20. Besserer Transport

Die moderne Fahrzeugtechnologie kann klimaschädliche Emissionen reduzieren, ohne den "Look and Feel" oder die Performance zu verändern, die die Käufer erwarten dürfen.

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 deutsche Wagen verbraucht um die 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.

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.

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

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.

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

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.

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.

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 energieeffizienter 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?

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.

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?

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

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

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.

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?

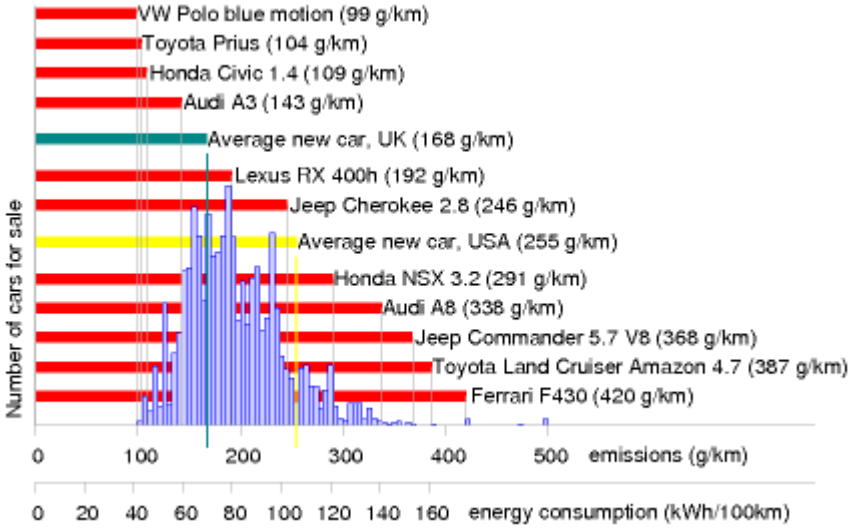

Fig.20.9: CO_2-Ausstoß, in g pro km, ausgewählter Autos, die in England verkauft werden. Die waagrechte Achse zeigt die Emissionsrate und die Höhe des blauen Histogramms zeigt die Verkäufe in 2006 für das entsprechende Modell. Quelle: www.newcarnet.co.uk. Die zweite waagrechte Achse zeigt den ungefähren Energieverbrauch, unter der Annahme, dass 240 g CO_2 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 Stimmberechtigten 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 Unfall-regelungen, 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 Deutschland, 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 unsere 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: Erkennbarer Verbesserungsbedarf. 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: Regenerative Bremsen; Hybridautos; Elektroautos; Autos mit Wasserstoffantrieb und den Pressluftantrieb.

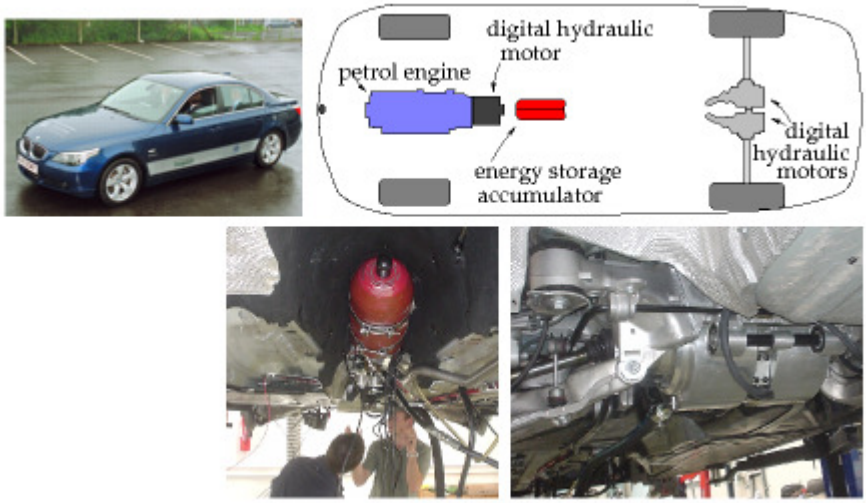

Fig.20.17: Ein BMW 520i umgerüstet von Artemis Intelligent Power auf digitale Hydraulik. Links unten: Ein 6l Speichertank (roter Kanister) kann etwa 0,05 kWh Energie in komprimiertem Stickstoff speichern. Rechts unten: Zwei 200kW Hydraulikmotoren, einer für jedes Hinterrad, die das Auto sowohl antreiben als auch abbremsen. 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.

