# Vergleichende Untersuchung der Energienutzung sowie der Verbräuche von Strassenfahrzeugen mit Elektro- und Verbrennungsmotorantrieb

Autor(en): **Busch, H. / Cupsa, A.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **70 (1979)**

Heft 6

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-905361

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

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

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Vergleichende Untersuchung der Energienutzung sowie der Verbräuche von Strassenfahrzeugen mit Elektro- und Verbrennungsmotorantrieb

Von H. Busch und A. Cupsa

*In diesem Beitrag werden wesentliche, zum Teil neue Kriterien der Energieerzeugung, -verteilung und -speicherung einerseits sowie der Fahrzeuge und deren Anwendung andererseits aufgezeigt und im einzelnen näher betrachtet. Nur auf dieser Basis ist eine vergleichende Beurteilung der Energieverbräuche und Energienutzung bei Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren im Nahverkehr möglich.*

*Dans cette étude sont mises en évidence et examinées en détail les caractéristiques essentielles, parfois nouvelles, de la production, de la distribution et de l'accumulation de l'énergie d'une part, des véhicules automobiles et de leur utilisation d'autre part. C'est seulement sur cette base que l'on peut comparer du point de vue de leur consommation d'énergie et de leur rendement énergétique les véhicules à moteur électrique et les véhicules équipés de moteur à combustion interne utilisés dans les transports locaux.*

## 1. Aufgabenstellung und Vergleichsbedingungen

Da Elektrofahrzeuge eine seit langem bekannte Technik zur Substitution von Mineralölderivaten sind, sahen sich auch schon früher mehrere Autoren veranlasst, die Primärenergienutzung von Strassenfahrzeugen mit Elektro- und Verbrennungsmotorantrieb zu untersuchen [1–7].

Zunächst wird die Gesamtkette der Energieumwandlung in vier grosse Blöcke unterteilt, wodurch sich Vergleichskriterien und Einflüsse verschiedener Faktoren leichter berücksichtigen, beurteilen und abschätzen lassen.

I Erzeugung der Sekundärenergie:
Raffinerien bzw. Kraftwerke

II Verteilung der Sekundärenergie:
Jeweilige Versorgungsinfrastrukturen

III Speicherung der Sekundärenergie im Fahrzeug:
Tank bzw. Batterie

IV Anwendung der Sekundärenergie im Fahrzeug:
Antriebsstrang einschliesslich Heizung

Wegen der Komplexität und der Verflechtung der Energieerzeugung, -verteilung und -anwendung, die sich von Land zu Land anders darstellen, bezieht sich der Vergleich zuerst nur auf die heutige Energieversorgungsstruktur in der Bundesrepublik Deutschland.

Es werden nur diejenigen Fahrzeuge und deren Einsätze untersucht, die für Elektroantriebe prädestiniert und dadurch für den Vergleich repräsentativ sind. So beschränkt sich die Analyse auf einige konkrete Einzelfälle im Nahverkehr, und sie kann deshalb auch nur zum Teil allgemeingültige Aussagen liefern.

Danach werden Beispiele mit veränderter Primär- und Sekundärenergiebasis sowie künftige Entwicklungstendenzen in die Untersuchungen einbezogen. Ausserdem wird der Versuch unternommen, den Primärenergieverbrauch im Hinlick auf Verfügbarkeit und Umweltfreundlichkeit der Energieträger durch Gütefaktoren zu bewerten.

## 2. Sekundärenergieerzeugung

Unter Sekundärenergien werden diejenigen Energien verstanden, die unmittelbar in Antriebsenergie und Nutzwärme oder ähnliches umzusetzen sind. Dies bedeutet zum Beispiel, dass nicht bedarfsgerechte Ausstossprodukte der Raffinerien einer weiteren Umwandlung, zum Beispiel in Strom, bedürfen und somit nicht als Sekundärenergien bezeichnet werden können. Ihre Umwandlungsverluste müssen zusätzlich berücksichtigt werden [4].

### *2.1 Flüssige Kraftstoffe Benzin und Dieselöl*

Bei der Ermittlung der Nutzungsgrade sind alle Raffinerien der Bundesrepublik Deutschland berücksichtigt worden [8]. Es ergibt sich so für das Jahr 1975 ein Bruttonutzungsgrad von 91,7 %.

Dieser Umwandlungsnutzungsgrad dürfte in der vergleichenden Betrachtung für Benzin und Dieselöl angesetzt werden, wenn die gesamten so anfallenden Ausstossprodukte auch in dieser Form für die Erzeugung der gewünschten Antriebsenergie und Nutzwärme oder ähnliches eingesetzt werden könnten. Da hierfür kein ausreichender Bedarf besteht, ist der Ausstoss der Raffinerien nicht ganz bedarfsgerecht. Schweres Heizöl muss teilweise in eine noch «edlere» Sekundärenergie, wie zum Beispiel Strom, umgewandelt werden [4].

