

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: Energiequellen für Elektrofahrzeuge

Autor: Port, Frederick J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-914987>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.03.2025

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

3. Zukunftsperspektiven

Bei der Zusammenfassung der Entwicklungen der elektrischen Fahrzeuge in der Welt lässt sich gewiss behaupten, dass es keine magische Formel gibt, die den zukünftigen kommerziellen Erfolg der elektrischen Fahrzeuge bestimmen könnte. Die Entwicklung der Batterien – die äusserst unterschiedlich ist – ist immer noch massgebend, wenn man erreichen will, dass die elektrischen Fahrzeuge von der Öffentlichkeit noch besser aufgenommen werden. Jedoch sind die gegenwärtig unternommenen Bemühungen, die dem Chassis, dem Motor und dem Antrieb gewidmet sind, für eine optimale Anwendung der in der Batterie begrenzt verfügbaren Energie ebenfalls von grosser Bedeutung.

Es ist unbestreitbar, dass der stets wachsende Druck in bezug auf den Schutz der Umwelt und die Brennstofferspar-

nis einen Anreiz für die Entwicklung der elektrischen Fahrzeuge darstellen. Die letzten Jahre der intensiven Entwicklung haben uns lediglich das reale Potential der elektrischen Fahrzeuge aufgezeigt und an den Tag gelegt, wieviel noch zu machen ist, um daraus ein Maximum herauszuholen. Ich bin davon überzeugt, dass die erforderlichen Lösungen gefunden werden, dass die technische Entwicklung sich beschleunigen wird und dass die Öffentlichkeit sich immer mehr von den Vorteilen der elektrischen Fahrzeuge überzeugen lassen wird.

Adresse des Autors

Sir Jon M. G. Samuel, Advanced Vehicle Systems Ltd., Bessemer Road, Welwyn Garden City, Herts (GB).

Energiequellen für Elektrofahrzeuge

Von Frederick J. Port

Noch vor einigen Jahren gab man der Entwicklung von leistungsfähigen Traktionsbatterien keine grossen Chancen. Die ursprünglich projektierten rund 25 verschiedenen Batterietypen sind heute auf 4 zusammengeschmolzen, die Aussicht auf Erfolg bieten. Es sind dies eine verbesserte Blei-Säure-Batterie, dann die Nickel-Zink- und die Zink-Chlor-Batterie und als Zukunftshoffnung die Natrium-Schwefel-Batterie. Diese Entwicklungen können mit einiger Zuversicht beurteilt werden und würden, sofern sie in ein optimiertes Elektrofahrzeugsystem eingegliedert werden können, zu einer attraktiven Fahrleistung führen.

1. Allgemeines

Vor zehn bis fünfzehn Jahren war der Hauptbeweggrund für die Entwicklung des Elektrofahrzeugs die Luftverschmutzung. Zwar sind durch Weiterentwicklung der Verbrennungsmotoren nicht unwesentliche Verbesserungen erzielt worden, leider aber auf Kosten erhöhten Kraftstoffverbrauchs. Nun sind sich heute jedoch weitblickende Leute darin einig, dass die Welt es sich einfach nicht leisten kann, Erdöl für Zwecke zu verwenden, für die eine sinnvolle Alternative besteht bzw. geschaffen werden kann. Der Erdölboykott und die drastischen Preissteigerungen haben erheblich zur Entwicklung dieses Bewusstseins beigetragen.

Dieser Umstand hat der Entwicklung des Elektrofahrzeugs erhöhte Berechtigung verliehen und darüber hinaus ihre volkswirtschaftliche Bedeutung erhöht. Ob die Reaktion der Öffentlichkeit den Sachverhalten entspricht, darüber lässt sich streiten; sicher ist jedoch, dass sie einen bedeutenden Nebeneffekt bewirkt hat, nämlich die Motivierung der Regierungsbehörden zur Beteiligung an der bevorstehenden Aufgabe. Selbst diejenigen, für die die unternehmerische Freiheit unabdingbar ist, können sinnvolle Regierungsbeteiligung an den mit hohen Investitionen und erheblichen Risiken verbundenen Arbeiten, die zur Verminderung unserer Anfälligkeit gegenüber abnehmenden Ölreserven erforderlich sind, nur begrüssen. Denn was würde die Nachwelt über uns sagen, wenn wir und alle Verantwortlichen jetzt nicht täten, was in unseren Kräften steht?

Il y a quelques années encore, on accordait peu de chances de réussite aux travaux de mise au point de puissantes batteries destinées à la population. Des quelque 25 projets initiaux de différents types de batterie, il ne reste aujourd'hui plus que 4 qui ont des chances d'aboutir. Il s'agit notamment des projets d'une batterie améliorée à plomb et acide, d'une batterie à nickel et zinc et d'une autre à zinc et chlore, et finalement, comme perspective d'avenir, d'une batterie à natrium et soufre. Ces conceptions autorisent de bons espoirs, et, dans la mesure où elles peuvent être utilisées sur un véhicule électrique bien optimisé, elles devraient permettre à celui-ci d'intéressantes performances.

