

Neue Automobil-Generation mit Hybridantrieb?

Autor(en): **Asper, Hans K.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **104 (1986)**

Heft 29

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76198>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Neue Automobil-Generation mit Hybridantrieb?

Von Hans K. Asper, Zürich

Vor 40 Jahren gab es in der Schweiz etwa 50 000 Motorfahrzeuge; heute zirkulieren über 2 500 000 auf unseren Strassen. Dieser Zunahme von 50:1 steht im gleichen Zeitraum eine Zunahme der Bevölkerung von rund 1,5:1 gegenüber. Die 2,5 Mio Strassenfahrzeuge verbrauchten 1984 rund 3 Mio t flüssiger Treibstoffe, wovon etwa 80% oder 2,5 Mio t jährlich ungenutzt als Abwärme in die Umgebung gelangen.

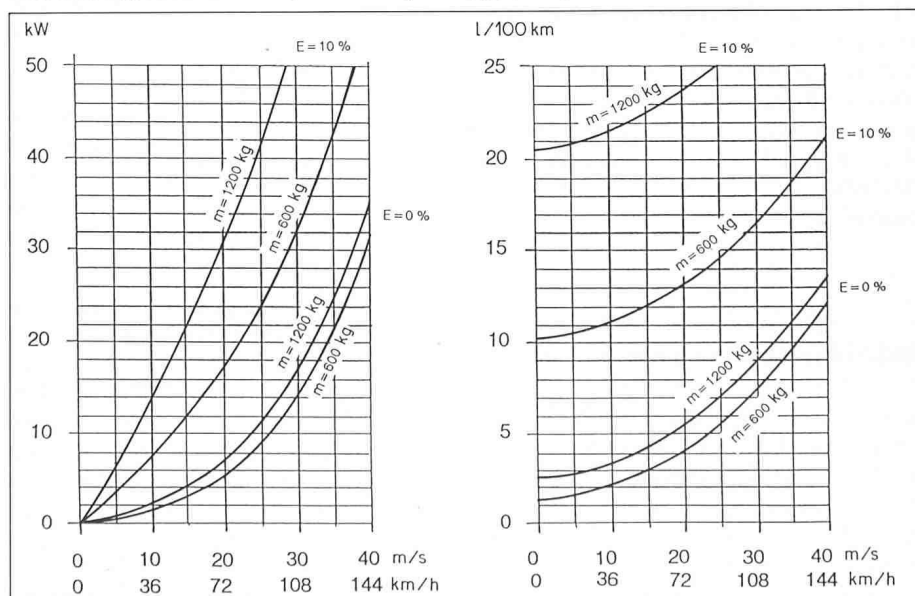
Berücksichtigen wir noch, dass diese Umweltbelastung vorwiegend in unseren Städten und Agglomerationen entsteht (in den USA macht der tägliche Pendlerverkehr rund 80% aller gefahrenen km aus), so verstehen wir, dass angesichts der feststellbaren, zunehmenden Luftverschmutzung der Strassenverkehr als Hauptverursacher angesehen wird.

Bin ein kausaler Zusammenhang zwischen der Luftqualität und dem Strassenverkehr schlüssig nachgewiesen ist, werden möglicherweise noch Jahre vergehen. Auf der technischen Seite brauchen wir jedoch nicht darauf zu warten, um konkrete Verbesserungsvorschläge auszuarbeiten und ohne Verzögern in die Wirklichkeit umzusetzen.

Der heutige Stand der Automobiltechnik mit komfortablen Autos und Vorteilen, die wir alle kennen und kaum mehr aufgeben möchten, ist die Folge von zwei Umständen: Die hohe Energiedichte der flüssigen Treibstoffe von rund 3 kWh/kg (mechanisch nutzbar) und der niedere Preis für Benzin oder Dieselöl von etwa 1.- Fr./l oder 0,85 Fr./kg. Damit kostet die im Auto mechanisch nutzbare Energie 0,28 Fr./kWh.

Ohne die eigentliche Transportdienstleistung eines Automobils reduzieren zu müssen, stehen heute technische Möglichkeiten zur Verfügung, um eine neue Generation von Strassenfahrzeugen zu schaffen, die vor allem auch der Forderung nach reduzierter Umweltbelastung erfüllt. Es sind dies eine Reduktion des Fahrwiderstandes (Gewicht, Formgebung) und eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs (fossil-elektrischer Hybridantrieb).

Bild 1. Antriebsleistung P_a und Treibstoffverbrauch in l/100 km in Funktion der Fahrgeschwindigkeit v für zwei Fahrzeugmassen m (600 bzw. 1200 kg) und zwei Steigungswinkel α (null und 10% bzw. null und 5,7 Grad Steigung) bei konstanter Luftwiderstandsfläche Q_w (0,72 m²)



Wieviel Antriebsleistung braucht ein Automobil?

Physikalisch gesehen leistet der Automobilmotor über die Räder Arbeit zur Überwindung der Rollreibung, von Steigungen und des Luftwiderstandes. Fährt ein Automobil mit einer konstanten Geschwindigkeit v mit einem Steigungswinkel, so berechnet sich die Antriebsleistung P_a zu:

$$(1) P_a = \{F_R + F_H + F_w\} v / 1000 \text{ [kW]}$$

mit F_R = Kraftkomponente der Rollreibung in Fahrtrichtung.

$$(2) F_R = m g r \cos \alpha \text{ [N]}$$

F_H = Gewichtskomponente in Fahrtrichtung

$$(3) F_H = m g \sin \alpha \text{ [N]}$$

F_w = Kraftkomponente des Luftwiderstandes in Fahrtrichtung

$$(4) F_w = 0,5 C_w Q d v^2 \text{ [N]}$$

Mit Hilfe der Gleichungen (2) bis (4) wird die Antriebsleistung nach Gleichung (1):

$$(5) P_a = [m g (\cos \alpha + r \sin \alpha)] \cdot v + 0,5 C_w Q d v^3 \text{ [kW]}$$

mit

m = Masse des Automobils einschliesslich Nutzlast

g = Erdbeschleunigung (= 9,81 m/s²)

α = Steigungswinkel (~5,7 Grad für 10% Steigung)

r = Koeffizient der Rollreibung (= 0,015, ~const.)

v = Konstante Fahrgeschwindigkeit in m/s

C_w = Luftwiderstandsbeiwert

Q = Stirnfläche in m²

d = Spezifische Luftdichte (= 1,23 kg/m³, ~const.)