Die Nettowerte berücksichtigen die durch die Umwandlung entstehenden Zusatzverluste. Von 30,238 Millionen t SKE Schweröl inländischer Raffinerien wurden im Jahr 1975 5,228 Millionen t SKE in Kraftwerken mit einem Nutzungsgrad von etwa $0{,}4 \times 0{,}95 = 38\,\%$ verstromt, so dass sich die der Raffinerie zuzuschlagenden Verluste um $5{,}228 \times 0{,}62$ Millionen t SKE erhöhen bzw. die Schwerölmenge um den gleichen Betrag verringert. Damit errechnet sich der bedarfsgerechte Nutzungsgrad für das Jahr 1975 zu 89,3 %.

### *2.2 Elektrizität als Sekundärenergie*

Wenn die eingesetzten Nettoprimärenergien zugrunde gelegt werden, ergibt sich ein mittlerer Umwandlungsnutzungsgrad von etwa 38,5 %. Dabei ist der Schwerölanteil mit dem Bruttonutzungsgrad von 91,7 % und nicht mit dem Nettonutzungsgrad in die Rechnung eingegangen. Der mittlere Erzeugungsnutzungsgrad ergibt sich anschliessend nach Abzug des Eigenverbrauchs zu etwa 34,8 %. Dieser Wert berücksichtigt keine Nutzung der Abwärme, die künftig sicher in zunehmendem Masse verwertet wird.

### *2.3 Einflüsse der Energieversorgungsstrukturen auf den Erzeugungsnutzungsgrad*

Bei der Herstellung von Benzin und Dieselkraftstoff fällt zwangsläufig auch schweres Heizöl an. Geht man einmal davon aus, die gesamte Menge könnte Heizzwecken dienen, dann ergäbe sich ein Bruttonutzungsgrad der Raffinerien von maximal 91,7 %. Unterstellt man dagegen, das gesamte Schweröl müsste verstromt werden, dann würde sich unter Annahme gleichen Verstromungsnutzungsgrades von 38 % ein Minimum von 77,7 % ergeben. Der Netto-Erzeugungsnutzungsgrad von Benzin und Dieselkraftstoff kann also rein theoretisch zwischen 78 und 92 % liegen. Diese Beispiele zeigen, wie wenig allgemein-

gültige, für alle Länder zutreffende Aussagen gemacht werden können. Der Bedarf zum Beispiel an Nutzwärme unterscheidet sich zwischen den nördlich und südlich gelegenen Ländern erheblich. Schon allein deshalb sind von Land zu Land andere Substitutionsmassnahmen für Mineralöl erforderlich. In einem ersten Schritt kann die Verschiebung der Produktpalette der Raffinerien sinnvoll sein.

Hingewiesen sei noch auf die Aussage einer Schweizer Veröffentlichung [12], wonach im Jahre 1977/78 der benötigte Strom zu 75 % in Wasser- und nur zu 25 % in thermischen Kraftwerken erzeugt wird. Dies führt zu einem Nutzungsgrad von 60 % anstatt 35 %. In Ländern mit grossem Wasserkraftanteil, wie der Schweiz und Norwegen, liegt das Elektrofahrzeug, wie sich später noch zeigen wird, schon heute energiewirtschaftlich günstiger als jede andere Antriebsart.

## 3. Sekundärenergieverteilung

Während die Versorgungsinfrastruktur für Mineralölderivate aus einem Netz von dezentralisierten, stationär untereinander nicht verbundenen Speichern besteht, das meist über Tankfahrzeuge mit geringen Transportverlusten gespeist wird, weist die Infrastruktur der Elektrizitätsversorgung ein Leitungsnetz auf, das keinerlei Speicherfähigkeit besitzt. Erzeugung, Transport und Verbrauch müssen praktisch gleichzeitig erfolgen. Es entstehen dabei grössere Verluste als beim Mineralöltransport.

Die Vielseitigkeit der Elektrizitätsanwendung kompensiert aber zu einem grossen Teil den Nachteil der fehlenden Speicherfähigkeit durch den Verbraucherverbund. Wenn Spitzen- und Schwachlastverbraucher in einem günstigen Verhältnis zueinander versorgt werden können, ergibt sich eine bessere Auslastung der Infrastruktur sowie der Kraftwerke und dadurch teilweise auch eine Erhöhung ihrer Nutzungsgrade [13].

### *3.1 Flüssige Kraftstoffe*

Für die Infrastruktur der Mineralölderivate von der Raffinerie bis zum Tankeinfüllstutzen lässt sich in der Bundesrepublik Deutschland folgender mittlerer Nutzungsgrad errechnen [6], [9]:

$$\eta_2 \cong 98\,\%$$

### *3.2 Elektrizität*

Die Infrastruktur der Elektrizitätsversorgung von der Kraftwerksklemme bis einschliesslich Batterieladegerät ist differenzierter zu betrachten. Je nach Spannungsstufe, Leistung, Ladekennlinie und -dauer treten unterschiedliche Verluste auf. Im öffentlichen Versorgungsnetz der Bundesrepublik Deutschland entstanden 1976 Gesamtverluste in Höhe von 15,23 Milliarden kWh. Dabei betrug der Gesamtstromverbrauch einschliesslich Verluste etwa 269,60 Milliarden kWh; der zugehörige Nutzungsgrad errechnet sich zu:

