

DIE ZUKUNFT FÄHRT ELEKTRISCH

Über 100 Jahre lang haben billiges Öl und überall verfügbarer Kraftstoff dem Auto mit Verbrennungsmotor einen Massenmarkt bereitet. Mehr als 800 Millionen PKW weltweit sind heute allerdings für rund 20 Prozent der menschengemachten Kohlendioxid-Emissionen verantwortlich. Jetzt führen neue Technologien zu einer Renaissance der Elektrofahrzeuge.

Diskutieren Sie mit!

Elektrofahrzeuge brauchen zwar kein Benzin. Doch der Strom, mit dem sie fahren, stammt bislang vor allem aus Kohle- und Atomkraftwerken. Entwickelt sich der Automobilbau in die richtige Richtung? Diskutieren Sie mit auf www.spektrum.de/artikel/980525.

Von Reinhard Löser

Angesichts hoher Ölpreise und höchstmöglicher Umweltschonung werden wir ganz schnell emissionsfreie Fahrzeuge anbieten«, verspricht Carlos Ghosn, Chef sowohl des französischen Unternehmens Renault als auch dessen japanischen Partners Nissan. Auf dem Weg zum selbsternannten »größten Anbieter für Elektrofahrzeuge weltweit« hat sich Renault-Nissan erst kürzlich mit dem Energieversorger Energie Ouest Suisse (seit 1. Februar 2009: Alpiq) verbrüdet. Dessen schweizerische Kraftwerke werden zu 85 Prozent mit Wasserkraft betrieben. Die Vision des Spaniers Ghosn von globaler Klimaentlastung: Nur wenn auch die Energie im »Tank« klimafreundlich und nachhaltig erzeugt wird, ist wirklich die gesamte Ökobilanz von der

Primärenergieerzeugung bis zur Kraftübertragung auf die Straße (»Well-to-Wheel«) kohlendioxidfrei.

Zum eigentlichen Entwicklungsschub haben vor allem deutliche Fortschritte in der Speichertechnologie und insbesondere bei Batterieelementen beigetragen – forciert durch transportable elektronische Geräte wie Handys, iPods, PDAs und Laptops. Und doch haben sich deutsche Autoschmieden der Elektromobilität bis vor ein, zwei Jahren mit aller Macht entgegengestellt. Sie setzten auf den sparsamen Diesel und vertrauten auf deutsche Ingenieurkunst, mittels derer sich die Emissionen am Ende des Auspuffs schon unter die gesetzlichen Grenzwerte bringen lassen würden.

Außerdem schien man mit Wasserstoff und Brennstoffzelle noch Trümpfe im Ärmel zu haben. Daimler arbeitet seit 1994 an dieser Technologie, investierte nach eigenem Bekunden bereits mehr als eine Milliarde Euro und hat sich die derzeit größte Brennstoffzellen-Fahrzeugflotte zugelegt. Dennoch stehen noch immer keine Fahrzeuge beim Händler, zu ambitioniert waren die ursprünglichen Ziele. Anfangs sollte das Brennstoffzellenfahrzeug sogar gänzlich ohne Batterie auskommen. Das Hybridauto (Hybrid Electric Vehicle, HEV) hingegen, das in Japan und den USA sukzessive den Markt aufräumt und ihn für reine Elektroau-

SERIE: AUTOS DER ZUKUNFT

Teil I:	Wie Nano das Auto verändert	SdW 02/2009
Teil II:	Die Zukunft fährt elektrisch	SdW 03/2009
Teil III:	Elektroautos – die rollenden Stromspeicher	SdW 04/2009
Teil IV:	Intelligente Sicherheitssysteme	SdW 05/2009

Elektroautos sind im Kommen. Anders als mancher vermuten würde, konzentrieren sich die Ingenieure aber nicht nur auf kleine Stadtautos, sondern präsentieren auch PS-starke Sportwagen. Zwar ist die Batterie, die dem Benzin im Tank überlegen wäre, noch nicht erfunden, doch die Entwicklung verläuft rasant.



