

Inputpapier von Prof. Dr. Horst Friedrich

Leiter Institut für Fahrzeugkonzepte, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Stuttgart

Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung?

1. Expertenmeeting vom 20. bis 22. Juni 2007

Paul Scherrer Institut PSI, Villigen, Schweiz



Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung?

Inputpaper

energie dialog SCHWEIZ



Titel	Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung?
Thema	Beitrag zum energie trialog SCHWEIZ
Schlüsselwörter	1-Liter-Auto, Fahrzeugkonzepte, Kraftstoffverbrauchsreduktion
Zugänglichkeit	Öffentlich
Autoren	Prof. H.E. Friedrich, Dr. S.A. Schmid
Mit Beiträgen von	

Version	Kommentar	Datum

Dateiname	2007-06-22_energie-trialog-Schweiz_Input-paper__sas-hef_v7.doc
Zuletzt gespeichert von	
Zuletzt gespeichert am	24.05.2007 16:55
Angelegt am	02.05.2007
Gedruckt am	12.06.2007 09:40

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte

Prof. H. E. Friedrich
 Pfaffenwaldring 38-40
 D-70569 Stuttgart, GERMANY

Dr. Stephan A. Schmid

Tel.: +49 (0)711/6862-256

+49 (0) 711/6862-533

Fax : +49 (0)711/6862-258

+49 (0) 711/6862-570

E-Mail: horst.friedrich@dlr.de

E-Mail: stephan.schmid@dlr.de

1 Einleitung

„Die Klimaänderung ist Realität. Nach wissenschaftlichen Erkenntnissen sollten wir eine Begrenzung des durchschnittlichen globalen Temperaturanstiegs auf 2°C über vorindustriellen Werten anstreben, um den Schaden zu begrenzen.“ (Europäische Kommission 2005). Den Erwartungen zu Folge dürften die globalen CO₂-Emissionen trotz erheblicher Anstrengungen bis 2025 steigen. Langfristig wird den Einschätzungen gemäß eine weltweite Netto-Minderung trotz globaler Industrialisierung um mindestens 15 % bis 2050 notwendig sein, um Schäden durch Klimawirkungen einzudämmen.

Kohlendioxid ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas. Der heutige atmosphärische CO₂-Gehalt beträgt etwa 380 ppm, im Jahr 1958 waren es noch 315 ppm im Vergleich zu 280 ppm in vorindustriellen Zeiten. Die CO₂-Emissionen des gesamten Verkehrs betragen im Jahr 2005 weltweit etwa 5,8 Gt/a und werden nach Projektionen der IEA auf 8,4 Gt/a im Jahr 2025 anwachsen. Im Jahr 2050 werden 12,3 Gt/a erreicht sein. (WBCSD 2004) Der Verkehrsbereich trägt damit weltweit knapp ein Viertel zu den CO₂-Emissionen bei, auf den Individualverkehr (Pkw) entfallen z.B. in Deutschland ca. 12 %.

Nach einem Beschluss der europäischen Umweltminister will sich die EU im Rahmen eines internationalen Klimaschutzabkommens verpflichten, ihre Treibhausgasemissionen um 30 Prozent bis 2020, gegenüber dem Jahr 1990, zu senken.

Welche Rolle kann der motorisiert Individualverkehr spielen?

Das 1-Liter Auto wurde technisch bereits realisiert. Es erfüllt die Crash/Sicherheitsanforderungen und ist ein 2-sitziges Fahrzeug, in dem Fahrer und Beifahrer hintereinander sitzen, um einen extrem geringen Luftwiderstand zu erhalten. Gleichzeitig wurden alle weiteren relevanten Einflüsse auf die Fahrwiderstände minimiert bzw. optimiert: Rollwiderstand, Masse sowie Motor- incl. Antriebsstrangs-Effizienz.

