Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 68 (1977)

Heft: 3

Artikel: Systemanalyse des elektrischen Strassenverkehrs

Autor: Müller, Hans-Georg

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914985

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

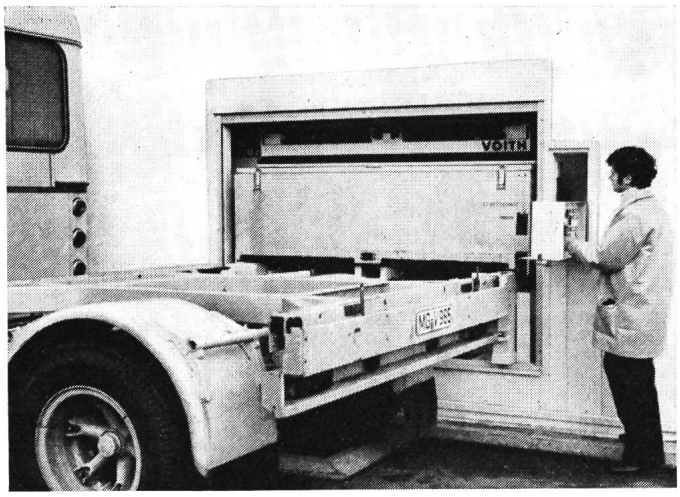

Fig. 15 Beispiel einer Batteriewechselstation für Stadt-Elektrobusse (Im Bild: Aufschieben der einsatzbereiten Batterie auf den Busanhänger)

aus Taiwan vor, die besagt, dass bereits im Jahre 1977 mit der Grossfertigung von Elektromobilen mit einer Anfangskapazität von 2000 Einheiten pro Jahr, zum Preis von rund 65000 NT$ (etwa 5000 Fr.) für einen rund 700 kg schweren Personenwagen, begonnen werden könne. Inwieweit solche Meldungen der Wahrheit entsprechen, ist schwierig abzuschätzen.

Die Gesamt-Weltproduktion von elektrisch betriebenen Personenwagen im Jahre 1976 kann auf rund 6000 bis 7000 Stück geschätzt werden (siehe auch Tabelle III). Es ist aber zu erwarten, dass die Produktion in den nächsten Jahren erheblich zunehmen wird und in einigen Jahren der Einsatz von Elektrofahrzeugen zumindest im Stadtverkehr keine Seltenheit mehr besitzt.

Literatur

[1] *H.-J. Budde:* Elektrischer Strassenverkehr und sein Beitrag zur Einsparung knapper fossiler Kohlenwasserstoffe; Energie 28(1976)6/7.

[2] *J.P. Altendorf* und *A. Kalberlah:* Primärenergieverbrauch von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Bericht 1.8; UNIPEDE/EVC-Symposium 1976.

[3] *W. Hamilton* und *G. Hagey:* Impacts of future use of electric cars in US cities. Report 1.2; UNIPEDE/EVC-Symposium 1976.

[4] *G. Ratcliff:* Gesamtbericht der Sektion 31 (UNIPEDE/EVC-Kolloquium).

[5] *E. Etienne:* Les véhicules électriques, de l'actuel au futur. Rapport 1.4 du Symposium UNIPEDE/EVC 1976.

[6] *F.J. Port:* Energy Sources; General statement, UNIPEDE/EVC-Symposium 1976.

[7] Electric Vehicle News; May 1976.

Adresse des Autors

J. Mutzner, dipl. Ing. ETH, Sekretariat des VSE, Bahnhofplatz 3, 8023 Zürich.

Systemanalyse des elektrischen Strassenverkehrs

Von Hans-Georg Müller

Energiewirtschaftliche Überlegungen zeigen, dass unter den denkbaren ölsubstituierenden Sekundärenergien Elektrizität gerade für den Antrieb von Strassenfahrzeugen noch in diesem Jahrhundert Bedeutung gewinnen kann. Unter Berücksichtigung spezieller Erfordernisse des Elektromobils, seines Energiespeichers und der notwendigen Versorgungsinfrastruktur werden technische und wirtschaftliche Aspekte erörtert und ein Zeitplan für die Einführung von Elektrofahrzeugen zur Diskussion gestellt.

Des études d'économie énergétique font apparaître que parmi les énergies secondaires susceptibles de substituer le pétrole l'électricité est capable de prendre de l'importance, encore en ce siècle, précisément pour la propulsion de véhicules routiers. Compte tenu d'exigences spéciales liées à l'électromobile, à son accumulateur d'énergie et à l'infrastructure d'approvisionnement requise, on a analysé des aspects techniques et économiques et on a examiné un calendrier au sujet de l'introduction de véhicules électriques.

1. Einleitung

Erstmalig in der Welt wurde im Jahre 1901 in den USA auf einer Briefmarke ein Automobil gezeigt. Die Benutzer dieses Baker-Electric-Taxis dachten in jener Zeit der beginnenden Industrialisierung sicherlich noch nicht an Rohstoffverknappung, Umweltschutz oder gar eine Energiekrise. Schon bald sattelten sie daher um auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, und in der Begeisterung für deren technische Vorzüge übersah man gewisse Nachteile, die sich bei deren Einsatz in grosser Zahl zwangsläufig ergeben mussten.

Heute haben wir gelernt, den Nutzen technischer Produkte für die Menschheit gegen den zu erwartenden Aufwand an Rohstoffen und Energie sowie gegen mögliche Schäden für die Umwelt kritisch abzuwägen. Manche Fehler der Vergangenheit sollen bei neuen Entwicklungen vermieden werden.

2. Energiewirtschaftliche Überlegungen

Weil die relativ billigen Primärenergieträger Erdöl und Erdgas nur noch für wenige Jahrzehnte zur Verfügung stehen, konzentrieren sich die Bemühungen der Ingenieure weltweit auf folgende Ziele:

– *Einsparung* von Energie in allen Bereichen, bevorzugt in den Sektoren Wärme und Bewegungsenergie, die besonders von Erdöl und Erdgas abhängig sind.

– *Substitution* von Erdöl und Erdgas durch Kernenergie und Kohle, deren Vorräte um ein vielfaches grösser sind, teilweise auch durch Sonnenenergie. Die Entwicklung geeigneter Verfahren ist weltweit langfristig unumgänglich. Je schneller wir damit beginnen, desto früher mindern wir nicht zuletzt die politische Abhängigkeit von wenigen Förderländern.

Weil die Deckung des Energiebedarfes am Arbeitsplatz, im privaten Bereich und für den Transport von Menschen und Gütern gleiche volkswirtschaftliche Bedeutung hat, müssen die genannten Ziele in sinnvoller Abstimmung für alle drei Bereiche gelten.

