

Anhang A. Autos II

Wir haben abgeschätzt, dass ein Auto für 100 km Fahrt etwa 80 kWh Energie benötigt. Wohin geht diese Energie? Wie hängt sie von den Eigenschaften des Fahrzeuges ab? Können wir 100mal effizientere Autos bauen? Lassen Sie uns ein simples Modell des Autofahrens skizzieren, um zu beschreiben, wohin die Energie geht. Die Energie eines typischen Diesel- oder Benzinautos geht hauptsächlich an vier Stellen, die wir alle behandeln werden:

1. Beschleunigen, und dann durch die Bremsen wieder entschleunigen
2. Luftwiderstand
3. Rollwiderstand
4. Wärme - etwa 75% der Energie wird in nutzlose Wärme gewandelt, weil die Energie-Umwandlungskette ineffizient ist.

Zunächst wird unser Modell den Rollwiderstand vernachlässigen; diesen Effekt werden wir später in diesem Kapitel hinzufügen. Nehmen wir an, der Fahrer beschleunigt rasch bis zur Reisegeschwindigkeit v und hält diese Geschwindigkeit eine Strecke d lang, die dem Abstand zwischen Ampeln, Stoppschildern oder Staus entspricht. Beim nächsten Halt angekommen steigt er auf die Bremse und verwandelt all die kinetische Energie in den Bremsen zu Wärme. (Das Fahrzeug benutzt nicht diese seltsamen regenerativen Bremsen.) Wenn er wieder fahren kann, beschleunigt er wieder auf die Reisegeschwindigkeit v . Diese Beschleunigung gibt dem Auto kinetische Energie; Bremsen wirft diese kinetische Energie weg.

Energie geht nicht nur in die Bremsen: Während das Auto fährt, verwirbelt es die Luft. Ein Auto lässt eine Röhre verwirbelter Luft hinter sich, die mit einer Geschwindigkeit strömt, die vergleichbar mit v ist. Welche dieser beiden Energieformen ist größer: Die kinetische Energie in Luftwirbeln oder die Wärme in den Bremsen? Rechnen wir es aus.

- Das Auto beschleunigt und bremst einmal innerhalb der Zeitspanne d/v . Die Rate, mit der Energie in die Bremsen gepumpt wird ist

$$\frac{\text{kinetische Energie}}{\text{Zeit zwischen Abbremsungen}} = \frac{\frac{1}{2} m_c v^2}{d/v} = \frac{\frac{1}{2} m_c v^3}{d}, \quad (\text{A.1})$$

wobei m_c die Masse des Autos sei.



Fig.A.1: Ein Peugeot 206 hat einen Cw-Wert von 0,33. Foto von Christopher Batt

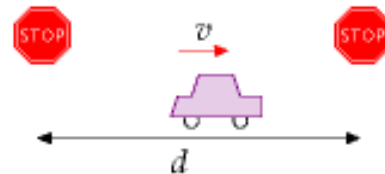


Fig.A.2: Annahme: Ein Auto bewegt sich mit der Geschwindigkeit v von einem Stopp zum nächsten, der den Abstand d hat.

Die Schlüsselformel für die meisten Berechnungen in diesem Buch ist

$$\text{kinetische Energie} = \frac{1}{2} m v^2 .$$

Beispiel: Ein Auto mit Masse $m=1000$ kg fährt mit der Geschwindigkeit $v = 100$ km/h = 28 m/s. Es hat dann die Energie

$$\frac{1}{2} m v^2 = 390.000 \text{ J} \approx 0,1 \text{ kWh}$$



Fig.A.3: Ein Auto mit Geschwindigkeit v erzeugt hinter sich eine Röhre wirbelnder Luft. Der Querschnitt der Röhre ist ähnlich der Aufstandsfläche des Autos und die Geschwindigkeit, mit der die Luft wirbelt, ist annähernd v .

- Die Röhre verwirbelter Luft, die ein Auto in der Zeit t erzeugt, hat das Volumen Avt , wobei A die Querschnittsfläche der Röhre ist, die ähnlich der von vorne gesehenen Fläche (der „Aufstandsfläche“) ist. (Für ein stromlinienförmiges Auto ist A gewöhnlich etwas kleiner als die Aufstandsfläche A_c des Autos, und das Verhältnis zwischen dem effektiven Querschnitt der Röhre und der Aufstandsfläche des Autos wird als Luftwiderstandsbeiwert oder c_w -Wert bezeichnet. Für die folgenden Berechnungen bedeutet A die „effektive Aufstandsfläche“ des Autos, $c_w A_c$.) Die Röhre hat eine Masse von $m_{\text{air}} = \rho Avt$ (Masse = Dichte \times Volumen, wobei ρ (griechischer Buchstabe Rho) die Dichte der Luft bezeichnet) und wirbelt mit der Geschwindigkeit v , also ist ihre kinetische Energie

