

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 99 (2008)
Heft: 1

Artikel: Die Entwicklung bei Batterien und Antriebstechnik für Elektroautomobile
Autor: Mathoy, Arno
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-855804>

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: 12.05.2025

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

Die Entwicklung bei Batterien und Antriebstechnik für Elektroautomobile

Bescheren die neuesten Fortschritte im Batteriesektor und in der elektrischen Antriebstechnik dem Elektroautomobil eine grosse Zukunft?

Das hohe Gewicht der Batterien ist einer der wichtigsten Gründe, wieso sich Elektroautomobile nur langsam im Markt durchzusetzen beginnen. Die Entwicklung der letzten Jahre hat aber gerade in diesem Bereich wesentliche Fortschritte erzielt. So sind moderne Lithium-Ionen-Batterien bei gleicher Kapazität rund fünfmal leichter als Bleiakkumulatoren. Für eine Mindestreichweite von 160 km eines 1 t schweren Fahrzeugs muss die Batterie eine Kapazität von rund 20 kWh ausweisen, wozu eine 180 kg schwere Lithium-Ionen-Batterie ausreichen würde. Damit lässt sich bereits heute ein sinnvolles Verhältnis zwischen Fahrzeug- und Batteriemasse von rund 4:1 erreichen. Der vorliegende Beitrag beleuchtet den aktuellen Stand der Technik bei Batterien und Motoren von Elektroautomobilen.

Batterien und ihre realen Eigenschaften galten schon immer als Hauptgrund, warum sich der elektrische Antrieb für Automobile noch nie ernsthaft gegen die Verbrennungsmotoren durchsetzen konnte: Sie wurden

Arno Mathoy

stets als zu schwer, zu teuer und zu unzuverlässig empfunden. Doch zum Glück unterliegen auch negative Erfahrungen einer gewissen Halbwertszeit, sodass sich von Zeit zu Zeit das Interesse am Elektroautomobil immer wieder neu entfachen konnte. Auslösend wirkten dabei immer Ereignisse, welche die Technologie des Verbrennungsmotors auf dem jeweiligen Entwicklungsstand als innovationsbedürftig erscheinen liessen.

Nach dem Zweiten Weltkrieg waren dies die Versorgungsknappheit in der Nachkriegszeit, der erste Ölschock 1973 und ein gutes Jahrzehnt später die Ökobewegung. Bislang führten diese Ereignisse jedoch nicht zum Durchbruch der elektrischen Antriebe, sondern zu einer erfolgreichen Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors hinsichtlich Effizienz und Reduktion des Schadstoffausstosses. Die jeweils erreichten Ergebnisse bei den Elektroautomobilen hinterliessen jedes Mal unerfüllte Erwartun-

gen, frustrierte Ingenieure und negative Assoziationen mit der Technologie, vor allem mit den Batterien.

Hauptursache des bisherigen Scheiterns eines breiten Einsatzes von Elektroautomobilen

Zwischen dem Energieinhalt eines elektrochemischen Speichers, der Batterie, und der verwertbaren Energie eines herkömmlichen Treibstofftanks bestand bisher ein zu grosser Unterschied. Bei gleicher Masse speichert eine Bleibatterie nur rund 1% der mechanisch nutzbaren Energie eines Treibstofftanks, weshalb allein die Energiedichte von Flüssigkraftstoff bis heute jegliche Form von Ineffizienz der Verbrennungsmotoren – zumindest physikalisch – kaschieren konnte.

Auf der anderen Seite erforderte die unzureichende Energie- und sehr oft auch Leistungsdichte der Batterie Kompromisse, die vom Markt nicht akzeptiert wurden. Das grosse Volumen der bisher verfügbaren Batterien liess sich schlecht unterbringen, und die mangelnde Energiedichte ging oft zulasten der Reichweite. Zudem begrenzte die typische chemische Reaktionsgeschwindigkeit der bisherigen verfügbaren Hochenergiebatterien deren Leistungs-

dichte, limitierte dadurch die Fahrdynamik und liess so den elektrischen Antrieb schwächlich erscheinen.

In den letzten Jahren sind vor allem im Batteriesektor sehr bedeutende Fortschritte erzielt worden. Verglichen mit Bleibatterien, weisen moderne Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Batterien einen 5-fach höheren spezifischen Energieinhalt auf. Auch deren Leistungsdichte liegt etwa 5-mal über jener bisheriger Hochenergiebatterien [1]. Die zum Teil bereits realisierte Batterielebensdauer reicht heute schon für ein typisches Autoleben von 10 Jahren beziehungsweise für eine kumulierte Fahrdistanz von etwa 150 000 km. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob die Speichertechnik alleine diesmal dem Elektroautomobil zu einem Durchbruch verhelfen wird oder ob auch noch andere Rahmenbedingungen zutreffen müssen, die bislang von der Batterieproblematik überdeckt wurden.