Während in der Vergangenheit der Bedarf an Wärme und Bewegungsenergie überwiegend durch unmittelbare Verbrennung klassischer Primärenergieträger wie Kohle, Öl und Gas gedeckt wurde, ist Kernenergie und künftig vermehrt auch Kohle nur nach Umwandlung in eine geeignete Sekundärenergie anwendbar. Die prinzipiellen Möglichkeiten ergeben sich aus Fig. 1. Danach wird das *Sekundärenergie-Zeitalter* gekennzeichnet sein dadurch, dass man aus Kernenergie, Kohle und Wasser neben der klassischen Sekundärenergie Elektrizität und der bekannten Prozess- und Fernwärme synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe (z.B. Methanol) und synthetische Gase (z.B. Methan, Synthesegas oder Wasserstoff) erzeugt. Die Verteilung und Anwendung wird wegen der engen Ver-

knüpfung in der Erzeugung über ein technisch wie wirtschaftlich optimiertes Verbundsystem erfolgen müssen, wie es die Elektrizitätswirtschaft seit Jahrzehnten betreibt.

In der Übergangszeit bis Mitte der neunziger Jahre wird Elektrizität die bedeutendste Sekundärenergie bleiben. Erst Ende dieses Jahrhunderts darf man mit der grosstechnischen Erzeugung synthetischer Gase oder Kraftstoffe rechnen, da dies den massierten Einsatz ausgereifter Reaktoren für höhere Prozesstemperaturen voraussetzt.

Der Wohlstand in der westlichen Welt, die heute mehr als drei Viertel der Erdölproduktion verbraucht, beruht auf industrieller Produktivität und hoher individueller Mobilität. Das Erdöl deckt 45 % des Weltenergiebedarfs, ist aber nur mit 5 % an den gesamten Primärenergievorräten beteiligt. Die Industrialisierung stützt sich weitgehend auf billige Energie. Hoher Lebensstandard ist gekennzeichnet durch freizügige Mobilität zwischen den getrennten Bereichen der Arbeit, des Wohnens, des Handels, der Ausbildung und der Freizeitgestaltung. Öffentliche Massenverkehrsmittel leisten zwar gerade im Nahbereich bis zu etwa 50 km Aktionsradius unentbehrliche Beiträge, können aber das Auto keineswegs ersetzen.

Die Schlüsselfunktion des Erdöls in den vergangenen Jahrzehnten ergab sich dadurch, dass bei seiner Raffination etwa ein Drittel Benzin und Dieselkraftstoff für das Automobil und etwa zwei Drittel Heizöl anfielen. Letzteres *musste* damals verbrannt werden und wurde daher zu günstigen Preisen angeboten. Mit steigender Motorisierung wurden die Mengen so gross, dass andere Primärenergieträger wie zum Beispiel Kohle zwangsläufig ihren Platz verlieren mussten. Weil der Verkehr und insbesondere der individuelle Nahverkehr auf der Strasse sich so völlig einseitig vom Erdöl abhängig gemacht haben, muss schnellstens nach Alternativen gesucht werden. Dabei ist besonders zu erwägen, ob nicht eine Integration in die vielschichtige Gruppe der Elektrizitätsverbraucher von Vorteil wäre.

Die Bedeutung intensiver Massnahmen zur Erdöleinsparung gerade in der westlichen Welt wird noch unterstrichen dadurch, dass es manche Anwendungsbereiche gibt, die sich einer Substitution weitgehend verschliessen. Dazu gehören nicht nur der Fernverkehr mit Flugzeug oder Schiff und manche Bereiche der Petrochemie, sondern vor allem auch der Aufbau der Elektrizitätsversorgung in den grossflächigen Ländern der Dritten Welt. Dort sind Erdölderivate in dezentralen Kleinkraftwerken nicht zu ersetzen, solange ein entsprechend dichtes Stromversorgungsnetz noch unrentabel ist. Allein der Bedarf hierfür wird im Jahre 2000 auf rund 350 Mio t/a Heizöl geschätzt, was rund 13 % der heutigen Welterdölproduktion entspricht.

Erdöl ist ein so kostbarer Rohstoff, dass es gerechtfertigt ist, an seiner Stelle andere reichlicher verfügbare Primärenergien sogar dann einzusetzen, wenn der Nutzungsgrad etwas niedriger sein sollte.

Da die Verunreinigung der Luft besonders in Ballungsgebieten zum überwiegenden Teil auf die Verbrennung von Erdölprodukten in kleinen Heizaggregaten oder Verbrennungsmotoren zurückzuführen ist, dient man auch dem *Umweltschutz,* wenn man recht bald den Erdölverbrauch reduziert. Es ist ein besonderer Vorzug aller Sekundärenergien, ganz besonders aber der Elektrizität, dass sie auf der Basis von Kernenergie umweltfreundlich gewonnen und fast schadstoffrei angewendet werden können.

3. Merkmale der Elektrizitätsanwendung

Die Erzeugung und Verteilung der Edelenergie Elektrizität erfordert den Einsatz besonders hochwertiger technischer Einrichtungen und dementsprechend grossen Kapitaleinsatz. Dieser ist wirtschaftlich nur zu rechtfertigen, wenn die Anlagen mit möglichst geringen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen gleichmässig ausgelastet sind. Elektrische Arbeit muss daher mit möglichst kleiner Leistung aber hoher Benutzungsdauer verbraucht werden. Diese Grundregel gilt sinngemäss auch für alle anderen künftigen Sekundärenergieträger.

Da Elektrizität nicht unmittelbar, sondern nur nach Wandlung in eine tertiäre Energieform speicherbar ist, hat als Hilfsmittel zur Lastvergleichmässigung der grossräumige vielschichtige Verbraucherverband höchste Bedeutung. Ein ausgesprochener Stossverbraucher wie der Strassenverkehr lässt sich nur in Verbindung mit Zwischenspeichern in das Belastungsdiagramm integrieren, wobei es sehr vorteilhaft ist, dass die Mehrzahl aller Fahrzeuge unabhängig von der Jahreszeit im Tagesdurchschnitt nicht mehr als 2 Stunden betrieben wird. Damit steht für das Nachladen der Energiespeicher rund das zehnfache der Entladezeit zur Verfügung.