$$\frac{1}{2} m_{\text{air}} v^2 = \frac{1}{2} \rho Avt v^2$$

und die Erzeugungsrate von kinetischer Energie in den Luftwirbeln ist

$$\frac{\frac{1}{2} \rho Avt v^2}{t} = \frac{1}{2} \rho Av^3.$$

Die Gesamtrate der Energieproduktion beim Auto ist also

$$\begin{aligned} \text{Leistung zum Abbremsen} &+ \text{Leistung zum Luftverwirbeln} \\ = \frac{1}{2} m_c v^3 / d &+ \frac{1}{2} \rho Av^3. \end{aligned} \tag{A.2}$$

Beide Formen der Energiedissipation skalieren mit v^3 . Dieses Modell sagt also vorher, dass ein Fahrer durch Halbieren seiner Geschwindigkeit seinen Energieverbrauch (pro Zeiteinheit) 8mal verkleinert. Beendet er seine Fahrt nach derselben Strecke, wird seine Fahrt doppelt so lang gedauert haben, doch die gesamte für die Fahrt benötigte Energie wird viermal geringer ausfallen.

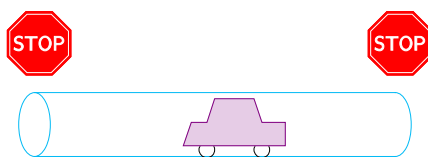


Fig.A.4: Um herauszufinden, ob der Energieverbrauch brems- oder luftwiderstands-dominiert ist, vergleichen wir die Masse des Autos mit der Masse der Luft-Röhre zwischen den Stopps.



Fig.A.5: Der Energieverbrauch eines Autos ist bei Autobahnfahrt proportional zu seiner Aufstandsfläche und bei Stadtverkehr proportional zu seiner Masse. Wer hat die besseren Verbrauchszahlen, der VW links, oder das Raumschiff?

Welche der beiden Formen der Energiedissipation – Bremsen und Luftverwirbelung – ist die größere? Das hängt vom Verhältnis

$$(m_c/d) / (\rho A)$$

ab. Ist das Verhältnis viel größer als 1, dann geht die meiste Energie in die Bremsen; ist es kleiner, geht mehr Energie in die Luftwirbel. Stellen wir dieses Verhältnis um, ist es größer als 1, wenn

$$m_c > \rho Ad.$$

Nun ist aber $\rho A d$ das Volumen der Röhre durchfahrener Luft von einem Stopp bis zum nächsten. Und $\rho A d$ ist die Masse dieses Volumens von Luft. So haben wir eine recht einfache Situation: Die Energiedissipation ist dominiert von der Energievernichtung beim Bremsen, wenn die Masse des Autos größer ist als die Masse der Luftröhre, die es von einem Stopp zum nächsten durchfährt; und sie ist dominiert vom Luftverwirbeln, wenn die Masse des Autos kleiner ist (Fig.A.4). Berechnen wir nun den Abstand d^* zwischen Stopps, unter dem die Dissipation bremsdominiert und über dem verwirbelungs- (Luftwiderstands-)dominiert ist. Wenn die Aufstandsfläche des Autos

$$A_c = 2 \text{ m breit} \times 1,5 \text{ m hoch} = 3 \text{ m}^2$$

beträgt, der c_w -Wert bei $1/3$ und die Masse $m_c = 1000 \text{ kg}$ ist, gilt für d^*

$$d^* = \frac{m_c}{\rho c_w A_c} = \frac{1000 \text{ kg}}{1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1/3 \times 3 \text{ m}^2} = 750 \text{ m} .$$

Im Stadtverkehr dominiert also die kinetische Energie und das Bremsen, wenn der Abstand zwischen einzelnen Stopps weniger als 750 m ist. Unter diesen Umständen ist es zum Energiesparen eine gute Idee,

1. die Masse des Fahrzeugs zu reduzieren,
2. ein Auto mit regenerativen Bremsen zu benutzen (die den Energieverlust beim Bremsen etwa halbieren, vgl. Kapitel 20) und
3. langsamer zu fahren.

Wenn die Stopps signifikant weiter als 750 m auseinanderliegen, ist die Energiedissipation vom Luftwiderstand dominiert. Dann ist es kaum erheblich, wie viel Ihr Fahrzeug wiegt, die Energiedissipation ist fast die gleiche, ob ihr Auto mit einem oder mit sechs Leuten besetzt ist. Energie kann gespart werden,

1. indem man den Luftwiderstand des Autos verringert,
2. indem man die Aufstandsfläche reduziert,
3. indem man langsamer fährt.