Zukünftige Fahrzeugtechnologien müssen in das Gesamtsystem sozialer, wirtschaftlicher und ökologischer Entwicklungen passen. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit sich die Konzepte des 1-Liter Autos auf Alltagsfahrzeuge übertragen lassen, die in großen Stückzahlen gebaut werden und für den Großteil der Bevölkerung erschwinglich sein sollen.

Die Komplexität von Fahrzeugen nimmt immer mehr zu. Viele verschiedene Einzeltechnologien können bzw. werden eingesetzt, um die Anforderungen an Sicherheit, Energieverbrauch und Emissionen zu erfüllen wobei sie teilweise im Wettbewerb miteinander stehen. Es ist eine spannende Frage, welche Technologien sich in Abhängigkeit von den Klimaschutzzielen durchsetzen werden.

Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über die Fragen:

- Welche Technologien zur Verbrauchsminderung zur Verfügung stehen
- Mit welchen Mehrkosten voraussichtlich gerechnet werden muss
- Welche CO₂ Minderungen aus heutiger Sicht erreichbar scheinen

2 Erhöhung der Effizienz

2.1 Potenziale von Verbrennungsmotoren

Eine Reihe von Ansatzpunkten zur Verbrauchsreduktion von Otto- und Dieselmotoren sind zu nennen:

- Minderung mechanischer Verluste
- Entdrosselung (Ottomotor)
- Verbesserung des Hochdruckwirkungsgrades
- Verschiebung des Lastkollektivs
- Verringerung der Ladungswechselverluste.

Weltweit wird heute überwiegend der homogen stöchiometrisch ($\lambda = 1$) betriebene Ottomotor eingesetzt. Dieser kann mit einem geregelten Dreiwegekatalysator zur Minimierung der Emissionen kombiniert werden. Verbesserungen können mit Lastpunktverschiebung, beispielsweise durch Downsizing kombiniert mit Aufladung und Zylinderabschaltung, sowie Verringerung der Ladungswechselverluste, etwa durch variable Ventilsteuerung realisiert werden. Abgasrückführung und variable Verdichtung führen darüber hinaus zur Erhöhung des Wirkungsgrades. Direkteinspritzung führt ebenfalls zur Entdrosselung des Ottomotors. Die geschichtete Direkteinspritzung führt zu einer Verbrauchsabsenkung von etwa 15 % in der stationären Teillast. Aufgrund der Kosten und der aufwändigen Abgasnachbehandlung hat sich dieser Ansatz obwohl lange im Markt eingeführt bis heute nicht flächendeckend durchgesetzt. Strahlgeführte Brennverfahren können bei großvolumigen Motoren zu Verbrauchsverbesserungen bis zu 20 % führen. Jedoch auch mit homogenen Verbrennungskonzepten konnten mit Aufladung, Downsizing, gekühlter AGR, Systemoptimierung und verlängerter Getriebeübersetzung ca. 20 % gezeigt werden.

Insgesamt scheint eine ca. 20 bis 25 %-ige Verbesserung des Verbrauchs im NEFZ gegenüber heutigen Fahrzeugen der Golf-Klasse mit Direkteinspritzung der ersten Generation motortechnisch die Zielmarke darzustellen. Darüber hinaus könnte der Kraftstoff Erdgas, eine weitere Reibungsoptimierung, Optimierung der Nebenaggregate weiteres, wenn auch geringes Potenzial bieten. Trotz der sehr guten Teillastwirkungsgrade, die mit diesen Maßnahmen erzielbar sind, kann der Kraftstoffverbrauch von Dieselmotoren im realen Betrieb kaum erreicht werden, da die thermodynamischen Vorteile des hohen Verdichtungsverhältnisses bei Volllast bleiben.