Die Gleichung (5) zeigt, dass die Antriebsleistung P_a zwei Anteile umfasst, nämlich einen ersten Anteil zur Überwindung der Rollreibung und der Steigung, der von der Fahrgeschwindigkeit v und der Masse m linear abhängig ist. Ein zweiter Anteil bezieht sich auf die Antriebsleistung zur Überwindung des Luftwiderstandes und ist von der dritten Potenz der Fahrgeschwindigkeit v abhängig. Der Luftwiderstand ist abhängig von der wirksamen Luftwiderstandsfläche Q_w , gebildet aus dem Produkt des Luftwiderstandsbeiwert C_w und der Stirnfläche Q des Fahrzeuges. Der Luftwiderstandsbeiwert C_w stellt somit eine allein von der Fahrzeugform bestimmte Kenngrösse dar, während die Stirnfläche Q von der Fahrzeuggrösse her festgelegt ist. Mittlere Werte für Luftwiderstandsflächen Q_w liegen für Kleinwagen bei 0,72 m², für Luxuswagen bei 0,77 m² und für Sportwagen bei 0,67 m². Experimentelle Prototypen eines Autoherstellers erreichten mit 0,32 m² für ein vierplätziges Fahrzeug den wohl niedrigsten Wert für Q_w .

Einfluss der Fahrzeugmasse

Bild 1 zeigt den Verlauf der nach (5) berechneten Antriebsleistung für ein konventionelles Automobil ($Q_w=0,72$) zusammen mit dem Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v mit der Masse m als Parameter für zwei Steigungswerte 0% (horizontal) und 10% (5,7 Grad Steigungswinkel).

Eindeutig erkennbar ist der starke Einfluss der Fahrzeugmasse m auf die Antriebsleistung und damit auf den Treibstoffverbrauch, vor allem bei Steigungen. Bei horizontaler Fahrt wirkt sich die Masse bei tiefen Geschwindigkeiten unterhalb etwa 50 km/h direkt auf den Treibstoffverbrauch aus, während bei

hohen Geschwindigkeiten über 100 km/h die Fahrzeugmasse die Antriebsleistung bzw. den Treibstoffverbrauch nur relativ wenig beeinflusst.

So benötigt ein Automobil von insgesamt 600 (1200) kg Masse auf ebener Strecke bei 50 km/h nur etwa 1,6 (3) kW Antriebsleistung mit einem Treibstoffverbrauch von 1,8 (3,5) l/100 m. Wird dagegen auf einer Steigung von 10% mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h gefahren, so erhöht sich die Antriebsleistung für 600 (1200) kg Gesamtmasse auf 10 (19) kW mit einem Treibstoffverbrauch beträchtlich von 12 (22,5) l/100 km.

Eine Reduktion der Fahrzeugmasse wirkt sich somit bei Steigungen und bei tiefen Geschwindigkeiten unterhalb 50 km/h (d. h. im Stadtverkehr) unmittelbar auf den Treibstoffverbrauch aus.

Einfluss des Luftwiderstandes

Bild 2 zeigt die Abhängigkeit der Antriebsleistung P_a in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit v mit der Luftwiderstandsfläche Q_w als Parameter für zwei Steigungswerte 0% (horizontal) und 10% (5,7 Grad Steigungswinkel) für eine Fahrzeugmasse $m = 1200$ kg.

Aus Bild 2 ist der starke Einfluss des Luftwiderstandes auf die Antriebsleistung bei hohen Geschwindigkeiten zu erkennen. Eine Verdoppelung des Luftwiderstandes fordert bei 72 (144) km/h eine Erhöhung der Antriebsleistung (bzw. des Treibstoffverbrauchs) um 42 (74)%. Bei geringen Geschwindigkeiten unterhalb 50 km/h (d. h. im Stadtverkehr) kann der Einfluss des Luftwiderstandes vernachlässigt werden.

Ein neu zu konzipierendes Stadtfahrzeug sollte deshalb in erster Linie eine geringere Gesamtmasse aufweisen. Moderne Leichtbauweise mit Faserverbundstoffen in Kombination mit Leichtmetallen könnten ähnlich wie in der Flugzeugindustrie wegweisend sein. Dabei dürfen jedoch die Sicherheitsaspekte leichter Strassenfahrzeuge nicht vergessen werden, was im folgenden noch erläutert wird.

Einfluss der Beschleunigung

Bild 3 zeigt die für die Beschleunigung des Fahrzeuges benötigte Leistung für verschiedene Beschleunigungszeiten und verschiedene Fahrzeugmassen.

Aus Bild 3 ist der starke Einfluss der Beschleunigungszeit auf die Antriebsleistung zu erkennen. Werden die Ansprüche für ein Stadtfahrzeug sowohl bezüglich Beschleunigung wie auch der Fahrzeugmasse sinnvoll gestellt, so lässt sich beispielsweise ein Fahrzeug von 600 kg mit 15 kW Antriebsleistung