Der tatsächliche Energieverbrauch eines Fahrzeugs ist die Energiedissipation aus Gleichung (A.2), erhöht um einen Faktor, der die Ineffizienz des Motors und der Kraftübertragung beinhaltet. Typische Verbrennungsmotoren sind 25%-effizient, also werden von der chemischen Energie, die ein Auto verbraucht, drei Viertel dazu verwendet, den Motor und den Kühler zu erhitzen und nur ein Viertel geht in „nützliche“ Energie:

Energie pro Strecke	
Auto mit 110 km/h	80 kWh/(100km)
Fahrrad mit 21 km/h	2,4 kWh/(100km)
Flugzeuge bei 900 km/h	
A380	27 kWh / 100 Sitzplatz-km

Tabelle A.6: Bemerkenswerte Fakten: Energieverbrauch des Autos.

$$\text{Gesamtleistung eines Autos} \approx 4 \left[\frac{1}{2} m_c v^3 / d + \frac{1}{2} \rho A v^3 \right] .$$

Lassen Sie uns diese Theorie des Autofahrens überprüfen, indem wir vernünftige Zahlen für Langstreckenfahrten einsetzen. Sei $v = 110 \text{ km/h} = 31 \text{ m/s}$ und $A = c_w A_c = 1 \text{ m}^2$. Der Leistungsverbrauch des Motors ist dann grob

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3 = 2 \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ m}^2 \times (31 \text{ m/s})^3 = 80 \text{ kW} .$$

Fahren Sie mit dieser Geschwindigkeit eine Stunde täglich, dann legen Sie 110 km zurück und verbrauchen 80 kWh jeden Tag. Wären Sie stattdessen zwei Stunden mit der halben Geschwindigkeit gefahren, hätten Sie dieselbe Strecke zurückgelegt und nur 20 kWh Energie verbraucht. Diese einfache Theorie scheint konsistent zu sein mit den Verbrauchszahlen aus Kapitel 3. Darüber hinaus gibt diese Theorie Hinweise, wie der Energieverbrauch eines Autos reduziert werden kann. Die Theorie hat aber auch einige Schwächen, die ich gleich erklären werde.

Können wir ein neues Auto bauen, das 100mal weniger Energie verbraucht und trotzdem 110 km/h fährt? Nein. Nicht wenn das Auto dieselbe Form haben soll. Auf der Autobahn bei 100 km/h geht der Energieverbrauch vorrangig in die Luftverwirbelungen. Die Materialien des Fahrzeugs zu verändern macht da keinen Unterschied. Eine wundersame Verbesserung des Verbrennungsmotors könnte vielleicht seine Effizienz von 25% auf 50% steigern und den Energieverbrauch auf 40 kWh pro 100 km senken.

Elektroautos haben einige Vorzüge: Obwohl das Gewicht des Energiespeichers pro nutzbarer gespeicherter Kilowattstunde etwa 25mal größer ist als bei Benzin, kann das Gewicht des Elektromotors etwa 8mal geringer sein. Und die Energiewandlung ist auch bei Elektroautos viel effizienter: Elektromotoren können bis zu 90% Effizienz erreichen.

Wir werden am Ende des Kapitels noch einmal genauer auf Elektroautos zurückkommen.

Fahrräder und der Skalierungstrick

Hier eine Fangfrage: Was ist der Energieverbrauch eines Fahrrads auf 100 km? Sich mit einem Fahrrad fortzubewegen erfordert Energie aus genau demselben Grund wie beim Auto: man erzeugt Luftwirbel. Jetzt könnten wir dieselben Berechnungen nochmals neu anstellen und die Kennzahlen des Autos durch die des Fahrrades ersetzen. Aber es gibt einen einfachen Trick, um die Antwort für das Fahrrad aus der Antwort für das Auto zu erhalten. Der Energieverbrauch des Autos pro gefahrener Strecke ist der Energieverbrauch für die Luftverwirbelungen

$$4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$$

dividiert durch die Geschwindigkeit v , also

$$\text{Energie pro Strecke} = 4 \times \frac{1}{2} \rho A v^2.$$

Die „4“ kam von der Motoreffizienz; ρ ist die Dichte von Luft, die Fläche $A = c_w A_c$ ist die effektive Aufstandsfläche des Fahrzeugs und v ist die Geschwindigkeit. Jetzt können wir ein Fahrrad mit einem Auto vergleichen, indem wir $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$ für das Fahrrad durch $4 \times \frac{1}{2} \rho A v^3$ für das Auto teilen. Alle Konstanten und die Dichten kürzen sich heraus, wenn die Effizienz des Kohlenstoff-betriebenen Radfahrers vergleichbar mit der des kohlenstoff-betriebenen Automotors ist (was der Fall ist). Das Verhältnis ist:

Luftwiderstandsbeiwert c_w	
<i>Autos:</i>	
Honda Insight	0.25
Prius	0.26
Renault 25	0.28
Honda Civic (2006)	0.31
VW Polo Gti	0.32
Peugeot 206	0.33
Ford Sierra	0.34
Audi TT	0.35
Honda Civic (2001)	0.36
Citroën 2CV	0.51
Radfahrer	0.9
Reisebus	0.425
<i>Flugzeuge:</i>	
Cessna	0.027
Learjet	0.022
Boeing 747	0.031
Eff. Aufstandsfläche (m ²)	
Land Rover Discovery	1.6
Volvo 740	0.81
Typical car	0.8
Honda Civic	0.68
VW Polo Gti	0.65
Honda Insight	0.47

Table A.7. c_w -Werte und effektive Aufstandsflächen

$$\frac{\text{Energie pro Strecke Rad}}{\text{Energie pro Strecke Auto}} = \frac{c_{w,\text{Rad}} A_{\text{Rad}} v_{\text{Rad}}^2}{c_{w,\text{Auto}} A_{\text{Auto}} v_{\text{Auto}}^2}$$

Der angewandte Trick heißt Skalierung. Wenn wir wissen, wie der Energieverbrauch mit der Geschwindigkeit und der Aufstandsfläche skaliert, können wir auch den Energieverbrauch für Objekte voraussagen, die völlig andere Werte für Geschwindigkeit oder Aufstandsfläche haben. Lassen Sie uns in diesem speziellen Fall annehmen, das Flächenverhältnis sei

$$\frac{A_{\text{Rad}}}{A_{\text{Auto}}} = \frac{1}{4}$$

(Vier Radfahrer können Schulter an Schulter sitzen in der Breite eines PKW.) Nehmen wir weiter an, das Fahrrad sei nicht sonderlich stromlinienförmig:

$$\frac{c_{w,\text{Rad}}}{c_{w,\text{Auto}}} = \frac{1}{1/3}$$

und die Geschwindigkeit des Radfahrers sei 22 km/h, also

$$\frac{v_{\text{Rad}}}{v_{\text{Auto}}} = \frac{1}{5}$$

Dann gilt

$$\begin{aligned} \frac{\text{Energie pro Strecke Rad}}{\text{Energie pro Strecke Auto}} &= \frac{c_{w,\text{Rad}} A_{\text{Rad}}}{c_{w,\text{Auto}} A_{\text{Auto}}} \times \frac{v_{\text{Rad}}^2}{v_{\text{Auto}}^2} \\ &= \left(\frac{3}{4}\right) \times \left(\frac{1}{5}\right)^2 \\ &= \frac{3}{100} \end{aligned}$$

Ein Radfahrer mit 21 km/h benötigt also ca. 3 % der Energie eines Autofahrers auf der Autobahn – um die 2,4 kWh auf 100 km.

Wenn Sie also ein Fahrzeug suchen, dessen Treibstoff-Effizienz 30mal besser als die eines Autos ist, liegt die Antwort nahe: Fahren Sie Rad.

Rad	c_R
Zug (Stahl auf Stahl)	0,002
Fahrradreifen	0,005
LKW-Reifen	0,007
PKW-Reifen	0,010

Tabelle A.8: Der Rollwiderstand ist gleich dem Gewicht mal dem Rollwiderstandsbeiwert c_R . Der Rollwiderstand enthält Verformungskräfte des Reifens, Reibungsverluste in den Radlagern, Stöße und Vibrationen sowohl des Fahrzeugs als auch der Straße (einschließlich der Energie, die die Stoßdämpfer aufnehmen) und den Schlupf der Reifen auf Straße oder Schiene. Der Koeffizient ändert sich abhängig von der Straßenqualität, vom Reifenmaterial und von der Temperatur. Die hier angegebenen Zahlen gelten für glatte Straßen. [2bhu35]

Was ist mit dem Rollwiderstand?