2.2 Hybridfahrzeuge und alternative Energiewandlung

Ein Hybridantrieb besteht aus zwei unterschiedlichen Antriebssystemen, d.h. aus mindestens zwei Energiewandlern und zwei Energiespeichern. Unterschieden werden serieller Hybrid, paralleler Hybrid und Powersplit Hybrid. Ein hybridelektrischer Antrieb wird in Kombination mit anderen Maßnahmen, wie z.B. Lastpunktanhebung (Downsizing) und automatisierte Getriebe, eingesetzt. Die Vorteile sind Bremsenergierückgewinnung, erhöhte Fahrleistung und eine Verbesserung des Wirkungsgrads des Verbrennungsmotors durch Lastpunktanhebung. Die Nachteile sind erhöhte Kosten, erhöhte Systemkomplexität und ein erhöhtes Fahrzeuggewicht. Unterschieden werden verschiedene Stufen der „Hybridisierung“, die sich an der Leistung des Elektromotors orientiert.

Das Einsparpotenzial durch „Hybridisierung“ beläuft sich theoretisch auf etwa 40 %, aber bei bereits weiter entwickelten Otto-Antrieben sinkt das Potenzial auf additiv etwa 20 bis 25 % beim Full Hybrid.

2.3 Nutzung von Verlustwärmeströmen

In der öffentlichen Diskussion und in Fachkreisen hat die Nutzung von Verlustenergieströmen bisher einen relativ geringen Anteil. Da nur etwa 25 % bis 35 % der im Kraftstoff chemisch gebundenen Energie genutzt werden, bietet sich jedoch theoretisch ein großes Potenzial für eine mögliche Rückgewinnung. Etwa 40 % bis 65 % der eingesetzten Energie gehen als Wärme durch die Motorkühlung und das Abgas an die Umgebung verloren. Diese relativ große Bandbreite ist durch Schwankungen in den Umgebungs- und Betriebsbedingungen (Außentemperatur, Heizung, Erwärmung der Aggregate) bedingt.

Technisch können Verlustwärmeströme beispielsweise zur Kühlung mittels thermisch aktivierter Kältemaschinen genutzt werden. Eine weitere Nutzungsmöglichkeit ist die Wandlung in mechanische Energie mittels eines Wärme-Kraft-Prozesses. In Frage kommen der Dampfprozess, der Stirling-Prozess sowie der offene Gasturbinen-Prozess. In einer der wenigen Studien bisher wird von einer Kraftstoffreduktion bei Konstantfahrt mit 140 km/h mit einem 1,6 l Otto-Fahrzeug von 1 % für die Gasturbine, 6 % für den Stirling-, sowie 5 % für den Dampfprozess berichtet. Praktisch wurde in jüngster Zeit der Dampfprozess auf dem Prüfstand realisiert. Dabei wird ein zweistufiger Dampfprozess in die Motorkühlung und den Abgasstrang integriert. Die durch die Expansion gewonnene mechanische Energie wird über die Kurbelwelle direkt in den Antriebsstrang eingespeist. Für diese Konfiguration wird eine Kraftstoffeinsparung von bis zu 15 % angegeben.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von thermoelektrischen Generatoren, die den Seebeck-Effekt zur direkten Umwandlung von thermischer in elektrische Energie nutzen. Bislang wird dieser Effekt im Bereich kleiner Leistungen eingesetzt. Es gibt jedoch bereits erste Prototypen in Fahrzeugen. In Abhängigkeit der Geschwindigkeit werden beispielsweise Kraftstoffeinsparungen von 1 bis 2 % angegeben, jedoch mit einigem Potenzial durch die Art der konstruktiven Ausführung (Thacher 2007). Durch die Aussicht auf Fortschritte beim Materialwirkungsgrad und der Systemintegration ist in jüngerer Zeit ein erhöhtes

Interesse an der Anwendung von TEG zu beobachten. Einsparungen von ca. 5% wurden prognostiziert (Friedrich 2007).

