



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Schwerpunkt Energietechnik
Institut für Technische
Thermodynamik

Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung (STB)

Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieben mit Brennstoffzellen und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor

On the Global Environmental Benefits by Using Electric Drive
with Fuel Cells, Battery Storage or Hybrid Systems
as Compared to Advanced Conventional Vehicle Systems
with IC Engine Drive
(Extended Summary)

DLR-IB-200044417400

C. Carpetis

Inhaltsverzeichnis

	Seite
<u>Extended Summary</u>	1
<u>1. Einleitung</u>	19
<u>2. Ausgangssituation</u>	19
<u>3. Übersicht über einige der Resultate: Vergleich der energetischen Wirkungsgrade</u>	21
<u>4. Die Simulationsprogramme für die detaillierten Konzeptvergleiche: Grundlagen und Vorgehensweise</u>	30
4.1 Das Simulationsprogramm	30
4.2 Fahrzyklen, Referenzfahrzyklus und Referenzfahrzeug	32
4.3 Systemvariablen und spezifische Daten: Berücksichtigung der neuesten Entwicklungen	34
4.4 Spezifische Emissionen und spezifischer Primärenergiebedarf der Kraftstoffe	40
4.5 Kraftstoffe und Energiespeicher an Bord (Kraftstofftanks)	44
<u>5. Resultate der Anwendung der Simulationsmethode mit Referenzdaten (Referenzfahrzyklus und Referenzfahrzeug) und Kraftstoffen fossilen Ursprungs</u>	47
5.1 Eine allgemeine Art der Darstellung: Vergleiche der konventionellen und der elektrischen Antriebe	48
5.2 Gegenüberstellung des Energieverbrauchs und der Emissionen konventioneller und alternativer Antriebskonzepte	62
5.3 Bewertung der Ergebnisse	67
<u>6. Vergleiche von fortschrittlichen Fahrzeugen und Konzepten: Sparmotoren in der Praxis, Prototypen mit Brennstoffzellenantrieb und Hybridkonzepte beim gegenwärtigen Stand der Kraftstoffversorgung (fossile Primärenergie)</u>	68
6.1 Stand der Technik: Vergleich von zwei Antriebskonzepten für Personenwagen der Mittelklasse	68
6.2 Die Chancen der „kleinen Klasse“ (Leichtfahrzeuge)	72
6.3 Hybridisierung von Personenwagen und Bussen	73
6.3.1 Hybrid-Personenkraftwagen	75
6.3.2 Hybrid-Busse	76

<u>7. Die Vorteile des elektrischen Antriebes in zukünftigen Systemen mit nichtfossiler Primärenergieversorgung: Der Verbrennungsmotor gerät in Bedrängnis</u>	80
<u>8. Eine Erweiterung der Betrachtungen in den Bereich des Kostenvergleichs und der Punktbewertung</u>	87
8.1 Einige Betrachtungen zur Kostensituation	88
8.2 Ein Versuch der Bewertung durch Punktgebung	93
<u>9. Diskussion der Resultate und Schlussfolgerungen</u>	98
9.1 Die Folgerungen aus der Untersuchung	100
9.2 Kommentare	101
9.3 Schlusswort	103
<u>10. Anhang: Zu den analytischen Beziehungen zwischen den Hauptparametern</u>	104
10.1 Die relevanten Parameter und Gleichungen	105
10.2 Die Relevanz des auf die Nutzlast bezogenen Wirkungsgrades der Antriebssysteme (oder: die Unzulänglichkeit einfacher Wirkungsgradketten als Vergleichskriterion)	108
10.3 Personenkraftwagen (Pkw) und die alternativen Antriebsarten: Das Problem der Kraftstoffspeicherung an Bord als Kriterium bei der Implementierung	109
10.4 Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellenantriebes für Pkw als Funktion der Antriebsmasse und Vergleich zum Verbrauch von wasserstoffangetriebenen Pkw mit Verbrennungsmotor zur Ermittlung des „break-even“-Wertes	114
<u>Literatur</u>	116

Verzeichnis der Abbildungen

<u>Abbildung Nr.</u> (Figure No.)	<u>Seite Nr.</u> (Page No.)
1	49
2	50
3	51
4	52
5	53
6	54
7	55
8	56
9	63
10	65
11	66
12	70
13	74
14	77
15	78
16	79
17	81
18	82
19	84
20	86
21	91
22	92
23	94
24	99
25	111
26	112
27	115
28	116

Verzeichnis der Tabellen

<u>Tabelle Nr.</u> (Table No.)	<u>Seite Nr.</u> (Page No.)
1	23
2	23
3	25
4	26
5	27
6	28
7	35
8	37
9	38
10	41
11	42
12	43
13	44
14	46
15	60
16	61
17	69
18	90
19	95
20	97
21	106

Extended Summary

The following summary is intended to give a quick overview of this study by commending the highlights of each chapter and of the contents of the tables. For the same purpose the captions of the figures are also given in English and the symbols or shortcuts used are explained in the captions.

Chapter 1 is an introduction explaining the target of the study as to be the assessment of the global advantages of alternative concepts for vehicle drives (reduction of greenhouse-emissions and primary energy demand) in comparison to conventional drives. All alternatives under discussion have in common that an electric drive (as single or optional power train) is used in the vehicle along with electrochemical energy converters like fuel cells and/or batteries.

In **Chapter 2** the present situation is briefly described. Although the usual internal combustion (IC) engines become very efficient in fuel consumption and the emissions have been reduced drastically, there is a need for further improvements and for preparations to be made for the post-oil era and the introduction of the ultimately following non-fossil era. But every shift (first to natural gas, then to hydrogen or other natural gas derivatives, and finally to regenerative fuels) means solving severe infrastructure problems and problems in connection with fuel storage on board. Furthermore, additional steps of energy conversion (like natural gas to methanol to hydrogen to electricity to mechanical energy, as in the case of a methanol powered vehicle with fuel cells) may abolish the merit of the high efficiency of a single step (in this case the high efficiency of the fuel cell itself). Thus, aiming at global improvements with new drive concepts involves the whole energy chain and the benefits must make up for particular problems of the concepts like on-board storage, vehicle range, costs and complexity.

Chapter 3 presents a rather simplistic overview on the expected energy efficiencies of several drive concepts of interest. This presentation makes it possible to recognize some basic interrelations and limitations before proceeding to the numerical simulation of the following chapters.

Table 1 depicts the optimal point efficiency chain from the chemical energy of the fuel to the wheels of a drive powered with IC-engine. Table 2 contains the corresponding chain for the system with fuel cell drive. The first two positions represent the conversions

- chemical energy => thermal energy => mechanical energy for the IC-engine
- chemical energy => electrical energy => mechanical energy for the fuel cell system

The second step (electrical energy => mechanical energy for the fuel cell vs. thermal energy => mechanical energy for the IC-engine) brings about the whole bargain for the fuel cell. The remaining conversion steps in the chains, which are responsible for compression, internal, external and parasitic losses, are responsible together for the same amount of losses in both systems (although the single efficiency values are notably different for each system). As a result, we can expect the efficiency (tank to wheels) to be basically by a factor up to 1.4 higher with a hydrogen powered fuel cell drive.

Table 3 contains data for the whole efficiency chain from the primary energy to the wheels. The partial efficiency positions are not identical with those of the previous tables but they are now associated with the physical sections or units within the chain. They are marked with the following shortcuts on the side of the symbol for efficiency.

FPD: fuel production and distribution

FCSt: fuel cell stack

FREF: fuel reformer on board

TMECH: from tank (or reformer, if applicable) output to mechanical energy

EMOT: electric motor

BATT: for battery round-trip

EPTM: for power management and transmission

TOT: for total efficiency

Values are meant to be mean values during the drive cycle.

In Table 4 the total efficiency („well to wheels“) is calculated for several cases of interest using the values of Table 3. There are two cases shown with IC-engine (VM in the table) and for electric vehicles (EF in the table). The later include cases with fuel cells (BZ) powered by means of hydrogen, benzine, or methanol (third to fifth row). Hydrogen and methanol are supposed to be produced from natural gas, benzine (gasoline) or methanol are reformed on board. In the last row the case of an electric vehicle with batteries is shown to have the highest efficiency, but its range must be short for usual payload to vehicle mass ratio. It is interesting that for all other cases with such different concepts and technologies the total efficiencies should be expected to be in the relatively narrow region between 20 % and 25 %.

In Table 5 it is shown that some important questions can be answered and some relationship can be clearly seen even with the simplistic data of the Tables 3 and 4. So, for example, if regenerative fuels (hydrogen or methanol) are available, the best energetic efficiencies should be expected with the fuel cell drive (but this is not the case if fossil fuels are to be used).

The results shown in Table 6 attempt to highlight the energy chains relevant traffic and to compare the drive systems and their efficiencies. There are five chains depicted as rows starting on the left hand side („Energiekette“) with the energy source (mineral oil, natural gas, biomass, solar sources and finally coal and nuclear) in the second column. Following an intermediate step (fuel production and distribution, eventually with reformation or electricity production), we mark the energy carrier („Energieträger 0“) as the fuel which is already *usable* for traffic drives but can also undergo further conversions mainly in order to be usable with novel drive concepts or in order to avoid storage problems on board. The possible conversions of this „basic fuel“ are shown for the rest of the chains: they are reformations to other fuels (marked in italics for reformation on board) or electrolysis, liquefaction („Verflüssigung“) or even electricity production („Verstromung“) leading to the secondary (second and third generation) fuels in the columns 6 and 8. In each column (denoted „Energieträger“ 0, 1 or 2) the relevant drive concepts which can use this fuel are given in frames positioned at the place of the corresponding fuel. They are concepts using conventional IC-engines (VM) or electric drive with fuel cells (BZ) or with batteries only (EV). In the frame for each concept the

efficiency of the power train (tank to wheels) is given in the first row („eta“). However, if fuels of the second or third generation are used (columns 6 and 8), the efficiency given in the second row of the frame is most important, because it is calculated from the base fuel (column 4, „Energieträger“ 0) and implicitly accounts for the losses of the intermediate steps. In the last row of the frame the main problem with each drive concept is marked: it could be emissions („Schadstoffe“), system cost and complexity, range („Reichweite“), or environmental problems („Umweltprobleme“) in general.

This table visualizes in a simple manner many of the problems typical with drives basing on electric drives: saving fossil fuel in comparison with conventional ICE-drives is possible with battery storage, but only with short range vehicles. Fuel cell systems abolish the advantage of high efficiency because its fuels are shifted „toward the end“ of the energy chains.

However, there is one thing that is extremely important: The situation changes in the case of regenerative fuels from biomass or solar energy (third and fourth chains). In these cases the drive with fuel cells has obviously higher fuel economy, even if steps like reformation or fuel liquefaction are necessary. The reason should be obvious from the table.

It must be underlined that, the efficiency considerations presented as far are informative, but not thoroughly adequate for ultimately comparing drive systems. The main reason is that the mass requirements and power demand are very different for various drive systems. In the following simulation this is taken into account and the comparisons are basing on the specific energy demand. The correct definition of traffic system efficiencies must be based on the ratio payload to specific energy demand (not on “fuel efficiency trains“) as explained in the section 10.3 of the **Annex**.

In the next chapters the severe method of moment-by-moment simulation of drive systems and the results following its application will be presented (the key numbers used in the previous chapter have been of course checked by this method).

In **Chapter 4** the simulation method is first introduced, Section 4.1. The drive cycle is implicitly described in time segments with the velocity of the vehicle at the start of each segment given. Test drives between arbitrary segments are possible. The input includes among other the following items:

- the mass of the vehicle without power train and tank (ZeroEngineMass, ZEM)
- the payload during the test
- the range with full tank
- the vehicle’s maximum continuous power requirement at the wheels is an input, but the real engine power is checked during the run, as to enable driving at any segment of the driving cycle
- the fuel at the filling station (e.g. hydrogen, benzine) and its primary source (e.g. natural gas, oil, etc.)
- details on the vehicle characteristics, like aerodynamic drag and rolling resistance coefficients, wheel diameter and gearing, maximal speed, power needs for accessories, etc.

- for hybrids or electric cars with battery storage the energy content of the battery at start (in order to check for brake energy recovery, if available)

Other inputs, mainly specific data for engines, fuels and storage devices are stored in tables which are presented briefly in later sections.

The output of interest are of course the vehicle mass and engine power, the fuel and primary energy consumption and the emissions. But the calculation enables the detailed analysis of the losses along the energy chain and the determination of the partial efficiency coefficients.

Results to be discussed later are presented for two driving cycles defined in Section 4.2. In addition to the new European driving cycle (NEFZ) a combined driving cycle including high speed segment simulating usual driving proportions on state roads and freeways has been considered as the representative cycle (RFZ). Also in the same section (Section 4.2) a representative car (a „middle class“ sedan) has been defined. For this car with ZEM=800 kg the payload is assumed to be 150 kg whereas the continuous power requirement at the wheels should be at least 50 kW/ton to suffice driving the RFZ cycle (and concur with the market requirements). In Table 7 further typical data for this car and others (smaller, „light weight“, „big class“) are given.

In Section 4.3 specific data of the main components of the power trains are shortly presented. Data for IC-engines are given in Table 8 and data for fuel cells and electrical drives are given in Table 9. In these tables the range of the values as well as the used values are shown. The data used as input for the simulation consider the improvements made in the last few years with both the IC-engines and the fuel cells and other components of systems with electric drive. There is, however, a difference: the time horizon for the characteristics of the IC-engine is the present time, for the fuel cell systems the data are quite optimistic for the present time, but in our opinion realistic for the time of commercialization, i.e. presumably the time after 2005. For the fuel cell system a reduction of the specific mass of the power train by the factor of two in comparison to the present state of the art has been assumed. For the fuel cell drive, however, beside system optimizations, the cost reduction of the fuel cell stack will be the challenge.

In this context it is important to realize that the very remarkable progress in fuel consumption and emissions with IC-engines during the last decade or so has been driven by the pressure of environmental aspects and has been enabled by the introduction of high-tech components (especially electronics) in the engine and power train. Environmental aspects have been essential for the progress with fuel cell systems, too. But the result of this progress push is that the now (technically) mature fuel cell systems are confronted with conventional IC-systems, which are much more „well-fitted“ than they were short time before.

Next Section 4.4 presents some information concerning the specific emissions related with the usage of different fuels as well the primary energy needed for their production and distribution.

Table 10 is an overview of the expected specific emissions of fuels when used in a typical driving cycle. The table considers carbon loaded fuels (benzine, Diesel oil, natural gas,

methanol from NG or from biomass, and finally ethanol from wood stock). For local emissions other than CO₂, a distinction must be made between systems using IC-engine (denoted „V-Motor“ in the table), or fuel cell and electric motor. Emissions are distinguished to be global or local („Kraftstoffnutzung“). In the results to be presented later we will consider the global greenhouse emission (CO₂ equivalent) as the main emission of concern, since it just includes the greenhouse effect of other emissions. The global NO_x-emission, however, is not included in the greenhouse effect calculation and will be given in the results explicitly.

Table 11 presents similar data as Table 10 but for non-carbon fuels (hydrogen, electricity), which in practice are locally non-pollutants. Differences in the shown values of the global emissions strongly depend on the production and distribution chain from the primary energy to the fueling station.

The greenhouse emissions are presently the major environmental concern, because they are practically proportional to the fuel consumption, whereas the other vehicle emissions have been drastically reduced since the introduction of catalytic converters in the exhaust system and continue to decline further. This is demonstrated by the information given in Table 12. In the first part of the table the 1980-1999 changes of fuel consumption and emissions of new passenger cars in Germany are listed: the fuel consumption and CO₂-emission have been reduced by a factor of about 1.5, other local emissions by factors between 35 and 50. In the lower part of the table the local emission limits according to different norms are listed along with some examples of the emission standards of typical passenger cars around 1997-1998.

Finally Table 13 presents an overview of the ratio primary-energy/fuel-energy (of which the inverse value represents the efficiency „well to fueling station“). Values for compressed (CH) or liquefied (LH) hydrogen in Table 13b are given for both hydrogen produced via electrolysis or from natural gas.

In the next Section 4.5 the problem of storing alternative fuels on board is discussed. The problem is that both the specific mass and volume of all of them, even for liquids as methanol, is substantially lower in comparison with those of benzine or diesel oil. Moreover, many novel fuels are basically gases (natural gas, hydrogen) and their storage on board surmises special techniques (high pressure tanks, liquefaction, adsorption or adsorption) and introduces its own loss mechanisms. All kinds of storage on board have been studied extensively and demonstrated in prototypes in the last few decades both for hydrogen and natural gas, but the problems remain. Every storage method is technically feasible, but the sum of inconveniences is in these cases considerable.

Table 14 depicts the specific (MJ/kg) and volumetric (MJ/l) energy contents of different fuels stored on board. For natural gas, besides high pressure storage, the use of adsorbers offers an interesting option. The adsorber mass is a penalty, but the pressure can be as low as 35 bar, thus enabling tanks of other than cylindrical form and one stage compression. Unfortunately, adsorption (e.g. with activated carbon) or absorption (metal hydrides) are disadvantageous as hydrogen storage methods. In general, hydrogen storage on board is the crux with its usage as fuel in passenger cars (see also section 10.3 in the **Annex** to this report). The volumetric energy content of gaseous hydrogen is low even at high pressures (250 bar)

and it is a problem in passenger cars. However, since the energy demand for hydrogen liquefaction is substantial, we consider high pressure hydrogen storage on board as viable, especially for buses. In the next chapters beside tanks for liquid fuels the following storage devices will be taken into consideration: high pressure tanks for natural gas (200 bar), hydrogen (300 bar), liquid hydrogen tanks and advanced batteries.

In **Chapter 5** results are presented for the reference vehicle and cycle with fuels from fossil energy sources. Although the simulation enables depicting moment-by-moment values, the results can be meaningfully depicted as mean values for a cycle. However, each component of the system undergoes substantial changes in its characteristics depending on the load. This is demonstrated in *Figure 1* by depicting the typical change of efficiency of drives with IC-engines or PEM fuel cell as the load varies (of course, in the practice there is rather a „cloud“ of operation points, but this is intercepted by the lines shown).

Results for the whole energy system are given in *Section 5.1*. Typical cases are depicted in the Figures 2 to 8, where the energy flow and the emissions from well to wheels for each case are shown. The shown cases are the following:

Figure 2 IC-engine with benzine as fuel

Figure 3 IC-engine with Diesel oil as fuel

Figure 4 IC-engine with compressed natural gas as fuel

Figure 5 Fuel cell-system with benzine as fuel (reformer on board)

Figure 6 Fuel cell-system with methanol from natural gas as fuel (reformer on board)

Figure 7 Fuel cell-system with compressed hydrogen on board

Figure 8 Electric vehicle with batteries, electricity from advanced natural gas plant

Of course, the power of the aggregates of the power train and the mass of the vehicles are not identical, since they must be adjusted to just enable traveling the same drive cycle and have the same range (concerning range, only in the case of electric vehicle with batteries this had to be reduced to about 200 km in order to ensure an acceptable payload to vehicle mass ratio). The facts can be found also in *Table 15*, which summarizes results for the cases shown in the Figures 2 to 8 and for some other cases.

From the Figures and from Table 15 we can already recognize some important facts:

- Concerning the efficiency of the energy conversion chain on board, a higher number of conversion steps increases the vehicle mass and fuel consumption. The higher efficiency „tank to wheels“ is that of the electric vehicle with batteries, followed by the efficiency of the fuel cell system with compressed hydrogen on board. But, reformation of liquid fuels on board (avoiding high pressure voluminous tanks) abolishes this advantage.
- Concerning the primary energy demands the situation is different, since the production and distribution of alternative fuels from fossil energy resources, like methanol or hydrogen or even electricity, are connected with higher losses. Even the fuel cell system with hydrogen storage on board cannot offer clear global energetic advantages. It seems that, the efficiency advantage of electric power trains are basing on the usage of fuels of higher exergetic value, but this advantage is counterbalanced by the exergy loss needed to produce (and store, or make more conveniently storable) these fuels!

- Concerning the global climate relevant emissions (CO₂-equivalent) usage of natural gas as primary energy is advantageous, because of its low specific carbon content. Direct usage of natural gas with IC-engine drives is recommended from this point of view, but better results can be expected with fuel cell drive and compressed hydrogen on board.

In Table 16 similar results are shown for a lighter passenger car (ZEM=675 kg, same payload) and lower rolling resistance. The engine power is checked to enable driving of the reference cycle („normal motorization“) but the results are shown for both the NEFZ and the reference cycle.

Ultimately, the evaluation of the alternative drive concepts from the environmental point of view must be made on the basis of the two criteria:

- specific primary energy demand (MJ/km)
- specific global climate relevant emissions (g/km)

The graphs of Section 5.2 compare these values for several alternative concepts.

We have already mentioned that usage of natural gas in the transportation sector would be advantageous from the environmental point of view. With natural gas available for transportation, it can be used directly with IC-engines or used to produce methanol or hydrogen to power electric vehicles with fuel cells. In the next Figure 9 we compare several concepts applicable within an energy system based on fossil primary energies (mineral oil, natural gas), where fuel cell drives could use fuels as compressed hydrogen, liquid hydrogen, methanol, or even benzine. The results show that only the combination of fuel cell with compressed hydrogen as fuel on board can just marginally compete in terms of global energy and emission criteria with conventional IC-engines. Usage of liquid hydrogen within an energy supply system based on fossil fuels cannot be recommended and will not be further considered for fossil energy systems. The global disadvantages of methanol as a fuel for fuel cell drive systems (which then need a reformer on board to convert it to hydrogen) are also obvious, but we will consider it as an option because its storage and handling is more convenient than with hydrogen gas.

For closer consideration of the relevant options in the fossil energy system we depict in the next Figure 10 both the fuel consumption and the primary energy demand for the alternative drive concepts including hybrids (with IC-engine or fuel cells) as well as electric cars with battery storage. The shown case of hybrid with IC-engine uses a Diesel engine and it is of interest that, from the energetic point of view, this concept can fairly well compete with the future fuel cell drive. The reason is, that hybridization of IC-drives is more advantageous than that of fuel cell systems. This will be explained in the next chapter.

Figure 11 depicts the global emissions for the same alternatives. From this point of view the competition situation for the fuel cell systems is better due to the absence of local emissions and to the usage of natural gas. With IC-engines most of the total NO_x emissions are produced locally and the rest of the local emissions escaping the catalytic converter causes a noticeable increase of the total greenhouse emissions.

In [Section 5.3](#) these results are evaluated. They show that drive systems with fuel cells, or more generally with electric power train alone, do not offer a clear perspective to save fossil resources and reduce the corresponding CO₂ emission, but they can contribute in some extent to the reduction of global emissions (CO₂-equivalent and NO_x emission). The essential question is whether that perspective can compensate for more expensive car technologies, infrastructures and fuels for electric drives within a fossil energy supply system. As we can see, these expenses would essentially aim at just avoiding emissions like NO_x and health endangering substances from car exhaust gases, that is during car operation. The question is in what extent could the job be done with more advanced catalytic converters for IC-engines.

It should be kept in mind that the fuel cell systems are really free from emissions only from the point of the power train and beyond, where pure hydrogen for the fuel cell is available. If fossil fuels like methanol are to be reformed on board, CO is produced at high rates, which must be removed with a catalytic device to avoid poisoning of the PEM-fuel cell. This means, so to speak, the catalytic system tacitly exists in the first part of the power train and not at the exhaust as in the case of conventional cars.

In **Chapter 6** we continue the comparisons of alternative driving concepts with fuels from fossil resources by considering some special cases, like existing prototypes with fuel cells, lightweight cars with advanced drives, hybrid concepts and finally buses. In order to highlight the details of the comparisons we depict the specific energy demand divided in six parts of interest, which appear in the legend of the following Figures 12 to 16. This partition is explained in [Table 17](#). The English version of this table is given below:

Table 17: Partition of the car energy demand in useful work and losses of the energy chain. *The abbreviations are used in the legends of Figures 12 to 16.*

Abbreviation used in the Fig.	Meaning :	Accounts for :
ProzVerl	Prozess-Verluste	Losses of the principal energy conversion in the power train (Conversion of the fuel chemical energy in the principal aggregate to the subsequent energy form used in the power train: mechanical or electrical energy).
Dros/Reib	Drosselung und Reibung	Losses of useful work due to mechanical friction of rotating parts or throttling and friction in flow sections.
Trans/Reg	Transimission und Regelung	Losses of mechanical or electrical controllers, converters and other components of the power transmission to the wheels, including losses of the energy storage in hybrids (e.g. battery „round-trip“).
Neben	Nebenverbraucher	Mean value of the energy demand for accessories.
Nutz	Nützliche Fahrtenergie	Useful energy at the wheels to compensate for rolling resistance, air drag and inertial losses (braking).
Kraft.P+V	Kraftstoffproduktion, Transport und Verteilung	Losses in the fuel production, transport and distribution chain.

In Section 6.1 of the chapter we compare four cases of alternative drives for a middle class passenger car, which could be presently representative as state of the art. They are depicted in Figure 12. This car with diesel engine is commercially available (right-hand bar in Figure 12). Prototypes powering the same car with fuel cell drives using methanol with reformation on board (Necar 3) and liquid hydrogen as fuel (Necar 4) have been demonstrated. Without reformation on board (i.e., if pure hydrogen is stored on board) the specific fuel consumption appears to be lower than with the diesel engine, but the usage of liquid hydrogen requires much more primary energy in total. The case with pressurized hydrogen as a fuel would be more interesting from the energetic point of view, but it could not be demonstrated, obviously because of space problems with the storage device in passenger cars, if the range has to be in the order of more than a few hundred kilometers.

In Section 6.2 we consider the case of lightweight small cars, which could approach the „magical“ limit of 3 liter fuel consumption per 100 kilometers. Commercial cars with this feature are already available. In Figure 13 the performance of the VW Lupo 3L is shown as an example (right-hand bar in the figure). The simulation of the performance of fuel cell drives for the same car shows similar results as in the previous figure. In addition, the space problems with methanol reformer or hydrogen storage would be more severe for small cars of this class.

In Section 6.3 we investigate the possible saving in fuel consumption to be expected in the case of hybrid drives. With IC-engines not only better fuel economy can be expected, but also emission-free driving in restricted areas is enabled, which could be of special interest for buses undergoing duty cycles in urban regions. The hybrid concept is also of high interest in the case of fuel cell drives. The cases discussed below must be limited to the usual concepts of most interest. These are parallel autonomous hybrids with batteries as secondary energy storage devices.

In Subsection 6.3.1 we consider hybrid concepts for the reference passenger car. In Figure 14 we compare the energy demand with IC-engine (VM) or fuel cell drive (BZ) and the corresponding hybrids without or with brake energy recovery (BR). The point in this illustration is that hybridization of systems with IC-engines is more advantageous than in the case with fuel cell drives. It can be recognized that in IC-engine hybrids the process losses as well as throttling and friction loss mechanisms are greatly reduced. Although, on the other hand, the transmission losses (which in the hybrid cases contain also the losses of the electric motor and of the battery round-trip) are much higher, there is a substantial net advantage. This is not the case with fuel cell drive, where the power reduction of the highly efficient fuel cell stack and its compensation by means of the storage „round-trip“ device is less advantageous. In Figure 15 the same cases are depicted with results obtained for a driving cycle (NEFZ) without the demand for full load at freeway speeds. The different partition of the losses here (for about the same fuel consumption) is due to the characteristic of this cycle, which also results in more advantages with brake energy recovery.

The situation is somehow different with hybrid buses, which are considered in Subsection 6.3.2. As shown in Figure 16 usage of hybrid buses with either IC-engine or with fuel cell drive system is beneficial only if it is combined with brake energy recovery (BR). The reason

is that buses, like typically most heavy duty vehicles, do not possess the huge motor power reserve solely needed for high speed acceleration process (typical for passenger cars). On the other hand the typical urban schedule for buses is suitable for optimal brake energy recovery. We expect for hybrid buses with fuel cells lower fuel consumption, which can at least partially compensate for the higher primary energy demand (i.e. for higher fuel price). However, there are furthermore beneficial aspects for fuel cell buses: the pressurized hydrogen storage is easier to manage in the case of buses, the cost of the drive train in percentage of the total vehicle cost is for buses lower than in the case of passenger cars and finally the absence of local emissions is especially important for urban duty cycles.

Of course buses with IC-engines can also benefit by using natural gas as fuel directly, although the fuel consumption should be expected to be higher than that of the diesel engine as shown in the next figures. *Figure 17* shows the fuel consumption and primary energy demand and *Figure 18* the global emissions for several bus drives including direct usage of natural gas (NG) with IC-engine. Later hybrid bus with brake energy recovery can compete with the fuel cell application from the point of view of global energy demand and greenhouse emission, but it is not fully emission-free during operation.

In the previous chapters we have considered fuels from fossil resources. However, these fuels will certainly have a limited range at the usual price level. But the matter of concern is the climate implication of the unavoidably emitted CO₂, when the fossil resources are depleted. Thus, there is need for action to promote usage of non-fossil resources as soon as possible. In **Chapter 7** we will see that, in this forthcoming scenario the driving concepts using electric drive are clearly more advantageous in comparison to those using IC-engines. Doing the comparisons of drive concepts within the scenario with regenerative energy supply is indeed a much easier task than the comparisons of the previous chapters with fossil fuels. Not accounting for the several CO₂-free options to produce it (wind, water, photovoltaic, solar thermal or even nuclear), we just only need to refer to the „non-fossil“ electricity as the common „primary“ source of further fuels usable in the traffic sector: the drive concept consuming less electricity is then advantageous from the energetic point of view. Besides electricity stored on board, which does not allow for usual range, the vehicle fuel will be principally electrolytic hydrogen (liquid or pressurized). The storage problem on board is within this scenario common to both drives using IC-engines or fuel cells. It is also conceivable to produce „regenerative“ methanol or similar liquids by means of CO₂-neutral methods (e.g. extracting CO₂ from the atmosphere using regenerative electricity) in order to avoid storage and distribution problems. These options are compared in *Figure 19*.

It is not surprising that an electric car with batteries has the lowest energy demand, since it uses the available regenerative electricity directly. But there is the problem with the energy storage on board (or: with the possible range). To get better energy storage performance one has to use pressurized gaseous hydrogen but must pay for more energy. Liquid fuels (in this case liquid hydrogen or „regenerative“ methanol) are even more expensive. Apart from these storage inconveniences, drive systems with future fuel cell drives do have in all cases (even when they use methanol and reformer on board) an advantage over the IC-drive using the same fuel. This is because in this scenario (unlike to the fossil energy case) the fuel consumption advantage of the fuel cell is also a global energy advantage as well.

The situation is similar when regenerative fuels, like methanol from biomass, are produced with the help of solar energy absorbed by plants. These fuels are basically not fully CO₂-neutral, but the feed recovery can contribute to a reduction of the CO₂-emissions. As shown in *Figure 20* usage of these fuels with future fuel cell systems would offer global advantages.

The results of chapter 7 imply that in the future non-fossil energy system the fuel cell systems will have the advantage of lower energy demand and hence lower fuel related specific costs. However, the competition of hydrogen fueled IC-engines, which can also be considered as environmentally clean, will be present at least in concern with the total vehicle costs. Even with very optimistic assumptions in relation to the costs of future fuel cell stacks, it turns out that the fuel cell drive will be by at least 25 % to 30 % more expensive than the conventional drive. This is due to the needed higher power level of the stack and to the additional costs for the high efficiency traction motor. The cost aspects will be of major importance especially for the competition situation in the future non-fossil era.

In **Chapter 8** we add to our considerations some cost comparisons and we also present a table ranking the alternative concepts by awarding marks to their key criteria. Both considerations were not at first regarded as a target of this study, but they were found meaningful in the course of the investigation.

The cost considerations which are presented in *Section 8.1* do not aim at exactly forecasting the cost developments of alternative concepts in time, but they are based on solid cost estimations (at current values) for the time of commercialization and on plausible relationships for the social costs. The consideration of the social costs with their partition in internal social costs (which correspond to the private costs excluding taxes and insurance) and external social costs (mainly accounting for the social costs caused by emissions and casualties) is meaningful here: It represents a common measure for such different aspects of the drive alternatives, like complexity and capital costs, fuel costs and life time energy saving, emissions, etc. The results presented here are far from being complete, but they grasp the essence of the comparison.

Cost estimations for the relevant positions are given in *Table 18*: they are specific cost for car structure without power train, for the power train, fuel tank, fuel cost excluding tax, fuel tax, life time drive distance and social costs of the emissions. Later costs are maximal values found in the literature. Social costs basically common to the alternatives (for example social costs of the casualties, insurance and car tax) do not have to be considered here. In the following figures results for the present energy system with fossil resources are presented.

A first example is given in *Figure 21* for a conventional passenger car with IC-engine. The private costs (left-hand bar) excluding fuel tax are summarized to the internal social costs, the external costs correspond to the present level of emissions (middle bar). The bar at the right-hand side shows the external costs for the same car with the emission level typical about a decade ago (without catalytic converter). In *Figure 22* we compare the costs for the same vehicle driven by conventional IC-engine or fuel cell drive. The situation shown is due mainly to the higher capital cost of the fuel cell system (at target costs for the fuel cell stack, see *Table 18*). The lower fuel consumption of the fuel cell is compensated by higher fuel

cost (due mainly to higher primary energy demand). The external social costs of the conventional system are mainly due to the local emissions during operation.

The situation is notably different when making the same calculations for buses, as shown in [Figure 23](#). First, the power train costs are a lower part of the total bus costs and this tends to equalize the internal social costs. The high life time utilization of the bus and the urban driving cycle make the specific emissions and the corresponding external social costs more significant. As a result the bus drive with fuel cell system could have lower social costs even within the present energy system with fossil fuels.

Within a system with regenerative hydrogen the difference in costs will be as follows. First, the fuel cost of the drive with IC-engine will be higher (due to higher fuel consumption of the *same* fuel which is used also with the fuel cell). This effect is, however, compensated by the much lower external costs of the hydrogen motor. In this way, the overall result of the comparison remains the same as above (i.e. is the fuel cell system is expected to have higher social costs in the case of the passenger car, but lower for bus applications).

The following presentation of [Section 8.2](#) has been indeed initiated as a rebuttal to the kind of evaluations found in the literature, which at first glance seem to be well reasoned, but are effectively quite incorrect. The cited article includes as a result an evaluation table for „next generation cars“, which is reproduced in the present study as [Table 19](#). First of all, the considered cars are by no means representative for the next generation cars (for example, Smart is a two seat niche car). The criteria are not complete and are not used with consequence. This and the used „knockout“ method for the ranking marks brings about unusual results. Thus, the Prius, a hybrid with high fuel economy, is evaluated with „0“, whereas Necar 4 with highest primary energy demand because of LH₂ usage (see [Figure 12](#)) is evaluated with „10“. This criticism is necessary for more clarity in this respect and it is neither meant for the special author nor for the Necar-concept in general, which as we have seen, could well compete with IC-engines within the future non-fossil energy system.

In the following [Table 20](#) we follow the ranking method, but with several adjustments. We do not refer to special models but to vehicle categories with fuels from fossil resources (first six cases) or with fuels from regenerative primary energy. The ranking marks are given more continuously without excluding same values for different concepts and the criteria have been completed and adjusted (e.g., „emissions profile“ has been spliced to differentiate greenhouse and local pollutants). The given values for the marks are of course simply quality-descriptive and some may be disputable. The result represented by the sums (last row, totals) is, however, plausible. The ranking sums are in accordance with and sketch in advance some important conclusions from this study. For example, it can be seen that market penetration of electric vehicles with batteries is seriously inhibited by range and refueling problems and that the IC-engine is the competition winner as long as fossil fuels are to be used. In the future system with regenerative energy supply (three last columns) there will be some inconveniences (see lower values for the totals!) mainly due to on board storage problems, but the fuel cell drive system will be clearly as fit for competition as the system with IC-engine.

Chapter 9 presents the conclusions from this study.

The discussion focuses on the global criteria (like primary energy demand and global greenhouse emissions), but other aspects are also considered. Concerning the local emissions, their climate potential is accounted for in the global CO₂-equivalent emission. Although local emissions are also health hazardous and of great public interest, we resign the presentation of numerical values, because in the last decade these hazardous local emissions of IC-engines have been diminished by a huge factor by means of catalytic converters in the exhaust system and are expected to further diminish. This is shown in Figure 24. Instead we prefer to keep in mind that drive systems with solely electric power train do have no or at least irrelevant hazardous emissions during operation.

In Section 9.1 the main conclusions are listed as follows.

1. In the energy system using fossil energy resources primary energy saving by using electric vehicles with fuel cells or batteries on board instead of advanced IC-engines cannot be anticipated in general terms. In the fossil energy system it seems more beneficial to ensure better quality for conventional fuels and enforce the *direct* usage of natural gas instead of introducing „new fuels“ like methanol, or liquid hydrogen, which can be derived from natural gas but are connected with significant production losses.
2. Global greenhouse emissions can be considerably reduced with natural gas as automotive fuel. Usage in fuel cell drive systems of *pressurized* hydrogen produced by reforming natural gas could further reduce greenhouse emissions by about 12 % as compared with the direct use of natural gas with IC-engines. This is mainly due to the NO_x emission of the IC-engines, but natural gas storage on board in this case is much less a problem as compared with the high pressure storage of hydrogen needed with fuel cell systems.
3. Consequently, within the fossil energy system the benefit of electric vehicles with fuel cells or batteries on board is simply the reduction potential of local emissions like NO_x, NMHC, CO, etc., but there is no clear saving in global terms, like primary energy resources and greenhouse gases. Thus, it is difficult for these drive concepts to compete with advanced drives using IC-engines or hybrids with IC-engines. However, market penetration of fuel cell buses especially in emission restricted areas seems probable, mainly due to the special space conditions in buses (e.g. for hydrogen storage), low ratio of drive cost to the total bus cost and, finally, fleet infrastructure.
4. Within the future non-fossil energy system with regenerative primary energies the competition situation for the fuel cell system is clearly advantageous, since in this case the inherent lower fuel consumption of future fuel cell systems means at the same time lower primary energy consumption and hence lower driving costs. Also special storage-related problems are common to all alternatives. In this clean energy system the competition of IC-engine drive (and that of battery-vehicles) will also be present, and the market penetration of each alternative will be based solely on the offered comforts and life time costs.

Section 9.2 includes some additional commentaries. The main conclusions given above are practically identical with those presented in a similar study [Carpentis, 1997] some years ago. However, the method of simulation has been further developed and the input information are adapted to actual data. The reason we have to make the same conclusions is first that, in the last few years better prospects for fuel cells, and electric systems in general, have been accompanied by important and rather unexpected improvements in the fuel consumption and

emissions of the IC-engines. Secondly, these conclusions result in partially from some inherent relationships, which are not sensitive to plausible technical improvements.

Concerning the state of the art, the considered reference IC-engine corresponds to present commercial models and we expect for the next time rather a generalization of this level of fuel economy than upsetting improvements. For the fuel cell systems we found it fair not to use data of present demonstration objects but to include the plausible improvements known to be yet possible. We expect that at the time of market penetration fuel cell systems will have the performance indicated here, and of course, much lower costs than at present.

Finally, in concern with hybrid ICE drives it is important to notice that beyond fuel saving also the possibility to use electric drive in emission-restricted areas will be an important implementation factor.

In the epilog of [Section 9.3](#) the main statement is that the prospect for market penetration of fuel cell drives would be excellent at the time when fuels like hydrogen or even methanol will become available from non fossil, regenerative energy resources, whereas the related infrastructure will be forced by the need to replace or save the fossil resources. However, with none of the fuels derived from fossil resources can global advantages be clearly expected by exploiting them with fuel cell systems.

Annex

The Annex presented in the last **Chapter 10** of the study presents some important equations. They are a further development of relations presented earlier from the author [Carpetis, 1981 and 1988], at that earlier time in order to estimate how the mass needed for the on board hydrogen or electricity storage increases fuel consumption, causing severe range limitations.

In the general form presented here, Equations (1) to (10) are first discussed in [Section 10.1](#) They allow a simple but reliable calculation of the operation characteristics of a vehicle, like

E_T , fuel consumption (MJ)

E_P , primary energy demand (MJ)

and also determines the mass of the power train M_A , the storage tank mass M_S and the total test mass of the vehicle M_V , given a number of input data and of specific values. The input includes (see [Table 21](#)):

P_{ZEM} , the vehicle mass without power train, tank and payload (kg)

M_P , the payload (kg)

P_{SP} , the wanted specific power at the wheels, kW/kg (of total vehicle mass)

R , the range with full tank (km).

The vehicle is supposed to drive in given cycle for which the parameter e_w , i. e. the specific mean driving energy MJ/(kg·km) for rolling, acceleration and aerodynamic drag, is known. Values for e_w can be found in [Table 21](#) included in [Chapter 10](#) or be determined by using

equation (8) for a simple iteration with the less sensitive parameters f_A and f_M of the same table, which can also be calculated by equations (9) and (10).

In addition to these base parameters for the vehicle, the user must know specific values defining the fuel:

s , the specific energy content of the storage device, MJ/kg

η_{FPD} , the efficiency of the production and distribution process for this fuel.

Finally the user must define the power train by three parameters:

m_D , the specific mass of the power train (kg/kW)

η_D , the efficiency of the power train (from tank to the wheels)

η_{TM} , the efficiency of the power transmission from the output of the main aggregate (IC-engine, fuel cell, battery) to the wheels. It includes losses for power management and electric motor, if applicable.

The determination of the parameter values can be easier and of higher accuracy than it seems at first glance. The table included in Chapter 10 (Table 21) comments the value ranges and particular specific values can be found in several tables (3, 8, 9, 13 to 17) of the present study. It must be stressed that, the set of the analytical relations (1) to (10) is *not to substitute for the numerical simulation* used in this study, on the contrary inputs like η_D and η_{TM} need to be confirmed by the exact numerical simulation (nonetheless, after the recent flood of related publications many of the involved values are well known and converge to generally accepted levels). Especially, it must be kept in mind that the aggregate efficiency η_D is strongly dependent on the driving cycle, so comparisons of different concepts are meaningful only under the same driving conditions.

The importance of the analytical relations (Equations (1) to (10)) presented in the Annex (Chapter 10) is that they make evident the main parameters and allow inexpensive parametric studies to recognize the influence of their values. An example application is given at the end of Section 10.1.

In Section 10.2 the appropriate system efficiency is defined as the ratio of payload to the specific energy requirement, $\eta_P = M_P / (E_P/R)$, and Equation (11) is given for its calculation.

It must be stressed that the usually considered „well to wheels“ efficiency $\eta_{WW} = \eta_D \cdot \eta_{FPD}$ is simply a factor in Equation (11) and it does not alone account for important parameters mentioned above. Only the payload related efficiency definition is adequate for comparisons of alternative traffic systems. An example is given at the end of the section.

In Section 10.3 the given analytical relations are used in example parametric studies. For the same passenger cars with fuel cell drive, as considered in the examples of Sections 10.1 and 10.2, the specific mass of the fuel cell drive is varied from the about 10 kg/kW needed recently to the very optimistic 5 kg/kW yet conceivable at the time of commercialization. The

result shown in **Figure 25** is obtained for hydrogen fuel from natural gas with high pressure storage on board. This result demonstrates the crux of the concept: The needed space for the pressurized hydrogen storage is a problem for passenger cars.

To study the results for different ranges and storage concepts with either IC-drive or with fuel cell drive we first fix the specific mass m_D of the fuel cell drive at the minimum value of 5 kg/kW and then use Equations (1) to (10) to obtain the results shown in **Figure 26a** and **Figure 26b**.

As expected, there is the lowest energy demand E_P , the lowest vehicle mass M_V and the lowest tank volume V_S with the IC-drive. As we found earlier for systems with fossil fuels, the energy demand for future fuel cell drives turns out to be slightly higher than that of the conventional drive system, if pressurized hydrogen on board is used (case „ E_P FC (CH)“ in Figure 26a). Then, however, for a range of 600 km the tank volume amounts to about 300 liter, which is a serious problem for passenger cars (case „ V_S FC (CH)“ in Figure 26b). With Methanol (Me) or even with liquid hydrogen (LH) the storage volume problem is manageable, but the energy demand is in both cases substantially higher. Finally, with a metal hydride storage tank (MH) the matter of concern is the high storage mass (case „ M_V FC (MH)“ in Figure 26b). This results in a primary energy demand (case „ E_P FC (MH)“ in Figure 26a) comparable to that with methanol or liquid hydrogen for the usual ranges of more than 400 km.

In **Figure 27a** and in **Figure 27b** we investigate the alternatives with the difference that the available fuels are electricity from non-fossil energy resources and hydrogen produced by electrolysis.

The problems related to hydrogen storage on board are of course the same as in the previous case with fossil resources (Figure 26b), but now they are a matter of concern also for drive systems with hydrogen fueled IC-engines as well. If we compare this alternative (hydrogen fueled IC-motor, cases „ V_S IC (MH)“ and „ V_S IC (LH)“ in Figure 27b) with the fuel cell drive, the higher *fuel* consumption (lower η_D) of the IC-drive implicates noticeable aggravation of the hydrogen storage problem on board. Compressed hydrogen storage in passenger cars with hydrogen engine (not shown in Figure 27b) would require more space than with fuel cells (case „ V_S FC (CH)“ in Figure 27b) and seems to be not practical for usual ranges. As can be seen from Figure 27a, the usage of metal hydride storage (MH) with IC-engines becomes more energy consuming than liquid hydrogen storage (LH) at lower values of the vehicle range (at about $R \approx 450$ km) as compared with the FC-drives (at about $R \approx 600$ km). In general, the advantages of fuel cell drive in comparison to the hydrogen fueled IC-drive become clearer and rather unambiguous in this case with non-fossil primary energy.

The results of Figures 27a and 27b demonstrate also the big advantage of the battery storage for electric cars using non-fossil electricity, but equally the limiting disadvantage: The primary energy demand is clearly the lowest of all alternatives (case „ E_P EV (Batt)“ in Figure 27a), but the storage volume V_S and vehicle mass M_V are rapidly increasing for higher ranges (see Figure 27b). Even with the conceivably best future batteries, ranges of more than about 300 km do not seem to be practical.

In the last *Section 10.4* the equations presented in Section 10.1 are used for the comparison of hydrogen fueled cars with internal combustion or fuel cell drive. The results are plotted in **Figure 28**. The hydrogen consumption and the total vehicle mass of the fuel cell car are plotted as a function of the specific mass of the fuel cell power train (including all components, namely fuel cell stack, heat and air management, power management, electric drive motors, etc.). The break even point for the shown case turns out to be about 7 kg per kW of the stack power or about 70 % of the current demonstrated value. In the present study the considered (future) value for the specific mass of the fuel cell system lies well below this „break even“ value shown in Figure 28.

1. Einleitung

Zahlreiche Berichte und Studien haben in letzter Zeit das Ziel, Antriebssysteme für Kraftfahrzeuge der Zukunft zu definieren, welche durch Nutzung neuer Komponenten und Konzepte zur deutlichen Verminderung des Energieverbrauchs und der Emissionen führen können. Es ist interessant festzustellen, dass alle „neuen“ Konzepte, soweit sie nicht nur auf der Einführung neuer Kraftstoffe (Erdgas, Wasserstoff) für Verbrennungsmotoren basieren, im Grunde auf die Einführung des Elektroantriebs zielen. Dieser besteht neben dem Elektromotor notwendigerweise aus chemoelektrischen Wandlern (Akkumulatoren und/oder Brennstoffzellen). Der elektrische Strang kann den „klassischen“ Antrieb mit Verbrennungsmotor ersetzen, wobei der Vorteil der lokalen Emissionsfreiheit entsteht. Andererseits aber ist die lokale Emissionsfreiheit nur ein Teil der Anforderungen. Ihre Bedeutung wird in dem Maße geringer, wie bei den herkömmlichen Antrieben durch Katalysatoren diese Emissionen zunehmend geringer werden. Es kommt also hauptsächlich auf die globalen Umweltvorteile, also auf die Verminderung der globalen spezifischen Emissionen (CO₂-Äquivalent bei Nutzung fossiler Kraftstoffe) und des spezifischen Energiebedarfs an, welche insbesondere bei zukünftigen regenerativen Energiesystemen die zentrale Bedeutung übernehmen.

Obwohl es im Grunde um die Beurteilung der Implementierung des Elektroantriebes geht, ist die Anzahl der zu vergleichenden Konzepte zahlreich. Denn der Elektroantrieb erlaubt auch in Kombination mit Verbrennungsmotoren die Verwirklichung von interessanten Hybridkonzepten [Hybrid-Fahrzeuge, 1997]. Für die Beurteilung der globalen Umweltvorteile jedes Konzeptes müssen auch die vorgelagerten Energieketten und zwar sowohl für die heute dominierende fossile wie auch für die zukünftige regenerative Energieversorgung berücksichtigt werden, was die Anzahl der zu betrachtenden Fälle erheblich erhöht. Im Rahmen dieses Berichtes müssen deswegen andere wichtige Aspekte, wie die Kosten der Antriebskonzepten, die Kosten der Infrastrukturänderungen bei Änderungen im Energieversorgungssystem etc., entweder außer Diskussion bleiben oder können nur in rudimentärer Form erwähnt werden.

Der vorliegende Bericht ist im Bezug auf die Fragestellung und die Methodik der Untersuchung eine Aktualisierung und Erweiterung der Untersuchung von 1997 [Carpetis, 1997]. Weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der Verbrennungsmotoren wie auch auf dem Gebiet der Brennstoffzellenantriebe wurden berücksichtigt. Die benutzten Simulationsmethoden wurden verfeinert, so dass auch Hybridkonzepte, welche grundsätzlich eine erhöhte zeitliche „Auflösung“ erfordern, eingehend berücksichtigt werden konnten.

2. Ausgangssituation

Nachhaltige Mobilität ist ein unumstrittenes gesellschaftliches Ziel. Genau so unumstritten ist, dass sowohl der Energieverbrauch und der gegenwärtig damit verbundene CO₂ Ausstoß wie auch die lokale Umweltbelastung durch die Emissionen der Kraftfahrzeuge gesenkt werden müssen.

Der Erfolg der Anstrengungen der letzten Jahre zum Erreichen dieser Zielsetzungen ist beachtlich. Im Abschnitt 4 werden Daten zu der Entwicklung des Verbrauchs und der Emissionen von Fahrzeugen mit herkömmlichen Antrieben (Verbrennungsmotoren) und Kraftstoff

(Benzin oder Diesel) bereitgestellt. Summarisch kann hier gesagt werden, dass die Schadstoffemissionen um Größenordnungen vermindert wurden und dass das „3-Liter-Auto“ zumindest für die Klasse der „Kleinwagen“ Wirklichkeit ist. Obwohl auf diesem Gebiet mit Sicherheit weitere Entwicklungsmöglichkeiten zu erwarten sind, ist es notwendig, weitere mögliche Optionen und Konzepte auch im Licht des sich abzeichnenden Endes der „Erdölära“ weiterhin intensiv zu untersuchen.

Fossile Alternativen zum Erdöl sind direkt ohne Änderung des Antriebskonzepts möglich. Erdgasmotoren haben einen mit dem Dieselmotor vergleichbaren Wirkungsgrad, der spezifische CO₂ Ausstoß ist niedriger (weil im Verbrennungsprozess mit Erdgas mehr Wasserstoffatome im Verhältnis zu Kohleatomen beteiligt sind) und die Schadstoffemissionen sind insgesamt niedriger. Hier stoßen wir jedoch auf eine ganze Reihe von Problemen, welche im Schlepptau jeder Änderung des gegenwärtigen Systems auftreten. Das Erdgas ist keine Flüssigkeit bei Umgebungstemperatur: dies bedeutet Nachteile bei der Speicherung, besonders an Bord von Fahrzeugen. Die Schwierigkeiten der Speicherung von gasförmigen Kraftstoffen an Bord werden im Abschnitt 4.5 diskutiert.

Muss aber unbedingt Erdgas an der „Tankstelle“ sein? Nicht unbedingt, weil aus Erdgas Wasserstoff oder Methanol gewonnen werden kann. Hier erscheint das zweite Problem, welches uns in diesem Bericht beschäftigen wird: Die Umwandlungen sind technisch gut beherrschbar, aber mit Verlusten behaftet. Welches ist also der Vorteil, um diese Verluste in Kauf zu nehmen?. Im Fall des Wasserstoffes ist es die lokal erzielbare Emissionsfreiheit (auch bei Anwendung in Verbrennungsmotoren), im Falle vom Methanol die gute Speicherbarkeit (vergleichbar zu dieser von Dieselmotorkraftstoff). Nähere Betrachtungen werden zeigen, dass innerhalb der fossilen Energiekette die Nutzung von Wasserstoff oder Methanol zwar möglich aber nicht eindeutig vorteilhaft ist.

Nutzung von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren ist ein Weg, das Teilziel der lokalen Emissionsfreiheit weitgehend zu erreichen: Außer Wasserdampf beinhalten die Abgase nur kleine NO_x-Mengen, welche durch NO_x-Speicherkatalysatoren und durch die über das Motormanagement geregelte Regenerierung zu unschädlichem Stickstoff und Sauerstoff zerlegt werden. Der andere ist, Verbrennungsmotoren überhaupt durch Elektroantriebe zu ersetzen: Elektrizität als „Kraftstoff“ für den Verkehr ist seit den Anfängen der Motorisierung zwar präsent, aber bis heute nicht erfolgreich. Die Nutzung der Elektrizität im Verkehr bietet schon heute den Vorteil, dass auch nichtfossile Primärenergien (Kernkraft, Wasser- und Windkraft, Biomasse etc.) im angebotenen Energiemix genutzt werden können, was unter Umständen zu einer Minderung des globalen CO₂-Ausstoßes führen kann. Die Einführung von Elektroautos wird jedoch durch das Problem der Energiespeicherung an Bord nachhaltig gehemmt: Batterien haben heute noch eine zu niedrige energie- und leistungsbezogene Kapazität, um eine akzeptable Reichweite zu erlauben.

Wasserstoff ist immerhin im Vorteil gegenüber der Elektrizität, wenn es um akzeptable Reichweiten geht. Ferner ist Wasserstoff mittels Elektrolyse aus elektrischer Energie zu gewinnen. Kann dieser Speichervorteil an Bord die zusätzlichen Verluste bei der Herstellung von elektrolytischem Wasserstoff auswägen? Hier wird die enge Verbindung zwischen der Auslegung des Fahrzeugantriebes und der vorgelagerten Energiewandlungskette offen-

sichtlich. In beiden Fällen wird Primärenergie in Elektrizität umgewandelt, aber nur im Elektroauto wird sie günstig mit Elektromotoren in mechanische Energie umgewandelt. Die Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse und seine Nutzung im Verbrennungsmotor sind unvergleichbar aufwendiger.

Ein Ausweg wäre, einen Teil der fossilen Ressourcen, in diesem Fall Erdgas, hauptsächlich dem Verkehrssektor zuzuführen um daraus direkt Wasserstoff zu produzieren. Diese Produktion ist energetisch günstiger als die Verstromung, aber die anschließende Nutzung in einem Verbrennungsmotor würde diesen Vorteil zunichte machen. Es bleiben lediglich die Vorteile der lokalen Emissionsfreiheit und der höheren Reichweite.

Die Umwandlung der Wasserstoffenergie in mechanische Energie kann aber auf einem anderen, chemoelektrischen, Weg stattfinden: mit Hilfe von Brennstoffzellen. Die Brennstoffzelle ist ein exzellenter Wandler von Wasserstoffenergie in elektrische Energie. Wir werden sehen, dass grundsätzlich das System Brennstoffzelle-Elektromotor einen höheren Wirkungsgrad als ein Wasserstoffmotor hat. Die Klärung der globalen Vorteile dieser Kombination im Vergleich zu den Alternativen ist aber kein einfaches Unterfangen und wird in den nachfolgenden Abschnitten in Einzelheiten diskutiert.