ALEXEY DUDOLADOV / ISTOCKPHOTO

tos aufnahmefähig macht, wurde in Deutschland noch bis vor Kurzem heftig boykottiert.

Über Nacht hat sich nun die Situation verändert: Seit der Finanzkrise und dem »Autosalon« in Paris im Oktober 2008 scheint es nur noch ein Thema zu geben – Elektrofahrzeuge (Electric Vehicles, EVs). Bei bloßen Ankündigungen bleibt es indessen nicht. In London lässt Daimler ausgesuchte Kundengruppen Erfahrungen mit 100 batteriegetriebenen Exemplaren des »smart ed«, einem Smart mit »electric drive«, sammeln. Einige Windkraftträder produzieren für dieses Vorhaben sogar Ökostrom, der ins Netz eingespeist wird. Auch beim Pilotprojekt »e-mobility Berlin« wird Daimler bald über 100 Elektroautos durch die Hauptstadt rollen lassen, aufladbar an 500 Stromzapfstellen des Energieversorgers RWE.

Auch der Strom ist »grün«

Ähnliches geschieht in Italien. Hier entwickelt der größte Energieversorger des Landes Enel eigens 400 neue Ladestationen für 100 EVs von Daimler, die ab 2010 in Rom, Mailand und Pisa unterwegs sein werden. Einen Flottenversuch unternimmt auch Volkswagen mit dem Energieversorger E.ON. Dabei wollen die Unternehmen mit zwei Batteriespezialisten – der GAIA Akkumulatorenwerke in Nordhausen und der Litec Battery aus dem

sächsischen Kamenz – sowie weiteren Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten.

BMW hat unterdessen zu Vattenfall Europe gefunden: 50 Mini-E-Elektroautos sollen demnächst in Berlin an den Start gehen, angetrieben von zertifiziertem »grünem« Strom des schwedischen Energieversorgers. Zehnmal so viele Elektrofahrzeuge schickt BMW derzeit in den USA auf die Straße.

Doch das »E« schmückt nicht nur kleine Stadtautos. Aus der kalifornischen Auto schmiede Tesla Motors stammt der Tesla Roadster, mit einer Spitzengeschwindigkeit von 200 Kilometern pro Stunde eines der schnellsten straßenzugelassenen Elektrofahrzeuge der Welt. Sein Nachfolger wird ab Mitte 2009 auch auf europäischen Straßen zu sehen sein. Der über 100 000 Euro teure Flitzer katapultiert sich bei einem Gewicht von 1240 Kilogramm innerhalb von knapp vier Sekunden von null auf 100 Kilometer pro Stunde. 6831 aus der Computertechnik geborgte Lithiumionen-(Li-Ionen-)Akkus speichern bei 375 Volt und einem Gewicht von 450 Kilogramm insgesamt 53 Kilowattstunden elektrische Energie. Ihre Gesamtleistung beträgt 225 Kilowatt (300 PS), das Drehmoment 280 Newtonmeter, die Reichweite 360 Kilometer.

Nach dem Raketenritt muss man sich allerdings in Geduld üben: Zwischen 4 und 16

In Kürze

- Angesichts der weltweiten Finanzkrise **überbieten sich Autohersteller** derzeit bei der Vorstellung elektrisch angetriebener Fahrzeuge, die möglicherweise die Zukunft der Mobilität verkörpern.
- Zentral ist dabei die Verfügbarkeit **leistungsfähiger Batterien**. Lithiumionen-Akkus sind derzeit die vielversprechendsten Produkte. Zahllose Varianten offerieren je eigene Vorteile.
- Serienreife Fahrzeuge sind allerdings noch selten, vorerst laufen Pilotprojekte. Noch haben die E-Mobile auch geringere Reichweiten als benzinbetriebene Autos. Doch der **Bedarf an Vehikeln für den Stadtverkehr** ist bereits größer, als ihn die Industrie decken kann.