Typisch für Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie ist es, dass nicht nur für die Fortleitung des Stromes relativ grössere Querschnitte zur Verfügung stehen müssen, sondern dass ausserdem eine alterungsbeständige hochwertige Isolation die Spannungsfestigkeit und Berührungssicherheit garantieren muss. Das Streben nach möglichst kleiner Anschlussleistung wird deutlich, wenn man bedenkt, dass der Füllschlauch einer Tankstelle rund 25000 kW, ein durchschnittlicher Hausanschluss jedoch nur etwa 25 kW Leistung abgibt. Während das Verhältnis zwischen Lade- und Entladezeit des Energiespeichers beim heutigen Kraftfahrzeug 1:100 beträgt, ist für ein Elektrofahrzeug der Wert 10:1 anzustreben oder, anders ausgedrückt, die Nachladung dauert rund 1000mal so lange. Es wird viel zu wenig beachtet, dass diese aus wirtschaftlichen, nicht aus technischen Gründen vom Netz vorgegebene Bedingung den Einsatz von Elektrofahrzeugen ebenso auf einen Bereich von täglich etwa 100 bis 150 km Aktionsradius beschränkt wie die Masse der elektrischen Energiespeicher, selbst wenn diese im Zuge technischen Fortschritts weiter gesenkt wird.

Der hohe Kapitaleinsatz in Verbindung mit den ungewöhnlich hohen Ansprüchen an die Zuverlässigkeit der Geräte und

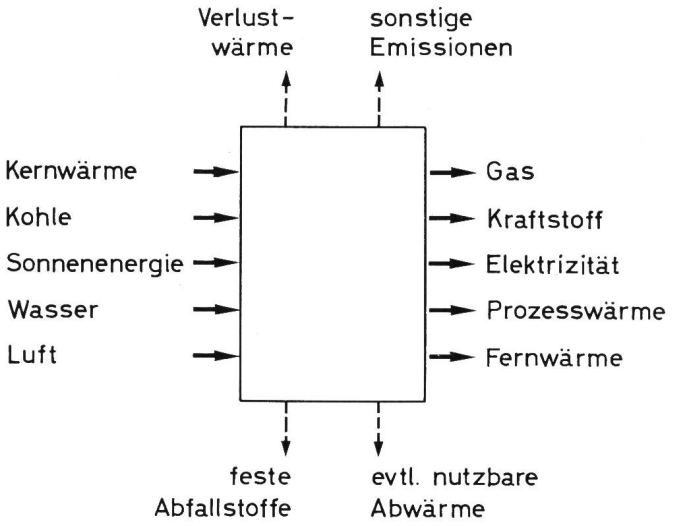

Fig. 1 Gewinnung von ölsubstituierenden Sekundärenergien

besonders deren Isolation führen zu dem Streben nach entsprechender Lebensdauer und langen Abschreibungszeiten. Begünstigt durch den geringen mechanischen Verschleiss, erreichen elektrische Geräte heute Standzeiten von mindestens 20 Jahren.

Elektrizität ist schliesslich traditionell eine *Substitutionsenergie*. Ihren Erfolg verdankt sie der Sauberkeit und Geräuscharmut, den einfachen Regelungsmöglichkeiten und schliesslich der Tatsache, dass sie so ausserordentlich vielseitig anwendbar ist. Die umfassenden Erfahrungen im Substitutionsbereich sollten technisch wie wirtschaftlich auch für das Strassenfahrzeug genutzt werden.

4. Technik des Elektrofahrzeugs

Leistungsangebot und begrenzte Speicherfähigkeit der Elektrizität grenzen die Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen eindeutig auf jenen Bereich ein, der volkswirtschaftlich sowohl im Güter- wie im Personenverkehr der bedeutsamste ist, nämlich auf den Nahverkehr im urbanen und suburbanen Bereich. Zwangsläufig wird sich daraus eine deutliche Trennung der Aufgaben zwischen Nah- und Fernverkehr auf der Strasse ergeben, wie sie heute beim Gütertransport schon üblich ist und wie sie gegenüber anderen Verkehrsträgern wie Bahn, Schiff und Flugzeug schon seit langem besteht.

Völliges Neuland muss bei der Energieversorgung von Elektrofahrzeugen betreten werden (Fig. 2). Grundsätzlich ist es zunächst möglich, durch Auswechslung der Batterien in wenigen Minuten rein mechanisch die Energieübertragung vorzunehmen. Solche Wechselstationen ähneln im Prinzip den gewohnten Tankstellen, jedoch ist der technische Aufwand wesentlich grösser. Man wird daher nur so viele davon errichten, wie für die Pflege und Wartung der Fahrzeugbatterien in grösseren Zeitabständen erforderlich sind.

Gewisse Ähnlichkeit mit heutigen Tanksäulen haben noch Schnelladegeräte, über die die Batterien etwa mit der gleichen

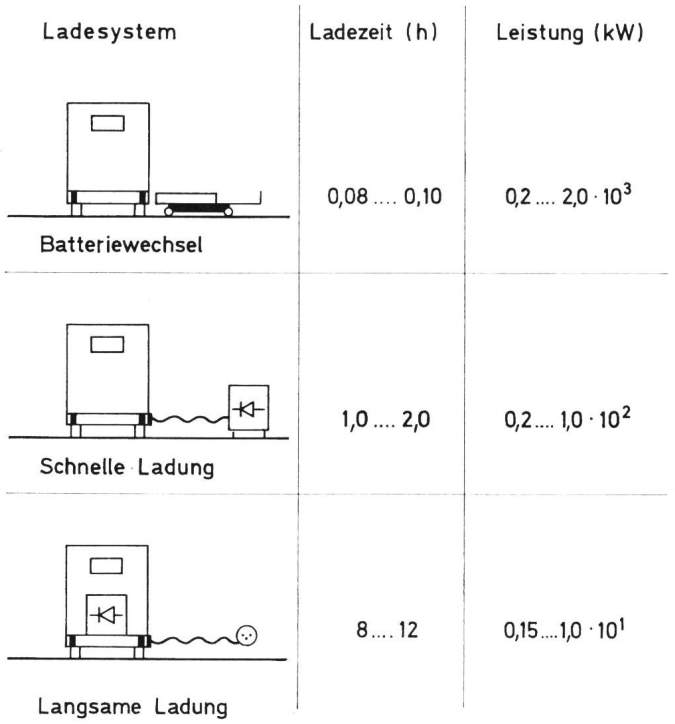

Fig. 2 Stromversorgung von Elektrofahrzeugen

		Kraftstoff (Benzin)	Blei-Säure-Speicher	Na-S-Speicher	Brennstoffzellenaggregat (H_2 / O_2)
Energieinhalt gesamt	kWh	500	20	40	40
Energieinhalt nutzbar	kWh	~75	~15	~30	~30
Hülle, inaktive Masse	kg	8	170	200	370
chemisch aktive Masse	kg	41	305	140	20
stromleitende Teile	kg	-	422	60	10
Energiedichte gesamt	Wh/kg	10200	22	100	100
Energiedichte nutzbar	Wh/kg	1530	17	75	75