Daten, die für das Elektroautomobil sprechen

Überschreiten des Fördermaximums von Erdöl (Peak Oil) und CO₂-Diskussion

Kaum jemand bezweifelt noch, dass die Begrenztheit der Ressource Erdöl einen sehr grossen Optimierungsdruck nicht nur auf den Verkehr, sondern auf alle energieaufwendigen Prozesse auslösen wird. Die Physik stellt uns dabei vor unterschiedliche Herausforderungen. Während der Wärmebedarf eines Gebäudes durch Isolation theoretisch auf null gesenkt werden kann, wendet ein bewegtes Fahrzeug stets Energie zur Überwindung der Luft- und Rollwiderstände auf. Das Optimierungspotenzial beschränkt sich daher auf jenen Teil, der bei der Umwandlung der mitgeführten Energie in Bewegungsenergie als Wärme verloren geht. Verbrennungsmotoren nutzen nur rund 1/3 des Energieinhalts des Kraftstoffes zur Bewegung, und dies auch nur dann, wenn sie in einem günstigen Arbeitspunkt betrieben werden. Im realen Fahrbetrieb, bei dem der Benzin- oder Dieselmotor weit unter seinem Wirkungsgradmaximum arbeitet, werden oft nur 20%

umgesetzt. Je mindestens ein weiteres Drittel verlässt das Fahrzeug über die heissen Abgase und über den Wasserkühler [2]. Moderne Elektroantriebe können hingegen bis über 90% des Energieinhalts des Speichers in Bewegung umsetzen [3], wobei jedoch nicht vergessen werden darf, dass die Elektrizität zum Aufladen der Batterie zum Teil auch aus fossilen Energieträgern gewonnen wird. Legt man den Durchschnittswirkungsgrad der thermischen Kraftwerke und den Übertragungswirkungsgrad der elektrischen Energie in die Batterie zugrunde, liegt der Gesamtwirkungsgrad des im Elektroautomobil verarbeiteten fossilen Energieträgers kaum über demjenigen einer direkten verbrennungsmotorischen Umsetzung.

Der elektrische Antrieb verursacht, aus diesem Blickwinkel gesehen, nicht weniger CO₂-Ausstoss als ein Verbrennungsmotor. Diese Tatsache wird gerne als Argument für die Beibehaltung des Status quo oder aber auch als Argument für die Forcierung der Atomenergie herangezogen. Dabei wird oft übersehen, dass global gesehen die Gesamtzahl aller heutigen Atomkraftwerke verzehnfacht werden müsste, wollte man Erdöl und Kohle vollständig durch Atomenergie substituieren [4]. Selbst in der Schweiz, deren Kernkraftanteil am Strombedarf schon jetzt mit 36% deutlich über dem globalen Atomstromanteil von 15% liegt, wäre immer noch ein Faktor 3 erforderlich, denn den heute rund 78×10^9 kWh an genutzter fossiler Energie (Benzin, Diesel, Flugtreibstoffe) stehen nur 26×10^9 kWh Atomstrom gegenüber.

Aus strategischer Sicht besteht jedoch ein grosser Unterschied zwischen dem direkten CO₂-Ausstoss eines konventionellen Fahrzeugs und dem indirekten eines Elektroautomobils, denn jede zukünftige technische Entwicklung und jede Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energie bei der Stromgewinnung wirkt sich unmittelbar positiv auf die Bilanz aller Elektroautomobile aus.

Unverminderte Fahreigenschaften durch elektrische Antriebstechnik

Die Marktchancen von Elektroautomobilen hängen meist nur sehr marginal von der Frage ihres indirekten CO₂-Ausstosses ab, dafür ist das Thema «Auto» viel zu emotional besetzt. Das Fahren mit Elektroautomobilen sollte vor allem auch Freude vermitteln. Wirklich nach dem Stand der Technik entwickelte Elektrofahrzeuge weisen zu konventionellen Automobilen ebenbürtige Fahreigenschaften auf. Diese Tatsache ist oft nicht einmal für Entscheidungsträger der Automobilfirmen (er)fahrbare. Dies mag mit ein Grund sein, warum sich viele Automobilhersteller mit einer eindeutigen Positionierung für das Elektroauto noch schwer tun. Auch die Fragen zum Kostenpotenzial lassen bereits heute sehr gute Aussichten für das Elektroautomobil erkennen.

Bedeutende Fortschritte in elektrischer Antriebstechnik

Bisheriger Stand der Technik

Merkwürdigerweise wurde die elektrische Antriebsmaschine schon immer selten mit der Frage nach der Machbarkeit von Elektroautomobilen in Beziehung gebracht. Die Allgegenwart elektrischer Traktionsantriebe aller Leistungsklassen, vom Hubstapler bis hin zum Hochgeschwindigkeitszug, liess überhaupt nie einen Zweifel daran aufkommen, dass der Stand der Technik auch für passende Antriebslösungen bei

elektrischen Automobilen hinreichend hoch sein sollte.

Diese weitverbreitete Ansicht entsprach aber bislang nicht dem tatsächlichen Sachverhalt. Soll nämlich der Antrieb mit einer einfachen Getriebestufe und ohne verstellbare Betriebsspannung auskommen, sind die Anforderungen an den Motor hinsichtlich konstanter Leistungsabgabe über einen weiten Drehzahlbereich sehr anspruchsvoll – viel anspruchsvoller als beispielsweise bei einem Hochgeschwindigkeitszug, dessen Steigfähigkeit wesentlich geringer sein muss als jene eines Strassenfahrzeugs.