Einen ungewöhnlichen Anblick bietet der kastenförmige Elektromotor des Mini E. 150 Kilowatt leistet das Aggregat und beschleunigt den Zweisitzer in 8,5 Sekunden von null auf 100 Kilometer pro Stunde. Die Reichweite liegt bei 240 Kilometern. 500 Exemplare sind bereits im Pilotprojekt auf amerikanischen Straßen unterwegs, weitere 50 fahren bald durch Berlin. Der Lithiumionen-Akku ist im Fond des Wagens platziert.

Der vollelektrische Tesla Roadster befindet sich seit Mai 2008 in der Kleinserienproduktion. Noch in diesem Jahr kommt eine leistungsstärkere Variante auch auf den europäischen Markt.



Stunden dauert das Wiederaufladen. Von der gewaltigen Beschleunigung, der hohen Geschwindigkeit, vor allem dem fast geräuschlosen »Fliegen« sind die Tesla-Fahrer aber durchweg begeistert. Dass das Fahrzeug mit null Emissionen auskommt, wird indessen kaum wahrgenommen und verliert sich oft in den euphorischen Presseberichten.

Unterdessen verstärken die Hersteller ihre Präsenz auch auf der Detroit Auto Show (North American International Auto Show) im Januar 2009 – ob GM, Ford, Jeep oder Dodge, Volvo, Mitsubishi oder PSA PeugeotCitroën. Die beiden Letztgenannten kündigten Mitte 2008 sogar eine zunächst kurzfristige Elektrokooperation an. PSA bringt als Branchenpionier die Erfahrung mit bislang rund 10 000 verkauften Elektrofahrzeugen in die Ehe ein, Mitsubishi wiederum verspricht sich eine Weiterentwicklung und gute Absätze seines auf dem Kleinwagen »i« basierenden »Mi-EV«, der bald auf den japanischen Markt kommen soll.

Toyota rüstet derzeit den Kleinwagen »iQ« mit Elektroantrieb aus. Konzipiert ist der »FT-EV« (Future Toyota Electric Vehicle),

der allerdings erst 2012 beim Händler stehen soll, mit einer rein elektrischen Reichweite für Kurzstrecken im Stadtverkehr. Aber selbst ein Newcomer aus dem Reich der Mitte wie das chinesische Unternehmen BYD (Build Your Dream) offeriert einen EV. Der kompakte Van namens »e6« soll 400 Kilometer am Stück schaffen und nach zehn Minuten zur Hälfte wieder aufgeladen sein.

Daimler schließlich präsentierte bei der NAIAS die Studie »Concept BlueZero« auf Basis der neuen B-Klasse. Es handelt sich dabei um gleich zwei EVs mit Li-Ionen-Akkus, die ab 2010 auf den Markt kommen sollen. »E-CELL« steht für ein Auto mit batterieelektrischem Antrieb und einer rein elektrischen Reichweite bis 200 Kilometer. Der »E-CELL PLUS« verfügt dagegen über einen zusätzlichen »Range Extender«, einen Dreizylinder-Benzinmotor mit 50 Kilowatt Leistung bei konstanten 3500 Umdrehungen pro Minute, der den Akku bei Bedarf unterstützt.

Er dient allerdings nicht wie bei einem Hybridfahrzeug dem Antrieb, sondern lädt nur die Batterie nach. Das bringt gleich zwei Vorteile, nämlich die Vergrößerung der Reichweite gegenüber rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen sowie die optimale Drehzahl und damit den besten Wirkungsgrad für den zugeschalteten Verbrennungsgenerator. Für den »E-CELL PLUS«, dessen rein elektrische Reichweite nur 100 Kilometer beträgt, kann der schwäbische Autobauer daher eine Gesamtreichweite von bis zu 600 Kilometer versprechen.

Die Akkus sind flüssigkeitsgekühlt und verfügen über eine Energiespeicherkapazität von 17,5 beziehungsweise 35 Kilowattstunden sowie einen kompakten, maximal 100 Kilowatt starken Elektromotor, der eine Dauerleistung von 70 Kilowatt und ein maximales Drehmoment von 320 Newtonmeter entwickeln kann. Bei einer Ladeleistung von 15 Kilowatt, wie sie spezielle Stromzapfstellen bieten, können die Akkus innerhalb einer beziehungsweise zwei Stunden genügend Energie für 100 oder 200 Kilometer Fahrtstrecke speichern. Beim Stromzapfen an gewöhnlichen Steckdosen, die nur eine Ladeleistung von sieben Kilowatt bringen, verdoppeln sich die Ladezeiten.