$$\eta_v = 0{,}944$$

Regionale und zeitbedingte Abweichungen nach oben und nach unten, wobei auch der Anschluss am Mittel- oder Niederspannungsnetz eine Rolle spielt, betragen in etwa:

$$\eta_v = 93...\mathit{94{,}4}...96\,\%$$

Je nach Konstruktion der Ladegeräte und deren Spannung, Leistung, Ladedauer und -kennlinie gelten in etwa Nutzungsgrade im folgenden Bereich:

$$\eta_L = 82...\mathit{84{,}5}...87\,\%$$

Für das Produkt $\eta_2 = \eta_v \times \eta_L$ ergibt sich mathematisch:

$$\eta_2 = 76...\mathit{80}...83{,}5\,\%$$

Für einen Drehstrom-Niederspannungsanschluss gilt im praktischen Betrieb mit normaler Ladung ein Wert von etwa:

$$\eta_2 \cong 80\,\%$$

Bei einem künftig zu erwartenden breiteren Einsatz von Elektrofahrzeugen wird die Batterieladung hauptsächlich in Schwachlastzeiten erfolgen, was dem Nutzungsgrad der Infrastruktur zugute kommt. Berücksichtigt man weiter die sich abzeichnende Verbesserung der Ladegeräte und -verfahren, so scheint es vertretbar, mittel- bis langfristig mit einem Verteilungsnutzungsgrad von etwa 84 % zu rechnen.

## 4. Sekundärenergiespeicherung

Die hohen Energiedichten flüssiger Kraftstoffe und die Tatsache, dass der zur Verbrennung benötigte Sauerstoff der Umgebungsluft entnommen werden kann, erlauben die direkte Speicherung einer grossen Energiemenge im Fahrzeug, ohne dass dabei nennenswerte Verluste entstehen.

Die Speicherung elektrischer Antriebsenergie ist dagegen wesentlich aufwendiger. Elektrizität lässt sich bekanntlich nicht direkt speichern, sondern nur zum Beispiel unter Zuhilfenahme chemischer Umsätze, die einen geschlossenen Kreislauf grosse Querschnitte zur Stromführung und viel Isolation sowie andere inaktive Massen erfordern. Solche Speicher haben deshalb wesentlich kleinere Energiedichten und sind viel stärker verlustbehaftet als Kraftstoffspeicher. Dieser Nachteil muss in Kauf genommen werden, er wirkt sich aber im reinen Verteilernahverkehr für Elektrofahrzeuge nur selten einsatzbegrenzend aus.

### *4.1 Flüssige Kraftstoffe*

Die Speicherung dieser Kraftstoffe im Fahrzeug sowie das Nachfüllen und Entnehmen erfolgt praktisch verlustlos. Daher gilt:

$$\eta_3 = 100\,\%$$

### *4.2 Elektrizität*

Als elektrochemische Speicher kommen für den praktischen Einsatz derzeit nur Bleibatterien in Frage, und deshalb sollen auch nur diese in Betracht gezogen werden. Der Nutzungsgrad eines Lade/Entlade-Vorganges hängt ganz wesentlich von den Parametern Temperatur, Restkapazität, Lade- und Entladedauer sowie Alter, Art und Höhe der Beanspruchung ab. Es werden deshalb nur betriebstypische Fälle berücksichtigt und die in der Erprobung und im praktischen Einsatz gewonnenen Daten zugrunde gelegt. Für eine 1- bis 1,5stündige Entladung mit anschliessender Normalladung nach IU- bzw. $IUI_a$-Kennlinien wurde folgendes experimentell ermittelt:

Mittlere Entladespannung: $\overline{U}_E = 1{,}82...1{,}88$ V/Zelle
Mittlere Ladespannung: $\overline{U}_L = 2{,}35...2{,}42$ V/Zelle
Mittlerer Ladefaktor: $k_L = 1{,}15...1{,}20$

Daraus erfolgt definitionsgemäss der Lade/Entlade-Nutzungsgrad:

$$\eta_3 = \frac{\overline{U}_E}{\overline{U}_L} \cdot \frac{1}{k_L} = 0{,}63...0{,}70$$

Für die im Einsatz befindlichen Batterien ergibt sich statistisch der Mittelwert:

$\eta_3 \cong 65\,\%$

Die Weiterentwicklung der Bleibatterie bzw. die Entwicklung neuer, leistungsfähigerer Batteriesysteme und die sich daraus ergebende längere Entlade/Lade-Dauer können in absehbarer Zeit zu einer Nutzungsgraderhöhung auf etwa 70 % führen. An dieser Stelle sei jedoch darauf hingewiesen, dass höhere Energiedichten nicht unbedingt mit besseren Nutzungsgraden verbunden sein müssen. So werden zum Beispiel mit Metall-Luft-Systemen etwa 100 Wh/kg erreicht, aber nur ein Lade/Entlade-Nutzungsgrad von höchstens 40 %.

## 5. Sekundärenergieanwendung

Vor einer eingehenden Betrachtung der Sekundärenergieanwendung bedarf es noch verschiedener allgemeiner Hinweise.