Fig. 3 Masse von Energiespeichern für Transporter

Leistung geladen werden können, mit der im Fahrzeug auch entladen wird. Das bedeutet, dass die Fahrzeuge etwa 1 bis 2 Stunden angeschlossen bleiben müssen, und wegen des entsprechenden Bedarfes an Standplätzen ist eine Dezentralisierung zwangsläufig erforderlich. Auch hierfür ist der Aufwand noch erheblich, und ausserdem ist diese Betriebsform weder vom Versorgungsnetz noch von der Batterie her gesehen wünschenswert. Dies gilt erst recht für die häufig zitierte Schnellstladung in Zeiten von etwa 20 Minuten, wobei dann die Batterie thermisch sehr hoch beansprucht wird und mit Nachteil für deren Masse jetzt eine Dimensionierung nach der Lade- statt nach der Entladeleistung zu erfolgen hätte.

Wirtschaftlich am sinnvollsten und den Grundregeln der Elektrizitätsversorgung entsprechend ist die Versorgung des Fahrzeuges mit kleiner Leistung über möglichst lange Zeit aus dem bereits vorhandenen öffentlichen Niederspannungsnetz. Zwangsläufig muss damit die grösste Zahl der Fahrzeuge am jeweiligen Standplatz geladen bzw. nachgeladen werden. Die zu lösende Entwicklungsaufgabe besteht darin, eine geeignete Infrastruktur zu schaffen und die Verbindung zwischen öffentlichem Netz und Fahrzeug so sicher und so einfach zu gestalten, wie dies in allen anderen Anwendungsfällen vom Elektrizitätsverbraucher erwartet wird.

Einige technische Probleme ergeben sich aus der Belastung eines Wechselstromnetzes mit einer grösseren Zahl von Batterie-Ladegleichrichtern und der daraus resultierenden Beeinflussung durch Oberschwingungen. Der Elektrizitätswirtschaftler sieht sich ausserdem vor die völlig neue Aufgabe gestellt, dass die Übergabestelle nicht mehr einem festen Kunden zugeordnet ist und daher ganz neue Tarife und Verrechnungsmethoden entwickelt werden müssen.

Für die Speicherung der Elektrizität an Bord des Fahrzeuges kommen nach heutigem Stand der Technik nur elektrochemische Speicher in Betracht. Fig. 3 zeigt, dass selbst bei erheblichen Fortschritten in der Batterietechnik und unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Antriebswirkungsgrades kein elektrischer Speicher aus technischen Gründen jemals das geringe Gewicht des konventionellen Kraftstofftanks erreichen kann. Während der Vorrat an flüssigen Kraftstoffen heute das Automobil mit max. 2–4 % belastet, wird in der übersehbaren Zukunft die Batterie mindestens 15 % beanspruchen. Die wesentlichen Ursachen hierfür sind:

– Für die Verbrennung einer Masseneinheit flüssigen Kraftstoffs wird etwa die dreifache Masse Sauerstoff oder aber mehr als die zehnfache Masse Luft benötigt. Diese wird jedoch der Umgebung entzogen und mit den Abgasen auch dieser wieder zugeführt, belastet also nicht das Fahrzeug.

– Elektrizität wird dagegen grundsätzlich im geschlossenen Kreislauf eingesetzt. Innerhalb des Speichers müssen nicht nur die chemisch aktiven Massen vorhanden sein, sondern ausserdem die elektrische Isolation und genügend metallische Querschnitte für die Durchleitung des elektrischen Stromes.

Die Entwicklung der letzten Jahrzehnte war gekennzeichnet durch den Bedarf an Batterien für kurzzeitige Stosslast (Starterbatterien), Batterien für seltenen Noteinsatz (Stand-by-Batterien) und Traktionsbatterien für spezielle Anwendungsfälle, die bei klar definierter Zyklisierung etwa im Bereich fünfstündiger Entladung betrieben wurden (U-Boot, Flurfahrzeuge). Die Traktionsbatterie für den Strassenverkehr ist gekennzeichnet durch zahlreiche neue Anforderungen, von denen nachstehend nur die für die Definition von Entwicklungszielen besonders wichtigen genannt sein sollen:

– Verbesserung der Energiedichte von heute etwa 22 Wh/kg bei einstündiger Entladung auf mindestens 80 bis später 120 Wh/kg bei zweistündiger Entladung und einer mittleren Leistungsdichte von 40 W/kg mit kurzzeitig dreifacher Überlastbarkeit. Diese Werte gelten für das fertig installierte «Batterie-Paket» mit Zubehör.

– Bei 5 Stunden Ladezeit und 2 Stunden Entladezeit soll der Lade-/Entlade-Wirkungsgrad besser als 75 % sein, weil sonst die elektrische Energie und damit letztlich die eingesetzte Primärenergie zu schlecht ausgenutzt wird.

– Die Batterie soll auch bei beliebigem Wechsel von Ladung und Entladung im Teillastbereich mindestens das Tausendfache der installierten Nennkapazität durchleiten können oder unabhängig von der Betriebsweise eine Lebensdauer von 10 Jahren erreichen. Diese Werte entsprechen bei 10000 km/a im Ballungsgebiet etwa 100000 km Fahrstrecke. Mehr als das erscheint wenig sinnvoll.

Antriebsmotore und Regeleinrichtungen können in vielfältigen Varianten aus anderen Anwendungsbereichen übernommen werden. Technische Aufgaben ergeben sich aus der physikalischen Tatsache, dass der Elektromotor sein maximales Drehmoment bei der Drehzahl Null und nicht wie der Verbrennungsmotor im Bereich höherer Drehzahl abgibt. Daraus folgt ein unterschiedliches Regelverhalten, dem – wie auch in anderen elektrischen Teilen – bei der Definition von Sicherheitsanforderungen Rechnung getragen werden muss. Im übrigen müssen sich die Entwicklungsarbeiten auf eine Optimierung des Wirkungsgrades von Elektroantrieben und kostengünstige Produktion der Aggregate in Großserien konzentrieren.

Von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist der Energiebedarf aller Hilfseinrichtungen des Fahrzeuges, insbesondere von Heizung und Lüftung. Rationeller Energieeinsatz und Nutzung der Abwärme stehen hier im Vordergrund.