Bei der obigen Diskussion der Situation im heutigem Energiesystem mit überwiegend fossilen Energieressourcen haben wir zwei Sekundärenergieträger erwähnt, mit welchen zumindest das Teilziel der lokalen Emissionsfreiheit im Verkehr zu erreichen ist: Elektrizität und Wasserstoff.

Das ultimative Ziel der nachhaltigen Energieversorgung ist jedoch die Nutzung von regenerativen Energieressourcen. Innerhalb der regenerativen Energiekette steht fast ausschließlich (mit Ausnahme der Biomasse) die Elektrizität als Sekundärenergieträger an der ersten Stelle. Wegen der Betankungs- und Reichweiteprobleme bei breiter Anwendung von Batterien ist die Anwendung von Wasserstoff im Verkehr in diesem zukünftigen Szenario unverzichtbar. Die Systeme Brennstoffzelle-Elektromotor und Wasserstoffmotor werden hier in Konkurrenz stehen. Dem nach aller Voraussicht existierenden energetischen Vorteil des ersteren, nämlich niedrigerer Verbrauch, steht die bewährte Einfachheit und die niedrigeren Kosten des zweiten gegenüber.

Aus diesen einführenden Betrachtungen wird ersichtlich, dass der Verbrennungsmotor in allen Versorgungssystemen in Konkurrenz steht, weil er mit den Kraftstoffen sowohl der gegenwärtigen Kraftstoffversorgung (Benzin, Diesel, Erdgas, Methanol und andere Bioalkohole) als auch der künftigen regenerativen Kraftstoffversorgung (Wasserstoff) betrieben werden kann. Elektrische Antriebe können grundsätzlich nur auf der Ebene der globalen Umweltvorteile konkurrieren, also durch bessere Ausnutzung der Energieressourcen. Dementsprechend ist die Ermittlung der entsprechenden Rahmenbedingungen das Zentralthema der folgenden Betrachtungen.

3. Übersicht über einige der Resultate: Vergleich der energetischen Wirkungsgrade

In diesem Abschnitt wird versucht, einen anschaulichen und trotzdem fundierten Überblick sowohl zu der Energieumwandlungskette im Fahrzeug als auch zu der gesamten Energie-

Umwandlungskette von der Primärenergie bis zum Fahrzeugrad zu vermitteln. Die hier angegebenen Zahlenwerte sind nicht in Widerspruch zu den Werten und Folgerungen der später folgenden genauen Simulationen, vielmehr werden sie durch diese überprüft. Sie stehen in guter Übereinstimmung zu den heute in der Literatur allgemein akzeptierten Daten. Die Art der Darstellung in diesem Abschnitt ist aus methodischen Gründen sinnvoll und soll zum besseren Verständnis der später dargestellten Resultate der genauen Simulation dienen.

Aus den einleitenden Ausführungen des vorigen Abschnittes ist bereits zu erkennen, dass die Frage, ob das System Brennstoffzelle-Elektromotor prinzipiell einen ausreichend höheren Wirkungsgrad hat im Vergleich zum Verbrennungsmotor eine Kardinalfrage dieses Berichtes darstellt.

Zur Beantwortung dieser Frage betrachten wir einerseits das typische Antriebssystem mit einem heute üblichen Verbrennungsmotor. Andererseits betrachten wir ein System bestehend aus einer PEM-Brennstoffzelle mit anschließendem elektrischen Antrieb. Beide Systeme sollen im Bereich des optimalen Betriebspunkts arbeiten, der in etwa der Nennleistung entspricht.

In der **Tabelle 1** werden die betrachteten Umwandlungsschritte und die entsprechenden Teilwirkungsgrade angegeben. Das neue bei dieser Darstellung ist, dass alle Umwandlungsschritte innerhalb der Hauptaggregate betrachtet, zueinander geordnet und die typischen Teilwirkungsgrade angegeben werden. Dies erlaubt eine bessere Einsicht in die prinzipiellen Gegebenheiten und das erwartete Gesamtergebnis.

In der **Tabelle 2** werden die entsprechenden Daten für das System Brennstoffzelle-Elektroantrieb angegeben, nach Möglichkeit entsprechend zugeordnet zu den entsprechenden Positionen der Tabelle 1. Allerdings wird dabei die tatsächliche Reihenfolge der Komponenten im Antriebsstrang nicht beibehalten.

Der Vergleich zeigt, dass der erste Schritt des Überganges von der chemischen Energieform des Kraftstoffes zur Wärme beim Verbrennungsmotor bzw. zur elektrischen Energie bei der Brennstoffzelle in beiden Fällen praktisch gleich effizient ist. Der erste nachteilige Schritt im Falle des Verbrennungsmotors ist die Umwandlung der Wärme in mechanische Energie, welche, wie aus exergetischen Gründen zu erwarten ist, ungünstiger ist, als die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie (zweite Spalte). Auch die Daten in der dritten Spalte fallen zu Ungunsten des Verbrennungsmotors aus. Der notwendige Takt zum relativ hohen Verbrennungsdruck ist verständlicherweise ungünstiger als die Luftverdichtung in einer Brennstoffzelle.

Insgesamt wird ersichtlich, dass die Umwandlungskette von der chemischen Energie des Wasserstoffes bis zur mechanischen Energie im Falle der Brennstoffzelle um ca. 40 % effizienter sein kann als die entsprechende Umwandlung der chemischen Energie der aus Erdöl abgeleiteten Kraftstoffe im Falle des Verbrennungsmotors. Wie die später angeführten detaillierter Untersuchungen zeigen, gilt dieses Resultat in etwa auch für den Betrieb während des Fahrzyklus und dies obwohl die Betriebscharakteristiken (Wirkungsgrad als Funktion der

Leistung) für die Hauptaggregate (Verbrennungsmotor bzw. Brennstoffzelle) sehr verschieden sind (siehe dazu Abb. 1 in Abschnitt 5)

Tabelle 1: Antriebssystem mit Verbrennungsmotor beim optimalen Betrieb (Nennleistung)

Wirkungsgrade (Faktoren)	Umwandlungsschritte		Andere Vorgänge			
	Chemische Energie --> Wärme	Wärme --> mechanische Energie	Kompression	Interne Reibung und Drosselung	Externe Reibung	Betrieb Nebenaggregate
$\eta_{CW}^{(1)}$	0.8					
$\eta_{WM}^{(2)}$		0.73				
$\eta_{VE}^{(3)}$			0.72			
$\eta_{IR}^{(4)}$				0.84		
$\eta_{ER}^{(5)}$					0.91	
$\eta_{NE}^{(6)}$						0.97

$$\eta_{ENG} = 0.35$$

$$\eta_{TOT} = 0.31$$

- (1) Verbrennung (2) Expansion (3) Verdichtung
 (4) mechanische Reibung, Strömungsverluste (Ladungswechsel)
 (5) Externe Reibung Getriebe, Achsübertragung, Pumpen und Lüfter
 (6) Elektrisches System

Tabelle 2: Brennstoffzellenantrieb im optimalen Betriebsbereich (Kraftstoff: Wasserstoff)

Wirkungsgrade (Faktoren)	Umwandlungsschritte		Andere Vorgänge			
	Chemische --> elektrische Energie (i=0)	Elektrische --> mechanische Energie	Luft Verdichtung	Interne Hemmungen und Verluste bei Last: i > 0	Externe Reibung bzw. el. Controller	Betrieb Nebenaggregate Konverter und Inverter
$\eta_{CE}^{(1)}$	0.83					
$\eta_{EM}^{(2)}$		0.90				
$\eta_{VE}^{(3)}$			0.95			
$\eta_{IV}^{(4)}$				0.78		
$\eta_{EV}^{(5)}$					0.95	
$\eta_{NE}^{(6)}$						0.82

$$\eta_{DC} = 0.62 \quad \eta_{ENG} = 0.55$$

$$\eta_{TOT} = 0.43$$

- (1) „kalte“ Verbrennung (2) Elektromotor (3) Verdichtung mit 50% Rückgewinnung durch Expander
 (4) Es handelt sich hier um den s.g. Spannungswirkungsgrad bzw. die „elektrochemische Gütezahl“:
 Bei Last (i > 0) fällt die Zellenspannung wegen Ohmsche Verluste, Reaktionshemmungen etc. ab.
 (5) Antrieb Pumpen und Lüfter (außer Luftverdichter)
 (6) Verluste durch Leistungskontroller und Elektromotorenregelung

In der Übersicht der **Tabelle 3** werden die energetischen Verhältnisse in der gesamten Energiewandlungskette durch die entsprechenden Wirkungsgradfaktoren wiedergegeben. Weil für Brennstoffzellenantriebe wegen der Schwierigkeiten der Wasserstoffspeicherung an Bord auch das Betanken von flüssigen Kraftstoffen in Betracht gezogen wird, sind die entsprechenden Wirkungsgrade der notwendigen Reformer an Bord angegeben (es wird hier klar, dass in diesem Fall ein Betankungsvorteil mit den Verlusten eines zusätzlichen Umwandlungsschrittes erkauft werden muss). Es werden auch Elektrofahrzeuge (EF) mit Batteriespeicherung (ohne Elektrizitätsproduktion an Bord) in Betracht gezogen. Die angegebenen numerischen Werte entsprechen den detaillierten Angaben in späteren Abschnitten.

Die Daten der Tabelle 3 erlauben den Gesamtwirkungsgrad (von der Quelle zum Rad) für verschiedene Alternativen abzuschätzen. Dieser wird für einige interessante Fälle mit fossiler Primärenergie (Erdöl oder Erdgas) in der **Tabelle 4** berechnet. Es ist interessant, dass der Gesamtwirkungsgrad in allen Fällen (außer Elektrofahrzeuge mit Batteriespeicherung) in einem ziemlich engen Bereich, zwischen 20 bis 25 %, liegt.

Der energetische Vorteil der Brennstoffzelle wird durch den ersten bzw. ersten und zweiten Energieumwandlungsschritt kompensiert, so dass der Antrieb mit Dieselmotor den besseren Gesamtwirkungsgrad aufweisen kann.

Der höhere Gesamtwirkungsgrad des Batteriefahrzeuges basiert im Grunde auf der Betankung eines exergetisch wertvollen Energieträgers (Elektrizität), welcher aber am schlechtesten speicherbar ist: die Reichweite des Fahrzeuges mit Batteriespeicher wird „prinzipiell“ im ungünstigen Bereich bleiben.

Der Vergleich der zwei Optionen für Brennstoffzellenfahrzeuge, nämlich Wasserstoff oder Methanolbetankung, weist ebenfalls auf diesen Zusammenhang hin: der Versuch, den exergetisch wertvolleren Wasserstoff durch einen besser speicherbaren Kraftstoff (Methanol) zu ersetzen, wird mit einem Nachteil in der Gesamtbilanz erkauft.

Es ist schließlich interessant darauf hinzuweisen, dass der erkennbare Vorteil der Benzinbetankung für Brennstoffzellenfahrzeuge gegenüber der Methanolbetankung eine Folge der jeweils verschiedenen betrachteten Primärenergien ist. Die Umwandlung von Benzin in Wasserstoff ist zwar energetisch aufwendiger als die entsprechende Umwandlung von Methanol. Aber die Bereitstellung von Benzin aus Erdöl ist weniger aufwendig als die Methanolherstellung aus dem exergetisch hochwertigeren Erdgas.

Diese Betrachtungen zeigen die große Bedeutung der dem Fahrzeugantrieb vorgelagerten Stufen innerhalb des fossilen Energieversorgungssystems bei der Gesamtenergiebilanz. Daraus ist ableitbar, dass sich innerhalb des gegenwärtigen fossilen Energieversorgungssystems keine energetischen Vorteile bei der Anwendung des Elektroantriebes mit Brennstoffzellen einstellen.

Tabelle 3: Typische Werte für die Wirkungsgradfaktoren der Teilsysteme

<u>Symbol</u>	<u>System</u>	<u>Wert</u>	<u>Bemerkungen</u>
η_{FPD}	Rohöl -> Benzin	0.87	[F V V, 1998] GUD Kraftwerk
	Rohöl -> Diesel	0.89	
	Erdgas -> Erdgas	0.87	
	Erdgas -> H ₂ (Gas)	0.61	
	Erdg -> Methanol	0.65	
	Erdg-> Elektrizität	0.48-0.50	
η_{FCSt}	PEM Brennstoffzelle	0.58-0.60	Im Fahrzyklus
η_{FREF}	Benzin -> H ₂	0.715	[F V V, 1998] , [Ferrall,1998]
	Methanol -> H ₂	0.81	
η_{TMECH}	Otto Motor (VM)	0.265	Im Fahrzyklus Im Fahrzyklus = $\eta_{FCSt} \eta_{EMOT}$ = $\eta_{BATT} \eta_{EMOT}$
	Diesel Motor (VM)	0.315	
	EF mit BZ-System	0.540	
	EF mit Batterien (EF: Elektrofahrzeug)	0.729	
η_{EMOT} η_{BATT}	Fahrzeuge mit Elektroantrieb (EF)	0.90	Im Fahrzyklus Lade-Entlade-Zyklus
	Batteriefahrzeuge	0.81	
η_{EPTM}	Verbrennungsmotor	0.88-0.92	[Pott, 1998] 0.79 AM + WTM 0.89 PT-Management PT-Management [Höhlein,1998],[Ferrall]
	EF mit BZ-System	0.70	
	EF mit Batterien	0.89	
η_{TOT}		$\eta_{FPD} \eta_{FREF} \eta_{TMECH} \eta_{EPTM}$	

Symbole für die Wirkungrade der Systeme und Teilsysteme

η_{FPD} : Kraftstoff- Produktion, Transport und Verteilung

η_{FCSt} : Brennstoffzellen-Stack

η_{FREF} : Kraftstoffreformierung an Bord

η_{TMECH} : Umwandlung der Kraftstoffenergie (vom Tank bzw. vom Reformer-Ausgang bei Systemen mit Reformer an Bord) zu mechanischer Energie ; Verluste von Nebenaggregaten und für Transmission sind hier nicht mitgerechnet (siehe darunter η_{EPTM}).

η_{EMOT} : Elektrische Antriebsmotoren

η_{BATT} : Batterie Lade-Entlade-Zyklus

η_{EPTM} : Leistungsmanagement ; Verluste der mechanischen und elektrischen Nebenaggregate zur Regelung der Energiewandlung und Transmission.

η_{TOT} = Gesamtwirkungsgrad der Energiewandlungskette (Well to Wheels)

Tabelle 4: Einige Anwendungsbeispiele mit Daten aus der Tabelle 3

<u>Antriebssystem</u>	$\eta_{TOT} = \eta_{FPD} \eta_{FREF} \eta_{TMECH} \eta_{EPTM}$	<u>Bemerkungen</u>
Ottomotor (VM)	$0.866 \cdot 0.265 \cdot 0.88 = 0.866 \cdot 0.23 = \mathbf{0.20}$	Typischer Verbrauch für Kleinwagen: ca. 5.7 l/100 km
Dieselmotor (VM)	$0.895 \cdot 0.315 \cdot 0.88 = 0.895 \cdot 0.28 = \mathbf{0.25}$	Typischer Verbrauch bei Kleinwagen : ca. 4.5 l/100 km
EF mit BZ-System und Druckwasserstofftank (Wasserstoff aus Erdgas)	$0.61 \cdot 0.54 \cdot 0.7 = 0.61 \cdot 0.378 = \mathbf{0.23}$	EF=Fahrzeug mit Elektroantrieb BZ=Brennstoffzelle
EF mit BZ-System und Benzintank	$0.866 \cdot 0.71 \cdot 0.54 \cdot 0.7 = \mathbf{0.23}$	
EF mit BZ-System und Methanoltank (Methanol aus Erdgas)	$0.652 \cdot 0.81 \cdot 0.54 \cdot 0.7 = \mathbf{0.20}$	
EF mit Batterien (begrenzte Reichweite)	$0.48 \cdot 0.73 \cdot 0.89 = \mathbf{0.31}$	sonst als „EV“ bezeichnet

Die Situation stellt sich innerhalb der zukünftigen regenerativen Energieversorgungssysteme anders dar. In diesem Fall ist die Betrachtung der vorgelagerten Stufen wenig oder überhaupt nicht sinnvoll. Wenn Elektrizität (und Wasserstoff) oder Methanol aus regenerativen Energiequellen zu Verfügung stehen, stellt sich nicht die Frage, ob sie günstiger sind als zum Beispiel Benzin aus Erdöl (da dieses dann definitionsgemäß nicht zur Disposition steht), sondern welches Fahrzeugantriebskonzept in diesem Fall am günstigsten diese Sekundär-energeträger nutzen kann. Diese Frage wird in folgenden Abschnitten eingehend untersucht. Aber schon die Daten aus der Tabelle 3 zeigen, dass bei Brennstoffzellenantrieben in diesem Fall mit einem klaren energetischen Vorteil zu rechnen ist.

In der **Tabelle 5** sind als Beispiel Fälle für regenerativen Wasserstoff und Methanol betrachtet, welche den Wirkungsgrad des Antriebssystems des Verbrennungsmotors zeigen, der notwendig wäre, um energetisch dem Brennstoffzellsystem mindestens gleichwertig zu sein. Er liegt höher als die gegenwärtigen Werte.

Dass der energetische Wirkungsgrad im Falle des Batteriefahrzeuges höher als dieser des Brennstoffzellensystems ist (letzte Zeile in der Tabelle 5), ist nicht überraschend, da der Schritt über Wasserstoff zu Elektrizität entfällt und der Batterie- „round trip“ effizienter ist, als ein Brennstoffzellenaggregat.

Gerade hier wird jedoch der Nachteil der alleinigen Betrachtung von Wirkungsgradketten deutlich, welche nur bei gleicher Fahrzeugmasse und Fahrleistungen über den Energiebedarf aussagekräftig sind. Bei gleicher Masse der Fahrzeuge wäre die Reichweite des Batte-

riefahrzeuges kaum akzeptabel. Dies ist nur ein Beispiel dafür, dass weitere wichtige Parameter zu berücksichtigen sind, was nur durch detaillierte Simulationsrechnungen und Untersuchungen erreicht werden kann (siehe auch die Ausführungen im Anhang des vorliegenden Berichtes für eine Darstellung der funktionellen Zusammenhänge, besonders Gl. (11) im Abschnitt 10.2, für die korrekte Definition des (nutzlastbezogenen) Wirkungsgrades anstatt der hier benutzten „Wirkungsgrads-Ketten“).

Tabelle 5: Einige Abschätzungen mit Hilfe der Daten der Tabellen 3, 4

Energiesystem	Fragestellung	Abschätzung	Bedeutung
Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen ist vorhanden	VM und EF mit BZ können benutzt werden. Wie hoch sollte η_{TMECH} des H2-betriebenen VM sein, damit er dem BZ-System überlegen ist?	Es sollte $\eta_{TMECH} > 0.54 \cdot 0.7 / 0.88 = \mathbf{0.43}$	Es ist nicht absehbar, daß der VM mit H2 als Kraftstoff dieses Wirkungsgradniveau erreichen kann. Dazu sind die lokale NOx-Emissionen nicht völlig vermeidbar.[Aceves]
Methanol aus regenerativen Energiequellen ist vorhanden	VM und EF mit BZ können benutzt werden. Wie hoch sollte η_{TMECH} des VM sein, damit er dem BZ-System überlegen ist?	Es sollte $\eta_{TMECH} > 0.81 \cdot 0.54 \cdot 0.7 / 0.88 = \mathbf{0.35}$	Es ist nicht einfach dieses Wirkungsgradniveau mit VM zu erreichen. Noch dazu sind die lokale NOx-Emissionen nicht völlig vermeidbar.
Elektrizität (und Wasserstoff) aus regenerativen Energiequellen ist vorhanden	EF mit Batterien und EF mit BZ können benutzt werden. Wieviel höher ist der Strombedarf des BZ-Systems?	Der energetische Wirkungsgrad des BZ-Systems ist niedriger und zwar um den Faktor: $0.81 \cdot 0.89 / 0.6 \cdot 0.7 = 1.72$	Das Resultat ist nicht aussagekräftig, weil der Energieaufwand auch von der Masse des Antriebes abhängt und die Batteriemasse sehr nachteilig wirkt

Eine zusammenfassende Darstellung zum Vergleich der energetischen Wirkungsgrade der aktuellen Optionen für Fahrzeugantriebe innerhalb der möglichen Energieumwandlungsketten ist in der **Tabelle 6** angegeben. Der Grundgedanke hierbei ist, die Energieketten für jede Primärenergiequelle getrennt zu betrachten und die Wirkungsgrade auf den *ersten* Sekundärenergieträger der jeweiligen Energiekette zu beziehen (also praktisch: „ab Tankstelle“ für zumindest eine Option). In der Tabelle 6 wird dieser als „Energieträger 0“ bezeichnet.

Die Darstellung soll visualisieren, welche Antriebsoption, die auf die Nutzung dieses Energieträgers (Kraftstoffes) basiert, die bessere Energienutzung verspricht und dadurch die höheren globalen Umweltvorteile aufweisen könnte.

Tabelle 6: Energieketten verschiedener Antriebe. Die Wirkungsgrade (eta) beziehen sich auf den „Energieträger 0“, welcher als erster in der Energiekette für den Verkehr direkt als Kraftstoff einsetzbar ist und aus welchem ggf. weitere Kraftstoffe (1,2) unter entsprechenden Energieverlusten abgeleitet werden können.

Eneket3_160899 / Tab_6.xls							
			Bezug (für eta)				
----->	Energiequelle		Energieträger 0	Umwandlung	Energieträger 1	Umwandlung	Energieträger 2
Energiekette	Erdöl	P+V	Benzin / Diesel	<i>Reformierung (0,72)</i>	Wasserstoffgas		
Antriebsstrang (eta)			VM (0,27)		BZ (0,38)		
eta En.Träger "0" bis Rad			0,27		0,27		
Problemzone			Schadstoffe		Systemkosten, -komplexität		
Energiekette	Erdgas	P+V	Erdgas	<i>Reformierung (0,74)</i>	Wasserstoffgas	<i>Verflüssigung (0,70)</i>	LH2
Antriebsstrang (eta)			VM (0,27)		BZ (0,38)		BZ (0,38)
eta En.Träger "0" bis Rad			0,27		0,28		0,2
Problemzone			Schadstoffe		Systemkosten		Systemkosten
Energiekette				<i>Reformierung (0,65)</i>	Methanol	<i>Reformierung (0,82)</i>	Wasserstoffgas
Antriebsstrang (eta)					VM (0,27)		BZ (0,38)
eta En.Träger "0" bis Rad					0,18		0,2
Problemzone					Schadstoffe		Systemkosten
Energiekette							
Antriebsstrang (eta)					BZ (0,27)		
eta En.Träger "0" bis Rad					0,18		
Problemzone					Systemkosten		
Energiekette				<i>Verstromung (0,50)</i>	Elektr. Energie		
Antriebsstrang (eta)					EV+Batt. (0,65)		
eta En.Träger "0" bis Rad					0,33		
Problemzone					Reichweite		
Energiekette	Biomasse	<i>Reformierung</i>	Methanol	<i>Reformierung (0,82)</i>	Wasserstoffgas		
Antriebsstrang (eta)			VM (0,27)		BZ (0,38)		
eta En.Träger "0" bis Rad			0,27		0,31		
Problemzone			Schadstoffe		Systemkosten		
Energiekette							
Antriebsstrang (eta)			BZ (0,27)				
eta En.Träger "0" bis Rad			0,27				
Problemzone			Systemkosten				
Energiekette	Wasser, Wind, Sonne	Verstromung	Elektr. Energie (regenerativ)	Elektrolyse (0,70)	Wasserstoffgas	<i>Verflüssigung (0,70)</i>	LH2
Antriebsstrang (eta)			EV+Batt. (0,65)		VM (0,27)		VM (0,27)
eta En.Träger "0" bis Rad			0,65		0,19		0,13
Problemzone			Reichweite				
Energiekette							
Antriebsstrang (eta)					BZ (0,38)		BZ (0,38)
eta En.Träger "0" bis Rad					0,27		0,19
Problemzone					Systemkosten		Systemkosten
Energiekette	Kohle, Kernenergie	Verstromung	Elektr. Energie				
Antriebsstrang (eta)			EV+Batt. (0,65)				
eta En.Träger "0" bis Rad			0,65				
Problemzone	Umweltprobleme		Reichweite				
Bemerkung: Energieträger-Umwandlung am Bord wird kursiv angegeben.							
VM = Antriebe mit Verbrennungsmotor ; BZ = Brennstoffzellenantriebe ; EV Batteriefahrzeuge							

Als Primärenergiequellen in dieser Tabelle sind

- Erdöl
- Erdgas
- Biomasse
- Wasser/Wind/Sonne
- Kohle/Kernenergie

und als „Sekundärenergieträger 0“ (= Kraftstoff)

- Benzin/Diesel
- Erdgas
- Methanol (aus Biomasse)
- Elektrizität aus Sonnenenergie
- Elektrizität aus Kohle/Kernenergie

angeführt.

Als Optionen stehen Antriebskonzepte zu Verfügung, welche direkt den „Sekundärenergieträger 0“ nutzen, oder, nach entsprechenden zusätzlichen Umwandlungen, weitere „abgeleitete“ Kraftstoffe nutzen. Diese werden in der Tabelle den Spalten „Energieträger 1“ oder „Energieträger 2“ zugeordnet.

Jede Antriebsoption wird durch drei Angaben charakterisiert:

- Kurzbezeichnung des Fahrzeugantriebes und dessen Wirkungsgrad (vom Tank bis zum Rad)
- Gesamtwirkungsgrad der Energiewandlung vom „Energieträger 0“ bis zum Rad
- eine Kurzbezeichnung der jeweils relevanten Problemzone (Schadstoffe, Systemkomplexität und Systemkosten, inhärente Reichweitenachteile, Umweltprobleme der Energiekette)

Steht zum Beispiel Erdgas als „Sekundärenergieträger 0“ zu Verfügung, ist seine Nutzung mit Erdgasmotor im Fahrzeug möglich. Nach einer Reformierung zu Wasserstoffgas ist die lokal emissionsfreie Nutzung mit Brennstoffzellenantrieben, jedoch ohne eindeutigen energetischen Vorteil, möglich. Wird Erdgas zu Methanol reformiert, ist seine Nutzung in Verbrennungsmotoren oder Direkt-Methanol-Brennstoffzellen möglich, aber energetisch ungünstig. Wird das betankte Methanol *an Bord* zu Wasserstoff reformiert und dieser mit den effizienten PEM-Brennstoffzellen genutzt, ist der Gesamtwirkungsgrad erheblich niedriger im Vergleich zu direkter Nutzung von Erdgas in Verbrennungsmotoren. Wird schließlich Erdgas verstromt, ist die Nutzung in Batteriefahrzeugen energetisch am günstigsten, die Problemzone „Reichweite“ ist aber ein ernst zu nehmender Hemmungsfaktor.

In den fossilen Energieketten mit den Primärenergiequellen Erdöl und Erdgas ist der Verbrennungsmotor in der Gesamtbilanz auch zukünftig im Vorteil, weil er „als erster“ direkt zum Kraftstoff der ersten Ebene zugreifen kann. Für die anderen Optionen werden weitere

Umwandlungsschritte (Energieverluste) und/oder aufwendigere Systemkomponenten (mehr Komplexität, Masse, Kosten) benötigt.

Bei den regenerativen Energieketten mit Biomasse bzw. Sonnenenergie ist die Situation verschieden, da Methanol oder Elektrizität an der Stelle des „Energieträgers 0“ zu setzen sind: Die sinnvolle Nutzung des Wasserstoffmotors ist an der zweiten (Wasserstoffgas) oder dritten Ebene (Flüssigwasserstoff) möglich. Aber auf der gleichen Kraftstoff-„Ebene“ wie der Brennstoffzellenantrieb ist der Verbrennungsmotor in diesen Fällen energetisch unterlegen.

Die informativen Zusammenhänge dieses Abschnittes sind auf einfache Weise darstellbar und sollen einem ersten Überblick dienen. Die Quelle der Grunddaten ist jedoch eine genaue Simulation der tatsächlichen Abläufe im typischen Fahrzyklus unter Berücksichtigung des Entwicklungsstandes der Antriebskomponenten, insbesondere der Verbrennungsmotoren, der Brennstoffzellen, der Batterien und der Speicherungsmöglichkeiten an Bord für neuartige Kraftstoffe.

4. Die Simulationsprogramme für die detaillierten Konzeptvergleiche: Grundlagen und Vorgehensweise

Das Ziel der Simulationsberechnung im vorliegenden Fall ist die Systemanalyse. Alle beteiligten technischen Komponenten des Systems (eines Fahrzeuges unter praxisnahen Fahrbedingungen eingebettet in einem Energieversorgungssystem) können prinzipiell in beliebiger „Tiefe“ und mit beliebig hohem Rechenaufwand simuliert werden. Die aufwendige numerische Simulation der Vorgänge in Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen und Elektromotoren ist aber nicht Gegenstand der vorliegenden Systemanalyse. Für sinnvolle Ergebnisse der Systemanalyse genügt es vielmehr, geeignete Parameter festzulegen, welche aus der Fahrzeugpraxis bzw. durch Informationen aus der Forschung und Entwicklung in ihrem momentanen bzw. absehbaren Wert innerhalb eines gewissen Zeithorizonts als gesichert gelten können. Bei richtiger Auswahl der Parameter verlangt die weitere Verknüpfung der Informationen zu einem komplexen System grundsätzlich wenig Aufwand. Das resultierende systemanalytische „Werkzeug“ muss zuerst einmal die Betriebseigenschaften der Teilkomponenten, im vorliegendem Fall auch oft die Betriebsdaten von kommerziellen Fahrzeugen oder Prototypen, welche die benötigte Information lieferten, richtig wiedergeben. Der Nutzen des Werkzeugs liegt natürlich in der großen Flexibilität, mit welcher die anschließende Simulation bzw. die parametrische Studie Resultate im Bezug auf Vergleiche, Rückwirkungen, globale Zusammenhänge und Änderung von Rahmenbedingungen liefern kann.

4.1 Das Simulationsprogramm

Die Simulationsberechnung wird mit einer Zeitauflösung durchgeführt, die der Zeit-Geschwindigkeit Funktion der vorgegebenen Fahrzyklen folgen kann. Bei der Definition der Fahrzyklen sind die Teilabschnitte (Segmente) konstanter Geschwindigkeit und Beschleunigung nach den entsprechenden Normen der Fahrzyklen eingegeben.

Als Startwerte für die Berechnung werden vorgegeben:

- Das Start- und Endsegment der Prüffahrstrecke. Dadurch kann eine beliebige Strecke innerhalb des Fahrzyklus oder innerhalb einer Kombination von Fahrzyklen als Fahrstrecke definiert werden. Bei Bedarf (für Kontrollzwecke) können auch Neigungsgrade in der Fahrstrecke angegeben werden.
- Die Masse des leeren Fahrzeuges ohne Antriebsstrang („Zero Engine Mass“, ZEM; alternativ in englischer Literatur auch als „glider mass“ bezeichnet). Dadurch wird die Art bzw. Klasse des Fahrzeuges definiert: PKW der kleinen, mittleren, großen „Klasse“, Leicht-PKW (meist Studien- oder Prototypfahrzeuge), Bus, etc.
- Die Motorisierung des Fahrzeuges (Leistung des Hauptaggregats, z.B. die Wellenleistung des Verbrennungsmotors). Bei Verbrennungsmotoren wird auch das Hubvolumen, die max. Drehzahl und die Drehzahl beim Leerlauf vorgegeben.
- Die Art des Kraftstoffes (Tankfüllung). Die Art des Kraftstoffes wird so vorgegeben, dass gleichzeitig auch seine „Herkunft“ definiert wird. So wird zum Beispiel zwischen Methanol aus Erdgas oder Biomasse bei der Angabe unterschieden.
- Die Nutzlast während der „Testfahrt“
- Die erwünschte Reichweite
- Diverse Fahrzeugmerkmale wie zum Beispiel Rollwiderstandsbeiwert, aerodynamische Beiwerte, Raddurchmesser und Übersetzungen, max. Geschwindigkeit, mittlere Leistung der üblichen Nebenverbrauchern etc.
- Für Batterie- oder Hybridfahrzeuge die maximal gespeicherte elektrische Energie (für Hybride auch der Ladungsgrad der Batterie beim Start).

Mit diesen Vorgaben kann im ersten Teil der Berechnung die gesamte Masse des Fahrzeuges während der Testfahrt bestimmt werden, welche die für den Kraftstoffverbrauch ausschlaggebenden Verluste durch Roll- und Inertialwiderstände bestimmt.

Dabei wird auf die Faktoren, Koeffizienten oder spezifischen Daten zurückgegriffen, welche jede Komponente des betrachteten Antriebssystems charakterisieren. Neben der benötigten Massen bestimmen diese Daten auch das Betriebsverhalten der Komponenten des Antriebssystems.

Bei der nun folgenden Simulation des Fahrbetriebes wird für jeden Abschnitt die Fahrzeuggeschwindigkeit, die an die Räder wirkenden Drehmomente bzw. Antriebskräfte, die notwendige Leistung des Antriebsmotors, die Verluste entlang des Antriebsstranges und die benötigte Kraftstoffleistung berechnet.

Bei jedem Zeitschritt wird durch Abfragen gewährleistet, dass die im jeweiligen Abschnitt abverlangte Leistung der Komponenten auch vorhanden ist. Bei der entsprechenden Meldung im Falle der Überschreitung wird neben der Möglichkeit des Abbruchs der Simulation auch die Fortsetzung wählbar. Im letzteren Fall wird der Abschnitt „markiert“ und die Leistungswerte ausgegeben, so dass bei Neustart die Auswahl der geeigneten Vorgaben erleichtert wird.

Weitere Vorgänge im Fahrbetrieb, wie zum Beispiel Abschaltung des Verbrennungsmotors bzw. des Brennstoffzellenblocks bei Stillstand des Fahrzeuges und bei Schiebebetrieb wäh-

rend des Fahrzyklus oder die Bremsenergieerückgewinnung bei Fahrzeugen mit Batteriespeicher, müssen innerhalb des jeweiligen Zeitschrittes berücksichtigt werden.

Bei Hybridsystemen ist die Anzahl der notwendigen Abfragen höher und der Berechnungsablauf komplizierter, da in jedem Zeitschritt der Einsatz des einen oder anderen Antriebsstranges festgelegt und der Stand der Energiespeicher überwacht werden muss.

Die mittleren Werte der relevanten Betriebsgrößen während einer Teilstrecke können ausgegeben werden, sie werden aber vor allem für die numerische Integration am Ende des Zeitschrittes benutzt, welche für die Ausgabe der Ergebnisse für die gesamte Fahrstrecke benötigt wird.

Die Ausgabe der Ergebnisse für die gesamte Fahrstrecke beinhaltet:

- Die inhärenten Verluste der Energieumwandlung der chemischen Energie des betankten Kraftstoffes in *nutzbare* Energieform (dies ist mechanische Energie bei Verbrennungsmotoren und elektrische Energie bei Systemen mit Brennstoffzellen oder Speicherbatterien). Es handelt sich um die Exergieverluste des Energiewandlungsprozesses innerhalb des Hauptaggregates oder Hauptspeichers.
- Die Verluste der nutzbaren Energieform auf dem Wege zum Radantrieb. Diese werden aufgeteilt in: Reibungs- oder elektrische Verluste für den Eigenbedarf des Hauptaggregats (zum Beispiel interne Reibung, Drosselung und mechanischer Antrieb von Hilfskomponenten beim Verbrennungsmotor), Transmissionsverluste auf dem Wege vom Hauptaggregat bis zu Antriebs(Rad-)achse, elektrische Verluste für Regelung und Hilfsenergiespeicherung und schließlich Energieverluste restlicher Verbraucher an Bord. Um eine informative Gegenüberstellung dieser Positionen für verschiedene Alternativen zu ermöglichen, werden die Verluste der Elektromotoren bei elektrischem Antrieb zu den Transmissionsverlusten gezählt.
- Die Nutzenergie aufgeteilt in den Anteilen für Roll- und Luftwiderstände, sowie für Bremsenergie.
- Diverse Teilwirkungsgrade und der Gesamtwirkungsgrad im Fahrzeug vom Tank bis zum Rad.
- Der notwendige Primärenergiebedarf und der Gesamtwirkungsgrad („Well to Wheels“)
- Die CO₂-Emission, die lokale Schadstoffemissionen und das CO₂-Äquivalent (g/km)

4.2 Fahrzyklen, Referenzfahrzyklus und Referenzfahrzeug

Die zur Zeit geltende Norm (neuer Europäischer Fahrzyklus), die im folgenden mit NEFZ bezeichnet wird, besteht aus zwei Teilen: Der erste Teil (NEFZ1) entspricht einem älteren Normfahrzyklus, welcher eher dem „stop and go“ Verkehr in einem Stadtkern entspricht. Der neu dazu gekommene Teil, NEFZ2, soll den Verkehr „außerorts“ beschreiben. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass beide Teile zusammen zufriedenstellend den Verkehr im sog. Stadtgebiet („urban“) beschreiben. Aus den Statistiken ist bekannt, dass diese Art von Verkehr ca. einem Drittel der üblichen Fahrleistungen in Deutschland entspricht. Ein weiteres Drittel entspricht Fahrleistungen auf Bundesstraßen mit maximalen Geschwindigkeiten von ca. 100 km/h (in USA „highway“), der Rest entspricht Fahrleistungen auf Autobahnen mit Spitzengeschwindigkeiten von über 120 km/h. Wir haben deswegen in unserem Refe-

renzfahrzyklus die Teile für das Fahren auf Schnellstraßen und Autobahnen integriert, welche vom Deutschen Automobilclub ADAC benutzt werden und zu Verfügung gestellt wurden. Der Referenzfahrzyklus (RFZy) besteht dann aus folgenden Teilen:

- Stadtkern bzw. innerorts nach NEFZ1 (4.25 km)
- Außerorts nach NEFZ2 (6.87 km)
- Schnellstraße (10.7 km)
- Autobahn (9.6 km)

Die gesamte Länge des Referenzfahrzyklus beträgt dann ca. 31.5 km.

Die Vergleiche der Antriebskonzepte für Personenkraftwagen (PKW) erfolgt in den folgenden Abschnitten, wenn nicht anders vermerkt, auf der Basis dieses Referenzfahrzyklus.

Wie die späteren Resultate zeigen werden, ergibt sich auch auf der Basis des neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) praktisch der gleiche spezifische Kraftstoffverbrauch (MJ/km) wie beim Referenzfahrzyklus, und zwar für alle Antriebsarten. Der Grund dafür ist, dass beim NEFZ zwar die erforderliche Leistung am Rad niedriger ist, aber auch der Wirkungsgrad der Antriebe, wenn sie dafür ausgelegt sind, dass, wie in der Praxis erforderlich, auch die Fahrten mit der maximalen Geschwindigkeit möglich sind (d.h. wenn keine Untermotorisierung vorliegt). Die Betrachtung des oben beschriebenen Referenzfahrzyklus hat vor allem den Vorteil, dass dadurch bei Fahrsimulationen die genügende Motorisierung der Antriebskonzepte überprüft wird und somit praxisnahe Auslegungen der Fahreigenschaften zum Vergleich gezogen werden.

Für spezielle Fahrzeuge wie Busse steht der Betrieb im städtischen Bereich im Vordergrund und die Geschwindigkeiten überschreiten nicht die im NEFZ vorgegebenen. Für solche Vergleiche wird der neue europäische Fahrzyklus mit beiden Teilen NEFZ1 und NEFZ2 oder gegebenenfalls nur mit dem Teil NEFZ1 (innerorts) in Betracht gezogen.

Als gemeinsame Basis für Konzeptvergleiche ist auch die Definition eines Referenzfahrzeuges (RFZ) notwendig.

Die Definition der Daten des Referenzfahrzeuges beinhaltet nicht den Antriebsstrang. Dieser wird für die verschiedenen Optionen gesondert berechnet mit dem Ziel, die gleichen Fahreigenschaften beim gleichen Fahrzyklus (Referenzfahrzyklus) zu erreichen. Alle andere Daten aber müssen für den Zweck des Vergleiches identisch sein, so etwa die Fahrzeugmasse ohne Antrieb (ZEM), welche in der Praxis die „Fahrzeugklasse“ weitgehend definiert. Neben der Bedingung, dass die Antriebsleistung für alle Abschnitte des Referenzfahrzyklus ausreichen soll, ist die Überwachung der „Motorisierung“ ausgedrückt in kW pro Tonne von Nutzen, um zu vermeiden, dass eines der zu vergleichenden Fahrzeugen „übermotorisiert“ ist. Als Vorgabe bei der Simulation wird grundsätzlich nur die Leistung des konventionellen Antriebes, also des Verbrennungsmotors angegeben, wodurch auch das „Maß“ der Motorisierung definiert wird. Die Leistung des Hauptaggregates im Antriebsstrang der alternativen Konzepte muss sich aus der Berechnung ergeben. So zeigen die Resultate, dass die Brennstoffzellenleistung um etwa 45-55 % höher sein soll als die Leistung des Verbrennungsmotors des zu vergleichenden Fahrzeuges mit konventionellem Antrieb. Dieses ist nicht nur ei-

ne Folge der höheren Gesamtmasse des Brennstoffzellenfahrzeuges: Die Brennstoffzelle liefert elektrische Energie, welche anschließend in mechanische Energie umgewandelt wird und sie muss deswegen für die Verluste der Konvertierung, der Regelung und des Elektromotors aufkommen. Die wichtigsten charakteristischen Daten des Referenzfahrzeuges sind die folgenden:

- Fahrzeugmasse ohne Antrieb (ZEM) 800 kg
- Nutzlast beim Test 150 kg
- Luftwiderstandskoeffizient 0.61
- Rollwiderstandsbeiwert 0.01
- Motorisierung ca. 50 kW/to
- Reichweite ca. 600 km (bei Batteriefahrzeugen: >150 km)
- Max. Geschwindigkeit 160 km/h

In der **Tabelle 7** wird ein Überblick der charakteristischen Daten verschiedener Fahrzeugklassen angegeben. Es wird ersichtlich, dass das Referenzfahrzeug ein Fahrzeug der sog. mittleren Klasse ist.

Bei vielen Resultaten der nachfolgenden Abschnitte sind auch andere Fahrzeuge als das Referenzfahrzeug Gegenstand der Untersuchung, so zum Beispiel Busse, oder neuere PKW-Modelle oder Prototypen mit alternativen Antrieben. In diesen Fällen müssen die Fahrzeugdaten gesondert spezifiziert werden. Bei Prototypen mit alternativen Antrieben muss selbstverständlich als Basis für die Motorisierung die Leistung des Prototyps stehen, wobei sich die Leistung des zu vergleichenden Antriebes mit Verbrennungsmotor aus der Berechnung ergibt.

4.3 Systemvariablen und spezifische Daten: Berücksichtigung der neuesten Entwicklungen

Mit der Auswahl der Systemvariablen in dieser Studie wurden die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Fahrzeugantriebe weitgehend berücksichtigt. Beachtenswerte Fortschritte hat es sowohl bei den Verbrennungsmotoren, wie auch bei Brennstoffzellensystemen gegeben.

Bei Verbrennungsmotoren ist mit kleinerem spezifischen Verbrauch zu rechnen. Obwohl hierfür bei serienmäßigen Motoren ein Bündel von Maßnahmen dazu beiträgt, kann hier summarisch gesagt werden, dass vor allem die Anhebung des Drehmomentes und die Verminderung der Drosselverluste im Teillastbereich dazu beitragen. Das Hauptinstrument für diese Verbesserungen ist die Elektronik und die Einführung intelligenter elektrischer Regelungen. Der Dieselmotor ist gegenwärtig im Bezug auf Kraftstoffverbrauch auch in der Serie weit fortgeschritten. Für den Ottomotor ist durch die Einführung der variablen Ventilsteuerung und schließlich der Direkteinspritzung bei Einführung von schwefelarmem Benzin ein Gleichziehen sicher. Der Einsatz der Elektronik erlaubt auch Verbesserungen bei der Kraftübertragung: Das früher ineffiziente Automatikgetriebe kann jetzt mit Hilfe der elektronischen Regelung für Kraftstoffeinsparung eingesetzt werden.

Tabelle 7: Charakteristische Daten verschiedener Fahrzeugklassen

	Mittlere Klasse (Referenz) ⁽¹⁾	Kleine Klasse	Leichtfahrzeug (Studien, Prototyp)	Große Klasse
ZEM	850 - 750 kg ⁽²⁾	650 - 700 kg ⁽³⁾	430 - 450 kg ⁽⁴⁾	1050 -1100 kg
Nutzlast beim Test	75-150 kg	75-150 kg	75-150 kg	75-150 kg
Luftwiderstands- koeffizient	$c_w \cdot A=0.60-0.61$	$c_w \cdot A=0.54-0.61$	$c_w \cdot A=0.54-0.61$	$c_w \cdot A=0.62-0.72$
Rollwiderstands- beiwert	0.008-0.011	0.008-0.011	0.008-0.011	0.008-0.012
Motorisierung min	30 kW / to	30 kW / to	30 kW / to	35 kW / to
Motorisierung, typisch	50 kW / to	44 kW / to	44 kW / to	55 kW / to
Max. Geschwindigkeit	>170	um 140	um 140	>180
Reichweite normal	>500 km	>500 km	>500 km	>500 km
Reichweite min. (Batteriefahrzeuge)	150 km	150 km	150 km	150 km

- (1) vgl. A-Klasse, Golf
- (2) vgl. [FVV, 1998], 730 kg
- (3) „Fiat Uno“ ca. 650 kg
- (4) Klasse A0 nach [Quiseck, 1998]: 430 kg

In der **Tabelle 8** werden einige spezifische Daten für gegenwärtige Antriebe mit Verbrennungsmotor und die dem Referenzfahrzeug entsprechenden Werte angegeben.

Die Entwicklungsschritte bei Brennstoffzellenantrieben liegen vor allem in der Verminderung der spezifischen Masse des Brennstoffzellenaggregats, der evtl. benötigten Reformer und der sonstigen Miniaturisierung von Komponenten in der Peripherie. In solchen Systemen ist zunehmend mit dem Einbau effizienter, speziell für Fahrzeuge entwickelten, Elektromotoren und Konverter zu rechnen, was auch den Elektrofahrzeugen mit Batteriespeicherung zugute kommen wird.

In der **Tabelle 9** werden einige spezifische Daten für Systeme mit elektrischem Antrieb und die dem Referenzfahrzeug entsprechenden Werte angegeben. Es muss erwähnt werden, dass die hier angegebenen Werte für die spezifischen Massen und für die Verluste in Nebenaggregaten realistisch vertretbare Werte sind. Sie sind insofern als optimistisch zu bezeichnen, als sie bedeutend besser sind, als diejenigen der zur Zeit in Prototypen zu Verfü-

gung stehenden Komponenten. Die nach der Tabelle 9 für den gesamten Brennstoffzellenantrieb berechnete Masse ergibt sich um ca. den Faktor zwei niedriger als die Masse der Antriebe in Prototypen, zukünftige Fortschritte sind hier bereits berücksichtigt. Insbesondere im Bezug auf die spezifische Masse darf nicht übersehen werden, dass diese bei Brennstoffzellenantrieben *prinzipiell* höher liegt als bei Antrieben mit Verbrennungsmotor. Aus der Theorie und Praxis von Batteriefahrzeugen ist schon bekannt, dass die Masse der Komponenten für die Aufbereitung der elektrischen Energie zuzüglich der Masse des Elektromotors der Masse eines Verbrennungsmotors gleicher Nettoleistung gleichkommt. Im Falle des Brennstoffzellenantriebes kommt aber die Masse des Brennstoffzellenstacks und des Luft- und Wärmemanagements noch dazu. Die resultierende Erhöhung der Masse der zukünftigen Brennstoffzellenantriebe gegenüber dem Verbrennungsfaktor kann minimal um den Faktor 1.4 bis 1.5 betragen (heutiger Wert ≈ 2). Eine Erhöhung der Fahrzeugmasse ist aber durchaus sinnvoll, wenn sich dadurch der Wirkungsgrad des gesamten Systems erhöht. Umgekehrt gilt, besonders bei Elektromotoren, dass eine Verringerung der Masse (d.h. Erhöhung der Ausnutzung) sich nicht mit den hier betrachteten Wirkungsgraden vereinbaren lässt.

Die Frage zum Platzbedarf der alternativen Antriebe ist nicht Hauptgegenstand dieses Berichtes, obwohl generell der Raumbedarf der neuen Antrieben höher ist im Vergleich zum konventionellen Antrieb und zu speziellen Konstruktionslösungen führen muss. Hier seien einige Daten zur Orientierung angegeben: Für Antriebe mit Verbrennungsmotor kann in etwa mit einem Platzbedarf von 3 l/kW gerechnet werden. Für Brennstoffzellenantriebe sind die besten zu erwarteten Werte in etwa 1 l/kW_e jeweils für den Brennstoffzellenblock und die Peripherie. Für den Methanolreformer und -tank ist mit etwa 1.5 l/kW_e zu rechnen. Bezogen auf die mechanische Antriebsleistung ergibt sich insgesamt ein Raumbedarf von bestenfalls ca. 5.9 l/kW, also fast das 2-fache als beim Verbrennungsmotor. Bei Druckspeicherung von Wasserstoff an Bord verschlechtert sich dieses Verhältnis günstigstenfalls auf das 4-fache. Die Unterbringung von Druckspeichern für *Wasserstoffgas* in Personenwagen mit normaler Reichweite ist wegen des Volumenbedarfs als problematisch zu betrachten, alternative Speicherungsverfahren (Methanol, Flüssigwasserstoff) sind bedeutend mehr energieaufwendig. Im Abschnitt 10.3 (Anhang zu diesem Bericht) wird dieses Problem eingehender diskutiert.

Die in den Tabellen 8 und 9 angegebenen Daten berücksichtigen die Entwicklungen und die Fortschritte der letzten Jahre sowohl im Bereich der konventionellen wie auch der alternativen Antriebe. Ist eine „Sättigung“ im Bezug auf solche Fortschritte erkennbar? Eine eindeutige und quantitative Antwort kann nicht gegeben werden, es gibt jedoch eine Anzahl interessanter Bemerkungen dazu.

Die Verminderung des Verbrauchs bei Verbrennungsmotoren folgt seit Jahren einen im Mittel linearen Verlauf, welcher sich auch über das Jahr 2000 hinaus fortsetzen wird. Der Zeitpunkt der nachfolgenden Sättigung hängt von der „Geschwindigkeit“ ab, mit welcher die Motorenhersteller die noch (zahlreichen) Maßnahmen zur Minderung des Kraftstoffverbrauchs gemäß der Marktsituation und der Gesetzgebung einführen werden. Mit den Daten der Tabelle 8 berücksichtigen wir den Stand der Technik, welcher auf dem Markt gegenwärtig verfügbar ist, wenn auch nicht bei allen Fahrzeugmodellen.

Tabelle 8: Auswahl wichtiger Eingangsvariablen bei Antriebssystemen mit Verbrennungsmotor

Beschreibung	Wertbereich	Optim. Praxiswert	Einheit (¹)
Verdichtung	9-20	10 (Otto) 19 (Diesel)	
Motordrehzahl max. Ottomotor Dieselmotor	4000-5600	5000 4200	U/min
Leerlaufdrehzahl	700-800	700	
Spezifischer Kraftstoffverbrauch für Reibung/Drosselung (Bezug: Leerlauf)	0.20-0.26	0.21	kW/(U, liter)
Spezifische Wellenleistung Ottomotor Dieselmotor	0.4-0.55 0.35-0.45	0.51 0.45	kW/(U, liter)
Volumenleistung Ottomotor Dieselmotor	37-55 26-39	50 38	kW / liter
Spezifische Motormasse Ottomotor Dieselmotor	1.5-2.7 2.2-3	2.1 2.5	kg / kW
Spezifische Masse der Transmission	0.75	0.75	kg / kW
Spezifische Masse der Nebenaggregate	0.5	0.5	kg / kW
Wirkungsgrad Getriebe/Kraftübertragung	0.88-0.92	0.92	

(¹) Volumenspezifische-Angaben beziehen sich auf Hubraumvolumen

Bemerkung zum Platzbedarf der Antriebe:

Für VM-Antriebe (inkl. Tank) kann in etwa mit 3 l/kW gerechnet werden.

Tabelle 9: Auswahl wichtiger Systemvariablen bei Antriebssystemen mit Elektromotor

Beschreibung	Wertbereich (¹)	Opt. Praxiswert (in diesem Bericht) (²)	Einheit
Koeffizienten zur Berechnung der Kennlinie von PEM-Brennstoffzellen (bei 80 °C)			
e_0		984	mVolt
b		59	mVolt/dec
r		0.2872	Ohm*cm ²
m		0.127	mVolt
n		0.006935	cm ² /mA
i_l	0.001- 0.010	0.002	A/cm ²
Reformer-Wirkungsgrad (Kraftstoff ->H ₂)	73-82	75 (Benzin->H ₂) 82 (Methanol->H ₂)	% %
<u>BZ-Luftversorgung</u> :			
Stoichiometrisches Verhältnis		3	-
Verdichter/Expander -Wirkungsgrad		75	%
Eingangsdruck, max.		2.9	bar
Ausgangsdruck		1	bar
Energierückgewinnung durch Turbinen		50	%
Standby-Leistung (falls keine Abschaltung)		10	%
<u>Verluste elektrischer Energie im Mittel des Zyklusbetriebes (Nebenaggregate, el. Antriebsstrang und evtl. vorhandene Bateriaespeicher) :</u>			
Elektr. Antriebsmotor (2-Gang-Betrieb)	10-18	10	%
Leistungsregelung / Converter / Inverter	10-20	11	%
Wärme- bzw. Temperaturmanagement,			%
Wasser-, Feuchtemanagement etc.	12-17	12	%
Batterie („round-trip“)	20-30	20	%
<u>Spezifische Massen BZ-Antriebsstrang:</u>			(³)
Kraftstoffreformer (inkl. Regelung)	1.5-2.7 (5.5)	1.5	kg/kW
Brennstoffzellenstapel (inkl. Filter, Befeuchtungskomponenten, etc.)	1.7-2.5	1.7	kg/kW
Verdichter / Expander		0.1	kg/kW
Wärmetauscher, Temperatur- und Leistungsmanagement (inkl. Konverter)		1.5	kg/kW
Antriebsmotor mit Inverter	1-2	1.1	kg/kW
Transmission		0.3	kg/kW
Restliche Komponenten (⁴)		0.3	kg/kW
<u>Spezifische Massen Batterien :</u>			
Energiebezogen	8-25	20 (Bleigel) 12 (NiMeH)	kg/kWh kg/kWh
Leistungsbezogen	2.2-6.6	3 (Bleigel) 4 (NiMeH)	kg/kW kg/kW

(1) Die Angaben variieren je nach Annahmen zum Entwicklungsstand, sowie wegen verschiedenen Fabrikate und Auslegungen. Im Falle der Batterien umfasst der Bereich verschiedene Batteriearten. Im Falle des Brennstoffzellenstapels hängt der Bereich auch von der angenommenen maxim. Stromdichte ab, welche aber bei Firmenangaben nicht explizit genannt wird. Sehr hohe Stromdichten sind mit niedrigem Wirkungsgrad verbunden, deswegen bedeuten niedrige spezifische Massen nicht unbedingt optimale Lösung. Mit gegenwärtiger Technologie ist für Kraftstoffreformer an Bord mit bis zu 5.5 kg/kW zu rechnen, eine bedeutende Massenreduzierung ist jedoch denkbar. Benzinreformer sind aufwendiger als Methanolreformer.