– Nur Fahrzeuge mit gleichartigen Transportaufgaben dürfen miteinander verglichen werden. Aufbau, Fahrkomfort, Einsatzort und -zweck, maximale Nutzlast und mittlere Auslastung, mittlere Tagesstrecke sowie Fahrleistungen im Stadtverkehr müssen daher möglichst identisch sein.

– Traktionsmotor, Stellglieder, Nebenaggregate und Heizung sowie die mechanische Übertragung weisen recht variable Energieverbräuche (Nutzungsgrade) auf, so dass diese zumindest teilweise experimentell ermittelt werden müssen.

– Prüf- und Messbedingungen müssen repräsentativ für jene Bereiche des Stadtverkehrs sein, in denen konventionelle Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge ersetzt oder zumindest parallel zu diesen betrieben werden können. Darüber hinaus ist es wichtig, reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

Die vorgenannten Kriterien lassen erkennen, dass allgemein gültige Aussagen hinsichtlich Nutzungsgraden nicht so ohne weiteres möglich sind. Deshalb wird sich der nachfolgend angestellte Vergleich zunächst nur auf einen Transporter-Pritschenwagen mit 800–1000 kg Nutzlast, der alternativ mit Otto- bzw. Elektromotor angetrieben wird, beziehen.

Die Beladung wird in beiden Fällen mit etwa 800 kg angenommen, weil sie einerseits die heute zulässige Nutzlast des Elektrotransporters darstellt und andererseits für viele praktische Einsätze, in denen sonst serienmässige Ottomotor-Fahrzeuge eingesetzt werden, ausreicht. Bei dieser Nutzlast gelten in etwa die Kenndaten aus Tabelle I.

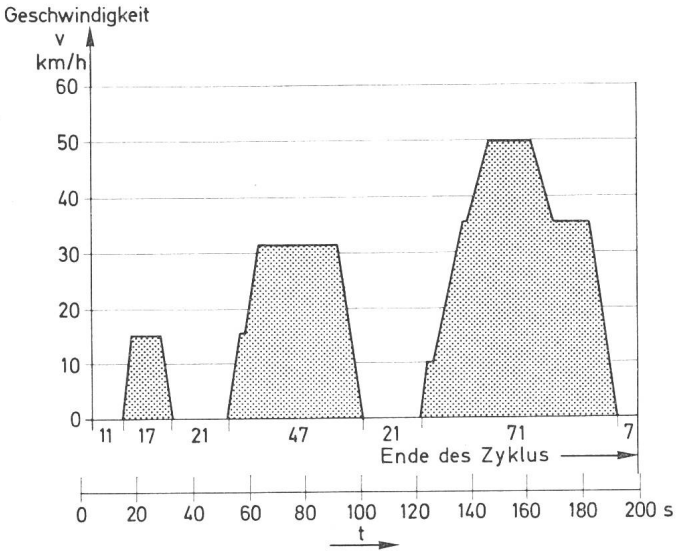


**Fig. 1 Idealisierte dynamische Prüffahrt (Europa-Zyklus)**

*Wichtigste Kenndaten der zu vergleichenden Transporter* Tabelle I

| Grösse | Ottomotor | Elektroantrieb |
|---|---|---|
| Fahrzeug-Gesamtmasse: $M_F$ (kg) | 2100 | 3000 |
| Anteil rotierender Massen am Rad: $m_R$ | 0,12 | 0,06 |
| Rollreibungszahl: $f_R$ (Gürtelreifen) | 0,012 | 0,012 |
| Wirksamer Luftquerschnitt: $c_W \cdot A$ (m²) | 1,45 | 1,45 |

Der reproduzierbare Vergleich der Anwendungsnutzungsgrade beider Transporter kann nur unter Zugrundelegung einiger idealisierter Fahrmodi erfolgen: Konstantfahrten und eine dynamische Zyklusfahrt in der Ebene (s. Fig. 1). Diese Fahrmodi sind zwar für elektrofahrzeugtypische Einsätze nicht repräsentativ, liefern aber zurzeit für beide Fahrzeuge die *einzigen* vergleichbaren und reproduzierbaren Messergebnisse, sowohl hinsichtlich des Energieverbrauches als auch des Nutzungsgrades.

### *5.1 Gemessene und errechnete Werte*

Unter reproduzierbaren Bedingungen wurden von der Fa. Volkswagenwerk AG die vorgängig erwähnten Fahrmodi auf dem Prüfstand simuliert und dabei für jedes Fahrzeug die Sekundärenergieverbräuche, das heisst Benzin- und Stromverbrauch netzseitig, ermittelt [7]. Die Messungen sind jedoch für unterschiedliche Nutzlasten von 1000 kg beim Ottomotor- bzw. 500 kg beim Elektrotransporter durchgeführt worden. Aus diesem Grunde mussten die Verbräuche zunächst für eine einheitliche Nutzlast von 800 kg unter linearer Berücksichtigung der massenabhängigen und -unabhängigen Anteile entsprechend Tabelle I umgerechnet werden [14].

