und Gesetzgebung brauchen, um den geschätzten Konsumenten zu ermutigen, energie-effizientere Autos zu wählen. Es gibt verschiedene Arten, dem Konsumenten zu helfen, den Honda Civic dem Benzinverschwender NSX 3.2 vorzuziehen: Erhöhung der Treibstoffpreise; Anheben der Steuer auf Neuwagen im Verhältnis zum vorausgesagten Lebensverbrauch des Fahrzeugs; Anheben der Kraftfahrzeugsteuer auf Benzinverschwender; Parkplatz-Privilegien für wirtschaftliche Autos (Fig.20.10); oder die Kraftstoffrationierung. Alle diese Maßnahmen sind bei zumindest einigen Stimmberech-

tigten unpopulär. Vielleicht wäre es eine bessere gesetzgeberische Taktik, vernünftige Energieeffizienz zu erzwingen, statt weiter die freie Wahl zu erlauben; zum Beispiel könnten wir von einem bestimmten Datum an den Verkauf eines Autos einfach verbieten, dessen Energieverbrauch mehr als 80 kWh pro 100 km ist; und dann im Laufe der Zeit dieses Limit reduzieren auf 60 kWh pro 100 km, dann weiter auf 40 kWh pro 100 km, und darüber hinaus. Um den Verbrauchern mehr Wahlfreiheit zu lassen, könnten die Regulierungen auch die Autohersteller zwingen, den durchschnittlichen Energieverbrauch aller ihrer verkauften Autos zu reduzieren. Zusätzliche Gesetzgebung, die das Gewicht und die Aufstandsfläche von Fahrzeugen beschränkt, würde gleichzeitig den Treibstoffverbrauch senken und die Sicherheit anderer Verkehrsteilnehmer erhöhen (siehe Fig.20.11). Menschen machen heute modische Statements mit der Wahl ihres Autos. Mit strenger Effizienz-Gesetzgebung könnte es immer noch eine weitgehende Wahl nach Modeaspekten geben, nur wären alle Varianten zufällig auch energieeffizient. Sie könnten jede Farbe wählen, vorausgesetzt, sie wäre grün.

Solange wir noch darauf warten, dass sich Wähler und Politiker auf effiziente Autos einigen, welche weiteren Möglichkeiten bleiben uns?



Fig.20.12: Ein Kreisverkehr in Enschede, Niederlande



Fig.20.13: Einige holländische Fahrräder

Fahrräder

Mein Lieblingsvorschlag ist die Bereitstellung exzellenter Fahrradwege, flankiert mit geeigneter Gesetzgebung (niedrigere Geschwindigkeitsbeschränkung oder Unfallregelungen, die Radfahrer bevorzugen, zum Beispiel). Fig.20.12 zeigt einen Kreisverkehr in Enschede, Niederlande. Er besteht aus zwei Kreisen, der eine für die Autos liegt innerhalb des anderen für die Radfahrer, getrennt durch eine gute Autolänge. Die Vorfahrtsregeln sind dieselben wie in England, jedoch müssen die Autos beim Ausfahren aus dem inneren Kreis den umfahrenden Radfahrern Vorfahrt gewähren (wie gegenüber Fußgängern an einem Zebrastreifen). Wo es hervorragende Radwege gibt, werden die Leute sie auch benutzen, wie die Unmengen von Fahrrädern vor dem Bahnhof von Enschede beweisen (Fig.20.13).

Irgendwie erreichen jedoch englische Radwege den holländischen Standard noch nicht ganz (Fig.20.14).

In der französischen Stadt Lyon wurde ein privater Fahrradverleih, Vélo'v, populär, der 2005 gegründet wurde. Für die 470.000 Einwohner von Lyon stehen 2000 Fahrräder in etwa 175 Stationen innerhalb einer Stadtfläche von 50 km² bereit (Fig.20.15). Im Stadtzentrum ist man üblicherweise nie weiter als 400 m von einer Fahrradstation entfernt. Benutzer können sich für 10€ pro Jahr registrieren und dann Fahrräder frei mieten für alle Fahrten unter 30 Minuten. Für längere Fahrten muss extra bis zu 1 € pro Stunde bezahlt werden. Besucher können sich für 1€ eine Woche registrieren lassen.



Fig.20.14: Inzwischen, zurück in England.
Foto rechts von Mike Armstrong

Weitere Möglichkeiten der Gesetzgebung

Geschwindigkeitsbeschränkungen sind ein einfacher Knopf, den man drücken kann. In der Regel brauchen Autos, die langsamer fahren, weniger Energie (Anhang A). Mit der nötigen Übung können Autofahrer lernen, wie man ökonomischer fährt: Weniger Beschleunigen und Bremsen und immer im höchstmöglichen Gang zu fahren kann eine 20%ige Verringerung des Treibstoffverbrauchs bewirken.

Eine andere Möglichkeit der Verbrauchsreduktion ist das Vermeiden von Staus. Stop-and-Go Verkehr, Beschleunigen und wieder Bremsen, ist eine viel weniger effiziente Art des Fahrens als ruhig dahinzurollen. Mit laufendem Motor im Stau zu stehen, ist eine besonders ineffiziente Weise, Treibstoff zu verbrauchen.

Fig.20.16: (rechts) Bei so einem Stau ist man zu Fuß noch schneller

Fig.20.15: (unten) Eine Vélu'v Station in Lyon



Staus entstehen, wenn zu viele Autos auf der Straße sind. Also ist es eine einfache Möglichkeit, Staus zu vermeiden, wenn man die Reisenden in weniger Autos gruppiert. Ein bestechendes Argument für den Umstieg von Autos auf Busse ist die Berechnung der Straßenfläche, die in beiden Modi benötigt wird. Nehmen wir eine Fernstraße kurz vor Entstehung eines Staus, mit Richtgeschwindigkeit 100 km/h. Der Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen beträgt 77 m. Nehmen wir an, alle 80 m fahre ein Auto, jeweils mit 1,6 Personen besetzt. 40 Leute in einen Bus zu kondensieren würde dann 2 km Straße leerfegen!

Stau kann verringert werden, indem man gute Alternativen bietet (Radwege, öffentliche Transportmittel), und indem man die Straßenbenutzer zur Kasse bittet, wenn

sie zum Stau beitragen. In den Anmerkungen am Ende dieses Kapitels beschreibe ich eine faire und einfache Methode der Stau-Gebührenerhebung.

Die Verbesserung von Autos

Nehmen wir an, die alte Liebe der Welt zu den Autos kann nicht zerbrochen werden, welche Technologien können dann signifikante Energieeinsparungen bewirken? Einsparungen von 10% oder 20% sind einfach – wir diskutierten bereits einige Wege, dies zu erreichen, etwa Autos kleiner und leichter zu bauen. Eine andere Möglichkeit ist die Umstellung von Benzin auf Diesel. Dieselmotoren sind aufwändiger zu bauen, doch sind sie tendenziell sparsamer. Doch gibt es Technologien, die die Effizienz der Energiekette wirklich radikal verbessern können? (Erinnern Sie sich, dass im Standard-PKW 75% der Energie als Wärme über den Kühler in die Luft geblasen wird!) Und wie steht es mit der Vorgabe, fossile Treibstoffe los zu werden? In diesem Abschnitt sehen wir uns fünf Technologien an: Regeneratives Bremsen; Hybridautos; Elektroautos; Autos mit Wasserstoffantrieb und den Pressluftantrieb.