Was wir bisher völlig vernachlässigt haben ist die Energie, die in Reifen und Lagern verbraucht wird, oder die Energie, die die Abrollgeräusche der Reifen auf der Straße

verursacht oder die den Gummi von den Reifen radiert und auch die Energie, die Fahrzeuge in die Straße übertragen, indem sie diese zu Erschütterungen anregen. Zusammengefasst nennt man diese Energien den Rollwiderstand. Das Standardmodell zum Rollwiderstand nimmt an, dass dieser – unabhängig von der Geschwindigkeit – exakt proportional zum Gewicht des Fahrzeugs ist. Die Proportionalitätskonstante heißt Rollwiderstandskoeffizient oder Rollwiderstandsbeiwert c_R . Tabelle A.8. zeigt einige typische Werte.

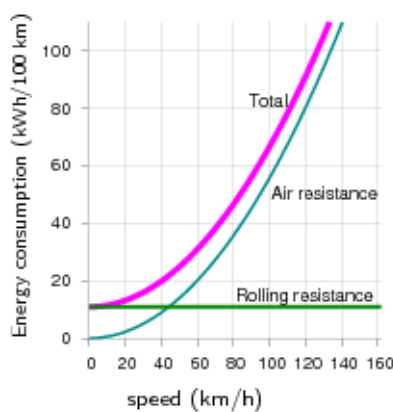


Fig.A.9: Einfache Theorie des Treibstoffverbrauchs beim Auto (Energie pro Strecke), bei gleichmäßiger Fahrgeschwindigkeit. Annahmen: Motorwirkungsgrad 25% geschwindigkeitsunabhängig, $c_W A_c = 1 \text{ m}^2$, $m_c = 1000 \text{ kg}$, $c_R = 0,01$.

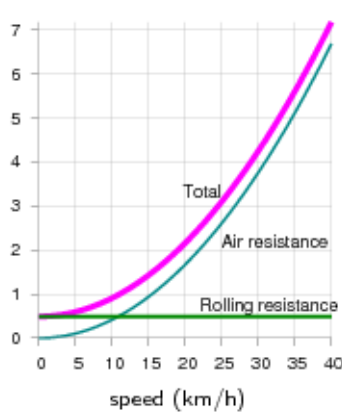


Fig.A.10: Einfache Theorie des Treibstoffverbrauchs beim Fahrrad (Energie pro Strecke). Senkrechte Achse ist Energieverbrauch auf 100 km. Annahmen: Wirkungsgrad des Motors (das sind Sie!) 25%, $c_W A_c = 0,75 \text{ m}^2$, Masse von Fahrer + Rad: 90 kg , $c_R = 0,005$.

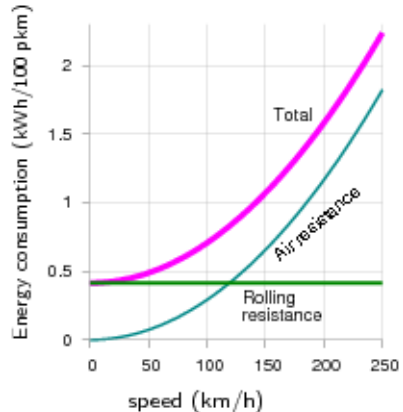


Fig.A.11: Einfache Theorie des Treibstoffverbrauchs beim Zug, pro Fahrgast, für einen 8-Waggon-Zug mit 584 Passagieren. Senkrechte Achse: Energieverbrauch in kWh pro Achse. Annahmen: Motorwirkungsgrad 0,90, $c_W A_{Zug} = 11 \text{ m}^2$, $m_{Zug} = 400.000 \text{ kg}$, $c_R = 0,002$.

Der Rollwiderstandsbeiwert eines Autos ist etwa 0,01. Der Effekt des Rollwiderstandes ist derselbe wie wenn man dauernd einen Berg mit 1% Steigung hinauffahren würde. Die Rollreibung ist etwa 100 Newton pro Tonne, unabhängig von der Geschwindigkeit. Sie können das nachprüfen, indem Sie ein 1-Tonnen-Fahrzeug eine ebene Straße entlangschieben. Sobald es in Schwung ist, werden Sie es mit einer Hand in Bewegung halten können. (100 Newton sind das Gewicht von 100 Äpfeln.) Bei einer Geschwindigkeit von 31 m/s (110 km/h) liegt für ein 1-Tonnen-Fahrzeug die Energie, die erforderlich ist um den Rollwiderstand zu überwinden, bei

$$\text{Kraft} \times \text{Geschwindigkeit} = (100 \text{ N}) \times (31 \text{ m/s}) = 3.100 \text{ W} ,$$

was bei einem Motorwirkungsgrad von 25% eine Motorleistung von 12 kW erfordert, im Gegensatz zum Luftwiderstand, dessen Überwindung 80 kW erfordert, wie wir oben auf S.274 berechnet haben. Bei hohen Geschwindigkeiten wird also etwa 15% der Energie für die Rollreibung benötigt.