Zwar könnten Schwächen der Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie durch ein mechanisches Schaltgetriebe kompensiert werden, so wie das für jede Verbrennungskraftmaschine zwingend erforderlich ist, jedoch

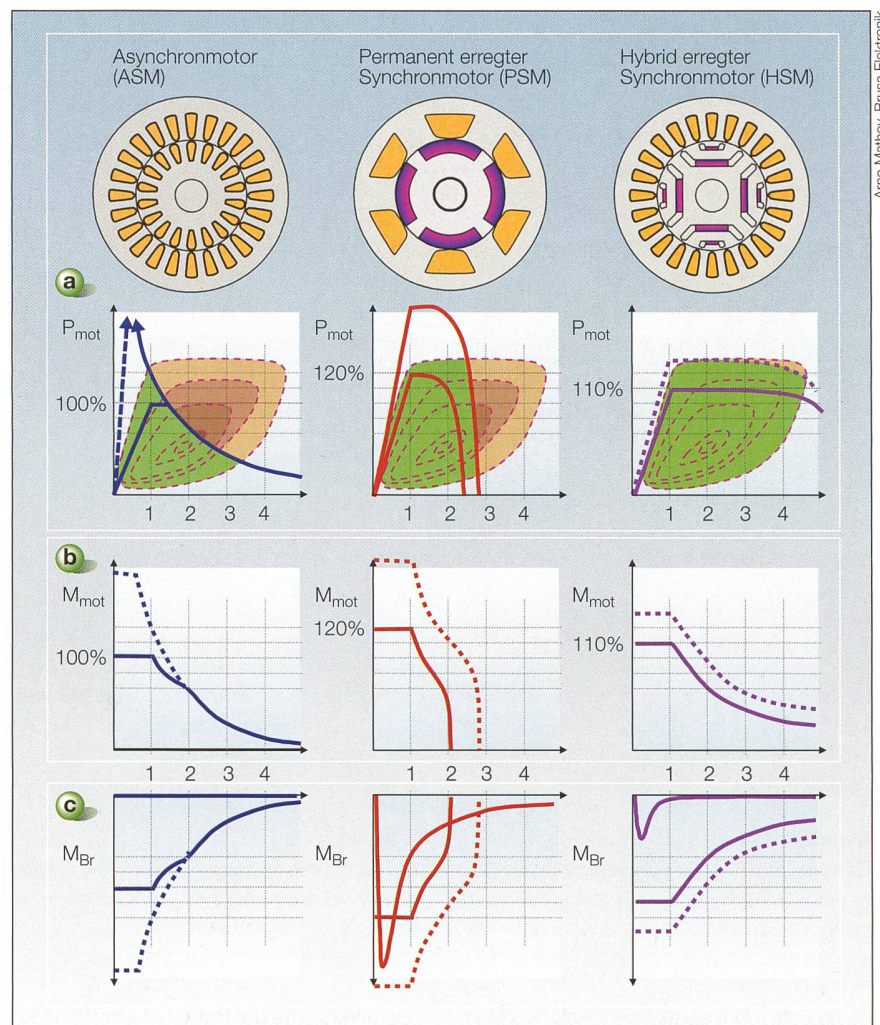


Bild 1 Charakteristische Motorkennlinien.

Alle Angaben sind auf die Nenn Drehzahl n_{eck} bezogen, an der die Motorspannung an die Batteriespannung «anschlägt» und ohne Zusatzmassnahmen nicht mehr weiter anwachsen kann.

Bild 1a: Die gestrichelten Linien zeigen die Kurzzeitleistung für 5 s, die durchgezogenen die Leistung für 30 s. Die eingefüllte Fläche entspricht dem Fahrleistungsprofil, wobei die grün gezeichnete Fläche die erreichbaren Werte darstellt.

Bild 1b: Die gestrichelten Linien zeigen das Kurzzeitmoment für 5 s, die durchgezogenen das Drehmoment für 30 s.

Bild 1c: Die dick durchgezogenen Linien zeigen das unbeeinflussbare Bremsmoment bei Umrichter kurzschluss, die dünn gestrichelten das Rekuperationsmoment für 5 s, die dünn durchgezogenen jenes für 30 s.

Arno Mathoy, Brusa Elektronik

articles spécialisés

Zusammenhang zwischen Fahrwiderständen und Energiebedarf

Rollwiderstandskraft F_{roll}

F_{roll} ist nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit und hängt von Strassenzustand und von den Reifen ab. Beim Fahren auf Asphalt sollte der Rollwiderstandsbeiwert (Reibungszahl μ) um 0,018 liegen.

$$F_{\text{roll}} = m_{\text{Fz}} \cdot g \cdot \mu$$

mit

m_{Fz} Masse des Fahrzeugs [kg]

g Fallbeschleunigung [m/s^2]

μ Reibungszahl [–]

Der Energieverlust infolge des Rollwiderstands für $s = 1000$ m beträgt für ein 1000 kg schweres Fahrzeug somit ($\mu = 0,018$):

$$E_{\text{roll}} = F_{\text{roll}} \cdot s = 180\,000 \text{ Nm} = 180\,000 \text{ Ws} = 50 \text{ Wh}$$

Luftwiderstandskraft F_{Luft}

F_{Luft} nimmt quadratisch mit der Geschwindigkeit zu und hängt von der Karosserieform ab (Widerstandsbeiwert c_w). Bei einer Geschwindigkeit von etwa 70 km/h ($\approx 19,4$ m/s) sollte er etwa gleich gross sein wie der Rollwiderstand. Der c_w -Wert liegt bei strömungsgünstiger Form unter 0,3. Da schwerere Fahrzeuge in der Regel auch grösser sind, kann für die Aufstandsfläche A_{Fz} als Näherungswert 2,4 m^2 pro Tonne Masse angenommen werden.