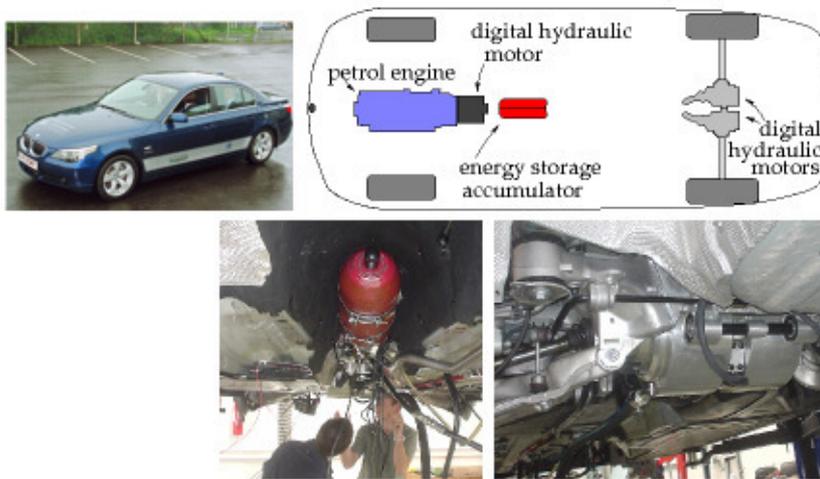


Fig.20.17: Ein BMW 520i umgerüstet von Artemis Intelligent Power auf digitale Hydraulik. Links unten: Ein 6l Speichertank (roter Kanister) kann etwa 0,05 kWh Energie in komprimiertem Stickstoff speichern. Rechts unten: Zwei 200kW Hydraulikmotoren, einer für jedes Hinterrad, die das Auto sowohl antreiben als auch abbremmen. Das Auto ist nach wie vor durch seinen 190 kW Benzinmotor angetrieben, doch dank der digitalen Hydraulik und der regenerativen Bremsen verbraucht es 30% weniger Treibstoff.

Regeneratives Bremsen

Es gibt vier Wege Energie einzufangen, wenn ein Fahrzeug abgebremst wird:

1. Ein elektrischer Generator, der mit den Rädern gekoppelt ist, kann eine Batterie oder einen Superkondensator aufladen.
2. Hydraulikpumpen, die mit den Rädern angetrieben werden, können Pressluft erzeugen, die in kleinen Kanistern gespeichert wird.
3. Energie kann in einem Schwungrad gespeichert werden
4. Bremsenergie kann als Gravitationsenergie gespeichert werden, indem man das Fahrzeug eine Rampe hochfährt, wenn man es abbremmen will. Diese gravitative Speichermöglichkeit ist recht unflexibel, weil immer eine Rampe an der richtigen Stelle bereitstehen muss. Diese Option ist hauptsächlich für Züge interessant, was etwa die Viktoria-Linie der Londoner U-Bahn zeigt, die Buckel für die Stationen hat. Jede Haltestelle liegt auf einem Hügel entlang der Strecke. Ankommende Züge werden automatisch durch den Hügel verlangsamt, abfahrende Züge werden beschleunigt, wenn sie das Gefälle des Hügels hinunterlaufen. Dieses Streckendesign erzeugt 5% Energieeinsparung und macht die Züge um 9% schneller.

Elektrisches regeneratives Bremsen (mit einer Batterie als Energiespeicher) rettet etwa 50% der Bewegungsenergie bei einem Bremsvorgang, was zu vielleicht 20% Energieeinsparung im Stadtverkehr führt.



Fig.20.18: (links) Ein regeneratives Bremssystem mit Schwungrad. Fotos mit freundlicher Genehmigung von Flybrid Systems

Fig.20.19: (unten) Toyota Prius – nach Jeremy Clarkson „eine sehr teure, sehr komplizierte, nicht besonders grüne, langsame, billig gefertigte und witzlose Art sich fortzubewegen“



Regenerative Bremssysteme mit Schwungrädern oder Hydraulik scheinen etwas besser zu arbeiten als batteriegestützte Systeme und retten etwa 70% der Bremsenergie. Fig.20.17 beschreibt ein Hybridauto mit einem Benzinmotor, der eine digital gesteuerte Hydraulik antreibt. Im Standard-Fahrzyklus verbraucht dieses Auto um 30% weniger Treibstoff als der Original-Benziner. Im Stadtverkehr ist sein Energieverbrauch halbiert von **131 kWh pro 100km** auf **62 kWh pro 100km**. (Dieser Erfolg geht halb auf das Konto der regenerativen Bremse und halb auf das der Hybridtechnologie.) Hydraulik und Schwungrad sind beides vielversprechende Ansätze für regeneratives Bremsen, da hier kleine Aggregate mit großen Energien umgehen können. Ein Schwungrad-System mit nur 24 kg Gewicht (Fig.20.18), konstruiert für einen Rennwagen, kann 400 kJ (0,1 kWh) speichern – genug Energie, um ein normales Auto auf ca. 100 km/h zu beschleunigen; und es kann 60 kW Leistung aufnehmen oder abgeben. Batterien in diesem Leistungsbereich wiegen um die 200 kg. Wenn nicht ohnehin schon Batterien in diesem Umfang an Bord sind, sollten daher auch elektrische regenerative Bremsen vielleicht besser Kondensatoren zum Speichern der Bremsenergie verwenden. Superkondensatoren haben ähnliche Energiespeicher- und Leistungsabgabe-Parameter wie Schwungräder.

Hybridautos

Hybridautos wie der Toyota Prius (Fig.20.19) haben effizientere Motoren und regenerative Bremsen, aber um ehrlich zu sein, stechen sie nicht wirklich aus der Menge hervor (Fig.20.9).

Die waagrechten Balken in Fig.20.9 zeigen einige Autos einschließlich zweier Hybridautos. Gegenüber dem durchschnittlichen Neuwagen in England mit 168 g CO₂ pro km, emittiert der Hybrid Prius 100 g CO₂, wie auch viele nicht-hybride Fahrzeuge – die VW Polo blue motion emittiert 99 g/km, und es gibt einen Smart mit 88 g/km.

Der Lexus RX 400h ist der zweite Hybrid, angepriesen mit dem Slogan: „LOW POLLUTION, ZERO GUILT.“²⁵ Doch seine CO₂-Emissionen liegen bei 192 g/km – schlechter als der englische Durchschnitt! Die Wettbewerbsaufsicht verfügte, dass diese Werbung gegen die Grundsätze Wahrheit, Vergleichbarkeit und Umweltaussagen verstößt. „Wir denken, ... der Leser soll hierbei zur Annahme geführt werden, dass dieses Auto keine oder wenig Umweltzerstörung verursachen würde, was nicht der Fall war, und

²⁵ Wörtlich: „Kaum Verschmutzung, keine Schuld“

dass dieses Auto wenig Emissionen im Vergleich zu anderen Autos hätte, was ebenfalls nicht der Fall war.“

In der Praxis scheinen Hybridtechnologien Einsparungen von 20% oder 30% zu erzielen. Deshalb scheinen für mich weder die Benzin/Elektro-Hybride noch die Benzin/Hydraulik-Hybride aus Fig.20.17 das Transport-Problem wirklich geknackt zu haben. Eine 30% Einsparung an fossilen Treibstoffen ist durchaus beeindruckend, aber nicht genug auf der Skala, die wir in diesem Buch betrachten. Unsere anfängliche Annahme war ja, dass wir aus den fossilen Treibstoffen aussteigen oder diese um wenigstens 90% reduzieren. Können wir dieses Ziel erreichen, ohne auf Fahrräder zurückzukehren?



Fig.20.20: Elektrofahrzeuge. V.l.n.r.: der G-Wiz; die verfallenen Überreste eines Sinclair C5; ein Citroën Berlingo; ein Elettrica

Elektroautos

Das Elektroauto REVA wurde im Juni 2001 in Bangalore vorgestellt und wird nach England unter der Marke G-Wiz exportiert. Sein Elektromotor hat eine Spitzenleistung von 13 kW und eine Dauerleistung von 4,8 kW. Der Motor unterstützt regeneratives Bremsen. Er wird über acht 6-Volt Blei-Säure-Akkus versorgt, die voll aufgeladen eine Reichweite von „bis zu 77 km“ ermöglichen. Eine Aufladung erfordert 9,7 kWh Elektrizität. Diese Zahlen ergeben Transportkosten von 13 kWh pro 100 km.

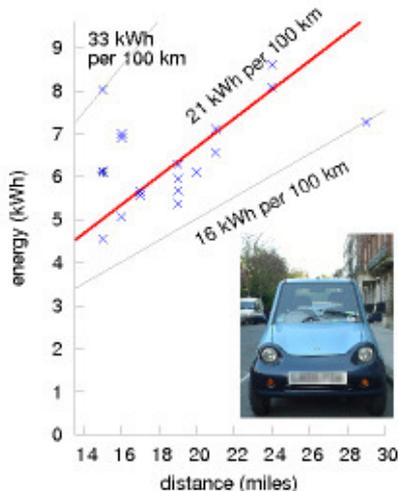


Fig.20.21: (links) benötigte Elektrizität zum Wiederaufladen eines G-Wiz versus gefahrene Strecke. Gemessen wurde an der Steckdose.