Ein weiteres Ereignis war – zumindest in den Vereinigten Staaten – ein Meinungswandel bezüglich des meistversprechenden Sektors des Elektrofahrzeugmarktes. In den frühen Tagen des Elektrofahrzeugs richteten sich die Entwicklungsanstrengungen angesichts der tatsächlichen Leistungsmöglichkeit dieser Fahrzeuge auf Lieferwagen und Busse.

Zu jener Zeit waren die Unternehmen davon überzeugt, dass für diese Art Fahrzeuge «logische» Märkte bestünden. Diese Ansicht herrschte natürlich auch in Westeuropa, in Japan und – laut der Presse – auch in Russland und in den Ostblockstaaten vor.

In Amerika haben wir jedoch darüber hinaus noch einen etwas ungewöhnlichen Markt, dessen Entwicklung durch die Ereignisse seit jenen Jahren begünstigt worden ist. Es ist dies der Markt für Familienzweit- und -drittwagen. Über ein Drittel aller amerikanischen Familien, die Autobesitzer sind, haben mehr als einen Wagen. Gemäss Schätzungen gab es in diesen Familien im Jahr 1975 27 Millionen Zweit- und Drittwagen, und für 1980 wird diese Zahl auf 32 Millionen angesetzt. Statistiken, die indirekt über die Verwendung dieser Zweit- und Drittwagen Auskunft geben, lassen den Schluss zu, dass, vom Standpunkt ihres Einsatzes aus betrachtet, etwa die Hälfte der auf diesen Markt entfallenden Fahrzeuge durch dem neuesten Entwicklungsstand entsprechende Elektrofahrzeuge ersetzt werden können. Das wären etwa 16 Millionen Fahrzeuge im Jahr 1980.

Im Hinblick auf diesen potentiellen Markt hat die Energieforschungs- und -entwicklungsbehörde der USA (ERDA) Aufträge für den Entwurf eines viersitzigen Elektrofahrzeugs an die Airesearch Manufacturing Company, die AMF Incorporated und die General Electric Company vergeben.

Zum wichtigsten Ziel bei der Entwicklung des Elektrofahrzeugs in den USA ist nunmehr der Personenwagen geworden und somit an die Stelle der Lieferwagen und Busse getreten.

Eine weitere vorausgesehene Entwicklung war die, dass eine grosse Anzahl Pionierunternehmen auf dem Gebiet des Elektrofahrzeugs ihre Tätigkeit aus finanziellen Gründen einstellen mussten. Alle diese Unternehmen haben einen Beitrag geleistet, und wir wollen hoffen, dass diejenigen, die sie abgelöst haben, sich auf ihre Vorarbeit stützen werden.

Jedoch hat sich in den letzten zehn Jahren auch Positives ereignet. Es sind wesentliche Verbesserungen bei den Fahrzeugen gegenüber früheren zu erkennen; die Fahrzeuge selbst sind verbessert worden und auch die Batterien. Ferner sind auch Bedeutung und Leistungsfähigkeit der heute an den Entwicklungsarbeiten beteiligten Institutionen nicht mit der damaligen zu vergleichen. Heute kann darauf verwiesen werden, dass Firmen wie die General Electric Company und die Chrysler Corporation mit ESB Incorporated bei der Entwicklung des Elektrofahrzeugs zusammenarbeiten. Auch ist heute ein unvergleichlich stärkeres Interesse am Elektrofahrzeug festzustellen.

Welche Ereignisse sind entgegen den vor zehn bis fünfzehn Jahren herrschenden Erwartungen *nicht* eingetreten?

Die beiden wesentlichen Voraussagen, die sich nicht erfüllt haben, sind folgende:

1. Was Personenwagen, Busse und Lieferwagen betrifft, gibt es nirgendwo in der Welt wirklich neue, lohnende Märkte für das Elektrofahrzeug.

2. Es gibt noch kein neues hochleistungsfähiges Batteriesystem für den Antrieb solcher Fahrzeuge.

Diese Tatsachen sind zwar enttäuschend, jedoch dürfen wir nicht die Augen vor ihnen verschliessen. Im Gegenteil müssen wir immer wieder darauf aufmerksam machen und uns eingehend um die Kenntnis der Gründe bemühen, weshalb diese vor Jahren angekündigten Ereignisse nicht eingetreten sind.

Wir sind uns alle darin einig, dass eine preiswerte, langlebige Batterie mit hoher Energiedichte dringend benötigt wird. Wenn eine solche Batterie verfügbar wäre, so würde es vermutlich bereits eine gutgehende Elektrofahrzeugindustrie geben. Es gibt Leute, die behaupten, dass die Verwirklichung dieser preiswerten, langlebigen, leistungsfähigen Batterie unmittelbar bevorsteht – kann man ihnen glauben?

2. Entwicklung der Elektrofahrzeug-Batterien

Gehen wir zurück bis zum Jahr 1967, als in Washington in öffentlichen Anhörungen vor einem gemischten Ausschuss des amerikanischen Senats neue Rechtsvorschriften für die Verwendung staatlicher Gelder für den Aufbau einer Elektrofahrzeugindustrie als Massnahme gegen die zunehmende Luftverschmutzung durch herkömmliche Kraftfahrzeuge untersucht wurden. Die meisten Anwesenden berichteten, dass eine Prüfung des Entwicklungsstandes des Elektrofahrzeugs ergeben hätte, dass diese Fahrzeuge eine schlechte Beschleunigung, keine zufriedenstellende Reichweite, kein Steigungsvermögen, schlechte Fahreigenschaften, mangelhafte Handhabung

und eine einfallslose Formgebung hatten und schliesslich jeglichen Komforts für den Fahrer entbehrten. Ausserdem waren sie unsicher auf den Autobahnen.