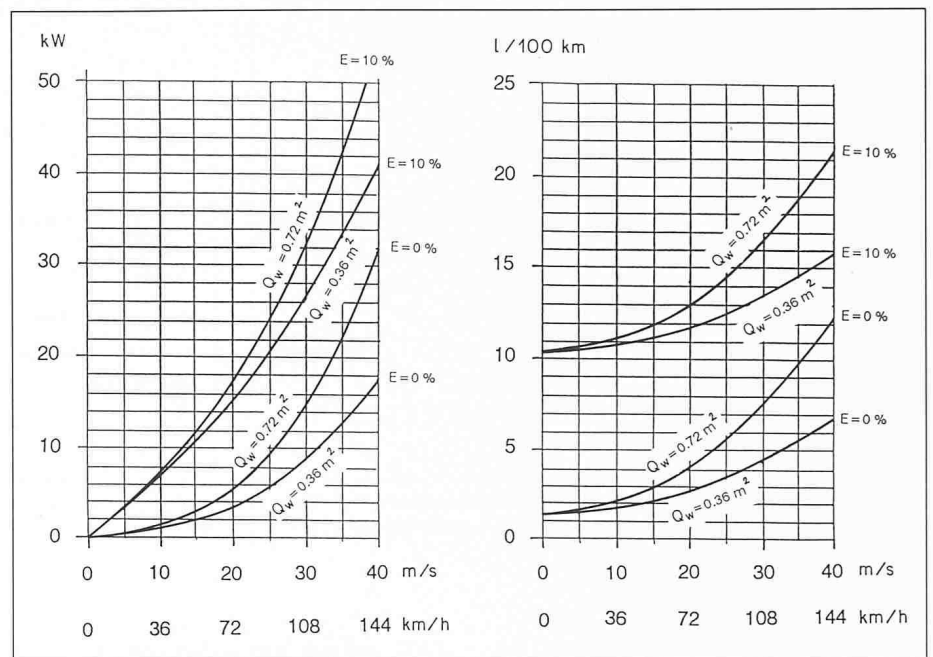
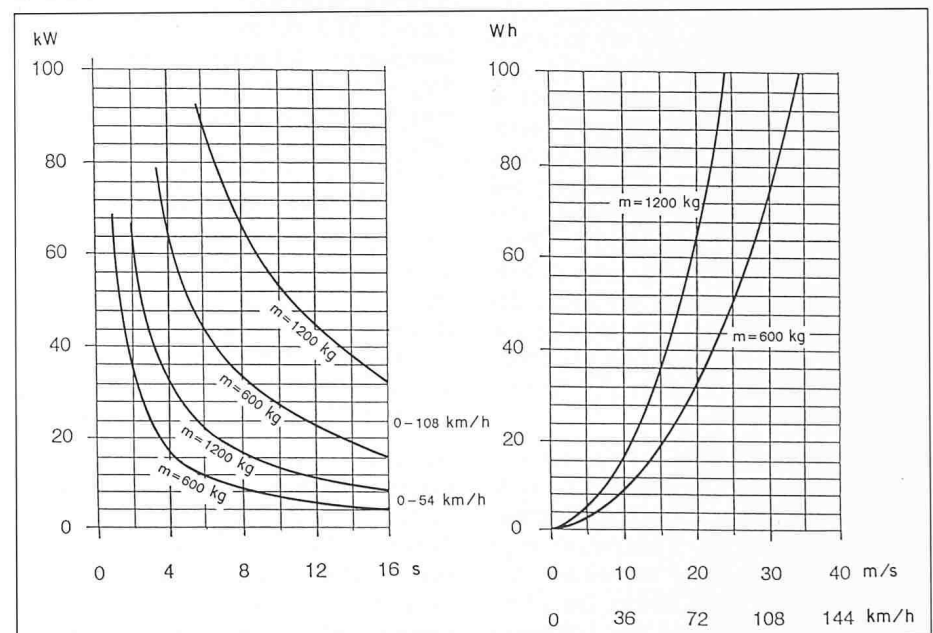


Bild 2. Antriebsleistung P_a und Treibstoffverbrauch in l/100 km in Funktion der Fahrgeschwindigkeit v für zwei Luftwiderstandsflächen Q_w (0,36 bzw. 0,72 m²) und zwei Steigungswinkel α (null und 10% bzw. null und 5,7 Grad Steigung). Fahrzeugauslegung: $m = 600$ kg; $c_w = 0,20$ bzw. 0,40; $Q = 1,8$ m²; $d = 1,23$ kg/m³; $Q_w = c_w Q = 0,36$ bzw. 0,72 m²; $r = 0,015$

Bild 3. Antriebsleistung P_a und Energie während des Beschleunigens in Funktion der Beschleunigungszeit für zwei Fahrzeugmassen m (600 bzw. 1200 kg) und zwei Endgeschwindigkeiten v (54 bzw. 108 km/h) als Parameter



in 4 Sekunden von 0 auf 50 km/h beschleunigen. Die mittlere Beschleunigung beträgt hier 3,5 m/s², während im ECE-Fahrzyklus Beschleunigungen von 1 m/s² auftreten.

Allgemein ist die Beschleunigungsenergie jedoch unerwartet gering und beträgt bei Vernachlässigung des Luftwiderstandes und der Rollreibung für Beschleunigungen von 0 auf 50 km/h nur 16 (32) Wh für 600 (1200) kg. Für die Beschleunigung von 0 auf 100 km/h liegen die entsprechenden Werte bei 64 (128) Wh für 600 (1200) kg.

Fossil-elektrischer Hybridantrieb

Bild 4 zeigt ein Prinzipschema des fossil-elektrischen Hybridantriebes für ein Stadtfahrzeug.

Hybridantrieb bedeutet grundsätzlich einen Antrieb mit verschiedenen, wahlweise benützten Energiequellen. Für Strassenfahrzeuge wurden schon eine Vielzahl von Vorschlägen für Hybridantriebe gemacht, die sich nach Art und Anzahl der Energiequellen (fossile Treibstoffe, elektrische Energiequellen)

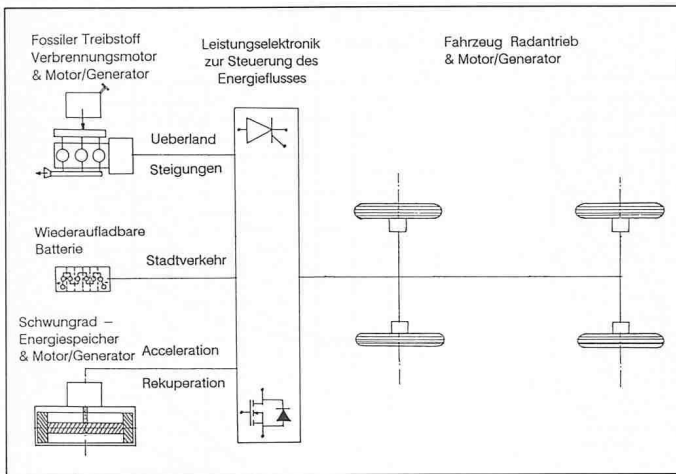


Bild 4. Prinzipschema des fossil-elektrischen Hybridantriebes für ein Stadtfahrzeug mit elektrischer Übertragung der Antriebsleistung auf die Fahrzeug-Radmotoren