Fig.20.22: (unten) Tesla Roadster: 15 kWh pro 100 km. www.teslamotors.com.



Herstellerangaben beinhalten immer die beste mögliche Performance der Produkte. Was aber passiert im wirklichen Leben? Die reale Performance eines G-Wiz in London zeigt Fig.20.21. Im Laufe von 19 Ladezyklen lagen die mittleren Transportkosten dieses G-Wiz bei 21 kWh pro 100 km – etwa viermal besser als das Durchschnittsauto. Das beste Ergebnis war 16 kWh pro 100 km, das schlechteste 33 kWh pro 100 km. Oder wenn Sie sich für CO₂-Emission interessieren: 21 kWh pro 100 km ist äquivalent mit

105 g CO₂ pro km, wenn man annimmt, dass Elektrizität einen Fußabdruck von 500 g CO₂ pro kWh hinterlässt.

Nun, der G-Wiz sitzt auf dem einen Ende des Performance-Spektrums. Was wenn wir mehr fordern - mehr Beschleunigung, mehr Geschwindigkeit, mehr Reichweite? Am anderen Ende des Spektrums ist der Tesla Roadster. Der Tesla Roadster 2008 hat eine Reichweite von 345 km; sein Lithium-Ionen-Akku speichert 53 kWh und wiegt 450 kg (120 Wh/kg). Das Fahrzeug wiegt 1220 kg und die Maximalleistung des Motors liegt bei 185 kW. Welchen Energieverbrauch hat dieses Kraftpaket? Bemerkenswert, es ist besser als der G-Wiz: **15 kWh pro 100 km**. Ein Hinweis, dass 345 km Reichweite für die meisten Menschen und in den meisten Fällen genug sein sollte, ist die Tatsache, dass nur 8,3 % der Pendler mehr als 30 km zu ihren Arbeitsplätzen fahren.

Ich habe die Kennzahlen der Performance für Unmengen von Elektroautos nachgeschlagen – sie sind in den Anmerkungen am Ende des Kapitels aufgelistet – und sie scheinen konsistent zu sein mit folgender Zusammenfassung: Elektroautos können den Transport für etwa **15 kWh pro 100 km** gewährleisten. Das ist fünfmal besser als unser Vergleichsfahrzeug mit fossilem Treibstoff, und signifikant besser als jedes Hybridauto. Hurra! Um ökonomischen Transport zu erreichen, müssen wir uns nicht in öffentlichen Verkehrsmitteln zusammenpferchen – wir können weiter herumrasen und die Freuden und Freiheiten des individuellen Fahrens genießen, dank der Elektroautos.

Dieser Augenblick des Feierns ist ein guter Zeitpunkt, das große Zusammenfassungsdiagramm dieses Kapitels zu enthüllen, Fig.20.23, das die Energieerfordernisse des Passagiertransports zeigt für alle seine Formen, die wir behandelt hatten und für einige, die noch kommen werden.

OK, das Rennen ist gelaufen und ich habe zwei Gewinner verkündet – öffentliche Verkehrsmittel und Elektroautos. Doch kamen auch noch andere Optionen über die Ziellinie? Wir müssen uns noch die pressluftbetriebenen Autos und die Wasserstoffantriebstechnik vornehmen. Wenn eines dieser beiden Konzepte sich als besser als Elektroautos herausstellt, wird das aber das langfristige Bild nicht grundlegend verändern: Welche dieser drei Technologien wir auch verwirklichen, die Fahrzeuge wären aufzuladen über Energie aus einer „grünen“ Quelle.

Pressluftantrieb

Luftbetriebene Fahrzeuge sind keine neue Idee. Hunderte von Trambahnen, angetrieben durch Pressluft und Heißwasser, bevölkerten die Straßen von Nantes und Paris von 1879 bis 1911. Fig.20.24 zeigt eine deutsche pneumatische Lokomotive von 1958. Ich denke, im Hinblick auf Energieeffizienz ist die Presslufttechnologie zur Energiespeicherung nicht so geeignet wie elektrische Batterien. Das Problem liegt darin, dass das Komprimieren von Luft Wärme erzeugt, die wahrscheinlich nicht sinnvoll genutzt werden kann, und

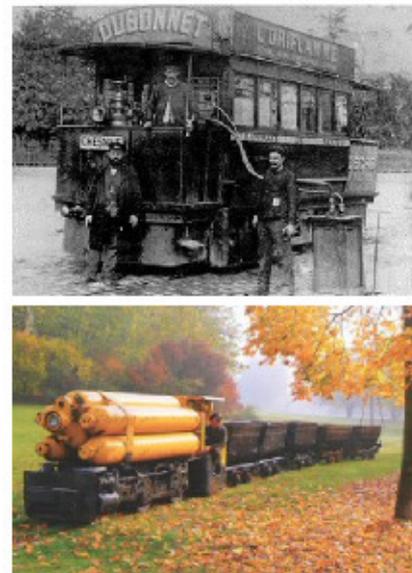


Fig.20.24: (oben) Eine Pressluft-Tram in Nantes nimmt Luft und Dampf auf. Der Betrieb der Trambahnen in Nantes brauchte 4,4 kg Kohle (36 kWh) pro Fahrzeug-km, oder **115 kWh pro 100p-km**, wenn die Tram voll war. [5qhvcb]
(unten) Eine Pressluft-Lokomotive, Gewicht 9,2t, Druck 175 Bar, Leistung 26 kW. Foto mit freundlicher Genehmigung von Rüdiger Fach, Rolf-Dieter Reichert und vom Frankfurter Feldbahnmuseum.