$$F_{\text{Luft}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{\text{Fz}} \cdot c_w \cdot v^2$$

mit

ρ Luftdichte (1,25 kg/m^3)

A_{Fz} Aufstandsfläche (grösster der Strömung entgegenstehender Körperquerschnitt [m^2])

c_w Widerstandsbeiwert (0,3, dimensionslos)

v Geschwindigkeit [m/s]

Der Energieverlust infolge des Luftwiderstands für $s = 1000$ m beträgt für ein 1000 kg schweres Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h (entspricht 19,4 m/s) somit ($A = 2,4$ m^2):

$$E_{\text{Luft}} = F_{\text{Luft}} \cdot s \approx 170\,000 \text{ Nm} = 170\,000 \text{ Ws} \approx 47 \text{ Wh}$$

Gesamtenergiebedarf an der Antriebswelle

Pro 1000 m und Tonne Fahrzeuggewicht ergibt sich somit die aufzubringende Energie $E_{\text{Fahr}} = E_{\text{roll}} + E_{\text{Luft}} \approx 100$ Wh. Umgerechnet auf 100 km sind dies 10 kWh bzw. 1 Liter Benzin. Ein modernes gleich schweres Fahrzeug mit Verbrennungsmotor würde dafür etwa 5 Liter Benzin verbrauchen.

bedingt dies sowohl einen erheblichen Zusatzaufwand an Mechanik als auch eine komplexe Abstimmung zwischen Leistungselektronik, Motor und Getriebe.

Die Klassiker: Asynchronmaschine und Gleichstrom-Nebenschlussmaschine

Ab etwa 1980 standen kompakte elektronische Leistungsumrichter zur Verfügung. Erst dadurch konnten die Gleichstrom-Nebenschlussmaschine und wenig später die Asynchronmaschine als Traktionsmotoren zum Einsatz kommen.

Da beide Maschinen stromerregt sind, kann man ihre Klemmenspannung bei einer bestimmten Drehzahl über die einstellbare Erregung in weiten Grenzen frei wählen. Mit schwächerem Erregerfeld sinkt zwar auch das erzielbare maximale Drehmoment proportional ab; wenn aber die Drehzahl um

denselben Faktor anwächst, wie das maximale Drehmoment sinkt, bleibt die Leistung an der Antriebswelle konstant, denn die Leistung ist ja das Produkt aus Drehmoment und Drehzahl.

Die Asynchronmaschine zeigt bei höheren Drehzahlen einen quadratisch abnehmenden Drehmomentverlauf. Soll bei ausreichender Steigfähigkeit von mindestens 25% auch eine hohe Endgeschwindigkeit von über 130 km/h erreicht werden, muss sie entsprechend überdimensioniert werden, was Gewichts- und Kostennachteile nach sich zieht.

Nebenschluss-Gleichstromantriebe zeigen diese Leistungsabnahme im Bereich des abnehmenden Feldes (Feldschwächebereich) nicht und erweisen sich trotz ihrer Bürsten als sehr zuverlässig. Allerdings erfordert der Kommutator zusätzlichen axia-

len Bauraum, was als der schwerwiegendste Nachteil der Gleichstrommotoren gelten kann.

Permanent erregte Synchronmaschinen und bürstenlose Gleichstrommaschinen

Mit der Verfügbarkeit hochwertiger Dauermagnetwerkstoffe, den Seltenerd-magneten, konnten sich permanent erregte Motoren als Hauptantriebe etablieren. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch eine hohe Remanenzflussdichte von rund 1,2 Tesla aus, das ist rund 4-mal mehr als ein Ferritmagnet, wie er in Lautsprechern verwendet wird. Ihre grosse Widerstandsfähigkeit gegen die entmagnetisierende Wirkung der Motorströme (Koerzitivkraft) wirkt sich ebenfalls sehr positiv auf die Drehmomentausbeute aus einem gegebenen Volumen aus. Der einzige Unterschied zwischen den permanent erregten Synchronmaschinen und den bürstenlosen Gleichstrommaschinen besteht in der Flussverteilung im Luftspalt.

Beide Motortypen zeichnen sich vor allem durch einen sehr hohen Wirkungsgrad im Nennpunkt und – gute Auslegung vorausgesetzt – durch sehr geringe Rotorverluste aus. Vor allem Letzteres führt zu kompakteren Abmessungen gegenüber stromerregten Maschinen bei gleicher Nennleistung. Da jeder permanent erregte Motor ein durch seinen Magnetgehalt definiertes Grenzmoment aufweist – während stromerregte Motoren dieser Einschränkung nicht unterliegen – sind permanent erregte Motoren den stromerregten im Kurzzeitbetrieb unterlegen.

Die Angabe des Wirkungsgrades im Nennpunkt sagt jedoch nur sehr wenig über die Energieeffizienz des Fahrzeugs aus. Um eine hohe Gesamteffizienz zu erreichen, muss der Antrieb in seinem gesamten Leistungsbereich einen hohen Wirkungsgrad und bei hohen Drehzahlen ohne Drehmomentabgabe eine geringe Leistungsaufnahme aufweisen (Schleppverluste).