Fig.A.9 zeigt die Theorie des Treibstoffverbrauches (Energie pro zurückgelegter Strecke) als Funktion der (konstanten) Geschwindigkeit, wenn man Roll- und Luftwiderstand zusammennimmt.

Die Geschwindigkeit, bei der Roll- und Luftwiderstand gleich sind, ist gegeben durch

$$c_R m_c g = \frac{1}{2} \rho c_W A_c v^2$$

also

$$v = \sqrt{2 \frac{c_R m_c g}{\rho c_w A_C}} = 7 \text{ m/s} = 25 \text{ km/h.}$$

Fahrräder

Für ein Fahrrad ($m=90 \text{ kg}$, $A=0,75 \text{ m}^2$) findet der Übergang von rollwiderstandsdominiertem auf luftwiderstandsdominiertes Fahren bei etwa 12 km/h statt. Bei einer konstanten Geschwindigkeit um die 20 km/h kostet das Radfahren etwa $2,2 \text{ kWh}$ pro 100 km . Durch Einnehmen einer aerodynamisch günstigen Haltung kann Luftwiderstand und Aufstandsfläche so reduziert werden, dass der Energieverbrauch auf $1,6 \text{ kWh}$ pro 100 km zurückgeht.

Züge

Für einen 8-Waggon-Zug wie aus Fig.20.4 ($m=400.000 \text{ kg}$, $A=11 \text{ m}^2$) wird der Luftwiderstand größer als der Rollwiderstand bei einer Geschwindigkeit von

$$v = 33 \text{ m/s} = 120 \text{ km/h.}$$

Mit nur einem Waggon ($m=50.000 \text{ kg}$, $A=11 \text{ m}^2$) liegt die Grenze bei

$$v = 12 \text{ m/s} = 43 \text{ km/h.}$$

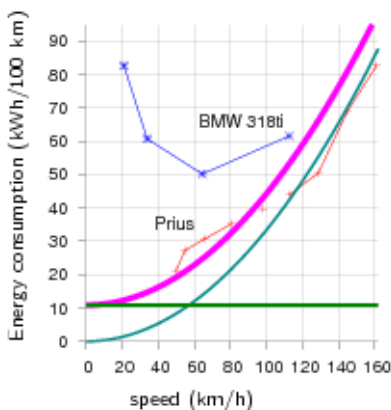
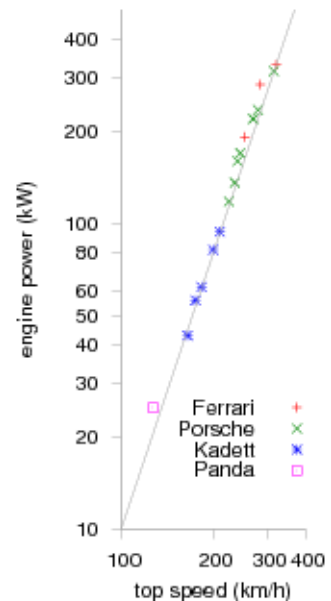


Fig.A.12: Der Treibstoffverbrauch der heutigen Autos geht nicht mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Prius Daten von B. Z. Wilson, BMW Daten von Phil C. Stuart. Die glatte Linie zeigt, wie eine v^2 -Kurve aussähe, bei einer angenommenen effektiven Aufstandsfläche von $0,6 \text{ m}^2$.

Fig.A.13: (rechts) Leistungen von Autos (kW) vs. Höchstgeschwindigkeit (in km/h). Beide Skalen sind logarithmisch. Die Leistung wächst mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit. Zweimal so schnell zu fahren erfordert die achtfache Motorleistung. Von Tennekes (1997).



Geschwindigkeitsabhängigkeit der Energie

Wenn ich sage, dass Halbieren der Fahrgeschwindigkeit den Verbrauch (in l auf 100 km) auf ein Viertel reduzieren sollte, schauen manche Leute skeptisch. Sie haben ein gutes Argument: Die meisten Automotoren haben eine optimale Drehzahl, und der gewählte Gang bestimmt die Geschwindigkeit, bei der die Motor-Effizienz optimal ist. In meinem Gedankenexperiment könnte bei Halbierung der Geschwindigkeit das Auto aus diesem optimalen Geschwindigkeitsbereich herausfallen und daher die Einsparung geringer als 4fach ausfallen. Meine stillschweigende Annahme, dass der Motorwirkungsgrad bei allen Geschwindigkeiten und allen Lastsituationen derselbe wäre, führte zur Schlussfolgerung, dass es (im Hinblick auf Verbrauch) immer besser wäre, langsamer zu fahren; wenn aber der Motorwirkungsgrad bei kleinen Geschwindigkeiten abfällt, müsste die treibstoff-effizienteste Geschwindigkeit ein Mittelweg sein, ein Kompromiss zwischen langsam fahren und den Motor im optimalen Drehzahlbereich halten. Für den BMW 318ti aus Fig.A.12 läge die optimale Geschwindigkeit beispielsweise bei 60 km/h . Wenn aber die Gesellschaft beschließt, dass Fahrzeuggeschwindigkeiten reduziert werden sollten,