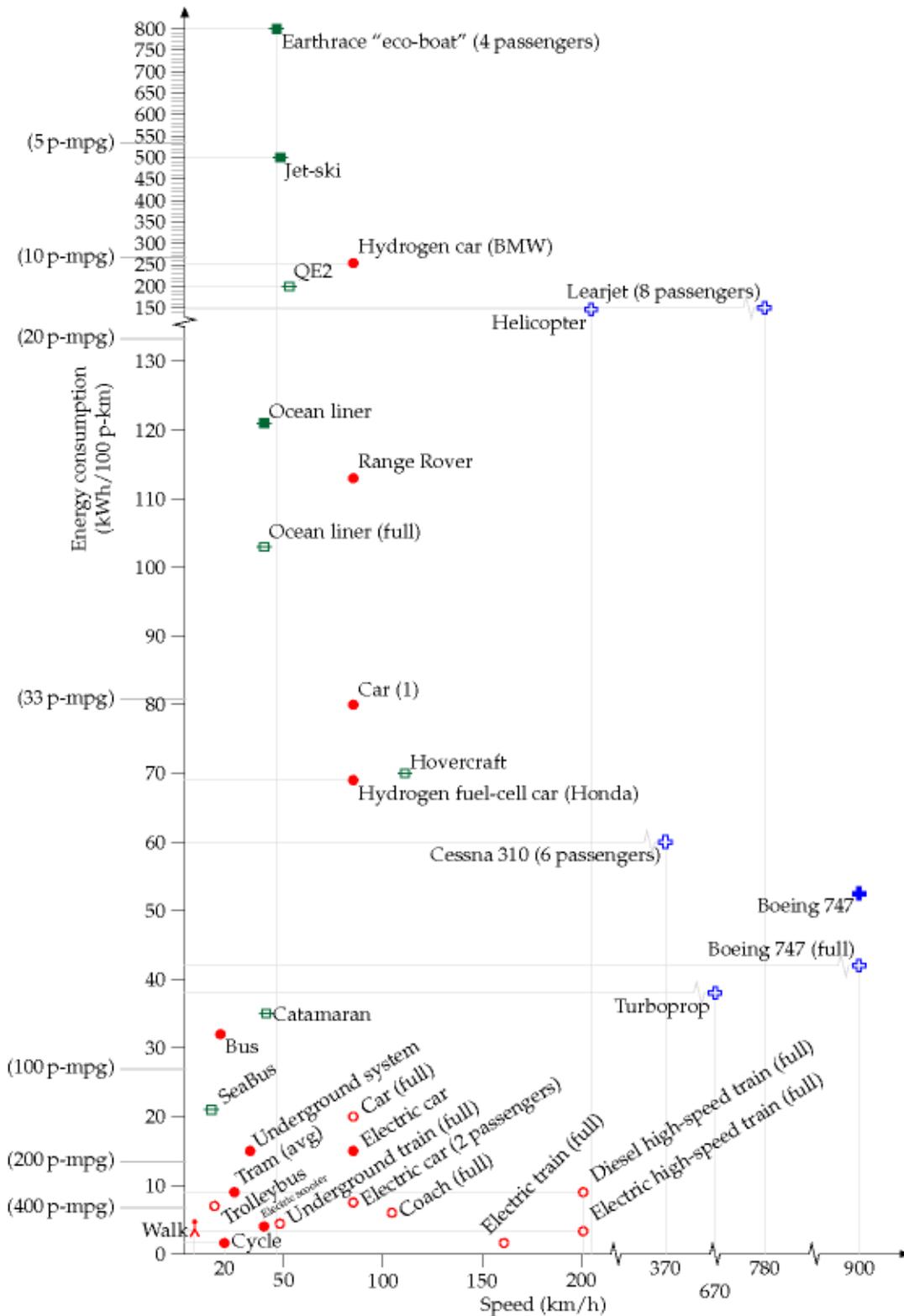


Fig. 20.23: Energieverbrauch verschiedener Formen des Passagiertransports. Die senkrechte Koordinate zeigt den Energieverbrauch in kWh pro 100p-km. Die horizontale Koordinate zeigt die Geschwindigkeit des Transportes. Das englische Durchschnittsauto mit einem Insassen „Car(1)“ verbraucht 33 mpg (8,5 l/100km). „Bus“ ist der Performance-Durchschnitt aller Londoner Busse. „Underground System“ steht für den Durchschnitt des Londoner U-Bahn-Netzes. Der „Catamaran“ ist ein dieselpetriebenes Boot. Links sind zum Vergleich noch die Treibstoff-Effizienzen in Meilen per (UK) Gallone pro Passagier (p-mpg). Hohle Punktmarkierungen stehen für Performance unter optimalen Praxisbedingungen, unter der Annahme, dass alle Sitzplätze belegt sind. Gefüllte Punktmarkierungen stehen für tatsächliche Performance unter typischen Bedingungen. Siehe auch Fig.15.8 (Energieverbrauch für Frachttransport).

das Expandieren der Luft mit Kühlung verbunden ist, die ebenfalls wohl nicht effizient genutzt werden kann. In anderer Hinsicht ist die Pressluft der Batterie wieder überlegen. So kann Luft tausende Male komprimiert werden, ohne sich zu verbrauchen! Eine interessante Erwähnung am Rande: Das erste Produkt, das die Firma Aircar verkaufte, war ein Elektroroller. [www.theaircar.com/acf]

Es gibt Gerüchte, dass Tata Motors in Indien luftbetriebene Autos herstellt, doch es ist schwer zu sagen, ob es ein Comeback der pressluftbetriebenen Fahrzeuge geben wird, weil niemand Spezifikationen aktueller Prototypen veröffentlicht. Hier ist die fundamentale Begrenzung: Die Energiedichte von Pressluftspeichern ist nur um die 11-28 Wh/kg, was etwa Blei-Säure-Akkus entspricht. (Siehe auch Fig.26.13 auf Seite 218 zu Einzelheiten anderer Speichertechniken) Also wird die Reichweite eines Pressluftautos niemals besser sein können als bei den ersten Elektroautos. Pressluftspeichersysteme haben drei Vorteile gegenüber Batterien: Längere Lebensdauer, billigere Herstellung und weniger lästige Chemikalien.

Wasserstoffbetriebene Autos – wie mit dem Zeppelin

Ich denke, Wasserstoff ist bloß ein Medien-Hype mit vielen Mitläufern. Ich wäre froh, wenn man mich widerlegen würde, aber ich kann nicht sehen, wie Wasserstoff uns bei der Lösung unserer Energieprobleme helfen sollte. Wasserstoff ist keine wundersame Energiequelle, sondern lediglich ein Energieträger, wie eine wiederaufladbare Batterie. Und er ist ein sehr ineffizienter Energieträger mit einem ganzen Bündel praktischer Einschränkungen.



Fig.20.25: Der Hummer H2H: Die grüne Revolution auf amerikanische Art. Foto mit freundlicher Genehmigung von General Motors



Fig.20.26: Der BMW Hydrogen 7. Energieverbrauch: 254 kWh pro 100 km. Foto von BMW.

Die „Wasserstoff-Ökonomie“ erhielt Unterstützung vom Nature Magazin in einem Artikel, der den Gouverneur von Kalifornien, Arnold Schwarzenegger, preist, wie er einen wasserstoffbetriebenen Hummer auffüllt (Fig.20.25). Der Nature-Artikel lobte Arnolds Vision von wasserstoffbetriebenen Autos, die „umweltverschmutzende Modelle“ ersetzen sollen, mit der Bemerkung: „Der Gouverneur ist ein Klima-Actionheld im wirklichen Leben.“ Doch die kritische Frage, die bei solchermaßen zur Schau gestelltem Wasserstoff-Heldentum unbedingt gestellt werden muss, lautet: „Woher kommt die Energie, die man braucht, um den Wasserstoff zu machen?“ Zudem kann die Konversion von Energie in und aus Wasserstoff nur ineffizient geschehen – zumindest mit heutiger Technologie.

Hierzu einige Zahlen:

- Im Rahmen des CUTE Projekts (Clean Urban Transport for Europe), das die Machbarkeit und Zuverlässigkeit von Brennstoffzellen-Bussen und Wasserstofftechnologie zeigen sollte, brauchte man zum Betanken der Wasserstoffbusse

zwischen 80% und 200% *mehr* Energie als für das Vergleichsfahrzeug, einen Diesel-Bus.

- Das Tanken des *Hydrogen 7*, dem Wasserstoffauto von BMW, erfordert **254 kWh pro 100 km** – *220% mehr* Energie als der europäische Durchschnittswagen.

Wäre unsere Aufgabe: „Bitte stoppt die Verwendung fossiler Brennstoffe im Transportwesen, auch unter der Annahme, dass eine *unbegrenzte* Menge grüner Energie umsonst verfügbar ist“, dann wäre natürlich eine energieverschwenderische Lösung wie Wasserstoff schon zu überlegen (obwohl Wasserstoff noch andere Probleme hat). Aber *grüne Elektrizität ist nicht umsonst*. In der Tat ist die Erzeugung grüner Elektrizität in dem Umfang unseres derzeitigen Verbrauchs schon eine echte Herausforderung. Das Problem fossiler Brennstoffe ist ein Energieproblem. Das Klimawandel-Problem ist ein Energieproblem. Wir müssen uns auf Lösungen konzentrieren, die weniger Energie verbrauchen, nicht „Lösungen“, die mehr verbrauchen. Ich kenne keine Form des Transports an Land dessen Energiebilanz schlechter ist als beim Wasserstoffauto. (Die einzigen schlechteren Transportformen sind Jet-Skis – mit etwa **500 kWh pro 100 km** – und ein mit Biodiesel betriebenes Schnellboot namens *Earthrace*, absurderweise als Eco-Boot bezeichnet, das **800 kWh pro 100 p-km** verbraucht.)



Fig.20.27: Das „eco-Boot“ Earthrace. Foto von David Castor



Fig.20.28: Honda FCX Clarity Limousine mit Wasserstoff-Brennstoffzelle, mit Jamie Lee Curtis als Maßstabsvergleich. Foto mit freundlicher Genehmigung von automobiles.honda.com

Wasserstoffbefürworter sagen „der BMW Hydrogen 7 ist nur ein früher Prototyp, er ist ein Luxusauto, ein Kraftpaket – die Technologie wird noch effizienter werden.“ Ja, das hoffe ich, denn sie hat noch eine Menge aufzuholen. Der Tesla Roadster (Fig.20.22) ist auch ein früher Prototyp, ein Luxusauto, ein Kraftpaket. Und er ist über zehnmals energieeffizienter als der Hydrogen 7! Gerne könne Sie Ihr Geld auf das Pferd Wasserstoff setzen wenn Sie wollen, und wenn es am Ende gewinnt, super! Doch es scheint wenig aussichtsreich, ein Pferd zu favorisieren, das bereits im Rennen so weit zurückliegt. Sehen Sie sich Fig.20.23 an – wenn ich die Spitze der senkrechten Achse nicht gestaucht hätte, hätte das Wasserstoffauto gar nicht mehr auf die Seite gepasst!