Die jeweils benötigte Fahrenergie am Rad lässt sich einfach aufgrund der Kenndaten aus Tabelle I errechnen. Mit Hilfe der vorher ermittelten Nutzungsgrade

$\eta_1, \eta_2, \eta_3$

ergeben sich anschliessend die Primärenergieverbräuche und Nutzungsgrade $\eta_{ges}$ bzw. $\eta_4$ für die Gesamtkette bzw. für die Sekundärenergieanwendung.

$$\eta_{ges} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4$$

Für den Elektrotransporter muss auch der zusätzliche Heizbedarf berücksichtigt werden. Zahlreiche Betriebsmessungen ergaben, dass in den sechs Wintermonaten seine Benzinheizung einen mittleren Verbrauch von etwa 0,34 l/h aufweist. Fügt man noch sechs verbrauchsfreie Sommermonate hinzu, so ergibt sich ein jährlicher Durchschnitt von 0,17 l/h.

### *5.2 Diskussion der Ergebnisse aus Tabelle II*

Für die idealisierte dynamische Prüffahrt ist derzeit der Primärenergieverbrauch des Elektrotransporters trotz einer um etwa 43 % höheren Gesamtmasse, die eine um 33 % höhere Fahrenergie erfordert, nur um etwa 8 % höher als beim Ottomotortransporter. Dies erklärt sich durch den gegenüber dem Ottomotortransporter besseren Gesamtnutzungsgrad des Elektrotransporters, der anstatt bei 11 % bei 13,5 % liegt.

*Zusammenstellung gemessener und errechneter Verbräuche und Nutzungsgrade für vier idealisierte Fahrmodi* Tabelle II

| Idealisierter Fahrmodus | Antrieb | Errechnete Fahrenergie am Rad (Wh/km) | Gemessener Sekundärenergieverbrauch pro 100 km mit Heizung[1]) | Errechneter Primärenergieverbrauch mit Heizung | | Errechneter Nutzungsgrad (%) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | (Wh/km) | (%) | Gesamte Kette | Anwendung ohne Heizung |
| Dynamische Fahrt in der Ebene (Europazyklus) | Otto[2]) | 170,5 | 15,34 l | 1555 | 100 | 11,0 | 12,6 |
| | Elektro mit Nutzbremsung[3]) | 227,3 | 52,17-kWh-Netz + 0,92 l Heizung | 1681 | 108,1 | 13,5 | 79,3 |
| Konstantfahrt mit 30 km/h in der Ebene | Otto[2]) | 86,7 | 11,63 l | 1176 | 100 | 7,4 | 8,4 |
| | Elektro[3]) | 116,1 | 26,81-kWh-Netz + 0,56 l Heizung | 873 | 74,2 | 13,3 | 78,8 |
| Konstantfahrt mit 50 km/h in der Ebene | Otto[2]) | 118,8 | 10,13 l | 1025 | 100 | 11,6 | 13,2 |
| | Elektro[2]) | 148,2 | 33,17-kWh-Netz + 0,34 l Heizung | 1044 | 101,8 | 14,2 | 81,3 |
| Konstantfahrt mit 70 km/h in der Ebene | Otto[2]) | 166,9 | 11,19 l | 1132 | 100 | 14,7 | 16,6 |
| | Elektro[2]) | 196,3 | 49,14-kWh-Netz + 0,24 l Heizung | 1520 | 134,3 | 12,9 | 72,7 |

[1]) Umgerechnet für eine einheitliche Nutzlast von 800 kg [2]) Mit 2100 kg Gesamtmasse [3]) Mit 3000 kg Gesamtmasse

Der Einsatz von bereits in Entwicklung befindlichen leistungsfähigeren, leichteren Batterien wird den Primärenergieverbrauch insgesamt zugunsten des Elektrofahrzeuges verschieben. Die Verringerung der Speichermasse um nur 28 % führt bereits zum gleichen Primärenergieverbrauch, obwohl der Elektrotransporter auch dann noch um etwa 660 kg schwerer bleibt als das Vergleichsfahrzeug.

Eine durchaus erreichbare Senkung der Speichermasse um etwa 47 % hätte die Reduzierung der Gesamtmasse auf 2600 kg zur Folge, so dass der Verbrauch des Elektrotransporters im Prüfzyklus nicht mehr um 8 % höher liegen würde, sondern schon um 5,5 % unter dem des vergleichbaren Ottomotortransporters, der eine Gesamtmasse von 2100 kg aufweist.

Bei Konstantfahrten in der Ebene macht sich bemerkbar, dass Ottomotorfahrzeuge hauptsächlich für den Fernverkehr ausgelegt sind. Sie schneiden daher bis etwa 50 km/h verbrauchsmässig schlechter ab als Elektrofahrzeuge, die für $V_{max}$ = 70 km/h ausgelegt sind und durch die Art der Steuerung zwischen 25 und 50 km/h einen nahezu optimalen Wirkungsgrad erreichen.