Regenerative 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 abbremsen 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 europäischen Neuwagen mit 168 g CO_2 pro km, emittiert der Hybrid Prius 100 g CO_2, wie auch viele nicht-hybride Fahrzeuge. Der 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.[16]“ Doch seine CO_2-Emissionen liegen bei 192 g/km – schlechter als der Durchschnitt! Die britische 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

[16] Wörtlich: „Kaum Verschmutzung, keine Schuld“

Auto keine oder wenig Umweltzerstörung verursachen würde, was nicht der Fall war, und 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 REVAi G-Wiz wurde im Juni 2001 in Bangalore vorgestellt ♦und wird nach Deutschland über die Firma Smiles importiert. ◦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.

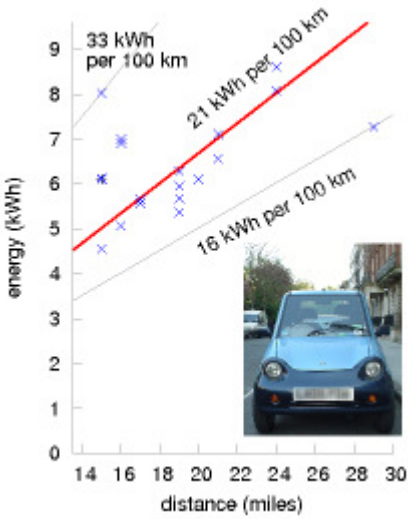

Fig.20.21: (links) benötigte Elektrizität zum Wideraufladen eines G-Wiz versus gefahrene Strecke. Gemessen wurde an der Steckdose.

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 im Stadtverkehr 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 CO_2-Emiossion interessieren: 21 kWh pro 100

km ist äquivalent mit 105 g CO_2 pro km, wenn man annimmt, dass Elektrizität einen Fußabdruck von 500 g CO_2 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.

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.

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 Pressluft-technologie 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