Die Batterien wurden gesondert behandelt. Liest man das Protokoll dieser Anhörung, so bekommt man den Eindruck, dass das Problem des Elektrofahrzeugs lediglich ein Batterieproblem war, ein Problem also, dessen Lösung angeblich ganz kurz bevorstand. Wir sollten uns jedoch dieses Protokoll etwas näher ansehen.

Die «Federal Power Commission» der USA erklärte, dass «ein Automobil, selbst ein Kleinwagen, mit keinem der bestehenden Speichersysteme – mit Ausnahme vielleicht der sehr teuren Silber-Zink-Batterie – eine Reichweite von 150 Meilen erlangen kann». An anderer Stelle desselben Protokolls heisst es, dass «eine annehmbare Lösung für ein Fahrzeug mit geringer Reichweite möglicherweise von einem der neuen Batteriesysteme wie der Zink-Luft- oder Natrium-Schwefel-Batterie erwartet werden könnte. Keines dieser Systeme ist jedoch soweit entwickelt, dass es in einem Strassenfahrzeug erprobt werden könnte; bis zum serienmässigen Einsatz einer dieser Batterien kann es noch fünf bis zehn Jahre dauern». Das war 1967.

Der Leiter einer grossen Automobilfirma sprach begeistert von Programmen, die seit 1956 – also seit elf Jahren – liefen, und sagte: «Wir rechnen damit, dass wir die für die Erreichung dieser (zufriedenstellenden) Leistungen erforderlichen Batterien, Motoren und Steuerungen innerhalb von vier bis fünf Jahren werden entwickeln können. In zehn Jahren dürfte dann die serienmässige Fertigung eines solchen Fahrzeugs möglich sein.» Er zeigte Anschauungsmaterial für eine Natrium-Schwefel-Batterie mit einer spezifischen Energiedichte von 330 Wh/kg.

Der Leiter einer Firmengruppe mit einem Umsatz von mehreren Millionen Dollar sprach über die Zink-Luft-Batterie. Er berichtete, dass sein Unternehmen vor fünf Jahren bereits Zellen mit geringer Leistung entwickelt hatte. Er sagte, dass von 1968 bis 1970 eine umfassende Erprobung und Vervollkommnung vorgenommen werden sollte, und erklärte abschliessend: «Wir rechnen mit der serienmässigen Verfügbarkeit dieser Zink-Luft-Batterien in den frühen 70er Jahren.» Er zeigte Darstellungen von Lieferwagen- und Busbatterien mit Energiedichten von 130 bis 155 Wh/kg bzw. 165 bis 200 Wh/kg.

Der Leiter einer Batterieherstellerfirma erklärte, dass «an Labormodellen (von Zink-Luft-Batterien) bereits eine Energiedichte von nahezu 330 Wh/kg erreicht wird». Ferner erwähnte er das Nickel-Zink-System. «Der voraussichtliche Vorteil dieses Systems», so sagte er, «ist seine aussergewöhnliche Lebensdauer. Prototypen werden in etwa zwei bis fünf Jahren verfügbar sein.» Er schloss mit der Erklärung: «... Diese Speichersysteme werden erst in frühestens fünf Jahren auf dem Markt erhältlich sein und in etwa acht Jahren in Fahrzeuge eingebaut werden können.»

Ebenfalls im Jahr 1967 erklärte der Leiter der Batterieabteilung des Entwicklungslabors eines kleineren Unternehmens, dass «die Arbeiten seines Unternehmens möglicherweise innerhalb von zwei Jahren zur Verwirklichung von Zink-Luft-Batterien führen könnten, die den Betrieb von Elektrofahrzeugen ermöglichen würden». Er veranschaulichte seine Ausführungen durch Darstellungen einer Batterie für «externe Aufladung» mit einer Energiedichte von 275 Wh/kg und einer

	Bleisäure EV-106	Bleisäure, verbessert	Nickel-Zink	Zink-Chlor	Natrium- Schwefel
Energiedichte (Wh/kg bei einstündiger Entladung)	24	40	60	110	125
Lebensdauer in Zyklen	400	800	1000	350	500
Anfangskosten (\$/kWh)	40	45	1000	60	50
Energiekosten (Cents/kWh)	10	5,6	10	17	10
Wahrscheinlichkeit des Einsatzes in den nächsten 5-8 Jahren (Schätzung)	100 %	85 %	50 %	25 %	10 %

Batterie für «interne Aufladung» mit einer Dichte von 130 Wh/kg.

Zu einem späteren Zeitpunkt, nämlich im Oktober 1967, kamen im Bericht der Elektrofahrzeugtagung des «Commerce Technical Advisory Board» des amerikanischen Handelsministeriums ähnliche Ansichten zum Ausdruck. Dort hiess es: «Mehrere neue für den Antrieb von Elektrofahrzeugen bestimmte Speichersysteme können angemessene Daten für Fahrzeuge mit begrenzten Fahreigenschaften garantieren. In allen Fällen ist mit einer Serienreife in frühestens fünf bis zehn Jahren zu rechnen.»