Die Ergebnisse aus Tabelle II und weitere nachstehende Überlegungen zeigen, dass die bisher betrachteten vier idealisierten Fahrmodi für einen allgemeinen Verbrauchsvergleich allein nicht ausreichen. Das Elektrofahrzeug wird aus Gründen des Umweltschutzes und der Infrastruktur der elektrischen Versorgung sicher nur in dicht besiedelten Nahverkehrszonen optimal einzusetzen sein, wobei

– einerseits die reellen Verkehrsverhältnisse bestenfalls einer Kombination obiger Fahrmodi entsprechen können und

– andererseits die wiederholten Anlauf-, Kaltstart- und Leerlaufphasen bei Ottomotorfahrzeugen besonders nachteilig ins Gewicht fallen.

Daher müssen die Messergebnisse des Prüfstandversuches auch durch im Betrieb ermittelte nahverkehrsgerechte Daten ergänzt werden.

### *5.3 Ergänzung der Ergebnisse aus Tabelle II*

In der Tabelle III sind einige im praktischen, täglichen Betrieb ermittelte und zum Teil umgerechnete Verbrauchswerte angegeben, die sich auf elektrofahrzeugtypische Einsätze im

*Vergleich der Energieverbräuche für elektrofahrzeuggerechte Einsätze mit etwa 400 kg mittlerer Auslastung* Tabelle III

| Einsatz | Antrieb | Sekundärenergie (mit Heizung) pro 100 km | Primärenergie | |
|---|---|---|---|---|
| | | | (Wh/km) | (%) |
| a) Statistische Werte für etwa 30 bzw. 15 Transporter unter leichten Einsatzbedingungen (z.B. EVU, Stadtwerke usw.) | Otto 36,7 kW | 16,3 l Benzin | 1649 | 100 |
| | Elektro 16/32 kW mit Nutzbremsung | 53,3 kWh-Netz + 0,7 l Benzin | 1692 | 102,6 |
| b) Mittlere Werte beim Einsatz unter schweren Einsatzbedingungen (z.B. Bundespost, Flughäfen, Lieferanten usw.) | Otto 36,7 kW | 25 l Benzin | 2528 | 100 |
| | Elektro 16/32 kW mit Nutzbremsung | 62-kWh-Netz + 1 l Benzin | 1987 | 78,6 |
| c) Dito, jedoch mit Dieselmotor bzw. mit leichterer, verbesserter Batterie (450 statt 850 kg) | Diesel 36,7 kW | 16,5 l Diesel | 1867 | 100 |
| | Elektro 16/32 kW mit Nutzbremsung und leichterer Batterie | 52,5-kWh-Netz + 1 l Benzin | 1697 | 90,9 |

Nahverkehr beziehen. Dabei betrug die mittlere Auslastung eines Transporters etwa 300–400 kg.

Bereits der leichte Einsatz (a) zeigt, dass der Mehrenergieverbrauch des Elektrotransporters von etwa 8,1% im Prüfzyklus auf etwa 2,6% im praktischen Betrieb sinkt.

Der Einsatz (b) aus Tabelle III bezieht sich auf starke «stop and go»-Beanspruchungen, die bei Elektrotransportern nur zu relativ höheren Verbräuchen führen. Bei Ottomotortransportern dagegen, wie auch aus Testveröffentlichungen bekannt ist [15], kann es zu sprunghaftem Anstieg des Verbrauches auf 25 l/100 km und mehr kommen, weil zum Beispiel allein eine Konstantfahrt im 2. Gang mit etwa 25 km/h gegenüber der Konstantfahrt im 3. Gang mit 33 km/h einen Mehrverbrauch von 4 l auf 100 km verursacht. Auch führt die Verdoppelung der Standzeiten von 1 auf 2 min/km, selbst mit warm laufendem Benzinmotor, zu einem weiteren Mehrverbrauch von etwa 2 l/100 km [5].

Als Ausblick auf eine mögliche Entwicklung soll der ungünstige Einsatzfall (b) aus Tabelle III rein rechnerisch einmal auch auf der Vergleichsbasis zwischen Diesel- und Elektrotransportern analysiert werden, wobei in der Rechnung eine von 850 auf 450 kg reduzierte Speichermasse angesetzt wird. Durch den besseren thermischen Wirkungsgrad des Dieselmotors, besonders im Teillastbereich, ist die Senkung des Verbrauches auf 16,5 l Dieselöl/100 km sicher realistisch und deshalb zugrunde gelegt. Bei 1 l Dieselöl ≙ 9,90 kWh gilt dann folgendes (s. «c» in Tabelle III).

$$\textit{Diesel:}\quad \frac{0{,}165 \times 9900}{0{,}980 \times 0{,}893} = 1867 \text{ Wh/km}$$

$$\textit{Elektro:}\quad \underbrace{1887 \times \frac{2{,}2}{2{,}6}}_{\text{Antrieb}} + \underbrace{100}_{\text{Heizung}} = 1697 \text{ Wh/km}$$

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich somit ein Minderverbrauch für den Elektrotransporter von etwa 9%. Bei unveränderter Speichermasse von 850 kg würde der Mehrenergieverbrauch des Elektrotransporters etwa 6,4% betragen.