In der Praxis überwiegen die Fahrzustände im tiefen Teillastbereich des Antriebmotors. Grosse Eisenverluste, wie sie für alle permanent erregten Motoren vor allem bei hohen Drehzahlen bei zugleich moderater Leistung typisch sind, wirken sich dabei ähnlich negativ aus wie eine wenig strömungsgünstige Karosserieform. Ausschliesslich permanent erregte Motoren können bei Ausfall des Umrichters (Kurzschluss zwischen Phasen) ein sehr grosses Drehmoment aufbauen und bergen dadurch auch gewisse Sicherheitsrisiken.

Hybrid erregte Synchronmaschinen

Eine weitere Gruppe von Motoren beruht auf dem Prinzip, dass sich ein magnetisier-

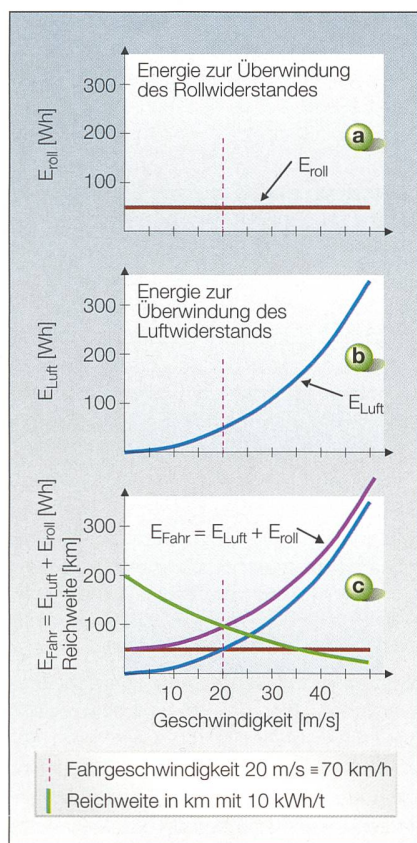


Bild 2 Energiebedarf an der Antriebswelle pro km und t bei unbeschleunigter Geradeausfahrt in ebenem Gelände.

Eine Geschwindigkeit von 20 m/s entspricht etwa 70 km/h.

Bild 2a: Energie zur Überwindung des Rollwiderstands; Bild 2b: Energie zur Überwindung des Luftwiderstands; Bild 2c: Gesamte benötigte Energie (Überlagerung der Kurven aus den Bild 2a und Bild 2b); die grüne Kurve beschreibt die mit 10 kWh/t erzielbare Reichweite in km.

barer (aber selbst nicht magnetischer) Körper mit einer ausgeprägten Vorzugsrichtung für den magnetischen Fluss in der Richtung des äusseren Feldes ausrichtet (Reluktanzprinzip).

Solche Reluktanzmotoren zeichnen sich durch eine sehr einfache Bauart und äusserste Robustheit aus. Allerdings schliessen sich die gewünschten Eigenschaften, hohe Leistungsdichte und geringe Geräuschemission, gegenseitig aus. Eine hohe Drehmomentausbeute wird erst mit Pulsströmen erreicht, welche nicht nur momentbildende, sondern auch pulsierende radiale Kräfte hervorrufen. Diese kneten den Stator richtiggehend durch und lassen ihn so zu einer kaum beherrschbaren Körperschallquelle werden.

Werden jedoch das Reluktanzprinzip und die permanente Erregung miteinander kombiniert, so lässt sich bei sorgfältiger Auslegung das Beste von beidem nutzen, ohne dass die spezifischen Nachteile allzu stark in den Vordergrund treten. Dabei wird der Umstand ausgenutzt, dass sich bei li-

near abnehmenden Grundeigenschaften die Nachteile quadratisch zurückbilden. Tragen beispielsweise die Magnete nur 50% zur maximalen Erregung bei, betragen die durch sie verursachten Grundverluste nur noch 25% eines voll permanent erregten Motors. In ähnlicher Weise gilt das auch für die Nachteile des Reluktanzprinzips.

So einleuchtend dieses Prinzip der Mischerregung auch erscheint, so wenig war es bis vor Kurzem möglich, derartige Motoren zu bauen, weil die verwendeten Magnetmaterialien zum Spielball des entmagnetisierend wirkenden Reluktanzanteils werden. Hybrid erregte Motoren enthalten zwar deutlich weniger Magnetwerkstoff als rein permanent erregte, doch werden an das wenige Material wesentlich höhere Anforderungen gestellt.

Solange das Verhältnis der Rohstoffpreise für Dauermagnetwerkstoffe zu den Basismetallen Kupfer und Stahl nicht gravierend nach oben verschoben wird, kann man behaupten, dass erst mit dem Prinzip der hybriden Erregung ein ökonomischer Weitbereichsantrieb möglich geworden ist. Erst dadurch lässt sich jene Fahrdynamik erzielen, die heute von einem Fahrzeug erwartet wird. So erfüllt der Hybridsynchronmotor die wohl wichtigste hinreichende Voraussetzung für die Zukunft des Elektroautos. Zum Glück noch rechtzeitig, denn sein Fehlen wäre im Zuge der Batteriediskussion vielleicht zu spät erkannt worden.