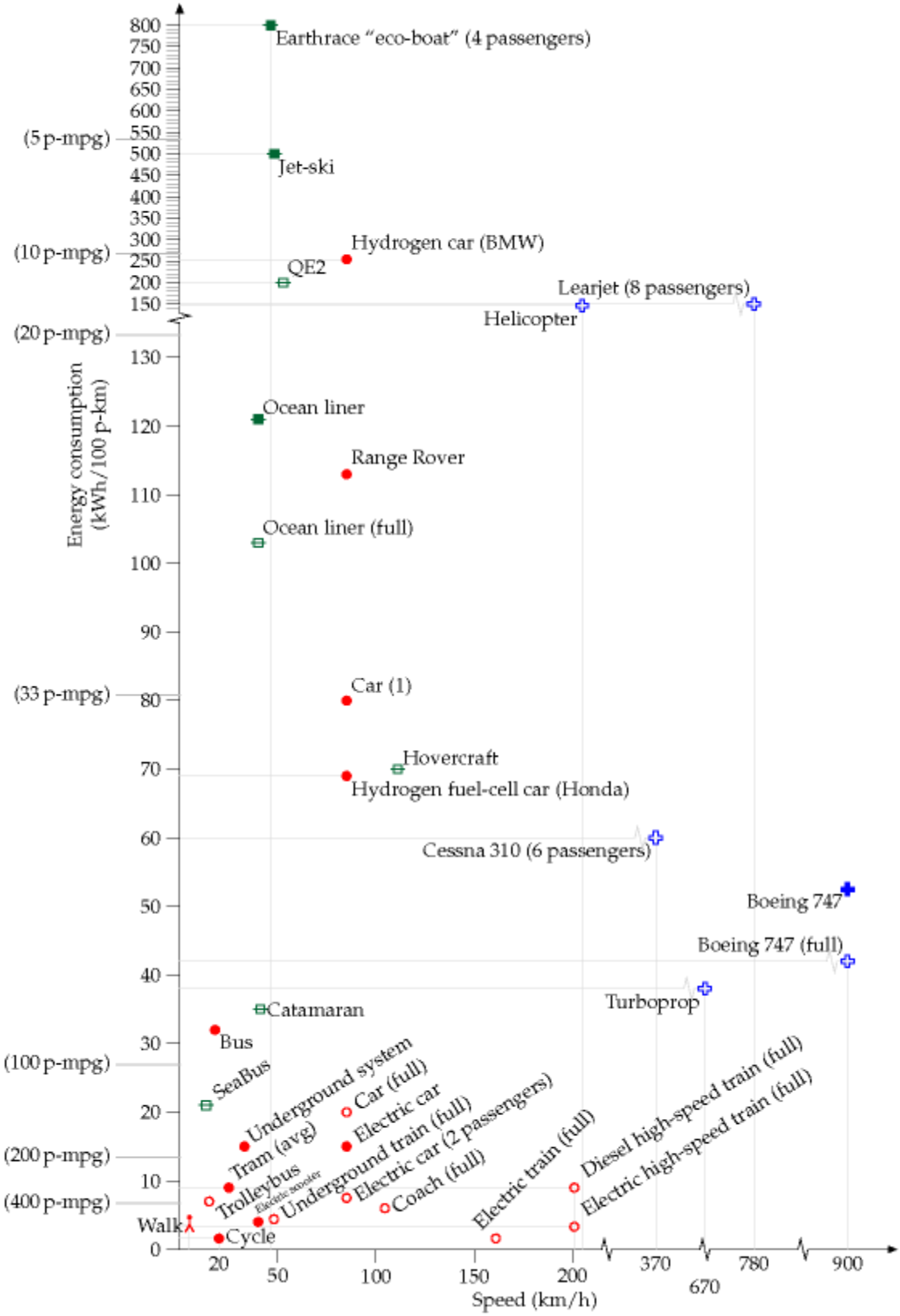

Fig. 20.23: Energieverbrauch verschiedener Formen des Passagiertransports. Die senkrechte Koordinate zeigt den Energieverbrauch in kWh pro 100p-km. Die horizontale Koordinate zeigt die Geschwindigkeit des Transportes. Das englische Durchschnittsauto mit einem Insassen „Car(1)“ verbraucht 33 mpg (8,5 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 dieselbetriebenes 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 220 zu Einzelheiten anderer Speichertechniken) Also wird die Rechweite 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 Energie*quelle*, sondern lediglich ein Energie*träger*, 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 ameríkanische 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 Wasserstoff-technologie 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 zehnmal 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 CO_2, 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 CO_2-Fußabdruck von 500 g pro kWh(el) hinterlässt, dann liegen die effektiven CO_2-Emissionen dieses Fahrzeugs bei 100 g CO_2 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 m^2 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 Betreib 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 90-95%. 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 198). 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 Fusionsreaktortechnik 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 Luxusschiff, 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“ In der Tat variieren die Prozentangaben dieses Mythos mit jeder Weitergabe. Manche sprechen von “5% der Energie”, andere glauben “Nur 0,3% der Treibstoffenergie” ginge in die Bewegung des Fahrers. [4qgg8q] Ich denke, nebenbei gesagt, dass keine dieser Statistiken korrekt oder gar hilfreich wäre.

136 Die Performance des Fahrrads ist etwa dieselbe wie die des Eco-Autos. Mit einem Ein-Personen-Fahrrad zu fahren kostet etwa 1,6 kWh auf 100 km, bei einer angenommenen Geschwindigkeit von 20 km/h. Details und Quellen hierzu sind in Anhang A zu finden.