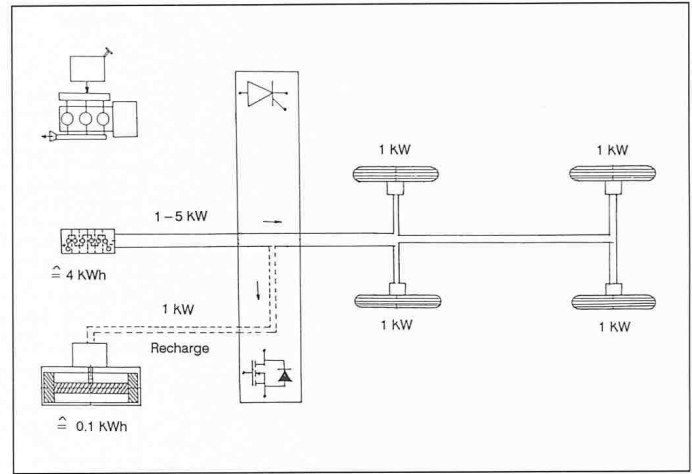


Bild 5. Energiefluss im Hybridantrieb mit Schwungradspeicher als Energiequelle

wie auch in der Art der Kopplung (mechanisch, elektrisch usw.) unterscheiden. Im hier vorgeschlagenen fossil-elektrischen Hybridantrieb sind drei Energiequellen und ein rein elektrischer Antrieb vorgesehen.

Als Energiequellen stehen neben einem Verbrennungsmotor (mit fossilem Treibstoff) ein Satz elektrischer wiederaufladbarer Batterien und ein kompaktes Schwungrad-Speicheraggregat zur Verfügung. Der Verbrennungsmotor ist mit einem elektrischen Motor/Generator gekoppelt und liefert den Antrieb für die Grundlast bei Steigungen und bei hohen Geschwindigkeiten. Der wiederaufladbare Batteriesatz übernimmt die Grundlast im ebenen (stokkenden) Stadtverkehr, während der Schwungradspeicher die Beschleunigung bzw. die Abbremsung des Fahrzeuges mit Rekuperation der Bremsenergie übernimmt.

Fahrzeuge mit fossil-elektrischem Hybridantrieb nützen somit die Vorteile beider Antriebsarten aus. Im Stadtverkehr fahren sie als Elektrofahrzeuge ohne Schadstoffabgabe mit einem Aktionsradius von rund 50 km. Im Überlandverkehr weisen sie bei 100 km/h mit 20 l Treibstoff eine Fahrautonomie von über 300 km auf.

Schwungradspeicher

Bild 5 zeigt den Energiefluss vom Schwungrad zu den Antriebsmotoren bei maximaler Leistungsabgabe während der Fahrzeugbeschleunigung bzw. Leistungsaufnahme während der Rekuperation von Bremsenergie.

Bei einer Beschleunigung (Anfahren bzw. Überholen) wird maximale Lei-

stung, jedoch wenig Energie benötigt. Diese Anforderungen erfüllen moderne hochtourige Schwungräder aus Faserverbund-Werkstoffen mit ihren hohen Leistungsdichten (1 bis 10 kW pro kg Rotormasse) in nahezu idealer Weise, indem sie während weniger Sekunden eine hohe Antriebsleistung abzugeben vermögen. Mit 0,5 m Durchmesser und 0,5 m Höhe könnte ein kompakter Schwungradspeicher mit 5 kg Rotormasse während etwa 12 s eine Maximalleistung von 30 kW abgeben, wobei die dafür gespeicherte Energie nur 100 Wh (entsprechend $30 \text{ kW} \times 12 \text{ s} = 360 \text{ kWs} = 100 \text{ Wh}$) beträgt.

Im «geladenen» Zustand rotiert das Schwungrad mit 24 000 U/Min. Die mit dem Schwungradrotor gekoppelte elektrische Maschine gibt elektrische Leistung ab, indem sie als Generator das Schwungrad abbremst und damit die Drehzahl reduziert.

Aus antriebstechnischen Gründen wird in einem Drehzahlbereich von 1:2 gearbeitet, d.h. das Schwungrad ist mit 12 000 U/Min. «entladen». Während der nachfolgenden Aufladung arbeitet die elektrische Maschine des Schwungrades als Motor. Bei der Rekuperation von Bremsenergie wird wieder Energie mit maximaler Bremsleistung von ebenfalls 30 kW in das Schwungrad zurückgeführt. Von der im Schwungrad gespeicherten Bremsenergie stehen für eine spätere Beschleunigung etwa 70 bis 80% wieder zur Verfügung. Die fehlenden 20 bis 30% werden aus der Batterie nachgeliefert.

Als Beispiel zeigt Bild 8 ein Versuchsschwungrad der Forschungsgruppe Energiespeicherung.

Der aus Glasfasergewebeband in Form einer Scheibenwicklung hergestellte Schwungradrotor hat einen Durchmesser von 260 mm und ist für den Dreh-

zahlbereich von 12 000 bis 24 000 U/min ausgelegt. Das unter Vorspannung auf die Metallnabe gewickelte Band ist mit einem Kunstharz getränkt und im Vakuum ausgehärtet. Der Rotor läuft in einem evakuierten Schutzgehäuse, damit die bei hohen Drehzahlen beträchtlichen Luftreibungsverluste vermieden werden.

Die ETH-Rotoren sind mit Metallnaben ausgeführt, die eine Elastomerschicht enthalten. Aufgabe der Elastomerschicht ist es, bei Restunwuchten mit einer Rückstellkraft den Rotor zu zentrieren. Dieser Selbstzentrierungseffekt wurde beim ETH-Rotor beobachtet, gleichzeitig wurde aber auch bei sehr hohen Geschwindigkeiten das Einsetzen von Instabilitäten festgestellt. Diese Instabilitäten sind charakteristisch für rotierende Systeme mit innerer und äusserer Dämpfung; sie sind jedoch gefährlicher als ein explosionsartiges Bersten des Rotors. Faserverstärkte Kunststoffrotoren explodieren allerdings äusserst gutmütig, indem nur zwei bis fünf Prozent der kinetischen Energie von einem Schutzgehäuse absorbiert werden müssen. Die übrigen 95 bis 98 Prozent werden als Deformationsenergie der einzelnen Faser in Wärme umgewandelt.