(2) Es handelt sich um optimistische, jedoch realistisch vertretbare Werte. Mit diesen Werten ergibt sich die Masse des gesamten Brennstoffzellenantriebes um den Faktor zwei niedriger als beim gegenwärtigen Stand.

(3) Bezogen auf die brutto Ausgangsleistung des Brennstoffzellenstapels.

(4) Komponenten, welche nicht zum Antriebsstrang gehören, werden gesondert berücksichtigt.

Bei der Herstellung des Brennstoffzellenstapels ist eine gewisse „Sättigung“ bei der Qualität der Brennstoffzellen- (Strom-Spannungs-)Charakteristik und der spezifischen Masse (kg/kW_e) des kommerziellen Stapels festzustellen, da die erreichten Fortschritte fast an die Grenzen des physikalisch Möglichen stoßen. Weitere Fortschritte sind, wie auch die Protagonisten der Einführung der Brennstoffzellenantriebe ankündigen, nunmehr auf dem Gebiet der Integration, der Effizienzerhöhung und der Miniaturisierung der restlichen Komponenten zu erwarten. Die spezifische Masse dieser Komponenten muss bedeutend reduziert werden, so dass die auf die elektrische Leistung des Brennstoffzellenstapels bezogene Masse des *gesamten* Antriebes noch um den Faktor zwei gegenüber dem heutigen Stand reduziert werden kann. Die Daten der Tabelle 9 berücksichtigen dies und entsprechen dem optimistischen Stand beim Zeitpunkt der angekündigten Markteinführung von Brennstoffzellenantrieben.

Mit anderen Worten: Als Zeithorizont für die benutzten spezifischen Daten bei den Simulationsberechnungen ist das Jahr 1999/2000 für die Verbrennungsmotoren bzw. die Zeit nach 2005 für die Brennstoffzellenantriebe zu verstehen.

In diesem Zeitrahmen erwarten wir die weitgehende „Reife“ sowohl der konventionellen Motoren wie auch der Hauptkomponenten des Brennstoffzellenantriebes. Dabei entsteht folgende Frage: Der Entwicklungszeitraum der Verbrennungsmotoren erstreckt sich auf über 100 Jahre, der Zeitraum intensiver Forschung für die Anwendung der Brennstoffzelle im Verkehr kaum zwei Jahrzehnte. Wie sind die unterschiedlichen Zeiträume bis zu der weitgehenden Reife zu erklären? Die Antwort scheint einfach:

Alle grundlegenden Prinzipien zur Verbesserung (auch die Hybridisierung!) waren schon in den ersten Jahren der Verbreitung der Antriebe mit Verbrennungsmotor bekannt. Die „lange“ Geschichte des Verbrennungsmotors muss im Hinblick auf die Verminderung von Verbrauch und Emissionen in Wirklichkeit als eine Stagnation wegen fehlender Konkurrenz durch Alternativen und wegen der Hürden der mechanischen Steuersysteme betrachtet werden: Erst die breite Anwendung der Elektronik an Bord erlaubte (und erzwang) unter dem Druck des wachsenden Verkehrsaufkommens und der Umweltprobleme deutliche Sprünge in der Verringerung von Verbrauch und Emissionen.

Diese zwei Ursachen für die beschleunigte Verbesserung der Antriebe, der Druck durch Umweltbewusstsein und die Möglichkeit der Nutzung der modernen Elektronik an Bord, kamen gleichzeitig allen Antriebskonzepten zugute. Im Resultat müssen sich die Alternativen an einen erheblich verbesserten Verbrennungsmotor messen lassen.

Nach der „Niederlage“ der Batteriefahrzeuge Anfang des 20. Jahrhundert war der Verbrennungsmotor ohne konkurrierende Alternative. Die Einführung der Brennstoffzellenantriebe muss mit klaren globalen Umweltvorteilen einhergehen, welche die Einführung eines reifen Produkts voraussetzen. Diese neue „Messlatte“ hat im Falle der langen Entwicklungsgeschichte des Verbrennungsmotors gefehlt. Gleichzeitig müssen Alternativen im wesentlichen das Kostenniveau des Verbrennungsmotors erreichen.

4.4 Spezifische Emissionen und spezifischer Primärenergiebedarf der Kraftstoffe

Die Emissionen eines Fahrzeuges hängen nicht nur von der Art des Antriebes ab, sondern auch von der Art des Kraftstoffes und der vorgelagerten Energiewandlungskette. Die Tabellen 10 und 11 geben für die wichtigsten Kraftstoffe einen Überblick zu den lokalen und globalen Emissionen, wobei die ersteren am Ort der Kraftstoffnutzung entstehen. Die globalen Emissionen enthalten zusätzlich die bei der Produktion und Verteilung des Kraftstoffes entstehenden Emissionen, siehe auch [Pehnt, 1999].

Die **Tabelle 10** fasst Daten für die fossilen Kraftstoffe und für Kohlewasserstoffhaltige Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zusammen.

In der **Tabelle 11** sind die entsprechenden Daten für Kraftstoffe zusammengefasst, welche lokal (also am Ort der Kraftstoffnutzung) ganz oder weitgehend emissionsfrei sind, also Elektrizität oder Wasserstoff. Sehr niedrige Emissionen sind auch bei nichtfossiler Elektrizität angeführt, welche aus schwer vermeidbaren bzw. nicht auszuschließenden Prozessen in der Produktions- und Verteilungskette stammen.

Der Bezug auf die Kraftstoffenergie ($\text{g/MJ}_{\text{Kraftstoff}}$) widerspiegelt den direkten Zusammenhang der Emission zu der verbrauchten Kraftstoffmenge. Allerdings ist die momentane Emission von Schadstoffen in gewisser Masse von der Art der Kraftstoffnutzung, speziell bei Verbrennungsmotoren vom momentanen Betriebspunkt, abhängig. Die angegebenen Daten sind aber repräsentativ, weil sie aus der Anwendungspraxis der Verbrennungsmotoren stammen (wobei die Nutzung von Katalysatoren berücksichtigt ist) und mittlere Werte aus dem praxisnahen Betrieb repräsentieren. Dabei muss auch berücksichtigt werden, dass, anders als bei der spezifischen CO_2 -Emission, sich gerade die Werte für Schadstoffe (wie CO , NO_x , Kohlenwasserstoff etc.) mit der Motorentwicklung ständig ändern.

In der **Tabelle 12** sind typische Daten für PKW für den Zeitraum 1980 bis 1999 angegeben. In diesem Zeitraum ist der Verbrauch nur um ca. den Faktor 1.53, jedoch die spezifische Emission ($\text{g/MJ}_{\text{Kraftstoff}}$) für CO um den Faktor 43, für NO_x um den Faktor 35 und für NMHC um den Faktor 50 zurückgegangen!. Die Tendenz ist anhaltend und es ist anzunehmen, dass auch schärfere Abgasnormen erfüllt werden können. Praktisch alle neuen Pkw-Modelle mit Verbrennungsmotor erfüllen die strengere D4-Norm, für CO -Werte sogar die ULEV oder sogar SULEV-Normen.

Der Primärenergiebedarf der Kraftstoffe kann ebenfalls auf die Kraftstoffenergie bezogen werden ($\text{MJ}_{\text{primär}}/\text{MJ}_{\text{Kraftstoff}}$). In den **Tabellen 13a, 13b** sind die in der Literatur übliche Bereiche für diesen Faktor und in Klammer der in diesem Bericht benutzte Wert angegeben.

Es ist interessant zu bemerken, dass die Produktion und Verteilung lokal emissionsfreier Kraftstoffe aus fossiler Primärenergie (Tabelle 13b) mit erheblichen globalen Nachteilen im Bezug auf Energiebedarf (und CO_2 -Ausstoß) verbunden ist.

Tabelle 10: Spez. Kraftstoffemissionen im Verkehr (Kohlenwasserstoffe, Alkohole)

Emissionen (g / MJ _{Kraftstoff})	Benzin	Diesel	Erdgas (Druck- speicher)	Methanol aus Erdgas	Methanol aus Holz/ Biomasse	Ethanol aus nachw. Rohstoffe
<u>CO₂-Äquivalent (Treibhausgase)</u> Kraftstoff global ⁽¹⁾	85.9 (90.9)	85.8 (91.1)	66.6 (73.6)	93.0 (97.7)	Bilanziert ⁽³⁾ 23.1 (24.8)	Bilanziert ⁽²⁾ ⁽³⁾ ⁽⁴⁾ 116.0
<u>CO₂</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	72.7 85.4	73.3 82.4	57.1 63.0	67.5 93.0	Bilanziert ⁽³⁾ 67.6 20.3	Bilanziert ⁽³⁾ 75.2 79.6
<u>NO_x, V-Motor</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	0.05 0.08	0.14 0.17	0.02 0.05	0.05 0.11	0.05 0.145	0.05 0.35
<u>NO_x, Elektromotor und Brennstoffzelle</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global				----- 0.06	----- 0.095	
<u>CO, V-Motor</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	0.19 0.20	0.20 0.21	0.146 0.214	0.05 0.075	0.05 0.165	0.05 0.33
<u>CO, Elektromotor und Brennstoffzelle</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global				----- 0.025	----- 0.115	
<u>NMHC, V-Motor</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	0.018 0.069	0.03 0.045	0.034 0.06	0.015 0.045	0.015 0.028	0.011 0.029
<u>NMHC, El.-Motor und Brennstoffzelle</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global				----- 0.03	----- 0.013	
CH ₄ global	0.047	0.03	0.30	0.09-0.24	0.02	0.076
N ₂ O global	0.015	0.016	0.014	0.013	0.02	0.113

- (1) Bei Erdgas (bzw. Kraftstoffen aus Erdgas) werden die auf „vermeidbare“ Leckagen und Abfackelungen (flares) zurückzuführenden Emissionen nicht mitgerechnet. Werte in Klammern gelten unter Berücksichtigung von zusätzlichen klimawirksamen Emissionen (z.B. N₂O).
- (2) Eigens angebauten Plantagen für Kraftstoffgewinnung (flüssige „Bio-Treibstoffe“)
- (3) Global bilanziert unter Berücksichtigung der Regenerierung der Plantage oder der Holz- bzw. der Biomasse (Feedstock recovery).
- (4) Diese hohen Emissionswerte entstehen durch die Anwendung von Düngemitteln und teils durch die Anwendung von Landwirtschaftlichen Maschinen, welche hier vorwiegend durch Energie aus fossilen Energieträgern angetrieben werden.

Tabelle 11: Lokal emissionsfreie Energieträger im Verkehr (Elektrizität, Wasserstoff) ⁽¹⁾

Emissionen (g / MJ _{Kraftstoff})	Elektrizität (Mix) (a)	Elektrizität (Nichtfossil) (b)	CH Elektrolyse mit (a) / (b)	LH Elektrolyse mit (a) / (b)	CH / LH aus Erdgas
<u>CO₂-Äquivalent</u> (Treibhausgase) Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	----- (EU) 149 (D: 191)	----- 17	1.6 ⁽²⁾ 199.5 / 24.4	1.6 ⁽²⁾ 291.8 / 35.3	1.6 ⁽²⁾ 92.3/135
<u>CO₂</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	----- (EU) 139 (D: 178)	----- 16	---- / ---- 177.3 / 23.1	---- / ---- 276 / 33.4	----- 88.5/130.6
<u>NO_x, IC - Motor</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global			0.02 / 0.02 0.20/ 0.045	0.02 / 0.02 0.29 / 0.06	0.02 0.066/ / 0.093
<u>NO_x, Elektromotor</u> (Batt./ Brennstoffzelle) Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	----- 0.14	----- 0.02	---- / ---- 0.18 / 0.025	---- / ---- 0.27 / 0.04	----- 0.046/ /0.068
<u>CO, IC - Motor</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global			---- / ---- 0.05/ 0.014	----- / ---- 0.07 / 0.02	----- 0.01/ 0.015
<u>CO, Elektromotor</u> (Batt./ Brennstoffzelle) Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	----- 0.028	----- 0.01	---- / ---- 0.05/ 0.014	---- / ---- 0.07 / 0.02	----- 0.01/ 0.015
<u>NMHC, IC - Motor</u> Kraftstoffnutzung Kraftstoff global			---- / ---- 0.016 / ----	---- / ---- 0.024 / ----	----- 0.02 / 0.03
<u>NMHC, El.- Motor</u> (Batt./ Brennstoffzelle) Kraftstoffnutzung Kraftstoff global	----- 0.012	----- -----	---- / ---- 0.016 / ----	---- / ---- 0.024 / ----	----- 0.02 / 0.03
CH ₄ global	0.14		0.19	0.28	0.03 ⁽³⁾

(1) Diese Energieträger sind im Bezug auf Treibhausgase praktisch lokal emissionsfrei. Ihre Anwendung ist aber mit Betankungs- und Speicherungsproblemen (Batterien, bzw. Druck- oder Flüssigwasserstoff speicher) behaftet. Bei nichtfossiler Elektrizität wird der Anteil der Photovoltaik mit ca 1/3 angesetzt (vgl. [Krüger et al., 1998]).

(2) Nur bei Anwendung von Verbrennungsmotoren. Elektrofahrzeuge sind lokal praktisch emissionsfrei. Ausnahme: evtl. benötigte Zusatzheizung.

(3) Leckverluste und Abfackeln von Erdgas nicht mitgerechnet.

(4) CH : Compressed Hydrogen ; LH : Liquid Hydrogen

Tabelle 12: Entwicklung des mittleren Verbrauchs und der Emissionen für PKW [Handbuch für Emissionsfaktoren, Infrac AG, 1966] sowie Emissionen nach D3, D4, ULEV und SULEV im Vergleich zu aktuellen Praxiswerten.

	Verbrauch (MJ/km)	CO ₂ (g/km)	CO (g/km)	NO _x (g/km)	NMHC (g/km)
1980	3,43	248,2	17,65	2,075	2,01
1982	3,31	239,7	15,41	2,059	1,94
1984	3,23	233,9	13,89	2,045	1,9
1986	2,9	209,7	1,99	0,285	0,175
1988	2,75	198,9	1,60	0,272	0,142
1990	2,67	193,4	1,61	0,284	0,143
1992	2,57	186,2	0,90	0,238	0,078
1994	2,57	185,7	0,9	0,277	0,089
1996	2,55	184,7	0,41	0,189	0,036
1998					0,04
1999	2,25	160,9	0,41 (D4)	0,122 (D3)	0,04 (D4)
2000			(SULEV)	0,06 (D4)	0,02 (ULEV)
Faktoren					
1980/1999	1,53	1,54	43,1	34,6	50,25

EU-Norm D3, D4 sowie US-Normen	CO (g/km)	NO _x (g/km)	HC (g/km)
D3	1.5	0.14 [0.15]*	0.17 [0.20]*
D4	0.7 [1.0]*	0.07 [0.08]*	0.08 [0.10]*
D3 Diesel	0.64	0.50	0.06
D4 Diesel	0.5	0.25	0.05
ULEV	1,31	0.043	0.034
SULEV	0.62	0.012	0.006
<i>Emissionen und Emissionsstandard aktueller Fahrzeugtypen nach Herstellerangaben</i>			
BMW 318i 2.54 MJ/km ; 87 kW [Sonderausgabe ATZ, 5/1998, Der neue BMW 3er]	0.70 D3 (-D4), SULEV	0.07 D3 (-D4)	0.09 D3 (-D4)
Ford 1,6 l Zetec 2.2 MJ/km; 74 kW [Sonderausgabe ATZ, Januar 1998 Ford Focus]	0.20 D4, SULEV	0.02 D4, ULEV	0.03 D4, ULEV
VW-Ngas Polo 2.1MJ/km; 50 kW [ASUE, Innovationen für...Erdgaseinsatz 1998]	0.19 D4, SULEV	0.03 D4, ULEV	0.12 D3
VW-NG Passat 3.24 MJ/km; 80 kW [ASUE, Innovationen für...Erdgaseinsatz 1998]	0.65 D4, ULEV	0.06 D4	0.11 D3
Diesel 1998 1.36-2.03 MJ/km [Pott, ATZ 100 (1998) 7/8] 33-66 kW	0,35-0,41 D4, SULEV	0,35-0,60 D3	0,08-0,15 D3
Ford Diesel (Endura) 1.78 MJ/km 60 kW [Sonderausgabe ATZ, Januar 1998, Ford Focus]	0.31 D4, SULEV	0.45 D3	0.09 D3

(*) Werte in [] nach Angaben anderer (nicht übereinstimmender) Literaturstelle

Tabelle 13a: Primärenergiebedarf für Kraftstoffe (Kohlenwasserstoffe, Alkohole ; vorw. flüssig) aus fossiler Primärenergie, lokal nicht emissionsfrei

	Benzin (¹)	Diesel	Erdgas (CNG)	Erdgas (LNG)	Methanol aus Erdgas
bezogener Primärenergieaufwand (²) MJ _{pri} / MJ _{Kraftst.}	1.12 - 1.20 =>1.15 (0.87)	1.11 (0.90)	1.11 - 1.14 => 1.11 (0.90)	1.05 - 1.25 =>1.21 (0.825)	1.45 - 1.71 => 1.64 (0.61)

(¹) 1 MJ Benzin = 1.19 MJ Primärenergie ; US-Literaturangaben, ab Erdölquelle
1 MJ Benzin = 1.12 - 1.15 MJ Primärenergie ; Deutsche Literaturangaben

(²) In der zweite Zeile wird der im Bericht benutzte Wert und in Klammern dessen Kehrwert (η) angegeben

Tabelle 13b: Primärenergiebedarf für lokal emissionsfreie Kraftstoffe (Elektrizität, Wasserstoff) aus fossiler Primärenergie (¹)

	Elektrizität „Mix“ (a)	CH (²) Elektrolyse mit (a)	LH (²) Elektrolyse mit (a)	CH aus Erdgas	LH aus Erdgas
Bezogene Primärenergieaufwand (³) MJ _{pri} / MJ _{Kraft}	(⁴) 2.70 - 2.90 =>2.7 (0.37)	4.2 - 4.4 =>4.3 (0.23)	5.55 - 6.95 =>5.9 (0.17)	1.5- 1.61 =>1.55 (0.65)	2.0 - 2.15 =>2.05 (0.49)

(1) Diese Sekundärenergieträger sind praktisch lokal emissionsfrei. Ihre Anwendung ist aber mit Betankungs- und Speicherungsproblemen behaftet (Batterien, Druck- bzw. Flüssigwasserstofftank).

(2) CH : Compressed Hydrogen
LH : Liquid Hydrogen

(3) In der zweite Zeile wird der im Bericht benutzte Wert und in Klammern dessen Kehrwert (η) angegeben

(4) Für den gegenwärtigen Elektrizitäts-Mix in verschiedenen EU-Ländern. Mit modernen Erdgas- bzw. GUD-Kraftwerken sind Werte von 2.1 erreichbar. Der Ladevorgang der Speicherbatterien bei Elektrofahrzeugen wird gesondert berücksichtigt.

4.5 Kraftstoffe und Energiespeicher an Bord (Kraftstofftanks)

Der Vergleich der auf die Speichermasse oder Speichervolumen bezogenen Energieinhalte der alternativen Kraftstoffe (MJ/kg oder MJ/l) zu den entsprechenden Werten für Benzin- oder Dieseldieselkraftstoff fällt besonders ungünstig aus. Berücksichtigt man noch, dass mit einigen Ausnahmen (Methanol, Alkohole) zusätzliche Umgebungsbedingungen (hoher Druck, Adsorption oder Absorbtion, kryogene Temperaturen) je nach Speicherart vorausgesetzt werden müssen, wird die Problematik der Energiespeicherung an Bord und/oder der Betankung bei den meisten alternativen Kraftstoffe ersichtlich (siehe auch ausführliche Betrachtungen im Anhang zu diesem Bericht, Abschnitt 10.3).

In der **Tabelle 14** werden typische Werte für die wichtigsten Speicherungsarten angegeben. Für Batteriespeicher ist auch die maximale spezifische Leistung ($\text{kW}_{\text{max}}/\text{kg}$) angegeben, welche genauso wie der begrenzte Energieinhalt, ein limitierender Faktor im Bezug auf die mögliche Reichweite sein kann.

Alle Speicherarten wurden spätestens seit der „Erdölkrise“ und der anschließenden Diskussion zu der möglichen Wasserstoffwirtschaft in den Siebzigern und frühen achtziger Jahren eingehend untersucht und in Prototypen als technisch brauchbar demonstriert. Die technologischen Lösungen stehen heute zu Verfügung, einige (zum Beispiel Flüssigwasserstoffspeicherung an Bord) zur Anwendungsreife entwickelt [Peschka, 1992] , [Peschka, 1998]. Die schon damals erkannten Probleme existieren aber heute noch. Sie sind mit Gewichts-, Raum- Sicherheits- und Kostenproblemen verbunden. Sie machen zwar die jeweilige Anwendung nicht a priori indiskutabel, aber die Summe der Probleme und „Unannehmlichkeiten“, welche mit der Energiespeicherung an Bord zusammenhängen, spielen eine zentrale Rolle bei der Diskussion zukünftiger Energieszenarien für den Verkehr.

Im Rahmen der Simulationsrechnung und der Zielsetzung dieses Berichtes ist die erforderliche Speichermasse besonders wichtig, weil sie unter Umständen den Kraftstoffverbrauch sehr ungünstig beeinflussen kann. Bei Batteriefahrzeugen, welche ansonsten umweltfreundlich sind und den höchsten Wirkungsgrad des Antriebstranges haben, ist der spezifische Energieinhalt auch bei modernen Batterien so niedrig, dass a priori das Ziel von Reichweiten über 250 km eher als unerreichbar zu beurteilen ist, selbst wenn man als zumutbare Grenze für die Speichermasse einen hohen Wert von etwa 50 % der Gesamtmasse des Fahrzeuges zulässt.

Mit Wasserstoffspeicherung in Metallhybride (Absorption) ist zwar ein höherer spezifischer Energieinhalt als mit Batterien erreichbar, jedoch ist das Problem sehr ähnlich wie bei Batteriefahrzeugen: Der Speichervorteil wird dadurch kompensiert, dass in diesem Fall die Wasserstoffenergie entweder über einen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle genutzt wird und der Wirkungsgrad des Antriebstranges niedriger ist als beim reinem Elektroantrieb. Das Resultat ist, dass auch hier bei den üblichen Reichweiten der Speichertank einen erheblichen Teil der Gesamtmasse des Fahrzeuges beanspruchen kann und dass der Mehrverbrauch an Wasserstoff wegen der Zusatzmasse des Speichers der Verflüssigungsenergie des Wasserstoffes für ein Flüssigwasserstoff-Fahrzeug entsprechen kann. Obwohl diese Tatsachen schon seit längerer Zeit bekannt sind [Carpetis, 1982] und in den letzten Jahren nur die Wasserstoffspeicherung mit Druckspeichern oder in flüssiger Form als für Fahrzeuge normaler Reichweite taugliche Lösung betrachtet wurde, wird im Rahmen des Zyklus der „wiederkehrenden Entdeckungen“ diese Speicherart wieder diskutiert. Als eine Berechtigung dafür kann allerdings die Tatsache betrachtet werden, dass die erwähnten Nachteile des Metallhydridspeichers kleiner werden wie die Kraftstoffökonomie höher wird, was insbesondere für die zukünftigen Brennstoffzellenantriebe zu erwarten ist. Andererseits kommen in Verbindung mit einer PEM-Brennstoffzelle, die unterhalb 100 °C betrieben wird, nur Niedertemperaturhydride niedrigerer Speicherdichte (FeTi Legierungen) in Frage, wobei auch in diesem Fall die zur Freisetzung des Wasserstoffes nötige Wärme nur sehr schwierig eingebracht werden kann.

Tabelle 14: Spezifische Daten der wichtigsten Kraftstoffspeicher an Bord

Kraftstoff an Bord	Speicherart	MJ /kg	MJ /l	kW /kg (Batterien)	Bemerkungen
Benzin	Normaltank	36	30		
Diesel	Normaltank	35	31		
Methanol	Normaltank	17	16		
Erdgas	Druckspeicher 200 bar	14-17.9	6.5		Kohlefasern - verstärkter Kunststoff
Erdgas	Druckspeicher mit Adsorber ca. 35 bar	(*) 1.9-2.5	(*) > 6 (5.2-6.9)		Al-Legierung, flache Behälter (adaptiv). Adsorber: Aktivkohle
Wasserstoffgas	Druckspeicher 250-300 bar	(**) 4.7-12.5	2.1-2.5		Kohlenstofffasern - verstärkter Kunststoff
Wasserstoff	Metallhydrid - Speicher	1.7 2.1	4.4 2.8		FeTi Speicher FeTi / MgNi Speicher
Erdgas flüssig	LNG - Speicher	23	18		kryogen, 113 K
Flüssigwasserstoff	LH2 - Speicher	10-18 (**)	4.5-5.5		kryogen, 21 K
Wasserstoff	Kryogener Druckspeicher mit Adsorber	5.1	3.5		Aktivkohle, kryogen, 87 K Druck 80 bar
Elektrizität	Bleibatterie	0.12-0.22		0.20-0.40	Betriebsabhängig
Elektrizität	Ni-Metallhydrid	0.21-0.43		0.18-0.30	Betriebsabhängig
Elektrizität	Li - Ion	0.36-0.50		0.25-0.30	Betriebsabhängig
Elektrizität	Ni - Cadmium	0.16-0.25		0.20-0.40	Betriebsabhängig
		kg/kWh		kg/kW	
	Bleibatterie	16.4-30		2.5-5	
	Ni-Metallhydrid	8.4-17		3.3-5.7	
	Li - Ion	7.2-10		3.3-4.0	
	Ni - Cadmium	15-22		2.5-5	

(*) Niedrigere Werte im Fahrzeugbetrieb demonstriert [Cook, 1997], höhere Werte möglich [Barrett, 1995]. Effektiv bewirkt die Nutzung des Adsorbers, dass die Speicherdichte die gleiche wie bei 200 bar CNG-Behältern bei ca. ein 1/6 des Druckes bleibt (Vorteile : Druckbehälter nicht unbedingt zylindrisch, keine mehrstufige Kompression notwendig). Allerdings wird dadurch der spezifische Energieinhalt (MJ/kg) wegen der Adsorbermasse vermindert.

(**) Praxiswerte sind von der Größe des Tanks, angewandten Technologie, Sicherheitsfaktoren (CH₂), Verlustrate (LH₂) etc. abhängig.

Eine ähnliche Situation ist bei der Speicherung von Wasserstoff mit Hilfe von Adsorbentien (Aktivkohle) zu verzeichnen. Eingehende Versuche in der Zeit 1978 bis 1982 [Carpentis, 1982], [Carpentis, 1988] haben gezeigt, dass diese Art von Speicherung nur bei relativ hohen Drücken und bei kryogenen Temperaturen einige Vorteile für stationäre Anwendungen bieten, für Speicherung an Bord jedoch nicht geeignet sein kann. Spätere Untersuchungen in USA [Amankwa et al., 1989] haben mit verbesserten Sorten von Aktivkohle zu den Werten geführt, die in der Tabelle 14 gezeigt werden. Obwohl der Energieinhalt höher als bei Metallhydriden ist, ist eine solche Anwendung an Bord von Fahrzeugen nicht denkbar.

Allerdings ist bei Erdgasspeicherung mit Hilfe von Adsorbentien und bei Umgebungstemperatur mit einigen Vorteilen gegenüber der einfachen Druckspeicherung zu rechnen. Neue Studien deuten darauf hin, dass eine größere Menge Erdgas, wie in 200-bar Druckbehältern gleichen Volumens, bei 35 bar mit Hilfe von Aktivkohle speicherbar wäre [Garrett, 1992], [Barrett, 1995], [Lin et al., 1993], [Matranga et al. 1992], [Cook et al., 1997]. Der Vorteil ist, dass die Fahrzeugtanks nicht unbedingt zylindrisch zu sein brauchen, was die Unterbringung im Fahrzeug erleichtert, und dass bei der Betankung keine mehrstufige Kompression notwendig ist. Allerdings wirkt sich die Adsorbentienmasse auf den spezifischen Energieinhalt (MJ/kg) ungünstig aus.

Aus den obigen Ausführungen und aus den Werten der Tabelle 14 wird verständlich, dass im folgenden neben der Batteriespeicherung für Elektrofahrzeuge und der Speicherung von Benzin, Diesel und Methanol an Bord, auch die Speicherung von Erdgas in Druckbehältern (200 bar) sowie für Wasserstoff die Speicherung in Druckbehältern (300 bar) oder in flüssiger Form (LH₂) betrachtet wird. Mit den massenreichen Metallhydriden (MH) ist das benötigte Tankvolumen zwar kleiner als bei Druckspeicherung von Wasserstoff, die Fahrzeugmasse aber steigt schnell mit der Reichweite. Der höhere Kraftstoffverbrauch resultiert schließlich, dass der Primärenergiebedarf sich für die üblichen Reichweiten diesem von Flüssigwasserstoff oder Methanol praktisch angleicht (siehe auch Abschnitt 10.3 im Anhang zu diesem Bericht).

Die Druckspeicherung von Wasserstoff an Bord ist vom energetischen Standpunkt am günstigsten und aus diesem Grunde wird sie bei den folgenden Auswertungen und Vergleichen als Bestandteil eines energetisch günstigen Antriebskonzepts mit Brennstoffzellen betrachtet. Allerdings ist das Speichervolumen speziell im Falle von Personenfahrzeugen (Pkw) ein ernsthaftes Problem. Dies erklärt auch die Tatsache, dass diese Speicherart in keinem Pkw mit Brennstoffzellenantrieb verwendet wurde, sondern auf die viel aufwendigeren Kraftstoffe Methanol (aus Erdgas) oder Flüssigwasserstoff „ausgewichen“ wird.

5. Resultate der Anwendung der Simulationsmethode mit Referenzdaten (Referenzfahrzyklus und Referenzfahrzeug) und Kraftstoffen fossilen Ursprungs

In diesem Abschnitt werden Resultate der genauen Simulation vorgestellt, welche im Referenzfahrzyklus den momentanen Leistungsbedarf und den daraus folgenden Energiefluss im Referenzfahrzeug zu berechnen erlaubt. Diese momentanen Daten dienen zwar der Kontrolle des Bewegungsablaufes und der momentanen „Fahrtauglichkeit“ des Fahrzeuges während des Fahrzyklus (ausreichende Antriebsleistung, Speicherkapazität etc.), als Ausgabe sind jedoch nur die über die Fahrzykluslänge integrierten Daten sinnvoll darstellbar. Diese werden in den folgenden Abschnitten besprochen.

Aus diesen Resultaten lässt sich auch der Wirkungsgrad des Fahrzeugantriebes (vom Tank bis zum Rad) im betrachteten Fahrzyklus angeben. Es muss aber betont werden, dass dieser bedeutend niedriger sein wird, als die optimalen Wirkungsgrade der Hauptkomponenten des Antriebsstranges in den entsprechenden Antriebssystemen. Dies ist eine Folge der grundsätzlichen Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom Lastzustand des entsprechenden Aggregates. Im Beispiel der **Abbildung 1** wird der Verlauf des Wirkungsgrades der Hauptaggregate und des Antriebssystems als Funktion der Leistung bei Antrieben mit Verbren-

nungsmotoren bzw. mit Brennstoffzellen dargestellt. Die dargestellten „glatten“ Linienvläufe sind hier als typische Verläufe und als Repräsentation der tatsächlichen „Wolke“ der Betriebspunkte zu verstehen, welche durch den jeweiligen Entwurf und zudem im Fahrzyklusbetrieb auch durch andere Ereignisse (zum Beispiel Gangwechsel, Temperaturänderung der Brennstoffzelle) beeinflusst werden. Die wichtigste Information aus der Abbildung ist, dass der Verbrennungsmotor bei Vollast, die Brennstoffzelle hingegen bei Teillast, den maximalen Wirkungsgrad aufweist. Dies mag zum besseren Verständnis einiger der späteren Resultate beitragen. Zum Beispiel ist die Hybridisierung des Verbrennungsmotors mit einem Elektroantrieb günstig, wenn der Verbrennungsmotor möglichst konstant hochbelastet im Fahrzyklus bleibt. Die Hybridisierung von Brennstoffzellen mit Batteriespeicher scheint hingegen deswegen mit wenigem Vorteil verbunden zu sein, weil sie dann im Teillastbereich betrieben werden muss. Dabei ist unter Umständen der erreichte Vorteil im Vollastbereich nicht so bedeutend, dass die Verluste des „round-trip“ über den Batteriespeicher kompensiert werden können (s. Abschnitt 5.2).

5.1 Eine allgemeine Art der Darstellung: Vergleiche der konventionellen und der elektrischen Antriebe

In den Abbildungen dieses Abschnittes wird der Energiefluss von der Primärenergiequelle bis zum Rad sowie die Emissionen für die konventionellen Antriebe mit Verbrennungsmotor und für die alternativen Elektroantriebe in einfacher Blockdarstellung für das Referenzfahrzeug (Personenwagen, mittlere Klasse) angegeben.

Die relevanten Energieumwandlungsschritte werden in der Mitte der Abbildungen dargestellt, die entsprechenden Verluste rechts davon. Die Emissionen werden auf der linken Seite der Diagramme den entsprechenden Umwandlungsschritten zugeordnet.

Alle Angaben sind auf 1 km der Fahrstrecke bezogen.

Die Abbildungen 2 bis 8 zeigen die Resultate für Antriebe mit Verbrennungsmotoren und elektrischen Antrieben mit Brennstoffzellen oder Batteriespeicherung an Bord:

Abbildung 2: Kraftstoff Benzin, Verbrennungsmotor

Abbildung 3: Dieseldieselkraftstoff, Verbrennungsmotor

Abbildung 4: Kraftstoff Erdgas, Druckspeicher an Bord, Verbrennungsmotor

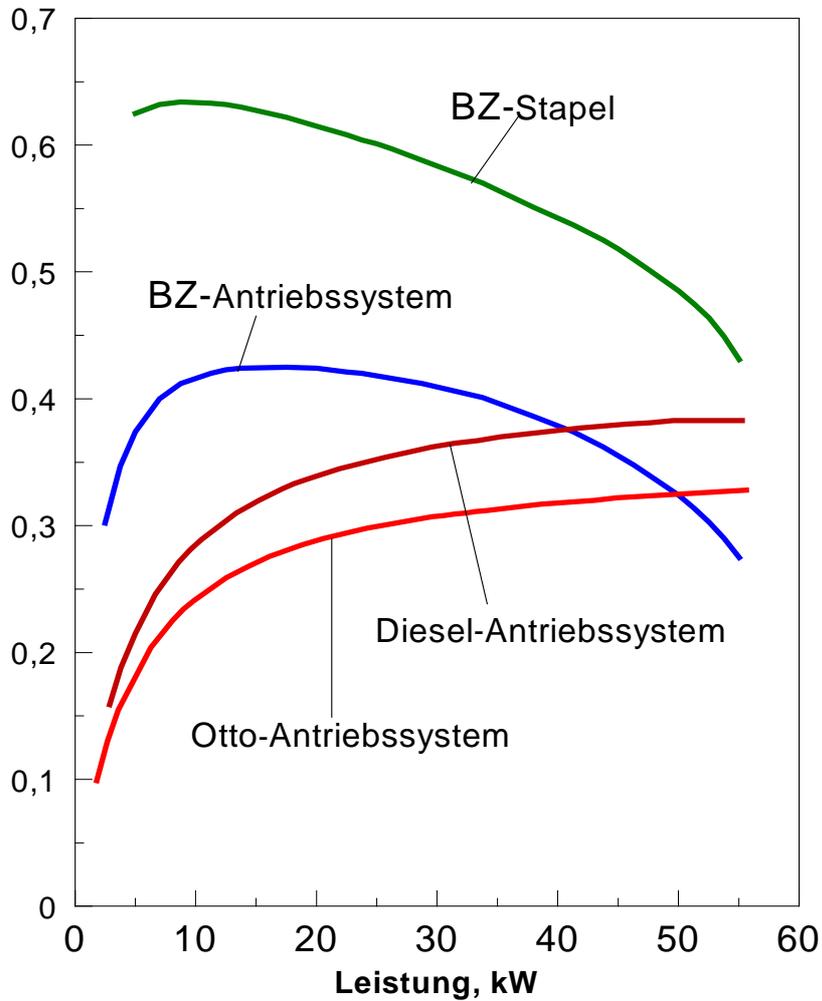
Abbildung 5: Kraftstoff Benzin, Benzinreformierung (Wasserstoffproduktion) an Bord und Elektroantrieb mit Brennstoffzelle

Abbildung 6: Kraftstoff Methanol aus Erdgas, Methanolreformer (Wasserstoffproduktion) an Bord und Elektroantrieb mit Brennstoffzelle

Abbildung 7: Kraftstoff Wasserstoff aus Erdgas, Druckspeicher an Bord und Elektroantrieb mit Brennstoffzelle

Abbildung 8: Elektrizität aus Erdgas (GUD-Kraftwerk), Elektroantrieb mit Batteriespeicherung an Bord (begrenzte Reichweite - lange Betankungszeit).

Wirkungsgrad



BZvsIC_f



Abb. 1. Typischer Verlauf des Wirkungsgrades der Hauptaggregate und des Antriebssystems als Funktion der Leistung bei Antrieben mit Verbrennungsmotor bzw. mit Brennstoffzellen (geglättete Darstellung der „Wolke“ der Betriebspunkte während des Fahrzyklus).

Fig. 1. Typical change of the efficiency as a function of power level.
BZ-Stapel = Fuel cell stack ; BZ-Antriebssystem = Fuel cell drive system
Diesel-Antriebssystem = Drive system with Diesel ICE
Otto-Antriebssystem = Drive system with Otto ICE

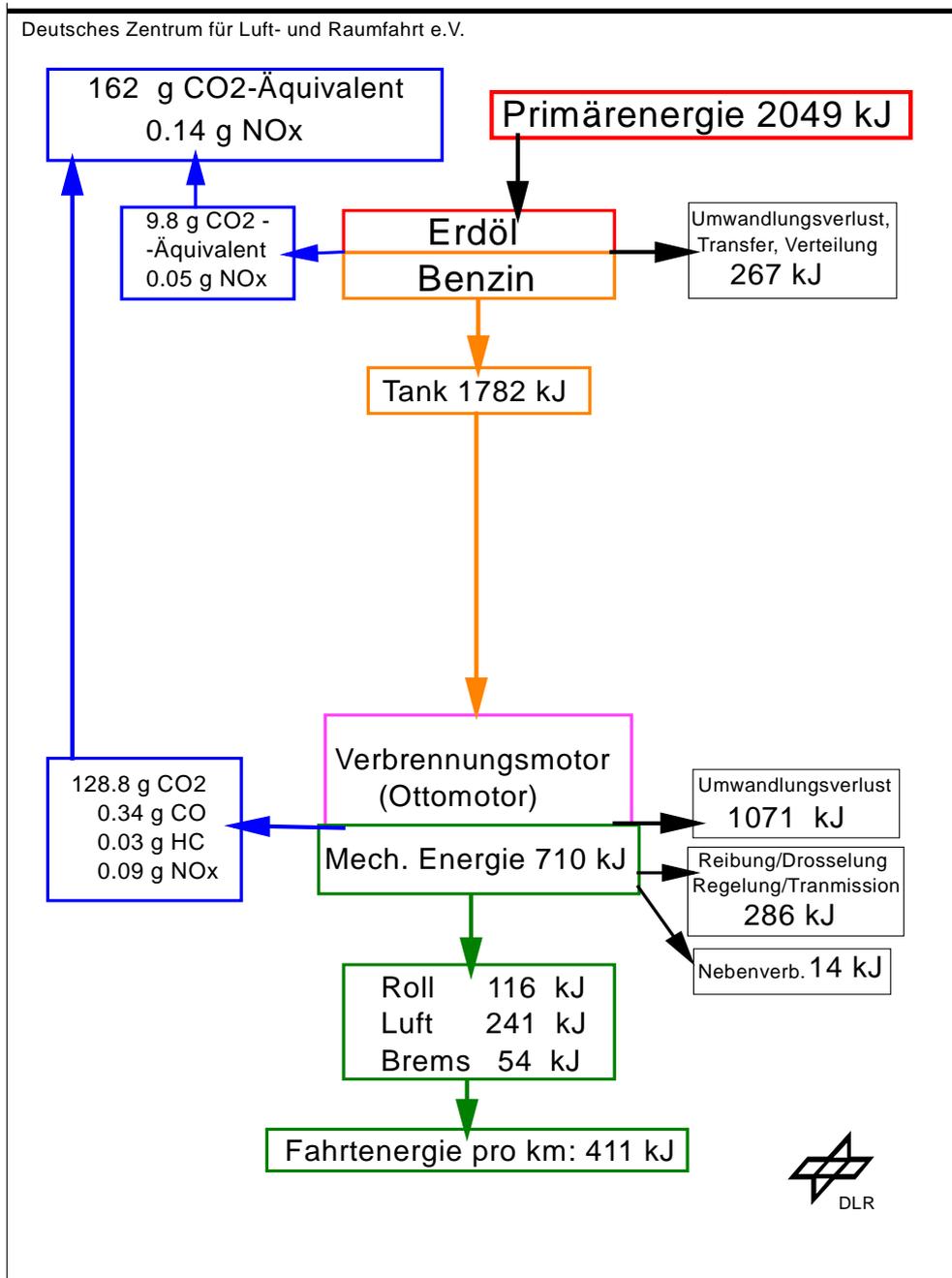


Abb. 2. Mittlerer Energiefluss (von der Primärenergiequelle bis zum Rad) und Emissionen pro Kilometer des Fahrzyklus für das Referenzfahrzeug mit Ottomotor.

Fig. 2. Mean energy flux („well to wheels“) and emissions per km of the drive cycle for the reference car with Otto engine. The mechanical energy of the engine is splitted up for friction and pumping losses, peripheral drives and drive work (Roll = rolling resistance loss ; Luft = aerodynamic loss ; Brems = brake loss).

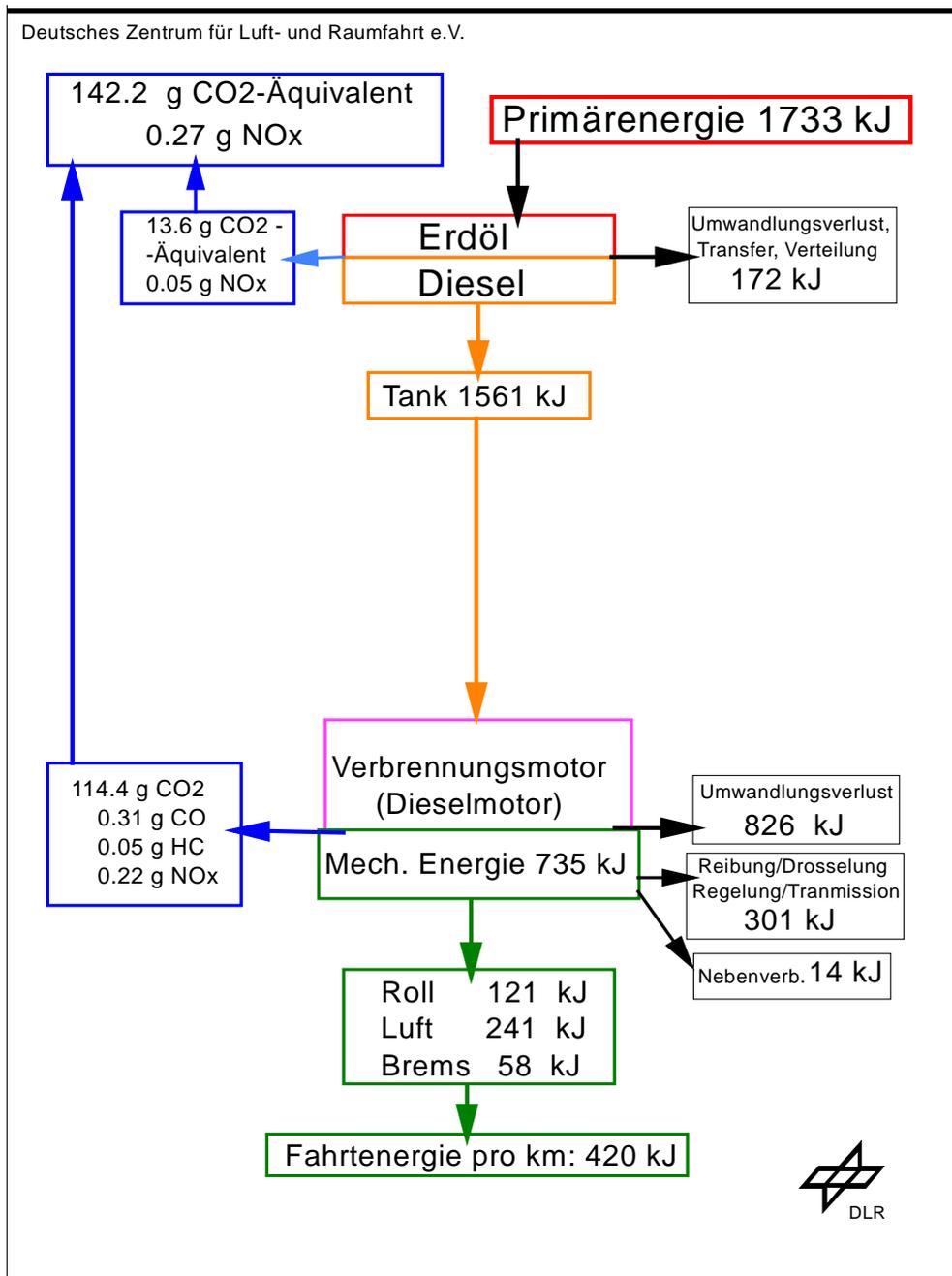


Abb. 3. Mittlerer Energiefluss (von der Primärenergiequelle bis zum Rad) und Emissionen pro Kilometer des Fahrzyklus für das Referenzfahrzeug mit Dieselmotor.

Fig. 3. Mean energy flux („well to wheels“) and emissions per km of the drive cycle for the reference car with Diesel engine. The mechanical energy of the engine is splitted for friction and pumping losses, peripheral drives and drive work (Roll = rolling resistance loss ; Luft = aerodynamic loss ; Brems = brake loss).

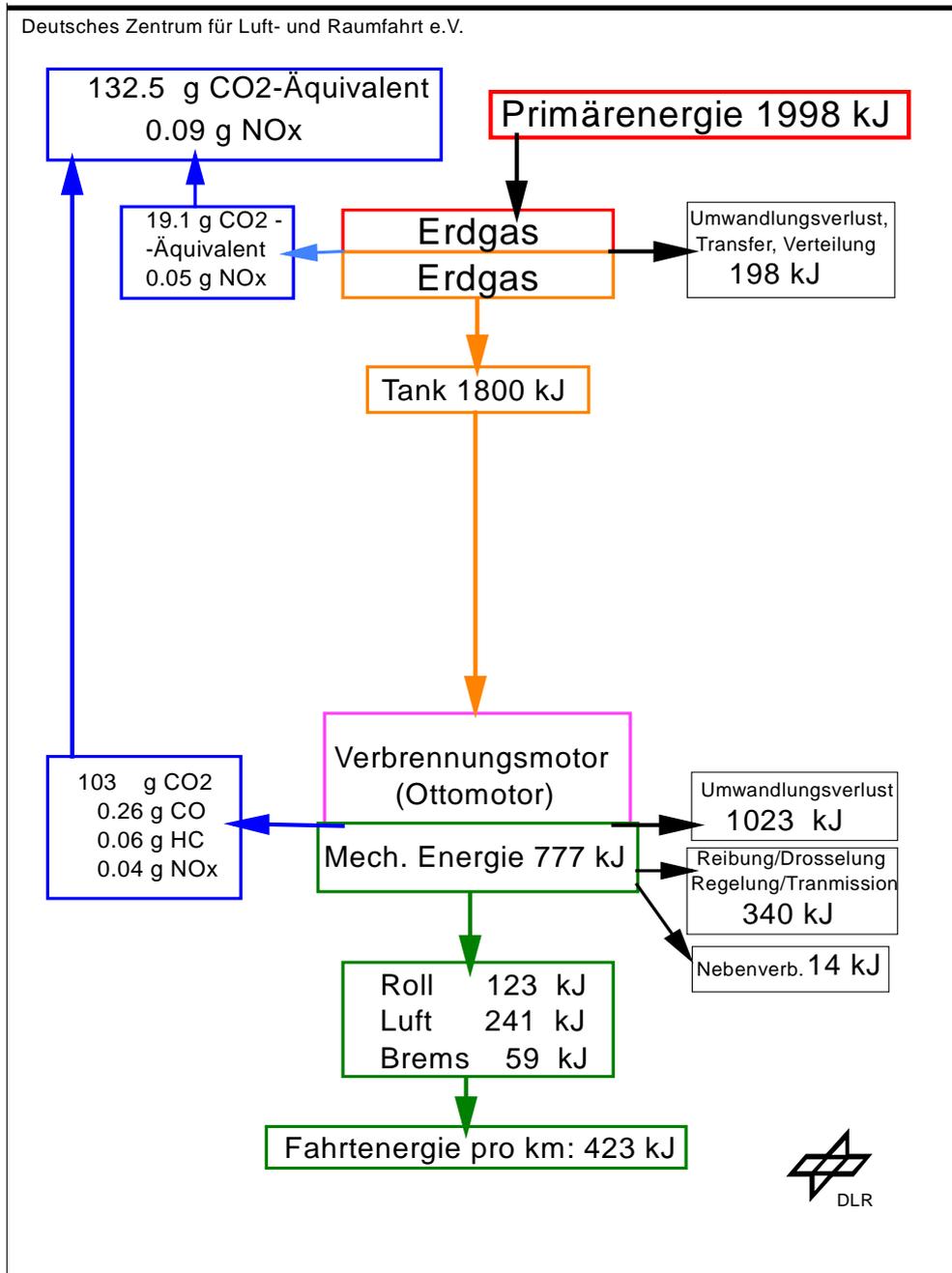


Abb. 4. Mittlerer Energiefluss (von der Primärenergiequelle bis zum Rad) und Emissionen pro Kilometer des Fahrzyklus für das Referenzfahrzeug mit Erdgasmotor.

Fig. 4. Mean energy flux („well to wheels“) and emissions per km of the drive cycle for the reference car with IC engine fueled by natural gas. The mechanical energy of the engine is splitted up for friction and pumping losses, peripheral drives and drive work (Roll = rolling resistance ; Luft = aerodynamic loss ; Brems = brake loss).

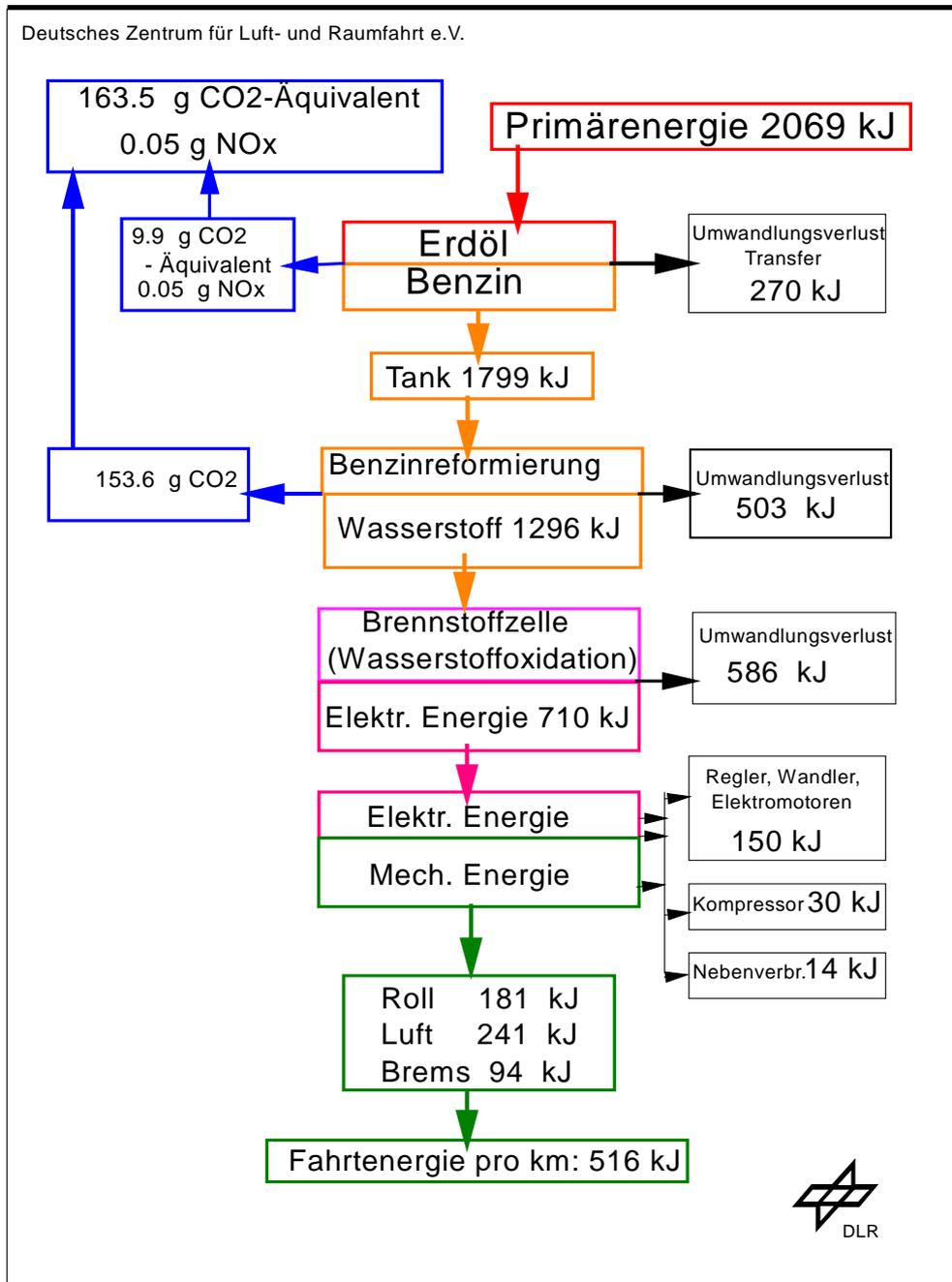


Abb. 5. Mittlerer Energiefluss (von der Primärenergiequelle bis zum Rad) und Emissionen pro Kilometer des Fahrzyklus für das Referenzfahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb und mit Benzinreformierung an Bord.

Fig. 5. Mean energy flux („well to wheels“) and emissions per km of the drive cycle for the reference car with fuel cell drive and gasoline reformer on board (unit after the tank followed by the fuel cell stack). The net electrical output of the fuel cell stack is splitted up for electrical controls and inverter losses, transmission losses (incl. losses of the drive motor), compressor losses, peripheral drives and drive work (Roll = rolling resistance ; Luft = aerodynamic loss ; Brems = brake loss).