Verfügbarkeit brauchbarer Batteriesysteme

Energetische Betrachtungen

Ein Elektrofahrzeug mit einer strömungsgünstigen Karosserieform benötigt zur Überwindung der Fahrwiderstände pro Tonne Fahrzeugmasse im mittleren Geschwindigkeitsbereich um 70 km/h rund 100 Wh/km. Die daraus resultierenden 10 kWh pro 100 km und Tonne entsprechen dem Heizwert von nur 1 l Benzin. Jedoch ist zu beachten, dass der Verbrennungsmotor nur rund 1/3 des Heizwertes nützt. Insofern entspricht der tatsächliche Energiebedarf eines Elektroautos von einer Tonne Gewicht dem eines gleich schweren konventionellen 3-l-Autos. Dies gilt für die Geradeausfahrt im ebenen Gelände.

Im sogenannten «Clean Air Act» werden für einige Bundesstaaten der USA ab Einführung die Hersteller aufgefordert, einen festgesetzten Anteil an lokal emissionsfreien Automobilen anzubieten und auch in den Verkehr zu bringen (ZEV, Zero Emission Vehicle). Für Batteriefahrzeuge wird zur Erfüllung dieser Klassifizierung eine Mindestreichweite von 100 Meilen (entspricht 160 km) gefordert, was einer sinnvollen

Grösse entspricht. Aus diesem Grund sollte der nutzbare Energieinhalt einer Batterie mindestens 16 kWh pro Tonne Fahrzeugmasse betragen. Da man in der Praxis nicht die gesamte Kapazität einer Batterie nutzen sollte, ergibt sich daraus ein Wert von ungefähr 20 kWh Nennkapazität pro Tonne Fahrzeugmasse.

Eine entsprechende Bleibatterie hätte 800 kg, eine Nickel-Metallhydrid-Batterie 400 kg und eine Lithium-Ionen-Batterie nur noch rund 180 kg Masse, jeweils inklusive Batteriebehälter [1]. Daraus ist ersichtlich, dass erst die Energiedichte der Lithium-Ionen- oder der Lithium-Polymer-Batterie auf ein sinnvolles Verhältnis zwischen Fahrzeugmasse und Batteriemasse von rund 4:1 führt.

Erforderliche Antriebsleistung bedingt leistungsstarke Batterie

Damit ein Fahrzeug sowohl 15% Steigung mit rund 70 km/h als auch eine Maximalgeschwindigkeit von etwa 150 km/h erreichen kann, muss der Antrieb pro Tonne Fahrzeuggewicht rund 40 kW Dauerleistung und 100 kW Spitzenleistung aufweisen. Wird diese Leistung aus einer 200-kg-Batterie entnommen, muss diese für eine spezifische Leistung von 500 W/kg ausgelegt sein, was der Belastung einer Starterbatterie während des Startvorgangs entspricht.

Frühere Hochenergiebatterien wiesen einen viel zu grossen Innenwiderstand auf, um eine derart schnelle Entladung auch effizient aufrechterhalten zu können. Dies gilt insbesondere für die Zink-Brom-Batterie und auch für die heisse Natrium-Nickelchlorid-Batterie (Zebra).

Batteriewirkungsgrad

Um hohe Leistungen abgeben zu können, muss die Batterie einen geringen Innenwiderstand aufweisen. Da aber auch noch elektrothermische Prozesse eine wichtige Nebenrolle spielen, muss eine Hochleistungsbatterie nicht unbedingt einen hohen Lade- bzw. Entladewirkungsgrad aufweisen. Beispielsweise kühlt sich eine Nickel-Kadmium- oder Nickel-Metallhydrid-Batterie beim Laden ab und erwärmt sich beim Entladen. Dieser Wärmepumpeneffekt ist physikalisch bedingt und führt dazu, dass ein Teil der gespeicherten Energie an den thermischen Zyklus verloren geht, unabhängig ob die Batterie nur wenig oder hoch belastet wird.

Der Ladezyklus der Lithiumsysteme ist frei von derartigen thermoelektrischen Effekten, wodurch auch hocheffiziente serielle Hybridlösungen energetisch sinnvoll werden, bei denen ein Generator während der Fahrt konstant Leistung liefert und die Dynamik von der Batterie bestritten wird.

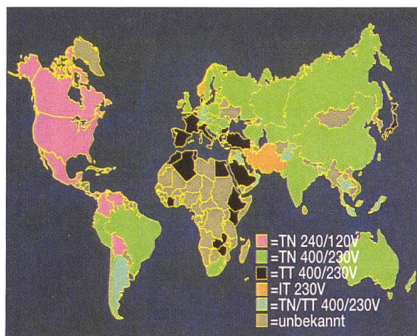


Bild 3 Verwendete Standards.

Lebensdauerbetrachtungen

Aus den zuvor abgeleiteten Anforderungen an ein Batteriesystem wird ersichtlich, dass keine bisherige Technologie die Mindestanforderungen an Energiedichte, Leistungsdichte und Ladewirkungsgrad auf sich vereinigen konnte. Man war deshalb auch oft gezwungen, die Batterien zum Teil über ihre physikalisch bedingten Grenzen hinaus zu betreiben, was fast immer zu Lasten der Lebensdauer geht. Da Lithiumsysteme alle Anforderungen zugleich erfüllen, besteht bei ihnen erstmals die Hoffnung, dass die im Labor nachgewiesenen 1000 Ladezyklen in der Realität auch tatsächlich erreicht werden.