Wenn man auch weltweit an neuen Konstruktionen von Elektrofahrzeugen arbeitet, so empfiehlt sich während der Entwicklungs- und Einführungsphase doch eine weitgehende Anlehnung an vorhandene Modelle, und nur bei Spezialfahrzeugen, die üblicherweise in kleinen Serien gefertigt werden, lässt sich eine Anpassung an die spezifischen Forderungen des Elektroantriebes schon früher realisieren.

5. Wirtschaftliche Aspekte

Die betriebswirtschaftlich korrekte Erfassung der Kosten, die dem einzelnen Bürger für die eigene Mobilität und den Transport von Gütern und Dienstleistungen entstehen, ist aus folgenden Gründen so ausserordentlich schwierig:

– Kosten für Bau und Unterhaltung der Verkehrswege sind den verschiedenen Benutzern nur schwer zuzuordnen. Flugplätze und Fernstrassen haben zum Beispiel auch strategische Bedeutung im militärischen Sinn, Wasserstrassen können in Verbindung mit landwirtschaftlichen Bewässerungsprojekten entstehen. Das Strassennetz in Siedlungsgebieten dient nur zu einem Teil dem ruhenden und rollenden Verkehr und nimmt darüber hinaus die ebenso wichtige unterirdische Infrastruktur (Wasser, Kanalisation, Gas, Elektrizität, Telefon) auf und ist unentbehrlich als Freiraum für öffentliche Aufgaben wie zum Beispiel Feuerwehr, Müllabfuhr usw. Nur die Bahnen sind für ihre Verkehrswege voll selbst verantwortlich und führen ihre negativen Betriebsergebnisse zum erheblichen Teil auf die daraus sich ergebenden Belastungen zurück.

– Die wesentlichen Kosten für Individualfahrzeuge werden vom Betreiber getragen, der sie häufig unter den Konten «Prestige» und «Komfort» verbucht, die Leistungen Fahren, Pflege und Wartung sogar manchmal als Vergnügen empfindet und daher überhaupt nicht berechnet. Gerade die letztere Kostengruppe hat im öffentlichen Nahverkehr besonderes Gewicht und begründet bei steigenden Personalkosten die negativen Bilanzen der öffentlichen Verkehrsbetriebe.

– Die recht unterschiedlichen Reise- bzw. Transportgeschwindigkeiten werden sehr häufig bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und vor allem des Energieverbrauchs nicht genügend berücksichtigt.

Solange der Gesetzgeber nicht durch steuerliche Massnahmen die Umweltfreundlichkeit und die Unabhängigkeit von importiertem, knapper werdendem Erdöl honoriert, interessieren den Käufer des Elektrofahrzeuges nur der Anschaffungspreis und die ihn täglich belastenden Betriebskosten für Wartung und Reparaturen sowie für Kraftstoff. Der Siegeszug des heutigen Kraftfahrzeuges ist gekennzeichnet nicht nur durch hohe Perfektion des Produktes selbst, sondern auch durch die Fertigungsfreundlichkeit aller seiner Komponenten, die Voraussetzung war für deren industrielle Produktion in Grossserien. Die Anwendungsvielfalt elektrischer Produkte und die schon begründete Notwendigkeit hoher Lebensdauer führten hingegen trotz straffer Normung zu sehr zahlreichen, in kleiner Stückzahl gefertigten Typen. Die Möglichkeit für eine Kostendegression elektrischer Fahrzeugkomponenten bei Serienproduktion lassen sich daher nur aus verwandten technischen Gebieten extrapolieren.

Die bisher in Kleinserien gebauten Elektrofahrzeuge sind naturgemäss um ein mehrfaches teurer als vergleichbare konventionelle Fahrzeuge. Je geringer der Serienausstoss bei letzteren, desto kleiner ist selbstverständlich die Kostendifferenz. Dies ist ein Grund mehr, in der Einführungsphase Nutzfahrzeuge (z.B. Elektrobus, Elektrotransporter) oder Spezialfahrzeuge (z.B. Kommunalfahrzeuge, Müllabfuhr) zu bevorzugen.

Am Beispiel eines Elektrotransporters sei demonstriert, dass dennoch schon aus heutiger Sicht eine Annäherung der Kosten erwartet und verbleibende Mehrkosten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lebensdauer ausgeglichen werden können.

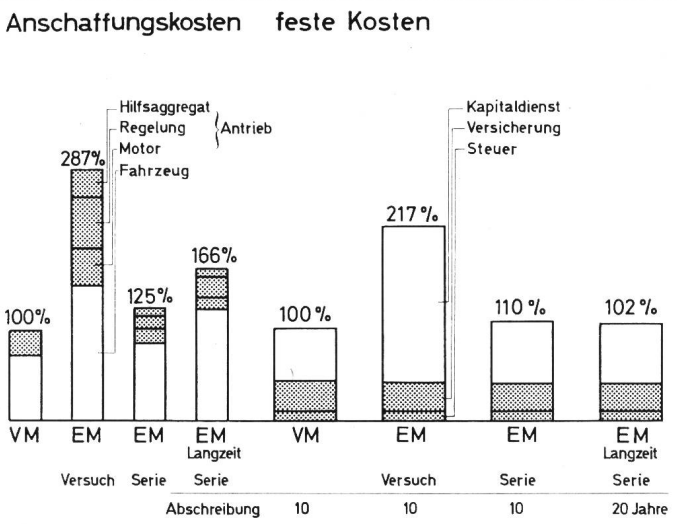

Fig. 4 Anschaffungs- und Festkosten für Transporter
VM Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
EM Elektromobil

In Fig. 4 sind zunächst die Anschaffungskosten und daraus abgeleitet die festen Anteile der Betriebskosten für einen konventionellen Transporter mit Antrieb durch Verbrennungsmotor und Elektrotransporter verschiedener Entwicklungsstufen gegenübergestellt. Grob getrennt wurde zwischen den Kosten für das Fahrzeug selbst und den Kosten für den Antrieb. Wenn in der Versuchsphase die Anschaffungskosten des E-Fahrzeuges beinahe dreimal so hoch sind, so liegt das zum einen daran, dass die Änderungen für die Aufnahme des elektrischen Antriebs und der Batterie in Versuchswerkstätten sehr teuer sind und dass die neu entwickelten elektrischen Komponenten erst recht einem Vergleich mit seriengefertigten Verbrennungsmotoren nicht standhalten können. Auch bei Fertigung in vergleichbaren Serien wird gemäss der dritten Säule das Elektrofahrzeug immer noch etwa 25 % teurer bleiben. Ein Teil dieses Mehrpreises folgt daraus, dass Fahrgestell und Antrieb für das zusätzlich zu bewegende Batteriegewicht bemessen werden müssen. Der verbleibende Rest entsteht dadurch, dass elektrische Komponenten vom Prinzip her dauerhafter konstruiert sein müssen.