160 Fig.20.4: Dieser 8-Waggon-Zug wiegt 275 Tonnen und kann 584 Personen sitzend transportieren. Seine Höchstgeschwindigkeit liegt bei 160 km/h, seine Leistungsabgabe 1,5 MW. Voll besetzt verbraucht der Zug bei Höchstgeschwindigkeit maximal 1,6 kWh pro 100 Passagier-km.

136 Die Londoner U-Bahnen Ein Zug der Victoria-Linie besteht aus vier 30,5 t und vier 20,5 t Wägen (erstere tragen auch die Motoren). Ein durchschnittlicher Zug wiegt 228 t. Die Höchstgeschwindigkeit ist 72 km/h, die mittlere Geschwindigkeit 50 km/h. Sind die meisten Sitze belegt, trägt der Zug etwa 350 Passagiere, vollgestopft an die 620. Der Energieverbrauch in Spitzenzeiten ist etwa 4,4 kWh pro 100 Passagier-km (Catling, 1966).

137 Hochgeschwindigkeitszüge: Ein Intercity-Dieselzug (rechts in Fig.20.5) wiegt 410 t. Bei 200 km/h bringt er 2,6 MW “auf die Schiene”. Vollbesetzt befördert er etwa 500 Passagiere. Der Durchschnittsverbrauch ist etwa 0,84 l Diesel pro 100 Sitzplatz-km [5o5x5m], das sind Transportkosten von etwa 9 kWh pro 100 Sitzplatz-km. Der Elektrozug Class 91 (links in Fig.20.5) fährt mit 225 km/h und hat 4,5 MW. Nach Roger Kemp verbraucht dieser Zug im Mittel 3 kWh pro 100 Sitzplatz-km [5o5x5m]. Nach Regierungsangaben [5fbeg9] verbrauchen Züge der East-Coast Mainline und West-Coast Mainline 15 kWh pro km (gesamter Zug). Die Anzahl der Sitzplätze ist 526 bzw. 470. Das sind dann 2,9–3,2 kWh pro 100 Sitzplatz-km.

137 Im Zeitraum 2006-7 lagen die gesamten Energiekosten – U-Bahnen: 15 kWh pro 100 p-km, die Energie-Kosten der Londoner Busse waren 32 kWh pro 100 p-km. Quelle: [679rpc]. Quelle für Geschwindigkeiten von Zügen und Bussen: Ridley and Catling (1982).

137 das Croydon Tramlink System Croydon Tramlink, siehe www.croydon-tramlink.co.uk, 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.

139 die Bereitstellung exzellenter Fahrradwege Ein britischer Leitfaden für Straßenplanung [www.manualforstreets.org.uk] rät, Straßen so zu entwerfen, dass 30 km/h die natürliche Geschwindigkeit ist. Siehe auch Franklin (2007).

141 eine faire und einfache Methode der Stau-Gebührenerhebung Eine brillante Art der automatisierten Stau-Gebührenerhebung stammt von Stephen Salter. Eine einfache tägliche Stau-Abgabe, wie sie in London erhoben wurde, ist nur ein grobes Signal für den Autofahrer. Hat ein Fahrer einmal die Stauabgabe geleistet, um in die Stauzone fahren zu dürfen, hat er wenig Interesse, innerhalb der Zone möglichst *wenig* zu fahren. Er wird auch nicht mit einem Rabatt belohnt, wenn er