Zugegeben, das Honda Brennstoffzellen-Auto, der FCX Clarity, macht es besser – er fährt mit 69 kWh pro 100 km – doch ist meine Vorhersage: Wenn sich das „Zero-Emission“ Getöse gelegt hat, werden wir erkennen, dass Wasserstoffautos genauso viel Energie verbrauchen wie unsere durchschnittlichen Benzinautos heute.

Hier sind einige weitere Probleme mit dem Wasserstoff. Wasserstoff ist als Energiespeicher weniger geeignet als die meisten Flüssigtreibstoffe, wegen seines Volumens, egal ob als hochkomprimiertes Gas oder als Flüssigkeit (was eine Temperatur unter -253 °C erfordert). Selbst bei einem Druck von 700 bar (was ein stabiles Druckgefäß erfordert) ist seine Energiedichte (Energie pro Volumeneinheit) nur bei 22% derer von Benzin. Der Kryo-Tank des BMW Hydrogen 7 wiegt 120 kg und speichert 8 kg Wasserstoff. Außerdem leckt Wasserstoff nach und nach aus praktisch jedem Behälter.

Wenn Sie Ihr Wasserstoffauto am Bahnhof parken und eine Woche später zurückkommen, sollten Sie darauf vorbereitet sein, dass der meiste Wasserstoff verflüchtigt ist.

Einige Fragen zu Elektrofahrzeugen

Wir haben gezeigt, dass Elektroautos energieeffizienter sind als Autos mit fossilem Treibstoff. Doch sind sie auch besser zur Vermeidung von CO₂, wenn die Elektrizität weiterhin durch fossil befeuerte Kraftwerke erzeugt wird?

Das ist eine einfache Rechnung. Nehmen wir an, die Elektroautos verbrauchen 20 kWh(el) auf 100 km. (Ich denke, 15 kWh(el) auf 100 km ist perfekt machbar, doch lassen Sie uns in dieser Rechnung auf der skeptischen Seite bleiben.) Wenn die Elektrizität aus dem Netz einen CO₂-Fußabdruck von 500 g pro kWh(el) hinterlässt, dann liegen die effektiven CO₂-Emissionen dieses Fahrzeugs bei 100 g CO₂ pro km, das mit den besseren fossil betriebenen Autos vergleichbar ist (Fig.20.9). Ich folgere daraus, dass der Umstieg auf Elektroautos bereits jetzt eine gute Idee ist, bevor wir noch unsere Elektrizitätsversorgung auf grüne Energien umgestellt haben.

Elektroautos haben, wie Benzinautos, Kosten sowohl für die Herstellung als auch für den Betrieb. Elektroautos mögen im Betrieb weniger kosten, doch wenn die Batterien nicht sehr lange halten, sollte man dann nicht mehr Augenmerk auf die Herstellungskosten legen?

Ja, das ist ein guter Punkt. Das Transport-Diagramm zeigt nur die Betriebskosten. Wenn Elektroautos alle paar Jahre neue Batterien brauchen, dürften meine Zahlen Unterschätzungen sein. Die Batterien im Prius sollen 10 Jahre halten und der Austausch 3.500 € kosten. Wird jemand einen 10 Jahre alten Prius wollen und diese Kosten tragen? Man könnte vorhersagen, dass die Meisten Prius nach 10 Jahren verschrottet sein werden. Das ist sicherlich ein Einwand, der für alle Elektroautos mit Batterien gilt. Doch bin ich optimistisch, dass die Batterietechnologie verbessert werden wird, wenn wir auf Elektrofahrzeuge umsteigen.

Ich lebe in einer heißen Gegend. Wie könnte ich ein Elektroauto fahren? Ich benötige eine leistungsstarke Klimaanlage!

Für diesen Einwand gibt es eine elegante Erwiderung: Montieren Sie 4 m² Photovoltaik-Module in den himmelwärts gerichteten Oberflächen des Autos. Wenn die Klimaanlage benötigt wird, scheint sicherlich die Sonne. Module mit 20% Effizienz erzeugen bis zu 800W, die zum Betrieb der Klimaanlage ausreichen. Die Module könnten auch zum Wiederaufladen des Autos dienen, wenn es geparkt ist. Solarbetriebene Autokühlung gab es bei Mazda schon 1993, die Solarzellen waren im gläsernen Sonnendach integriert.

Ich lebe in einer kalten Gegend. Wie könnte ich ein Elektroauto fahren? Ich benötige leistungsstarke Innenraumheizung!

Der Motor eines Elektrofahrzeugs verbraucht im Betrieb im Mittel etwas um die 10 kW mit einer Effizienz von 90-90%. Einiges der verlorenen Leistung, die anderen 5-10%, verteilen sich als Wärme im Motor. Vielleicht könnten Elektroautos für kalte Gegenden sorgfältig so designed werden, dass die Abwärme des Motors, die um die 250 oder 500W betragen mag, vom Motor in den Innenraum geleitet werden kann. So viel Leistung könnte gut die Scheiben enteisen oder den Fahrer wärmen.

Sind Lithium-Ionen-Batterien sicher bei einem Unfall?

Einige Lithium-Ionen-Batterien sind unsicher wenn sie kurzgeschlossen oder überhitzt werden, doch die Batterie-Hersteller produzieren bereits sicherere Batterien etwa aus Lithium-Phosphat. Es gibt ein lustiges Video dazu auf www.valence.com.

Gibt es genug Lithium für all die Batterien einer großen Elektroautoflotte?

Die Weltreserven an Lithium in Erzgruben werden auf 9,5 Millionen Tonnen geschätzt (Seite 196). Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht zu 3% aus Lithium. Nehmen wir an, jedes Fahrzeug hätte eine 200 kg schwere Batterie, dann wären das 6 g Lithium pro Fahrzeug. Die Lithiumreserven würden also ausreichen, um Batterien für 1,6 Milliarden Fahrzeuge herzustellen. Das ist mehr als die Anzahl der Autos auf der Welt (etwa 1 Milliarde) – aber nicht sehr viel mehr, also mag die Menge des Lithium schon eine Rolle spielen, besonders wenn wir in Betracht ziehen, dass es widerstreitende Ambitionen aus der nuklearen Fusionsreakorteknik gibt (Kapitel 24), die Lithium in ihren Reaktoren verwenden will. Es gibt aber viele tausendmal mehr Lithium im Meerwasser, daher werden die Ozeane vielleicht einen brauchbaren Zusatzbeitrag liefern. Lithiumspezialist R. Keith Evans sagt: „Bedenken wegen der Lithium-Verfügbarkeit für Batterien von Hybrid- oder Elektroautos oder andere vorhersehbare Anwendungen sind unbegründet.“ Und überdies werden andere, lithiumfreie Batterietechnologien erforscht, etwa Zink-Luft-Akkus [www.revolttechnology.com]. Ich denke, das Elektroauto klappt!

Die Zukunft des Fliegens?

Der Superjumbo A380 wird ein „höchst treibstoff-effizientes Flugzeug“ genannt. In der Tat verbrennt er 12% weniger Treibstoff pro Passagier als eine 747.



Fig.20.29: (links) Airbus A380.

Fig.20.30: (unten) TSS Rijndam.



Boeing vermeldete einen ähnlichen Durchbruch: Ihr neuer 747-8 Intercontinental, gerühmt für seine planetenrettenden Eigenschaften, ist (nach Angaben von Boeing) auch nur 15% treibstoff-effizienter als eine 747-400.

Diese langsame Rate des Fortschritts (im Vergleich zu Autos, wo technologische Veränderungen zweifach oder sogar zehnfach verbesserte Effizienz liefern) wird detailliert in Anhang C beschrieben. Flugzeuge sind nahe an ihrem fundamentalen Limit, das die Gesetz der Physik vorgeben. Jedes Flugzeug, unabhängig von seiner Größe, muss notgedrungen eine Energie von etwa 0,4 kWh pro Tonne und km aufwenden, um oben und in Bewegung zu bleiben. Flugzeuge sind bereits fantastisch optimiert und es besteht keine Aussicht auf weitere Verbesserungen in ihrer Effizienz.