Sieben Jahre später, im Jahr 1974, gab eine heute der ERDA angehörende Abteilung der amerikanischen Regierung eine Studie über die «Folgen des künftigen Einsatzes von Elektrofahrzeugen für den Bezirk von Los Angeles» in Auftrag. Die Studie bezog sich auf drei bestimmte Jahre: 1980, 1990 und 2000. Die Verfasser, die General Research Corporation, gelangten zu dem Schluss, dass lediglich Batterien, die zum damaligen Zeitpunkt bereits nahezu Produktionsreife erreicht hatten, für das Elektrofahrzeug des Jahres 1980 überhaupt in Betracht kämen. Von allen Anwärtern war die Blei-Säure-Batterie soweit.

So sah die General Research Corporation im Jahr 1974 nach all den vielversprechenden Erklärungen in der Blei-Säure-Batterie die einzig geeignete Batterie für ein 1980 (also dreizehn Jahre nach den Anhörungen des Senats von 1967) zu bauendes Fahrzeug. Und sie hatte Recht.

Wie steht es denn mit den übrigen Batteriesystemen? Nach Befragung der Batteriehersteller kündigte die Studie der General Research Corporation im Jahr 1974 die Verfügbarkeit der Nickel-Zink-Batterien bis 1980, der Zink-Chlorhydrat-Batterien bis 1985 und der Lithium-Schwefel-Batterien bis 1990 an.

Ist es dann verwunderlich, wenn Zyniker behaupten: «Ihr von der Batteriebranche seid doch alle gleich – je weiter die Fertigung eines Produkts in der Zukunft liegt, desto besser sind seine angeblichen Eigenschaften.» Zu dieser kritischen Bemerkung besteht tatsächlich einige Berechtigung.

Wie ist es möglich, dass in unserer durch die Geschwindigkeit des technischen Fortschritts gekennzeichneten Epoche ein Jahrzehnt vergehen konnte, ohne dass wir dem Zeitpunkt der Verfügbarkeit der neuen Batterien wesentlich näher gekommen wären?

Der Grund hierfür erscheint mir recht einfach: Es gilt aussergewöhnlich schwierige Probleme zu überwinden. Bisher sind bereits zahlreiche fähige Köpfe und beträchtliche finanzielle Mittel zur Lösung dieser Probleme eingesetzt worden, ohne dass der erwartete spektakuläre Durchbruch eingetreten wäre.

Die preiswerte, langlebige Batterie mit hoher Energiedichte gibt es immer noch nicht, und man mag sich mit einiger Berechtigung fragen, ob man der Verwirklichung dieser Batterie heute überhaupt näher ist als vor zehn Jahren.

Vor diesem deutlich kritischen Hintergrund sind die möglichen Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge zu betrachten. Ursprünglich bestanden Projekte für über 25 verschiedene Batterietypen, von denen vier schliesslich Aussicht auf Erfolg bieten.

Es sind dies:

als zuverlässiges Streitross
als erfolgversprechender Anwärter
als gut eingeführter Mitstreiter
als letzte Hoffnung

die Blei-Säure-Batterie
die Nickel-Zink-Batterie
die Zink-Chlor-Batterie
die Natrium-Schwefel-Batterie

Zu den wichtigsten Merkmalen zählt in erster Linie die Energiedichte, das heisst die Wattstunden je Kilogramm, wegen ihrer Bedeutung für die Daten des Elektrofahrzeugs, insbesondere für seine Reichweite. Auch hier müssen wir wieder vereinfachen und die Energiedichte lediglich für einen einzigen Entladevorgang und bei kontinuierlicher Entladung betrachten. Mein Unternehmen hat die Entladezeit ausgewählt, die für eine Anwendung im Elektrofahrzeug am ehesten charakteristisch ist und die Testergebnisse am ESB-Elektrofahrzeug «Sundancer» erprobt. Es hat sich ergeben, dass die einstündige Entladung die für die Elektrofahrzeuge repräsentativste ist.

Der Entladevorgang setzt sich aus Perioden mit höheren und niedrigeren Entladegeschwindigkeiten und Perioden ohne Entladung zusammen. Die Entladekurve variiert je nach Fahrer und ist auch an den einzelnen Tagen unterschiedlich. Da wir jedoch eine stark vereinfachte Situation auswählen müssen, entschieden wir uns für die einstündige Entladung.

Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die Lebensdauer, ein noch komplexeres Problem. Beim Betrieb der Batterie ist jeder Zyklus unterschiedlich, was Entladungstiefe, Temperatur, Vibration, Art der Wiederaufladung, Standzeiten usw. betrifft. Wiederum müssen wir eine stark vereinfachte Situation aus der Reihe der Labortests auswählen, in der Hoffnung, dass sie für die tatsächlichen Bedingungen repräsentativ ist. Es gibt ein offiziell anerkanntes Testverfahren für die Lebensdauer von Golfwagenbatterien. Ein solches Testverfahren für die hier besprochenen Elektrofahrzeugtypen ist unbedingt erforderlich, und solange es dieses Verfahren nicht gibt, bleibt unser Reden über die Batterielebensdauer zwangsläufig vage.