innerhalb der Zone Routen wählt, die wenig Stau beinhalten. Statt einer zentralen Stelle, die mit intensivem Monitoring und aufwändigen Verkehrszählungen vorab entscheidet, wann und wo Stauzonen sind, hat Salter eine einfachere, dezentrale und anonyme Methode, um Fahrer zur Kasse zu bitten, die in zähfließendem, stauendem Verkehr unterwegs sind, wo auch immer er auftritt. Dieses System wäre landesweit möglich. Uns so funktioniert's: Wir wollen ein Gerät, das die Frage beantwortet: „Wie staugefährdet ist der Verkehr, in dem ich mich gerade bewege?" Ein gutes Maß dafür ist „Wie viele andere Fahrzeuge sind in meiner Nähe?". Im schnellen Verkehr sind die Abstände größer als im zähfließenden. Geht es nur im Stop-und-Go vorwärts, sind die Abstände besonders gering. Die Anzahl der Fahrzeuge in der Nähe kann nun anonym gemessen werden, indem man jedes Fahrzeug mit einem billigen Sender/Empfänger (etwa wie ein Billighandy) ausstattet, das kurze Radiosignale in regelmäßigen Abständen aussendet, solange der Motor läuft, und das alle Signale zählt, das es von anderen Fahrzeugen empfängt. Die Stauabgabe wäre dann proportional zur Anzahl gezählter Signale zu entrichten, das könnte jeweils an den Tankstellen beim Betanken des Fahrzeuges passieren. Dieser Sender/Empfänger könnte z.B. auch Mautgeräte (OBUs) ersetzen.

142 Schwungräder oder Hydraulik retten etwa 70% der Bremsenergie Pressluft für regeneratives Bremsen wird in Lastwägen verwendet, eaton.com sagt, dieser "Hydraulic Launch Assist" könnte 70% der kinetischen Energie einfangen [5cp27j]. Das Schwungrad-System von flybridsystems.com fängt ebenfalls 70% der kinetischen Energie. www.flybridsystems.com/F1System.html. Elektrische regenerative Bremssysteme gewinnen 50%. Quelle: E4tech (2007).

142 Batterien in diesem Leistungsbereich wiegen um die 200 kg. Gute Lithium-Ionenakkus haben eine spezifische Leistung von 300W/kg (Horie et al., 1997; Mindl, 2003).

142 durchschnittlichen Neuwagen in England mit 168 g CO_2 pro km Dieser Wert ist aus 2006 (King, 2008). Die Emissionen neuer PKWs in USA waren bei 255 g pro km (King, 2008).

142 Hybridautos wie der Toyota Prius (Fig.20.19) haben effizientere Motoren Der Benzinmotor des Prius benutzt den Atkinson Zyklus an Stelle des üblichen Otto Zyklus. Durch trickreiches Mischen von elektrischem und fossilem Antrieb je nach Fahrerfordernis kommt der Prius mit einem kleineren Motor aus als vergleichbare PKWs und nutzt so sein Benzin effektiver als ein konventioneller Automotor.

143 In der Praxis scheinen Hybridtechnologien Einsparungen von 20% oder 30% zu erzielen Zum Beispiel schreibt Hitachi in einem Forschungsbericht zu Hybrid-Zügen (Kaneko et al., 2004): Hocheffiziente Maschinen und regeneratives Bremsen könnten „voraussichtliche Treibstoffeinsparungen von etwa 20% gegenüber konventionellen Dieselzügen" bewirken.

144 Tatsache, dass nur 8,3 % der Pendler mehr als 30 km zu ihren Arbeitsplätzen fahren Quelle: Eddington (2006). Die Abhängigkeit der Reichweite eines Elektrofahrzeugs von seiner Batteriegröße ist in Anhang A diskutiert.

144 Kennzahlen der Performance für Unmengen von Elektroautos – Die Daten von Elektrofahrzeugen habe ich hier alle aufgelistet, in willkürlicher Reihenfolge. Die Zahlen stammen weitestgehend von den Herstellern selbst. Wie oben beschrieben, werden sie nicht immer im realen Verkehrseinsatz bestätigt.