Passt man das Fahrzeug selbst an die Lebensdauer des Elektroantriebes an, so steigt der Anschaffungspreis dementsprechend. Darunter ist nicht unbedingt ein Langzeitauto zu verstehen. Diese Kosten können auch ebenso dazu verwandt werden, nach angemessener Benutzungszeit bestimmte Teile zu erneuern.

Der Vergleich der festen Betriebskosten im rechten Teil von Fig. 4 zeigt schon ein günstigeres Ergebnis. Besonders wirkt sich in der vierten Säule die von 10 auf 20 Jahre verdoppelte Abschreibungszeit aus. In Anlehnung an die derzeitige deutsche Praxis wurde zusätzlich unterstellt, dass Elektrofahrzeuge, wenn auch nur geringfügig, sowohl in der Steuer wie in den Versicherungskosten weiterhin bevorzugt werden.

Im technischen Abschnitt war schon darauf hingewiesen worden, dass die Zukunft des Elektrofahrzeuges entscheidend geprägt wird nicht nur von Fortschritten in der elektrischen Speichertechnik, sondern auch von der Entwicklung einer geeigneten Versorgungsinfrastruktur. Diese Argumentation bekommt noch zusätzliches Gewicht, wenn man nach Fig. 5 nunmehr die beweglichen Betriebskosten vergleicht. Dabei genügt für diese grobe Betrachtung die jeweilige Unterteilung in die Kosten für Reparaturen und Wartung und die Kosten für die Antriebsenergie. Die Auswertung der bisherigen Versuche in der Praxis zeigt für den ersteren Teil einen unter Berücksichtigung der unvermeidbaren Kinderkrankheiten vertretbaren Mehrpreis, der zu recht vermuten lässt, dass bei ausgereifter Technik Kostenvorteile gegenüber dem Verbrennungsmotorfahrzeug erwartet werden dürfen.

In die eigentlichen Kraftstoffkosten müssen selbstverständlich die Kosten für den Elektrizitätsspeicher und die Nachlade-Infrastruktur einbezogen werden. Man erkennt sofort, dass diese so eindeutig überwiegen, dass die Kosten für die elektrische Energie eine ganz untergeordnete Rolle spielen.

In der Versuchsphase mussten für die Energiespeicher eine relativ kurze Abschreibungszeit und recht erhebliche Kosten für deren Wartung sowie für Reservevorhaltung angesetzt werden. Die Anschaffungskosten selbst sind für Versuchsbatterien heute noch hoch. Entsprechend gross sind die Chancen, bei Serienproduktion die Anschaffungskosten zu senken, durch verbesserte Technik eine Abschreibungszeit von 10 Jahren zu ermöglichen und den Wartungsaufwand ebenso wie die notwendige Reservevorhaltung zu reduzieren.

Die grösste Aufgabe liegt aber auch aus wirtschaftlicher Sicht in der Senkung der Kosten für die Infrastruktur. Diese sind bei den hier betrachteten deutschen Elektrotransportern so besonders hoch, weil man die aufwendige Technik des Batteriewechsels gerade in der Versuchsphase schon erproben wollte. Die Wechseleinrichtungen wurden ebenfalls mit fünfjähriger Abschreibungszeit versehen, wie das bei Versuchen in der Regel üblich ist, und sie belasten die Betriebskosten deswegen so erheblich, weil eine Einrichtung, die später 100 bis 200 Fahrzeuge bedienen könnte, durchschnittlich 3 bis 4 Fahrzeugen zugeordnet werden musste. Ergänzt wurde diese Versorgungsinfrastruktur durch relativ reichlich dimensionierte Ladegleichrichter, um die Versuchsfahrzeuge möglichst schnell wieder betriebsbereit zu haben.

Eine so erhebliche Reduzierung der Kosten für die Infrastruktur wird nur möglich sein, wenn man dem für die Elektrizitätsversorgung typischen Argument konsequent folgt und mit möglichst kleinen Ladegeräten dezentral die Batterien speist. Eine weitere Bedingung, die für wirtschaftliche Elektri-

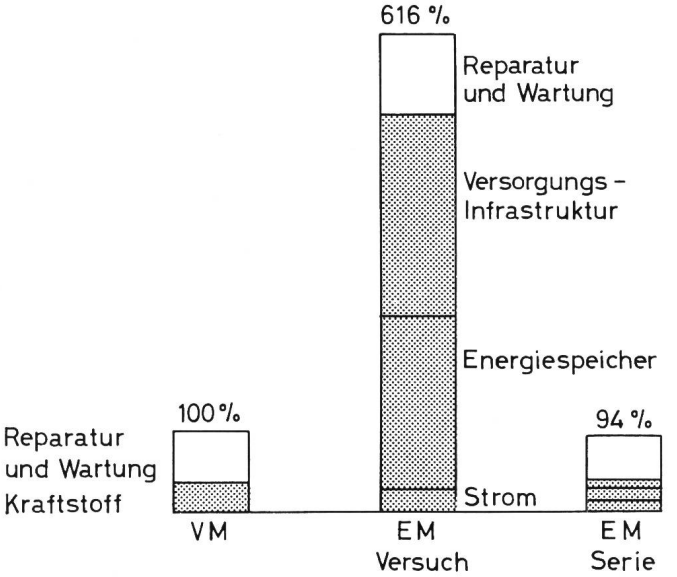

Fig. 5 Betriebskosten für Transporter

zitätsversorgung auch in allen anderen Bereichen gilt, muss zusätzlich erfüllt sein, und das ist eine technische Qualität, die für diese Infrastruktur Abschreibungszeiten von mindestens 20 Jahren zulässt. Rechtzeitige, gründlich durchdachte und langfristig orientierte *Normung* der wesentlichen technischen Teile ist *entscheidende Voraussetzung* für den wirtschaftlichen Erfolg.

6. Zeitbedarf für die Einführung des Elektromobils

Die Prognose darüber, wann sich elektrische Kraftfahrzeuge auf einem freien Markt einführen lassen, ist von so zahlreichen Randbedingungen abhängig, dass nur ein Trend abgeschätzt und zur Diskussion gestellt werden kann.

Vorweg muss vorausgesetzt werden, dass sich die Weltwirtschaft einigermassen stetig weiterentwickelt, was bedingt, dass nicht neue, politisch bedingte Ölversorgungskrisen eintreten.