Weitere hier zu erwähnende Merkmale sind die Anfangskosten je Kilowattstunde der Batteriekapazität und – wichtiger noch – die Energiekosten je abgegebene Kilowattstunde über die gesamte Lebensdauer.

Als Vergleichsnorm für die vier genannten Batteriemerkmale soll, wie aus Tabelle I ersichtlich, die EV-106-Batterie der ESB Incorporated herangezogen werden. Es handelt sich um eine 6-V-Blei-Säure-Batterie in einem Polypropylengehäuse, die speziell für Golfwagen entwickelt worden ist. Sie wird schon seit einiger Zeit serienmässig hergestellt und eingesetzt und kommt in ihren Anwendungsmöglichkeiten den Anforderungen des Elektrostrassenfahrzeugs am ehesten entgegen. Dabei steht EV für Elektrofahrzeug; 106 bedeutet, dass die Batterie während 106 Minuten kontinuierlich 75 A abgibt. Diese Entladezeit haben die Golfwagenhersteller als Norm angesetzt. Die Entladung innerhalb einer Stunde bedeutet natürlich eine stärkere Beanspruchung, aber selbst dann hat die Batterie noch eine Energiedichte von 24 Wh/kg.

Die Lebensdauer beträgt etwa 400 Zyklen bei der in unseren Labortests vorgenommenen kontinuierlich «tiefen» Entladung. Die Kosten für den Benutzer liegen bei etwa \$ 40 je Kilowattstunde der Batteriekapazität für einstündige Entladung, was auf einen Preis von 10 Cents je abgegebene Kilowattstunde über die gesamte Lebensdauer der Batterie hinausläuft. Ferner hat die Batterie einen guten Gebrauchtwert beim Eintausch gegen eine neue.

Es stellt sich die Frage, ob wir jetzt am Ende der Entwicklungsfähigkeit des Blei-Säure-Speichersystems angelangt sind. Die Antwort lautet eindeutig «Nein», insbesondere wenn es sich darum handelt, die Auslegung im Hinblick auf eine neue Anwendung zu optimieren.

Die Erwartungen an eine verbesserte Blei-Säure-Batterie (Spalte 2 der Tabelle I) sind für ein bereits so gründlich erforschtes Gebiet wie das Blei-Säure-System zwar hoch angesetzt, aber sie dürften erreichbar sein. Natürlich wird bei dieser Batterie der Preis je Kilogramm höher liegen. Demgegenüber werden die Anfangskosten je Kilowattstunde ungefähr die gleichen sein, während im Falle der Erreichung einer doppelten Lebensdauer die Energiekosten je Kilowattstunde über die gesamte Lebensdauer wesentlich gesenkt werden können. Ganz ohne Zweifel ist die Erreichung dieser Ziele einige Anstrengungen wert, denn sie würden sich sowohl auf die Rentabilität als auch auf die Daten des Elektrofahrzeugs sehr positiv auswirken.

Betrachten wir nun aber die übrigen Kandidaten auf der Tabelle I. Die Nickel-Zink-Batterie ist sehr erfolversprechend, und es sind zahlreiche Versionen dieser Batterie möglich.

Zink ist ein hervorragend geeignetes Material für Primärbatterien, jedoch ergeben sich ernsthafte Schwierigkeiten im Hinblick auf die Zyklisierbarkeit. Der grösste Teil der bisherigen Arbeit an dieser Batterie galt der Entwicklung eines – teuren – Separators zur Erhöhung der Lebensdauer. Unserer Ansicht nach würde die Erreichung einer Lebensdauer von 400 Zyklen bei Anfangskosten in Höhe von \$ 100 je Kilowattstunde für dieses Modell bereits erhebliche Schwierigkeiten bereiten, aber selbst wenn dies gelänge, wären die daraus resultierenden Energiekosten von 25 Cents je Kilowattstunde vergleichsweise unannehmbar.

Mit einem anderen Verfahren, nämlich durch Verwendung einer Vibrationselektrode ohne Separatoren, konnten 1000 Zyklen erreicht werden, allerdings auf Kosten der Energiedichte. Trotzdem haben wir dieses System mitberücksichtigt, da es die besten Aussichten darauf bietet, kostenmässig wettbewerbsfähig zu sein.

Zinkplatten sind zwar qualitativ gut, doch lassen die Anfangskosten erkennen, dass sie auch teuer sind.

Die Energiekosten je erzeugter Kilowattstunde sind durchaus annehmbar.

Bei der Zink-Chlor-Batterie haben wir es vor allem mit Zukunftsaussichten und somit mit Ungewissheiten zu tun. Die Tatsache, dass diese Batterie als Prototyp existiert, ist nicht massgeblich, ebensowenig die erreichte hohe Energiedichte. Was zählt, das sind die Lebensdauer und die Kosten, die dieses Batteriesystem insgesamt verursacht.