Eine Zeitlang dachte ich, dass ein gangbarer Weg zur Lösung des Langstrecken-Transportproblems die Rückkehr zum Status vor den Flugzeugen wäre, zu den

Ozeanschiffen. Dann sah ich mir die Zahlen an. Die traurige Wahrheit ist, dass Ozeanschiffe mehr Energie pro Passagier verbrauchen als Jumbos. Die QE2 verbraucht viermal so viel Energie pro Passagier wie ein Jumbo. OK, das ist ein Luxussschiff, können wir das mit langsameren Touristen-Linienschiffen verbessern? Von 1952 bis 1968 waren ein ökonomischer Weg der Atlantiküberquerung die „Economy Twins“, zwei holländische Linienschiffe, die Maasdam und die Rijndam. Sie fuhren mit 16,5 Knoten (30,5 km/h) und die Überfahrt dauerte 8 Tage. Ihr Energieverbrauch, voll besetzt mit 893 Passagieren, lag bei 103 kWh pro 100p-km. Bei einer typischen Auslastung von 85% sind das **121 kWh pro 100p-km** – mehr als das Doppelte eines Jumbo Jets. Um fair zu den Schiffen zu bleiben: Sie liefern nicht nur Transport: Sie heizen auch die Raumluft für Passagiere und Crew, liefern heißes Wasser, Licht und Unterhaltung für einige Tage; doch die Energie, die man zu Hause spart, weil man einige Tage an Bord ist, ist winzig gegen den Energieverbrauch des Schiffes, der im Fall der QE2 um die 3000 kWh pro Tag pro Passagier beträgt.

Leider werden die Schiffe wohl nie die Flugzeuge auf der Langstrecke schlagen können, was Energieverbrauch betrifft. Wenn man dennoch die Langstreckenreisen unabhängig von fossilen Brennstoffen machen will, sind vielleicht atombetriebene Schiffe eine interessante Option (Fig.20.31 und 20.32).

Was ist mit dem Frachttransport?

Die internationale Schifffahrt ist ein überraschend effizienter Verbraucher fossiler Brennstoffe; es ist also viel wichtiger, beim Straßentransport von fossilen Brennstoffen auszusteigen als bei der Schifffahrt. Doch sind fossile Brennstoffe eine begrenzte Ressource und deshalb müssen auch Schiffe möglicherweise irgendwann von etwas anderem angetrieben werden. Biotreibstoffe *könnten* das übernehmen. Eine andere Option ist Atomkraft. Das erste atomgetriebene Schiff für Fracht- und Personentransport war die NS Savannah (Fig.20.31), die 1962 als Teil der von Präsident Dwight D. Eisenhowers unterstützten „Atom for peace“-Initiative vom Stapel lief. Angetrieben von einem 74 MW Atomreaktor und einem 15 MW Motor erreichte die Savannah eine Reisegeschwindigkeit von 21 Knoten (39 km/h) und konnte 60 Passagiere und 14.000 t Ladung aufnehmen. Das ist eine Transport-Effizienz für Ladung von 0,14 kWh pro t-km. Sie konnte 500.000 km ohne Nachtanken fahren. Gegenwärtig gibt es viele atombetriebene Schiffe, sowohl im militärischen als auch im zivilen Bereich. Russland hat z.B. zehn nuklearbetriebene Eisbrecher, von denen noch sieben aktiv sind. Fig.20.32 zeigt den nuklearen Eisbrecher Yamal, der zwei 171 MW Reaktoren und Motoren mit 55 MW Leistung beherbergt.



Fig.20.31: NS Savannah, das erste kommerzielle nuklearbetriebene Frachtschiff bei einer Durchfahrt unter der Golden Gate Bridge 1962.



Fig.20.32: Der nuklearbetriebene Eisbrecher Yamal fährt 100 Touristen zum Nordpol, 2001. Foto von Wofratz.

„Hey, Sie haben die magnetische Schwebetechnik noch nicht erwähnt“

Die deutsche Firma Transrapid, die die Magnetschwebebahn für Shanghai, China (Fig.20.33), gebaut hat, sagt: „Das Transrapid Superspeed Magnetschwebesystem ist unerreicht in Punkto Lärmemission, Energieverbrauch und Flächenverbrauch. Das innovative kontaktlose Transportsystem garantiert Mobilität, ohne dass die Umwelt auf der Strecke bleibt.“

Magnetschwebetechnik ist einer der vielen Ansätze, die groß herausgestellt werden wenn die Leute Energiethemen diskutieren. Im Hinblick auf den Energieverbrauch ist der Vergleich mit anderen Hochgeschwindigkeitszügen in Wirklichkeit nicht so gravierend, wie es der Hype glauben machen will. Die Transrapid-Homepage vergleicht den Transrapid mit dem ICE, einem elektrischen Hochgeschwindigkeitszug:

Schnellzüge verglichen bei 200 km/h	
Transrapid	2,2 kWh pro 100 Sitz-km
ICE	2,9 kWh pro 100 Sitz-km

Die wesentlichen Ursachen, weshalb Magnetbahnen etwas besser sind als der ICE sind: Der magnetische Antriebsmotor hat einen hohen Wirkungsgrad; der Zug selbst hat weniger Masse, weil der Großteil des Antriebssystems in den Schienen liegt anstatt im Zug; und es passen mehr Passagiere in den Zug, weil der Platz nicht für Motoren benötigt wird. Oh und vielleicht, weil die Daten von der Magnetbahn-Herstellerfirma kommen und so ausgewählt sind, dass die Magnetbahn besser herauskommt!

Fig.20.34 (rechts) Neun von zehn Fahrzeugen in London sind G-Wizes (und 95% aller Statistiken sind gefälscht)



Fig.20.33: (unten) eine Magnetschwebebahn am Flughafen von Pudong, Shanghai. „Fahren ohne Räder, Fliegen ohne Flügel.“ Foto von Alex Needharn.



Leute, die den Transrapid in Shanghai gesehen haben, erzählten mir zudem, dass er bei Höchstgeschwindigkeit „etwa so leise wie ein Düsenflugzeug“ sei.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

135 Eine oft zitierte Statistik sagt in etwa „nur ein Prozent der verbrauchten Energie geht in die Bewegung des Fahrers“ 119 A widely quoted statistic says “Only 1% of fuel energy in a car goes into moving the driver.” In fact the percentage in this myth varies in size as it commutes around the urban community. Some people say “5% of

the energy goes into moving the driver.” Others say “A mere *three tenths of 1 percent* of fuel energy goes into moving the driver.” [4qgg8q] My take, by the way, isthat none of these statistics is correct or helpful.