Ladetechnik

Technische Rahmenbedingungen

Das Einlagern von elektrischer Energie in einen elektrochemischen Speicher unterscheidet sich in mehrfacher Hinsicht vom gewohnten Tanken. Das Füllen eines 60-l-Tanks in einer Minute entspricht einer Füllleistung von einem 1 l Benzin bzw. 10 kWh

pro Sekunde, was eine elektrische Leistung von 36 MW verlangen würde. Allerdings unterliegt die elektrische Übertragung vielfältigen Einschränkungen auf der Infrastrukturseite, welche auch noch von Land zu Land verschieden sein können.

Die chemischen Prozesse beim Laden verlaufen genau umgekehrt wie beim Entladen und unterliegen auch meist denselben Leistungslimiten. In der Regel kann eine Batterie genau so schnell geladen werden, wie sie entladen werden darf. Dabei muss sichergestellt sein, dass sie weder überladen oder thermisch ausserhalb der Spezifikation betrieben wird.

Vor einigen Jahren wurde bereits der IEC-Standard 61851 ausgearbeitet, der das Laden an der bereits bestehenden Infrastruktur weltweit regelt und der es den Autoherstellern ermöglicht, ihre Produkte mit entsprechender Ladetechnik auszurüsten.

Ladekonzepte

Das Laden ab dem Niederspannungsnetz erfordert die geringsten Investitionen und ermöglicht unter Umständen dem Versorgungsunternehmen, über die dynamische Beeinflussung des Kollektivs aller Elektroautos am Netz Lastspitzen auszugleichen. Die Gesamtzahl der an Steckdosen angeschlossenen Elektrofahrzeuge verhält sich dann ähnlich wie ein schnell reversierbares Pumpspeicherkraftwerk. Die Energieversorger wissen sehr gut, welche Kosten ihnen so ein Konzept ersparen kann.

Schnelladesysteme, die auf Gleichstromübertragung beruhen, wären ergänzend denkbar, machen energetisch aber nur dann Sinn, wenn sie ihre Energie nicht

über das Versorgungsnetz beziehen, sondern zum Beispiel die über Solargeneratoren lokal gewonnene elektrische Energie direkt aus einem Zwischenspeicher an das Fahrzeug abgeben.

Ladegeschwindigkeit

Der geringe Energiebedarf eines leichten Fahrzeugs wird auch mit einer höheren Verfügbarkeit des Fahrzeuges belohnt. Da die pro Zeiteinheit akkumulierbare Energie nur von der Leistung der Infrastruktur abhängt, nicht aber von der Batteriegrösse, kann ein kleineres, leichteres Fahrzeug schneller Reichweite akkumulieren als ein schweres mit einem hohen Energiebedarf. Die Kilometerleistung, welche die ins Fahrzeug übertragene Energie pro Stunde ermöglicht, wird daher auch als Ladegeschwindigkeit in Kilometer pro Stunde definiert.

Wirtschaftliche Aspekte

Kostenpotenziale der Antriebstechnik

Wird die Batterie ausgeklammert, bestehen realistische Chancen, dass das Elektroauto gegenüber dem konventionellen Auto, bezogen auf die Gewichtsklasse, kostenneutral hergestellt werden kann. Heute jedoch kann davon noch keine Rede sein, weil dem Elektroantrieb für Automobile nach wie vor die Grossserienumsetzung fehlt.

Diese Umsetzung stellt die Autohersteller vor eine wesentlich grössere Herausforderung, als es scheint, denn sie verfügen weder im Bereich Elektromaschinenbau noch in der Leistungselektronik über Kernkompetenzen, noch existieren Zulieferstrukturen, die derartige Komponenten in geeigneter Stückzahl für den Fahrzeugeinsatz herstellen könnten. Zudem ist der technologische Abstand zur industriellen Antriebstechnik sehr gross.

Ob sich dereinst die Fahrzeughersteller dem Thema selbst widmen werden oder ob die grossen Zulieferer den Ball aufgreifen, ist derzeit noch nicht klar. Es beginnt sich aber ein Trend abzuzeichnen, dass die Autohersteller der in Zukunft abnehmenden Bedeutung des Verbrennungsmotors entgegenwirken, indem sie den drohenden Wertschöpfungsverlust durch Integration der elektrischen Antriebstechnik in ihren Kernkompetenzbereich auszugleichen suchen.

Werden Batterien jemals wirtschaftlich?

Allein durch ihre Masse, ihren Gehalt an wertvollen Rohstoffen und den Energieeinsatz bei ihrer Herstellung werden Batterien auch in Zukunft ein Kostenfaktor bleiben. Allerdings sind Finanzierungsmodelle denkbar, welche die Batterie als Teil der Betriebskosten amortisieren. Zum Vergleich