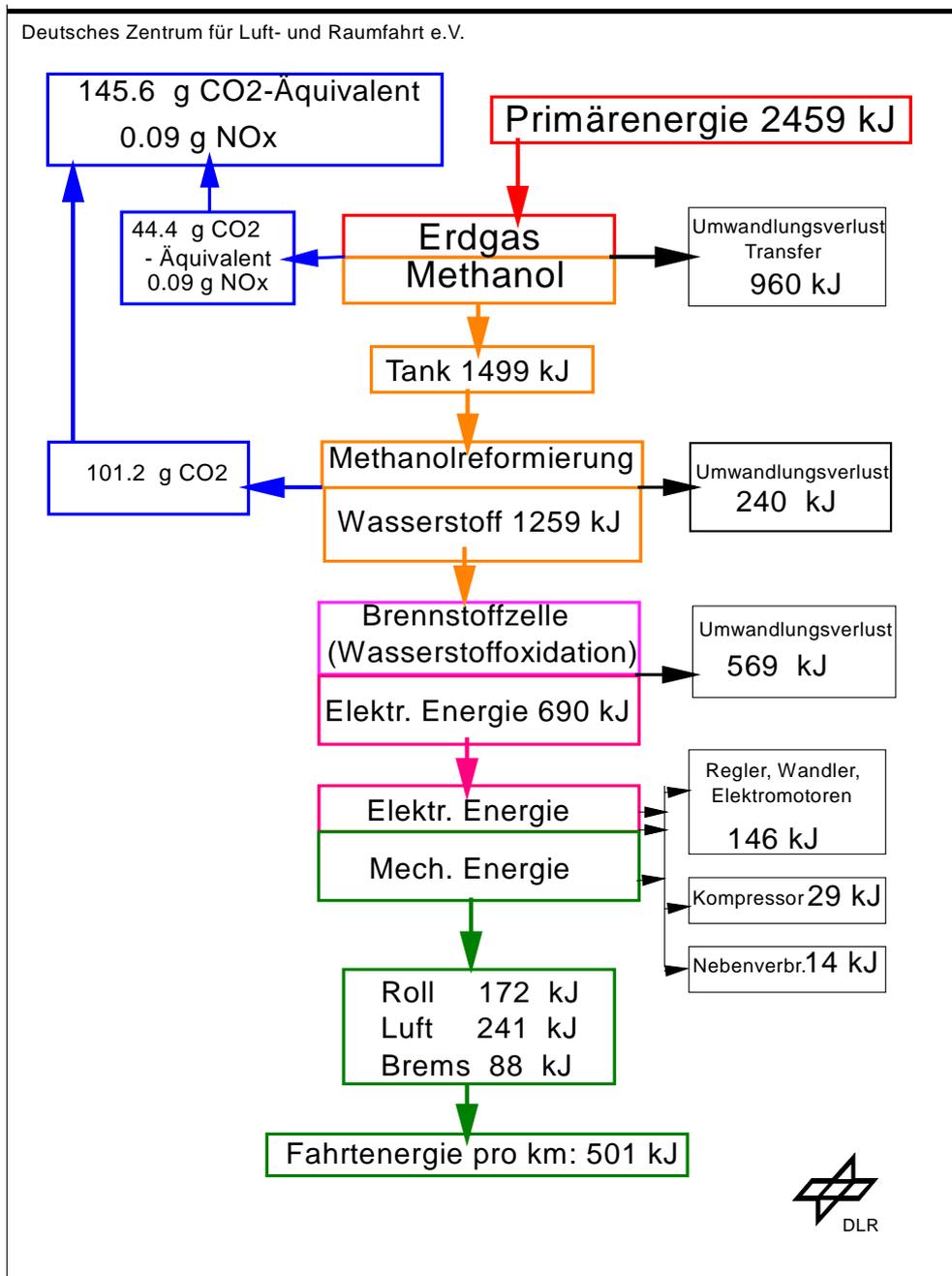


Abb. 6. Mittlerer Energiefluss (von der Primärenergiequelle bis zum Rad) und Emissionen pro Kilometer des Fahrzyklus für das Referenzfahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb und Methanolreformierung an Bord.

Fig. 6. Mean energy flux („well to wheels“) and emissions per km of the drive cycle for the reference car with fuel cell drive and methanol reformer on board (unit after the tank followed by the fuel cell stack). The net electrical output of the fuel cell stack is splitted up for electrical controls and inverter losses, transmission losses (incl. losses of the drive motor), compressor losses, peripheral drives and drive work (Roll = rolling resistance ; Luft = aerodynamic loss ; Brems = brake loss).

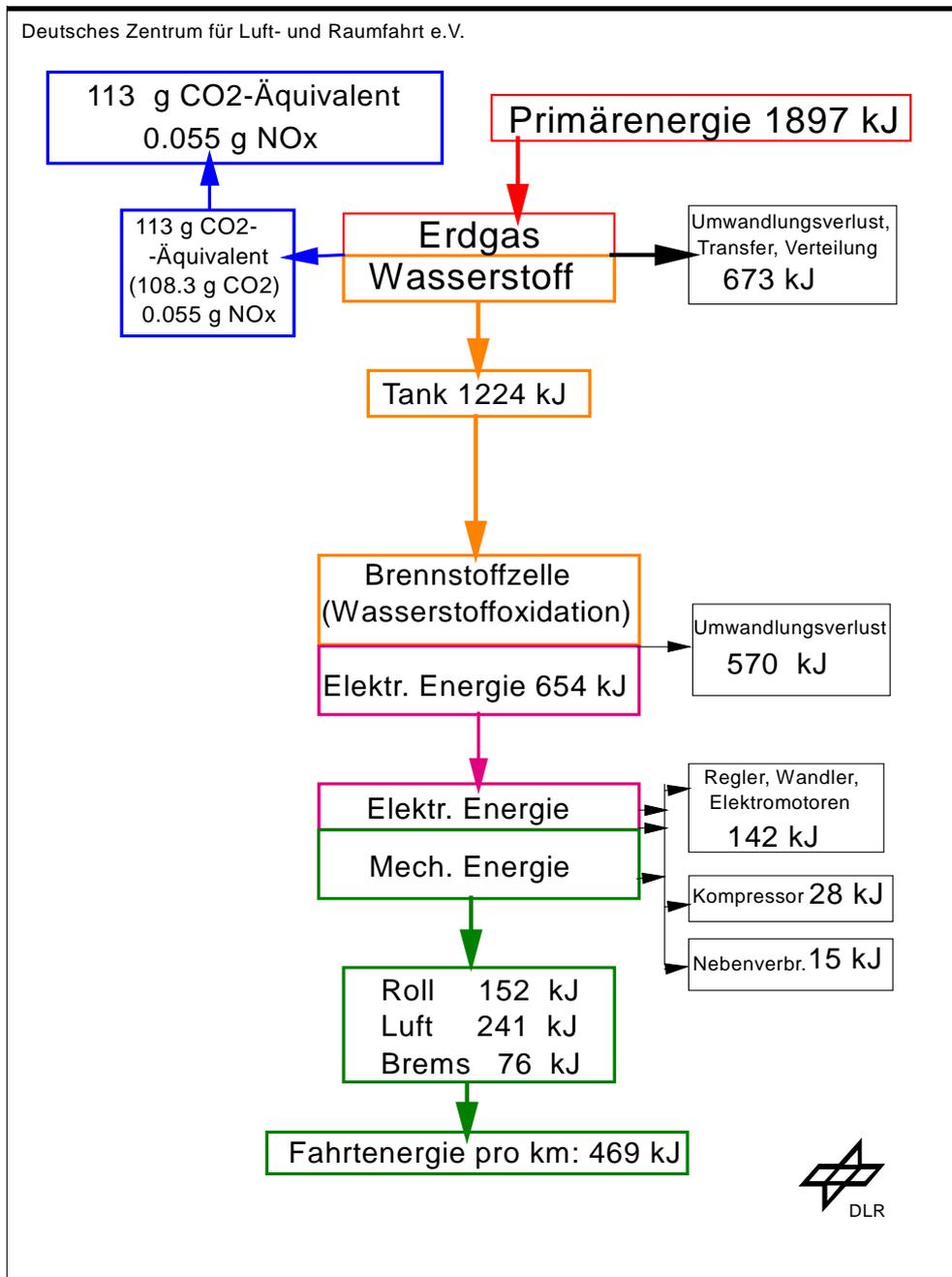


Abb. 7. Mittlerer Energiefluss (von der Primärenergiequelle bis zum Rad) und Emissionen pro Kilometer des Fahrzyklus für das Referenzfahrzeug mit Brennstoffzellenantrieb und Wasserstoff-Gasspeicher an Bord.

Fig. 7. Mean energy flux („well to wheels“) and emissions per km of the drive cycle for the reference car with fuel cell drive and high pressure Hydrogen tank on board. The net electrical output of the fuel cell stack is splitted up for electrical controls and inverter losses, transmission losses (incl. losses of the drive motor), compressor losses, peripheral drives and drive work (Roll = rolling resistance ; Luft = aerodynamic loss ; Brems = brake loss).

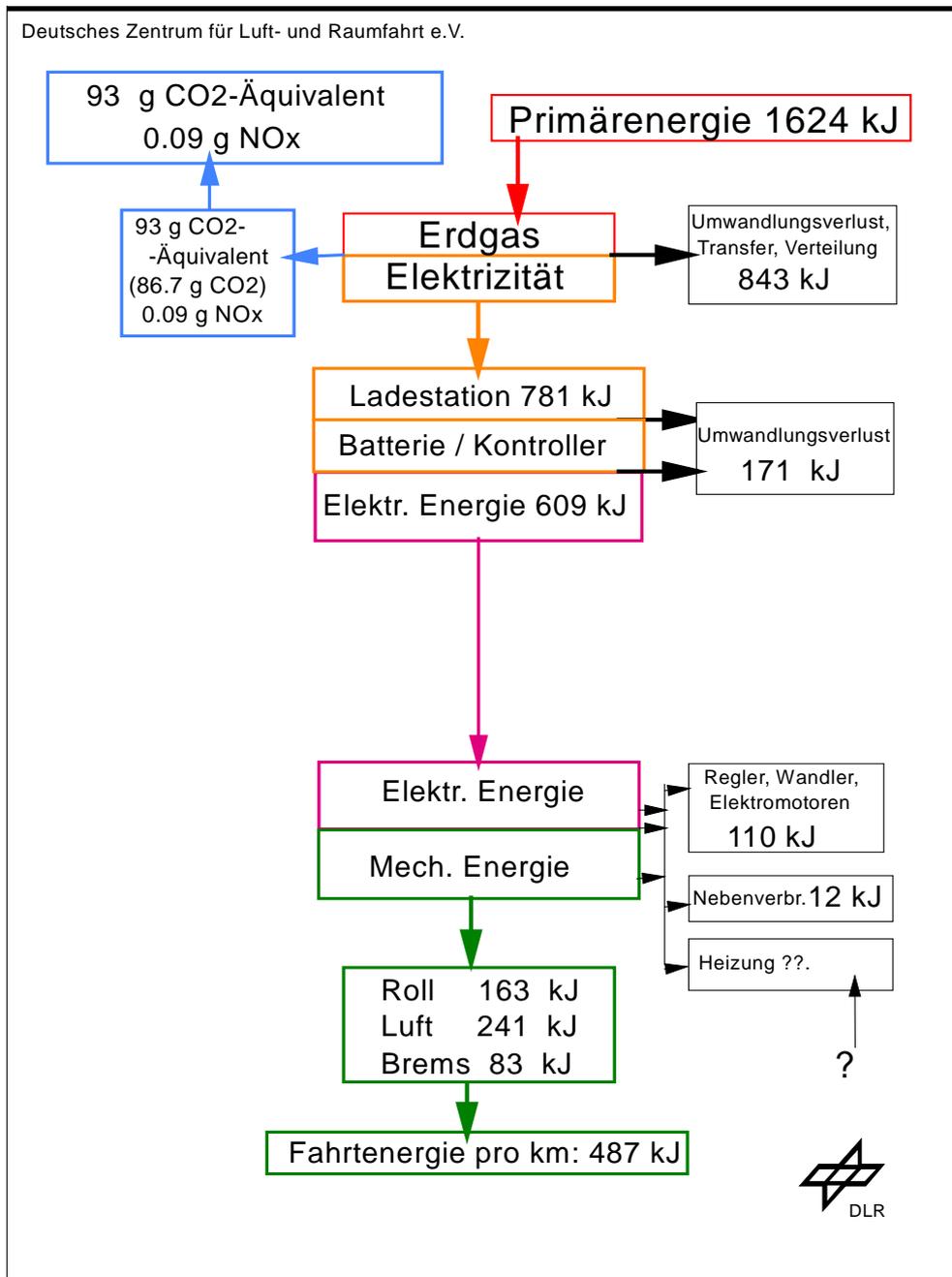


Abb. 8. Mittlerer Energiefluss (von der Primärenergiequelle bis zum Rad) und Emissionen pro Kilometer des Fahrzyklus für das Referenzfahrzeug mit Elektroantrieb und Batteriespeicher an Bord.

Fig. 8. Mean energy flux („well to wheels“) and emissions per km of the drive cycle for the reference car with electrical drive and batteries on board (electricity from natural gas at the load station). The net electrical output of the battery-storage is splitted up for electrical controls and inverter losses, transmission losses (incl. losses of the drive motor), peripheral drives and drive work (Roll = rolling resistance ; Luft = aerodynamic loss ; Brems = brake loss). Energy consumption for heating demand is not considered in this balance.

Die Energiespeicher an Bord (Kraftstofftanks) wurden so dimensioniert, dass sich eine Reichweite von ca. 600 km ergibt. Eine Ausnahme bildet der Fall der Abbildung 8 für das Batteriefahrzeug: Die genannte Reichweite ist nach heutiger Sicht auch mit fortgeschrittenen Batterien nicht erreichbar. Um die Gesamtmasse des Batteriefahrzeuges auf maximal das 1.45-fache des entsprechenden Fahrzeuges mit Ottomotor zu begrenzen, muss die Batteriemasse begrenzt werden. Dies ergibt eine Reichweite von ca. 140 km bei Anwendung herkömmlicher Batterien (Energieinhalt ca. 30 kWh) bzw. eine Reichweite von ca. 250 km bei Anwendung fortgeschrittener (z.B. Ni-Metallhydrid) Batterien.

Die Motorisierung aller Fahrzeuge (Antriebsleistung am Rad) ist identisch und zwar so bemessen, dass sie den Referenzfahrzyklus (mit Autobahnteil) durchfahren können. Für das Referenzfahrzeug genügt dafür bei Antrieb mit Verbrennungsmotor eine Motorleistung im Bereich 60-65 kW, für Antriebe mit Brennstoffzellen hingegen muss die Brutto-Leistung des Brennstoffzellenstapels um ca. 40 bis 50 % höher gewählt werden, wobei der höhere Wert für Antriebssysteme mit Reformier an Bord gilt.

Es ist interessant an dieser Stelle hinzuweisen, dass im Bezug auf Energieverbrauch (und globale Emissionen) die Resultate praktisch auch mit dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) nahezu die gleichen sind wie beim Referenzfahrzyklus. Dabei sind die Fahrwiderstände im NEFZ bedeutend niedriger und anders aufgeteilt (Anteil des Luftwiderstandes niedriger, Anteil der Bremsenergie höher). Unter der Voraussetzung, dass die Fahrzeuge auch für Autobahnfahrt motorisiert sind (was eine Radantriebsleistung von mindestens 45 kW/Tonne bedeutet), wird allerdings der Wirkungsgradverlauf des Antriebssystems im NEFZ insgesamt ungünstiger, so dass sich ein leicht erhöhter Kraftstoffaufwand (MJ/km) ergibt.

Entsprechende Berechnungen zeigen, dass mit Verbrennungsmotoren der Kraftstoffaufwand im NEFZ um etwa 3 % höher liegt als im Referenzfahrzyklus, wobei der Wirkungsgrad des Antriebes mit Ottomotor im NEFZ auf etwa 0.19 absinkt. Dieses Resultat wird bei Testfahrten mit modernen Fahrzeugen in der Praxis bestätigt: Der mittlere Verbrauch aus „Stadtfahrt“ und „Landstraße“ ergibt sich in etwa um 3-4 % höher als das Ergebnis der „kombinierten“ Fahrt inklusive Autobahn. Für Brennstoffzellenantriebe ist das Resultat ähnlich, der Mehrverbrauch im NEFZ beträgt in etwa 2 %, obwohl die Kennlinie des Wirkungsgrades ein Optimum im Mittellastbereich aufweist. Die Verweilzeit in diesem Bereich ist jedoch auch im NEFZ relativ klein. Es wurde schon in der Literatur hingewiesen, dass, falls die Leistungsgrößen der Brennstoffzelle nur an den Anforderungen des NEFZ angepaßt wären, die auf die Nennleistung bezogene relative Leistungsanforderung im NEFZ höher und damit außerhalb der Bereiche geringer Systemwirkungsgrade liegen kann. Eine solche Auslegung würde jedoch ein untermotorisiertes, vom Autobenutzer kaum akzeptiertes Fahrzeug ergeben. Es sei noch bemerkt, dass die gleiche Aussage auch für die alternativen Antriebe gilt, d.h. auch der vergleichbare Antrieb mit Verbrennungsmotor, der *nur* an die Anforderungen des NEFZ angepasst ist, wäre effizienter. An den Vergleichsresultaten ändert sich also nichts Grundlegendes.

Aus diesen Gründen wird verständlich, warum bei den in den Abbildungen 2 bis 8 ange-
stellten Vergleichen der Referenzfahrzyklus anstatt des „Normfahrzyklus“ NEFZ vorgezogen
wurde.

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Resultate der Abbildungen 2 bis 8 beinhaltet die
Tabelle 15.

Aus den Abbildungen und aus der Tabelle wird Folgendes ersichtlich.

- Eine steigende Anzahl von Energieumwandelungsschritten im Fahrzeug bedeutet grund-
sätzlich höheren Energiebedarf am Rad, da die Anzahl der Komponenten und *die Masse
des Antriebes* höher ist. Dies ist deutlich der Fall bei Brennstoffzellenantrieben, insbeson-
dere wenn flüssiger Kraftstoff (Benzin oder Methanol) getankt und an Bord reformiert
wird. Eine Ausnahme bildet das Batteriefahrzeug, bei welchem exergetisch besonders
hochwertige aber schwer speicherbare Energieform (Elektrizität) betankt wird. Die not-
wendige *Batteriemasse* zwingt hier zu einer Kompromisslösung, nämlich zu drastischer
Verminderung der Reichweite.
- Den höheren Antriebswirkungsgrad (Tank bis zum Rad) weist das Batteriefahrzeug auf,
nicht nur weil hier nur *eine* Energieumwandlung stattfindet, sondern weil sie besonders
effizient ist (Elektromotor). Dies wird allerdings durch das „Betanken“ eines exergetisch
hochwertigen (aber schwer speicherbaren) Energieträgers ermöglicht.
- Der nächstbessere Antriebswirkungsgrad wird mit dem Brennstoffzellenantrieb erreicht,
bei welchem exergetisch wertvolles Gas, nämlich Wasserstoff, betankt wird. Seine Um-
wandlung in Elektrizität erfolgt dem entsprechend mit hohem Wirkungsgrad und erlaubt
den niedrigsten *Kraftstoffverbrauch* im Vergleich zu allen Alternativen, welche exergetisch
weniger wertvolle flüssige oder gasförmige *fossile* Kraftstoffe betanken.
- Soll jedoch statt Wasserstoff Methanol oder Benzin betankt werden um die entsprechen-
den Speicherungsprobleme an Bord zu umgehen, dann werden die Wirkungsgrade der
Brennstoffzellenantriebe wegen der Reformierung an Bord niedriger. Der Kraftstoff-
verbrauch ist beim Brennstoffzellenantrieb mit Methanol in etwa der gleiche wie bei einem
Dieselfahrzeug, bei Brennstoffzellenantrieb mit Benzinbetankung in etwa der gleiche wie
beim herkömmlichen Ottoantrieb.
- Die Verhältnisse ändern sich noch einmal, wenn man den Primärenergieverbrauch be-
trachtet. Da sowohl Wasserstoff wie auch Methanol erst aus Erdgas aufbereitet werden
müssen (wobei die Verluste dieser vorgelagerten Produktions- und Transportketten sich
insgesamt höher als bei Benzin oder Diesel ergeben), sind die entsprechenden Brenn-
stoffzellenantriebe benachteiligt. Der Brennstoffzellenantrieb mit Druckwasserstoffspei-
cher ist deswegen (trotz niedrigeren Kraftstoffverbrauchs) den Alternativen mit Verbren-
nungsmotor energetisch nicht überlegen. Der Brennstoffzellenantrieb mit Methanol ist so-
gar die energetisch aufwendigste Alternative.
- Noch aufwendiger in Hinsicht auf Primärenergiebedarf wird die Option des Brennstoffzel-
lenantriebes mit Flüssigwasserstoff (LH₂) an Bord. Wegen des Verflüssigungsaufwandes,
der nicht gerade einfachen Handhabung und der entsprechenden Mehrkosten von LH₂ ist
die *Wasserstoffverflüssigung lediglich als Lösung der Speicherungsprobleme an Bord*
nicht vertretbar. Flüssigwasserstoffspeicherung an Bord kann nur im Rahmen eines zu-

künftigen globalen Netzes von Wasserstoffproduktion (mit regenerativer Primärenergie) und -transportes (auch in flüssiger Form), also nur im Rahmen der sog. „Wasserstoffwirtschaft“, von Interesse sein.

- Sehr niedriger Ausstoß klimarelevanter Emissionen ist mit einem Brennstoffzellenantrieb zu erreichen, bei welchem Wasserstoff in komprimierter Form betankt wird. Der Grund ist, dass bei diesem System ein Antrieb mit gutem Wirkungsgrad mit einer Primärenergiequelle niedrigen Kohlenstoffinhaltes (Erdgas) kombiniert wird. Obwohl der Gesamtwirkungsgrad („von der Quelle bis zum Rad“) für das Erdgasfahrzeug mit Verbrennungsmotor vergleichbar ist, ist in diesem Fall mit höherer Emission von CO₂-Äquivalent wegen der zusätzlichen lokalen Emissionen des Verbrennungsmotors (und auch wegen höheren Emissionen bei der Verteilung von Erdgas) zu rechnen.
- Mit dem Einsatz von Batteriefahrzeugen sind auch sehr niedrige Werte sowohl von Emissionen wie auch von Primärenergiebedarf erreichbar. Allerdings hängt beides davon ab, welche Primärenergie zu Traktionszwecken eingesetzt werden soll. Wird dazu ausschließlich Erdgas und hocheffiziente Verstromung eingesetzt, so erreicht man damit die beste Kraftstoff- und Primärenergienutzung (allerdings auch die größten Probleme bezüglich Reichweite). Wird aber der Kraftwerkmix als Stromquelle betrachtet, so vermindern sich die Vorteile in dem Maß, wie kohlenstoffreiche Primärenergien (Stein- und Braunkohle, Erdöl) darin beteiligt sind.

In der **Tabelle 16** werden ähnliche Resultate für einen um 125 kg leichteren Pkw (z.B. ZEM=675 kg, Anwendung von Aluminium-Legierungen für die Karosserie) und mit niedrigerem Rollwiderstand (Rollwiderstandsbeiwert=0.008) im Vergleich zum Referenzfahrzeug gezeigt. Die akzeptable Motorisierung verbleibt im Bereich 43-45 kW/Tonne, die Nutzlast beim Test beträgt auch hier 150 kg (die Resultate wären natürlich die gleichen mit ZEM=750 kg und Nutzlast beim Test 75 kg). Für den Vergleich werden die Werte für die jeweils benötigte Fahrtenenergie und für den Wirkungsgrad des Antriebssystems für beide Fahrzyklen (NEFZ und Referenzfahrzyklus) angegeben.

Die hier dargestellten Resultate für die Brennstoffzellenantriebe sind bedeutend günstiger als gegenwärtig demonstriert werden kann, sie entsprechen jedoch Werten, die bei der Marktreife realistisch erwartet werden können. Die Masse des gesamten Antriebes mit Brennstoffzellen ergibt etwa die Hälfte dessen, was sie nach dem gegenwärtigen Stand betragen würde. Die Masse des Fahrzeuges mit Brennstoffzellenantrieb ist aber deshalb höher als beim Antrieb mit Verbrennungsmotor, nicht nur weil die leistungsbezogene Masse des Brennstoffzellenantriebes prinzipiell höher ist als bei diesem (siehe Abschnitt 4.3, ferner Abschnitt 10.4 und Abbildung 28 im Anhang), sondern auch, weil die Stackleistung höher gewählt werden muss, um gleiche Fahrleistungen zu erreichen (der netto Gleichstromleistung steht noch die Aufbereitung und Umwandlung in mechanischer Energie bevor).

Tabelle 15: Referenzfahrzeug mit verschiedenen Antriebssystemen und fossilen Kraftstoffen im Referenzfahrzyklus (RFZ) (Bei den erforderlichen Fahrleistungen in diesem Fahrzyklus muß je nach Antriebssystem die Nennleistung der Verbrennungsmotoren im Bereich von 60-65 kW, der Brennstoffzellenstapeln im Bereich 87-105 kW liegen).

Antriebssystem :	VM-Benzin	VM-Diesel	VM-Erdgas	BZ-Benzin (¹)	BZ-Methanol (¹)	BZ- H ₂ aus Erdgas (¹)	EV (Batt.) (¹) (²) Elektrizität aus Erdgas / MIX
Fahrtenergie (Rad) MJ/km	0.411	0.420	0.423	0.516	0.501	0.469	0.487
Fahrzeugmasse, kg (Nutzlast 150 kg)	1180	1240	1260	1850	1750	1550	1700
Wirkungsgrad Antriebssystem Tank bis zum Rad	0.231	0.269	0.235	0.287 (³) (η_{BZ} : 0.58)	0.334 (³) (η_{BZ} : 0.58)	0.383 (³) (η_{BZ} : 0.57)	0.624
Kraftstoffverbrauch, MJ/km	1.782	1.561	1.800	1.799	1.499	1.224	0.781
Primärenergiebedarf, MJ/km	2.049	1.733	1.998	2.069	2.459	1.897(CH ₂) 2.570(LH ₂)	1.624 (Erdgas) 2.108(Euromix)
Emission CO ₂ -Äquivalent g/km	162	143	133	163	146	113 (CH ₂) 164 (LH ₂)	93 (Erdgas) 113 (Euromix)
Emission NO _x , g/km (global)	0.14	0.27	0.09	0.05	0.09	0.05 (CH ₂) 0.09 (LH ₂)	0.09 (Erdgas) 0.07 (Euromix)
Umwandlungsschritte	Erdöl Benzin mech. Energie	Erdöl Diesel mech. Energie	Erdgas Erdgas (Druck) mech. Energie	Erdöl Benzin Wasserstoff Elektr. Energie mech. Energie	Erdgas Methanol Wasserstoff Elektr. Energie mech. Energie	Erdgas Wasserstoff Elektr. Energie mech. Energie	Erdgas oder KW-Mix Elektr. Energie mech. Energie

(¹) Diese Antriebssysteme sind praktisch lokal schadstoffemissionsfrei

(²) Für das Batteriefahrzeug gelten die üblichen Restriktionen :

(a) Der Batteriespeicher erlaubt eine Reichweite zwischen ca. 140 km (mit fortschrittlichen Bleibatterien) und 250 km (z.B. mit NiMeHydrid - Batterien).

(b) Für die Betankungszeit des leeren Speichers muß mit einer Dauer von bis zu einer Stunde gerechnet werden (bei Anwendung moderner Schnellladesystemen).

(³) η_{BZ} = Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstapels im Fahrzyklus

Tabelle 16: Leichtfahrzeug (Fahrmasse ohne Antrieb und Tank=ZEM+Nutzlast=825kg), verminderter Rollwiderstand (Beiwert=0.008).
Resultate im NEFZ bzw. im Referenzfahrzyklus.

Antriebssystem :	VM-Benzin	VM-Diesel	VM-Erdgas	VM- H ₂ ⁽¹⁾ (CH ₂ , LH ₂)	BZ-Benzin ⁽¹⁾	BZ-Methanol ⁽¹⁾	BZ- H ₂ ⁽¹⁾ (CH ₂ , LH ₂)
Fahrzeugmasse, kg	1030	1090	1100	1070	1500	1440	1350
Nennleistung des VM oder BZ kW	55	55	55	55	80	80	80
Fahrtenergie (Rad) MJ/km							
NEFZ	0.302	0.313	0,315	0.31	0.39	0.378	0.36
Referenzfahrzyklus (RFZ)	0.365	0.373	0.376	0.37	0.43	0.422	0.41
Wirkungsgrad Antriebssystem Tank bis zum Rad ⁽³⁾							
NEFZ	0.19	0.22	0.195	0.20	0.25	0.29	0.34
Referenzfahrzyklus (RFZ)	0.23	0.26	0.238	0.25	0.29	0.33	0.40
ca. Kraftstoffverbrauch, MJ/km (Ungefähr gleich bei beiden Fahr- zyklen, NEFZ oder RFZ !)	1.6	1.45	1.57	1.52	1.6	1.29	1.05 ⁽²⁾
Primärenergiebedarf, MJ/km (bei fossiler Primärenergie) ⁽⁴⁾	1.84	1.59	1.79	2.29 (GH ₂) 3.10 (LH ₂)	1.8	2.16	1.62 (CH ₂) 2.19 (LH ₂)
Emission CO ₂ -Äquivalent g/km (bei fossiler Primärenergie) ⁽⁵⁾	147	130	118	142 (GH ₂) 206 (LH ₂)	143	128	99 (CH ₂) 144 (LH ₂)
Emission NO _x , g/km (global) (bei fossiler Primärenergie) ⁽⁵⁾	0.13	0.24	0.08	0.08 (GH ₂) 0.14 (LH ₂)	0.04	0.08	0.045(CH ₂) 0.07 (LH ₂)

⁽¹⁾ Diese Antriebssysteme sind praktisch lokal schadstoffemissionsfrei ⁽²⁾ Dieser Wert ist als der niedrigste Verbrauchswert unter realistischen Bedingungen anzusehen. In der Literatur anzutreffende niedrigere Werte ergeben sich nur durch untermotorisierte Systeme, oder durch nicht realistische Annahmen im Bezug auf die Antriebsmasse ⁽³⁾ Bei Brennstoffzellensystemen ergibt sich der mittl. Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstapels im Fahrzyklus > 0.58 ⁽⁴⁾ Wird Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen gewonnen, ist der Primärenergieverbrauch proportional zum Kraftstoffverbrauch und nur von diesem abhängig ⁽⁵⁾ Bei Nutzung vom regenerativen Wasserstoff sind die Emissionen bei allen Antriebskonzepten unbedeutend (BZ: ZEV; VM: SULEV).

5.2 Gegenüberstellung des Energieverbrauchs und der Emissionen konventioneller und alternativer Antriebskonzepte

Für die Beurteilung der globalen Umweltvorteile der Antriebskonzepte sind vor allem zwei spezifische Werte von eminenter Bedeutung:

- Der spezifische Primärenergiebedarf pro km Fahrleistung (MJ /km) und
- Der spezifische Ausstoß klimarelevanter Emissionen (CO₂-Äquivalent) pro km Fahrleistung (g /km)

In den Abbildungen dieses Abschnittes werden diese Größen im Vordergrund stehen und zum direkten Vergleich der alternativen Antriebssysteme in den Diagrammen dargestellt.

In der **Abbildung 9** werden im Rahmen des gegenwärtigen Energiesystems mit fossilen Kraftstoffen zuerst die Alternativen betrachtet, welche die Einführung der Erdgasnutzung im Verkehr ermöglichen würden. Aus dieser Nutzung sind Umweltvorteile zu erwarten, da Erdgas kohlenstoffärmer ist, als zum Beispiel Benzin oder Diesel.

Erdgas kann ohne Schwierigkeiten als Kraftstoff einem Verbrennungsmotor zugeführt werden. Die Kraftstoffspeicherung setzt die Benutzung von Drucktanks voraus, wenn der Verflüssigungsaufwand zu vermeiden ist und der Bedarf Primärenergie unterhalb dessen eines Benzinmotors bleiben soll. Diesem Nachteil steht eine bedeutende Verminderung des emittierten CO₂-Äquivalents gegenüber.

Der Einsatz von (lokal emissionsfreien !) Brennstoffzellenantrieben ist auch mit Benzin als Kraftstoff und Integration eines Benzinreformers im Antriebssystem möglich. Das System wird aber sehr aufwendig, der Primärenergieaufwand ist etwas höher als im Falle des Verbrennungsmotors und die globale CO₂-Emission praktisch identisch.

Andere Kraftstoffe für die Brennstoffzelle sind aus Erdgas zu gewinnen: Methanol oder Wasserstoff.

Im Falle der Methanolnutzung ist ähnlich wie bei der Benzinnutzung die Methanolreformierung an Bord nötig. Der Primärenergieaufwand ist, wegen des Produktionsaufwandes von Methanol aus Erdgas und der anschließenden Reformierung zu Wasserstoff hoch.

Der Einsatz von Flüssigwasserstoff als Kraftstoff an Bord bietet keine Vorteile (sowohl hinsichtlich Primärenergiebedarf wie auch hinsichtlich globaler Emissionen) gegenüber der Methanolnutzung. Der Energieaufwand für die Methanolerzeugung aus Erdgas wird durch den Aufwand für die Wasserstofferzeugung, Verflüssigung und Verteilung aufgewogen, anstelle des Methanolreformers an Bord werden aufwendige und relativ voluminöse kryogene Tanks benötigt. In der Praxis ist nun denkbar, dass eher Methanol als Flüssigwasserstoff (aus Erdgas) als Kraftstoff an der Tankstelle angeboten werden kann. Ohne erkennbare energetische- oder Emissionsvorteile ist dann die Flüssigwasserstoffnutzung in Brennstoffzellenfahrzeugen lediglich als Lösung des Problems der Wasserstoffspeicherung an Bord schwer zu vertreten.

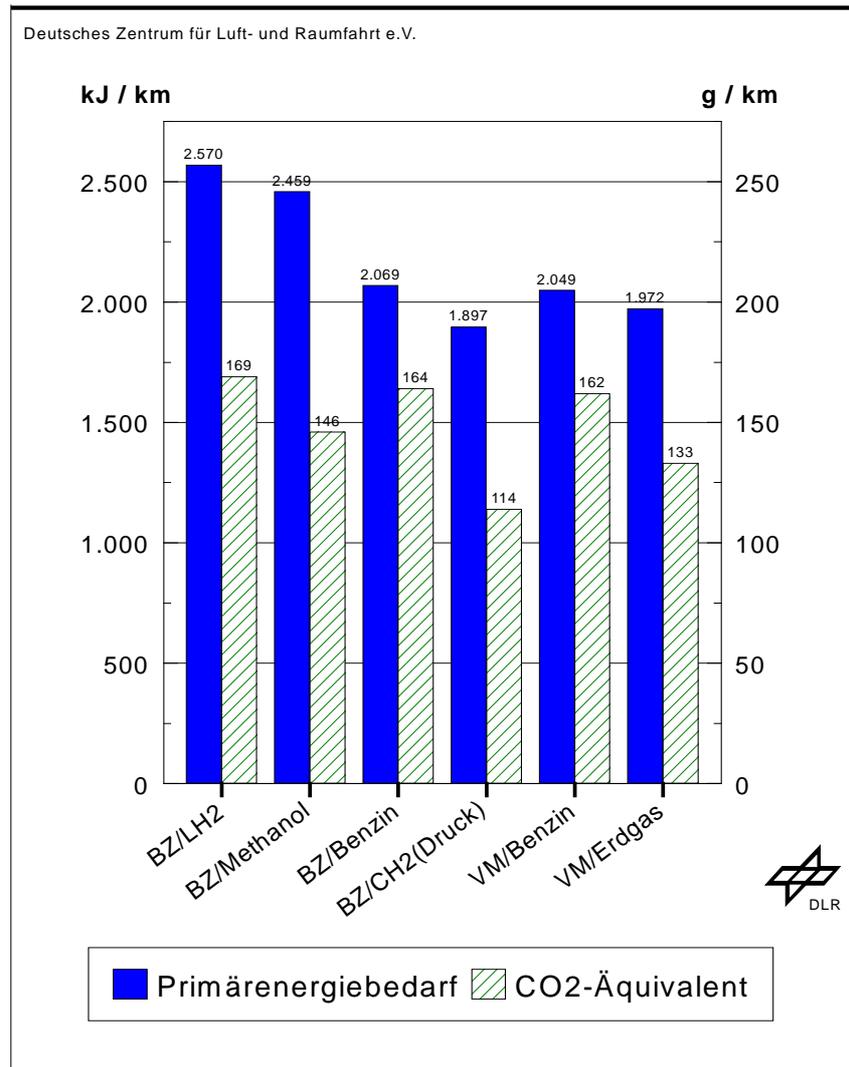


Abb. 9. Vergleich des Primärenergiebedarfes und der globalen Treibhausemissionen bei Nutzung von Erdgas oder Erdöl. Betrachtet werden die Kraftstoffe Benzin (aus Erdöl) bzw. Flüssigwasserstoff (LH₂), Druckwasserstoff (CH₂) und Methanol aus Erdgas. Diese Kraftstoffe können mit Verbrennungsmotor (VM) oder Brennstoffzellenantrieben genutzt werden.

Fig. 9. Comparison of the specific primary energy consumption (left bar and scale) and of the global greenhouse emissions by usage of benzine (gasoline) and natural gas. Alternative fuels derived from natural gas for usage with fuel cell drives are liquid hydrogen (LH₂), compressed hydrogen (CH₂) and methanol. Fuel cell systems with benzine or methanol tank are equipped with on board reformers.

BZ = Fuel Cell Drive ; VM = Drive with Internal Combustion Engine

Erst der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff und zwar in gasförmiger Form in Druckbehältern an Bord erlaubt einen Primärenergiebedarf (hier: Erdgasverbrauch) für Brennstoffzellenantriebe merklich unter dem Primärenergiebedarf von konventionellen Antrieben mit Verbrennungsmotor. Im Vergleich zum System mit Erdgasmotor ist hier der Vorteil des Brennstoffzellensystems erkennbar, so dass sich hier niedrigere globale Emissionen ergeben. Dies ist vor allem auf den höheren Wirkungsgrad und die Emissionsfreiheit des Brennstoffzellenaggregates zurückzuführen, welches den Elektroantrieb versorgt (im Bezug auf Primärenergiebedarf wird jedoch der Wirkungsgradvorteil der Brennstoffzelle durch den Energiebedarf für die Wasserstofferzeugung in der vorgelagerten Energiewandlungskette nahezu aufgewogen).

In den nächsten **Abbildungen 10 und 11** werden weitere Antriebskonzepte für das Energieversorgungssystem mit fossiler Primärenergie in Betracht gezogen.

Neben dem Verbrennungsmotor mit Diesel als Kraftstoff sind auch die Hybridausführungen sowohl mit Verbrennungsmotor als auch mit Brennstoffzellen vertreten (eine eingehende Betrachtung von Hybridfahrzeugen erfolgt im Abschnitt 6.3).

Ferner werden auch Elektrofahrzeuge mit Batteriespeicher (EV) betrachtet, wobei für deren Primärenergiebedarf und Emissionen unterschieden wird nach Elektrizität aus modernen mit Erdgas versorgten (GUD-)Kraftwerken oder aus dem Kraftwerk-Mix.

In der **Abbildung 10** sind sowohl der Kraftstoff- wie auch der Primärenergiebedarf dargestellt. Fahrzeuge mit Elektroantrieb haben einen niedrigeren Kraftstoffverbrauch, solange keine *Kraftstoffumwandlung an Bord* nötig ist (wie dies im Brennstoffzellenantrieb mit Methanol als Kraftstoff der Fall ist). Für den gesamten Primärenergiebedarf ist aber der Energieaufwand in der vorgelagerten Kette der Kraftstofferzeugung, -Transport und -Verteilung ausschlaggebend. Dieser Energieaufwand ist niedriger bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, weil die entsprechenden Kraftstoffe keine Umwandlung vor der Verbrennung benötigen (Erdgas), oder mit relativ kleinem Energieaufwand dargestellt werden (Benzin, Dieseldieselkraftstoff). Das Resultat ist, dass Brennstoffzellenantriebe energetisch aufwendiger im Vergleich zu fortschrittlichen Dieselantrieben sind. Auch bei Hybridfahrzeugen (mit Hilfsenergiespeicher und Bremsenergie-Rückgewinnung) ist die Anwendung des Dieselantriebes energetisch vorteilhafter. Bemerkenswert ist, dass die Hybridisierung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren einen höheren energetischen Vorteil bewirkt, als dies der Fall bei Brennstoffzellenantrieben ist (siehe dazu Abschnitt 5.3). Es ist auch bemerkenswert, dass sich bei Systemen *ohne Hilfsenergiespeicher* der Energiebedarf an fossiler Energie in einem relativ schmalen Band von etwa 1800 bis 2050 kJ/km ergibt (solange keine zusätzliche Kraftstoffumwandlung an Bord vorgenommen werden muss). Energetisch günstigere Antriebssysteme, welche einen niedrigeren Bedarf im Bereich von etwa 1400 bis 1650 kJ/km haben können, setzen die Anwendung von Hilfsenergiespeicherung bzw. Batterien voraus!

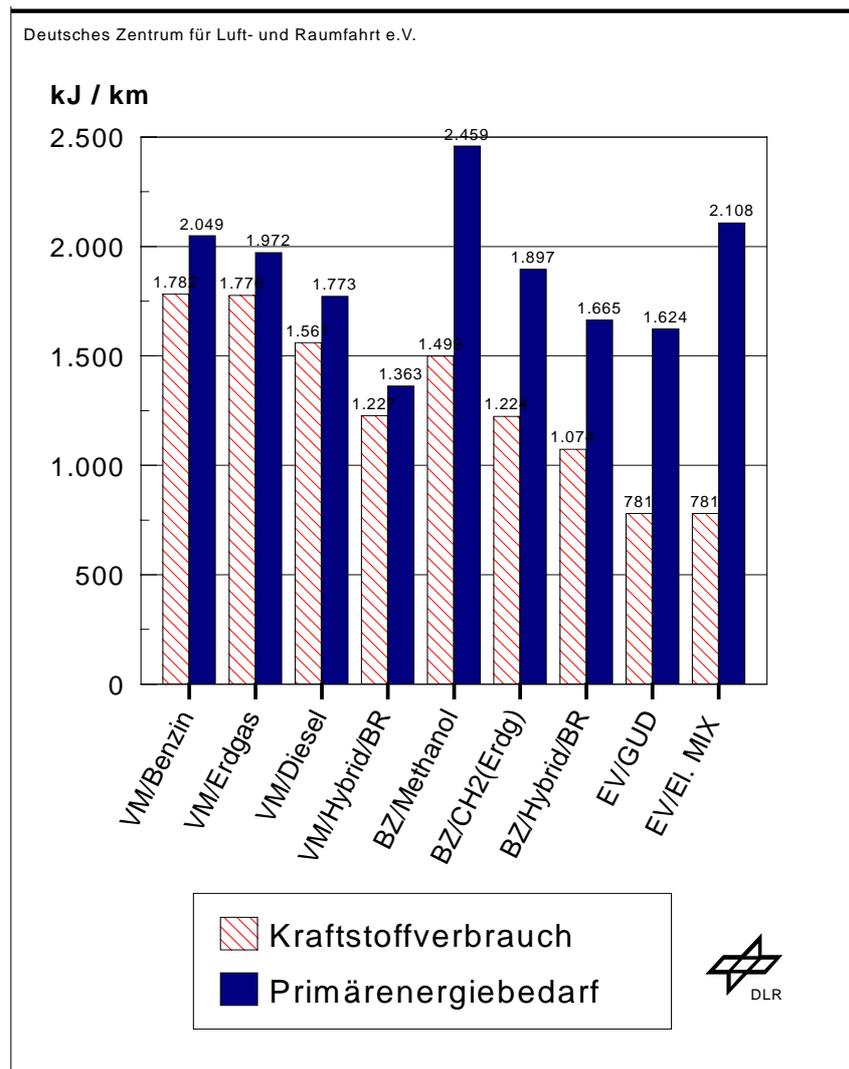


Abb. 10. Vergleich des Kraftstoffverbrauchs und des Primärenergiebedarfes im Rahmen der gegenwärtigen Energieversorgung fossilen Ursprungs. Betrachtet werden Antriebskonzepte mit herkömmlichen Kraftstoffen bzw. mit aus Erdgas abgeleiteten Kraftstoffen, wie Druckwasserstoff (CH₂) und Methanol. Zusätzlich zu den Antriebskonzepten mit Verbrennungsmotor (VM) oder Brennstoffzellenantrieben (BZ) und deren autonomen Hybridausführungen mit Bremsenergieerückgewinnung (BR), werden auch Elektrofahrzeuge mit Batteriespeicher (EV) zum Vergleich herangezogen, deren Stromversorgung aus modernen Erdgaskraftwerken (GUD) oder aus dem europäischen Kraftwerkmix sichergestellt werden soll.

Fig. 10. Comparison of the specific fuel consumption (left bar) and primary energy demand within the energy system using fuels from fossil resources. The relevant drive systems shown in the figure are using conventional fuels, natural gas, or fuels derived from natural gas. Natural gas derived fuels considered here for usage with fuel cells are compressed hydrogen (CH₂) and methanol on board. In addition to drives with IC-engines (VM) and fuel cells (BZ) also autonomous hybrids of both using brake energy recovery (BR) are considered. For the purpose of comparison, electrical vehicles with battery storage (EV) fueled with electricity from modern natural gas plants (GUD) or from the European network-mix are also considered.

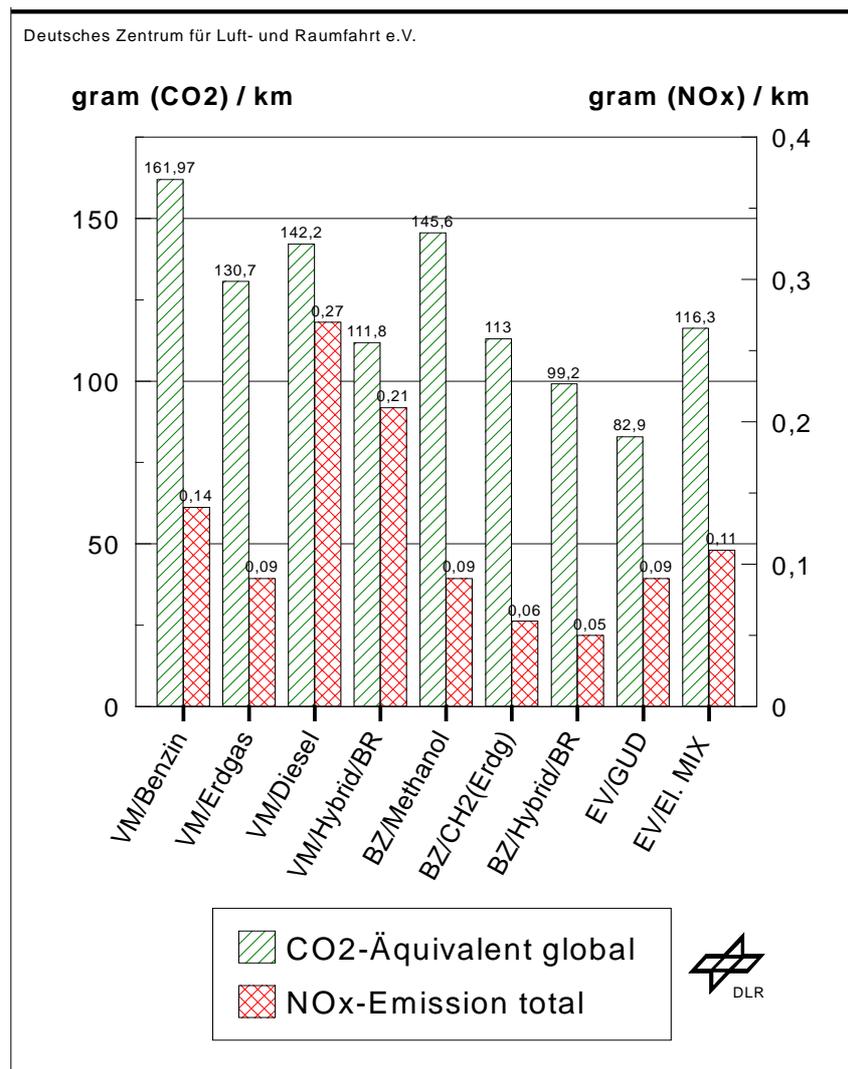


Abb. 11. Vergleich der globalen Treibhausemissionen und der globalen NOx-Emission im Rahmen der gegenwärtigen Energieversorgung fossilen Ursprungs. Betrachtet werden die relevanten Antriebskonzepte mit herkömmlichen Kraftstoffen bzw. mit aus Erdgas abgeleiteten Kraftstoffen, wie Druckwasserstoff (CH₂) und Methanol. Zusätzlich zu den Antriebskonzepten mit Verbrennungsmotor (VM) oder Brennstoffzellenantrieben (BZ) und deren autonomen (autarken) Hybrid Ausführungen mit Bremsenergieerückgewinnung (BR), werden auch Elektrofahrzeuge mit Batteriespeicher (EV) zum Vergleich herangezogen, deren Stromversorgung aus modernen Erdgaskraftwerken (GUD) oder aus dem europäischen Kraftwerkmix sichergestellt werden soll.

Fig. 11. Comparison of the global greenhouse emissions (left bar and scale) and of the global NOx-emission within the energy system using fuels from fossil resources. The relevant drive systems shown in the figure are using conventional fuels, natural gas, or fuels derived from natural gas. Natural gas derived fuels considered here for usage with fuel cells are compressed hydrogen (CH₂) and methanol on board. In addition to drives with IC-engines (VM) and fuel cells (BZ) also autonomous hybrids of both using brake energy recovery (BR) are considered. For the purpose of comparison, electrical vehicles with battery storage (EV) fueled with electricity from modern natural gas plants (GUD) or from the European network-mix are also considered.

In der **Abbildung 11** werden die globalen oder regional wirksamen Emissionen für die betrachteten Alternativen dargestellt. Von der Darstellung der lokalen Emissionen wird hier Abstand genommen, da das Problem der lokalen Emissionen von Verbrennungsmotoren hinreichend bekannt ist, wobei noch die entsprechenden Zahlen fast „jährlich“ durch Verbesserung der Motoren und Katalysatoren geändert werden. Die Antriebskonzepte ohne Verbrennungsmotoren (also „reine“ Elektroantriebe) können hingegen als praktisch lokal emissionsfrei betrachtet werden. In der Abbildung werden deswegen nur die globalen Emissionen betrachtet.

Die globale Emission an klimarelevante Gase (CO₂-Äquivalent, g/km) für Antriebe mit Verbrennungsmotoren ergibt sich im Bereich von etwa 130 bis 160 g/km (niedrigeren Wert mit Erdgasmotoren). Niedrigere Werte im Bereich von etwa 85 bis 115 g/km sind erst durch Anwendung des Elektroantriebes (Batterie-, Brennstoffzellen- oder Hybridfahrzeuge) zu erwarten. Bei Fahrzeugen mit „normaler Reichweite“ (im Bereich 500 km und mehr) ist der niedrigste Wert an klimarelevanten Emissionen mit einem Brennstoffzellenantrieb in Hybridausführung (mit Hilfsenergiespeicher) zu erreichen, dicht gefolgt vom Hybridfahrzeug mit Dieselantrieb. Letzteres hat praktisch das gleiche Emissionsniveau an CO₂-Äquivalent wie die Brennstoffzellenfahrzeuge, emittiert aber global bedeutend mehr NO_x (Stand 1999) und kann lokal emissionsfrei nur in Zonen höherer Restriktionen (z.B. Stadtkern) fahren, wenn der Dieselantrieb in diesen Zonen abgeschaltet wird. Es sei noch bemerkt, dass die hier betrachteten Hybridfahrzeuge autonome Hybridfahrzeuge (paralleler Bauart) mit Bremsenergieerückgewinnung sind.

5.3 Bewertung der Ergebnisse

In den vorigen Abschnitten 4.1 und 4.2 wurde der spezifische Energiebedarf fossilen Ursprungs und die globalen Emissionen verschiedener Antriebskonzepte für Fahrzeuge mit den Referenzdaten dargestellt. Dabei sind für die konventionellen Antriebe der gegenwärtige fortschrittliche Stand, für die elektrischen Antriebe und die dazugehörigen chemoelektrische Wandler (Brennstoffzellen, Batterien) der optimistische, beim Erreichen der Marktreife realisierbare, fortschrittliche Stand betrachtet. Dies bedeutet, dass die *mögliche Massenreduktion von gegenwärtigen Brennstoffzellenantrieben bei den Resultaten schon berücksichtigt ist*. Ein Beispiel für die Sensibilität der Resultate bei Variation der leistungsbezogenen Antriebsmasse von den heutigen bis zu den hier betrachteten ultimativen Werten ist übrigens im Anhang zu diesem Bericht (Abbildung 25) mit Hilfe der dort besprochenen analytischen Beziehungen dargestellt.

Die Resultate (z.B. Abbildungen 10 und 11) zeigen Folgendes:

Im Bezug auf Primärenergiebedarf fossilen Ursprungs bietet die Einführung von Brennstoffzellenantrieben keine „klaren“ Vorteile an, zumindest in dem Sinne, dass durch niedrigere Betriebskosten und ökologische Vorteile (Schonung fossiler Energieresourcen) der Verbrennungsmotor und dessen Hybridausführungen in seinem „etablierten“ Versorgungssystem zu verdrängen wäre.

Im Bezug auf die Emissionen zeigen die Resultate, dass die Einführung des Elektroantriebes eine Senkung der klimarelevanten Emissionen gegenüber dem heute typischen Motor-

antrieb (mit Benzin, Diesel oder Erdgas) bewirken kann. Elektroantriebe ohne Verbrennungsmotor erscheinen besonders attraktiv, wenn man noch die NO_x -Emissionen und vor allem die *lokale* Emissionsfreiheit an Schadstoffen berücksichtigt. Voraussetzung ist jedoch, dass bei Brennstoffzellenantrieben *gasförmiger Wasserstoff* betankt wird: Bei Nutzung von Benzin, Methanol oder LH_2 an Bord von Brennstoffzellenfahrzeugen werden die *globalen* Emissionsvorteile zunichte gemacht (Abbildungen 9 und 11). Bei Brennstoffzellenantrieben mit Reformierung an Bord muss hinzugefügt werden, dass die angenommene lokale Emissionsfreiheit auch mit Hilfe katalytischer Systeme zu erreichen ist; denn auch das im Reformierungsprozess entstehende CO muss bis auf einige ppm reduziert werden, um die „Vergiftung“ der PEM-Brennstoffzelle zu vermeiden.

In diesem Sinne erscheint der Brennstoffzellenantrieb mit *gasförmigen Wasserstoff* an Bord besonders attraktiv. Die gezeigten Emissionsvorteile sind aber nicht so groß, um weitere Fragen ignorieren zu können: In welchem Umfang wird z.B. die absolute lokale Emissionsfreiheit Bedeutung erlangen, so dass höhere Kosten für Kraftstoff (Wasserstoff aus Erdgas z.B.), Fahrzeug und neue Infrastrukturen (Versorgungssysteme) akzeptiert werden können? Und wird bei Personenfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb das Problem des Volumens des Druckspeichers für Wasserstoff (welches im Abschnitt 10.3 des Anhangs näher betrachtet wird) doch zu niedrigeren Reichweiten als heute üblich zwingen?

6. Vergleiche von fortschrittlichen Fahrzeugen und Konzepten: Prototypen mit Brennstoffzellenantrieb, Sparmotoren in der Praxis und Hybridkonzepte beim gegenwärtigen Stand der Kraftstoffversorgung (fossile Primärenergie)

Im vorigem Abschnitt wurden Resultate für das Referenzfahrzeug vorgelegt. In den folgenden Abschnitten werden ergänzende Resultate für weitere Fahrzeugtypen aus der Praxis, zum Beispiel Leichtfahrzeuge oder auch Busse, vorgestellt. Dabei wird der Energiebedarf bei Nutzung konventioneller Antriebsarten oder Brennstoffzellenantriebe untersucht und die Vorteile der Hybridfahrzeuge mit Hilfsenergiespeicher (hier: Pufferbatterie) eingehender diskutiert. Für eine informative Gegenüberstellung wird in den Diagrammen dieses Abschnittes der Energiebedarf in einigen Positionen aufgeteilt, welche sinngemäss in allen Antriebsarten existieren. Diese Positionen sind in der folgenden **Tabelle 17** angegeben.