- 136 **Die Performance des Fahrrads ist etwa dieselbe wie die des Eco-Autos.** – The bicycle’s performance is about the same as the eco-car’s. Cycling on a single-person bike costs about 1.6 kWh per 100 km, assuming a speed of 20 km/h. For details and references, see Chapter A, p262.
- 160 **Fig.20.4: Dieser 8-Waggon-Zug** The 8-carriage stopping train fromCambridge to London (figure 20.4) weighs 275 tonnes, and can carry 584 passengers seated. Its maximum speed is 100mph (161 km/h), and the power output is 1.5MW. If all the seats are occupied, this train at top speed consumes at most **1.6 kWh per 100 passenger-km**.
- 137 **Die Londoner U-Bahnen** 120 London Underground. A Victoria-line train consists of four 30.5-ton and four 20.5-ton cars (the former carrying the motors). Laden, an average train weighs 228 tons. The maximum speed is 45 mile/h. The average speed is 31mph. A train with most seats occupied carries about 350 passengers; crush-loaded, the train takes about 620. The energy consumption at peak times is about **4.4 kWh per 100 passenger-km** (Catling, 1966).
- 137 **Hochgeschwindigkeitszüge**, 121 High-speed train. A diesel-powered intercity 125 train (on the right in figure 20.5) weighs 410 tons. When travelling at 125mph, the power delivered “at the rail” is 2.6MW. The number of passengers in a full train is about 500. The average fuel consumption is about 0.84 litres of diesel per 100 seat-km [5o5x5m], which is a transport cost of about **9 kWh per 100 seat-km**. The Class 91 electric train (on the left in figure 20.5) travels at 140mph (225 km/h) and uses 4.5MW. According to Roger Kemp, this train’s average energy consumption is **3 kWh per 100 seat-km** [5o5x5m]. The government document [5fbeg9] says that east-coast mainline and west-coast mainline trains both consume about 15 kWh per km (whole train). The number of seats in each train is 526 or 470 respectively. So that’s **2.9–3.2 kWh per 100 seat-km**.
- 137 **Im Zeitraum 2006-7 lagen die gesamten Energiekosten** – the total energy cost of all London’s underground trains, was 15 kWh per 100 p-km. . . . The energy cost of all London buses was 32 kWh per 100 pkm. Source: [679rpc]. Source for train speeds and bus speeds: Ridley and Catling (1982).
- 137 **das Croydon Tramlink System** – Croydon Tramlink. www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/TfL-environment-report-2007.pdf, www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-Travel-Report-2007-final.pdf, www.croydon-tramlink.co.uk.
- 139 **die Bereitstellung exzellenter Fahrradwege** 123 . . . provision of excellent cycle facilities . . . The UK street design guide [www.manualforstreets.org.uk] encourages designing streets to make 20 miles per hour the natural speed. See also Franklin (2007).
- 141 **eine faire und einfache Methode der Stau-Gebührenerhebung** 124 A fair and simple method for handling congestion-charging. I learnt a brilliant way to automate congestion-charging from Stephen Salter. A simple daily congestion charge, as levied in London, sends only a crude signal to drivers; once a car-owner has decided to pay the day’s charge and drive into a congestion zone, he has no incentive to drive *little* in the zone. Nor is he rewarded with any rebate if he carefully chooses routes in the zone that are not congested. Instead of having a centralized authority

that decides in advance when and where the congestion-charge zones are, with expensive and intrusive monitoring and recording of vehicle movements into and within all those zones, Salter has a simpler, decentralized, anonymous method of charging drivers for driving in heavy, slow traffic, wherever and whenever it actually exists. The system would operate nationwide. Here's how it works. We want a device that answers the question "how congested is the traffic I am driving in?" A good measure of congestion is "how many other active vehicles are close to mine?" In fast-moving traffic, the spacing between vehicles is larger than slow-moving traffic. Traffic that's trundling in tedious queues is the most densely packed. The number of nearby vehicles that are active can be sensed anonymously by fitting in every vehicle a radio transmitter/receiver (like a very cheap mobile phone) that transmits little radio-bleeps at a steady rate whenever the engine is running, and that counts the number of bleeps it hears from other vehicles. The congestion charge would be proportional to the number of bleeps received; this charge could be paid at refuelling stations whenever the vehicle is refuelled. The radio transmitter/receiver would replace the current UK road tax disc.

- 142 **Schwungräder oder Hydraulik retten etwa 70% der Bremsenergie** 126 hydraulics and flywheels salvage at least 70% of the braking energy. Compressed air is used for regenerative braking in trucks; eaton.com say "hydraulic launch assist" captures 70% of the kinetic energy. [5cp27j] The flywheel system of flybridsystems.com also captures 70% of the kinetic energy. www.flybridsystems.com/F1System.html Electric regenerative braking salvages 50%. Source: E4tech (2007).
- 142 **Batterien in diesem Leistungsbereich wiegen um die 200 kg.** – Electric batteries capable of delivering 60 kW would weigh about 200 kg. Good lithium-ion batteries have a specific power of 300W/kg (Horie et al., 1997; Mindl, 2003).
- 142 **durchschnittlichen Neuwagen in England mit 168 g CO₂ pro km** – the average new car in the UK emits 168 g CO₂ per km. This is the figure for the year 2006 (King, 2008). The average emissions of a new passenger vehicle in the USA were 255 g per km (King, 2008).
- 142 **Hybridautos wie der Toyota Prius (Fig.20.19) haben effizientere Motoren** – The Toyota Prius has a more-efficient engine. The Prius's petrol engine uses the Atkinson cycle, in contrast to the conventional Otto cycle. By cunningly mixing electric power and petrol power as the driver's demands change, the Prius gets by with a smaller engine than is normal in a car of its weight, and converts petrol to work more efficiently than a conventional petrol engine.
- 143 **In der Praxis scheinen Hybridtechnologien Einsparungen von 20% oder 30% zu erzielen** – Hybrid technologies give fuel savings of 20% or 30%. For example, from Hitachi's research report describing hybrid trains (Kaneko et al., 2004): highefficiency power generation and regenerative braking are "expected to give fuel savings of approximately 20% compared with conventional diesel-powered trains."
- 144 **Tatsache, dass nur 8,3 % der Pendler mehr als 30 km zu ihren Arbeitsplätzen fahren** 127 Only 8.3% of commuters travel over 30 km to their workplace. Source: Eddington (2006). The dependence of the range of an electric car on the size of its battery is discussed in Chapter A (p261).
- 144 **Kennzahlen der Performance für Unmengen von Elektroautos** – Lots of electric vehicles. They are all listed below, in no particular order. Performance figures are mainly from the manufacturers. As we saw on p127, real-life performance doesn't always match manufacturers' claims.

Th!nk Electric cars from Norway. The five-door Th!nk Ox has a range of 200 km. Its batteries weigh 350 kg, and the car weighs 1500 kg in total. Its energy consumption is approximately **20 kWh per 100 km**. www.think.no Electric Smart Car "The electric version is powered by a 40 bhp motor, can go up to 70 miles, and has a top speed of 70mph. Recharging is done through a standard electrical power point and costs about £1.20, producing the equivalent of 60 g/km of carbon dioxide emissions at the power station. [cf. the equivalent petrol-powered Smart: 116 g/km.] A full recharge takes about eight hours, but the battery can be topped up from 80%-drained to 80%-charged in about three-and-a-half hours." [www.whatcar.com/newsarticle.aspx?NA=226488]



Fig.20.37: Th!nk Ox. Foto von www.think.no

Berlingo Electrique 500E, an urban delivery van (figure 20.20), has 27 nicad batteries and a 28 kW motor. It can transport a payload of 500 kg. Top speed: 100 km/h; range: 100 km. **25 kWh per 100 km**. (Estimate kindly supplied by a Berlingo owner.) [4wm2w4]



Fig.20.38: Der i MiEV von Mitsubishi Motors Corp. Er hat einen 47 kW Motor, wiegt 1080 kg und läuft 130 km/h Spitze.

i MiEV This electric car is projected to have a range of 160 km with a 16 kWh battery pack. That's **10 kWh per 100 km** – better than the G-Wiz – and whereas it's hard to fit two adult Europeans in a G-Wiz, the Mitsubishi prototype has four doors and four full-size seats (figure 20.38). [658ode]



Fig.20.39: Lightning: **11 kWh pro 100 km**. Foto von www.lightningcarcompany.co.uk

EV1 The two-seater General Motors EV1 had a range of 120 to 240 km per charge, with nickel-metal hydride batteries holding 26.4 kWh. That's an energy consumption of between **11 and 22 kWh per 100 km**.

Lightning (figure 20.39) – has four 120 kW brushless motors, one on each wheel, regenerative braking, and fast-charging Nanosafe lithium titanate batteries. A capacity of 36 kWh gives a range of 200miles (320 km). That's **11 kWh per 100 km**.



Fig.20.40: Der Aptera. **6 kWh auf 100km**. Foto von www.aptera.com

Aptera This fantastic slippery fish is a two-seater vehicle, said to have an energy cost of **6 kWh per 100 km**. It has a drag coefficient of 0.11 (figure 20.40). Electric and hybrid models are being developed.

Loremo Like the Aptera, the Loremo (figure 20.41) has a small frontal area and small drag coefficient (0.2) and it's going to be available in both fossil-fuel and electric versions. It has two adult seats



Fig.20.41: Der Loremo. **6 kWh auf 100 km**. Foto von evolution.loremo.com

and two rear-facing kiddie seats. The Loremo EV will have lithium ion batteries and is predicted to have an energy cost of **6 kWh per 100 km**, a top speed of 170 km/h, and a range of 153 km. It weighs 600 kg.

eBox The eBox has a lithium-ion battery with a capacity of 35 kWh and a weight of 280 kg; and a range of 140–180 miles. Its motor has a peak power of 120 kW and can produce a sustained power of 50 kW. Energy consumption: **12 kWh per 100 km**.