Die in Tabelle I angegebenen Kostenansätze basieren auf dem, was publiziert wurde, nicht auf dem, was man weiss. Das Röhrensystem und das erforderliche Hilfsaggregat für die Kühlung lassen vermuten, dass dieser Batterietyp wesentlich besser für den Lastausgleich im Netz geeignet ist als für ein Elektrofahrzeug. Es besteht der Verdacht, dass die Anfangskosten je Kilowattstunde für eine kleine Einheit wesentlich über \$ 60 liegen würden, so dass die Lebensdauer ausgesprochen hoch sein müsste, um diese Kosten zu rechtfertigen. Dieses System ist keineswegs erforscht.

Der letzte Kandidat auf Tabelle I ist, sozusagen als letzte Hoffnung, die Natrium-Schwefel-Batterie. In Wirklichkeit handelt es sich hierbei um eine ganze Familie von Kandidaten, die ihrer Natur nach Schmelzsalt-Batterien genannt werden könnten. In allen Fällen dient B-Aluminium als Elektrolyt, wobei jedoch das Natrium durch Lithium ersetzt werden kann und auch für den Schwefel Alternativen bestehen. Vereinfachend soll die gesamte Familie jedoch als Natrium-Schwefel-System bezeichnet werden.

Man mag sich erinnern, dass die Natrium-Schwefel-Batterie im Jahr 1967 als gründlich erforschtes System mit vielversprechenden Möglichkeiten gepriesen wurde. Die angestrebte Energiedichte lag damals bei 330 Wh/kg. Heute liegt sie zwar nur noch bei 125 Wh/kg, ist damit jedoch immer noch am höchsten im Vergleich zu den übrigen Systemen der Tabelle.

Die Ungewissheiten sind hier noch grösser als in den vorangegangenen Fällen, und dies, obwohl zahlreiche der fähigsten Batteriefachleute in der ganzen Welt sich bei ihrer Forschungsarbeit jahrelang mit diesem System beschäftigt haben. Wie bei dem Zink-Chlor-System ist der Grund für diese Anstrengungen um die Natrium-Schwefel-Batterie ihre mögliche Eignung als preiswerte, langlebige Batterie für den Lastausgleich, jedoch sind die grundlegende Technik und die zu überwindenden Probleme dabei dieselben wie für eine Anwendung im Elektrofahrzeug. Ein Beweis für das Ausmass der Probleme ist der im Vergleich zu den während der letzten zehn Jahre aufgewendeten finanziellen Mittel der nur sehr geringe Fortschritt bei der Entwicklung dieses Systems.

3. Erfolgsaussichten der verschiedenen Batterien

In der 5. Zeile der Tabelle I ist der aus verschiedenen Faktoren errechnete Prozentsatz des Grades der Wahrscheinlichkeit angegeben, mit dem unserer Meinung nach ein jedes der untersuchten Batteriesysteme innerhalb der nächsten fünf bis acht Jahre in eine nennenswerte Anzahl von Elektrofahrzeugen eingebaut werden wird. Hier ist darauf hinzuweisen, dass bei der Errechnung dieser Wahrscheinlichkeitsgrade sowohl die technischen als auch die wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt worden sind.

Abgesehen von der Blei-Säure-Batterie EV-106 ist für keine der angeführten Zahlen die Richtigkeit unbedingt nachweisbar.

Die Blei-Säure-Batterie EV-106 weist zwar Mängel auf, aber sie existiert in der Praxis, und die Anzahl der Fahrzeuge, die mit dieser Batterie ausgerüstet sind, nimmt stetig zu. Im Hinblick auf die verbesserte Blei-Säure-Batterie ist man recht zuversichtlich, und der genannte Satz von 85 % ist als vorsichtiger Ausdruck dieser Zuversicht zu verstehen.

Die übrigen Zahlen sind weniger zuverlässig. Die Rentabilität der Nickel-Zink-Batterie wäre dann nicht schlecht, wenn wir im tatsächlichen Einsatz eine Lebensdauer von 1000 Zyklen erreichen könnten. 50 % Wahrscheinlichkeit ist, kurzfristig gesehen, ein wohlwollender Ansatz.

In den Anfangskosten bei der Zink-Chlor-Batterie in einem kleinen Elektrofahrzeug liegt ein grosses Hindernis, und 25 % Wahrscheinlichkeit sind sehr günstig geschätzt.

Bei der Gruppe der Schmelzsatz-Batterien gibt es zwei erhebliche Schwierigkeiten. Erstens die schwerwiegenden technischen Probleme, die bereits erwähnt wurden, und zweitens das Risiko, das eintritt, wenn beträchtliche Mengen stark erhitztes flüssiges Natrium oder Lithium in Fahrzeugen mit hoher Geschwindigkeit auf unseren Autobahnen herumgefahren werden. In Anbetracht dessen sind auch hier 10 % Wahrscheinlichkeit als grosszügige Schätzung zu werten.

Wenn diese Zahlen der tatsächlichen Situation der Energiequellen für Elektrofahrzeuge zutreffen sollten, was bedeutet das dann für diejenigen, die an der Entwicklung der Elektrofahrzeugindustrie interessiert sind?