Durch die gewählte Aufteilung werden bei gegenüberstellenden Darstellungen die typischen Vorteile, Nachteile bzw. Verlustquellen der verschiedenen Antriebsarten besser aufgezeigt.

6.1 Stand der Technik: Vergleich von zwei Antriebskonzepten für Personenwagen der Mittelklasse

Der Stand der Technik kann am besten durch die Betrachtung von Fahrzeugmodellen aufgezeigt werden, bei welchen in derselben „Karosserie“ alle hier interessierenden Antriebsvarianten eingebaut worden sind. Dies ist tatsächlich der Fall mit der Mercedes-Benz A-Klasse. Die Bauweise der Karosserie entspricht den typischen Anforderungen des Elektroantriebes und der Unterbringung chemoelektrischer Komponenten. Am Markt werden zur Zeit die Versionen mit Verbrennungsmotor, z.B. die Version A-170 mit einem 66 kW Dieselmotor angeboten. Das gleiche Fahrzeug diene als Träger eines Brennstoffzellenantriebes mit

Methanol als Kraftstoff (Prototyp-Bezeichnung: Nekar 3) und eines Brennstoffzellenantriebes mit Flüssigwasserstoff (LH₂) als Kraftstoff (Prototyp-Bezeichnung: Nekar 4).

Tabelle 17: Aufteilung des Energiebedarfs von Kraftfahrzeugen (Legenden der Abb. 12-16)

<u>Bezeichnung im Diagramm</u>	<u>Bedeutung</u>	<u>Berücksichtigt :</u>
ProzVerl	Prozess-Verluste	Verluste des Prozesses im Hauptwandler (Umwandlung der chemischen Energie des Kraftstoffes in für den anschließenden Antriebsstrang nutzbare Energieform: mechanische oder elektrische Energie)
Dros/Reib	Drosselung und Reibung	Verluste an nutzbare Energie durch mechanische Reibung oder Drosselung/Reibung von Stoffströmungen
Trans/Reg	Transmission und Regelung	Verluste der mechanischen oder elektrischen Regler, Wandler und Komponenten der Leistungstransmission bis zum Rad, eventuel auch der Hilfsenergiespeicher (z.B. Batterie „round-trip“)
Neben	Nebenverbraucher	Mittl. Verbrauch von Nebenaggregaten, Audio u.ä.
Nutz	Nützliche Fahrtenergie	Roll- und Luftwiderstand sowie Bremsenergie
Kraft.P+V	Kraftstoffproduktion, Transport und Verteilung	Verluste der dem Fahrzeug vorgelagerten Energie-wandlungskete für Kraftstoffherstellung und Transport

In der **Abbildung 12** ist der sich aus dem Simulationsprogramm ergebende Energiebedarf für die zwei Prototypen sowie für das kommerzielle Modell A-170 mit Verbrennungsmotor (66 kW) dargestellt. Der Vergleich ist interessant, weil er den Stand der Technik beim Einbau dieser alternativen Antriebe im gleichen Karosseriemodell demonstriert und noch zeigt wie schwierig es ist, mit den „etablierten“ Ausführungen zu konkurrieren. Andererseits muss betont werden, dass es beim gegenwärtigen „Stand der Technik“ eine Motorisierung der Brennstoffzellenfahrzeuge wie beim Dieselmodell (ca. 47 kW_{Rad}/Tonne) überhaupt nicht möglich wäre. So sind das methanolbetriebene Fahrzeug mit ca. 20 kW_{Rad}/Tonne (Stackleistung 50 kW_e) und die Flüssigwasserstoff-Version mit ca. 29 kW_{Rad}/Tonne (Stackleistung 70 kW_e) untermotorisiert. Sie können bei der Simulation die Fahrzyklenteile außerhalb von NEFZ nicht wie das Dieselmodell durchfahren. Dennoch ergibt sich der Kraftstoffverbrauch bedeutend höher als der in den normal „motorisierten“ Fällen der Abbildungen 9 oder 10. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die spezifischen Massen der dort betrachteten Brennstoffzellenantriebe die zukünftig optimal erreichbaren sind und erheblich niedriger (nach Tabelle 9) sind als die gegenwärtigen Werte.

Trotzdem ist aus der Abbildung 12 erkennbar, dass der hohe Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstacks auch unter diesen „widrigen“ Massenverhältnissen zu merklich niedrigem Kraftstoffverbrauch führt, besonders dann, wenn keine Reformierung an Bord nötig ist.

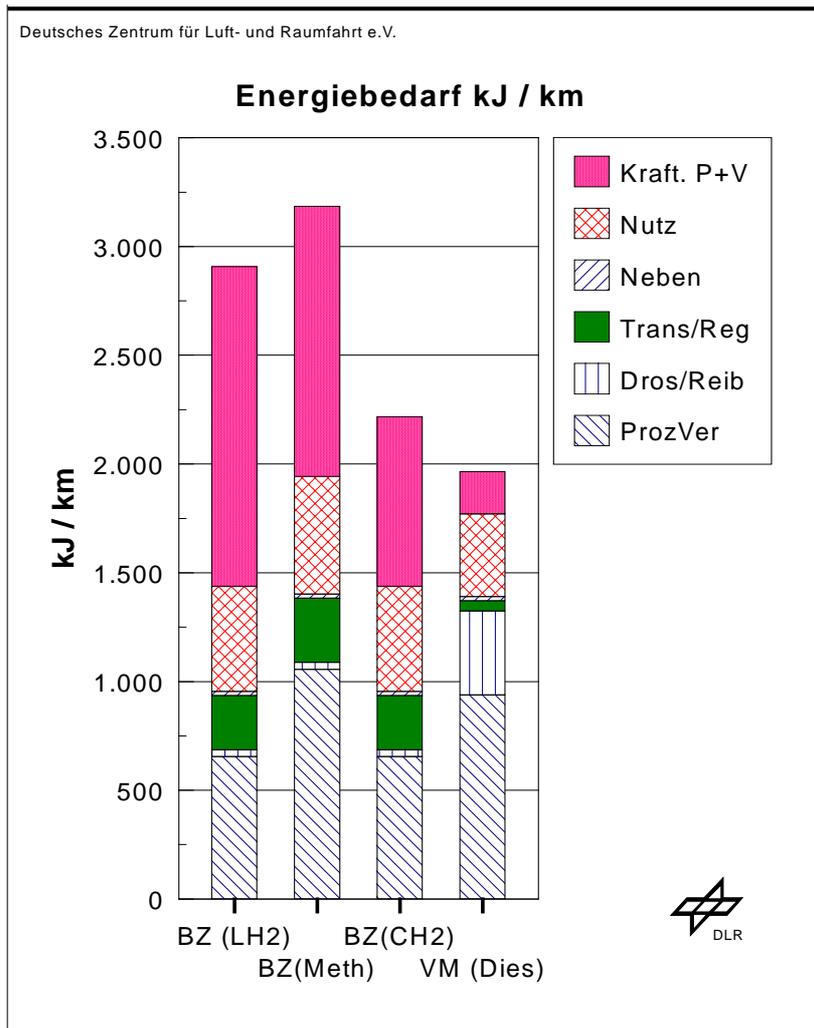


Abb. 12. Analyse des Energiebedarfs eines kommerziellen Pkw der mittleren Klasse (A-170) mit Dieselantrieb im Vergleich zum Energiebedarf des gleichen Fahrzeuges im NEFZ mit Brennstoffzellenantrieb und Wasserstoff oder Methanol als Kraftstoff. Ausführungen mit Methanol oder LH₂ als Kraftstoff existieren als Demonstrationsfahrzeuge. Eine Ausführung mit Hochdruckspeicher an Bord wurde, obwohl energetisch günstiger, wegen der Problematik der H₂-Druckspeicherung an Bord (vorw. Platzprobleme im Pkw) nicht als Prototyp ausgeführt. Der Kraftstoffverbrauch entspricht dem gesamten Energiebedarf abzüglich der Verluste für Kraftstoffherstellung, -transfer und -verteilung (Kraft. P+V). Die einzelnen Positionen, in welchen der Kraftstoffverbrauch geteilt wird, werden im Text besprochen (siehe Tabelle 17). Die Motorisierung der Demonstrationsfahrzeuge mit LH₂ bzw. Methanol ist wegen der hohen Antriebsmasse auf ca. 55% bzw. 39% der Motorisierung des kommerziellen Pkw mit Dieselmotor begrenzt.

Fig 12. Analysis of the energy demand for a commercial sedan (type A-170) with Diesel engine in comparison to the energy demand of the same car with present technology fuel cell system and hydrogen or methanol as a fuel. The systems with methanol or LH₂ as fuel (left bars) are demonstration vehicles (with lower motorization than the commercial sedan). Only a system with pressurized hydrogen (CH₂) as fuel could be comparable to the conventional drive system from the energetic point of view. Unfortunately, no such application could be demonstrated mainly due to the space problems of high pressure hydrogen storage especially in the case of personal cars. The fuel consumption (which is lowest for fuel cell systems with hydrogen on board) can be seen in the diagram by subtracting from the total energy demand the energy part (denoted as „Kraft. P+V“) for fuel production (from natural gas in the fuel cell cases), transfer and distribution. For the purpose of comparison, the fuel consumption is shown splitted up in five parts as described in Table 17.

BZ = Fuel Cell Drive ; VM = Drive with Internal Combustion Engine

Der Kraftstoffverbrauch des Brennstoffzellenantriebes mit Methanol ist höher als der des Dieselantriebes, was auf die Methanolreformierung an Bord zurückzuführen ist. Dies wird deutlich, wenn man den Verbrauch des Brennstoffzellenantriebes mit Flüssigwasserstoff ebenfalls betrachtet: Der Kraftstoffverbrauch ist hier deutlich niedriger als der des Dieselantriebes, die Kraftstoffbereitstellung aber aufwendiger. Berücksichtigt man also den Energiebedarf der vorgelagerten Energiekette (Kraftstoffbereitstellung) so wird deutlich, dass der Gesamtbedarf an fossiler Primärenergie bei den Brennstoffzellenantrieben mit flüssigem Kraftstoff um ca. 50 % höher als beim Dieselfahrzeug liegt.

Eine Verminderung des Energiebedarfs des Brennstoffzellenantriebes wäre durch den Verzicht auf die Betankung eines flüssigen Kraftstoffes möglich: Mit Druckspeicher (CH_2) wäre der Kraftstoffverbrauch praktisch der gleiche wie im Falle von Flüssigwasserstoff (LH_2), da die Tanks in beiden Fällen ca. die gleiche Masse haben. Der Gesamtenergiebedarf aber ist bedeutend niedriger. Der Energiebedarf dieser „hypothetischen“, d.h. nicht als Prototyp gebauten Ausführung (BZ(CH_2)) ist ebenfalls in der Abbildung 12 gezeigt. Der Grund, dass die Druckspeicherung in dieser Pkw-Klasse nicht demonstriert wird, ist aus der Tabelle 14 ersichtlich: Der Raumbedarf des Druckspeichers ist um ca. den Faktor 2 höher als dieser des Flüssigwasserstofftanks und praktisch (d.h. ohne eine ca. Halbierung der Reichweite) nicht im Wagen dieser Klasse unterzubringen.

Diese Situation stellt das Dilemma für die Anwendung des Brennstoffzellenantriebes in Pkw dar: Die Anwendung von flüssigen Kraftstoffen (Methanol, Benzin, Flüssigwasserstoff) bringt keine relevanten globalen energetischen Vorteile (Schonung fossiler Energieressourcen) oder globale klimarelevante Emissionsvorteile mit sich, bei Anwendung von Druckwasserstoff (mit besserer Energie- und Emissionsbilanz) wären hingegen Abstriche bei der Reichweite oder dem Nutzvolumen notwendig. Ein Vorschlag für die Unterbringung von Druckspeicher für Wasserstoff in einem Pkw mit Brennstoffzellenantrieb für eine Reichweite von 600 km ohne Inanspruchnahme des Nutzvolumens („no intrusion into the trunk space“) wird in [Thomas et al., 2000] dargestellt. Allerdings handelt es sich um zylindrische Tanks, welche mit einem Druck von 350 bar beansprucht werden und im Fahrzeugunterboden untergebracht sind. Zugunsten der Wasserstoffdruckspeicherung, bei welcher aber in dieser Ausführung der gesamte Brennstoffzellenantrieb im konventionellen Motorraum eines Pkw unterzubringen wäre, wird das Argument der gesamten (volkswirtschaftlichen) Infrastrukturkosten erwähnt: sie sollen für den Fall der direkten Speicherung von Druckwasserstoff an Bord niedriger als bei der Infrastruktur mit Methanol oder Benzin und Reformier an Bord sein. Im übrigen stehen die in diesem Bericht dargestellten energetischen Aspekte (Energiebedarf am niedrigsten mit Druckwasserstoff an Bord, Energiebedarf des Brennstoffzellenantriebes mit Benzinreformer wie beim konventionellen Ottomotor) im Einklang zu den Resultaten der Abbildungen 9 und 12.

Der Vergleich der einzelnen Positionen in den Säulendiagrammen der Abbildung 12 ist aufschlussreich. Der Kraftstoffverbrauch ist abzulesen nachdem der Anteil für Kraftstoffbereitstellung (Kraft. P+V) vom gesamten Energiebedarf abgezogen wird. Das Verhältnis der nützlichen Fahrtenenergie zu der Summe der verbleibenden drei (in den Diagrammen „unteren“ Positionen) bestimmt den Wirkungsgrad der Antriebskette im Fahrzeug. Von diesen drei Positionen ist die Drosselung und Reibung (Ladeverluste, mechanische Reibung etc.) im

Falle des Verbrennungsmotors bedeutend höher als bei Brennstoffzellensystemen, wo diese Position praktisch den Luftverdichtungsverlusten entspricht. Die eigentlichen Prozessverluste im Verbrennungsmotor (welche den „inneren“ Wirkungsgrad bestimmen) sind zwar höher als bei Brennstoffzellensystemen, aber der Motorwirkungsgrad an der Welle (also vor der Transmission) wird durch die Drosselung/Reibung ungünstig beeinflusst. Gerade an diesem Punkt setzen viele moderne motorische Maßnahmen (Gemischregelung durch Kraftstoffeinspritzung, maximales Drehmoment schon bei niedrigen Drehzahlen, etc.) an und erreichen damit beachtliche Verlustminderungen.

Als Vorteil für das System mit Verbrennungsmotor können die relativ niedrigen Verluste der mechanischen Transmission von der Motorwelle bis zum Rad angesehen werden.

Bei Brennstoffzellensystemen sind zwar die Verluste bis zum Ausgang des Hauptaggregates (Brennstoffzellenblock) erheblich kleiner (falls keine Kraftstoffreformierung an Bord stattfindet), die vorliegende elektrische Energie muss jedoch einen relativ aufwendigen Regelungs- und Umwandlungsprozess durchlaufen. Deshalb sind hier die Regelungs- und Transmissionsverluste, welche die Verluste der Inverter und Elektromotoren beinhalten, bedeutend höher im Vergleich zu den Transmissionsverlusten der Systeme mit Verbrennungsmotor.

Die eben besprochene Darstellungsart zum Energiebedarf der betrachteten Fahrzeuge wird auch in den zwei folgenden Abschnitten benutzt. Für die Alternativen Antriebe betrachten wir aber nicht, wie in diesem Abschnitt, den gegenwärtigen „Stand der Technik“ sondern, wie im Kapitel 5, die zukünftig optimal erreichbaren Werte.

6.2 Die Chancen der „kleinen Klasse“ (Leichtfahrzeuge)

Die im vorigen Abschnitt besprochenen Fahrzeuge sind natürlich keine „drei-Liter-Autos“. Eine Annäherung an diese „magische“ Grenze (in etwa 1 MJ/km Kraftstoffverbrauch) ist jedoch gegenwärtig erzielt worden, allerdings mit Leichtfahrzeugen der kleinen Klasse: Lupo-3L-TDI (880 kg Leergewicht), Audi A2 (825 kg Leergewicht).

In diesem Abschnitt wird eines davon, Lupo TDI, näher betrachtet und werden die Leistungen des gleichen Fahrzeuges mit Brennstoffzellenantrieb dargestellt. Dabei sollen die spezifischen Daten des Brennstoffzellenantriebes die gleichen wie die des Referenzfahrzeuges sein, also gegenüber dem gegenwärtigen Stand verbessert (der Zeithorizont „2005“ sieht neben der optimistischen Verminderung der Systemmasse auch Verbesserungen beim Eigenverbrauch des Brennstoffzellenstapels und des Regelungs- und Transmissionssystems vor).

Die Minderung der ZEM-Masse der „Leichtfahrzeuge“ wird vor allem durch den massiven Einsatz von Aluminiumlegierungen erreicht, die Motorisierung des Lupo mit 45 kW (entspricht 51 kW/Tonne Leergewicht) ist für die üblichen Fahrleistungen ausreichend.

In der **Abbildung 13** ist die Analyse des Energiebedarfs gezeigt. Der Kraftstoffverbrauch des Dieselantriebes liegt im Referenzfahrzyklus sehr nah an 1.1 MJ/km. Das fortschrittliche Brennstoffzellensystem mit Methanolreformer erreicht in diesem Fall praktisch den selben Kraftstoffverbrauch, der gesamte Energiebedarf liegt entsprechend höher. Wäre es möglich,

ein solches Brennstoffzellenfahrzeug mit einem Drucktank für Wasserstoffgas zu betreiben (was mit Raumproblemen bzw. Verminderung der Reichweite verbunden wäre), wäre der Gesamtenergiebedarf nicht wesentlich höher als der des Lupo-TDI. Der Vorteil wäre dabei die lokale Emissionsfreiheit des Brennstoffzellenantriebes.

Die in der Abbildung 13 gezeigte Situation unterscheidet sich beim Vergleich der Alternativen kaum von der Situation der Abbildung 10 für schwerere Fahrzeuge. Tatsächlich zeigt eine Sensitivitätsanalyse, dass der relative Energiebedarf der Alternativen wenig von der Fahrzeugmasse ohne Antriebsstrang (ZEM) abhängt, vorausgesetzt, dass die gleiche spezifische Fahrleistung (kW Antriebsleistung am Rad pro Tonne Fahrgewicht) aufzubringen ist.

Diese letztere Größe ist aber bei schweren Nutzfahrzeugen wie Busse verschieden, da sich bei diesen sowohl die Motorisierung wie auch der geeignete Fahrzyklus von den bisher betrachteten Pkw unterscheidet. Busse werden auch als Hybridfahrzeuge im Rahmen der Ausführungen im nächsten Abschnitt näher betrachtet.

6.3 Hybridisierung von Personenwagen und Bussen

In diesem Abschnitt wird der Energiebedarf verschiedener Hybrid-Ausführungen von Fahrzeugantrieben den entsprechenden Ausführungen ohne Hilfsenergiespeicher (Puffer) gegenübergestellt. Da Hybrid-Busse interessante Aspekte als Alternativen zu der heutigen Ausführung mit (nur) Verbrennungsmotor bieten, werden sie in diesem Abschnitt näher betrachtet. Als Hilfsenergiespeicher werden Batterien gewählt, weil im vorliegenden Bericht der elektrische Antrieb (ob mit Batterien, Brennstoffzellen oder in Hybrid-Systemen) als Alternative im Mittelpunkt steht und in diesem Fall die Pufferung durch Batterien naheliegend ist. Die ansonsten mögliche Energiezwischen-speicherung durch Schwungräder ist in moderner Ausführung (mit Anwendung magnetischer Lagerung des Schwungrades) nicht so universal einsetzbar (der Fahrzyklus muss geeignet sein) und mit einigen speziellen Problemen behaftet. Der „Superkondensator“ als Alternative zu Batterien ist nur als Booster-System für die Deckung kurzzeitiger Spitzenleistung geeignet und für die Integration in den autonomen Hybriden zur Kraftstoffeinsparung kaum zweckmässig.

Es werden nur parallele Hybride betrachtet, bei welchen der Radantrieb wahlweise direkt oder unter Einbeziehung der im Puffer zwischengespeicherten Energie erfolgt. Serielle Hybride, bei welchen der Radantrieb immer elektrisch über eine Batterie erfolgt, welche vom Hauptaggregat (z.B. einem Dieselgenerator) nachgeladen wird, sind wegen der höheren Verluste der Zwischenspeicherung für die Verminderung des Kraftstoffverbrauchs wenig geeignet. Sie sind für spezielle Zwecke vom Interesse, zum Beispiel ermöglicht der diesel-elektrische Antrieb die Ausführung von Niederflurbussen mit besonderem Ein- und Aussteige-Komfort, da die mechanische Transmission entfallen kann.

Es werden auch nur autonome Hybride zum Vergleich gestellt. Die Möglichkeit der Nachladung des Puffers vom Netz braucht dabei nicht ausgeschlossen zu sein, nur wird bei der Fahrsimulation die Kapazität des Puffers so lange erhöht, dass beim optimalen Betrieb mit Kraftstoffeinsparung am Ende des jeweiligen Fahrzyklus (ohne Nachladung vom Netz) der Startzustand des Puffers wieder erreicht wird.

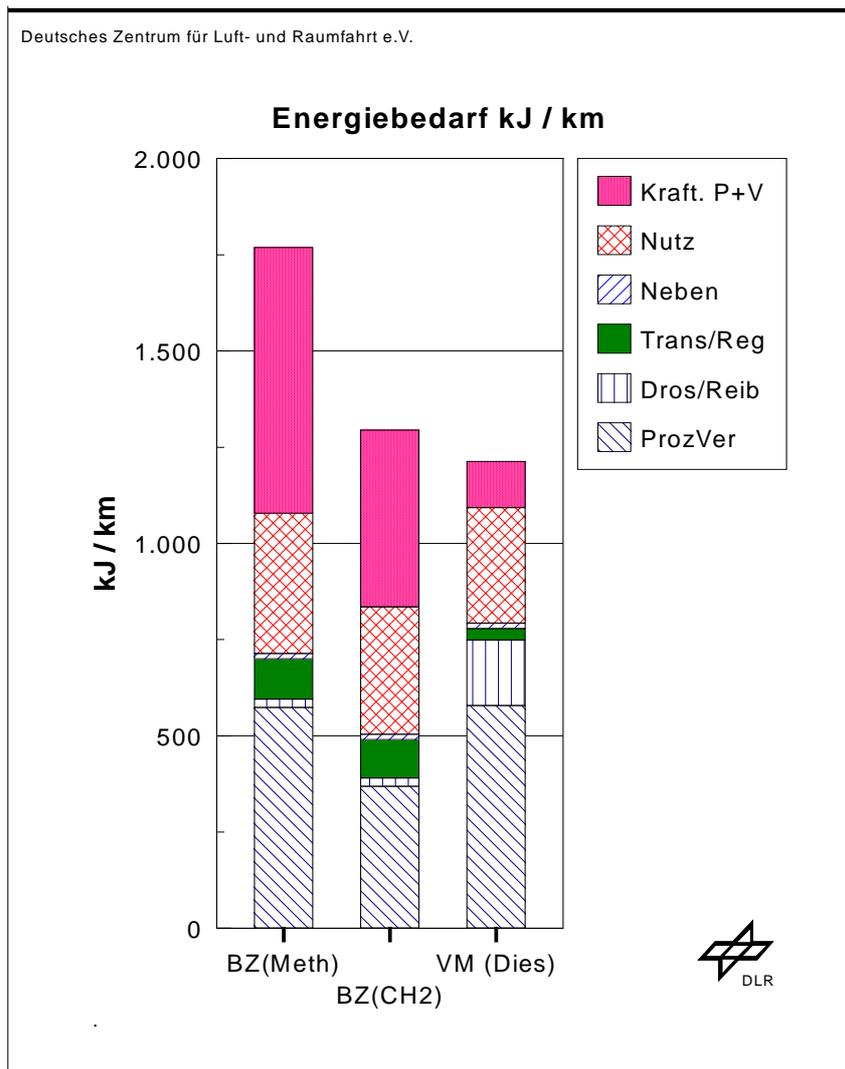


Abb. 13. Analyse des Energiebedarfs eines kommerziellen Klein Pkw mit Dieselmotor (Lupo 3L) im Vergleich zum Energiebedarf des gleichen Fahrzeuges mit optimiertem Brennstoffzellenantrieb und Wasserstoff oder Methanol als Kraftstoff. Der Einbau von Antrieben mit hohem spezifischem Platzbedarf (Brennstoffzellensysteme, Gasspeicherung von Wasserstoff) in Kleinfahrzeugen ist viel problematischer als im Fall von Großfahrzeugen. Deswegen muss die energetisch günstigere Option mit Wasserstoffspeicherung an Bord für Kleinwagen dieses Types als praktisch undurchführbar angesehen werden. In der Abbildung entspricht der Kraftstoffverbrauch dem gesamten Energiebedarf abzüglich der Verluste für Kraftstoffherstellung, -transfer und -verteilung (Kraft. P+V). Die einzelnen Positionen, in welchen der Kraftstoffverbrauch geteilt wird, werden im Text besprochen (siehe Tabelle 17).

Fig 13. Analysis of the energy demand for a commercial small car (Lupo 3L) with Diesel ICE (right-hand side, VM(Dies)) in comparison to the energy demand of the same car with fuel cell drive. The usage of space intensive systems, like fuel cell systems especially with pressurized hydrogen tanks (CH2), becomes problematical for small size cars and is not likely to be applicable. The energy for fuel production, transfer and distribution is denoted as „Kraft. P+V“. For the purpose of comparison, the fuel consumption is shown splitted up in the remaining five positions as described in Table 17.

BZ = Fuel Cell Drive ; VM = Drive with Internal Combustion Engine

Bei Hybrid-Fahrzeugen liegt es nah, bei Stillstand das Hauptaggregat (Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellenstack) abzuschalten, um Leerlaufverluste zu vermeiden. Von dieser Möglichkeit wird bei der Fahrsimulation in allen Fällen Gebrauch gemacht. Falls das Hauptaggregat lokal Schadstoffe emittiert, also ein Verbrennungsmotor ist, bietet sich die Möglichkeit an, dieses nicht nur beim Stillstand, sondern wahlweise in Restriktionsgebieten (z.B. im Stadtzentrum) ganz abzuschalten, um nur mit dem elektrischen Antrieb zu fahren. Diese Möglichkeit wird bei der Fahrsimulation genutzt, wobei natürlich überprüft werden muss, ob der Fahrzyklus dann einen autonomen Betrieb ermöglicht.

6.3.1 Hybrid-Personenkraftwagen

Bei der Darstellung des Energiebedarfs bei Hybrid-Pkw im Referenzfahrzyklus werden die Hybrid-Antriebe sowohl mit Diesel-Verbrennungsmotor (VM) wie auch mit Brennstoffzelle und gasförmigen Wasserstoff an Bord (BZ) betrachtet. Bei Hybrid-Antrieben liegt es nah, die Möglichkeit, das Batteriepuffer auch zur Bremsenergie-Rückgewinnung (BR) zu benutzen. Sie wird als Variante zusätzlich dargestellt.

In der **Abbildung 14** werden die Varianten der Hybrid-Fahrzeuge den Antrieben ohne Energiezwischenspeicherung gegenübergestellt. Die Vorteile der Hybridisierung sind leicht einzu-sehen: Das Hauptaggregat ist kleiner, arbeitet vorwiegend im optimalen Bereich und Leerlaufverluste können vermieden werden. Andererseits ist der Lade-Entlade-Zyklus der Batterie mit Verlusten behaftet und bei Bremsenergie-Rückgewinnung werden typischerweise nur 37 % der Bremsenergie zurückgewonnen. Im Endeffekt ist die Hybridisierung des Antriebes in allen Fällen energetisch lohnend.

Dennoch ist der Gewinn im Falle der Brennstoffzellen nicht sehr bedeutend, was zum Teil auch erklärt, warum für die meisten Prototypen mit Brennstoffzellen-Antrieb (z.B. die Necar-Serie von Daimler-Chrysler) kein Batteriepuffer als für erforderlich gehalten wird. Der Grund ist, dass das elektrische System mit Brennstoffzelle ohnehin sehr effizient ist. Die Übernahme eines Teiles des Betriebes dieser Komponente durch den Hilfsenergiespeicher im Falle von erhöhtem Leistungsbedarf bietet keine klaren energetischen Vorteile, weil der Lade-Entlade Zyklus der Batterie mit wesentlichen Verlusten behaftet ist.

Der eigentliche Gewinner bei Hybrid-Ausführung ist der Verbrennungsmotor: Mit Bremsenergie-Rückgewinnung in der Hybrid-Version kann der Kraftstoffverbrauch um ca. 20 % gesenkt werden im Vergleich zum Referenzfahrzeug (nur mit Verbrennungsmotor), wodurch sich ein bedeutend niedrigerer Energiebedarf als bei den Brennstoffzellen-Fahrzeugen ergibt. Zudem kann dieses Hybridfahrzeug teilweise abgasfrei, also nur elektrisch, in Stadtgebieten fahren (autonom: ca. 15 % des Referenzfahrzyklus).

Die Erklärung ist aus den einzelnen Positionen der Säulendiagramme abzulesen: Durch den kleineren, besser ausgenutzten, Verbrennungsmotor werden die Prozessverluste bedeutend vermindert. Die Verluste durch Drosselung/Reibung werden prozentual noch stärker vermindert, weil sie besonders beim Leerlauf stark ins Gewicht fallen. Die Verluste des elektrischen Antriebstranges machen sich bemerkbar durch die Erhöhung der Transmissions- und Regelungsverluste: sie sind hauptsächlich auf die Verluste des Batterie-„round-trip“ zurückzu-

führen, da sich die Verluste des Elektromotors im Mittel nicht sehr von den Verlusten der normalen (mechanischen) Transmission unterscheiden.

Die Resultate sind weitgehend davon unabhängig, ob der Hochgeschwindigkeits -Teil des Referenzfahrzyklus mit einbezogen wird. In der **Abbildung 15** sind die Resultate für den neuen Europäischen Fahrzyklus NEFZ gezeigt. An dem gesamten spezifischen Energiebedarf ändert sich wenig, auch die Verhältnisse der Alternativen zueinander bleiben im wesentlichen unverändert. Interessant ist jedoch die Änderung der Verteilung des Kraftstoffverbrauchs in einzelnen Positionen: Der Verbrennungsmotor wird weniger in Anspruch genommen, da keine hohen Leistungsspitzen wie bei der Autobahnfahrt verlangt werden. Er arbeitet vorwiegend im optimalen Bereich, nur um den Hilfsenergiespeicher in geeigneten Zeitabschnitten zu laden. Dieser Vorteil (niedrigere „Prozess-Verluste“) wird aber durch die öftere Anspruchnahme des Elektroantriebes und Erhöhung der Verluste der elektrischen Transmission (also der Verluste des Elektromotors *und* des Lade-Entlade-Zyklus der Batterie) weitgehend aufgehoben.

In diesem Fahrzyklus (NEFZ) sind allerdings die Vorteile beider Hybrid-Ausführungen (Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle) *mit* Bremsenergie-Rückgewinnung höher als beim Referenzfahrzyklus, weil hier der Anteil der Bremsverluste an der Fahrtenergie im Vergleich zu den Luft- und Rollwiderstandsverlusten bedeutend höher ist und die Rückgewinnung lohnender wird.

6.3.2 Hybrid-Busse

In der **Abbildung 16** werden die Varianten eines Hybrid-Busses den Antrieben ohne Energiezwischenspeicherung gegenübergestellt. Betrachtet werden Antriebe sowohl mit Diesel-Verbrennungsmotor (VM) wie auch mit Brennstoffzelle und gasförmigen Wasserstoff an Bord (BZ) für einen Bus mit einer Masse ohne Antrieb (ZEM) von 6800 kg und eine Nutzlast von 3000 kg. Eine Motorisierung von 23 kW pro Tonne Fahrgewicht ist ausreichend für den Busbetrieb im Rahmen des NEFZ, was für den Basisfall (Bus mit Dieselmotor, Testgewicht 11,1 Tonnen) einer Motorleistung von ca. 255 kW bedeutet.

Die in der Abbildung 16 gezeigten Verhältnisse für das im Vergleich zum Pkw viel schwerere Fahrzeug sind qualitativ ähnlich wie in der Abbildung 15 für Pkw. Der wesentliche Unterschied ist der Folgende: Die Hybridisierung von Bussen ist *ohne* Bremsenergie-Rückgewinnung kaum lohnend. Dies ist typisch für Fahrzeuge mit relativ niedriger Motorisierung im Vergleich zum Pkw, welcher nicht nur innerhalb vom NEFZ, sondern auch für die Autobahnfahrt bei Steigung und Beschleunigung noch Leistungsreserven besitzen muss. Busse sind mit der Leistung des Hauptaggregats (Motor, Brennstoffzelle) eng an die Fahrverhältnisse im Stadtkern und Stadtgebiet angepaßt, so dass der anschließende „Ersatz“ durch kleinere Aggregate bei Hybridisierung keine eindeutigen energetischen Vorteile bringt. Erst durch die Bremsenergie-Rückgewinnung (BR) wird speziell für Busse die Hybridisierung lohnend, weil im Busbetrieb, besonders im Stadtgebiet der Anteil der Bremsenergie bei den Fahrverlusten bedeutend ist.

Die Darstellung der Resultate für Busse in den nächsten Abbildungen entsprechen der Art der Darstellung für Pkw in den Abbildungen 10 und 11.

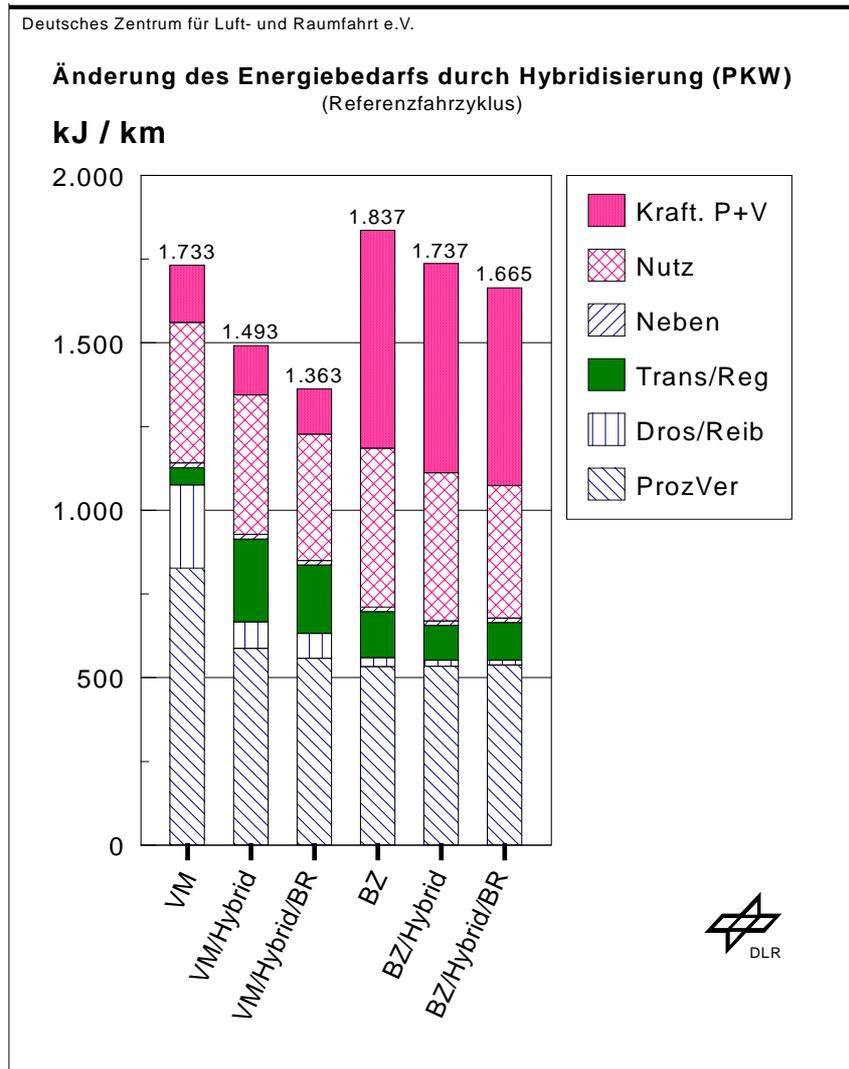


Abb. 14. Änderung des Energiebedarfs des Referenzfahrzeuges durch Hybridisierung bei verschiedenen Antriebsarten. In der normalen Ausführung besitzt das Fahrzeug einen Dieselmotor (VM) oder einen Antrieb mit Brennstoffzelle ohne Batteriepuffer (BZ) mit Druckwasserstoff als Kraftstoff. Die Hybride mit Verbrennungsmotor profitieren durch den optimalen Motorbetrieb und die Verminderung vor allem der Drosselungs- und Leerlaufverluste. Bei den Systemen mit Brennstoffzellenantrieb ist der Vorteil der Hybrid Ausführungen nicht so bedeutend, weil der alternative Weg über den Batteriepuffer nicht effizienter ist als der direkte Betrieb der ohnehin hocheffizienten Brennstoffzelle. Der Einsatz der Bremsenergieerückgewinnung (BR) vermindert im hier betrachteten Referenzfahrzyklus die benötigte Nutzleistung („Nutz“) merklich, aber weniger als beim NEFZ (Abb. 15). Die einzelnen Positionen, in welchen der Energiebedarf geteilt gezeigt wird, werden im Text besprochen (siehe Tabelle 17).

Fig. 14. Change in energy demand by using hybrid drives for the reference car in comparison to the basis concepts with Diesel motor (VM) or fuel cell system (BZ) with high pressure hydrogen tank. Hybrid system with ICE benefits by the optimal usage of the engine, which permits to avoid losses, i.e. mainly throttle and idling losses. The benefit is lower in the case of fuel cell systems, since the battery round trip is not much more efficient than the operation of the fuel cell stack itself. Recovery of brake energy (BR) in the hybrids reduces the required drive energy depending on the drive cycle. For the considered reference drive cycle with freeway driving part, the benefit is lower than that shown in Fig. 15. For the purpose of comparison, the energy demand is shown splitted up in several parts as described in Table 17.

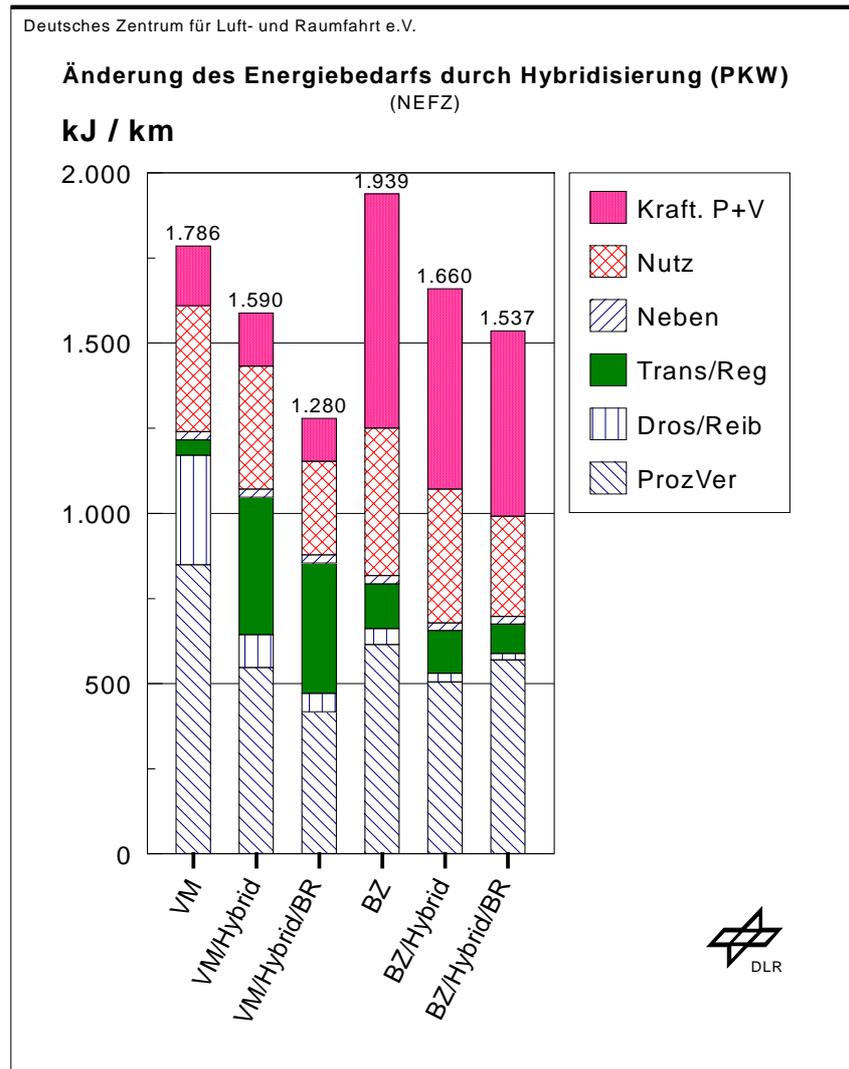


Abb. 15. Gleiches Fahrzeug und gleiche alternative Antriebsarten wie im Bild 14, jedoch für den neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), wo Vollastbetrieb des Antriebes bei der Autobahnfahrt nicht einbezogen wird. Der Kraftstoffverbrauch und der gesamte Energiebedarf sind nicht sehr verschieden im Vergleich zum Referenzfahrzyklus, der Einsatz der Bremsenergieückgewinnung (BR) ist jedoch lohnender als beim Referenzfahrzyklus. Interessant ist, dass bei Hybriden mit Verbrennungsmotor (VM) der prozentuale Anteil der Verluste der Transmission („Trans/Reg“), welche hauptsächlich dem elektrischen Strang (Elektromotor, Batterie) zuzuordnen sind, im vorliegenden Fall deutlich höher wird: Der Verbrennungsmotor arbeitet zwar optimal, was durch den kleineren Anteil seiner Verluste („ProzVer“ und „Dros/Reib“) zu erkennen ist, die Transmission über den Elektromotor und den Batteriepuffer ist aber aufwendig im Vergleich zur (mechanischen) Transmission beim direkten Antrieb über den Verbrennungsmotor (z.B. bei Vollast).

Fig. 15. Results for the same vehicle and drive alternatives as in Fig. 14, but for the new European drive cycle (NEFZ), where full load demand at freeway speeds is not included. Specific fuel consumption and total energy demand are not very different, but the usage of brake energy recovery (BR) is here more favourable. It is of interest to notice the higher transmission losses („Trans/Reg“) of the ICE-hybrids, which in this case are associated with the electric system (electric motor, battery). The IC engine works optimally, as can be seen from its lower losses („ProzVer“ und „Dros/Reib“), but the drive by means of electric motor and battery round trip is not as efficient as the direct mechanical transmission from the engine at full load conditions. See Table 17 explaining abbreviations in the legend.

BZ = Fuel Cell Drive ; VM = Drive with Internal Combustion Engine

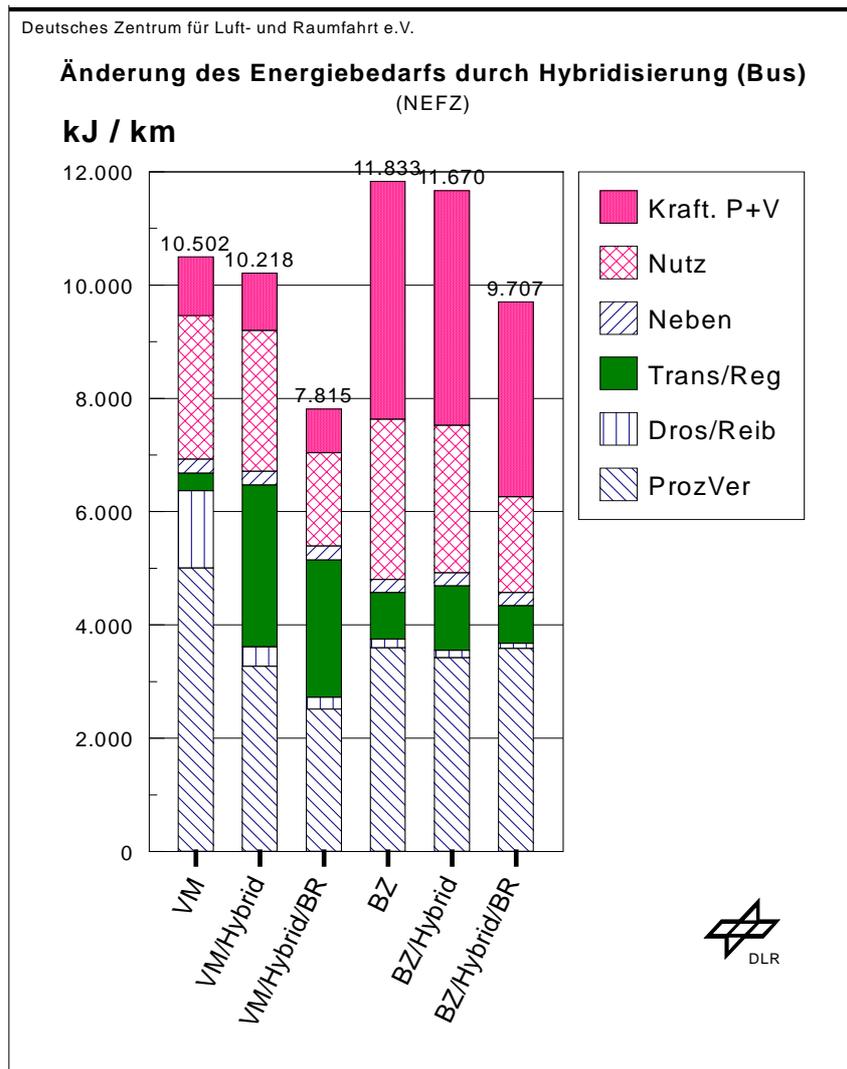


Abb. 16. Änderung des Energiebedarfs eines Busses durch Hybridisierung bei verschiedenen Antriebsarten und Fahrt nach dem neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ). In der normalen Ausführung besitzt das Fahrzeug einen Dieselmotor (VM) oder einen Antrieb mit Brennstoffzelle ohne Batteriepuffer (BZ) mit Druckwasserstoff als Kraftstoff. Die Verhältnisse (bei Änderung der Skala entsprechend dem höheren Verbrauch des Busses) ähneln denen der Abbildung 15 für Pkw im gleichen Fahrzyklus. Dennoch ist bei den Verhältnissen eines Nutzfahrzeuges ein Unterschied von Bedeutung: Die Hybridisierung ist erst dann deutlich lohnend, wenn sie mit Bremsenergie-Rückgewinnung (BR) kombiniert wird. Die einzelnen Positionen, in welchen der Energiebedarf geteilt gezeigt wird, werden im Text besprochen (siehe Tabelle 17).

Fig. 16. Change in energy demand by using hybrid drives in buses as compared to the basis concepts with Diesel motor (VM) or fuel cell system (BZ) with high pressure hydrogen tank. Results are shown for the new European drive cycle (NEFZ) as in Fig. 15. The results are very similar to those of the Fig.15, apart from the different scale accounting for the higher energy demand for driving the bus. However, there is an important difference: In the case of a bus (or more general, in most cases of heavy duty vehicle usage) the hybrid concepts are clearly advantageous, only if recovery of brake energy is used in the system. For the purpose of comparison, the energy demand is shown splitted up in several parts as described in Table 17.

In der **Abbildung 17** wird der Kraftstoffverbrauch der Alternativen dem Primärenergiebedarf gegenübergestellt, wobei noch die Anwendung eines Erdgasmotors als Alternative zum Dieselmotor in einem Hybrid-Bus mit Bremsenergie-Rückgewinnung betrachtet wurde. Solche erdgasbetriebenen Busse sind weltweit in Erprobung bzw. in Betrieb, wobei der Druckspeicher für Erdgas, ähnlich wie der Druckspeicher für Wasserstoff bei Brennstoffzellenantrieb vorzugsweise im Dachbereich des Busses untergebracht wird. Der Verbrauch des Hybrides mit erdgasbetriebenem Ottomotor ist höher als bei der entsprechenden Ausführung mit Dieselantrieb, der Vorteil liegt hier in der Reduzierung der Emissionen durch Anwendung von Erdgas anstelle von Diesel-Kraftstoff.

In der **Abbildung 18** werden die globalen oder regional wirksamen Emissionen für die betrachteten Alternativen dargestellt. Obwohl die Alternativen mit Dieselmotor energetisch günstiger sind (Abbildung 17), sind sie wegen des hohen Kohlenstoffinhaltes und der Verbrennungstemperatur des Dieselmotors ungünstiger im Bezug auf die Emissionen. Die erdgasbetriebenen Alternativen mit Verbrennungsmotor sind, wie der Vergleich des in der Abbildung 17 und 18 gezeigten Hybrides zeigt, durchaus vergleichbar mit dem entsprechenden Hybrid mit Brennstoffzellenantrieb. Als grundsätzlicher Vorteil des Brennstoffantriebes verbleibt die lokale Emissionsfreiheit. Bei Anwendung von Verbrennungsmotoren müssen die lokal erzeugten Schadstoffe mit Katalysatoren vermindert werden, oder bei Hybrid-Ausführungen deren Emission in Restriktionsgebieten durch Nutzung des Elektroantriebes und Abschaltung des Motors vermieden werden. Für die Resultate der Abbildungen 17 und 18 wurde als Restriktionsgebiet der Stadtkern (entsprechend einer Strecke von ca. 15 % der Gesamtlänge des NEFZ) vorausgesetzt.

7. Die Vorteile des elektrischen Antriebes in zukünftigen Systemen mit nichtfossiler Primärenergieversorgung: Der Verbrennungsmotor gerät in Bedrängnis

In den Kapiteln 4, 5 und 6 wurden Fälle mit Kraftstoffen fossilen Ursprungs untersucht.

Unabhängig davon, wie lange die fossilen Energiereserven ausreichend vorhanden sein werden, sind sie erschöpflich. Einerseits ist die Reichweite der möglichen Ressourcen (besonders wenn auch Methanhydrate aus den Weltmeeren einbezogen werden) so lang, dass sich daraus kein zwingender Handlungsbedarf ableiten lässt. Andererseits dürfte sich die Ära der preiswerten fossilen Energieversorgung ihrem Ende zuneigen, woraus sich eine Konvergenz der Kosten der Energie aus erschöpflichen und unerschöpflichen (regenerativen) Ressourcen ableiten lässt. Dazu kommt die Erkenntnis, dass der weitere Verbrauch der fossilen Energieträger zu einer kritischen Belastung der Atmosphäre mit anthropogen erzeugten Klimagasen führt, die trotz ihrer ungewissen konkreten Wirkungen nicht ungefährliche Klimaeinflüsse hervorrufen kann.

Aus diesen Gründen resultiert die Notwendigkeit, die Nutzung regenerativer Energiequellen zu fördern, wobei u.a. das Ziel der Ersatz der fossilen Kraftstoffe durch regenerative Energieträger sein soll. Unabhängig vom Zeitrahmen, müssen daher bei den Betrachtungen der zukünftigen Antriebsarten für Kraftfahrzeuge die regenerativen Energieträger als Kraftstoffe der Zukunft beachtet werden.

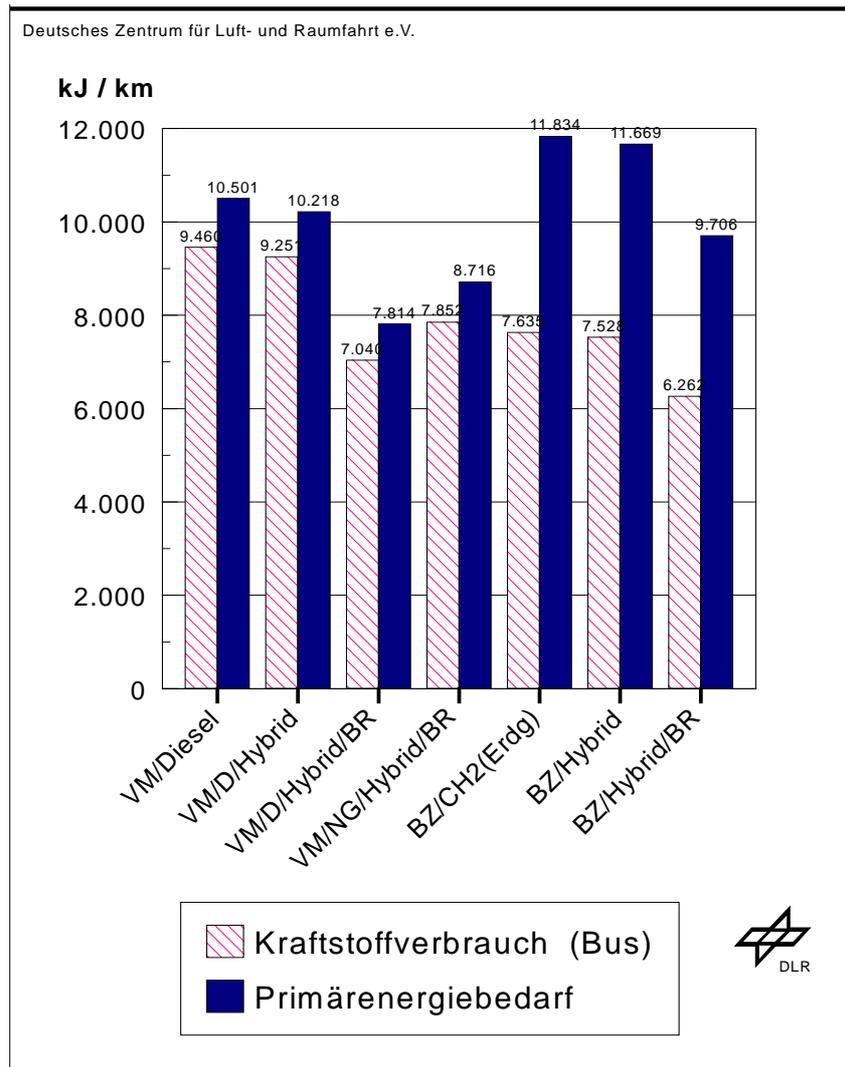


Abb. 17. Vergleich des Kraftstoffverbrauchs und des Primärenergiebedarfes eines Busses im Rahmen der gegenwärtigen Energieversorgung fossilen Ursprungs. Betrachtet werden die relevanten Antriebskonzepte mit Dieselmotorkraftstoff (D), Erdgas und mit aus Erdgas abgeleitetem Druckwasserstoff (CH₂). Zusätzlich zu den Antriebskonzepten mit Verbrennungsmotor (VM) oder Brennstoffzellenantrieben (BZ) werden auch entsprechende autonome Hybridausführungen ohne bzw. mit Bremsenergie-Rückgewinnung (BR) betrachtet. Energetische Vorteile durch die Anwendung von Hybridsystemen für Busse sind in praktisch gleichem Maß durch Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellensysteme zu erreichen.

Fig. 17. Comparison of the fuel consumption (left bar) and of the primary energy demand of buses within the energy system using fuels from fossil resources. The relevant drive systems fueled with Diesel oil (D), natural gas (NG) and compressed hydrogen (CH₂) from natural gas on board are presented. In addition to drives with IC-engines (VM) and fuel cells (BZ) also autonomous hybrids of both, without or with recovery of brake energy (BR) are considered. The benefits of using hybrid systems is similar in both cases with IC engines or fuel cell drives, but there are no primary energy savings by using fuel cell instead of IC engines in hybrid systems for buses.