Th!nk Elektroautos aus Norwegen. Der 5-Türer Th!nk Ox hat eine Reichweite von 200 km. Batterien wiegen 350 kg, das ganze Auto 1500 kg. Der Energieverbrauch ist etwa 20 kWh pro 100 km. www.think.no

Elektro-Smart Die Elektroversion mit 40 PS und 120 km Reichweite hat eine Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h. Das Fahrzeug kann für etwa 1,50 € an einer Standardsteckdose geladen werden, das CO_2-Äquivalent an Emissionen der Stromproduktion liegt bei 60 g/km [vgl. CO_2-Wert für den fossilbetriebenen Smart: 116 g/km.] Eine volle Aufladung dauert etwa acht Stunden, von 80% leer auf 80% voll dauert es dreienhalb Stunden.
[www.whatcar.com/newsarticle. aspx?NA=226488]

Berlingo Electrique 500E, ein Lieferwagen für Stadtverkehr (Fig. 20.20), hat 27 NiCd-Akkus und einen 28 kW Motor. Maximale Zuladung: 500 kg. Spitzengeschwindigkeit: 100 km/h; Reichweite: 100 km. 25 kWh pro 100 km. (Abschätzungen von einem Berlingo-Fahrer.) [4wm2w4]

i MiEV Dieses Elektroauto ist für 160 km Reichweite mit einem 16 kWh Akku ausgelegt. Das sind 10 kWh pro 100 km – besser als der G-Wiz – und während es schwer ist, zwei ausgewachsene Europäer in eine G-Wiz zu packen, hat der Mitsubishi-Prototyp vier Türen und vier richtige normalgroße Sitze (Fig. 20.38). [658ode]

EV1 Der Zweisitzer von General Motors hatte eine Reichweite von 120 bis 240 km pro Aufladung, mit einem 26,4 kWh Nickel-Metallhydrid-Akku. Das ist ein Energieverbrauch von 11 bis 22 kWh pro 100 km.

Lightning (Fig. 20.39) – hat vier büstenlose Motoren mit 120 kW, je einen pro Rad, ein regeneratives Bremssystem, und Nanosafe Lithium-Titanat-Batterien. Eine Kapazität von 36 kWh ergibt eine Reichweite von 320 km, das sind 11 kWh pro 100 km.

Aptera - Dieser fantastische windschlüpfrige Fisch ist ein Zweisitzer und soll mit 6 kWh pro 100 km fahren. Sein c_w-Wert liegt bei 0,11 (Fig. 20.40). Es sind Elektro- und Hybridmodelle in der Entwicklung.

Loremo (Fig. 20.41) Der Loremo hat wie der Aptera eine kleine Windaufstandsfläche und einen geringen cw-Wert (0,2). Es gibt ihn in fossilbetriebener und in Elektro-Version. Er hat zwei Erwachsenensitze und zwei nach hinten orientierte Kindersitze. Der Loremo EV wird mit Lithium-Ionenakkus ausgestattet sein

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

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.

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

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

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

und voraussichtlich eine Energie-Effizienz von 6 kWh pro 100 km erreichen, eine Spitzengeschwindigkeit von 170 km/h und eine Reichweite von 153 km. Er wiegt 600 kg.

eBox Der eBox hat eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 35 kWh und wiegt 280 kg; Reichweite 220 bis 280 km. Der Motor hat eine Spitzenleistung von 120 kW und eine Dauerleistung von 50 kW. Energieverbrauch: 12 kWh pro 100 km.

Ze-0 Ein Fünfsitzer-Fünftürer. Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h, Reichweite: 80 km. Gewicht inkl. Batterie: 1350 kg. Bleiakkus mit einer Kapazität von 18 kWh. Motor: 15 kW. 22.4 kWh pro 100 km.

e500 Ein italienisches Fahrzeug, ähnlich dem Fiat, Zweitürer-Viersitzer. 100 km/h Spitze. Reichweite im Stadtverkehr: 120 km. Lithium-Ionen-Polymer-Akku.

MyCar Der MyCar ist ein Zweisitzer in italienischem Design. Spitzengeschwindigkeit 65 km/h, 100 km Reichweite. Bleiakku.

Mega City ist ein Zweisitzer mit maximaler Dauerleistung von 4 kW und einer Spitzengeschwindigkeit von 65 km/h: 11,5 kWh pro 100 km. Leergewicht inkl. Batterien – 725 kg. Bleiakkus mit einer Kapazität von 10 kWh.