3 Reduktion der Fahrwiderstände

Beeinflussbare Komponenten des Fahrwiderstands sind der Roll-, der Beschleunigungs-, der Steigungs- und der Luftwiderstand. Für den Beschleunigungs- und den Steigungswiderstand spielt die Fahrzeugmasse die maßgebende Rolle. Daher ist der Fahrzeuggestaltbau ein zentrales Forschungsgebiet für die Fahrzeugindustrie. Der Rollwiderstand ist vorwiegend über die Reifen und den Straßenbelag beeinflussbar, wobei letzteres hier nicht betrachtet wird.

3.1 Leichtbau

Die Reduktion der Fahrzeugmasse hat direkten Einfluss auf den Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand und somit werden drei Fahrwiderstände gleichzeitig vermindert. Wird an einer Stelle Gewicht gespart, so beeinflusst dies auch die Auslegung anderer Fahrzeugkomponenten. Diese müssen geringere Kräfte aushalten und können eventuell schlanker und leichter gebaut werden. Dies wird als sekundärer Leichtbaueffekt bezeichnet.

Für die Gewichtseinsparung am Fahrzeug können verschiedene Leichtbaustrategien unterschieden werden, die sich unterschiedlich auf die Kosten und das Potenzial auswirken. Dies sind im Wesentlichen:

- Stoffleichtbau (Materialsubstitution),
- Formleichtbau (Minimierung des Werkstoffeinsatzes, Optimierung der Geometrie),
- Konzeptleichtbau (Komponentenauswahl, Anpassungsoptimierung, Reduktion der Teilezahl und Fügestellen),
- Bedingungsleichtbau (Veränderung der Kundenanforderungen und der gesetzlichen Anforderungen an ein Fahrzeug).

Für den Stoffleichtbau stehen dabei Werkstoffe wie Magnesium, Aluminium, Titan, GFK und CFK zur Diskussion. Insbesondere wird in der Neukonzeption von Fahrzeugstrukturen der Schlüssel für eine drastische Reduktion des Energieverbrauchs gesehen. Heute gibt es sowohl für einzelne Strukturbauteile als auch für FKV-Karosserien eine Reihe von funktionstüchtigen Prototypen, die die technische Realisierbarkeit nachgewiesen haben.

Technologien zur Verwendung von höherwertigem Stahl für Leichtbaukonzepte in Fahrzeugen zeigen sich heute bereits in Serienfahrzeugen. Für diese Werkstoffe und Bauweisen besteht ein Potenzial zur Gewichtseinsparung von ca. 50 kg für heutige Fahrzeuge der „Golf“-Klasse bei relativ geringen Kosten.

Eine Gewichtsreduktion von 100 kg bewirkt eine Kraftstoffeinsparung bei Fahrzeugen mit Ottomotor von etwa 0,35 l/100 km bzw. etwa 8,4 g CO₂/km im neuen europäischen Fahrzyklus. Bei großen Fahrzeugen kann mehr, bei kleinen Fahrzeugen durch 100 kg Gewichtsreduktion jedoch weniger eingespart werden.

Insgesamt sollten – abhängig vom jeweiligen Fahrzeugkonzept – künftig ca. 50 bis 150 kg Fahrzeugmasse reduziert werden können.

3.2 Rollwiderstand

Der Rollwiderstand entsteht durch die elastische Verformung des Reifens beim Durchlaufen der Bodenaufstandsfläche. Durch die Umwandlung von mechanischer in thermischer Energie kommt es zu einem Energieverlust. Dessen Größe ist abhängig vom Aufbau und den Materialien des Reifens, sowie vom Reifenhalmmesser, Reifendruck und der Fahrgeschwindigkeit. Bei konstanter Fahrt mit 100 km/h benötigt ein Pkw etwa 50 % der Energie am Rad um den Rollwiderstand zu überwinden.