Vermutlich ist der mittelfristige kommerzielle Erfolg der beiden letztgenannten Batterien so wenig wahrscheinlich, dass sie nennenswerte Investitionen seitens privater Industrieunternehmen nicht rechtfertigen. Anders sieht die Sache für Regierungen und grosse Vereinigungen von Elektrizitätsversorgungsunternehmen aus, für die das Risiko zwar nicht geringer, der Nutzen für die Allgemeinheit jedoch so viel grösser ist als im Falle eines einzelnen Privatunternehmens, dass das Risiko-Nutzen-Verhältnis akzeptiert werden kann. Dies ist ein Fall, wo eine Weiterarbeit für eine Privatfirma sehr unvorsichtig wäre.

Die verbesserte Blei-Säure- und die Nickel-Zink-Batterie lassen auf Erfolgsaussichten schliessen, die auch für ein Privatunternehmen die Weiterentwicklung rechtfertigen. Nunmehr stellt sich aber die entscheidende Frage: Wie gut soll ein Elektrofahrzeug für den Fall, dass die angestrebten Ziele erreicht werden, für diese speziellen Energiequellen gebaut werden?

Die Arbeit, die aus einer Energiequelle gewonnen werden kann, hängt davon ab, wie gut diese Energiequelle auf die von ihr zu leistende Aufgabe abgestimmt ist. Von 1957 bis heute sind fast alle Urteile über die Elektrofahrzeug-Batterie auf der Basis einer Aufgabe erfolgt, die von Fahrzeugen erfüllt wurde, die durch Zusammensetzen auf dem Markt verfügbarer Einzelteile entstanden sind.

Aus jüngsten Studien, die die ESB Incorporated mit der General Electric Company und der Chrysler Corporation gemeinsam durchgeführt hat, ist zu entnehmen, dass ein tatsächlich fortschrittliches Elektrostrassenfahrzeug, das von Grund auf neu ausgelegt wäre, gegenüber den gegenwärtig auf dem Markt verfügbaren und erprobten Fahrzeugen deutliche Vorteile hätte.

Um Aussicht auf Erfolg zu haben, muss das Elektrofahrzeug auf vier Gebieten verbessert werden.

In erster Linie müsste die Reichweite erhöht werden. Bei eingehenden Nachforschungen wurde festgestellt, dass es technisch möglich ist, auch an anderen Bauteilen als der Batterie Verbesserungen vorzunehmen. Zwecks Erhöhung der Reichweite wäre auf alle folgenden Ziele hinzuwirken:

- Geringerer Rollwiderstand
- Geringerer Luftwiderstand
- Höherer Gesamtwirkungsgrad des Antriebs
- Nutzbremmung
- Reduzierung der Belastungsspitzen
- Verbesserung der Batterieeigenschaften entsprechend der Entladungsgeschwindigkeit in einem Elektrofahrzeug

Fast ebensowichtig ist die Verbesserung der Beschleunigung ohne Beeinträchtigung der Batteriekapazität. Diese Aufgabe betrifft nicht allein den Batterieingenieur. Seine Anstrengungen müssen ergänzt werden durch die Arbeit des Maschinen- und Elektronikingenieurs. Es sind bereits eine Reihe Entwürfe vorgelegt worden, von denen einige verwirklicht werden könnten.

Das Gesamtgewicht – und die Kosten – des Fahrzeugs muss gesenkt werden durch

- leichteres, leistungsfähigeres Fahrzeug
- kleineren Motor und weniger umfangreiche Elektronik
- bessere Ausnutzung der Batterie

Auch sind die Fahreigenschaften und die Handhabung zu verbessern. Dies bedeutet Weiterentwicklung der Dynamik, der Aufhängung, der Steuerung und der Gewichtsverteilung – Dinge, die eng miteinander verbunden sind.

Schliesslich wollen wir ein Fahrzeug, das allen Anforderungen an die Fahrsicherheit für den Autobahnverkehr genügt, das zuverlässig und sparsam im Energieverbrauch ist.

Das bedeutet zunächst, dass zu viele Leute sich während zu langer Zeit zu stark auf lediglich ein Mittel zur Lösung des Elektrofahrzeugproblems konzentriert haben, nämlich allein auf die Energiequelle. Sie haben nicht gemerkt, dass «alles miteinander verbunden ist». Dem Fahrzeug als Gesamtsystem, das um eine zwar verfügbare, aber kapazitätsbegrenzte Energiequelle herum zu bauen ist, wurde nicht genug Aufmerksamkeit gewidmet.

Die Tabelle II, 1. Kolonne, gibt Auskunft über die Daten der typischen «zusammengesetzten» bzw. dem heutigen Stand der Technik entsprechenden Elektrofahrzeuge, die mit Batterien ausgerüstet sind, die die höchste heute realisierbare Energiedichte aufweisen.

Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 48 km/h fährt das Fahrzeug 64 bis 72 km weit. Bei 88 km Stundengeschwindigkeit sinkt die Reichweite auf 32 bis 40 km. Den Test der «Society of Automotive Engineers Metropolitan Electric Vehicle» würde das Fahrzeug nicht einmal bestehen, da die Beschleunigung nicht ausreichend ist. Es hat eine Spitzengeschwindigkeit von 88 km/h und eine Reisegeschwindigkeit von 56 km/h. Die Beschleunigung ist schlecht, die Reichweite zu gering, die Steigfähigkeit begrenzt, die Fahreigenschaften schlecht, die Handhabung mangelhaft, die Formgebung einfallslos, und der Komfort für den Fahrer ist ausgesprochen armselig – womit wir eigentlich wieder bei dem Fahrzeug des Jahres 1967 angelangt wären.