Ze-0 A five-seat, five-door car. Maximum speed: 50mph. Range: 50miles. Weight, including batteries: 1350 kg. Lead acid batteries with capacity of 18 kWh. Motor: 15 kW. **22.4 kWh per 100 km**.

e500 An Italian Fiat-like car, with two doors and 4 seats. Maximum speed: 60mph. Range in city driving: 75 miles. Battery: lithium-ion polymer.

MyCar The MyCar is an Italian-designed two-seater. Maximum speed: 40mph. Maximum range: 60 miles. Lead-acid battery.

Mega City A two-seater car with a maximum continuous power of 4 kW and maximum speed of 40mph: **11.5 kWh per 100 km**. Weight unladen (including batteries) – 725 kg. The lead batteries have a capacity of 10 kWh.

Xebra Is claimed to have a 40 km range from a 4.75 kWh charge. **12 kWh per 100 km**. Maximum speed 65 km/h. Lead-acid batteries.

TREV The Two-Seater Renewable Energy Vehicle (TREV) is a prototype developed by the University of South Australia (figure 20.42). This three-wheeler has a range of 150 km, a top speed of 120 km/h, a mass of 300 kg, and lithium-ion polymer batteries weighing 45 kg. During a real 3000 km trip, the energy consumption was **6.2 kWh per 100 km**.
Venturi Fetish Has a 28 kWh battery, weighing 248 kg. The car weighs 1000 kg. Range 160–250 km. That's **11–17 kWh per 100 km**.
www.venturifetish.fr/fetish.html



Fig.20.42: Der TREV. **6 kWh pro 100 km**. Foto von www.unisa.edu.au

Toyota RAV4 EV This vehicle – an all-electric mini-SUV – was sold by Toyota between 1997 and 2003 (figure 20.43). The RAV4 EV has 24 12-volt 95Ah NiMH batteries capable of storing 27.4 kWh of energy; and a range of 130 to 190 km. So that's an energy consumption of **14–21 kWh per 100 km**. The RAV4 EV was popular with Jersey Police force.



Fig.20.43: Toyota RAV4 EV. Foto von Kenneth Adelman, www.solarwarrior.com

Phoenix SUT – a five-seat “sport utility truck” made in California – has a range of “up to 130miles” from a 35 kWh lithium-ion battery pack. (That's **17 kWh per 100 km**.) The batteries can be recharged from a special outlet in 10 minutes.
www.gizmag.com/go/7446/

Modec delivery vehicle Modec carries two tons a distance of 100 miles. Kerb weight 3000 kg. www.modec.co.uk

Smith Ampere Smaller delivery van, 24 kWh lithium ion batteries. Range “over 100 miles.” www.smithelectricvehicles.com

Electric minibus From www.smithelectricvehicles.com: 40 kWh lithium ion battery pack. 90 kW motor with regenerative brakes. Range “up to 100 miles.” 15 seats. Vehicle kerb weight 3026 kg. Payload 1224 kg. That’s a vehicle-performance of at best **25 kWh per 100 km**. If the vehicle is fully occupied, it could deliver transportation at an impressive cost of **2 kWh per 100 p-km**.

Electric coach The Thunder Sky bus has a range of 180 miles and a recharge time of three hours. www.thunder-sky.com

Electric scooters The Vectrix is a substantial scooter (figure 20.44). Its battery (nickel metal hydride) has a capacity of 3.7 kWh. It can be driven for up to 68 miles at 25 miles/h (40 km/h), on a two-hour charge from a standard electrical socket. That’s 110 km for 3 kWh, or **2.75 kWh per 100 km**. It has a maximum speed of 62mph (100 km/h). It weighs 210 kg and has a peak power of 20 kW. www.vectrix.com The “Oxygen Cargo” is a smaller scooter. It weighs 121 kg, has a 38 mile range, and takes 2–3 hours to charge. Peak power: 3.5 kW; maximum speed 28mph. It has two lithium-ion batteries and regenerative brakes. The range can be extended by adding extra batteries, which store about 1.2 kWh and weigh 15 kg each. Energy consumption: **4 kWh per 100 km**.



Fig.20.44: Vectrix: **2,75 kWh auf 100 km**. Foto von www.vectrix.com

146 Die Energiedichte von Pressluftspeichern ist nur um die 11-28 Wh/kg 129 the energy-density of compressed-air energy-stores is only about 11–28Wh per kg. The theoretical limit, assuming perfect isothermal compression: if 1m³ of ambient air is slowly compressed into a 5-litre container at 200 bar, the potential energy stored is 0.16 kWh in 1.2 kg of air. In practice, a 5-litre container appropriate for this sort of pressure weighs about 7.5 kg if made from steel or 2 kg using kevlar or carbon fibre, and the overall energy density achieved would be about 11–28Wh per kg. The theoretical energy density is the same, whatever the volume of the container.

146 Arnold Schwarzenegger, preist, wie er einen wasserstoffbetriebenen Hummer auffüllt 130 Arnold Schwarzenegger . . . filling up a hydrogen-powered Hummer. *Nature* **438**, 24 November 2005. I’m not saying that hydrogen will *never* be useful for transportation; but I would hope that such a distinguished journal as *Nature* would address the hydrogen bandwagon with some critical thought, not only euphoria. *Hydrogen and fuel cells are not the way to go. The decision by the Bush administration and the State of California to follow the hydrogen highway is the single worst decision of the past few years.* James Woolsey, Chairman of the Advisory Board of the US Clean Fuels Foundation, 27th November 2007. In September 2008, *The Economist* wrote “Almost nobody disputes that . . . eventually most cars will be powered by batteries alone.” On the other hand, to hear more from advocates of hydrogen-based transport, see the Rocky Mountain Institute’s pages about the “HyperCar” www.rmi.org/hypercar/.

146 CUTE Projekts (Clean Urban Transport for Europe) – In the Clean Urban Transport for Europe project the overall energy required to power the hydrogen buses was between 80% and 200% greater than that of the baseline diesel bus. Source: CUTE (2006); Binder et al. (2006).

- 146 **Das Tanken des Hydrogen 7** - Fuelling the hydrogen-powered car made by BMW requires three times more energy than an average car. Half of the boot of the BMW "Hydrogen 7" car is taken up by its 170-litre hydrogen tank, which holds 8 kg of hydrogen, giving a range of 200 km on hydrogen [news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm]. The calorific value of hydrogen is 39 kWh per kg, and the best-practice energy cost of making hydrogen is 63 kWh per kg (made up of 52 kWh of natural gas and 11 kWh of electricity) (CUTE, 2006). So filling up the 8 kg tank has an energy cost of at least 508 kWh; and if that tank indeed delivers 200 km, then the energy cost is **254 kWh per 100 km**. *The Hydrogen 7 and its hydrogen-fuel-cell cousins are, in many ways, simply flashy distractions.* David Talbot, MIT Technology Review www.technologyreview.com/Energy/18301/
- 147 **das Honda Brennstoffzellen-Auto, der FCX Clarity**, Honda's fuel-cell car, the FCX Clarity, weighs 1625 kg, stores 4.1 kg of hydrogen at a pressure of 345 bar, and is said to have a range of 280 miles, consuming 57 miles of road per kg of hydrogen (91 km per kg) in a standard mix of driving conditions [czjjo], [5a3ryx]. Using the cost for creating hydrogen mentioned above, assuming natural gas is used as the main energy source, this car has a transport cost of **69 kWh per 100 km**. *Honda might be able to kid journalists into thinking that hydrogen cars are "zero emission" but unfortunately they can't fool the climate.* Merrick Godhaven
- 149 **Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht zu 3% aus Lithium** 132 A lithium-ion battery is 3% lithium. Source: Fisher et al. (2006).
- 149 **Lithiumspezialist R. Keith Evans** - Lithium specialist R. Keith Evans says "concerns regarding lithium availability . . . are unfounded." - Evans (2008).
- 150 **die „Economy Twins“, zwei holländische Linienschiffe** 133 Two Dutch-built liners known as "The Economy Twins." www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm.
- 150 **QE2**: www.qe2.org.uk.
- 151 **Das Transrapid Magnetschwebesystem** 134 Transrapid magnetic levitation train. www.transrapid.de.