Umweltfreundlichkeit und Versorgungssicherheit unabhängig vom Erdöl sind wichtige Argumente, die der verantwortliche Politiker anerkennen wird. Die Industrie ist aber vom Markt abhängig, und die Kaufbereitschaft des Kunden wird durch Preis und Qualität bestimmt. Geht man davon aus, dass es technisch möglich ist, elektrische Kraftfahrzeuge in Grossserien zu einem vernünftigen Preis zu bauen, so entscheiden die Kosten für die Antriebsenergie selbst und die Fortschritte auf dem Batteriesektor die Marktfähigkeit. Der in Fig. 6 dargestellte Zeitplan berücksichtigt diese wesentlichen Einflussgrössen.

Zunächst dürfen wir davon ausgehen, dass nach allen Prognosen bis Ende dieses Jahrhunderts die heute bekannten, zu niedrigen Kosten produzierenden Ölquellen weitgehend versiegt und die gesamten flüssigen Erdölreserven der Erde schon beinahe zur Hälfte verbraucht sein werden. Selbst wenn man sich nicht aus politischer Verantwortung zu einer Drosselung der Ölproduktion im Interesse der Streckung der Vorräte entschliesst, wird das Regulativ des gestiegenen Preises den Ölverbrauch auf die besonders wichtigen, schwer zu substituierenden Bereiche lenken. Dies rechtfertigt die Annahme, dass sich im Jahre 2000 auch der Strassenverkehr schon sehr weitgehend auf Sekundärenergien stützen muss. Die Schätzung, dass dann etwa 30 % der Fahrzeuge elektrisch betrieben werden, lässt noch ausreichenden Spielraum für synthetische, gasförmige oder flüssige Kraftstoffe. Gewisse Hinweise ergeben sich auch aus verschiedenen Studien über die künftige Deckung des Weltenergiebedarfes. Danach rechnet man für das Jahr 2000 mit einem Anteil der Kernenergie in Höhe von etwa 45 % am gesamten Primärenergieverbrauch. Bis zum gleichen Termin soll der Anteil der Elektrizität zur Deckung des Energiebedarfs von heute etwa 10 % auf bis zu 25 % steigen. Um dies zu erreichen, müssen etwa 80 % der eingesetzten Kernenergie in Elektrizität umgewandelt werden. Etwa 3 bis 5 % der dann erzeugten elektrischen Energie genügen bereits, um die genannten 30 % der Strassenfahrzeuge zu versorgen.

Wesentliche Orientierungsdaten auf dem Weg in die Zukunft wird die Batterietechnik zu setzen haben. Fig. 6 geht davon aus, dass es gelingt, auf der Basis heute weitgehend bekannter Technologien (z. B. Bleibatterie, Nickel-Eisen) bis zum Jahre 1980 die spezifische Energiedichte zu verdoppeln und bis zum Jahre 1990 heute noch in der Laborentwicklung stehende neue Batterien (z. B. Natrium-Schwefel) zu fertigen, die um den Faktor 5 verbessert sind. Die beiden gezeigten Kurven sollen andeuten, wie diese zu erwartenden Verbesserungen sich auf

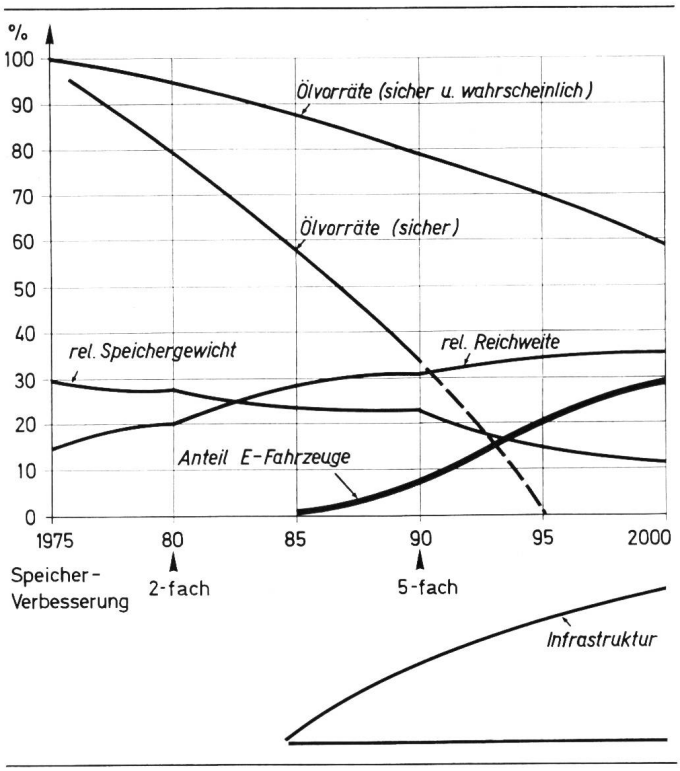

Fig. 6 Zeitplan für die Einführung von E-Fahrzeugen

die Reichweite je Batterieladung im Vergleich zu einer konventionellen Tankfüllung und auf die Reduzierung des Anteiles des Batteriegewichtes am zulässigen Fahrzeuggesamtgewicht auswirken. Man erkennt, dass die Vergrösserung der Reichweite zeitliche Priorität vor der Senkung des Batteriegewichtes haben wird.

Nach dem heutigen Stand der Technik dürfte es sinnvoll sein, mit einem Beginn der Produktionsphase nicht vor dem Jahre 1985 zu rechnen, weil man diese Zeitspanne sicherlich noch braucht, um die technischen Voraussetzungen für Konstruktion und Serienfertigung zu schaffen. Auch dann werden die Zuwachsraten zunächst noch klein sein und sich auf Spezialfahrzeuge und vor allem auf solche Fahrzeuge beschränken müssen, die in grösseren Flotten (z. B. Post, Kommunalbetriebe, EVU) eingesetzt werden. Dort sind, bezogen auf den Gesamtfahrzeugbestand, gewisse anfängliche Mehrkosten auch leichter zu vertreten. Im übrigen berücksichtigt die Zuwachskurve, dass der Anteil der Elektrofahrzeuge an der Gesamtproduktion sich dann zunächst relativ schnell auf etwa ein Fünftel der produzierten Fahrzeuge steigert und dass er sich nach und nach einem Sättigungswert von etwa 25 bis 30 % nähert.

Wesentliche Voraussetzung für die Einführung der Fahrzeuge ist es, dass man im Jahre 1985 und von da an stets mit einem gewissen Vorlauf mit dem Ausbau der Versorgungsinfrastruktur beginnt.