Der Rollwiderstandsbeiwert heute verwendeter Pkw-Reifen liegt zwischen $r_0 = 0,0097$ und $r_0 = 0,0128$ mit einem Mittelwert von 0,011 bei 20 getesteten Reifen (Reifengröße 195/65 R15 „Golf“, Sommer-, Winter- und Ganzjahresreifen) (TÜV Automotive GmbH 2003). Die Leichtlaufreifen des 1-Liter Auto haben ein r_0 von etwa 0,007.

Eine wichtige Rolle spielt der Reifendruck. Einige Studien deuten darauf hin, dass Reifen im Einsatz mit einem um 0,2 bis 0,4 bar zu geringem Druck gefahren werden. Dies erhöht den Kraftstoffverbrauch um etwa 1 bis 2,5 %. Dem wird durch eine elektronische Reifendruckkontrolle entgegen gewirkt.

Mit neuen Konzepten geht die Reifenindustrie davon aus, den Rollwiderstand bis 2030 um 50 % zu senken.

3.3 Aerodynamik

Der Luftwiderstand eines Fahrzeugs wird durch das Produkt aus dem Luftwiderstandsbeiwert c_w und der effektiver Frontfläche A (Stirnfläche) bestimmt ($c_w \cdot A$). Während bei variierenden Fahrzyklen in der Regel die Beschleunigungswiderstände die dominierende Rolle spielen, ist bei Konstantfahrt mit höheren Geschwindigkeiten der Luftwiderstand wesentlich – bei 120 km/h doppelt so wichtig wie der Rollwiderstand. Hier werden etwa 44 % der Energie für die Überwindung des Luftwiderstands verbraucht. Im MVEG-Fahrzyklus sind es etwa knapp 8 %-

Die Entwicklung des c_w -Werts über der Zeit zeigt eine ständige Verbesserung. Heutige Mittelklassefahrzeuge haben im Durchschnitt einen c_w -Wert von 0,3. Noch 1995 betrug der c_w -Wert aller verkauften Fahrzeuge 0,35. Der Unterboden bietet noch ein Potenzial von etwa 10 % für eine Verbesserung der Aerodynamik. Ein weiterer Ansatzpunkt bietet eine Optimierung der Motordurchströmung. Insgesamt scheint das Erreichen eines c_w -Wertes von 0,2 möglich.

Leider zeigt der zweite Einflussfaktor, die Frontfläche, einen gegenläufigen Trend: sie steigt ständig an. Interessanterweise liegt der Wert für $c_w \cdot A$ über alle Fahrzeugklassen nahezu gleich, im Mittel bei 0,68. Die geringe Frontfläche wird durch eine relativ schlechte Aerodynamik aufgehoben, größere Fahrzeuge haben eine relativ bessere Aerodynamik, jedoch eine große Stirnfläche. Insgesamt ist eine Minderung des aerodynamischen Widerstandes mittelfristig um 10 % mit Kosten von bis zu 100 €₂₀₀₀ möglich. Dies würde den Kraftstoffverbrauch bei Konstantfahrt mit 160 km/h um ca. 20 % senken.

4 Alternative Kraftstoffe

Alternative Kraftstoffe spielen eine wichtige Rolle bei der Senkung der CO₂-Emissionen „well-to-wheel“ und der Entkopplung des Verkehrs von der Erdölabhängigkeit.

Trotz der deutlichen prognostizierten Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Normzyklus für Pkw Neufahrzeuge lässt sich die Kraftstoffnachfrage bis zum Jahr 2050 insgesamt nur um ca. ein Drittel reduzieren. Dieses Szenario beinhaltet die Annahme eines weiteren Anstiegs der Fahrleistung, sowohl im motorisierten Individualverkehr als auch im Güterverkehr.

Biokraftstoffe müssen daher zu einem weiteren CO₂-Rückgang beitragen. Zunächst decken Biokraftstoffe der ersten Generation entsprechend der Vorgaben der Europäischen Kommission den anwachsenden Bedarf. Ab dem Jahr 2020 übernehmen zunehmend die Biokraftstoffe der 2ten Generation den weiter ansteigenden Anteil. Aufgrund des begrenzten Flächenpotenzials können Biomasse-basierte Kraftstoffe jedoch niemals den gesamten Kraftstoffbedarf abdecken.