Gesetzt den Fall, anhand der heutigen technischen Kenntnisse werden zusätzlich zu der Batterie auch noch andere Bauteile des Elektrofahrzeugs verbessert, und das System als sol-

	Heute verfügbares Elektrofahrzeug	Nach dem Stand der Technik mögliches Elektrofahrzeug
<i>Reichweite</i>		
Konstante Geschwindigkeit 48 km/h	64–72 km	314 km
Konstante Geschwindigkeit 64 km/h	48–56 km	257 km
Konstante Geschwindigkeit 88 km/h	32–40 km	177 km
SAE J 227 Metropolitan Driving Cycle	Kann nicht einen Zyklus durchlaufen	193 km
<i>Beschleunigung</i>		
Von 0 auf 48 km/h	12–20 s	10–12 s
<i>Geschwindigkeit</i>		
Höchstgeschwindigkeit	88 km/h	97 km/h
Reisegeschwindigkeit	56 km/h	88 km/h

ches werde im Hinblick auf die Erreichung folgender Ziele optimiert:

- Leichteres, leistungsfähigeres Fahrzeug
- Geringerer Rollwiderstand
- Geringerer Luftwiderstand
- Höherer Gesamtwirkungsgrad des Antriebs
- Kleinerer Motor und weniger umfangreiche Elektronik
- Reduzierung der Belastungsspitzen
- Nutzbremmung
- Verbesserung der Batterieeigenschaften entsprechend der Entladungsgeschwindigkeit in einem Elektrofahrzeug
- Bessere Ausnutzung der Batterie

so könnten, wenn man am Elektrofahrzeug als an einem Gesamtsystem arbeitet und die im vorangegangenen behandelte verbesserte Blei-Säure-Batterie einsetzen würde, die in der Tabelle II, 2. Kolonne, angegebenen Daten des Elektrofahrzeugs nach dem heutigen Stand der Technik erreichen.

Die Daten dieses verbesserten Elektrofahrzeugs sind auf der Basis von 314 km bei einer Stundengeschwindigkeit von 48 km und von 177 km bei einer Stundengeschwindigkeit von 88 km berechnet. Unter Berücksichtigung der Fahrweise der meisten

von uns, die in Städten oder zumindest in Stadtnähe leben, eine Fahrweise, die durch häufiges Bremsen und Anfahren gekennzeichnet ist, kann die Reichweite für eine Batterieladung noch mit 193 angegeben werden.

Das Fahrzeug hätte eine Beschleunigung, die es mit den mit Verbrennungsmotoren ausgerüsteten Fahrzeugen konkurrieren liesse, und es würde sämtlichen Sicherheitsanforderungen der «National Highway Traffic Safety Administration» genügen.

Die Studie über «Die Folgen des künftigen Einsatzes von Elektrofahrzeugen für den Bezirk von Los Angeles» hat ergeben, dass ein viersitziges Elektrofahrzeug mit einer Reichweite von 87 km pro Tag im Stadtverkehr des Jahres 1980 durchaus alle Funktionen erfüllen könnte, für die allein im Bezirk Los Angeles eine Million Fahrzeuge eingesetzt werden. Eine Million entspricht etwa 17% des zum genannten Zeitpunkt vermutlich bestehenden Fahrzeugparks. Unser geplantes verbessertes Elektrofahrzeug hat bei einer einzigen Batterieladung mehr als das Doppelte der genannten Reichweite. Dadurch ergibt sich noch eine positive Nebenwirkung: Während des Tages braucht die Batterie nicht aufgeladen zu werden, sondern das kann während der Nacht geschehen, was einen Beitrag zum Lastausgleich der Elektrizitätsversorgungsunternehmen bedeutet.

Es sollen hier nicht noch einmal die – teils optimistischen und teils pessimistischen – Feststellungen wiederholt werden, die vorher getroffen worden sind. Es sei aber doch nochmals darauf aufmerksam gemacht, dass zur Verwirklichung dessen, was wir anstreben, die finanzielle Unterstützung durch Regierung und Vereinigungen von Elektrizitätsversorgungsunternehmen notwendig ist, und dies hauptsächlich bei den risikoreichen Projekten, die im Erfolgsfalle bedeutenden Nutzen für die Allgemeinheit mit sich bringen würden.

Es kann mit einiger Zuversicht vorausgesagt werden, dass eine verbesserte Blei-Säure-Batterie oder vielleicht eine Nickel-Zink-Batterie, sofern sie sinnvoll in ein optimiertes Elektrofahrzeugsystem eingegliedert werden kann, schon bald zu einer Fahrleistung führen würde, die für eine beträchtliche Anzahl von Fahrzeugeigentümern sehr attraktiv wäre. Mit anderen Worten: Wenn ein solches Elektrofahrzeug auf den Markt kommt – ich bin sicher, dass es sich verkaufen wird.

Adresse des Autors

Frederick J. Port, Chairman of the Executive Committee EVC, President of ESB Incorporated, 5, Penn Center Plaza, Philadelphia, Pa. 19103.