Am bedeutsamsten ist aber wohl die Erkenntnis, dass uns für die grundsätzlichen Vorarbeiten *nur noch knapp 10 Jahre* zur Verfügung stehen. Ob sie ausreichen werden, ist abhängig davon, dass die Anstrengungen in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Industrie und Wissenschaft wesentlich verstärkt und entsprechend gefördert werden und dass die ergänzenden Modellversuche in der Praxis auf grössere Stückzahlen ausgedehnt werden, um die gewonnenen Erkenntnisse

statistisch abzusichern und die Entwicklungsingenieure durch gewonnene Erfahrungen auf dem neuesten Stand zu halten.

Die vielfältigen technischen wie wirtschaftlichen Verknüpfungen zwischen Versorgungsinfrastruktur, Elektrizitätsspeicher, Fahrzeug und Antrieb erfordern *engste Zusammenarbeit aller beteiligten Fachbereiche*. Ohne Kenntnis der Probleme des anderen und die Bereitschaft, diese bei den eigenen Arbeiten zu berücksichtigen, wird das Gesamtsystem elektrischer Strassenverkehr nicht optimal entwickelt werden können. Internationaler Erfahrungsaustausch ist wichtige Voraussetzung für die unerlässliche gemeinsame Arbeit an Sicherheitsrichtlinien und Normen.

Adresse des Autors
Hans-Georg Müller, Dr.-Ing., Geschäftsführer der GES, Gesellschaft für elektrischen Strassenverkehr mbH, Tersteegenstrasse 77, D-4 Düsseldorf 30.

Gegenwärtiger Stand der Entwicklung von elektrischen Fahrzeugen in der Welt

Von Jon M. G. Samuel

Zweck der vorliegenden Ausführungen ist, über Fahrzeuge, die sich im Produktionsstadium befinden oder es in kurzer Zeit erreichen werden, sowie über die Verbesserungen an den Batterien, die gegenwärtig im Handel sind, und schliesslich über die wahrscheinliche Auswirkung dieser Verbesserungen auf die Entwicklung von Fahrzeugen auf kurze und mittlere Frist zu berichten.

Le présent exposé traite des véhicules électriques qui sont parvenus au stade de la production ou qui y parviendront d'ici peu de temps, des améliorations apportées aux batteries qui se trouvent actuellement sur le marché et des répercussions probables que ces améliorations auront sur le développement des véhicules à court et à moyen terme.

1. Einleitung

Die zunehmende Energieknappheit in der Welt ist für jeden durch die Ereignisse der letzten drei Jahre klar deutlich geworden. Die Ölvorräte sind begrenzt, und die «Rohölwaffe» ist jetzt zu einem äusserst mächtigen politischen Instrument geworden. Die Verbraucherländer sind von Erzeugerländern, auf die man sich nicht stets verlassen kann, abhängig. Lärm und Luftverschmutzung sind in verschiedenen Stadtgebieten unerträglich geworden, und die Bemühungen, diese Phänomene bei den Verbrennungsmotoren einzudämmen, sind sehr kostspielig und steigern noch den Benzinverbrauch. Beim Transportwesen ist unsere gegenwärtige Abhängigkeit vom Rohöl fast vollkommen, und wir erschöpfen durch das Verbrennen von Öl in Verbrennungsmotoren ohne jegliche Einsicht die Lagerbestände, die wir vorteilhafter als Rohstoffe für die chemische Industrie verwenden könnten.

Ganz abgesehen von den Ölproblemen leidet ein grosser Teil der Automobilindustrie zurzeit unter Überkapazität, und man kann sich selbst fragen, ob dieser Industriezweig jemals das Niveau der Expansion wieder erreichen wird, das er zu Beginn der siebziger Jahre erreicht hatte. Seit Ende des Krieges stand die Automobilindustrie im Mittelpunkt der wirtschaftlichen Entwicklung der westlichen Welt, so dass es für die Regierungen der verschiedenen Länder vital ist, die Anzahl der Arbeitsplätze in diesem Sektor beizubehalten und die Nutzung der Ölquellen zu rationalisieren.

Keiner ist sich darüber im Zweifel, dass das gegenwärtige Klima nicht günstig für Umstellungen in der Automobilindustrie wäre; seit mehr als sechzig Jahren hat es keinerlei fundamentale Veränderungen mehr bei den Antriebssystemen gegeben. Fast sämtliche Bemühungen, die unternommen worden sind, waren darauf ausgerichtet, den Verbrennungsmotor bis in die kleinsten Details zu verbessern und zu vervollkommnen. Trotz den aussergewöhnlichen Problemen, die sich in bezug auf Technik und Ingenieurwesen ergeben, gestatten die elektrischen Fahrzeuge einen Transport mit Multitreibstoff, eine Reduzierung von Lärm und Luftverschmutzung und schliesslich eine absolute nationale Unabhängigkeit gegenüber dem eingeführten Rohöl.

2. Die Fahrzeugentwicklung in den verschiedenen Ländern

Die *amerikanische Industrie* ist vom Kongress, der im Jahre 1975 einen «Electric Vehicle Research, Development and Demonstration Act» (120 Millionen Dollar) erlassen hat, sehr ermutigt worden. Mike McCormack, Hauptreferent dieses Gesetzentwurfes, hat als Mitglied des Kongresses erklärt: «Erst wenn der Beweis gegeben ist, dass die Öffentlichkeit diese Initiative zustimmend annimmt, wird sich unser Land in massiver Weise für eine Politik engagieren, die darauf ausgerichtet ist, neue Transportsysteme zu entwickeln, die geeignet sind, unsere Abhängigkeit vom importierten Öl zu reduzieren und die Auswirkungen dieser Abhängigkeit auf unsere Wirtschaft einzuschränken.» Es ist zu hoffen, dass dieses Gesetz möglichst bald zu einer Beschleunigung der Entwicklung der elektrischen Fahrzeuge führen wird, obwohl in letzter Zeit die Anregungen mit der grössten direkten Wirkung von dem «Electric Vehicle Council» ausgingen, das die Elektrizitätsversorgungsunternehmen vertritt und ein Anschaffungsprogramm für elektrische Nutzfahrzeuge lanciert hat.

Im Rahmen dieses Programms hat die Firma *Battronic* aus Boyertown (Pennsylvania) einen Vertragsabschluss über 120 Lieferwagen erzielen können. Diese Lieferwagen, die eine Nutzlast von 450 kg aufweisen, gehen in mancher Hinsicht der Zeit voraus.

Für die Inbetriebnahme dieser Fahrzeuge in den amerikanischen Städten war es unbedingt erforderlich, dass sie sich in geeigneter Form in den Verkehr auf den Autostrassen einfügen. Da ihre Maximalgeschwindigkeit 90 km/h beträgt und sie ein grosses Beschleunigungsvermögen besitzen, stellt