spricht nichts dagegen, auch die Motoren so umzudesignen, dass die optimale Effizienz bei der entsprechenden Geschwindigkeit erreicht werden kann. Ein weiterer Hinweis auf die Proportionalität zwischen erforderlicher Energie und der dritten Potenz der Geschwindigkeit ist in Fig.A.13 abgebildet: Sie zeigt Motorleistung vs. Spitzengeschwindigkeit für eine Vielzahl von Autos. Die eingezeichnete Linie zeigt die Beziehung „Energie proportional zu v^3 .“

Elektroautos: Ist die Reichweite ein Problem?

Die Leute sagen oft, dass die Reichweite von Elektrofahrzeugen nicht groß genug wäre. E-Auto-Befürworter sagen „kein Problem, wir können ja einfach größere Batterien einsetzen“ – und das ist wahr, doch müssen wir ausarbeiten, welchen Effekt diese zusätzliche Batterien auf den Energieverbrauch haben. Die Antwort hängt entscheidend davon ab, welche Energiedichte wir für die Batterien annehmen. Für eine Energiedichte von 40 Wh/kg (typisch für Bleiakkus) werden wir sehen, dass es schwer ist, den Aktionsradius über 200 oder 300 km auszudehnen. Doch für Energiedichten um die 120 Wh/kg (typisch für verschiedene lithiumbasierte Akkus) sind Reichweiten von 500 km kein Problem.

Nehmen wir an, die Masse des Fahrzeugs mit Insassen wäre 740 kg, ohne Batterien. Wir werden dann nacheinander 100 kg, 200 kg, 500 kg oder vielleicht 1000 kg Batterien hinzunehmen. Nehmen wir weiter an: eine typische Geschwindigkeit 50 km/h, eine effektive Aufstandsfläche von 0,8 m², einen Rollwiderstand von 0,01, eine mittlere Entfernung zwischen Stopps von 500 m, einen Motorwirkungsgrad von 85% und eine Rückgewinnung von 50% der kinetischen Energie des Fahrzeugs beim Anhalten durch den Einsatz regenerativer Bremsen. Das Laden des Autos aus der Steckdose soll 85% effizient erfolgen können. Fig.A.14 zeigt die Transportkosten des Fahrzeugs über seiner Reichweite, wenn wir den Batterieumfang im Fahrzeug variieren. Die obere Kurve zeigt das Ergebnis für Batterien mit einer Energiedichte von 40 Wh/kg (altmodische Bleiakkus). Die Reichweite ist bei etwa 500 km limitiert. Um diesem Limit nahe zu kommen, müssen wir unheimlich große Batterien verwenden: Für eine Reichweite von 400 km wären beispielsweise 2000 kg Batterien erforderlich, und die Transportkosten wären über 25 kWh auf 100 km. Wenn wir mit einer Reichweite von 180 km zufrieden sind, können wir das mit 500 kg Batterien erreichen. Die Dinge sehen gleich viel besser aus, wenn man die leichteren Lithium-Ionen-Akkus verwendet. Bei einer Energiedichte von 120 Wh/kg können Autos mit 500 kg Batterien leicht über 500 km schaffen. Die Transportkosten wären dann bei 13 kWh pro 100 km.

Daher scheint es mir, dass das Reichweitenproblem bereits durch die Verfügbarkeit moderner Batterien gelöst ist. Es wäre sicherlich schön, noch bessere Batterien zu haben, doch eine Energiedichte von 120 Wh/kg ist bereits ausreichend, so lange wir mit