Bei geeigneter Wahl der Dämpfungsparameter kann aufgrund bisheriger Messungen die kritische Drehzahl, bei der Instabilitäten einsetzen, über den Arbeits-Drehzahlbereich hinaus verlegt werden, so dass ein stabiler Betrieb gewährleistet ist. Die Glasgewebeband-Rotoren halten maximale Umfangsgeschwindigkeiten von 500 m/s aus, was bei einem Durchmesser von 260 mm einer maximalen Drehzahl von über 40 000 U/min entspricht. Die nutzbare Energiedichte beträgt 15 W/kg Rotormasse. Damit wird ein Rotor für 100 Wh Energieinhalt etwa 7 kg schwer.

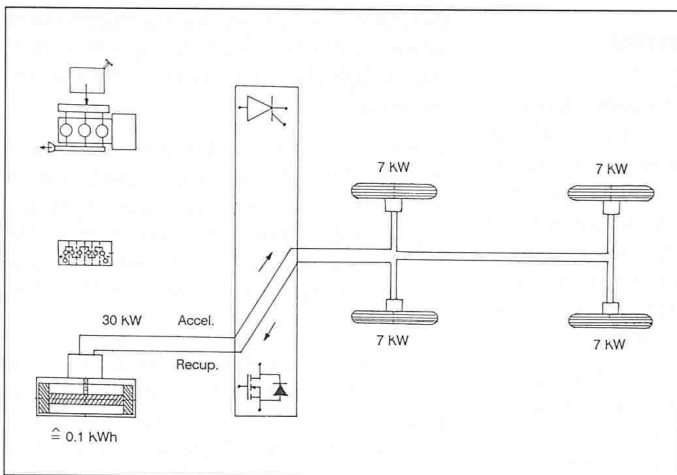


Bild 6. Energiefluss im Hybridantrieb mit Energiebezug aus den wiederaufladbaren Batterien

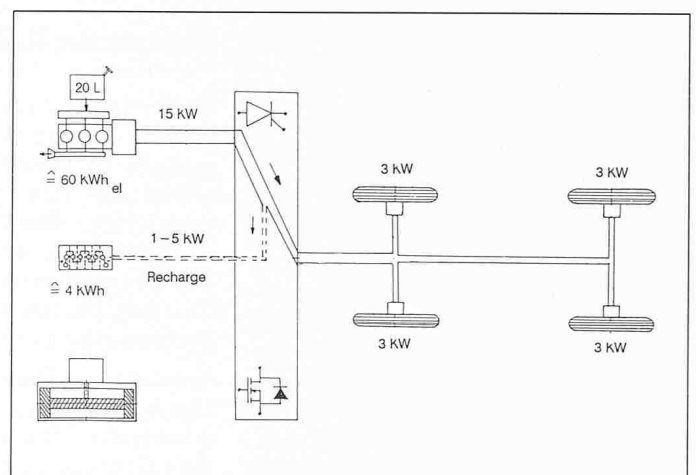


Bild 7. Energiefluss im Hybridantrieb mit Energiebezug aus dem fossilen Treibstoff über Verbrennungsmotor und elektrischen Generator

Warum nicht nur Schwungradantrieb?

Ein wegweisendes Beispiel eines Strassenfahrzeuges mit Schwungradspeicher ist der «Girobus» aus den 50er Jahren der früheren Maschinenfabrik Oerlikon (heute Brown, Boveri & Cie AG, Oerlikon). Im Gegensatz zum vorliegenden Konzept lieferte der Schwungradspeicher des Girobusses die gesamte Fahrenergie für eine (ebene) Fahrstrecke von etwa 6 km. Zur Speicherung von nutzbaren 6 kWh wurde ein Stahlrotor von 1,5 t benötigt (vgl. Schweizerische Bauzeitung, H. 38/1950, S. 533). Zusammen mit dem evakuierten Schutzgehäuse und dem Motor/Generator betrug die Masse des Gesamtsystems etwa 2 t, d. h. die Energiedichte lag bei rund 3 Wh/kg.

Das Konzept des Girobusses wurde jedoch aus verschiedenen Gründen wieder fallengelassen, u. a. wegen Lagerproblemen, Betriebsproblemen sowie infolge der Konkurrenz der konventionellen Autobusse mit billigem fossilem Treibstoff. Neben den erwähnten Gründen bestehen Vorbehalte gegenüber Schwungradsystemen infolge der potentiellen Berst- bzw. Explosionsgefahr. Massive Stahlrotoren stellen diesbezüglich ein hohes Risiko dar, welches nur mit genügend starken Schutzgehäusen und/oder mit Überdimensionierung (Erhöhung des Sicherheitsfaktors) beherrschbar ist.

Selbst bei einer zehnfach höheren Energiedichte (20 bis 30 Wh/kg gegenüber 3 Wh/kg beim Girobus) ist es nicht sinnvoll, die gesamte Fahrenergie in einem Schwungradsystem zu speichern und mitzuführen. Für mobile Anwendungen wird die Grundlastenergie bei geringer Geschwindigkeit im Stadtverkehr vorteilhafter aus wiederaufladbaren Batterien bezogen.

Wiederaufladbare Batterien

In Bild 6 ist der Energiefluss im Hybridantrieb dargestellt, wobei der Energiebezug aus den wiederaufladbaren Batterien erfolgt.

Überlegungen für einen modernen Fahrzeug-Hybridantrieb deuten darauf hin, dass mit einer Aufgabenteilung zwischen Schwungrad, Batterie und Verbrennungsmotor eine optimale Reduktion an Masse erzielbar ist.

Herkömmliche Elektroautomobile weisen Batteriesätze bis zu 400 kg und mehr auf. Der Grund dafür ist, dass die bekannte wiederaufladbare Bleibatterie mit einer Energiedichte von etwa 25 Wh/kg nur eine beschränkte Leistungsdichte von etwa 50 W/kg aufweist (im Vergleich dazu hat ein modernes Schwungradspeichersystem 0,5 bis 1 kW/kg). Zur Abgabe von 20 kW Spitzenleistung sind somit rund 400 kg Bleibatterien nötig mit einer Energiekapazität von 16 kWh.

Hohe Leistungsabgabe beeinträchtigt jedoch die Lebensdauer der Batterie, die im Maximum etwa 800 Lade/Entladezyklen erreicht, bei Investitionskosten von etwa 100 Fr./kWh.