Xebra Er soll 40 km Reichweite mit einer 4,75 kWh Ladung haben. 12 kWh pro 100 km. 100 km/h Spitze, mit Bleiakku.

TREV Das Two-Seater Renewable Energy Vehicle (TREV) ist ein Prototyp der University of South Australia (Fig. 20.42), mit drei Rädern, einer Reichweite von 150 km, einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h, einer Masse von 300 kg, und mit Lithium-Ionen-Polymer-Batterien von 45 kg. Auf einer 3000 km Testfahrt lag der Energieverbrauch bei 6,2 kWh pro 100 km.

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

Venturi Fetish hat eine 28 kWh Batterie, die 248 kg wiegt. Das Auto wiegt 1000 kg. Reichweite 160–250 km. Das sind 11–17 kWh pro 100 km. www.venturifetish.fr/fetish.html

Toyota RAV4 EV Dieses voll-elektrische Mini-SUV verkaufte Toyota von 1997 bis 2003 (Fig. 20.43). Der RAV4 EV hat 24 12-Volt 95Ah NiMH Batterien, die 27,4 kWh Energie speichern können, und eine Reichweite von 130 bis 190 km. Sein Energieverbrauch liegt damit bei 14–21 kWh pro 100 km. The RAV4 EV wurde von den Polizeikräften in Jersey eingesetzt.

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

Phoenix SUT – ein fünfsitziger "Sport Utility Truck" aus Kalifornien – hat eine Reichweite von "bis zu 200 km" mit einem 35 kWh Lithium-Ionen Batterieblock. (Das sind 17 kWh pro 100 km.) Die Batterien können mit einer Spezialsteckdose in 10 Minuten geladen werden. www.gizmag.com/go/7446/

Modec Lieferwagen Der Modec befördert zwei Tonnen Zuladung über 150 km, Leergewicht 3000 kg. www.modec.co.uk

Smith Ampere Kleiner Lieferwagen mit 24 kWh Lithium-Ionen-Batterien. Reichweite "über 160 km" www.smithelectricvehicles.com

Elektrischer Minibus von www.smithelectricvehicles.com: 40 kWh Lithium-Ionen Batterieblock. 90 kW Motor mit regenerativen Bremsen. Reichweite "bis zu 160 km", 15 Sitzplätze. Leergewicht 3026 kg, Zuladung 1224 kg. Das ergibt eine Performance von – im besten Fall - 25 kWh pro 100 km. Ist das Fahrzeug voll, ist seine Transporteffizienz bei beeindruckenden 2 kWh pro 100 p-km.

Thunder Sky Der elektrische Reisebus hat eine Reichweite von 300 km und eine Ladezeit von drei Stunden. www.thunder-sky.com

Elektroroller Der Vectrix ist praktisch ein Motorroller (Fig 20.44). Seine Batterie (Nickel-Metallhydrid) hat eine Kapazität von 3,7 kWh. Er fährt bis zu 110 km bei 40 km/h nach einer zweistündigen Ladung (80%) an einer Standardsteckdose. Das sind dann 110 km für 3 kWh, oder 2.75 kWh pro 100 km. Seine Höchstgechwindigkeit liegt bei 110 km/h. Er wiegt 210 kg und hat eine Spitzenleistung von 20 kW. www.vectrix.com. Der "Oxygen Cargo" ist ein kleinerer Roller. Er wiegt 121 kg, hat 60 km Reichweite und braucht 2-3 Stunden zum Aufladen. Spizenleistung: 3,5 kW; Spitzengeschwindigkeit 45 km/h. Er hat 2 Li-Ionen-Akkus und regenerative Bremsen. Die Reichweite kann durch Extra-Batterien erhöht werden, die weitere 1,2 kWh bei 15 kg Zusatzgewicht geben. Energieverbrauch: 4 kWh pro 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 Das theoretische Limit, bei angenommener perfekter isothermischer Kompression: Wird 1 m³ Umgebungsluft langsam in einen 5-l-Behälter auf 200 bar komprimiert, sind 0,16 kWh potentielle Energie in 1,2 kg Luft gespeichert. In der Praxis wiegt ein solcher geeigneter Druckbehälter 7,5 kg (aus Stahl) bzw. 2 kg (aus Glasfaser oder Polyamid), damit wird eine Gesamt-Energiedichte von 11–28 Wh pro kg erreicht. Diese theoretische Energiedichte ist ziemlich unabhängig vom Volumen des Behälters.