Die Euphorie der letzten Zeit kann indessen nicht darüber hinwegtäuschen, dass die meisten heutigen Elektroautos keine erschwinglichen Serienfahrzeuge sind und die neue Technologie noch in den Kinderschuhen steckt. Weiterhin scheitern rein batterieelektrisch angetriebene Autos an den Anforderungen der an Benzin- und Dieseltreibstoff gewöhnten Fahrer, die unterwegs immer eine Tankstelle finden.

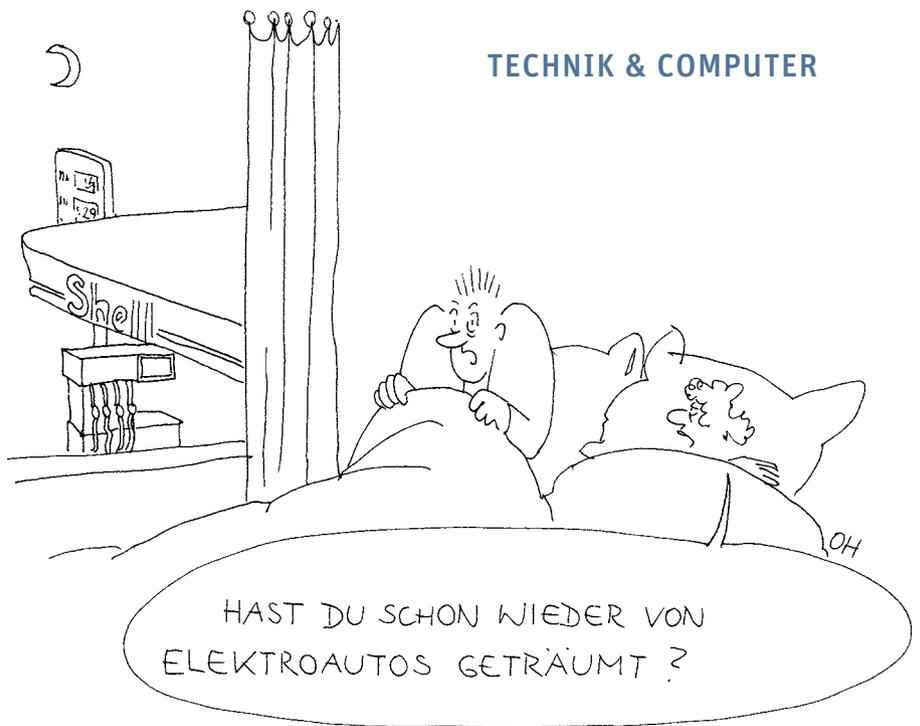
Was hat Deutschland in diesem Bereich zu bieten? Zumindest bis in die 1990er Jahre war das Autoland führend in der Elektrochemie. Doch seit dem Großversuch mit batteriebetriebenen Autos auf der Insel Rügen – mit nicht ausgereifter Batterietechnik in herkömmlichen, viel zu schweren Autos, die eigentlich für einen Verbrennungsmotor ausgelegt waren – wurde die Speichertechnik ad acta gelegt. Einige Fahrzeuge brannten damals wegen Batterieüberhitzung ab, und die Leistungsparameter der Batterien konnten gegenüber Benzin und Diesel nicht punkten. Also wurde in den letzten Jahren der Diesel parkettfähig gemacht, und man werkelte an der Brennstoffzelle. Nun hat sich der einstige Vorsprung verflüchtigt. Japanische Autos rollen den Markt auf, in der Batterietechnik geben China und Japan den Ton an, und überall finden Batteriespezialisten und Autoleute zusammen.