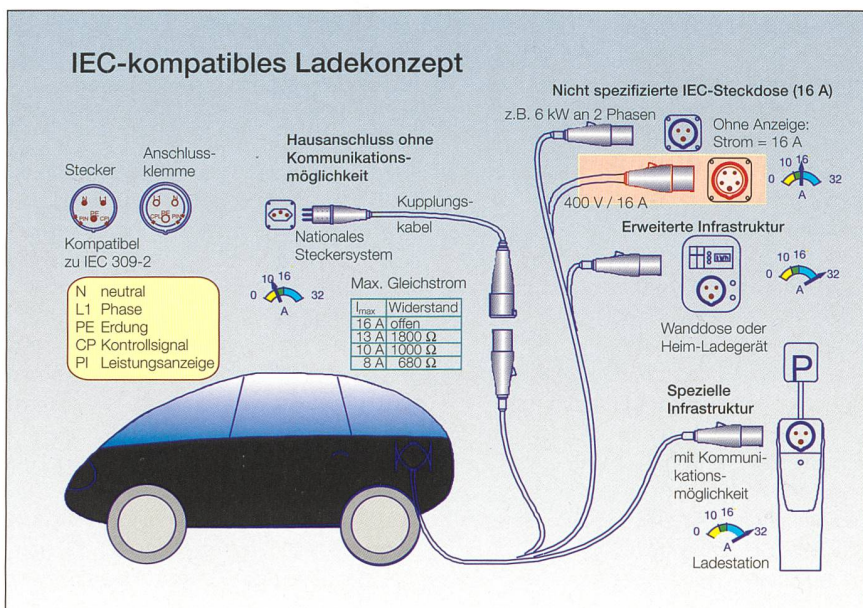


Bild 4 IEC-kompatibles Ladekonzept.

würde man ja auch ein Auto als zu teuer empfinden, bei dem der Treibstoff für die ersten 100 000 km gleich mitbestellt werden müsste.

Ein Lithium-Batteriesystem mit 1 kWh Energieinhalt kostet derzeit rund CHF 1000.–. Wenn es die versprochenen 1000 Ladezyklen «erlebt», entfallen auf jeden einzelnen Zyklus CHF 1.– Amortisation. Die von der Batterie dabei zwischengespeicherte 1 kWh aus dem Netz kostet mit CHF 0.10 im Nachtarif 10-mal weniger.

Wenn jedoch in einem Umfeld sehr teuren Erdöls die Brennstoffzelle oder Biotreibstoffe die Alternativen sind, dann ergibt sich die Wirtschaftlichkeit von ganz alleine, denn von allen Alternativen weisen Lithiumsysteme das beste Kostenpotenzial auf. Biotreibstoffe beanspruchen immense Anbau-

flächen und verteuern dadurch schon jetzt die Agrarrohstoffe [4, 5]. Beim Wasserstoff für die Brennstoffzelle gehen mindestens 15% seiner Energie für das Komprimieren beim Tanken verloren; die Brennstoffzelle selbst hat allein durch den derzeit erforderlichen Gehalt von rund 200 g Platin pro 100 kW_{Peak} ein schwerwiegendes Kostenproblem.

Zusammenfassung

Es spricht vieles dafür, dass Elektroautomobile schon in naher Zukunft eine durchaus wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Fahrzeugen darstellen werden. Ihre Machbarkeit ist bereits heute nicht mehr eine Frage der Technologie, sondern hängt von der Bereitschaft ab, in die indus-

trielle Umsetzung der erforderlichen Speicher- und Antriebstechnik zu investieren.

Es kann auch durchaus der Fall sein, dass sich bislang unbekannte Strukturen zu Elektroautomobilherstellern entwickeln, denn der Vorsprung der Automobilhersteller gegenüber branchenfremden Grossunternehmen beschränkt sich auf ein internationales Logistiksystem, das Verkauf und Wartung der Produkte erleichtert, und auf den mechanischen Fahrzeugaufbau an sich.

Man kann jedoch davon ausgehen, dass die vorgängig angesprochenen Umstände in den Plänen für die aufstrebende Wirtschaft Chinas ihren Niederschlag finden und dort das Elektroautomobil eine zentrale Rolle bei der Mobilitätsentwicklung spielen wird. Unter Umständen ist es nicht eine Frage, ob es Elektroautomobile zu kaufen geben wird, sondern ob diese rechtzeitig von europäischen Autoherstellern angeboten werden.

Résumé

Le développement dans le domaine des batteries et de la technique de locomotion pour voitures électriques

Les tout derniers progrès réalisés dans le secteur des batteries et la technique d'entraînement électrique sont-ils prometteurs d'un grand avenir pour l'automobile électrique? Le poids élevé des batteries est une des principales raisons pour lesquelles les voitures électriques ne commencent à s'imposer que lentement sur le marché. Mais ces dernières années, le développement a réalisé d'importants progrès dans ce domaine. C'est ainsi que les batteries au lithium-ion sont, à capacité égale, environ cinq fois plus légères que les accumulateurs au plomb. Pour assurer à un véhicule pesant une tonne un rayon d'action de 160 km, la batterie doit avoir une capacité d'environ 20 kWh, et une telle batterie au lithium-ion de 180 kg y suffirait. Cela permet dès maintenant de réaliser un rapport de poids intéressant de 4:1 environ entre la masse du véhicule et celle de la batterie. Le présent article expose l'état actuel de la technique des batteries et moteurs de voitures électriques.

Angaben zum Autor

Diplomingenieur **Arno Mathoy** ist Mitinhaber und Verwaltungsrat der Firma Brusa AG in Sennwald und seit 1996 in der IEC-TC-69-Expertenkommission für die internationale Standardisierung im Bereich Elektrofahrzeuge tätig.
arno.mathoy@brusa.biz, Brusa Elektronik AG, 9466 Sennwald

Referenzen

- [1] www.elektroauto-tipp.de/index.php
- [2] www.energie.ch/et/umwandlung/motor/index.htm
- [3] www.brusa.biz/products/g_motor_hsm6.17.12411.htm
- [4] www.nuclear-free.com/deutsch/traube3.htm
- [5] www.contexo.net/wiki/index.php?title=Biomasse

RFID? Im Bulletin steht's.

BULLETIN

Abo: www.bulletin-sev-vse.ch