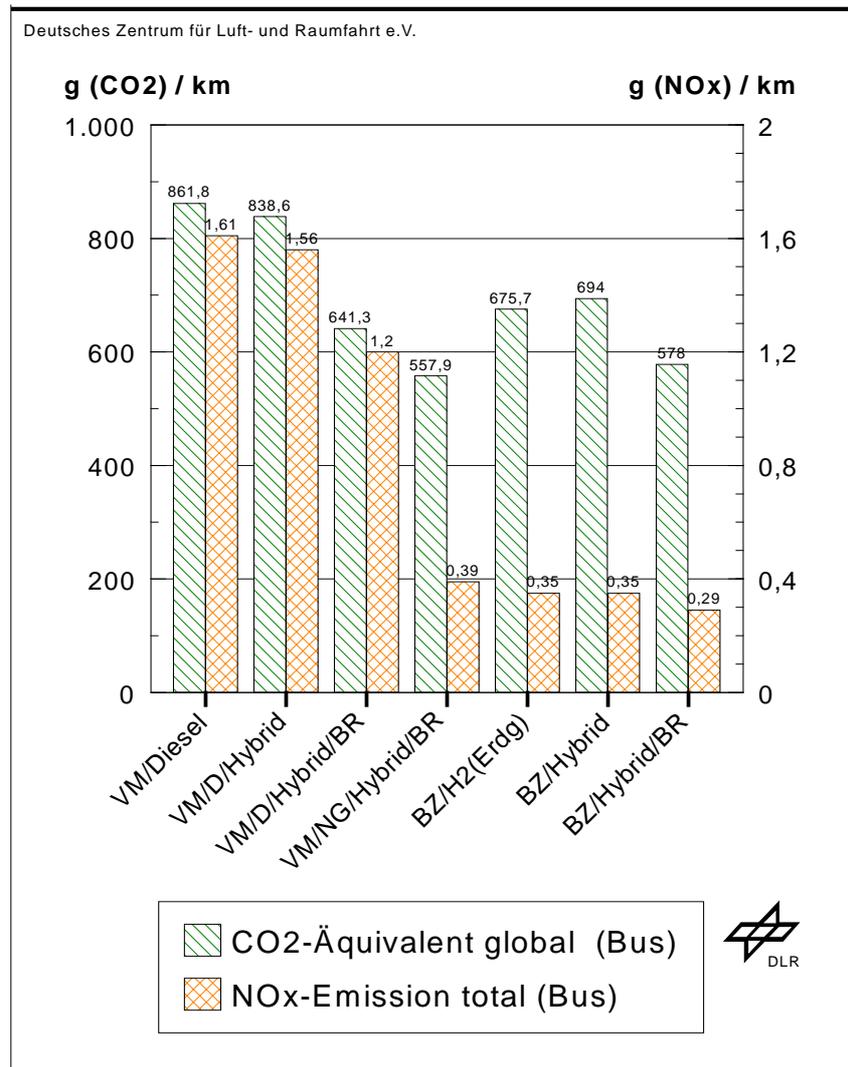


Abb. 18. Vergleich der globalen Treibhausemissionen und der globalen NO_x-Emission eines Busses im Rahmen der gegenwärtigen Energieversorgung fossilen Ursprungs. Betrachtet werden die relevanten Antriebskonzepte mit Dieselloil (D), Erdgas (NG) und mit aus Erdgas abgeleitetem Druckwasserstoff (CH₂). Zusätzlich zu den Antriebskonzepten mit Verbrennungsmotor (VM) oder Brennstoffzellenantrieben (BZ) werden auch entsprechende autonome Hybridausführungen ohne bzw. mit Bremsenergie-Rückgewinnung (BR) betrachtet. Das globale Emissionsniveau, welches mit Brennstoffzellenantrieben erreicht werden kann, ist vergleichbar mit dem eines Hybridbusses mit erdgasbetriebenem Verbrennungsmotor und Bremsenergie-Rückgewinnung.

Fig. 18. Comparison of the global greenhouse emissions (left bar and scale) and of the global NO_x-emission of a bus within the energy system using fuels from fossil resources. Presented are the relevant drive systems fueled with Diesel oil (D), natural gas (NG) and compressed hydrogen (CH₂) from natural gas on board. In addition to drives with IC-engines (VM) and fuel cells (BZ) also autonomous hybrids of both, without or with recovery of brake energy (BR), are considered. A low global emission level can be achieved with fuel cell drives, but practically the same results are obtained with hybrid bus drive using brake energy recovery and IC engine fueled with natural gas.

Welche sind diese Kraftstoffe? Mit Ausnahme der aus nachwachsenden Rohstoffen oder aus Biomasse herstellbaren Kraftstoffe, von welchen später noch die Rede sein wird, steht an der Spitze der Umwandlungskette der Kraftstofferzeugung aus unerschöpflichen Ressourcen die Elektrizität als Sekundärenergieträger. Wenn man den Begriff der zukünftigen Energieversorgung auf „nichtfossil“ im Sinne des Kohlenstoffes begrenzt, d.h. einen Anteil an Kernenergie beibehält, so steht auch in diesem Fall als erster Sekundärenergieträger die Elektrizität zu Verfügung. Sie ist als „Kraftstoff“ für Batteriefahrzeuge unmittelbar einsetzbar, wobei aber Abstriche in der gewohnten „Reichweite“ des Fahrzeuges in Kauf genommen werden müssen. Aus regenerativer Elektrizität im Rahmen einer „Wasserstoffwirtschaft“ erzeugter Wasserstoff kann, wenn man von Speicherproblemen an Bord absieht, als der ideale Kraftstoff der Zukunft angesehen werden. Das Attribut „ideal“ kann leider den Fahrzeugtank (Druckgasspeicher oder kryogener Tank) in diesem Fall nicht einschließen! Es sollte daher die technische Möglichkeit, einen problemlos speicherbaren kohlenhaltigen Kraftstoff, z.B. Methanol, aus regenerativen Elektrizität zu produzieren nicht außer Acht gelassen werden. Dabei soll bei der Methanolerzeugung CO₂ aus der Atmosphäre genutzt werden, so dass der ganze Prozess CO₂-neutral ist. Dieser Prozess ist zwar aufwendig, aber als zukünftige Alternative durchaus möglich und interessant.

Die Bereitstellung dieser regenerativen Energieträger (Elektrizität, Wasserstoff, Methanol) wird mit dem Ziel der Schonung der fossilen Energiereserven und der Vermeidung des CO₂-Problems erfolgen und einen gemeinsamen Punkt in der Energiekette, die Elektrizitätserzeugung, haben.

Dies hat wichtige Konsequenzen für die weiteren Betrachtungen dieses Kapitels:

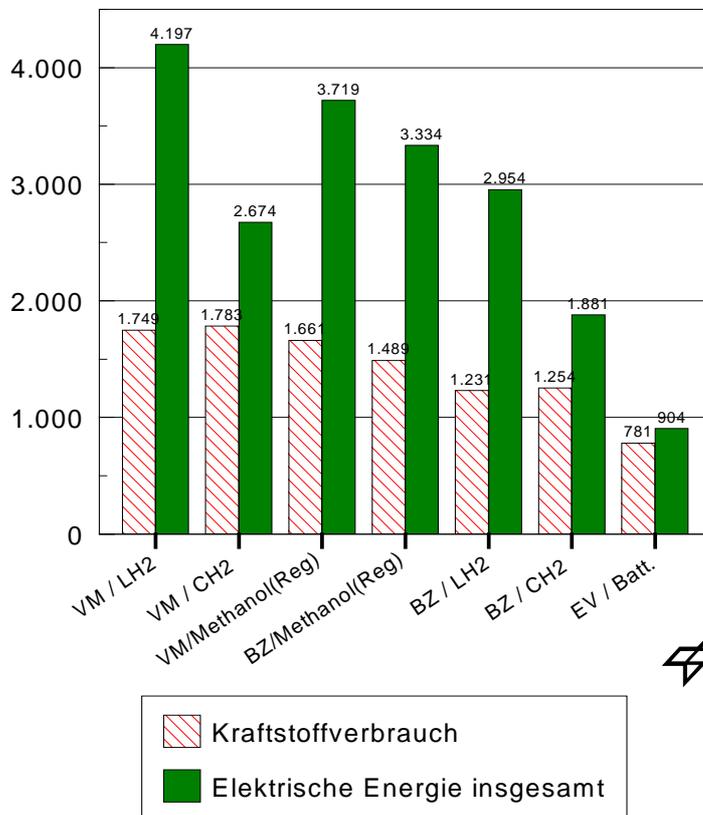
Die bei fossilen Kraftstoffen so wichtige Betrachtung der globalen klimawirksamen Emissionen kann hier entfallen. Ferner ist die Betrachtung des Primärenergieaufwandes von wenig Interesse, weil eine Betrachtung der einzelnen sehr verschiedenartigen Energieketten (wie Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, solarthermische Kraftwerke, etc.) eine Verzettelung der Aussagen ohne tiefere Bedeutung für den Vergleich von Antriebsalternativen mit sich bringen würde.

Es wird daher für die Vergleiche der Antriebsalternativen der Bedarf an elektrischer Energie unabhängig von ihrer Ursprung (ob aus Solaranlagen, Wind- und Wasserkraft, Kernenergie, etc.) als Maßstab definiert: Diejenige Alternative, welche den niedrigsten Elektrizitätsbedarf aufweisen kann, ist energetisch (und evtl. auch im Bezug auf *Kraftstoffkosten*) die günstigste.

In der **Abbildung 19** werden die Antriebsalternativen unter diesem Aspekt miteinander verglichen. Es ist nicht überraschend, dass ein Batteriefahrzeug hier besonders günstig erscheint. Sein „Kraftstoff“ ist direkt die nichtfossile Elektrizität, aus welcher auch Wasserstoff oder Methanol für die anderen Alternativen hergestellt wird. Ihre „direkte“ Nutzung ist aber mit den schon erwähnten Problemen der Batteriespeicherung verbunden (im gezeigten Fall beträgt die Reichweite maximal ca. 220 km).

Energieaufwand / Elektrizität aus nichtfossiler Primärenergie
(Elektrizität aus Solaranlagen, Wind- und Wasserkraft oder Kernenergie)

kJ / km



Reichweite des Batteriefahrzeuges 175-220 km je nach Streckenart

Abb. 19. Kraftstoffverbrauch und Bedarf an elektrischer Energie verschiedener Antriebskonzepte bei nichtfossiler Energieversorgung. Im Rahmen eines zukünftigen nichtfossilen Energieversorgungssystems wird die Primärenergie (Solar-, Wasser-, Wind-, Kernenergie) sekundär in Form von elektrischer Energie zur Verfügung stehen. Der Bezug auf elektrische Energie erlaubt den Vergleich der Antriebskonzepte, welche elektrolytischen Wasserstoff (GH₂ oder LH₂), Methanol (hergestellt durch Nutzung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes, „regeneratives Methanol“) oder direkt Elektrizität nutzen, ohne die „Art“ der Primärenergiequelle spezifizieren zu müssen. In diesem Energiesystem sind die Vorteile der Brennstoffzellenantriebe besonders deutlich, weil sie niedrigen Energiebedarf ohne die bekannten Nachteile der Batteriespeicher an Bord aufweisen können.

Fig 19. Fuel consumption and demand of electrical energy for different drive systems with future energy supply from non-fossil primary energy. In this case electrical energy from solar, water, wind, or nuclear energy will be available for the transportation sector. Electricity consumption can be in this case the basis of comparison for drive systems using different drives with IC engine (VM) or fuel cells (BZ) and different fuels on board, like electrolytic hydrogen (gaseous H₂ or LH₂), methanol (produced with extraction of CO₂ from the atmosphere, i.e. „regenerative methanol“), or simply electricity stored on board (EV with battery storage). In this energy system the energetic advantage of the fuel cell drives becomes unambiguous, since they combine low energy demand with manageable fuel storage on board for acceptable vehicle range.

Aus der Abbildung ist auch zu ersehen, dass die Alternativen, welche keine Druckspeicherung an Bord für Wasserstoff, also flüssigen Kraftstoff benutzen, einen höheren Energiebedarf aufweisen.

Die Vorteile der Brennstoffzellenantriebe gegenüber den Antrieben mit Verbrennungsmotor werden im Rahmen einer nichtfossilen Energieversorgung eindeutig. Der Grund ist, dass in diesem System die Verfügbarkeit eines Kraftstoffes vorausgesetzt wird und auf diesen Kraftstoff Fahrzeuge mit verschiedenen Antriebssystemen zugreifen können. Die Antwort auf die Frage, welche der Alternativen bei gleichem Kraftstoff energetisch günstiger ist, reduziert sich auf den Vergleich des *Kraftstoffverbrauchs*.

Schon bei den Betrachtungen der Kapitel 4 und 5 wurde festgestellt, dass für die Brennstoffzellenantriebe der Zukunft mit einem niedrigeren *Kraftstoffverbrauch* zu rechnen sei. Dieser Vorteil wurde jedoch durch die für die Bereitstellung des für Brennstoffzellen geeigneten Kraftstoffes aus fossilen Energien (Erdöl, Erdgas) notwendige zusätzliche Reformierungsschritte zunichte gemacht. Die Situation im vorliegenden Fall ist jedoch anders: Den Alternativen Verbrennungsmotor- oder Brennstoffzellenantrieb steht der gleiche Kraftstoff zu Verfügung und der Vorteil des niedrigeren Kraftstoffverbrauchs (vom Tank bis Rad) ist gleichbedeutend mit niedrigerem Gesamtenergiebedarf.

Methanol kann, wie schon erwähnt, auch aus nachwachsenden Rohstoffen bzw. aus Biomasse erzeugt werden, wobei auch in diesem Fall Sonnenenergie als Primärenergie beteiligt ist. Dieser Kraftstoff wurde bei den Alternativen der Abbildung 19 nicht miteinbezogen, da hier ein Bezug auf Solarelektrizität nicht zutrifft. Der Vergleich der Alternativen zur Nutzung von Bio-Methanol (oder auch „Biodiesel“) kann einfach auf der Basis des Kraftstoffverbrauchs (unabhängig der vorgelagerten Herstellungskette) stattfinden. Hier ist die Nutzung von Biokraftstoffen in Brennstoffzellenantrieben a priori im Vorteil, da mit den im vorliegenden Bericht unterstellten Annahmen (Zeithorizont 2005) der Kraftstoffverbrauch bei Brennstoffzellenantrieben trotz der Methanolreformierung an Bord niedriger im Vergleich zu der Nutzung in Verbrennungsmotoren ist.

In der **Abbildung 20** werden typische Werte für den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen gezeigt, welche im Fall der Nutzung von Methanol aus nachwachsenden Rohstoffen mit Verbrennungsmotor- bzw. Brennstoffzellenantrieb zu erwarten sind.

Die Ausführungen dieses Kapitels führen zur Erkenntnis, dass die Konkurrenzfähigkeit der Brennstoffzellenantriebe gegenüber dem Verbrennungsmotor innerhalb der zukünftigen Systeme mit regenerativer Energieversorgung höher ist als bei der gegenwärtigen Energieversorgung mit fossilen Primärenergien. In diesem Fall steht eine begrenzte Anzahl von Kraftstoffen zu Verfügung, auf welche beide Alternativen zugreifen können, wobei die Speicherprobleme an Bord beider Alternativen gemeinsam sind. Daher avanciert sich der niedrigere Kraftstoffverbrauch zum wichtigsten Kriterium, was zugunsten der Brennstoffzellenantriebe spricht.

**Methanol aus Biomasse:
Kraftstoffverbrauch und Emission (bilanziert)**

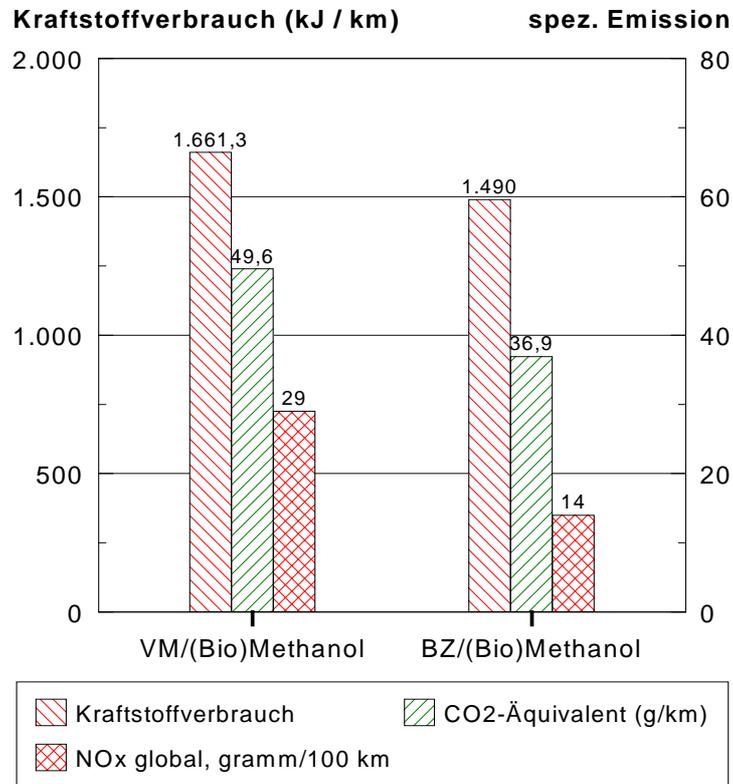


Abb. 20. Im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung wird die Bereitstellung von Methanol aus Biomasse von Bedeutung sein. Die Abbildung zeigt den Kraftstoffverbrauch bei Nutzung bei Fahrzeugantrieben mit Verbrennungsmotor (VM) oder Brennstoffzellen (BZ). Die bilanzierten globalen Treibhausgasemissionen berücksichtigen die CO₂-Rückgewinnung durch die Biomasse. Die Emissionswerte ergeben sich unter der Annahme der Nutzung von fossilen Kraftstoffen im Produktions- und Verteilungsprozess. Die NO_x-Emission auf der rechten Skala wird in Gramm pro 100 km angegeben, die Emission an Treibhausgasen in Gramm pro km. Die Nutzung dieses Kraftstoffes mit Brennstoffzellenantrieben (BZ) weist deutliche Vorteile gegenüber der Nutzung mit Verbrennungsmotoren (VM) auf.

Fig. 20. Usage of methanol from biomass (biomethanol) is expected to be of importance in the future. The figure shows the fuel consumption for drive system with IC engine (VM) or fuel cells (BZ). The global emissions of greenhouse gases and NO_x (right hand scale) are balanced values taking into account CO₂ recovery from the crop and assuming usage of fossil fuel during the production and delivery process. Note that the NO_x values are given in grams per 100 km. The results show that usage of methanol from biomass in drive systems with fuel cells, instead of IC engine, could be clearly advantageous both from the energy and emission point of view.

Andererseits ist der Verbrennungsmotor mit Wasserstoff als Kraftstoff im Hinblick auf Emissionen nicht minder umweltfreundlich als der Brennstoffzellenantrieb. Zwar emittiert der Wasserstoffmotor neben Wasserdampf auch Stickoxide, aber im Vergleich zu herkömmlichen Benzinmotoren in erheblich geringeren, durch das Motormanagement (Wasserstoffeinspritzung) steuerbaren Mengen. Weitere motorische Maßnahmen und die Anwendung gesteuerter NO_x-Speicherkatalysatoren (vgl. Anwendung der Motronik MED 7 von Bosch im Lupo) können die Bedeutung der Emissionen des Wasserstoffmotors als Vergleichskriterium eliminieren [Aceves et al. 1996], [Aceves et al., 1997].

Der oben festgestellte Verbrauchsvorteil der Brennstoffzelle ist als Vorteil im Bezug auf die Betriebskosten anzusehen. Es liegt nah, die Konkurrenzfähigkeit der Alternativen speziell im zukünftigen CO₂-neutralen Energiesystem mit Wasserstoffversorgung auf der Basis des Vergleiches der spezifischen Kosten zu formulieren. Dazu werden Angaben zu den Kosten der Antriebssysteme notwendig. Kostenberechnungen bzw. Voraussagen sind nicht das Ziel des vorliegenden Berichtes, man kann aber aufgrund einiger Grenzfall-Betrachtungen zu einer ersten Beurteilung der Kostensituation kommen (siehe auch Abschnitt 8.1).

Im Grenzfall („benchmark“) können die Kosten eines Fahrzeuges mit Brennstoffzellenantrieb die Kosten der herkömmlichen Antriebe mit Verbrennungsmotor kaum erreichen. Auch bei optimistischen Projektionen bei Massenproduktion von Brennstoffzellenstacks liegen die Kosten in der Nähe der Kosten des herkömmlichen Antriebes inkl. Transmission. Dazu kommen aber die Kosten des elektrischen Motors. Die spezifischen Kosten betragen auch bei üblichen Elektromotoren mindestens 1/3 der spezifischen Kosten von Verbrennungsmotoren. Die mit höherem Materialaufwand erzielbaren Wirkungsgradverbesserungen der Elektromotoren, welche hier vorausgesetzt wurden, sind mit beträchtlichen Mehrkosten verbunden [Auinger et al., 1980], [Gutt et al., 1998]. Im Resultat zeigen auch optimistische Projektionen und Betrachtungen, dass auch bei zukünftigen Brennstoffzellenantrieben die Fahrzeugkosten um mindestens 25-35 % höher sein werden.

Als Resultat dieser Betrachtungen kann der Schluss gezogen werden, dass in einem regenerativen Energieversorgungssystem die Konkurrenz zwischen Brennstoffzellenantrieben und Antrieben mit Verbrennungsmotor hauptsächlich auf dem Gebiet der spezifischen Kosten pro km bestehen wird, wobei die Brennstoffzellenantriebe durch niedrigere Kraftstoffkosten und höhere Fahrzeugkosten gekennzeichnet sein werden.

8. Eine Erweiterung der Betrachtungen in den Bereich des Kostenvergleichs und der Punktbewertung

Aus den Betrachtungen der vorigen Abschnitte wurde Folgendes deutlich:

- Weil im Rahmen des gegenwärtigen Energieversorgungssystems mit Kraftstoffen fossilen Ursprungs keine deutlichen energetischen Vorteile der Brennstoffzellenantriebe möglich erscheinen, gewinnt als Kriterium die lokale Emission von Schadstoffen an Bedeutung. Eine Quantifizierung dieses Faktors ist nur möglich, wenn man die Gesamtkosten (volkswirtschaftliche Kosten) des Fahrzeuges unter Einbeziehung der von der Gesellschaft zu tragenden „externen“ Kosten in die Betrachtung einbezieht.

- Im Rahmen der zukünftigen Energieversorgung mit regenerativen Kraftstoffen sind vorwiegend die (betriebswirtschaftlichen) Privatkosten (die Summe der Kapitalkosten, der Unterhaltungskosten und die durch den Kraftstoffverbrauch entstehenden Kosten) zu vergleichen, da die externen Kosten in diesem umweltfreundlichen Szenario weitgehend vernachlässigbar werden.

Die ungefähre Quantifizierung dieser Kosten ist aus den in der Literatur angegebenen Kosten möglich, welche speziell für die Brennstoffzellen mehrfach als Zielkosten (cost targets) oder minimale Werte bei Massenproduktion („benchmarks“) in der Literatur abgeschätzt wurden. Der Versuch der Quantifizierung wird im folgenden Abschnitt 8.1 dieses Kapitels erfolgen.

Der darauf folgende Versuch einer Bewertung mittels einer Punktbewertung beinhaltet unweigerlich eine subjektive Komponente. Trotzdem ist die Punktbewertung in der Literatur nicht unüblich und ist dann sinnvoll und brauchbar, wenn das Bewertungsverfahren transparent und nachvollziehbar ist. Beim Versuch, eine bereits veröffentlichte Punktetabelle sinnvoll zu überarbeiten, entstand das hier weiter unten im Abschnitt 8.2 gezeigte Resultat.

8.1 Einige Betrachtungen zur Kostensituation

Die Betrachtungen dieses Abschnittes haben nicht zum Ziel, Kostenvoraussagen für einen bestimmten Zeitpunkt zu ermitteln, sondern die auf eine gemeinsame und plausible Basis gestellten Kostenpositionen als Vergleichskriterium bei einer ganzheitlichen Bilanzierung der Alternativen heranzuziehen. Voraussetzung ist, dass die Schädlichkeit der Emissionen auch monetär abgeschätzt werden kann. Die monetären Angaben haben dann sogar einen Vorteil gegenüber der Betrachtung der globalen Werte für Primärenergieverbrauch und Emissionen. Letztere müssen getrennt dargestellt werden, wobei die Bewertung und Gewichtung schwierig ist. Obwohl die monetären Angaben allgemein unsicherer sind, besitzen sie als eine gemeinsame Basis die Gesamtkosten unter Einbeziehung der externen Kosten.

Dazu kommt, dass der Primärenergiebedarf eine wichtige Komponente der Gesamtkosten des Autofahrens, aber nicht die alleinige, darstellt. Der Primärenergiebedarf (wie auch die Emissionen) für die Herstellung eines herkömmlichen Pkw betragen typischerweise ca. nur 10 % des gesamten kumulierten Energieaufwandes pro Pkw [Ebersberger et al., 1998]. Der Anteil der Kraftfahrzeugkosten („Wertverlust“) an die Gesamtkosten ist erheblich höher: etwa 50 % und darüber. Der Grund ist, dass der Primärenergieaufwand bezogen auf den Produktionswert des Pkw nur ca. 6MJ/DM beträgt [Born, 1992], [Drake, 1996], so dass die Primärenergie in etwa 10-12 % des Produktwertes entspricht (der Rest entspricht den Arbeits- und Dienstleistungskosten). Im Gegensatz dazu ist der bezogene Primärenergieaufwand des Kraftstoffes erheblich höher (typisch 75 MJ/DM), wobei der Produktwert des Kraftstoffes fast gänzlich den Primärenergiekosten entspricht.

Aus diesen Gründen vermitteln Vergleiche von alternativen Antrieben, welche nur den Primärenergieaufwand (und die Emissionen) als Vergleichskriterium nutzen, weniger Information als Vergleiche, welche auf monetären Angaben zu den Gesamtkosten basieren. Durch diese können „Verzerrungen“ der relativen Bedeutung einzelner Positionen (wie zum Beispiel „Kraftstoffverbrauch“) vermieden werden.

Wir folgen im Folgenden der Betrachtungsweise, welche zwischen privaten (betriebswirtschaftlichen) und Gesamtkosten (internen und externen), also volkswirtschaftlichen Kosten, unterscheidet [Hörmandiger et al., 1996].

Die Definitionen sind die folgenden:

- private Kosten beinhalten die (Fahrzeug-)Kapitalkosten, die Unterhaltung (Reparaturen, Service) und die Kraftstoffkosten inklusive Kraftstoffsteuer (Versicherungen, Kraftfahrzeugsteuer und eventuelle Kraftfahrerlöhne brauchen hier nicht betrachtet zu werden).

Die privaten Kosten werden im folgenden einfach (Kfz-)Kosten genannt.

- Die internen Kosten entsprechen hier den wie oben definierten privaten Kosten abzüglich der Kraftstoffsteuer.
- Die externen Kosten beinhalten die von der Gesellschaft zu tragenden Kosten, welche durch das Fahrzeug verursacht werden. Hauptsächlich sind es Kosten, die bei der Kraftstoffnutzung durch die globalen Emissionen (Klimagase) und lokalen Emissionen (NO_x und Schadstoffe wie Kohlenwasserstoffe) entstehen. Dazu gehören auch Lärmemissionen, Folgen durch Unfälle und andere gesellschaftliche Kosten und Schäden, welche aber nicht von der Antriebsart abhängig sind und daher bei einem relativen Vergleich von Fahrzeugen nicht berücksichtigt zu werden brauchen.

Die externen Kosten durch Emissionen sind schwer quantifizierbar, obwohl es zahlreiche Studien und Veröffentlichungen (siehe Tabelle 18) zum Thema gibt, welche allerdings zu wenig übereinstimmenden Ergebnissen kommen. Für den Zweck unserer Betrachtungen ist ausreichend, die maximalen in der Literatur angegebenen Werte zu betrachten. Sie sind höher als die in [Hörmandiger et al., 1996] als „highest values“ angegebenen, der Unterschied ist aber für die folgenden Vergleiche nicht relevant.

In der folgenden **Tabelle 18** werden diese Werte sowie Angaben zu den wichtigsten der weiteren Kostenpositionen gezeigt. Leistungsbezogene Angaben beziehen sich auf die (Brutto-) Ausgangsleistung des jeweiligen Aggregates.

Als Beispiel betrachten wir den Vergleich der Kosten und der Gesamtkosten für einen Pkw der mittleren Klasse. Die externen Kosten werden in der **Abbildung 21** nicht nur für den heutigen Stand der Emissionen, sondern auch für den Stand vor der Einführung des Katalysators, also auch für die Zeit etwa 1980-1983 angegeben. Daraus wird ersichtlich, dass durch die Einführung des Katalysators allein eine gewaltige Minderung der Schadstoffe und dadurch der externen Kosten erzielt worden ist.

Die in der Abbildung links gezeigten privaten Kosten enthalten die Kraftstoffsteuer. Man sieht daraus, dass in älteren Zeitperioden die Kraftstoffsteuer viel zu niedrig im Vergleich zu den externen Kosten war, gegenwärtig hingegen übersteigt sie diese Kosten knapp. Hierbei sind allerdings (s. oben) weitere externe Kostenanteile, wie Wegekosten, Kosten durch Unfälle etc. nicht enthalten, da sie gleich für die Alternativen sind und daher für die hier angestrebten Vergleiche irrelevant sind. Ähnlich sind die gezeigten privaten Kosten als Summe aus Kapitalkosten, Unterhalt, tatsächlichen Kosten des Kraftstoffes und Kraftstoffsteuer

niedriger als die „Autofahrerkosten“ des Alltags, weil in der Abbildung Kraftfahrzeugsteuer, Versicherung und Nebenkosten als für die Vergleiche irrelevant nicht gezeigt werden.

Tabelle 18: Bezogene Angaben zu den Kostenpositionen

	Antrieb mit Verbrennungsmotor	Brennstoffzellen-Antrieb mit GH ₂	Bemerkung
Fahrzeug ohne Antrieb (Karosserie, ZEM)	27 DM / kg	27 DM / kg	
Antrieb	180 DM / kW	220 DM / kW 1000 DM 125 DM / kW	BZ-Stack+ Peripherie, Luft- und Wärmeman. El. Steuerung/Kontroll Elektromotoren
Kraftstofftank	450 DM	3000*(E/500)^(2/3), DM	E = Energieinhalt, MJ
Unterhaltungskosten	0.16 DM / km	0.16 DM / km	
Kraftstoffkosten <u>ohne</u> Steuer	0.0124 DM / MJ	0.020 DM / MJ	
Kraftstoffsteuer	0.0433 DM/MJ (Benzin) 0.0225 DM/MJ (Diesel)	0.0225 DM / MJ	ca. 50% der Steuer im Vergleich zu Otto-kraftstoff !
Lebensdauer Fahrleistung	150000 km 450000 km	150000 km 450000 km	Pkw Bus
Externe Kosten			Lit.: [Umweltbundesamt] [Martin, 1995] [Kâgeson, 1993] [Envir. Resour., 1991] [Engin.Systems,1992]
• CO ₂	300 DM / Tonne	300 DM / Tonne	
• NO _x	55 DM / kg	55 DM / kg	
• CO	40 DM / kg	40 DM / kg	
• HC	70 DM / kg	70 DM / kg	

In der **Abbildung 22** werden die berechneten Kosten für beide Antriebsarten, mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellen, gegenübergestellt. Die internen Kosten (private Kosten abzüglich Kraftstoffsteuer) sind im Falle des Brennstoffzellenantriebes wegen der höheren Kapitalkosten für das Fahrzeug höher. Diese höheren Kosten sind nicht auf die spezifischen Kosten des Brennstoffzellenstapels, welche kaum höher als die Kosten des Verbrennungsmotors angenommen wurden, sondern auf die Kosten für die Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie, also letztendlich auf die Kosten des elektrischen Traktionsmotors hoher Effizienz zurückzuführen. Die durch die Emissionen verursachten externen Kosten sind beim Verbrennungsmotor höher, die Kraftstoffkosten (ohne Steuer) ungefähr gleich. Bei diesen zwei Positionen spiegeln sich die Verhältnisse der Abbildungen 17 und 18 wieder. Der niedrigere Kraftstoffverbrauch der Brennstoffzelle wird zum Beispiel durch die höhere Kosten der Kraftstoffbereitstellung für die Brennstoffzelle (höherer Primärenergieanteil, Abbildung 17) aufgehoben.

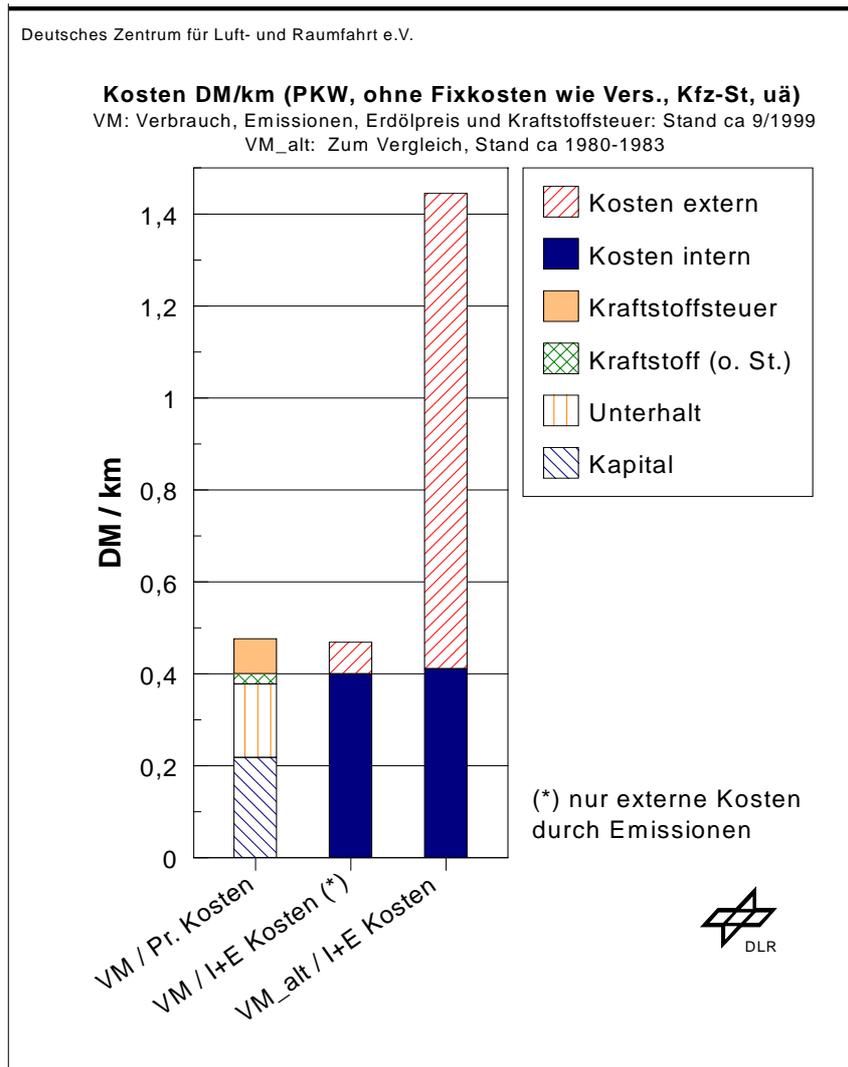


Abb. 21. Bei dieser Kostenbetrachtung werden die spezifischen Privatkosten (Betriebskosten) für Kapital (Fahrzeugwert), Unterhaltung und Kraftstoff ohne Steueranteil zu den *internen* Kosten zusammengefasst. Zu den Gesamtkosten gehören aber auch die *externen* Kosten, welche hauptsächlich durch die Emissionen verursacht werden. In der Abbildung werden diese Kosten für einen Pkw mit konventionellem Antrieb der Gegenwart (VM) gezeigt, rechts jedoch werden die externen Kosten nach den Emissionswerten von „alten“ Fahrzeugen in etwa aus der Zeit 1980-1983 berechnet (VM_alt). Dies veranschaulicht die gewaltige Verminderung an Schadstoffemissionen in den letzten Jahrzehnten. Kostenpositionen (private oder externe), welche unabhängig vom Fahrzeugkonzept sind (z.B. durch Unfälle verursachte Kosten, Wegekosten etc.), müssen hier nicht berücksichtigt werden.

Fig. 21. In this cost overview the specific private costs due to capital, maintenance, and fuel price with- out fuel tax (bars on the left) are combined to give the *internal* social costs (lower bar in the middle). However, the social costs include also the *external* social costs due mainly to the social costs of the emissions. In the Figure the external costs given on the middle position are presently typical for a passenger car with IC engine (VM), but on the right the external costs are calculated according to the emission values of „old“ cars as about in the period 1980-1983 (VM_alt). This visualizes the huge emission reduction achieved in the last few decades.

In the legend it denotes:

Unterhalt= maintenance ; Kraftstoff (o. St.)= fuel price without fuel Tax ; Kraftstoffsteuer= fuel Tax
 Kosten intern = internal social costs ; Kosten extern= external social costs

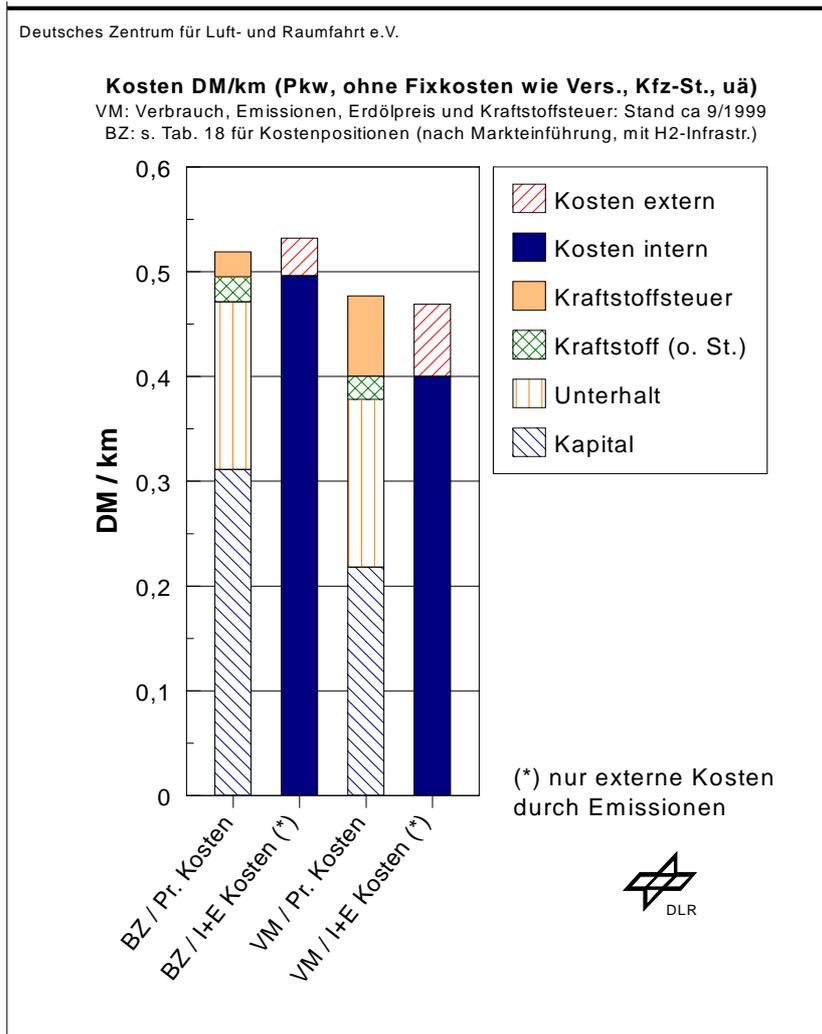


Abb. 22. Bei dieser Kostenbetrachtung werden die spezifischen Privatkosten (Betriebskosten) für Kapital (Fahrzeugwert), Unterhaltung und Kraftstoff ohne Steueranteil zu den *internen* Kosten zusammengefasst. Zu den Gesamtkosten gehören aber auch die *externen* Kosten, welche hauptsächlich durch die Emissionen verursacht werden. In der Abbildung werden diese Kosten für einen Pkw mit konventionellem Antrieb der Gegenwart (VM) und mit Brennstoffzellenantrieb der Zukunft gezeigt (BZ). Obwohl die Kapitalkosten für das BZ-Fahrzeug so optimistisch wie möglich eingesetzt wurden, sind sie höher als beim konventionellen Pkw. Der niedrigere Kraftstoffverbrauch der Brennstoffzelle wird zum Teil durch die höheren Kosten des aus fossiler Primärenergie abgeleiteten Kraftstoffes kompensiert. Die externen Kosten sind höher im Falle des Antriebes mit Verbrennungsmotor, vor allem wegen der lokalen Emissionen, der Unterschied reicht aber nicht aus, um die höheren internen Kosten des Brennstoffzellenantriebes zu kompensieren.

Fig. 22. In this cost overview the specific costs due to capital, maintenance, and fuel price without fuel tax are combined to give the *internal* social costs. However, the social costs include also the *external* social costs due mainly to the social costs of the emissions. The given costs are the presently typical costs for a passenger car with IC engine (VM) and the corresponding costs for the same vehicle with future fuel cell drive (BZ). Even with most optimistic costs for the fuel cell system (see Table 18), the capital cost of the system will be higher than those of the conventional system. The advantage of the lower fuel consumption of the fuel cell is partially compensated by intrinsically higher unit cost for the fuel cell fuel derived from fossil resources. As a result, the conventional system does have higher external costs mainly due to its intrinsic local emission, but the difference does not compensate for the higher internal social costs of the fuel cell system. It denotes:
 Unterhalt= maintenance ; Kraftstoff (o. St.)= fuel price without fuel Tax ; Kraftstoffsteuer= fuel Tax
 Kosten intern = internal social costs ; Kosten extern= external social costs

Innerhalb des Energiesystems der Zukunft mit Wasserstoff aus regenerativen Energiequellen ändert sich das Resultat des Vergleiches nicht. Dort ist zwar der Anteil der Kraftstoffkosten im Falle des Verbrennungsmotors entsprechend des höheren Verbrauches an Wasserstoff höher (vgl. Abbildung 19) , dafür aber wird der Anteil der externen Kosten wegen der sehr niedrigen Emissionen erheblich kleiner.

Im Resultat ist beim Brennstoffzellenantrieb eines Personenkraftwagens mit höheren Kosten zu rechnen, da die niedrigen externen (Emissionskosten) die höheren Antriebskosten nicht ausgleichen können.

Interessant ist, dass bei der gleichen Untersuchung für einen Bus (anstatt eines Pkw in der vorigen Abbildung) die Verhältnisse deutlich anders ausfallen. In der **Abbildung 23** werden die berechneten Kosten für beide Antriebsarten, mit Verbrennungsmotor (hier Dieselmotor) oder Brennstoffzellen, für einen im NEFZ betriebenen Bus gegenübergestellt. Zuerst ist eine Angleichung der Kapitalkosten festzustellen, welche daher resultiert, dass der Anteil der Kapitalkosten des *Antriebssystems* zu den gesamten Fahrzeugkosten bei einem Bus niedriger als im Pkw-Fall ist. Der Anteil der Kraftstoffkosten sowie der emissionsbedingten externen Kosten zu den Gesamtkosten wird dadurch größer. Dies ist ungünstig für ein Antriebssystem mit höheren Emission: Obwohl bei einem Bus mit Dieselantrieb die privaten Kosten niedriger ausfallen, treten höhere Gesamtkosten auf.

Obwohl die Unterschiede nicht sehr groß erscheinen, ist die Anwendung von Brennstoffzellenantrieben bei Bussen auch vom Gesichtspunkt der Gesamtkosten zu befürworten (wenn die Kostenziele für die Brennstoffzellenstacks, Tabelle 18, erreicht werden).

Die Betrachtungen dieses Abschnittes demonstrieren einerseits die Wettbewerbsfähigkeit des Antriebes mit Verbrennungsmotor auch unter Berücksichtigung der externen Kosten. Andererseits aber zeigen sie am Beispiel des Busbetriebes, dass Brennstoffzellenantriebe innerhalb des gegenwärtigen Systems mit fossilen Kraftstoffen für bestimmte Anwendungen in Hinsicht auf die Gesamtkosten konkurrenzfähig sein können, wenn die möglichen Kostenziele (Tabelle 18) für dieses System erreicht sind. Dazu wäre noch zu bemerken, dass bei Bussen das Problem der Unterbringung von Drucktanks für die Wasserstoffspeicherung leichter zu lösen ist als im Falle eines Pkw.

8.2 Ein Versuch der Bewertung durch Punktgebung

Als negatives Beispiel für die Präsentation einer Bewertung mit Punkttabelle sollen die in [Nevin, 1999] dargestellten Daten benutzt werden, **Tabelle 19**.

Schon die Auswahl der Fahrzeuge in Tabelle 19 bittet Anlass zu Kritik. Demonstrationsfahrzeuge, einige schon in „veralteter Ausführung“ (EV1), sind nicht repräsentativ für Fahrzeuge der nächsten Generation, Smart ist ein „Nischenfahrzeug“, welches zudem nicht gerade kraftstoffsparsam ist: hier sollte eher der VW-Lupo stehen.

Die Vergebung der Punkte findet nach einer „Knockout“ Reihenfolge mit gewaltigen Bewertungssprüngen (10 Punkte für top-rated, 5 Punkte für den second-ranked, egal wie wenig dieser unterlegen sein soll etc.).

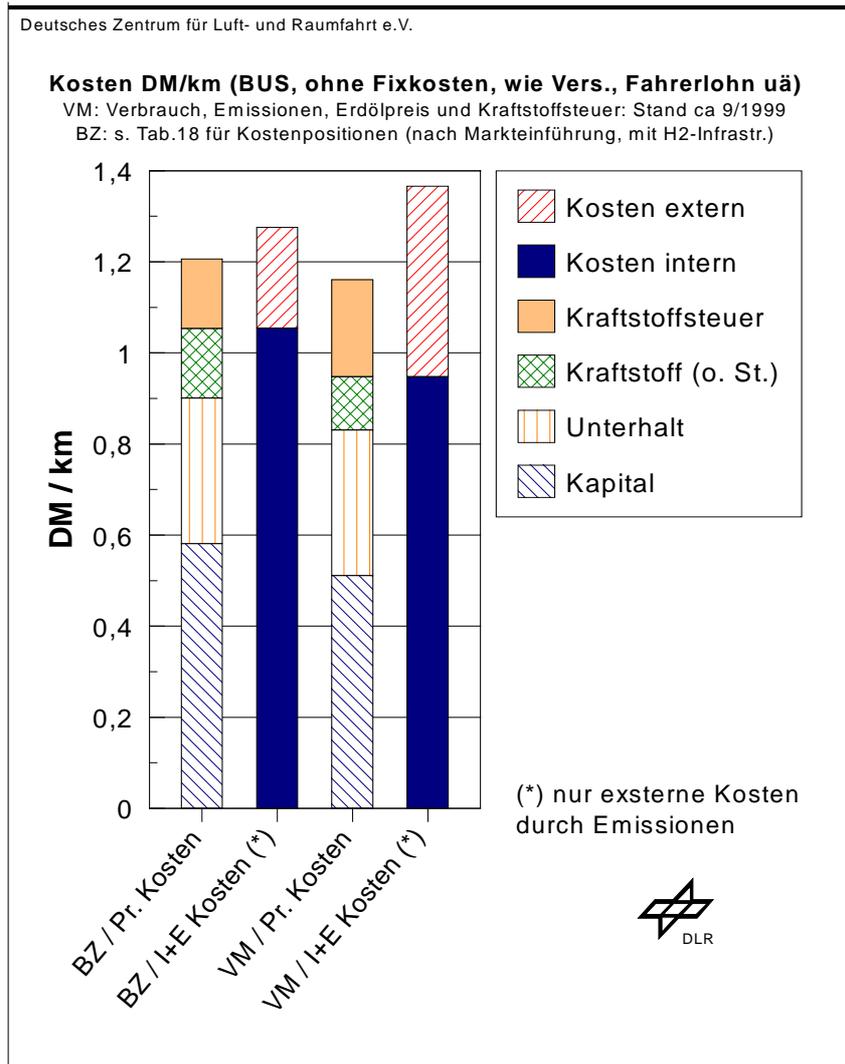


Abb. 23. Die im Bild 22 gezeigte Kostensituation ändert sich bedeutend, wenn man anstatt eines Pkw die spezifischen Kosten eines Busses darstellt. Wegen der hohen Nutzungsdauer des Busses ist der Anteil der Kapitalkosten zu den internen Kosten niedriger als beim Pkw. Ferner ist der Anteil der Kosten des Antriebes im Bus relativ klein im Vergleich zu den Gesamtkosten eines Busses, wodurch eine Angleichung der spezifischen Kapitalkosten und dadurch der internen Kosten der beiden Alternativen bewirkt wird. Im Resultat bewirken dann die niedrigen externen Kosten des Brennstoffzellenantriebes einen Nettovorteil gegenüber dem konventionellen Busantrieb mit Verbrennungsmotor auch innerhalb des gegenwärtigen fossilen Energiesystems. Allerdings sind in dieser Darstellung die Kosten für neue Kraftstoff-Infrastrukturen bei den Kraftstoffpreisen noch nicht berücksichtigt worden.

Fig. 23. The situation shown in Fig. 22 for private cars changes substantially if the costs for a *bus* powered with conventional IC engine (VM) are compared with the costs of the same bus powered with future fuel cell drive (BZ). First, because of the high usage of the bus the contribution of the capital cost to the total specific cost is lower with a bus. Secondly, the contribution of the cost of the power train itself to the total vehicle costs is lower in the same case. For both reasons the internal social costs of the considered alternative drives for a bus are not very different. In this case the lower external costs of the fuel cell drive results in an advantage in social costs even within the present energy system using fossil resources. Nonetheless, the impact of the extra costs for new fuel infrastructures on the fuel cost have not been considered here. It denotes:
 Unterhalt= maintenance ; Kraftstoff (o. St.)= fuel price without fuel Tax ; Kraftstoffsteuer= fuel Tax
 Kosten intern = internal social costs ; Kosten extern= external social costs

Tabelle 19: „A comparison of four next generation cars“ nach [Nevin, 1999]

	EV1	Smart	Prius	Necar 4
Customer acceptability	0	2	5	10
Design simplicity	5	10	0	2
Emissions profile	5	0	2	10
Fuel efficiency	5	2	0	10
Interior space	2	0	5	10
Price	2	10	5	0
Range	0	5	5	10
Refuelling infrastructure	2	10	5	0
Safety	2	0	10	5
Speed and acceleration	0	2	5	10
Total	23	41	42	67

Die Kriterien sind in den meisten Fällen eher unklar definiert und nicht korrekt bewertet:

Wenn als „fuel efficiency“ der Wirkungsgrad vom Tank zu Rad zu verstehen ist, dann verdient eher das Batteriefahrzeug den ersten Platz, der Prius hat als autonome Hybrid einen höheren Wirkungsgrad (um die 27 %) als der Smart, und dass der Wirkungsgrad von Necar 4 auf etwa 35-37 % abgeschätzt werden kann (statt 70 % wie in [Nevin, 1999] erwähnt), berechtigt keineswegs die Punktgebung 10 gegenüber 0 für den Prius. Dabei ist der Necar 4 gegenüber dem Prius untermotorisiert und zudem ein Flüssigwasserstoff-Fahrzeug, wobei in der Tabelle 19 die Frage des Primärenergieverbrauchs unberücksichtigt bleibt. Diese Kritik soll nicht als gegen das Konzept des Necar 4 gerichtet gesehen werden (welches in einem zukünftigen System mit regenerativer LH₂-Versorgung ernsthaft mit dem Verbrennungsmotor konkurrieren kann), sondern gegen den Vergleich mit dem Prius oder Smart als „comparison of next generation cars“ aufgefasst werden.

Bei den Emissionen werden offenbar die lokalen und die globalen Emissionen wahlweise betrachtet. Sollte es sich um die lokalen Emissionen handeln, dann ist der EV1 genauso emissionsfrei wie der Necar 4. Handelt es sich um die gesamte klimarelevante Emissionen im fossilen Energiesystem (was das Anlasten von höheren CO₂-Emissionen an das EV1 in [Nivel, 1999] andeutet), dann ist der Necar 4 der größte CO₂-Emitter und verdient keineswegs die Punktzahl 10.

Diese hier aufgeführte Kritik hat nicht den Zweck, die Meinung eines bestimmten Autors zu widerlegen, sondern soll auf die Schwächen derartiger Wertungen hindeuten. Solche plakativen Darstellungen sind insofern von Bedeutung, da sie gerade vom „eiligen Leser“ (und das sind verständlicherweise auch viele Entscheidungsträger) nicht in den Einzelheiten analysiert werden können. Der eigentliche Grund für die Übernahme dieser Art der Darstellung

in den vorliegenden Bericht ist aber, dass die obige kritische Betrachtung Anlass dazu gegeben hat, den Versuch zu unternehmen, eine „verbesserte“ konsistente Tabelle dieser Art herzustellen. Das Resultat dieses Versuchs ist in der **Tabelle 20** dargestellt.

In dieser Tabelle wird, um eine gewisse Allgemeinheit zu betonen, kein Bezug auf spezielle Fahrzeugmodelle genommen, z.B. nicht auf den Prius oder den Smart, sondern auf Hybride oder Fahrzeuge der „kleinen Klasse“. Für die Brennstoffantriebe soll die Bezeichnung „FC car“ bedeuten, dass wir die Aussage nicht unbedingt auf das Fahrzeug Nocar 4 der Tabelle 19 beziehen, sondern dass wir noch günstigere denkbare Antriebseigenschaften berücksichtigt haben, wobei die Kategorie des Kraftstoffes in jeder Spalte genannt wird. Die Spalten 2 bis 6 betreffen die Nutzung von Kraftstoffen fossilen Ursprungs, die letzten drei vom regenerativen Wasserstoff oder Elektrizität. Die Punktgebung ist nicht an eine Reihenfolge von festen „Sprüngen“ gebunden. Sie ist als ein qualitativer Ausdruck der „Güte“ des Antriebkonzepts im Bezug auf das jeweilige Kriterium anzusehen, welcher nicht ausschließt, dass mehrere Konzepte die gleiche Punktzahl bekommen, oder dass größere Sprünge der Werte innerhalb einer Zeile stattfinden. Als höchste Punktzahl wurde „10“ vergeben.

Die Position „fuel efficiency“ hat bei solchen „tabellarischen“ Vergleichen wenig Sinn: Antriebe mit höheren Wirkungsgrad (vom Tank zum Rad) können energetisch und im Bezug auf Emissionen ungünstiger sein. Bei den Emissionen muss schließlich zwischen lokaler Emission von Schadstoffen und klimarelevanter Emission (vorwiegend CO₂) unterschieden werden.

Es ist interessant, dass bei der Bildung der Summen der Punkte in der Tabelle 20 eine Reihenfolge entsteht, welche plausibel kommentiert werden kann und qualitativ einige wichtige Schlussfolgerungen im nächsten Kapitel vorwegnimmt.

So wird es zum Beispiel klar, dass bei Batteriefahrzeugen die Marktchancen vor allem durch Nachteile in bezug auf die Reichweite, Infrastruktur, Akzeptabilität (umständliches bzw. langes Betanken), Kosten und Lebensdauer der Batterien etc. am niedrigsten erscheinen. Im Energiesystem mit fossilen Kraftstoffen ist der klare „Punktsieger“ der klassische Antrieb mit Verbrennungsmotor. Interessant ist aber der Angleich der Punktezahl im System mit regenerativen Wasserstoff: Der Antrieb mit Verbrennungsmotor ist hier dem Brennstoffzellenantrieb unterlegen, da er auf den gleichen Kraftstoff, gleiche Infrastruktur und gleiche Speicherungsart an Bord zugreifen muss.