146 Arnold Schwarzenegger preist, wie er einen wasserstoffbetriebenen Hummer auffüllt aus: *Nature* **438**, 24 November 2005. Ich behaupte nicht, dass Wasserstoff *niemals* für Verkehrsanwendungen hilfreich wäre, doch hätte ich gehofft, dass ein renommiertes Blatt wie *Nature* den ganzen Wasserstoff-Mitläufern etwas kritischer gegenübertritt, und nicht nur mit Euphorie. *„Wasserstoff und Brennstoffzellen sind kein gangbarer Weg. Die Entscheidung der Regierung Bush und des Staates Kalifornien, dem Wasserstoff-Pfad zu folgen, ist die schlechteste Einzel-entscheidung der letzten Jahre"* sagt James Woolsey, Beiratsvorsitzender der US Clean Fuels Foundation, 27. November 2007. Im September 2008 schrieb *The Economist* "Fast niemand redet darüber, dass ... möglicherweise die meisten Autos einfach mit Batterien ausgestattet sein werden." Wer andererseits mehr von den Befürwortern wasserstoffbasierten Verkehrs erfahren will, sei auf die Seiten des Rocky Mountain Institute's über den "HyperCar" verwiesen: www.rmi.org/hypercar/.

146 CUTE Projekts (Clean Urban Transport for Europe) – Im *Clean Urban Transport for Europe* Projekt lag die benötigte Gesamtenergie für Wasserstoffbusse zwischen

80% und 200% über den Vergleichswerten des Diesel-Busses. Quelle: CUTE (2006); Binder et al. (2006).

146 Das Tanken des *Hydrogen 7* Die Hälfte des Innenraums im BMW "Hydrogen 7" nimmt der 170-Liter Wasserstofftank ein, der 8 kg Wasserstoff fasst, was eine wasserstoffbasierte Reichweite von 200 km erlaubt. [news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm]. Der kalorische Energiegehalt von Wasserstoff ist 39 kWh pro kg, und der Energieaufwand des effizientesten Herstellungsverfahrens für Wasserstoff beträgt 63 kWh pro kg (bestehend aus 52 kWh Erdgas und 11 kWh Elektrizität) (CUTE, 2006). Den 8 kg Tank zu füllen kostet also mindestens 508 kWh Energie; liefert eine Tankfüllung tatsächlich 200 km, sind das 254 kWh pro 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: Er wiegt 1625 kg, speichert 4,1 kg Wasserstoff bei einem Druck von 345 bar, soll eine Reichweite von 450 km haben und schafft 91 km Straße pro kg Wasserstoff in einem Standard-Fahrzyklus. [czjjo], [5a3ryx]. Nehmen wir wieder die oben genannten Herstellungskosten für Wasserstoff, in der Erdgas als vorwiegende Energiequelle benutzt wird, liegen die Energiekosten bei 69 kWh per 100 km. *„Honda mag es gelingen, Journalisten hinters Licht zu führen, dass Wasserstoffautos „Null Emission" verursachen würden, doch leider werden sie das Klima nicht hinters Licht führen können"* Merrick Godhaven

149 Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht zu 3% aus Lithium Quelle: Fisher et al. (2006).

149 Lithiumspezialist R. Keith Evans – R. Keith Evans sagt "Bedenken wegen der Verfügbarkeit von Lithium ... sind unbegründet." – Evans (2008).

150 die „Economy Twins", zwei holländische Linienschiffe" Siehe www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm.

150 QE2: www.qe2.org.uk.

151 Das Transrapid Magnetschwebesystem Siehe www.transrapid.de.