## 6. Bewertung des Primärenergieverbrauchs durch Gütefaktoren

Die bisherigen Vergleiche gingen unter anderem von der heutigen Energieversorgungsstruktur aus. Sämtliche Primärenergien wurden als gleichwertig angesehen, wobei unterstellt wurde, dass flüssige Kraftstoffe aus Mineralöl und Strom vorwiegend aus Kohle, Erdgas und zu einem geringen Teil auch aus Kernenergie erzeugt werden.

Primärenergien können aber nicht länger als gleichwertig betrachtet werden, weil sie sich vor allem in ihrer Verfügbarkeit und Umwandelbarkeit in Sekundärenergie wesentlich unterscheiden. Bekanntlich lassen sich nicht alle Primärenergien gleich gut, wenn überhaupt, in jede gewünschte Sekundärenergie umwandeln. Auf der einen Seite wird die wertvolle Primärenergie Mineralöl heute noch in Bereichen eingesetzt, die durch andere weniger wertvolle Primärenergien abgedeckt werden könnten, und auf der anderen Seite gehen weniger wertvolle Primärenergien, wie zum Beispiel Müll, Holz und minder abbauwürdige Kohle, die in der Regel langfristig verfügbar sind und teilweise auch wirtschaftlich zur Stromerzeugung und damit zur Mineralölsubstitution eingesetzt werden könnten, unwiederbringlich verloren.

*Bewertung des Primärenergieverbrauchs unter Berücksichtigung der Energieverfügbarkeit und Umweltbelästigung* Tabelle IV

| | | Ottomotor | Elektroantrieb | |
|---|---|---|---|---|
| Art der Sekundärenergie | | Benzin | Strom | Benzin |
| Unbewerteter Primärenergieverbrauch (Wh/km) | | 1649 | 1621 | 71 |
| 1. Gütefaktor: Mehrenergieaufwand zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus Kohle | | 2 [1]) | 1 | 2 [1]) |
| 2. Gütefaktor: Umweltbelästigung | | 4 | 1 | 2 |
| Wichtung des 1. Gütefaktors | | 2/3 | 2/3 | 2/3 |
| Wichtung des 2. Gütefaktors | | 1/3 | 1/3 | 1/3 |
| Resultierender Gütefaktor | | 2,666 | 1 | 2 |
| «Bewerteter» Primärenergieverbrauch | Wh/km | 4397 | 1763 | |
| | % | 100 | 40,1 | |

[1]) Bei der Methanolherstellung aus Kohle ergibt sich zum Beispiel gegenüber Benzinherstellung aus Erdöl ein Mehrenergieaufwand von etwa 2,2 bis 2,4: 1. Da aber auch mit einer Verbesserung des Motorwirkungsgrades zu rechnen ist (1,1 bis 1,2), gilt letztendlich für Methanol der Faktor 2,2: 1,1 = 2.

Wenn Mineralölderivate eines Tages vollständig durch synthetisch erzeugte Sekundärenergien ersetzt werden müssen, ist in jedem Fall mit einem Mehrverbrauch an Primärenergie zu rechnen. Lediglich die Anwendung der Elektrizität lässt den nahezu gleichen oder gar einen geringeren Primärenergieverbrauch erwarten.

Von nicht geringerer Bedeutung ist in den Bereichen Energieerzeugung und Anwendung auch die Umweltfreundlichkeit. Hierbei kommt es nicht so sehr auf die Emission als auf die Immissionswerte an, die entscheidend durch Ort und Lage der Emissionsquellen bestimmt werden.

Diese Überlegungen führten dazu, einmal den Versuch zu unternehmen – der im wesentlichen als Diskussionsbeitrag zu diesem Thema gedacht ist –, zwei Gütefaktoren zu definieren, um so die obigen Kriterien, Substitution von Mineralölderivaten und Verbesserung der Umweltbelastung, quantitativ zu berücksichtigen (s. Tabelle IV).

Als Betrachtungsbeispiel dient dabei der Einsatz (a) aus Tabelle III. Zur Wichtung der Gütefaktoren wurde angenommen, dass langfristig die Verfügbarkeit verschiedener Primärenergien Vorrang vor absolutem Verbrauch und Umweltfreundlichkeit haben wird. Daraus ergibt sich ein «bewerteter» Primärenergieverbrauch, wie zum Beispiel für Ottomotortransporter:

$$1649 \times \left(2 \times \frac{2}{3} + 4 \times \frac{1}{3}\right) = 1649 \times 2{,}666$$
$$= 4397 \text{ Wh/km}$$

Bei Elektrotransportern dagegen erhält man nur 1763 Wh/km oder rund 40%. Dieses Ergebnis überrascht nicht. Es erscheint prinzipiell auch in anderen Literaturquellen, die zum Beispiel von der künftigen Primärenergiebasis Kohle für Kraftstoff- und Stromerzeugung ausgehen [16–18]. Wichtig bei der Bewertung ist vor allem, die Problematik zu erkennen und

nicht so sehr die genaue Wichtung der Einzelkomponenten zu erreichen, die aus heutiger Sicht sicher sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich sein dürfte.