Alternative Kraftstoffe, die auf dem zunehmenden Potenzial an regenerativ erzeugtem Strom basieren, müssen daher zu einer weiteren Diversifizierung des Kraftstoffangebots beitragen. An Bedeutung gewinnen dann elektrifizierte Fahrzeuge mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb und Elektro-Batterie-Fahrzeuge.

5 Zusammenfassung

Die Demonstration der Machbarkeit von 1 Liter Verbrauch auf 100 km äquivalent 26 g CO₂/km ist mit dem 1-Liter-Auto gelungen. Überträgt man die angewendeten Technologien auf ein Fahrzeug der unteren Mittelklasse (etwa VW Golf o. ä. Fahrzeuge gleicher Nutzungsfähigkeit) wäre ein CO₂-Wert von ca. 60 g/km im NEFZ darstellbar. Dieses aber nicht zu den heute erwarteten Fahrzeugkosten.

Um die individuelle Mobilität künftig umweltverträglich, verzichtsfrei und finanzierbar zu gestalten sind folgende Handlungsfelder zu bearbeiten:

Antrieb

- Mittelfristig: Verbesserung des Verbrennungsmotors und selektive Hybridisierung des Antriebsstranges
- Langfristig: Einsatz des Brennstoffzellen/Wasserstoff Fahrzeugs u/o des Batterie-Elektrofahrzeugs

Voraussetzungen sind die Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnik insbesondere unter den Gesichtspunkten der Wasserstoffspeicherung, Betriebstauglichkeit und Kosten sowie die Einbindung der Wasserstoff-Erzeugung/Verteilung in ein energetisches Gesamtkonzept. Bezüglich des Einsatzes eines „Full Battery Vehicles“ ist die Optimierung der Li-Ionen-Batterietechnologie notwendig.

Fahrzeugtechnik

- Reduzierung aller maßgeblichen Fahrwiderstände, insbesondere der Fahrzeugmasse durch intelligenten Konzeptleichtbau (Gewichtsreduktion bis zu ca. 150 kg)

Kraftstoffe

- Mittelfristig: Ergänzung der fossilen und zunehmend synthetisch hergestellten Otto- und Dieselmotorkraftstoffe durch Biokraftstoffe der 2. Generation, ergänzt durch Erdgas für spezielle Märkte
- Langfristig: Nutzung von regenerativ hergestelltem Wasserstoff bzw. elektrischer Energie in Abhängigkeit der vorgenannten Evolution der Antriebstechniken.

Fazit

Unter den vorgenannten Annahmen und einer entsprechenden künftigen F+E Aktivität wird davon ausgegangen, dass ein **60 g CO₂/km-Fahrzeug**¹ mittelfristig realisierbar ist. Langfristig scheinen unter der Option alternativer Kraftstoffe niedrigere Werte bzw. CO₂-Neutralität möglich und notwendig.

¹ Basis: Mittelklasse-Fahrzeug, Typ Golf, im NEFZ

6 Literatur

IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Thacher, E. F., B. T. Helenbrook, et al. (2006). "Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck." Proc. IMechE Vol. 221 Part D: J. Automobile Engineering Vol. 221(JAUTO51).

UBA 2006: S. Ramesohl, M. Fishedick, M. Pehnt, W. Knörr, S. A. Schmid, J. Nitsch, P. Viebahn u.a. „Entwicklung einer Gesamtstrategie zur Einführung alternativer Kraftstoffe.“ WI Wuppertal, IFEU Heidelberg, DLR Stuttgart, im Auftrag des UBA (FKZ 203 45 118), Berlin, März 2006 (unveröffentlicht).

Friedrich, H. E. et al: (Juno 2007) atz/mtz-Konferenz, München