Das vorgeschlagene Stadtfahrzeug mit Hybridantrieb fährt demzufolge in der Stadt ausschliesslich als Elektrofahrzeug. Dazu sind für Fahrzeugmassen von 600 bis 1200 kg etwa 1 bis 2 kWh elektrischer Energie nötig, was rund 40 bis 80 kg herkömmlicher Bleibatterien erfordert.

Warum nicht nur Batterie?

Wie erwähnt, ist es nicht vorteilhaft, für den Elektroantrieb eines Stadtfahrzeuges ausschliesslich Batterien zu ver-

wenden. Die genannten 40 bis 80 kg Bleibatterien ermöglichen im innerstädtischen (ebenen) Verkehr eine Fahrautonomie von nur etwa 36 km. Ausserhalb der Stadt kommt der im vorliegenden Hybridantrieb ebenfalls vorgeschlagene Verbrennungsmotor zum Einsatz zur Erhöhung der täglichen Fahrautonomie.

Der wohl wichtigere Grund aber ist darin zu sehen, dass mit den 40 bis 80 kg Bleibatterien und der damit nutzbaren Leistungsdichte von gegenwärtig maximal 50 W/kg nur 0,8 bis 1,6 kW Spitzenleistung bezogen werden könnte. Diese Leistung ist aber um mindestens einen Faktor 10 zu niedrig. Als Ergänzung liefert deshalb der Schwungradspeicher während 5 bis 10 Sekunden die hohe Antriebsleistung während der Fahrzeugbeschleunigung.

Verbrennungsmotor

Der hohe Energieinhalt des fossilen Treibstoffes, welcher mittels eines Verbrennungsmotors mit etwa 3 kWh/kg Brennstoff genutzt werden kann, ermöglicht im Hybridantrieb einerseits eine Erhöhung der Fahrautonomie bis zu 500 km, andererseits eine Bewältigung längerer Steigungen (z. B. bei Passfahrten usw.). Ebenso ist jedoch ein abgasfreier Elektrofahrmodus im Stadtverkehr möglich.

Der Verbrennungsmotor in Verbindung mit einem Hybridantrieb muss nicht mehr auf Spitzenleistung ausgelegt werden, da diese vom Schwungrad geliefert wird; sie wird jeweils nur während weniger Sekunden benötigt. In erster Näherung kann die Motorleistung um 50% reduziert werden; sie kann für leichtere Stadtfahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von 600 bis 700 kg (ein-

schliesslich Fahrer, Mitfahrer und Gepäck) entsprechend auf etwa 15 kW festgelegt werden.

Bild 7 zeigt den Energiefluss beim Hybridantrieb mit Energiebezug aus dem fossilen Treibstoff über den Verbrennungsmotor und den damit gekoppelten elektrischen Generator.

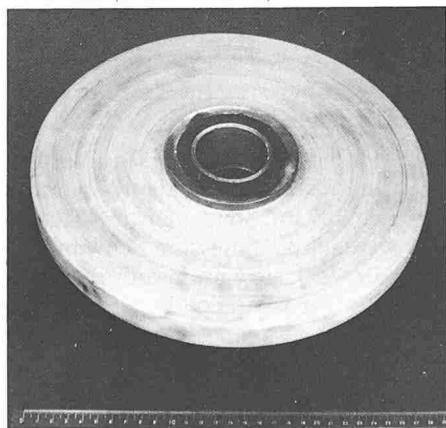
Im Gegensatz zu den Verbrennungsmotoren in herkömmlichen Strassenfahrzeugen kann im vorgeschlagenen Hybridantrieb der Verbrennungsmotor auf seinem optimalen Arbeitspunkt bei konstanter Drehzahl betrieben werden. Die Abgasemission kann dabei gegebenenfalls ohne Katalysator auf minimale Werte gebracht werden. Ausser Dieselmotoren könnte in Zukunft auch ein Stirlingmotor zur Anwendung kommen, der als externer Verbrennungsmotor eine vollständige Verbrennung des Flüssigtreibstoffes ermöglicht. Darüber hinaus sind zurzeit Entwicklungen im Gange, bei welchen Verbrennungsmotoren ihre Leistung unmittelbar in elektrischer Form abgeben.

Warum nicht mehr nur Verbrennungsmotor?

Die zunehmende Umweltbelastung und Luftverschmutzung in den Städten zwingt uns heute, in allen Bereichen der fossilen Brennstoffnutzung neue Wege zu suchen und Substitutionsmöglichkeiten zu finden.

Im individuellen Strassenverkehr könnten Fahrzeuge mit fossil-elektrischem Hybridantrieb eine technische Lösung bringen, die dank ihrer Flexibilität in echte Konkurrenz zu neuen, konventionellen Automobilen treten könnte.

Bild 8. Beispiel eines Versuchsschwungrades der Forschungsgruppe Energiespeicherung. Wickelkörper aus Glasfasergewebeband mit selbstzentrierender Nabe (Elastomerschicht)



Elektrischer Radantrieb

Der millionenfach bewährte konventionelle Radantrieb vom Verbrennungsmotor über Getriebe und Differential lässt sich im vorliegenden Hybridantrieb, obwohl er kostengünstig ist, nicht ohne weiteres übernehmen. Der rein elektrische Antrieb wurde deshalb gewählt, um die Rekuperation der Bremsenergie zu ermöglichen.

Beim starken Bremsen mit hoher Verzögerung wird mit den als Generatoren arbeitenden Radmotoren eine hohe Bremsleistung in den Schwungradspeicher zurückgeführt. Die dabei gespeicherte Energie steht anschliessend zu rund 70 bis 80% zur nachfolgenden Beschleunigung wieder zur Verfügung. Bei längeren, mit geringer Neigung abfallenden Strecken wird bei mässiger Fahrgeschwindigkeit (und damit mässiger Bremsleistung) die Bremsenergie direkt den Batterien zugeführt.

Bild 9 zeigt eine Skizze eines an der ETH Zürich von der Forschungsgruppe Energiespeicherung konzipierten Stadtfahrzeuges mit fossil-elektrischem Hybridantrieb.