Trotz der inhärenten Nachteile der Punktgebung ist bei Vermeidung systematischer Fehler die Anwendung solcher Darstellungen informativ und transparent. Eine eventuelle Verbesserung der Aussagekraft könnte möglicherweise durch „Gewichtung“ der Kriterien erreicht werden.

Tabelle 20: Versuch einer Bewertung von herkömmlichen und alternativen Antrieben mit Kraftstoffen fossilen Ursprungs (Spalten 2 bis 6) und mit zukünftigen Kraftstoffen (Wasserstoff, Elektrizität) aus regenerativen Energiequellen.

	EV Batt (Mix)	Small Car (ICE)	Hybride Car (ICE)	FC Car fossil fuel (NG) H ₂ on board	FC Car Methanol (from NG) on board	Modern Car IC-Engine fossil fuel	FC Car regener. H ₂	Modern Car IC-Engine regener. H ₂	EV (Batt.) with regenerative electricity
Customer acceptability	2	4	4	4	4	6	10	8	2
Design simplicity	6	10	8	4	2	10	4	8	6
Primary energy	4	6	8	6	4	7	8	6	10
CO ₂ - Emission	4	6	8	8	6	7	10	10	10
Local Pollutants	10	6	4	10	10	2	10	9	10
Interior space	6	4	8	8	6	10	8	10	6
Price	4	10	4	4	4	10	4	8	4
Fuel price	8	10	10	6	7	10	6	6	10
Range	2	10	10	8	8	10	8	6	2
Refuelling Infrastructure	2	10	8	2	8	10	2	2	2
Safety	6	6	10	8	8	10	8	8	6
Performance	2	4	6	8	6	10	8	8	2
Total	56	86	88	78	73	102	86	83	70

9. Diskussion der Resultate und Schlussfolgerungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Resultate vorgestellt, welche den Schlussfolgerungen dieses Abschnittes im Bezug auf die globalen Vorteile der Alternativen im Vergleich zu den Antrieben mit Verbrennungsmotor zugrunde liegen.

Die Betrachtung der globalen Vorteile (oder Nachteile) von alternativen Antriebssystemen bedeutet letztendlich, dass die Kriterien der Verminderung des Primärenergiebedarfs und der klimarelevanten Emissionen (angegeben als CO₂-Äquivalent und totale NO_x Emission in der gesamten Energiekette von der Primärenergie bis zum Rad) benutzt werden sollen. Die lokalen Emissionen der Verbrennungsmotoren werden bei der Angabe dieser globalen Emission in ihrer Klimawirksamkeit schon berücksichtigt und als CO₂-Äquivalent mitgerechnet.

Hierzu sind folgende Erläuterungen notwendig:

Die lokalen Emissionen der Verbrennungsmotoren sind nicht nur klimarelevant (was wir in diesem Bericht als globales Kriterium erfasst haben), sondern enthalten auch gesundheits-schädigende Stoffe oder giftige Substanzen. Ihre Emission ist, viel mehr als die CO₂-Emissionen in der Öffentlichkeit als gefährlich bewusst und wird als das unmittelbar auf der Straße spürbare Übel angesehen. Es ist daher verständlich, dass bei der Diskussion von Verkehrsproblemen allgemein die Angaben der lokalen Emissionen fast immer im Mittelpunkt stehen und detaillierte diesbezügliche Angaben als Qualitätsmerkmal der entsprechenden Untersuchung angesehen werden. Der Verfasser selbst hat solche Angaben im vorangegangenen Bericht miteinbezogen [Carpetis, 1997], auf ein „update“ im vorliegenden Bericht wird aber verzichtet. Die Gründe sind die folgenden:

- Die Abgaswerte der *neu zugelassenen* Fahrzeuge sind in den vergangenen Jahren drastisch zurückgegangen, wie es graphisch in der **Abbildung 24** dargestellt ist (siehe auch Tabelle 12 im Abschnitt 4.4). Die fallende Tendenz ist anhaltend und alle neuen Pkw-Modelle mit Verbrennungsmotor erfüllen die strengere D4-Norm, für CO-Werte sogar die ULEV oder sogar SULEV-Normen. Jede Angabe ist jährlich zu revidieren. Weitere Verbesserungen sind durch die Einführung (schon ab dem Jahr 2000) von schwefel- und benzolarmen Kraftstoffen sowohl für die allmählich in den Markt kommenden direkt einspritzenden sparsamen Ottomotoren wie auch für die Dieselmotoren zu erwarten.
- Als Vergleichs-Kriterium für zukünftige Fahrzeugantriebe sind diese immer kleiner werdenden Werte auch von wenig quantitativem Wert, da die Alternativen mit elektrischem Antrieb praktisch keine lokalen Emissionen von Schadstoffen haben. Es ist sinnvoller, Vergleiche von nachhaltig kleiner werdenden Werten gegenüber „Nullwerten“ mit einer qualitativen Aussage wie die folgende zu ersetzen:
- Da die lokalen Emissionen der Verbrennungsmotoren gemäß der zeitlichen Entwicklung der Vorschriften für Schadstoffemissionen fortwährend begrenzt werden müssen, ist die lokale Emissionsfreiheit der elektrischen Antriebe pauschal als ein Vorteil festzuhalten. Die weitere Diskussion zum Vergleich der Alternativen kann dann auf der Basis der globalen Energie- und Emissionswerte fortgesetzt werden.

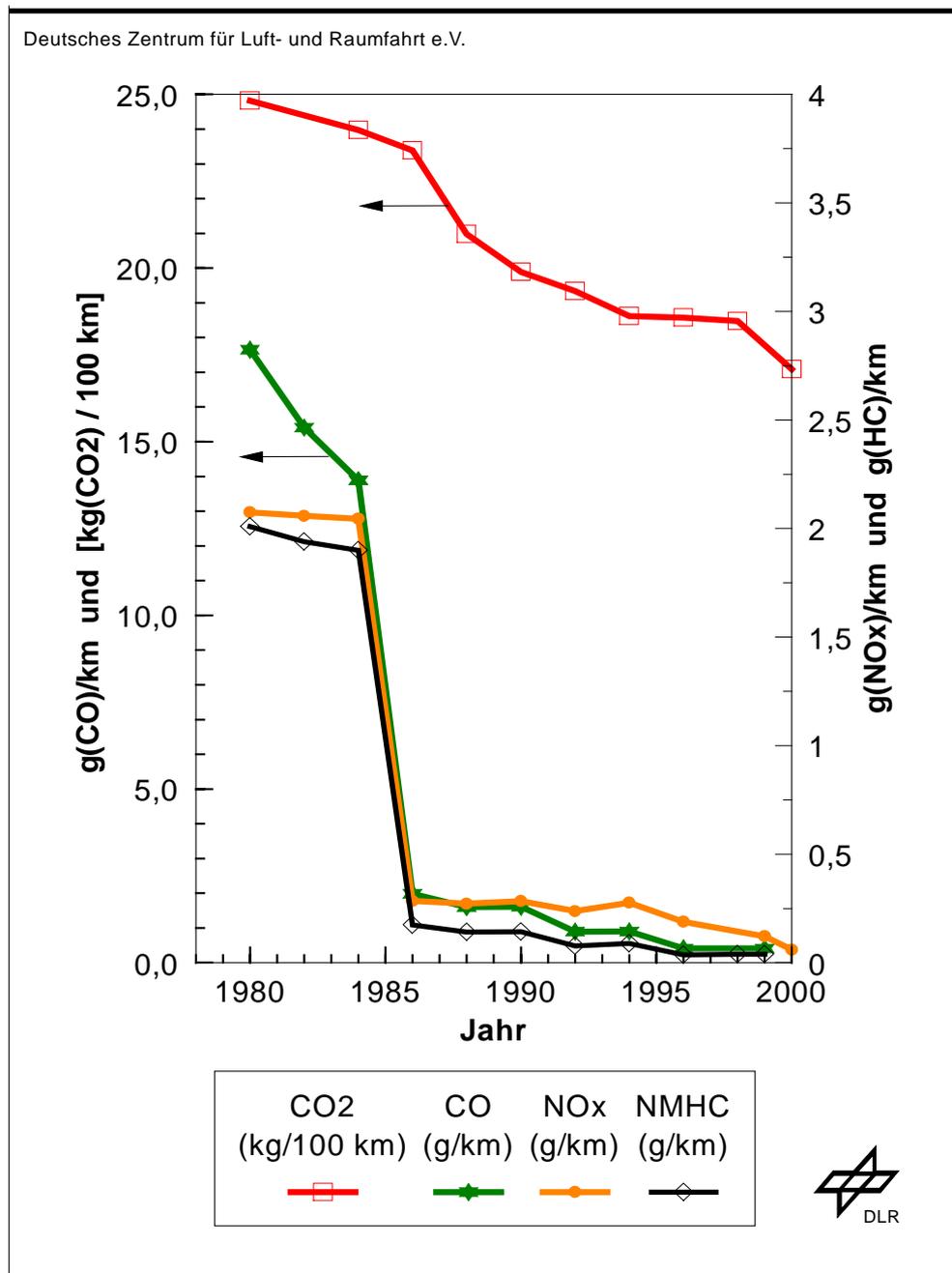


Abb. 24. Entwicklung der Emissionen (im Stadtgebiet) von *neu* zugelassenen Pkw mit Ottomotor in Deutschland [Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, INFRAS AG, im Auftrag des UBA, 1996 ff].

Fig. 24. The change of the emissions in urban traffic of the newly registered private cars since 1980 in Germany.

9.1 Die Folgerungen aus der Untersuchung

Die Schlussfolgerungen der Untersuchung dieses Berichtes lassen sich folgendermaßen formulieren:

1. Im Rahmen eines Energieversorgungssystems, welches fossile Primärenergie nutzt, ist der Einsatz von Elektroantrieben vom Standpunkt der Primärenergieeinsparung mit keinen eindeutigen Vorteilen verbunden. Im gegenwärtigen fossilen Energieversorgungssystem ist die Bereitstellung der herkömmlichen Kraftstoffe (Benzin, Diesel) in verbesserter Qualität (zum Beispiel niedriger Schwefelgehalt!) sowie die Förderung erdgasbetriebener Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor von größerem Nutzen als die Herstellung abgeleiteter Kraftstoffe (Methanol, Wasserstoff, Elektrizität) zur Nutzung in Fahrzeugen mit Elektroantrieb (Brennstoffzellen- oder Batteriefahrzeuge), welche entweder zusätzliche Reformierung an Bord benötigen (Methanol), oder inhärente Speicherungsprobleme an Bord (Hochdruck- bzw. Flüssigwasserstoff) bzw. Abstriche in der Reichweite (Batterien) hinnehmen müssen, ohne eindeutige globale Energieeinsparung vorweisen zu können (siehe zum Beispiel Abbildung 10).
2. Eine bedeutende Verminderung des Ausstoßes von Treibhausgasen durch den Verkehr ist im Rahmen eines Energieversorgungssystems, welches fossile Primärenergie nutzt, möglich, wenn zunehmend Erdgas im Verkehr eingesetzt wird. Aus Erdgas hergestelltes Methanol als Kraftstoff für zukünftige Brennstoffzellenantriebe würde einen höheren Ressourcenverbrauch und höheren CO₂-Ausstoß als herkömmliche Diesel- oder erdgasbetriebene Fahrzeuge verursachen, aber noch um ca. 10 % unter der CO₂-Emission eines benzinbetriebenen Fahrzeuges liegen. Andere aus Erdgas abgeleitete Kraftstoffe können beim Einsatz in Fahrzeugen mit Elektroantrieb (Hochdruckwasserstoff in Brennstoffzellen- oder Elektrizität in Batteriefahrzeugen) den Ausstoß von Treibhausgasen um etwa 12 % bis 14 % im Vergleich zum Einsatz von Erdgas in Verbrennungsmotoren verringern (siehe zum Beispiel Abbildung 11). Höhere Kosten und inhärente Speicherungsprobleme an Bord bzw. Abstriche an der Reichweite, welche oben unter 1 erwähnt wurden, stehen jedoch diesem Vorteil entgegen. Hierzu muss auch erinnert werden, dass Erdgasspeicherung an Bord, wie bei der direkten Nutzung von Erdgas mit Verbrennungsmotoren nötig ist, sowohl volumen- wie auch massenbezogen bedeutend günstiger ist als Wasserstoffspeicherung oder Elektrizitätsspeicherung an Bord (Tabelle 14).
3. Es folgt hieraus, dass im Rahmen eines Energieversorgungssystems, welches fossile Primärenergie nutzt, die Konkurrenzfähigkeit speziell der Brennstoffzellenantriebe gegenüber der herkömmlichen Antriebe mit Verbrennungsmotor im wesentlichen nur auf dem Reduktionspotenzial von NO_x und der Schadstoffe CO, NMHC, SO₂, etc. beruht, was für eine allgemeine Markteinführung (abgesehen von Nischenanwendungen, wie Busse in Restriktionsgebieten) in Anbetracht des niedrigen Emissionsniveaus moderner Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ab Euro 4) nicht ausreichen dürfte. Dies wird auch deutlich, wenn man dieses Potenzial durch eine Analyse der Gesamtkosten der Alternativen (Abschnitt 8.1 in diesem Bericht) oder eine Kosten-Nutzen-Analyse bewertet [Kolke, 1999], [Umweltbundesamt, 1999].
4. Der inhärente Vorteil der Brennstoffzelle (hocheffiziente Umwandlung der Wasserstoffenergie in elektrische Energie) kann erst im Rahmen einer nichtfossilen Energiewirtschaft zu globalen Vorteilen und zur Konkurrenzfähigkeit der Brennstoffzellenantriebe führen.

Die Markteinführung von nichtfossilen regenerativen Energiequellen ist eine sicher zu erwartende Entwicklung mit allerdings unsicherem Zeithorizont, welche entweder durch das Erschöpfen preiswerter fossiler Energien oder durch die Notwendigkeit, den CO₂-Ausstoß radikal zu vermindern (globale Klimabeeinflussung) zustande kommen wird. In diesem Fall können sowohl Solarwasserstoff wie auch Methanol aus Biomasse für den Verkehr zur Verfügung stehen. In diesem Szenario, in dem Brennstoffzellenantriebe und Verbrennungsmotor auf den *gleichen* Kraftstoff und auf das gleiche Speichersystem an Bord zugreifen *müssen*, bietet der Brennstoffzellenantrieb den globalen Vorteil des niedrigeren Ressourcenverbrauches (siehe Abbildungen 19 und 20) und der „absoluten“ lokalen Emissionsfreiheit. Als Konkurrenz bei der Wasserstoffnutzung wird der Antrieb mit Verbrennungsmotor verbleiben können, weil das Brennstoffzellensystem inhärent mit mehr Herstellungskosten verbunden sein dürfte, welche durch Kraftstoffersparnis schwer zu kompensieren sind. Gegenüber dem mit Solarstrom betriebenen Batteriefahrzeug hat das mit Solarwasserstoff betriebene Brennstoffzellensystem zwar einen höheren primären Energiebedarf, aber die Vorteile im Bezug auf Reichweite und Betankungszeit.

Insofern wird ersichtlich, dass Brennstoffzellenfahrzeuge innerhalb nichtfossiler zukünftiger Energiesysteme hauptsächlich Wasserstoff als Kraftstoff nutzen werden. Der Vorteil der einfacheren Speicherbarkeit von Methanol bei Anwendung in Brennstoffzellenfahrzeugen kann nur bei Nutzung von *Biomasse* zur Geltung kommen. Untersuchungen von [Ogden et al., 1998] zeigen, dass aus Biomasse hergestellter Wasserstoff wegen höherer Infrastrukturkosten mit höheren Kosten angeboten werden wird, so dass der höhere Kraftstoffverbrauch bei Nutzung von Methanol aus Biomasse kompensiert werden kann. Im Gegensatz dazu ist zwar aus Solarstrom und mit Kohlenstoff aus der Atmosphäre die Herstellung von Methanol technisch möglich, aber im Effekt ist seine Nutzung als Kraftstoff energetisch zu aufwendig (siehe Abbildung 19) und kostspielig. Vorteile der Infrastruktur und der Speicherung an Bord können diesen Nachteil wahrscheinlich nicht kompensieren.

9.2 Kommentare

Die im vorigen Abschnitt 9.1 dargestellten *Folgerungen* sind weitgehend identisch mit den Folgerungen der Untersuchung vom Jahre 1997 [Carpetis, 1997]. Sie werden jedoch auf eine sicherere Basis gestellt, da die Simulationsmethode weiter entwickelt wurde, weitere Aspekte bei den Vergleichen betrachtet wurden und die *numerischen* Resultate (für Kraftstoffverbrauch, Emissionen) im vorliegenden Bericht sich von diesen des Jahres 1997 entsprechend unterscheiden. Die Gründe sind die folgenden:

- Einerseits hängen einige wesentliche Zusammenhänge (zum Beispiel Einfluss der Kraftstoffketten) nur wenig vom jeweiligen technologischen Stand ab
- Der technologische Stand der wichtigsten Komponenten (Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor) hat sich in der relativ kurzen Spanne von drei Jahren entsprechend weiterentwickelt.

Das Stichwort „Weiterentwicklung“ wirft die Frage auf, welcher der Zeithorizont der obigen Aussagen sein soll. Wir haben die Untersuchung zwar „zukunftsorientiert“ durchgeführt, nicht aber explizit auf ein bestimmtes Jahr bezogen. Konkret bedeutet dies:

- Bei Verbrennungsmotoren wurden die technischen Merkmale berücksichtigt, welche gegenwärtig bei neuen Modellen zu Marktpreisen angeboten werden („sparsame Motoren“, Euro 4 oder besser). Eine Palette weiterer Verbesserungen, wie z.B. elektrische Ventilsteuerung statt mechanische Ventilsteuerung mit Nockenwelle, kombinierter Motor-Generator statt Anlasser+Generator, direkteinspritzende Benzinmotoren und vieles andere sind „in der Schublade“. Ihre Einführung ist weniger ein technisches Problem, sondern vielmehr ein Problem der Kosten und der Marktpolitik (das gleiche gilt für die Einführung von Hybridfahrzeugen). Besonders die Einführung des kombinierten Anlasser-Generators (CSG) anstelle von Anlasser+Generator besitzt das Potenzial, den Wirkungsgrad im Zyklusbetrieb bedeutend anzuheben: einerseits werden die Leerlaufverluste vermieden, andererseits wird durch den geregelten Generatorbetrieb während der Teillastphase eine effiziente Deckung des Strombedarfs auch der zahlreichen peripheren Stromverbraucher moderner Kraftfahrzeuge gewährleistet. Es ist daher für die Bewertung der Antriebe mit Verbrennungsmotor nicht übertrieben, davon auszugehen, dass in absehbarer Zukunft alle neuen Modelle den gegenwärtigen Stand der „Sparmotoren“ erreichen werden und zwar, bevor auch die weiteren letztmöglichen Reserven marktfähig werden (müssen).
- Bei den Brennstoffzellenantrieben wäre es hingegen unfair, vom gegenwärtigen Stand auszugehen, welcher in Demonstrations- und Versuchsfahrzeugen erkennbar ist. Dabei liegt das Verbesserungspotential nicht so sehr in den spezifischen Daten des Brennstoffzellenstapels selbst, welche schon bekannt sind und die möglichen „Zielwerte“ erreichen dürften, sondern vielmehr in der Verbesserung der Peripherie und des elektrischen Antriebsstranges im Bezug auf Masse und Effizienz. In diesem Bericht wurde dieses Potential berücksichtigt, wobei die Masse des Brennstoffzellen-Antriebes ohne Einbuße an Wirkungsgrad noch auf etwa 55 bis 60 % gegenüber dem demonstrierten Stand der Technik reduziert wurde. Im Anhang zu diesem Bericht (Abschnitt 10.4, Abbildung 28) wird gezeigt, dass der Wasserstoffverbrauch eines Fahrzeuges mit Brennstoffzellenantrieb erst dann niedriger im Vergleich zum Verbrauch des gleich motorisierten Fahrzeuges mit Wasserstoffmotor ist, wenn der „break-even“-Wert für die Masse des Brennstoffzellenantriebes (inkl. Brennstoffzellenstapel mit Nebenaggregate, Wärme-, Luft- und Leistungsmanagement, Elektromotoren etc.) erreicht ist. Dieser hier angenommene Stand unterhalb des „break-even“-Wertes könnte bis zur kommerziellen Einführung der Brennstoffzellenantriebe (Zeithorizont: etwa nach dem Jahr 2005) erreicht werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass bei vielen Energiewandlern Kosten, spezifische Masse und Wirkungsgrad korreliert sind. Dies gilt nicht nur für Elektromotoren (hocheffiziente Elektromotoren sind kostspielig und/oder haben niedrigere Leistungsdichte) sondern auch für Brennstoffzellen: Auslegungen für hohe Effizienz im Fahrzyklus sind mit der höchstmöglichen Leistungsdichte bzw. niedrigeren Kosten nicht vereinbar. Als vorrangige Entwicklungsaufgabe für die Brennstoffzellen ergibt sich für die absehbare Zeit nicht so sehr die kaum noch mögliche Verbesserung der Leistungsdichte des Stapels im Vergleich zum hier betrachteten Wert, sondern die Reduktion der Antriebsmasse und die Kostenreduktion (siehe auch Zitat der Stellungnahme des Vorstandes von DaimlerChrysler nach der Vorstellung von Necar 4 in [Nevin, 1998, Seite 23]).

Die Untersuchung von Hybridfahrzeugen mit Hilfe des Simulationsprogrammes hat die globalen Umweltvorteile der Hybridisierung quantifiziert. Dazu sind folgende Kommentare angebracht:

- Ein Hybridfahrzeug mit Verbrennungsmotor wird kostenaufwendiger sein, da der elektrische Strang zusätzlich zum konventionellen eingebaut werden muss. Dafür ist der mögliche Kraftstoffverbrauch (und die Betriebskosten) merklich niedriger. Als größter Vorteil muss aber die Möglichkeit angesehen werden, dass durch das Antriebsmanagement die Möglichkeit der „umweltbewußten Citylogistik“ gegeben wird. Als erster Schritt und als eine Art von „Mini-Hybridisierung“ wird mit Sicherheit der zur Marktreife gelangte kombinierte Anlasser-Generator (CSG) eingeführt, welcher den Motorleerlauf vermeiden und das elektrische Anfahren erlauben lässt.
- Die Hybridisierung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird nicht unbedingt mit zusätzlichen Kosten verbunden sein, da der elektrische Strang vorhanden ist und die Kosten der Speicherbatterie durch die ersparten Kosten an Brennstoffzellen kompensiert werden können. Dafür sind die relativen Vorteile im Bezug auf Kraftstoffersparnis nicht sehr hoch, vor allem weil die Verluste bei der Ladung-Entladung der Batterie vergleichbar zu den Verlusten der Stromproduktion in der Brennstoffzelle selbst sind.

9.3 Schlussbemerkung

Die wichtigste Botschaft aus den Resultaten der vorliegenden Untersuchung ist, dass Brennstoffzellenantriebe erst dann sehr gute Aussichten für Markteinführung haben werden, wenn die geeigneten Kraftstoffe, Wasserstoff oder Methanol **aus nicht fossilen Primärenergien** für den Verkehr zur Verfügung gestellt werden.

Mit keinem Kraftstoff fossilen Ursprungs, welcher gegenwärtig angeboten wird (Benzin, Diesel, Erdgas) und mit keinem Kraftstoff, welcher aus Erdgas sonst abgeleitet werden kann (Wasserstoff, Methanol), sind auch unter den günstigen hier vorgelegten Annahmen eindeutige globale Umweltvorteile durch den Einsatz von Brennstoffzellenantrieben zu erreichen. Der Einsatz von Benzin als Kraftstoff für Brennstoffzellenantriebe mit Benzinreformer an Bord würde bestenfalls zu gleichem Primärenergieverbrauch und globalen Emissionen wie beim Benzinmotor führen, nur das System wäre ungleich aufwendiger. Knappe globale Vorteile sind erkennbar bei Nutzung von Wasserstoff aus Erdgas, wenn Druckspeicher an Bord eingesetzt werden. Dies in Kombination mit der totalen lokalen Schadstoffemissionsfreiheit des Brennstoffzellensystems läßt die Anwendung auch mit fossilem Wasserstoff für Busse attraktiv erscheinen, wenn das Problem der Infrastruktur für die Wasserstoffversorgung lösbar ist. Für Pkw ist das Speicherungsproblem an Bord nur mit Flüssigwasserstoff an Bord oder Methanoltank und Reformier an Bord zu lösen, falls die Reformier die hier angenommene spezifische Masse und spezifisches Volumen in der Praxis erreichen würden. In beiden Fällen ist aber der Verbrauch der fossilen Energieresourcen und der globale Ausstoß an Treibhausgasen nicht niedriger als bei der herkömmlichen Anwendung der fossilen Energien.

Der Kraftstoff, welcher der Brennstoffzelle zugeführt werden soll, muss aus regenerativen Energien stammen und seine Infrastruktur der Produktion und Verteilung muss mit dem höherrangigem Ziel gekoppelt sein, fossile Energiequellen ersetzen oder schonen zu wollen. Nur in diesem Fall können Wasserstoff oder Biokraftstoffe alternativ zu den Verbrennungsmotoren vorteilhaft mit Brennstoffzellenantrieben genutzt werden.

In diesem Sinne ist die spezielle Suche nach dem „Kraftstoff der Zukunft“ im Rahmen des fossilen Energieversorgungssystems (Erdöl-Erdgas) überflüssig. Der Kraftstoff der Zukunft, mit welchem die Brennstoffzellen ihre Vorteile zur Geltung bringen können, wird aus regenerativen Energien stammen müssen.

Es muss abschließend bemerkt werden, dass diese Aussage nur für den Verkehrssektor, d.h. nur für Brennstoffzellenantriebe gilt. Für die stationären Anwendungen der Brennstoffzellen zur Elektrizitätserzeugung und für die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme ist die Situation auch im Rahmen der fossilen Energiewirtschaft anders. Die Vorteile für die Anwendung von Brennstoffzellen ergeben sich hier hauptsächlich aus zwei Gründen: Erstens ist die gewünschte Endenergie Elektrizität (und nicht mechanische Energie wie im Verkehrssektor) und zweitens kann die Brennstoffzelle konstant im Bereich des maximalen Wirkungsgrades betrieben werden, weil Laständerungen (wie die extreme Laständerungen im Fahrzyklus) hier entfallen. Schließlich sind die Probleme der Massenminimierung und der Kraftstoffspeicherung bei stationären Anwendungen nicht wie bei Kraftfahrzeugen relevant.

10. Anhang: Zu den analytischen Beziehungen zwischen den Hauptparametern

Die Diskussion zu alternativen Antriebssystemen und zu „neuen“ Kraftstoffen für den Verkehr wurde bereits in seit den 70er Jahren („erste Erdölpreis-Krise“) durchgeführt (s. zum Beispiel Studie „neuen Kraftstoffen auf der Spur“, Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1974). Für die Vergleiche der Alternativen wurden in den vergangenen Jahrzehnten vielfältige Berechnungen, von einfachen Berechnungen von Wirkungsgradketten bis zu anspruchsvollen Simulationsprogrammen, bei welchen auch die Lastabhängigkeit aller beteiligten Komponenten in Sekundentakt berücksichtigt wird, angewandt. Es ist selbstverständlich, dass die letzteren genaue Antworten liefern können, allerdings bleibt dabei der funktionale Zusammenhang der relevanten Parameter verborgen, oder er ist nur durch aufwendige Graphikpräsentationen darstellbar. Die einfache aber zuverlässige analytische Verknüpfung der Hauptparameter alternativer Antriebe und der dazugehörigen Kraftstoffe und Primärenergien ist jedoch ebenfalls von Interesse. Sie ist soweit möglich, dass ein guter Überblick zur Parameterrelevanz durch eine einfache parametrische Formelbewertung ermöglicht wird. Die dazugehörigen bezogenen oder spezifischen Werte oder Kennzahlen können aus der Praxis oder doch durch genaue Simulation ermittelt werden. Auch sind solche Werte in einem sicheren Bereich eingrenzbar und werden zumindest in „Fachkreisen“ allgemein akzeptiert.

Solche Beziehungen wurden vom Verfasser im Jahre 1980 entwickelt, um den Einfluss der Masse des Energiespeichers an Bord auf den Energiebedarf von Fahrzeugen mit Wasserstoffmotoren zu ermitteln und um zu zeigen, dass Fahrzeuge mit Metallhydridspeicher mehr Primärenergie verbrauchen als Flüssigwasserstoff-Fahrzeuge, wenn die Reichweite mehr als ca. 300 km betragen soll [Carpetis, 1982]. Später wurden solche Betrachtungen auch auf Batteriefahrzeuge ausgedehnt [Carpetis, 1988]. Sie werden auch in neueren Veröffentlichungen weiter vorgestellt [Yamana K, Furuhamas S., 1998].

Die im folgenden angegebenen Formeln stellen eine Weiterentwicklung dar, welche nicht nur die spezifische Speichermasse und die Reichweite parametrisch erfasst, sondern auch

die Motorisierung (und dadurch die Fahreigenschaften) sowie die spezifische Masse des Antriebes explizit berücksichtigt .

10.1 Die relevanten Parameter und Gleichungen

Die für eine Strecke von R (km) erforderliche Primärenergie E_P (MJ) beträgt

$$E_P = E_T / \eta_{FPD} \quad (1)$$

wobei E_T die für die Strecke R notwendige Energie des an Bord gespeicherten Kraftstoffes ist. Sie beträgt

$$E_T = (M_{ZEM} + M_P) \cdot e_w \cdot R / [\eta_D \cdot (1 - F_A) \cdot F_T] \quad (2)$$

wobei die Faktoren F_T und F_A folgendermaßen definiert sind:

$$F_T = 1 - [e_w \cdot R / (s \cdot \eta_D)] \quad (3)$$

und

$$F_A = P_{SP} \cdot m_D / (\eta_{TM} \cdot F_T) \quad (4)$$

Die Bedeutung der Symbole sowie Beispiele für übliche Wertebereiche werden in der **Tabelle 21** angegeben.

Aus diesen Berechnungen ergeben sich auch die Massen des Antriebssystems, des Speichers und des Fahrzeuges:

- Masse des Antriebes: $M_A = (M_{ZEM} + M_P) \cdot F_A / (1 - F_A) \quad (5)$

- Masse des Speichers an Bord: $M_S = (M_{ZEM} + M_P) \cdot (1 - F_T) / F_T \quad (6)$

- Gesamtmasse: $M_V = (M_{ZEM} + M_P) / [(1 - F_A) \cdot F_T] \quad (7)$

Die Parameter P_{SP} , M_{ZEM} , M_P und R sind „frei wählbar“ und definieren das Fahrzeug unabhängig der Antriebsart.

Im weiteren müssen sowohl die Antriebsart wie auch der zugehörige Kraftstoff, also die Variablen m_D , η_D , η_{TM} (Antriebsstrang) und s, η_{FPD} (Kraftstoff), definiert werden.

Der Wert für e_w liegt zwar in einem relativ engen Bereich, andererseits ist das Resultat direkt von ihm abhängig, so dass eine genauere Berechnung unter Berücksichtigung der Fahrzeugmasse und mit Hilfe der weniger „sensiblen“ Parameter f_A und f_M empfehlenswert ist. Es gilt nämlich:

$$e_w = f_A / M_V + f_M \quad (8)$$

$$\text{wobei } M_V = (M_{ZEM} + M_P) / [(1 - F_{A0}) \cdot F_{T0}]$$

$$\text{mit } F_{T0} \approx 1 - [0.3 \cdot 10^{-3} \cdot R / (s \cdot \eta_D)] \text{ und } F_{A0} = P_{SP} \cdot m_D / (\eta_{TM} \cdot F_{T0})$$

in erster Näherung eingesetzt werden kann, wobei mit einigen Iterationen ausreichend genaue Werte für e_w und M_V berechnet werden können.

Tabelle 21: Erklärung der Symbole der Gleichungen 1-10

Symbol	Einheit	Beschreibung	Wertbereich	Bemerkungen
P_{SP}	kW/kg	Geforderte spezifische Antriebsleistung am Rad (bez. auf Testmasse)	$30 \cdot 10^{-3}$ -?	30 kW/Tonne gesetz. Min. in USA 45 kW/Tonne bei „massiger“ Pkw-Motorisierung gegenwärtig üblich
M_{ZEM}	kg	Leermasse ohne Antrieb (ZEM)	650-850	typisch für Pkw
M_P	kg	Nutzlast	75-150	typisch für Pkw
m_D	kg/kW	Spezifische Masse des Antriebstranges	2-10	bezogen auf die Leistung des Hauptaggregates (s. Tab. 8, 9)
s	MJ/kg	Spezifischer Energieinhalt des Tanks	0.02 -36	niedrigster Wert bei Batterien, höchster für Benzin (Tab. 14)
e_w	MJ/(kg*km)	mittlere spezifische Fahrtenergie (Rad)	$(0.26-0.30) \cdot 10^{-3}$ (NEFZ) $(0.30-0.35) \cdot 10^{-3}$ (Referenz-FZy.)	Massenbezogen pro km des Fahrzyklus. Siehe Resultate Tab. 15, 16 oder Berechnungsweg weiter unten im Text, Gl (8)-(10).
η_{TM}	–	mittlerer Wirkungsgrad des Antriebstranges ab Welle/Klemme des Hauptaggregates (bei Systemen mit el. Motor inkl. dessen Verlusten)	0.60-0.92	siehe Tabelle 3 für typische Teilwirkungsgrade: $\eta_{TM} = \eta_{TEPTM}$, bzw. für Systeme mit Elektromotor $\eta_{TM} = \eta_{TEPTM} \cdot \eta_{EMOT}$
η_D	–	mittlerer Wirkungsgrad vom Tank bis zum Rad (Fahrzyklusabhängig!)	0.19-0.40	siehe Resultate, z.B. Tabelle 17, oder Tabelle 3 für typische Wirkungsgrade: $\eta_D = \eta_{TOT} / \eta_{FPD}$
η_{FPD}	–	Wirkungsgrad der Herstellung und Verteilung des Kraftstoffs	0.50-0.89	siehe z.B. Tabelle 3
f_A	MJ/km	Bezogene Energie des Luftwiderstands	0.12 (NEFZ) 0.23 (RFZ)	Fahrzyklusabhängig, Werte aus Berechnungen, hier für Pkw. Siehe auch Gl. (9)-(10)
f_M	MJ/(kg*km)	bezogene Energie Rollen/Bremsen	$0.173 \cdot 10^{-3}$ (NEFZ) $0.133 \cdot 10^{-3}$ (Referenz-Fzy.)	Fahrzyklusabhängig, Werte aus Berechnungen, hier für Pkw. Siehe auch Gl. (9)-(10)
R	km	Reichweite	250-700	650 gegenwärtig üblich

Für die Variablen f_A und f_M können die Werte aus der Tabelle oben, zum Beispiel $f_A = 0.12$ und $f_M \approx 0.173 \cdot 10^{-3}$ (für NEFZ), entnommen werden. Diese Variablen können auch genauer berechnet werden, wenn die folgende Werte des Fahrzeuges vorgegeben sind:

c_w , für den Luftwiderstandsbeiwert (für Pkw ≈ 0.3)

c_r , für den Rollwiderstandsbeiwert (üblicher Bereich: 0.008-0.01), und

A , für die aerodynamische Querschnittsfläche (für Pkw $\approx 2 \text{ m}^2$)

Es gilt dann

$$f_A = 0.2 \cdot c_w \cdot A \quad (9)$$

$$f_M = (8,54 \cdot c_r + 0.105) \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

für den NEFZ, beziehungsweise

$$f_A = 0.383 \cdot c_w \cdot A \quad (9a)$$

$$f_M = (8,54 \cdot c_r + 0.065) \cdot 10^{-3} \quad (10a)$$

für den Referenzfahrzyklus (RFZ).

Als Beispiel wollen wir eine solche Berechnung für ein Fahrzeug mit der Basismasse $M_{ZEM} = 750 \text{ kg}$, Motorisierung $P_{SP} = 45 \text{ kW/Tonne}$, Nutzlast $P_P = 75 \text{ kg}$, und Reichweite $R = 600 \text{ km}$ im Fahrzyklus NEFZ für zwei alternative Antriebsarten durchführen. Als solche sollen ein konventioneller (moderner) Antrieb mit Verbrennungsmotor und ein Brennstoffzellenantrieb der Zukunft mit aus Erdgas hergestelltem Druckwasserstoff an Bord betrachtet werden. Für den Brennstoffzellenantrieb wird hier ein sehr optimistischer Wert für die spezifische Masse m_D des gesamten Antriebstranges angenommen, welcher nur um 35 % höher sein soll als dieser beim Antrieb mit Verbrennungsmotor.

Die spezifischen Daten sind:

- Mit Verbrennungsmotor: $m_D = 3.7 \text{ kg/kW}$, $s = 35 \text{ MJ/kg}$, $\eta_D = 0.22$, $\eta_{TM} = 0.9$, $\eta_{FPD} = 0.89$
- Mit Brennstoffzellenantr: $m_D = 5 \text{ kg/kW}$, $s = 5.5 \text{ MJ/kg}$, $\eta_D = 0.34$, $\eta_{TM} = 0.7$, $\eta_{FPD} = 0.65$

Aus den obigen Beziehungen folgt dann

	Kraftstoffverbrauch E_T / R	Primärenergiebedarf E_P / R
Verbrennungsmotor	1.37 MJ/km	1.54 MJ/km
Brennstoffzellenantrieb	1.06 MJ/km	1.63 MJ/km

Die Fahrzeugmassen betragen bei dieser Fahrt 1041 kg bzw. 1386 kg.

In diesem Fahrzyklus ergibt sich also in etwa der gleiche Primärenergiebedarf für beide Alternativen. Weil der Brennstoffzellenantrieb das (im Vergleich zum Erdöl) kohlenstoffärmere Erdgas nutzt, bietet er einen globalen Emissionsvorteil. Ein ernst zu nehmendes Problem bei dieser Anwendung ist jedoch die Unterbringung der Druckspeicher für Wasserstoff in einem Pkw sowie die entsprechende Infrastruktur „Erdgas-Druckwasserstofftankstelle“. Die Anwendung von aus Erdgas hergestelltem Flüssigwasserstoff oder vom Methanol mit Reformer an Bord ist in beiden Fällen mit zusätzlichen Verlusten behaftet, welche den eben festgestellten Vorteil des Brennstoffzellenantriebes zunichte machen. Der Nutzen aus der möglichen bedeutenden Kraftstoffeinsparung mit Brennstoffzellenantrieben (siehe oben, E_T/R) ist nur innerhalb von Energiesystemen möglich, wo beide Alternativen auf den gleichen Kraftstoff zugreifen *müssen*, etwa bei nichtfossiler Energieversorgung. Erst dann (bei gleichem η_{FPD} und gleichem s) entspricht der Vorteil an E_T (Kraftstoffverbrauch) einem globalen Vorteil an E_P (Bedarf an Primärenergie).

10.2 Die Relevanz des auf die Nutzlast bezogenen Wirkungsgrades der Antriebssysteme (oder: die Unzulänglichkeit einfacher Wirkungsgradketten als Vergleichskriterium)

Es ist verständlich, dass bei der Diskussion der energetischen Vorteile der alternativen Antriebssysteme der Begriff des Wirkungsgrades als Synonym für die Effizienz bei der Nutzung der Ressourcen betrachtet wird. Dies mag korrekt sein, solange die Definition des Wirkungsgrades auch adäquat ist. Besonders bei *Energiesystemen* ist jedoch Vorsicht geboten: So ist leicht einzusehen, dass der „tank to wheels“ Wirkungsgrad $\eta_D (= e_w \cdot M_V \cdot R / E_T)$ eines Antriebssystems allein nichts über die globale Energieeffizienz aussagen kann. Es ist wichtig zu betonen, dass auch die zusätzliche Berücksichtigung des „Wirkungsgrades“ η_{FPD} der vorgelagerten Energiekette unzureichend ist: Der resultierende „well to wheels“ Wirkungsgrad, $\eta_{WW} = \eta_D \cdot \eta_{FPD}$, berücksichtigt die Antriebsparameter R , P_{SP} , η_{TM} , s , m_D und ihre Implikationen nicht explizit. Deswegen ist auch dieser Wirkungsgrad (obwohl oft als Kriterium benutzt) allenfalls als erste Näherung für die globale Energieeffizienz von Antriebssystemen zu verstehen.

Die adäquate Definition des Wirkungsgrades muss sich auf die Nutzlast beziehen:

$$\eta_P = M_P / (E_P/R), \text{ d.h.}$$

$$\eta_P = M_P \cdot \eta_D \cdot \eta_{FPD} \cdot (1 - F_A) \cdot F_T / [(M_{ZEM} + M_P) \cdot e_w] \quad (11)$$

Bei dieser Definition (kg (Nutzlast)*m/J, bzw. Ton (Nutzlast)*km/MJ) ist der „well to wheels“ Wirkungsgrad ($\eta_D \cdot \eta_{FPD}$) nur ein Faktor in der Gleichung, die relevanten Antriebsparameter werden durch die Faktoren F_A und F_T und e_w berücksichtigt.

Es ist leicht zu überprüfen, dass das Verhältnis der nutzlastbezogenen Wirkungsgrade nach Gleichung (11) dem umgekehrten Verhältnis des globalen spezifischen Energiebedarfs E_P/R zwei zu vergleichender Antriebssystemen entspricht.

Im Beispiel des vorangegangenen Abschnittes 10.1 lauten die Resultate:

	Verbrennungsmotor	Brennstoffzellenantrieb
Primärenergiebedarf E_P / R	1.54 MJ/km	1.63 MJ/km
η_{WW} ("well to wheels")	0.196	0.221
η_P (Nutzlastbezogen)	0.0488	0.0461

Der nach der „Wirkungsgradkette“ definierte η_{WW} , welcher beim Brennstoffzellenantrieb höher ist, entspricht nicht dem tatsächlichen Energiebedarf. Das Verhältnis der nutzlastbezogenen Wirkungsgrade η_P entspricht hingegen dem Verhältnis des Primärenergiebedarfs (1.63/1.54) der betrachteten Alternativen. Mit anderen Worten, Vergleiche von Wirkungsgraden als Bewertungskriterien sind sinnvoll, wenn diese nach Gleichung (11) definiert sind.

10.3 Personenkraftwagen (Pkw) und die alternativen Antriebsarten: Das Problem der Kraftstoffspeicherung an Bord als Kriterium bei der Implementierung

Die begrenzte Kapazität von Traktionsbatterien ist allgemein bekannt und stellt ein wichtiges Hemmnis bei der Implementierung von Batteriefahrzeugen dar. Jedoch wurde das Problem der Kraftstoffspeicherung an Bord bei Nutzung anderer alternativer Kraftstoffe und Antriebskonzepte für Personenkraftwagen als Entscheidungskriterium bisher in der Literatur weniger beachtet, als es seiner Bedeutung entsprechend notwendig wäre. Es scheint zunächst, dass die Kraftstoffspeicherung an Bord auch bei alternativen Kraftstoffen wie Methanol oder Wasserstoff prinzipiell Stand der Technik ist und entsprechende Probleme durch konstruktive Maßnahmen gelöst werden können. Was übersehen werden kann ist, dass gerade das Problem der Kraftstoffspeicherung an Bord auf globaler Ebene zu energieaufwendigen Lösungen *zwingen* kann, und, dass es bei der Kraftstoffspeicherung an Bord prinzipielle Grenzen gibt, welche einige sonst interessante Antriebskonzepte ernsthaft beeinträchtigen können.

Wir wollen in diesem Abschnitt mit Hilfe der Gleichungen des vorigen Abschnittes 10.1 einige diesbezügliche Zusammenhänge darstellen. Als Beispiel dient auch hier ein Fahrzeug mit der Basismasse $M_{ZEM}=750\text{kg}$, Motorisierung $P_{SP} = 45 \text{ kW/Tonne}$, Nutzlast $P_P = 75 \text{ kg}$ im Fahrzyklus NEFZ. Als Antriebsaggregate werden alternativ der Antrieb mit Verbrennungsmotor oder mit Brennstoffzellenantrieb wie oben beschrieben betrachtet.

Für den Brennstoffzellenantrieb lassen wir, wie in der **Abbildung 25** gezeigt, die spezifische Masse m_D variieren. Das Resultat zeigt nicht nur die Bedeutung dieser Parameter für die resultierende Gesamtmasse des Fahrzeuges, sondern auch, dass für den hier betrachteten Fall der Druckspeicherung das für eine Reichweite von 600 km notwendige Tankvolumen kaum unterzubringen ist: Bei einem Fahrzeug mit $M_V \approx 1,7$ Tonnen Gesamtgewicht (wie die gegenwärtigen Prototypfahrzeuge) würde das Tankvolumen in etwa 325 Liter betragen (der typische „Kofferraum“ heutiger Pkw beträgt ca. 400 l). Hierzu muss noch Folgendes bemerkt werden: Bei einer Fahrzeugmasse von $\approx 1,7$ Tonnen mit der hier vorausgesetzten Motorisie-

runge von 45 kW/Tonne beträgt die aus der Abbildung 25 ablesbare Masse des Brennstoffzellenantriebes ca. 7 kg/kW. Weil aber gegenwärtig die benötigte Antriebsmasse des Brennstoffzellenantriebes bedeutend höher liegt, sind die Prototypfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb entsprechend untermotorisiert und die Reichweite auf ca. 400 km begrenzt.

Für die weiteren Vergleiche verschiedener Kraftstoff- und Speicheroptionen soll die spezifische Masse m_D auf den „zukünftigen“ Wert $m_D = 5 \text{ kg/kW}$ fixiert und die Reichweite R variiert werden.

Die Resultate der **Abbildung 26a** zeigen den spezifischen Kraftstoffverbrauch E_T und den Primärenergiebedarf E_P , die Resultate der **Abbildung 26b** die Fahrzeugmasse M_V und das minimale Tankvolumen V_S , welche für eine Reichweite R notwendig sind. In der Legende der Abbildungen bezeichnet die zweite Buchstabengruppe die Antriebsart (FC für Antrieb mit Brennstoffzellen, IC mit Verbrennungsmotor). In Klammer wird der jeweilige Kraftstoff bezeichnet. Flüssige Kraftstoffe sind ausser Benzin (Be) für den Verbrennungsmotor, Methanol (Me) und Flüssigwasserstoff (LH) für den Brennstoffzellenantrieb. Neben komprimierten Wasserstoff (CH) betrachten wir hier auch Metallhydridspeicher (MH) an Bord der Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb. Es ist ersichtlich, dass mit Kraftstoffen fossilen Ursprungs der Antrieb mit Verbrennungsmotor den niedrigen Primärenergiebedarf, Fahrzeugmasse und Tankvolumen benötigt. Wichtig ist hier die Tatsache, dass der Primärenergiebedarf des Brennstoffzellenantriebes nicht wesentlich höher ist, *wenn* der Wasserstoff unter Druck in geeigneten Tanks an Bord gespeichert wird (Abbildung 26a). Aus der Abbildung 26b ist jedoch zu ersehen, dass er schon für eine Reichweite von 400 km ein Tankvolumen in der Größenordnung von 200 l benötigt, bei 600 km knapp 300 l. Dies erklärt, warum diese vom energetischen Standpunkt günstige Lösung (CH) für Pkw kaum in Frage kommt bzw. in keinem Prototyp-Fahrzeug in Erwägung gezogen wurde. Methanol und Flüssigwasserstoff bieten keine so gravierenden Nachteile bezüglich des Speichervolumens (wobei bei Methanol noch das Volumen des Reformers an Bord zu berücksichtigen ist!), in beiden Fällen aber ist der Primärenergiebedarf bedeutend höher. Mit den massenreichen Metallhydriden (MH) ist das benötigte Tankvolumen zwar kleiner als bei Druckspeicherung von Wasserstoff, die Fahrzeugmasse aber steigt schnell mit der Reichweite. Der höhere Kraftstoffverbrauch bewirkt schließlich, dass sich der Primärenergiebedarf für die üblichen Reichweiten dem von Flüssigwasserstoff oder Methanol angleicht.

Folgende Bemerkung ist im übrigen vom „exergetischem“ Standpunkt nicht uninteressant: Der Versuch den Wasserstoff, der an Bord für die Brennstoffzelle benötigt wird, in flüssiger Form (kryogen oder chemisch gebunden) zu betanken, ist mit Verlusten behaftet, welche von der Methode, Wasserstoffverflüssigung oder Methanolbereitstellung+Reformierung an Bord, weitgehend unabhängig sind (Abbildung 26a). Auch der Versuch, die Reformierung an Bord zu vermeiden (Direct Methanol FC) ändert an der exergetischen Situation nichts: der Wirkungsgrad der DMFC wird entsprechend kleiner.

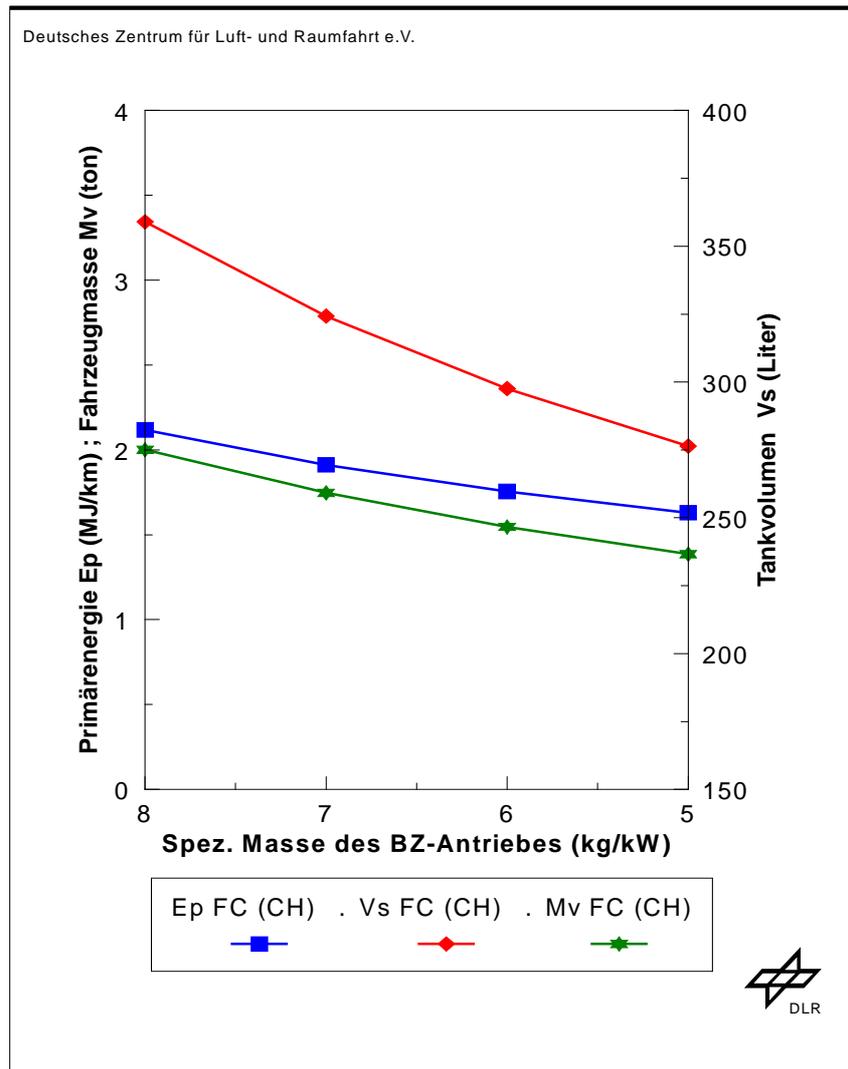


Abb. 25. Primärenergiebedarf E_p , Fahrzeugmasse M_v und Tankvolumen V_s als Funktion der auf die Stackleistung bezogenen Masse des Brennstoffzellenantriebes (FC) mit komprimiertem Wasserstoff (CH) aus Erdgas an Bord (Pkw). Wasserstoffspeicherung in Hochdrucktanks ist energetisch bedeutend günstiger als die Alternativen (siehe Abbildungen 26 und 27) jedoch ist das Speichervolumen kaum akzeptabel: Es beträgt bestenfalls 70% des typischen „Kofferraumvolumens“ eines Pkw.

Fig. 25. Primary energy demand E_p , vehicle mass M_v and tank volume V_s of a passenger car as a function of the stack power related specific mass of the fuel cell drive system (FC). The fuel is compressed hydrogen (CH) from natural gas. High pressure storage on board is from the energetic point of view much more advantageous than the alternatives (liquid hydrogen, Methanol, see Figures 26 and 27), but the volume is a serious problem for passenger cars: The storage volume would be at least 70% of the typical „trunk-volume“ of a passenger car.

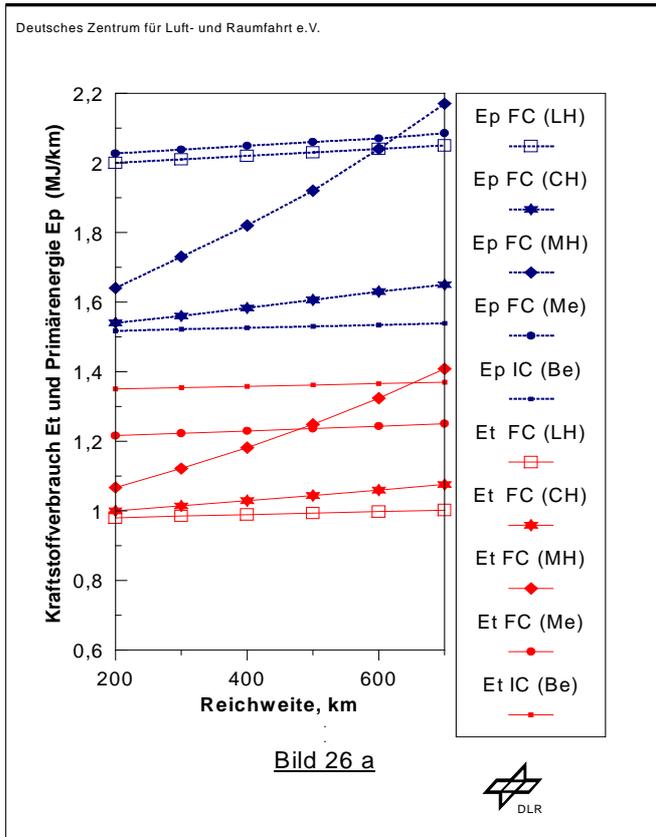


Abb. 26 (a, b). Vergleich zukünftiger Fahrzeugkonzepte (Pkw): Kraftstoffverbrauch E_T und Primärenergiebedarf E_P werden in **Abb. 26a** (oben), Fahrzeugmasse M_V und Tankvolumen V_S werden in **Abb. 26b** (unten) als Funktion der Reichweite R dargestellt. Die auf die Stackleistung bezogene Masse des Brennstoffzellenantriebes ist hier auf den zukünftigen Wert $m_D = 5 \text{ kg/kW}$ fixiert. Wasserstoff und Methanol (Me) sind fossilen Ursprungs (aus Erdgas). Als Wasserstoffspeicher an Bord werden Druckspeicher (CH), Flüssigwasserstoffspeicher (LH) oder Metalhydridspeicher (MH) in Betracht gezogen. Zusätzlich zu den Optionen mit Brennstoffzellenantrieben (FC) wird auch der Antrieb mit Verbrennungsmotor (IC) mit Kraftstoff aus Erdöl (Be) dargestellt.