## 7. Schlussbetrachtung

Die Untersuchungen zeigen im wesentlichen folgendes:

Derzeit sind die Primärenergieverbräuche von Ottomotor- und Elektrotransportern in etwa gleich. Bei leichten Einsätzen wirkt sich die noch hohe Batteriemasse nachteilig aus, während für typische «stop and go»-Einsätze bereits heute Primärenergieersparnisse möglich sind.

Kurz- bis mittelfristig werden Batterien mit doppelter Leistungsfähigkeit produktionsreif sein. Dadurch wird der Verbrauch von Elektrotransportern um weitere 12–13 % sinken, so dass diese im Primärenergieverbrauch selbst im Vergleich zu Dieseltransportern im Nahverkehr besser abschneiden werden.

Mittel- und langfristig bekommen die Verfügbarkeit und Umweltfreundlichkeit der Primärenergieträger eine immer grössere Bedeutung. Wenn Sekundärenergien nur noch auf Kohle- und Kernenergiebasis oder ähnlichem gewonnen werden können, dann wird das Elektrofahrzeug im Energieverbrauch dem konventionellen Fahrzeug mit Abstand überlegen sein.

Das Elektrofahrzeug wird daher in den nächsten Jahrzehnten eine der aussichtsreichsten Lösungen für den flächenorientierten Nahverkehr darstellen, und sein verstärkter Einsatz bringt Vorteile in dreifacher Hinsicht mit sich:

– die Energieanwendung wird sparsamer;

– der Energiebedarf verlagert sich rationell zu reichlicher vorhandenen und teilweise weniger wertvollen Primärenergien;

– die Umweltbelastung in Ballungsgebieten nimmt merklich ab.

**Literatur**


[1] *M. Rudolf:* Primärenergieaufwand und Schadstoffemission im Stadtverkehr; Modellvergleich zwischen konventioneller und elektrischer Traktion. BWK, Bd. 25 (1973), Nr. 9.

[2] *J. T. Salihi:* Energy Requirements for Electric Cars and Their Impact on Electric Power Generation and Distribution Systems. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. IA-9, 1973, Nr. 5.

[3] *S. Meurer:* Energieprobleme des Kraftfahrzeuges. VDI-Bericht Nr. 238, 1975.

[4] *J. Gallot:* Comparison of Electric and Conventional Drive of Road Vehicles from the Point of View of Energy Efficiency of Primary Energy Originating from Oil Products. Paper presented at UNIPEDE-Congress, May 1976, Wien.

[5] Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, 1976: Technologien zur Einsparung von Energie im Endverbrauchssektor Verkehr. Studie im Auftrag des BMFT, För-Knz.: ET 5012.

[6] *H. Nebelung* u.a.: Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr. RWTH-Aachen, 1976. Forschungsauftrag F 86 des Bundesministeriums für Verkehr.

[7] *J. P. Altendorf* und *A. Kalberlah:* Primärenergieverbrauch von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. etz-a, Bd. 98 (1977), H. 1.

[8] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Düsseldorf: Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1976.

[9] Statistisches Bundesamt, Wiesbaden: Statistisches Jahresbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1977.

[10] Referat Elektrizitätswirtschaft im Bundesministerium für Wirtschaft: Die Elektrizitätswirtschaft in der Bundesrepublik 1976. Sonderdruck aus Elektrizitätswirtschaft. Bd. 76 (1977), H. 23.

[11] BMFT, Bonn, 1974: Neuen Kraftstoffen auf der Spur; alternative Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge.

[12] Eidgenössisches Amt für Energiewirtschaft, Bern: Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie in der Schweiz im hydrographischen Jahr 1970/71. Bull. SEV 63 (1972), Nr. 8.

[13] *K. J. Oehms* und *H. Busch:* Die Versorgung elektrisch angetriebener Kraftfahrzeuge mit Antriebsenergie und deren Einordnung in die Belastungskurve der Elektrizitätsversorgungsunternehmen. etz-a, Bd. 94 (1973), Nr. 11.

[14] *A. Cupsa* und *U. Görlach:* Grundlagen zur Vorausberechnung von Elektro-Strassenfahrzeugen. etz-a, Bd. 98 (1977), H. 7.

[15] Quick-Verbrauchstest: Quick, Nr. 52 vom 15. Dezember 1977.

[16] *G. P. Fettermann,* G. *Mauri* und *R. L. Ricci:* Comparative Efficiencies of Alternative Future Automotive Power Systems. Exxon's Paper presented at APS Symposium, Washington, April 1977.

[17] *D. C. Sheridan, J. J. Bush* und *W. R. Kuziak:* A Study of the Energy Utilisation of Gasoline and Battery-Electric Powered Special Purpose Vehicles. SAE Paper Nr. 760119, February 23–27, 1976.

[18] *Ming-Chih Yew* und *D. E. McCulloch:* Small Electric Vehicle Considerations in View of Performance and Energy Usage. Paper Nr. 769060 presented at 11th IECEC, State Line, September 12–17, 1976.



**Adresse der Autoren**

*H. Busch,* Oberingenieur, und *A. Cupsa,* Dr.-Ing., Gesellschaft für elektrischen Strassenverkehr m.b.H., Tersteegenstrasse 77, D-4000 Düsseldorf 30.