Kostenbetrachtungen

Die nachfolgenden Kostenbetrachtungen können nur Grössenordnungen über Investitionen und Betrieb des vorgeschlagenen Stadtautos mit fossil-elektrischem Hybridantrieb geben. Präzisere Zahlen und Ergebnisse könnte aber eine wissenschaftliche Studie liefern.

Von heutigen, konventionellen Stadtfahrzeugen unterscheidet sich die vorgeschlagene Lösung eines Stadtautos mit Hybridantrieb weitgehend. Bekannte Elemente wie Differential, Getriebe, Kupplung, Vergaser usw. fallen weg, während neu elektrische Komponenten wie Radmotoren, ein kleinerer Verbrennungsmotor mit elektrischem Motor/Generator, Schwungradspeicher, wiederaufladbare Batterien sowie die Kontrollelektronik zur Steuerung des Energieflusses dazukommen. Darüber hinaus sind aber die zur Sicherheit des Insassen benötigten Komponenten wie Mehrkreis-Bremssystem, Beleuchtung, Aufprall-Deformationszonen usw. ebenfalls vorgesehen.

Die Anschaffungskosten werden nach den vorliegenden Schätzungen gegenüber einem konventionellen Stadtfahrzeug je nach Fahrzeuggrösse um bis zu Fr. 5000.- höher liegen. Andererseits kann dank der besseren Energienutzung mit deutlich geringeren Betriebskosten gerechnet werden. Diese Min-

derkosten lassen sich kapitalisieren und könnten die erhöhten Anschaffungskosten möglicherweise gerade etwa kompensieren.

Die reinen Treibstoffkosten eines konventionellen Stadtautos liegen unter der Annahme einer jährlichen Fahrleistung von 10 000 km (wovon 80% im Stadtverkehr) mit 9 l/100 km und einem Treibstoffpreis von 1,00 Fr./l bei 900 Fr. pro Jahr.

Das hier vorgeschlagene Stadtfahrzeug mit Hybridantrieb benötigt demgegenüber im Stadtverkehr elektrische Energie entsprechend 3 l/100 km. Damit belaufen sich die Treibstoffkosten nur noch auf 300 Fr. für 10 000 km/Jahr und die jährlichen Minderkosten auf 600 Fr.

Bei unveränderten Treibstoffpreisen liessen sich mit 600 Fr. jährlich bei 20 Jahren Amortisationszeit (üblich für mechanisch-elektrische Komponenten) und einem Zinssatz von 5% etwa Fr. 6000.- kapitalisieren. Da ein Automobil nach einer Lebensdauer von 7 bis 10 Jahren bloss etwa 2000 (!) Betriebsstunden aufweist, wäre es denkbar, die Antriebskomponenten des Hybridantriebs beispielsweise im Austausch weiterzuverwenden, mindestens für 4000 Betriebsstunden bzw. etwa 14 bis 20 Jahre. Auf die Lebensdauer eines konventionellen Autos bezogen, würden damit die Mehrkosten mindestens halbiert.

Diese Übersichtsrechnung zeigt, dass in erster Näherung die erhöhten Anschaffungskosten durch die kapitalisierten Minderkosten der reduzierten jährlichen Treibstoffauslagen für das Stadtfahrzeug mit Hybridantrieb kompensiert werden. In diesen Kostenüberlegungen sind jedoch zusätzliche Kostenreduktionen dank verminderter Umweltbelastung nicht berücksichtigt. Sie könnten im Rahmen einer noch durchzuführenden wissenschaftlichen Studie umfassender ermittelt werden.

Künftige Forschungsarbeiten

Ohne zunächst auf die Wirtschaftlichkeit zu schauen, könnten Prototypen des oben skizzierten Stadtfahrzeuges mit Hybridantrieb im Computer modelliert werden. Der Hybridantrieb könnte sodann im Labor auf einem Prüfstand im Massstab 1:1 aufgebaut werden, wobei die Trägheit der Fahrzeugmasse (wirksam beim Beschleunigen und Bremsen) durch rotierende Schwunmassen nachgebildet wird. Verschiedene Fahrzyklen (u. a. Beschleunigen, Abbremsen mit Energierekuperation) sowie städtische Fahr-

zyklen (u. a. ECE-Fahrzyklus) könnten auf dem Prüfstand simuliert werden, um schlüssige Aussagen über Fahreigenschaften, Energie-(bzw. Treibstoff-) Verbrauch und über die Effizienz der Rekuperation von Bremsenergie mit dem Schwungradspeicher zu ermöglichen.

Mit diesen Ergebnissen könnte gemeinsam mit der Industrie ein mögliches weiteres Vorgehen, z. B. die Realisation eines Prototyps, überlegt und ausgearbeitet werden. Wie bereits erwähnt, sind dabei die Sicherheitsaspekte von Anfang an zu berücksichtigen.

Benötigen wir eine neue Generation von Stadtfahrzeugen?

Im technischen Bereich setzt sich langfristig immer die elegantere Lösung durch.

Im vorliegenden Fall bedeutet dies ein Stadtfahrzeug mit annähernd gleicher Transportdienstleistung (Gutes Beschleunigungs- und Steigvermögen, Spitzengeschwindigkeit von 130 km/h) jedoch bedeutend geringerem Energie- bzw. Treibstoffverbrauch und erheblich reduzierter Umweltbelastung durch schädliche Abgase vor allem in den Städten.

Allein durch Reduktion der Fahrzeugmasse lässt sich der Verbrauch an fossilen Treibstoffen bei konventionellen Fahrzeugen erheblich senken (Sparpotential 30 bis 50%). Eine weitere Senkung des Treibstoffverbrauches bringt der vorgeschlagene fossil-elektrische Hybridantrieb, vor allem im Stadtverkehr, verbunden mit einer entsprechend geringeren Immission an Schadstoffen (zusätzlich erreichbares Sparpotential 20%).

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen eine neue Generation von Stadtfahrzeugen in den nächsten 5 bis 10 Jahren realisiert werden könnte, mit interessanten Eigenschaften, wie elektrischem, immissionsfreiem Fahrmodus im Stadtverkehr (Autonomie rund 50 km), hohen Überlandgeschwindigkeiten und gutem Steigvermögen (Autonomie etwa 300 km) sowie Treibstoffeinsparungen von bis zu 60%.