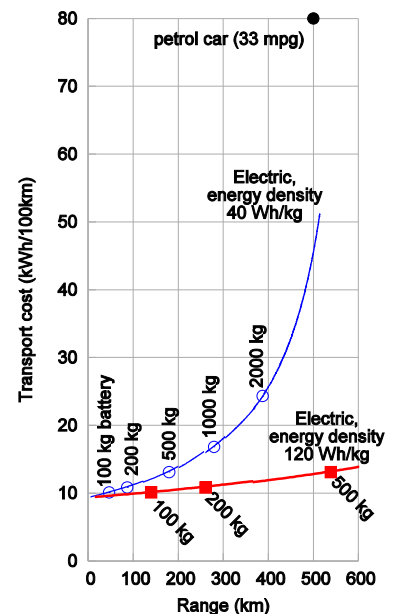


Fig.A.14: Theorie der Reichweite (waagrechte Achse) und Transportkosten (senkrechte Achse) von Elektroautos als Funktion der Batteriemasse, für zwei Batterietechnologien. Ein Auto mit 500 kg alter Batterien, mit einer Energiedichte von 40 Wh/kg, hat eine Reichweite von 180 km. Mit dem selben Gewicht an modernen Batterien, mit 120 Wh/kg, hat das Elektroauto eine Reichweite von über 500 km. In beiden Fällen sind die Energiekosten etwa 13 kWh pro 100 km. Die Zahlen gelten für eine Batterie-Ladeeffizienz von 85%.

500 kg Batterien im Auto glücklich sind. In der Praxis wären wohl die meisten Leute mit einem Radius von 300 km zufrieden, der mit 250 kg Batterien erreicht werden kann. Wären diese Batterien in Blöcke zu je 25 kg unterteilt, die einzeln ausbaubar wären, dann könnte ein Autofahrer, der nur die übliche Pendlerstrecke fährt, lediglich 4 der 10 Blöcke an Bord nehmen (100 kg ergeben 140 km) und weitere 6 Blöcke nur dann an der Stromtankstelle holen, wenn er eine längere Fahrt plant. Bei einer Langstreckenfahrt müsste man etwa alle 300 km die Batterien an einer Stromtankstelle durch einen frischen Satz austauschen.

Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

274 mit regenerativen Bremsen, die den Energieverlust beim Bremsen etwa halbieren – *Regenerative brakes roughly halve the energy lost in braking.* Quelle: E4tech (2007).

274 Typische Verbrennungsmotoren sind 25%-effizient 256 *Typical petrol engines are about 25% efficient.* Encarta [6by8x] sagt: “Die Wirkungsgrade moderner Ottomotoren liegen zwischen 20 und 25%” Der Benzinmotor im Toyota Prius, berühmt dafür, eines der effizientesten Autos zu sein, benutzt den Atkinson-Zyklus statt des Otto-Zyklus; er hat eine Spitzenleistung von 52 kW und einen Wirkungsgrad von 34% bei 10 kW [348whs]. Der effizienteste Dieselmotor der Welt hat einen Wirkungsgrad von 52%, ist aber für Autos nicht geeignet, da er 2.300 Tonnen wiegt: Der Wartsila-Sulzer RTA96-C Turbodiesel (Fig.A.15) ist für Containerschiffe konzipiert und liefert 80 MW.



Fig.A.15: Der Wartsila-Sulzer RTA96-C 14-Zylinder Zweitakt-Dieselmotor. 27 m lang und 13,5 m hoch. www.wartsila.com

275 kann das Gewicht des Elektroautos etwa 8mal geringer sein 257 *Electric engines can be about 8 times lighter than petrol engines.* Ein 4-Takt-Benzinmotor hat ein Leistungs-zu-Masse-Verhältnis von etwa 0.75 kW/kg. Die besten Elektromotoren haben einen Wirkungsgrad von 90% und ein Leistungs-zu-Masse-Verhältnis von 6 kW/kg. Einen 75 kW Benzinmotor durch einen 75 kW Elektromotor zu ersetzen spart also 85 kg Gewicht. Leider ist das Leistungs-zu-Masse-Verhältnis von Batterien etwa 1 kW pro kg, so dass man bei den Batterien wieder verliert, was man am Motor gewinnt.

275 die Effizienz des Kohlenstoff-betriebenen Radfahrers 259 *The bike's engine uses energy with an efficiency of 0.25.* Diese und weitere Annahmen über das Radfahren findet man bestätigt bei di Prampero et al. (1979). Die effektive Aufstandsfläche eines Radfahrers in Rennhaltung ist $c_{wA} = 0,3 \text{ m}^2$. Der Rollwiderstand eines hochwertigen Rennrades (Gesamtgewicht 73 kg) ist 3,2 N.

278 Fig.A.12 260 Prius Daten von B. Z. Wilson [home.hiwaay.net/~bzwilson/prius/]. BMW Daten von Phil C. Stuart [www.randomuseless.info/318ti/economy.html].

Weiterführende Literatur: Gabrielli und von Kármán (1950).