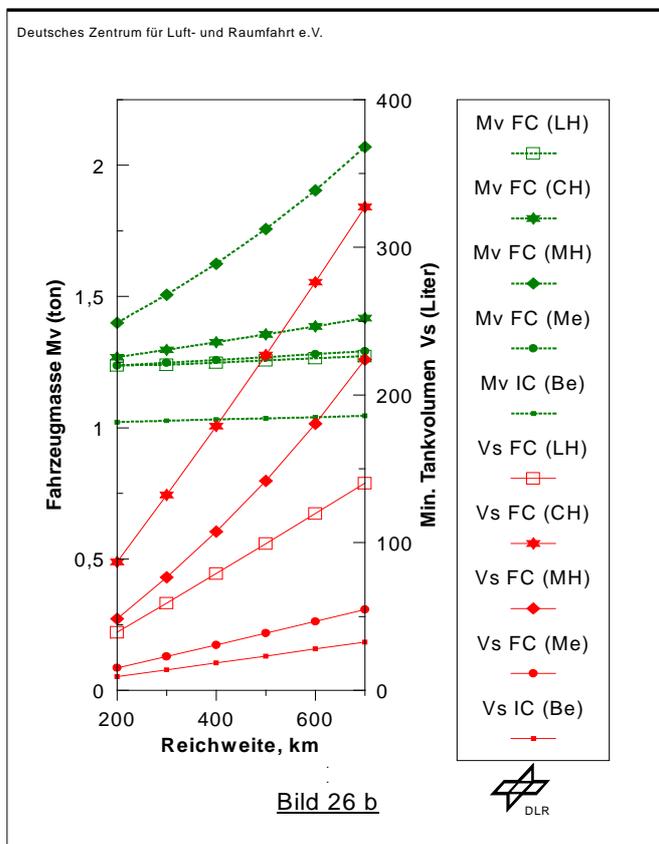


Fig. 26 (a, b). Comparison of future driving concepts (passenger cars): fuel consumption E_T and primary energy demand E_P are depicted as a function of the range R in the upper figure of this page, **Fig. 26a**, vehicle mass M_V and tank volume V_S are depicted in **Fig. 26b**. The stack power related specific mass of the fuel cell drive system (FC) is fixed to the „future“ value $m_D = 5 \text{ kg/kW}$. The fuel options are based on fossil resources (natural gas) and are denoted in the legend by the characters in parentheses. They are liquid hydrogen (LH), compressed hydrogen (CH), metal hydride (MH), and methanol (Me). In both figures data for the equivalent drive system using IC-drive (IC) with oil-based fuel (Be) are also depicted.

In der **Abbildung 27a** werden die gleichen Fahrzeugantriebe wie in der Abbildung 26a zum Vergleich gestellt, wobei im Rahmen eines zukünftigen nichtfossilen Energieversorgungssystems elektrolytisch hergestellter Wasserstoff als Kraftstoff dienen soll. Die zu seiner Herstellung benötigte elektrische Energie soll als „Primärenergie“ beim energetischen Vergleich betrachtet werden. Die Resultate der **Abbildung 27b** zeigen für diesen Fall die Fahrzeugmasse M_V und das minimale Tankvolumen V_S , welche für eine Reichweite R notwendig sind. An die Speicherungsmöglichkeiten von Wasserstoff an Bord hat sich für den Brennstoffzellenantrieb im Vergleich zur Abbildung 26b zwar nichts geändert, der Vergleich aber zu der Alternative des Antriebes mit Verbrennungsmotor fällt hier eindeutig günstiger aus, weil für den letzteren die gleichen Speicherungsarten zur Verfügung stehen, wobei aber grundsätzlich mit höherem Wasserstoffverbrauch (niedrigeres η_D) zu rechnen ist.

Ein akzeptables Volumen bieten im Falle des Brennstoffzellenantriebes bei Reichweiten von bis zu ca. 500 km sowohl der Flüssigwasserstofftank wie auch der Metallhydridspeicher. Nach Abbildung 27a ist der Energieverbrauch mit Metallhydridspeicher allerdings schon bei dieser Reichweite nahezu so hoch wie mit Flüssigwasserstoff (Angleich bei 600 km).

Wegen des höheren Verbrauchs beim Antrieb mit Verbrennungsmotor gleicht der Energiebedarf des Fahrzeuges mit Metallhydridspeicherung dem des Antriebes mit Flüssigwasserstoff schon bei einer Reichweite $R \approx 500$ km (Abbildung 27a), und das Volumen des Metallhydridspeichers übersteigt schon bei $R=500$ km die 200 l Grenze (Abbildung 27b). Aus diesen Gründen bietet die Nutzung von Metallhydridspeichern in wasserstoffangetriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor weniger Vorteile gegenüber der Lösung mit Flüssigwasserstoff an, als dies bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb der Fall ist. In wasserstoffangetriebenem Pkw mit Verbrennungsmotor übersteigt das Tankvolumen für Druckspeicherung von Wasserstoff schon bei 500 km die 300 l Grenze und wird in der Abbildung 27b nicht dargestellt.

In dem hier betrachteten Energieversorgungssystem mit ausreichendem Angebot an Elektrizität aus nichtfossilen Energiequellen ist die Konkurrenzfähigkeit der Batteriefahrzeuge nicht zu unterschätzen. Aus der Abbildung 27a wird ersichtlich, dass mit diesen der minimale Energiebedarf zu erzielen ist. Wie jedoch erwartet, steigt nicht nur das benötigte Volumen des Batteriespeichers sondern auch die Fahrzeugmasse sehr steil mit steigender Reichweite an. Der begrenzende Faktor für Reichweiten höher als $R \approx 300$ km ist nicht so sehr das Batterievolumen (wenn man bedenkt, dass das „Brennstoffzellenvolumen“ dafür auch zur Verfügung stünde), sondern die Fahrzeugmasse: Schon bei dieser Reichweite (Abbildung 27b) wäre die Gesamtmasse für ein Fahrzeug mit $M_{ZEM} = 750$ kg nicht vertretbar.

10.4 Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellenantriebes für Pkw als Funktion der Antriebsmasse und Vergleich zum Verbrauch von wasserstoffangetriebenen Pkw mit Verbrennungsmotor zur Ermittlung des „break-even“-Wertes

Für den Vergleich soll hier die Leermasse ohne Antrieb und die Motorisierung des Referenzfahrzeuges zugrunde gelegt werden. Der Kraftstoff für beide Alternativen soll Flüssigwasserstoff (im Rahmen eines zukünftigen nichtfossilen Energieversorgungssystems) sein.

Für beide Antriebsarten gilt: $M_{ZEM}=800$ kg, $M_P=150$ kg, $P_{SP}=0.050$ kW/kg

Die weiteren spezifische Daten sind:

- Mit Verbrennungsmotor: $m_D = 3.7$ kg/kW, $s = 9$ MJ/kg, $\eta_D = 0.25$, $\eta_{TM} = 0.9$
- Mit Brennstoffzellenantrieb: $s = 9$ MJ/kg, $\eta_D = 0.35$, $\eta_{TM} = 0.7$

Die spezifische Masse des Brennstoffzellenantriebes soll als Variable im Bereich von 10 bis 5 kg/kW variiert werden. Das Resultat wird in der **Abbildung 28** gezeigt. Der „break-even“-Wert, für welchen der Wasserstoffverbrauch des Brennstoffzellenantriebes niedriger als der Verbrauch des Antriebes mit Wasserstoffmotor wird, liegt bei etwa 7 kg/kW. Für die Resultate der Vergleiche im vorliegenden Bericht wurde die spezifische Masse des Brennstoffzellenantriebes bedeutend niedriger als dieser Wert angenommen.

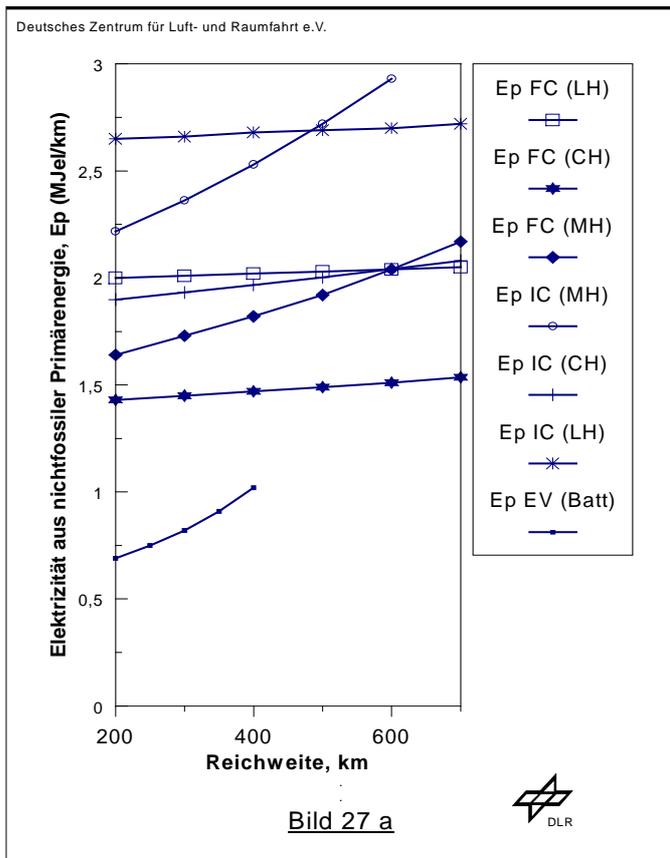


Abb. 27 (a, b). Vergleich zukünftiger Antriebsoptionen (Pkw) im Rahmen eines nichtfossilen Energiesystems. Wasserstoff wird durch Elektrolyse bereitgestellt.

Der Primärenergiebedarf E_p (hier nichtfossile Elektrizität) wird in **Abb. 27a** (oben), die Fahrzeugmasse M_v und das Tankvolumen V_s werden in **Abb. 27b** als Funktion der Reichweite R dargestellt.

Für die Wasserstoffspeicherung an Bord stehen die gleichen Speichermethoden wie in Abbildung 26 (LH, CH, MH) zu Verfügung, wobei in diesem Energieversorgungssystem auch der Verbrennungsmotor (IC) mit Wasserstoff angetrieben wird. In diesem Fall ist zu erwarten, dass die energetische Effizienz des Brennstoffzellenantriebes (mit $m_D = 5 \text{ kg/kW}$) gegenüber dem Verbrennungsmotor auch global überlegen wird. Die zur Verfügung stehende nichtfossile elektrische Energie kann mit der höchsten Effizienz mit Batteriefahrzeugen genutzt werden (Abb. 27a), wobei aber für Reichweiten von mehr als ca. 300 km die Volumen- und Massenprobleme des Speichers eminent werden (Abb. 27b).

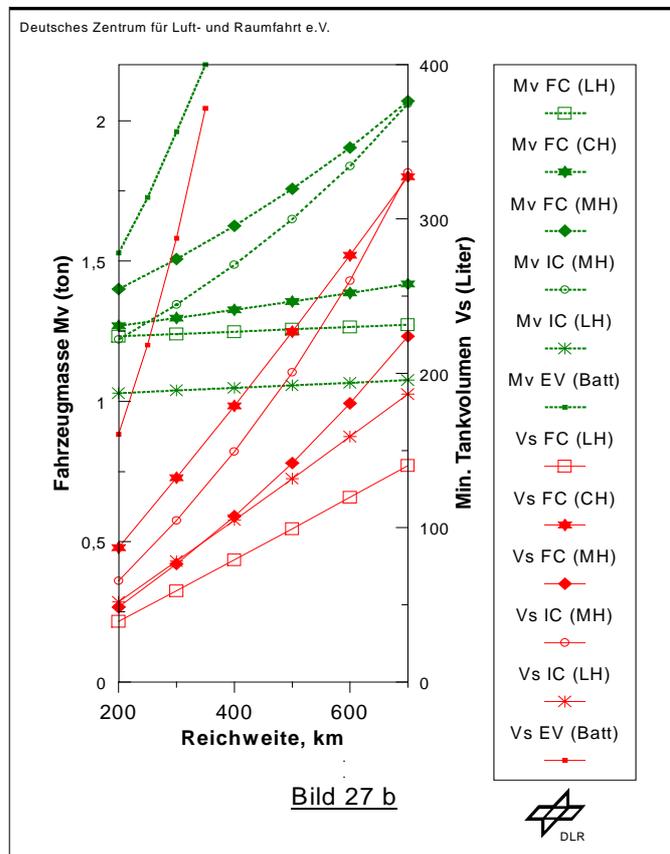


Fig. 27 (a, b). Comparison of future driving concepts (passenger cars) in a future energy system with non fossil primary sources:

the primary energy demand E_p (here: non-fossil electricity) is depicted in the upper of this page, **Fig. 27a**, vehicle mass M_v and tank volume V_s are depicted in the **Fig. 27b** as a function of the range R .

Hydrogen is produced by electrolysis (non-fossil electricity). The options for hydrogen storage on board are the same as in Figure 26 (LH, CH, MH), the difference being that also the drive system with IC-engine is hydrogen fueled. In this case the fuel cell drive (here with $m_D = 5 \text{ kg/kW}$) is globally more efficient and can clearly compete with the former. Nevertheless, the available non-fossil electricity can be used with the highest efficiency in electric cars with battery storage (Fig. 27a). Unfortunately, as shown in Figure 27b, the volume and mass problems of the on board electricity storage are to be considered prohibitive for ranges above about 300 km.

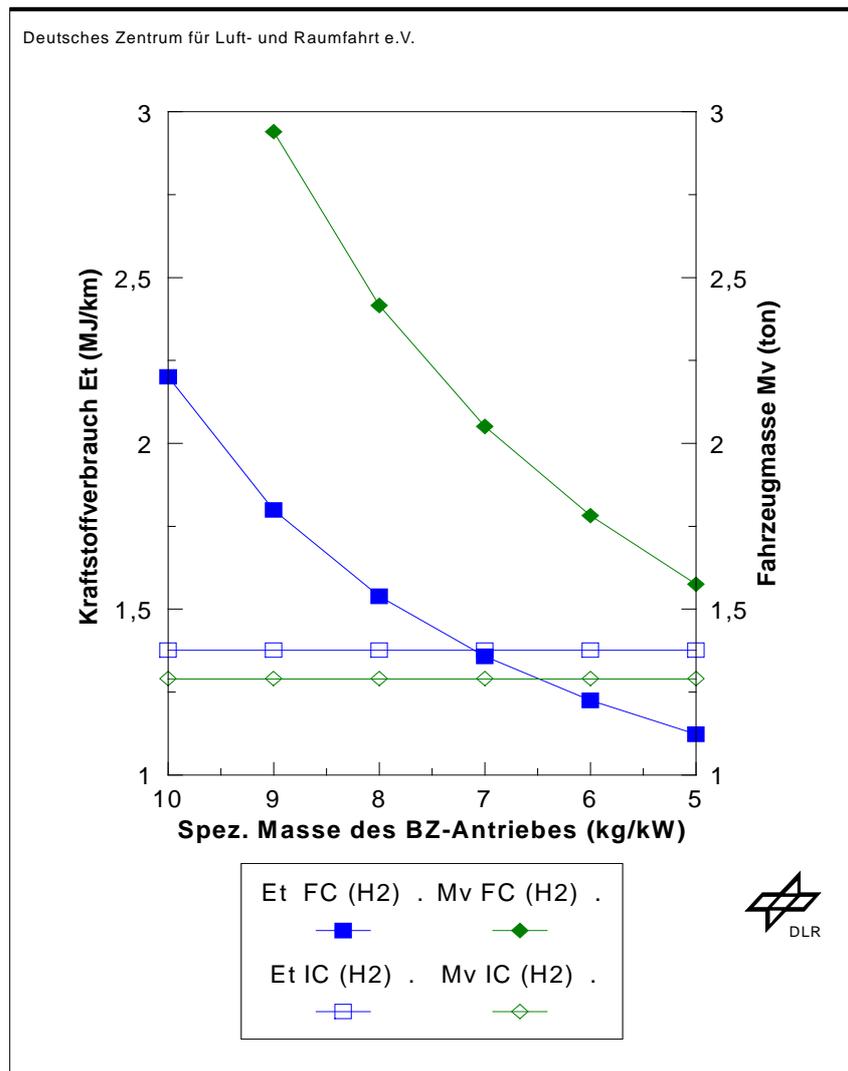


Abb. 28. Vergleich des Wasserstoffverbrauchs E_T und der Fahrzeugmasse M_V eines zukünftigen Pkw beim Antrieb mit Verbrennungsmotor (IC) oder Brennstoffzellensystem (FC). Für beide Fahrzeugkonzepte ist die Fahrzeugmasse ohne Antrieb $M_{ZEM}=800$ kg, die Nutzlast $M_P=150$ kg, die Motorisierung $P_{SP}=50$ kW/Tonne und die Reichweite $R=500$ km. Das Tanksystem ist in beiden Fällen das gleiche (im gezeigten Fall beträgt der spez. Energieinhalt des Tanks $s=9$ MJ/kg). Die Daten für den Brennstoffzellenantrieb werden als Funktion der spezifischen Antriebsmasse m_D (Brennstoffzellenstack, Wärme-, Luft- und Leistungsmanagement, Elektromotoren) eingetragen. Der „break-even“ Wert für niedrigeren Wasserstoffverbrauch mit dem Brennstoffzellenantrieb beträgt $m_D \approx 7$ kg/kW.

Fig. 28. In a future energy system with hydrogen supply for cars both drive systems with internal combustion engine (IC) or fuel cell drive (FC) use the same fuel and tank system. The Figure compares the hydrogen consumption E_T and the total car mass M_V for both cases. The results are for a car with glider mass $M_{ZEM}=800$ kg, payload $M_P=150$ kg, motorization $P_{SP}=50$ kW/Ton and range $R=500$ km. Other fixed values are listed in Section 10.4 of the Annex. The specific mass m_D of the fuel cell drive (including stacks, air-, water- and power management, electric drive motor etc.) is varied from 10 to 5 kg/kW. The break-even point for lower hydrogen consumption with fuel cell drive turns out to be $m_D \approx 7$ kg/kW in this case.

Zitierte Literatur

Hybrid-Fahrzeuge

TÜV Automotive GmbH, Unternehmensgruppe TÜV Süddeutschland, 1997

Aceves S.M., Smith J.R.

Hybrid and Conventional Hydrogen Engine Vehicles that Meet EZEVE Emissions
SAE Paper 970290 Februar 1997 (UCRL-JC-125891 Preprint)

Aceves S.M., Smith J.R.

Lean-Burn Hydrogen Spark-Ignited Engines: The mechanical Equivalent to the Fuel Cell
UCRL-JC-124095 (Preprint August 1996) and
Proceedings ASME Internal Combustion Engine 1996 Fall Conference

Amankwa K.A.G., Noh J.S., Schwarz J.A.

Hydrogen Storage on Superactivated Carbon at Refrigeration Temperatures
Int. J. Hydrogen Energy, Vol 14, No 7, pp. 437-447, 1989

Auinger H., Kracke G., Neuhaus W.

Wirkungsgrad elektrischer Maschinen - Möglichkeiten und Grenzen für eine Verbesserung
Siemens Energietechnik 2 (1980) Heft 7, S. 271-276

Barrett J.

Low pressure gas locked in Carbon
Eureka transfers Technology, April 1995, pp. 24-25

Born P.

Energie-, CO₂-, und Arbeitsaufwand zur Herstellung von Gütern
BWK, Bd. 44 (1992) Nr. 5 - Mai

Carpetis C.

Comparison of the Expenses Required for the On-Board Fuel Storage Systems of Hydrogen
Powered Vehicles
Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 7 (1982), No 1, pp. 61-77

Carpetis C.

Storage, Transport and Distribution of Hydrogen
in „Hydrogen as an Energy Carrier“ (C.-J. Winter, Nitsch J., Eds.) Springer Verlag, Berlin,
1988

Carpetis C.

Energie- und Schadstoffbilanzen von Elektrofahrzeugen mit Batterien und/oder Brennstoff-
zellen-Antrieben im Vergleich zu Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, DLR - 97 44417 IB 404
(STB-Bericht Nr. 16), Dezember 1997

Cook T.L., Horne D.B.

Low Pressure Adsorbed Natural Gas Vehicle Demonstration
Proceedings 20th World Gas Conference, 1997, pp. 165-179 (KP-03)

Drake F.-D.

Bestimmung des kumulierten Energieraufwands und der kumulierten CO₂-Emission mit Hilfe des energetischen Input-Output-Analyse

BWK Band 48 (1996) Nr 8, S. 33-43

Ebersperger R., Mauch W., u.a.

Wieviel Energie braucht ein PKW?

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 48. Jg. (1998) Heft 5, S. 323-329

Engineering Systems Management, Inc.

Life-Cycle Cost Analysis of Conventional and Fuel Cell/Battery powered Urban Passenger Vehicles

U.S. Department of Energy, DOE/CH/10491-1, Nov. 1992

Environmental Resources Limited

The monetary evaluation of environmental costs in the energy sector

Report for the Commission of the European Communities, DG XII. London, 1991

J. Ferrall, T. Rehg, L. Schipper

Parametric Analyses for an Air-Reformate Proton Exchange Membrane (PEM) fuel Cell Vehicle Application

Proceedings 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, Nov. 16-19, 1998, pp 667-670

Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV)

Brennstoffzellen-Studie

Vorhaben Nr. 686, Heft 657, Frankfurt, 1998

Garrett K.

Fuelling Vehicles with adsorbed Natural Gas

Design Engineering June 1992, pp. 22-26

Gutt H.-J., Grüner A.

Neuartige Energie-Sparpotentiale elektrischer Antriebssysteme

ELEKTRIE, Berlin 52 (1998) Heft 7-9, S. 213-222

Höhlein B.

Energy Balance in mobile PEM Fuel-Cell Applications

Proc. 4. European Conference „Energy Markets, What`s New?“, Berlin 9-10 September 1998

Hörmandiger G., Lucas N.J.

Is Clean enough? The influence of Environmental Externalities on Markets for Fuel Cells in Transport

Transpn. Res.-D. Vol 1, No 1, pp. 63-78, 1996

Kâgeson P.

Getting the Prices Right. A European Scheme for making Transport Pay ist True Costs

European Federation for Transport and Environment (T&E) Stockholm, Sweden, 1993

Krüger R., Fahl U., Voß A.

Alternative Kraftstoffe und Antriebe- ein Weg zur Minderung der Kohlenwasserstoffemissionen?

ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998) 1, S. 26-33

Lin Y.C., Huff G.A.

Absorbed Natural Gas (ANG): Fuel of the Future

Proceedings SAE Future Transportation Technology Conference (Paper 931821), 1993, pp. 189-199

Martin P.E.

The External Costs of Electricity Generation

Paper for 20th ENER Joint Seminar, The European Network for Energy Economics Research, 1995

Matranga K.R., Myers A.L., et al.

Storage of Natural Gas by Adsorption on Activated Carbon

Chemical Engineering Science, Vol 47 No 7, 1992, pp. 1569-1579

Nevin M.

Low Emission Technologies - The Next Generation

FT Automotive Environment Analyst, Issue 57, October 1999, pp. 21-23

Ogden J., Kreutz T.G., Steinbugler M.

Fuels for Fuel Cell Vehicles: Vehicle Design and Infrastructure Issues

SAE Technical Paper Series No 982500, Intern. Fall Fuels and Lubricants Meeting, San Francisco, October 19-22, 1998

Pehnt M.

Brennstoffketten

in „Analyse und Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen in Industrie und öffentliche Stromversorgung“

Gutachten für das Büro für Technikfolgenabschätzung im Deutschen Bundestag, DLR, Stuttgart, 1999

Peschka W.

Hydrogen: The Future Cryofuel in Internal Combustion Engines

Int. J. Hydrogen Energy, Vol 23, No 1, pp. 27-43, 1998

Peschka W.

Liquid Hydrogen - Fuel of the Future

Springer Verlag, Wien, 1992

Pott E.

Energieflußmanagement zur Kraftstoffverbrauchs-, Emissions- und Heizkomfortoptimierung

ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998) 7/8, S. 480-488

Quissek F., Lück P., Köhle S.

Rahmenbedingungen und Zukunft des E-Mobils aus der Sicht eines Herstellers
VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden,
17 und 18 Februar 1998, S. 171-183.

Thomas C.E., James B.D., Lomax F.D., Kuhn Ira Jr

Fuel Options for the fuel cell vehicle: hydrogen, methanol, or gasoline?
International Journal of Hydrogen Energy 25 (2000) pp. 551-567

Umweltbundesamt

Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen
Reihe TEXTE des Umweltbundesamtes Nr. 33/99, 1999

Yamane K. and Furuhamma S.

A Study on the Effect of the Total Weight of Fuel and Fuel Tank on the Driving Performan-
ces of Cars
Int. J. Hydrogen Energy, Vol.23, No 9, pp.825-831,1998

Literaturauswahl

Konzepte für besonders schadstoffarme Automobile
Energie, Jahrg. 47, Nr. 3, März 1995

Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen
Abschlußbericht (Kurzversion), Deutsche Automobilgesellschaft mbH (DAUG), Braun-
schweig

Klimatische Differenzen
Traffic Tech 1(1997) S.24-26

Dedicated Engines
Traffic Tech 1(1997) S. 27-28

Energie und Verkehr
Energie Spektrum, 13. Jahrgang (1998) Heft 12, S. 43-53

Energy-Efficient Vehicles for a Cleaner Enviroment
DOE - Office of Advanced Automotive Technologies R and D Plan, DOE/RO/2065, 1997

Aceves S.M., Smith J.R.

A Hybrid Vehicle Evaluation Code and ist Application to Vehicle Design
SAE Paper 950491, 1995

Aceves S.M., Smith J.R.

Optimum Flywheel Sizing for Parallel and Series Hybrid Vehicles
UCRL-JC-126259 (Preprint December 1996) and
Proceedings World Car Conference 1997, Riverside, California January 1997)

Amphlett J.C., Baumert R.M., e.a.

A Performance model for PEM Fuel Cells
Paper 93241 presented at the 28th IECEC, 1993, Proceedings pp 1.1215-1.1220

Amphlett J.C., Mann R.F., ea. (auch Rodrigues und Salvador !!)

Simulation of a 250 kW diesel fuel processor/PEM fuel cell system
Journal of Power Sources 71 (1988) pp. 179-184

An F., Ross M.

A model of fuel economy with applications to driving cycles and traffic management
Transportation Research Record, 1416 (1993), pp105-114

An F., Ross M.

A model of fuel economy and Driving Patterns
Society of Automotive Engineers, Nr. 930328, Warrendal, PA, (1996)

Angloher J., Geiger B.

Elektro-PKW mit Hochtemperatur-Batterien- Eine Energetische Analyse
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47. Jg. (1997) Heft 6, S. 332-337

Appleby A.J.

The Electrochemical Engine for vehicles
Scientific American, July 1999, pp. 58-63

Arbeitskreis Elektrische Fahrzeuge der VDEW (Verein Deutscher ElektrizitätsWerke)

Mit Strom mobil
VDEW-Verlag, Frankfurt, 1996

Barbir F. (Energy Partners)

Control Strategy of a Vehicular fuel Cell Power System
Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, 23-28 June 1996

Barbir F., Gomez T.

Efficiency and Economics of Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells
Int. Journal Hydrogen Energy, Vol. 21, No 10 (1996), pp 891-901

Berichte aus EVS 14 (EV Symposium, 1998):

Kohei Suzuki et al.: Development of the Nissan ALTRA-EV
Iwao Mitsuishi et al.: Progress of the Research and development of Lithium Secondary Batteries ...
Hideaki Horie et al.: Development of a high Power Lithium-Ion Battery System for HEV
Tetsuhiro Ishikawa et al.: Development of a Traction Inverter with Charging Function
Claude Letourneau et al.: Lithium Polymer Battery Pack Design

Bezler H., Traub K.-H.

Der elektrische Einzelradantrieb im Stadtlinienbus

„Der Nahverkehr“ 6/1998, S.23-30

Birnbreier H.

Energetische und ökologische Bilanzierung des Einsatzes eines Elektro-Omnibusses auf Rügen

ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100 (1998) 7/8, S. 510-517

Blümel H., Wein K.

Kosteneffizienz alternativer PKW-Antriebe

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46. Jg. (1996) Heft 3, S. 164-170

Boeckh M.

Die Wasserstoff-Ära: eine Vision verblaßt

Bild der Wissenschaft 5/1997, S. 32-36

Bonz M., Bezler H.

Stuttgarter Busverkehr setzt auf dieselektrischen Antrieb

„Der Nahverkehr“, 5/1997, S. 40-42

Borroni-Bird Chr.

Fuel cell commercialization issues for light-duty vehicle applications

Journal of Power Sources 61 (1996) pp. 33-48

Braune und Russ (Automobile Realisation)

Monovalente Erdgasfahrzeuge mit optimierter Motorentchnik und Tankanordnung

ASUE Dokumentation „Innovationen für einen rationellen und umweltschonenden Erdgaseinsatz“, 1998

Broka K., Ekdunge P.

Oxygen and hydrogen permeation properties and water uptake of Nafion 117 membrane and recast film for PEM fuel cell

Journal of Applied Electrochemistry 27 (1997) S. 117-123

Burkner W., Günther B.

Energiebilanz für ein Elektrofahrzeug

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 41.Jg.(1991)Heft 1/2 S.28-33

Bußman W.

Rasante Fortschritte - Brennstoffzellen in Elektrofahrzeugen: NECAR II liegt in Führung

Energiespektrum 11 Jg. ,7+8/1996, S.66-69

Büttner B., Foellmer T. et al.

Brennstoffzellen im Vergleich

BWK Bd. 0 (1998) Nr. 5, S. 11-19

Carpetis C.

Untersuchung zur Bewertung von Brennstoffzellen-Antrieben in Fahrzeugen

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, STB-Bericht Nr. 13, Mai 1996

Carpetis C.

Bewertung von Brennstoffzellen-Antrieben in Fahrzeugen im Hinblick auf Energie- und Schadstoffbilanz

Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, DLR - 97 44417 IB 401 (STB-Bericht Nr. 14), April 1997

Carpetis C., Nitsch J.

Neue Antriebskonzepte im Vergleich

Motortechnische Zeitschrift (MTZ) 60. Jahrgang, Heft Nr. 2, Februar 1999, S. 94-99

Vortrag: „Motorische Verbrennung- aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze“, Essen, 1999

Chalk S.G., Milliken JoAnn, et al.

The US Department of Energy - investing in clean transport

Journal of power Sources 71 (1998) pp. 26-35

Ciancia A., Pede G. Brighigna M., Perrone V.

Compressed Hydrogen Fuelled Vehicles: Reasons of a Choice and developments in ENEA

Int. Journal Hydrogen Energy, Vol. 21, No 5 (1996), pp 397-406

Cleghorn S.J.C., Ren X., Springer T.E. et al.

PEM fuel cells for transportation and stationary power generation applications

Int. J. Hydrogen Energy, Vol 22, No 12, pp. 1137-1144, 1997

Contreras A., Yigit S., et al.

Hydrogen as Aviation Fuel: A comparison with Hydrocarbon Fuels

Int. J. Hydrogen Energy, Vol 22, No 10/11, pp 1053-1060, 1997

Cruickshank J., Scott K.

The degree and effect of methanol crossover in the direct methanol fuel cell

Journal of power Sources 70 (1998) pp. 40-47

Das L. M.

On-Board Hydrogen Storage systems for Automotive application

Int. J. Hydrogen Energy, Vol 21, No 9(1996), pp 789-800

Daugherty M.A., Prenger F.C., Daney D.E., Hill D.D., Edeskuty F.J.

A Comparison of Hydrogen Vehicle Storage Options Using the EPA Driving Schedule

Los Alamos Technical Report LA-UR-95-2462 (July 1995), Los Alamos, New Mexico, 87545 USA

DeWispelare A.R.

Electric Vehicle Modeling and Simulation

Technical Report AU-AFIT-EN-TR- 83-4, Air Force Institute of Technology, Wright Patterson Air Force Base, Ohio, 1983

Dönitz W.

Fuel Cells für mobil applications, Status, Requirements and future Application Potential

Int. J. Hydrogen Energy Vol 23, No 7, pp. 611-615, 1998

Dünkelberg R., Zander E.

Qualität schafft Märkte - Optimierung von Elektrofahrzeugen

Vorträge auf der DGES-Fachtagung „Elektrofahrzeuge im Aufschwung-Zukunftsvisionen und Realität“, Berlin, 27/28 April 1995

Dustmann C.-H.

Mobile Stromquellen -- Batterien für Elektroautos

Spektrum der Wissenschaft, Oktober 1996, S. 96-101

Dustmann Cord-H.

ZEBRA battery meets USABC goals

Journal of Power Sources 72 (1998) p. 27-31

Ekdunge P., Räberg M. (Volvo)

The Fuel Cell Vehicle Analysis of Energy Use, Emissions and Costs

Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, 23-28 June 1996

und Int. Journal Hydrogen Energy, Vol. 23, No 5 (1998), pp. 381-385

Emonts B., Höhle B., et al.

Compact methanol reformer for fuel-cell powered light-duty vehicles

Journal of Power Sources 71 (1998) pp. 288-293

Energie und Verkehr:

Kraftstoffe für das Brennstoffzellenauto

Der andere Weg

Der erste Schritt

Meilensteine der Wasserstoffwirtschaft

u.a.

Berichte zum Thema „Energie und Verkehr“ in Energie Spektrum 4/1999

Energy and Environmental Analysis, Inc.

Automotive Technologies To Improve Fuel Economy to 2015

Report prepared for the Office of Technology Assessment (OTA), June 1995, p. 10-82

Energy Information Administration

Alternatives to Traditional Transportation Fuels

Energy Information Administration, DOE/IEA- 0585(94)/2, August 1996

Ewe T.

Und es bewegt sich doch

Bild der Wissenschaft, 5/1999, S. 32-37

Fiedler R.-G., Helfer M., Essers U.

Energieeinsparung und CO₂-Minderung im Verkehr - Fahrzeugtechnik -

Akademie für Technologiefolgenabschätzung Baden-Württemberg, Arbeitsbericht Nr. 22,

Apr. 1994

Finnström B.

Hydrogen - a Study of Efficiencies

„feature article“ in Annual Report of IEA, 1990

Fleissner Th.

Vergleichende Lebenszyklusanalyse verschiedener Antriebskonzepte

VDI Berichte 1307, Tagung „Ganzheitliche Betrachtungen im Automobilbau“, Wolfsburg, Febr 1996

Fleißner Th.

Primärenergetische Optimierung eines autarken Hybridfahrzeuges

IfE Schriftenreihe Heft 40, 1999

Fouda S. A.

Liquid fuels from Natural Gas

Scientific American March 1998, pp. 74-77

Friedrich J., Krauß R., Spaniel D.

Stand und Entwicklungsmöglichkeiten des Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuges

VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden, 17 und 18 Februar 1998, S. 141-153.

Garche J., Döring H., Lang F. u.a.

Sicherheitsuntersuchungen an Fahrzeugbatterien und Entwicklungspotential des Bleiakкумуляtors

VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden, 17 und 18 Februar 1998, S. 235-253.

Göhring M.

Betriebsstrategien für serielle Hybridantriebe

6. Aachener Kolloquium „Fahrzeug und Motorentechnik“, 1997, S1389-1374

Goubeau A., Heuser R., Metz N., Nierhauve B.

Energieverbrauch und Emissionen zukünftiger PkW-Antriebe

Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 46 (1996) Heft 12, S.798-804

Goubeau A., Heuser R., Metz N., Nierhauve B. Sporckmann B.

Energieverbrauch und Emissionen zukünftiger Pkw-Antriebe- Ein Vergleich für das Jahr 2000

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46 (1966) 12, S. 798-804

Große J., Waidhas M.

Fortschritte bei der PEM-Brennstoffzellenentwicklung

VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden, 17 und 18 Februar 1998, S. 155-169.

Hamnett A.

Fuel cells and their development

Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A (1996) 354, pp 1653-1669

Hart D., Hörmandiger G.

Initial Assessment of the Enviromental Characteristics of Fuel Cells and Competing Technologies

Energy Technology Support Unit (ETSU) Nr. ETSU/F/02/00111/REP/1, Great Britain, 1997

Hart D., Hörmandiger G.

Environmental benefits of transport and stationary fuel cells
Journal of Power Sources 71 (1998) pp. 348-353

Hartmann D., Kaltschmitt M.

Von der Wiege bis zum Bahre
BWK Bd. 50(1998) Nr.3, S.56-61

Haschka F., Warthmann W., et al.

Alkaline batteries for hybrid and electric vehicles
Journal of Power Sources 72 (1998) p. 32-36

Heidl R.

Ein Konzept für den Individualverkehr in Ballungsräumen - der Elektroantrieb
Spektrum der Wissenschaft Juni 1997, S. 39-42

Heidl R.

Ein Konzept für den Individualverkehr in Ballungsräumen: Der Elektroantrieb
Spektrum der Wissenschaft, Juni 1997, S. 39-42 (Forum Stadtverkehr)

Hishinuma Yukio et al.

Experiments with and Analysis of the Performance of a Polymer Electrolyte Fuel Cell for
Automotive Applications
Proceedings 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, November 16-19, 1998,
pp 655-668

Höhlein B.

Fuel- Cell Systems for Transportation
2nd IEA Advanced Fuel Cells Workshop on „Fuel Processing for Modular Fuel Cell Power
Packages“
29.9-1.10.97, Wislikofen, Switzerland

Höhlein B., Biedermann P.

Vergleichende Analyse von PKW-Antrieben der Zukunft mit Verbrennungsmotoren oder
Brennstoffzellen-Systemen
VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden,
17 und 18 Februar 1998, S. 171-183.

Höhlein B., Boe M., Bögild-Hansen J., Bröckerhoff P., Colsman G., e.a.

Hydrogen from methanol for fuel cells in mobile systems: development of a compact reformer
Journal of Power Sources 61 (1996) 143-147

Höhlein B., Colsman G., Magin P.

Methanol - ein neuer Energieträger für den Verkehr: Methanolmarkt und Methanol-
Herstellung
Abschlußbericht zum BMFT- Projekt „IKARUS“ (4-11), 1993

Höhlein B., Nitsch J., Carpetis C.

Energie- und Schadstoffbilanzen von Brennstoffzellen-Systemen
Forschungsverbund Sonnenenergie, Jahrestagung 1998

Höhlein B., Nitsch J., Wagner U.

Ganzheitliche Systemuntersuchung zur Energiewandlung durch Brennstoffzellen
Abschlußbericht zur FVV-Studie, Mai 1998

Höhlein B., Stimmig U.

Energie und Emissionsbilanzen bei der Verwendung alternativer Kraftstoffe
Chemie Ingenieur Technik 67 (1995) Heft 10, S.1306-1309

International Energy Agency

Cars and Climate Change
OECD-Publications, Paris, OECD/IEA 1993

Jones M.R.

Hybrid Vehicles - The best of both worlds?
Chemistry and Industry, 7 August 1995, pp 589-592

Jorach R., Enderle Chr., Decker R.

Development of a Low-NO_x Truck Hydrogen Engine with high specific Power Output
Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 22 (1997), No 4 , pp 423-427

Jorgensen K.

Hydrogen in Vans and Light Duty Trucks in Denmark
Int. Journal Hydrogen Energy, Vol. 21, No 7 (1996), pp 597-606

Kalhammer F.R., Prokopius P.R., Roan V.P., Voecks G.E.

Status and Prospects of Fuel Cells as Automotive Engines
Report of the Fuel Cell Technical Advisory Panel, July 1998 (Prep. for the Cal. Air Res.
Board)

Kattentidt Björn

Intelligent Electromechanical Drive Systems for Motor Cars
Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der Universität Stuttgart, 1999
(paper SS-019/1)

Kattentidt Björn

Mechatroniksysteme für Elektrofahrzeuge
IEMA Kolloquium 1995 (Universität Stuttgart)

Kawatsu Shigeyuki

Advanced PEFC development for fuel cell powered vehicles
Journal of power Sources 71 (1998) pp. 150-155

Kim J, Lee S.M., Srinivasan S.

Modelling of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance with an empirical Equation
J. Electrochem. Society, Vol. 142, No 8, August 1995, pp 2670-2674

Klaiber Th.

Fuel Cells for transport: can the promise be fulfilled? Technical requirements and demands
from customers
Journal of Power Sources 61 (1996) pp. 61-89

Köhler U., Krüger F.J., u.a.

Hochleistungsbatterien für Elektrofahrzeuge

VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden, 17 und 18 Februar 1998, S. 91-100.

Kolke R.

The Assessment of Fuel Cells in Transport from the Environmental Point of View

Tagung „Commercialising Fuel Cell Vehicles 97“, 20-22 October 1997, Frankfurt

Kolke R.

Energie- und Emissionsbilanz fortschrittlicher Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor- und Batterie-Antrieb

Internationales Verkehrswesen, (48) 12/1996, S. 16- 22

Kolke R.

Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor

Studie des Umweltbundesamtes (UBA), 1999

Kreutz T.G., Ogden J.M.

Transient Effects in fuel Cell Vehicles with onboard Fuel Processors

Proceedings 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, November 16-19, 1998, pp 663-666

Krumpelt M., Kumar R., Myles K.M.

Fundamentals of fuel cell system integration

Journal of power Sources 49 (1994) pp. 37-51

Kumar R., Ahluwalia R., et al.

Design, Integration, and Trade-off Analyses of Gasoline fueled Polymer-Electrolyte Fuel Cell Systems for Transportation

Proceedings 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, November 16-19, 1998, pp 226-229

Larking J.T., Wimmer R.R.

Fuel Cell powered Transit Bus Demonstration and Test Programm

Proceedings 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, November 16-19, 1998, pp 735-738

Lee J.H., Lalk T.R., Appleby A.J.

Modeling electrochemical performance in large scale proton exchange membrane fuel cell stacks

Journal of power Sources 70 (1998) pp. 258-268

Legat W.

Das Elektroauto in den USA und Japan

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47. Jg. (1997) Heft 6, S. 328-331

Lehna M.

Audi duo, Ein Hybridfahrzeug für die City-Logistik

VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden, 17 und 18 Februar 1998, S. 171-183.

Lohbeck W.

Ein Konzept für den Individualverkehr in Ballungsräumen: Das Drei-Liter-Auto

Spektrum der Wissenschaft, Juni 1997, S. 36-38 (Forum Stadtverkehr)

Lossau N.

Die Last mit der Ladung

Bild der Wissenschaft 10/1994, S.96-100

Luberoff B.

Fuel-Cell Electric Cars on fast Track

Chemistry and Industry Vol. 5, 3. March 1997, p. 191

Lublinski J.

Aufwind für den Magermotor

Bild der Wissenschaft 10/1994, S. 101-103

Lux R., Sawillion M. et al.

Brennstoffzellen im CO₂-Vergleich

BWK Bd. 50 (1998) Nr. 3, S. 48-57

Martin P.E.

The External Costs of Electricity Generation: Lessons from the US Experience

Energy Studies Review Vol. 7, No 3, 1995, pp. 232-246

Matano et al.

Development of a New Multi Mode Variable Valve Timing Engine

SAE paper 9300878, 1993

McAlevy R.F.

Optimum Design of Automotive Vehicles Employing Alternative Energy Sources of Low Energy Density: Impact on Selection of an Energy-Carrier for Future Urban Vehicle Transportation Systems

Alternative Energy Sources Vol. 8 (Hydrogen Energy) Hemisphere Publications (1978) pp 3877-3888

Menzer R., Höhle B.

Analysis of energy and water management in terms of fuel-cell electricity generation

Journal of power Sources 71 (1998) pp. 294-301

Menzer R., Höhle B.

Verfahrensanalyse der Stromerzeugung für Fahrzeugantriebe mit Methanol und

Brennstoffzellen als Energieumwandlungssystem

Bericht Jül-3445 des Forschungszentrums Jülich, Institut für Energieverfahrenstechnik, 1995?

Meyer A.P., Goman M.E., Callaghan V.M.

Fuel Cell Systems Development for Automobiles and Commercial Vehicles
Proceedings 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, November 16-19, 1998,
pp 722-724

Mohr H.

Technischer Stand und Potentiale von Diesel-/Gasmotoren
BWK 49 (1997) Nr. 5 (Mai) S. 50-53

Moore T.

The Road ahead for EV Batteries
EPRI Journal, March/april 1996, pp7-15

Mourelatos A., Diakoulaki D., Papagiannakis L.

Impact of CO₂ reduction policies on the development of renewable energy sources
Int. J. Hydrogen Energy, Vol 23, No 2, pp. 139-149, 1998

Nadal M., Barbir F.

Development of a Hybrid Fuel Cell/Battery Powered Electric Vehicle
Int. Journal Hydrogen Energy, Vol. 21, No 6 (1996), pp 497-505

Noreikat K.

Stand und Entwicklungstendenzen von alternativen Fahrzeugantrieben
Daimler Benz AG

Noreikat K., Krämer M.

Neuester Stand und Entwicklungstendenzen von Brennstoffzellen-Fahrzeugen
VDI Berichte Nr. 1201, (Wasserstoff-Energiertechnik IV) München 1995, S. 358-374

O'Connell L.G., Anderson C.J., e.a.

Energy Storage Systems for Automobile Propulsion
UCRL-53053-80 (Final Report, Lawrence Livermore National Laboratory), December 1980

Ogden J.M.

A Technical and Economic Assessment of Hydrogen Energy Systems with CO₂ Sequestration
Paper presented at the 12th WHEC, Buenos Aires, June 1998

Ohi J.M., Bailey B.K.

Fuels for PEM Fuel Cells
Proceedings 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, November 16-19, 1998,
pp 710-713

Patil Pandit, Zegers P.

Fuel cell road traction: an option for a clean global society
Journal of Power Sources, 49 (1994) pp. 169-184

Patton K.J., Nitschke R.G., Heywood J.B.

Development and Evaluation of a friction Model for Spark Ignition Engines
Society of Automotive Engineers, Nr. 890836, Warrendal, PA, (1989)

Pentastar Electronics, Inc.

Conceptual Design Report for a direct Hydrogen Proton Exchange Membrane Fuel Cell for Transportation Application

U.S. Department of Energy, DOE/CE/50390-9, 5 September 1995

Petersen R., Diaz-Bone H.

Das „Drei-Liter-Auto“ - Aktuelle Konzepte und Stand der Realisierung

Wuppertal Institut für Klima - Umwelt - Energie, Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen

Prechtl H.

Das energetische Betriebsverhalten eines Elektrotransporters

IfE Schriftenreihe, Heft 14

Prümm W.

Wasserstoffmotor mit äußerer Gemischbildung für Nutzfahrzeuge

Berichte zur Energie- und Verfahrenstechnik (BEV), Schriftenreihe Heft 99.1, 1999,

S. 501-514

Tagung „Motorische Verbrennung- aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze“, Essen, 1999

Quadflieg H., Hanagert

Strategy for the Introduction of a Common Worldwide Transitional alternative Transport System

Proc. of XII International Symposium on Alcohol Fuels, Beijing, China, 21-24 Sept. 1998

Quissek F.

Fahrzeugantriebe der Zukunft - Aus der Sicht der VW-Forschung

Die evolutionäre Weiterentwicklung des Automobils, I/97

Verleger: Eurotax (International) AG, Wolleraustrasse 11a, CH-8807 Freienbach

Radke Sabine (Herausg.: Bundesverkehrsministerium, Bonn)

Verkehr in Zahlen 1996

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Königin-Luise-Str. 5, 14195 Berlin, 1996

Reiner K.

Energetischer Vergleich von Batteriesystemen - Modellierung und Kenngrößen

IFE-Schriftenreihe, Heft 33, 1996 (TU München)

Rosen H.A., Castleman D.

Flywheels in Hybrid Vehicles

Scientific American, October 1997, pp. 49-51

Samaras Z., Zierock K.-H.

COPERT: Computer Program to Calculate Emissions from Road Traffic

Computer Rechniques in Environmental Studies III (P. Zanetti edit.), pp. 213-228

Computational Mechanics Publications, Springer Verlag, 1990

Sasaki S., Takaota T., u.a.

Toyota's Newly Developed Electric-Gasoline Engine Hybrid Powertrain System

Electric Vehicle Symposium EVS-14, Dec. 1997, Orlando USA

Schmitdt V.M., Bröckerhoff P., Höhle B., Menzer R., Stimming U.

Utilization of Methanol for polymer electrolyte fuel cells in mobile systems

Journal of Power Sources, 49 (1994) pp. 299-313

Schock R.N., Berry G.B., Smith J.R., Rambach G.D.

Hydrogen as a Near-Term Transportation Fuel

Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-JC-121355 , also Paper presented at the International Energy, Environment and Economics Symposium, Melbourne, Nov. 20-24, 1995

Schock R.N., Berry G.D., Smith J.R., e.a.

The transition to Hydrogen as a Transportation Fuel: Costs and Infrastructure Requirements

UCRL-JC-123420 Preprint March 1996) and 11th WHEC, Stuttgart, June 1996

Schröder G.

Elektrofahrzeuge auf Rügen - Fortschritte werden deutlich

Vorträge auf der DGES-Fachtagung „Elektrofahrzeuge im Aufschwung-Zukunftsvisionen und Realität“, Berlin, 27/28 April 1995 (Nr. 5)

Schwartz H.J.

The Computer Simulation of Automobile Use Patterns for Defining Battery Requirements for Electric Cars

NASA Technical Memorandum NASA-TM-X-71900, Lewis Res. Center, Cleveland, Ohio, 1976

Smith J. Ray, S.Aceves

Hybride Vehicle System Studies and Optimized Hydrogen Engine Design

UCRL-JC-120151 (Preprint) Lawrence Livermore National Laboratory , April 1995

Sovran G., Bohm M.S.

Formulae for the Tractive-Energy requirements of Vehicles Driving the EPA Schedules

Society of Automotive Engineers, Nr. 810184, Warrendal, PA, (1981)

Specht M., Staiss F., et al.

Comparison of the renewable transportation fuels, liquid hydrogen and methanol, with gasoline - energetic and economic aspects

Int. J. Hydrogen Energy, Vol 23, No 5, pp. 387-396, 1998

Sperling D.

The Case for Electric Vehicles

Scientific American, November 1996, S.36-41

Spörl Th., Flaig A., Lechner G.

Fasima II - Modellierung und Simulation beliebiger Antriebskonzepte

VDI Berichte Nr 1225, 1995

Staschewski D.

Traction Data Acquisition and Analysis with a Hydrogen Fuel Cell Truck driven on public Roads

Int. J. Hydrogen Energy, Vol 21, No 1, pp. 53-63, 1996

Stegers W.

Neue Wundercocktails treiben Motoren zu Höchstleistungen
PM Magazin, 7/1999, S. 68-72

Sterbak R.

Bessere Batterien müssen her!
Bild der Wissenschaft 7/1997, S.24-28

Tachtler J.

Brennstoffzellen- Systeme für den Pkw - Chancen und Anforderungen
ACHEMA Internationales Treffen für Chemische Technik/Symposion Brennstoffzellen,
1997

Tauber C., Jablonski R.

Brennstoffzellen aus Sicht eines überregionalen EVU
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 48. Jg. (1998) Heft 1/2, S. 68-74

Thirumalai D. and White R.E.

Mathematical Modeling of Proton-Exchange-Membrane Fuel-Cell Stacks
J. Electrochem. Soc., Vol. 144, No 5, May 1997, pp1717-1723

Thomas C.E., James B.D. and Lomax F.D. Jr.

Market Penetration Scenarios for Fuel Cell Vehicles
Int. J. Hydrogen Energy, Vol.23, No 10, pp.946-966,1998

U.S. Office of Technology Assessment

Advanced Automotive Technology: Visions of a Super-Efficient Family-Car
National Technical Information Service, (OTA-ETI-638) PB96-109202, Sept. 1995

Umweltbundesamt

Technische Optionen zur Verminderung der Verkehrsbelastungen
Reihe TEXTE des Umweltbundesamtes Nr. 33/99, 1999

Vandenborre H., Sierens R.

Greenbus: A Hydrogen Fuelled City Bus
Int. Journal Hydrogen Energy, Vol. 21, No 6 (1996), pp 521-524

Venter R.D., Pucher G.

Modelling of Stationary Bulk Hydrogen Storage Systems
Int. J. Hydrogen Energy Vol 22, No 8, pp. 761-798, 1997

Virji M.B.V., Adcock P.L., et al.

Effect of operating pressure on the system efficiency of a methane-fuelled solid polymer fuel
cell power source
Journal of power Sources 71 (1998) pp. 337-347

Vollmer H.

Globaler Primärenergieverbrauch
Energiewirtschaftliche Tagesfragen 47. Jg. (1997) Heft ½, S. 12-19

Vollmer Th., Höhn B.-R., Kersch S., Pinnenkamp B.

Der autarke Hybrid: Auslegung des Gesamtsystems

VDI Berichte Nr. 1225, 1995

Wacker M.

Sektor Verkehr - Erreichtes, Hemmnisse und Perspektiven

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 46. Jg. (1996) Heft 8, S. 492-497

Wagner U.

Rügen war kein Praxistest- Zu den Ergebnissen eine Elektroauto- Feldversuchs

Energiewirt.Tagesfragen 47. Jg. (1997) Heft 6, S. 326-327

Wagner U., Angloher J., Fleißner Th.

Ganzheitliche Bilanzierung von Hybrid-Fahrzeugen

VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden, 17 und 18 Februar 1998, S. 129-139.

Wagner U., Geiger B., Schaefer H.

Energy life analysis of hydrogen systems

Int. J. Hydrogen Energy, Vol 23, No 1, pp. 1-6, 1998

Wallentowitz H., Bady R.

Chancen durch das Elektroauto

VDI Berichte 1378, Tagung „Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge“, Dresden, 17 und 18 Februar 1998, S. 171-183.

Wang M.Q.

Greet 1.0 - Transportation Fuel Cycles Model: Methodology and Use

Argonne National Laboratory, ANL/ESD - 33, June 1996

Wang M.Q.

Fuel-Cycle Energy Requirements and Emissions of advanced Automotive Technologies

Argonne National Laboratory, Report prepared for the Office of Technology Assessment, July 1995

Weibel Th., Dietrich Ph.

Ökoinventare und Wirkungsbilanzen für den ökologischen Vergleich von Hybridfahrzeugen

VDI Bericht 1307, VDI/VW Gemeinschaftstagung, 1996

Wein K., Schmied M.

Energieverbrauch und Emissionen von Transportketten

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 48 (1998) Heft ½, S. 91-97

Wenzel P., et al.

Länderspezifische Strombereitstellungs- und CO₂-Emissionsfaktoren

Energiewirtschaftliche Tagesfragen 49. Jg. (1999) Heft 7, S. 432-437

Willant J., Krauß R., Rennefeld A., Noreikat K.-E.

Versuch und Berechnung bei der Entwicklung eines Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuges in „Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren“ (Ulf Essers, Herausgeber), Expert Verlag, S. 324 ff (2. Stuttgarter Symposium „Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren“, 18.-20. Februar 1997)

Wouk V.

Hybrid Electric Vehicles

Scientific American, October 1997, pp 44-48

Wouk V., Bates B., King R., e.a.

EVs Unplugged: Hybrid electric vehicles boost range but not pollution

IEEE Spektrum 32 (July 1995) 7, pp 16-31

(Wouk V.: Hybrids: Then and now

Bates B.: Getting a Ford HEV on the Road

King R. e.a.: Hybrid Electric Bus pollutes less, conserves fuel)

Wurster R., Altmann M., Auwerter K., ea.

Feasibility Study on Fuel Cell Propulsion for Urban City Buses and Delivery Trucks

Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, 23-28 June 1996

Xiaoming Ren, Sharon C.T., et al.

Direct Methanol Fuel Cells: Developments for Portable Power and for potential

Transportation Applications

Proceedings 1998 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, November 16-19, 1998, pp 745-748