Drei Voraussetzungen müssten zum Erreichen dieses Ziels erfüllt sein. Sie liegen im technischen Bereich, im Bereich des Fahrzeugbenützers sowie im politischen Bereich.

Die dargelegten technischen Voraussetzungen lassen sich zusammenfassen:

□ Reduktion der *Fahrzeugmasse* (ohne Nutzlast) um mindestens einen Faktor 2 auf 400 bis 500 kg Leergewicht;

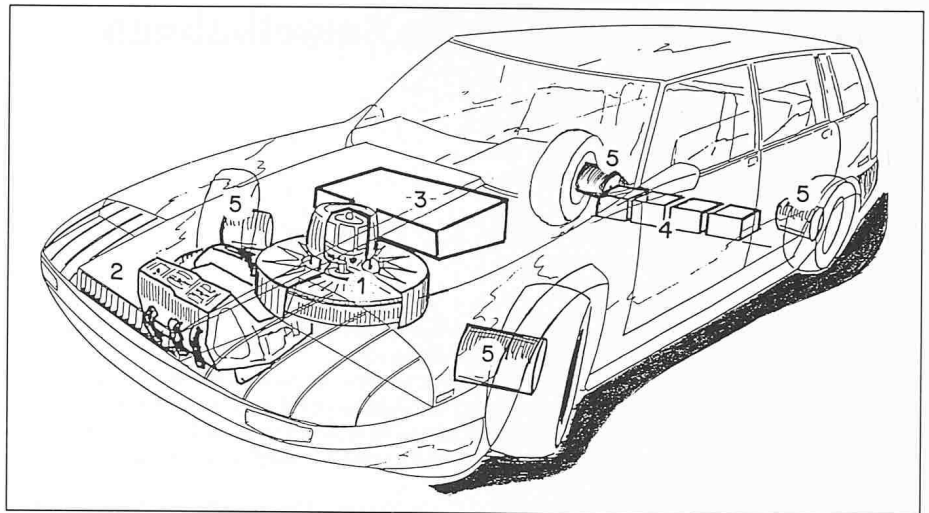


Bild 9. Skizze eines Stadtfahrzeuges in Leichtbauweise mit fossil-elektrischem Hybridantrieb. 1 Kompaktes Schwungrad-Speicheraggregat, 2 Verbrennungsmotor mit elektrischem Motor/Generator, 3 Steuerelektronik, 4 Satz von wiederaufladbaren elektrischen Batterien, 5 Radelektromotoren bzw. -generatoren zur Rekuperation der Bremsenergie

□ Fossil-elektrischer *Hybridantrieb* mit drei Energiequellen, nämlich einem kompakten Verbrennungsmotor mit Generator (rund 70 kg) zur Deckung der Grundlast von 10 bis 20 kW, einen kompakten Schwungradspeicher (rund 50 kg) zur Deckung der 15 bis 30 kW Spitzenleistung sowie einen Satz wiederaufladbarer Batterien (rund 50 kg) für den Stadtverkehr bei tieferen Geschwindigkeiten.

□ Effiziente Rekuperation der Bremsenergie (mit 70 bis 80% Wirkungsgrad).

Die Voraussetzung, welche der *Fahrzeugbenützer* mitbringen sollte, ist die Bereitschaft, seine Anforderungen an ein künftiges Stadtfahrzeug bezüglich Fahrleistung und Fahrkomfort im Hinblick auf die (vor allem in den Städten) zunehmende Schadstoffbelastung der Umwelt etwas zu reduzieren. Eine Reduktion der Fahrleistung könnte für den Benutzer beispielsweise bedeuten, dass es ihm genügt, anstatt in 8 Sekunden in etwa 16 Sekunden von 0 auf 100 km/h zu beschleunigen.

Mit dem Verständnis der oben ausgeführten Zusammenhänge müsste ein zukünftiger Benutzer eines Stadtfahrzeuges bereit sein, für die täglichen Pendlerfahrten ein leichteres Fahrzeug mit geringeren Aussen-(und Innen-) Abmessungen, jedoch mit vier Plätzen und genügend Raum für Gepäck usw. zu fahren.

Die Voraussetzung im *politischen Bereich* ist ein intensiverer politischer Wille zur Bereitstellung der dafür notwendigen finanziellen Mittel. Unsere Industrie kann und muss diese Mittel nicht aufbringen, da sie im Automobilbau nicht tätig ist. Mit entsprechenden Forschungsgeldern könnten vor allem die Forschungsstätten an den Hoch-

schulen, den höheren Lehranstalten usw. die technische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten aufnehmen.

Die dafür erforderlichen finanziellen Mitteln sind im Vergleich zu den übrigen im Strassenverkehr aufgewendeten Mitteln verschwindend klein. Denn unsere Volkswirtschaft gab im Jahr 1985 3500 Mio Fr. für Treibstoffe im Sektor Strassenverkehr aus. Gelänge es uns, auch nur 30% dieser Treibstoffkosten einzusparen, so würden damit jährlich 1000 Mio Fr. freigestellt und stünde unserer Volkswirtschaft zusätzlich für neue Investitionen usw. zur Verfügung. Der geschätzte Forschungsaufwand von 20 Millionen über die nächsten 5 bis 10 Jahre würde sich also lohnen.

Investitionen in dieser Richtung dürften sich jedoch auch für unsere Industrie mit Diversifikation, Erschliessung neuer Märkte sowie der Erhaltung oder Schaffung von Arbeitsplätzen durchaus bezahlt machen.

Dieses Ziel könnte eine Herausforderung und Auftrag an unsere Politiker sein, mit politischem Willen für solche neuen Forschungs- und Entwicklungsbereiche die notwendigen finanziellen Mittel bereitzustellen. Auf der technischen Seite sind neue Ideen, engagierte Forscher, Techniker und Mechaniker sowie gut ausgerüstete Infrastrukturen in unseren Forschungsstätten vorhanden.

Adresse des Verfassers: Dr. Hans K. Asper, Leiter der Forschungsgruppe Energiespeicherung, Institut für Elektrische Maschinen, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Die Mitarbeiter an diesem Projekt der Forschungsgruppe Energiespeicherung des Institutes für Elektrische Maschinen an der ETH Zürich sind: dipl. Ing. T. Grieder, dipl. Ing. H. J. Riesen und Ing. HTL J. Widmer.