Nachdem beispielsweise Mitsubishi schon im Jahr 2007 ein Joint Venture mit der GS Yuasa Corporation eingegangen ist, plant nun auch Honda, mit dem japanischen Batteriespezialisten eine gemeinsame Firma für Fertigung und Vertrieb von Hochleistungs-batterien in Lithiumionen-Technologie zu gründen. Automotive Energy Supply Corporation (AESC) wiederum ist ein japanisches Gemeinschaftsunternehmen von Nissan und NEC. Panasonic EV Energy liefert für Toyota die Akkus, und Hitachi und Sanyo aus Japan sowie Samsung aus Korea haben ebenfalls ihre Partner in der Branche gefunden.

Wertvoll wie eine Ölquelle

Deutschland ist im Zugzwang, wie auch Ministerialdirektor Uwe Lahl im Bundesumweltministerium bereits schwant: »Wer Akkus entwickelt, besitzt eine eigene Ölquelle!« Also fördert das Bundesforschungsministerium die Lithium-Technologie mit 60 Millionen Euro und unterstützt damit seit Ende 2007 ein Konsortium aus BASF, Bosch, Evonik und Volkswagen, das seinerseits weitere 360 Millionen Euro in das Projekt steckt. Bosch und Samsung SDI haben sich ebenfalls die Li-Ionen-Technik vorgenommen und wollen in den nächsten fünf Jahren zwischen 300 und 400 Millionen Euro investieren.

Das ist längst nicht alles. Volkswagen und Evonik finanzieren seit Anfang 2008 einen Lehrstuhl an der Universität Münster, um die Grundlagenforschung an elektrischen Speichermedien zu stärken. Forschung findet auch im »Projekthaus e-drive« statt, das Ende 2008 von Daimler mit dem Karlsruher Institut für Technologie, einer Gemeinschaftseinrichtung von Universität und Forschungszentrum Karlsruhe, ins Leben gerufen wurde und die



Themen Leistungselektronik, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie elektrische Energiespeicherung und Elektromaschinenbau bündeln soll. Wissenschaftler des Stuttgarter Max-Planck-Instituts für Festkörperphysik und des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie in Pfinztal bei Karlsruhe tüfteln ebenfalls seit Langem an Lithiumsystemen.

Mit gutem Grund: »Die Zukunft und ein Großteil der Gegenwart«, so bekundet Joachim Maier, Direktor der Abteilung für Physikalische Chemie am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, »gehört lithiumbasierten Systemen.« Das sehr leichte Alkalimetall Lithium ist nämlich prädestiniert für hohe Energiedichten und sehr hohe Zellspannungen.

In Li-Ionen-Batterien besteht die Kathode grundsätzlich aus einer Metalloxidmatrix, aus der Lithiumionen austreten können, und einer Anode, die – zumindest bislang – üblicherweise aus Graphit besteht. Als Elektrolyt fungiert ein in einem organischen Lösungsmittel gebundenes Lithiumsalz. Beim Aufladen wandern die Lithiumionen von der Kathode weg und setzen sich im Graphit fest, beim Entladen kehren die Elektronen zu ihrer

Beim Zweisitzer »Smart ed« befindet sich die Batterie unter den Sitzen. Geliefert wird sie vorerst allerdings von Tesla Motors. Denn die Batterie, die Smart-Hersteller Daimler gemeinsam mit Evonik produzieren will, ist wohl erst in einigen Jahren einsatzreif.



AUFHOLJAGD

Den Titel des schnellsten elektrischen Serienfahrzeugs der Welt will sich der Ultimate Aero EV von Shelby SuperCars (SSC) im US-Bundesstaat Washington noch in diesem Jahr verdienen. 1000 Pferdestärken sollen den Sportwagen in 2,5 Sekunden von null auf 100 und auf maximal 335 Kilometer pro Stunde beschleunigen. Die versprochene **Ladezeit von zehn Minuten** an einer 220-Volt-Steckdose, nach der die Reichweite erneut rund 300 Kilometer betragen soll, ist allerdings zweifelhaft.

Ausgangselektrode zurück. Weil die Elektroden sicher und gleichmäßig voneinander getrennt sein müssen, ist dabei der »Abstandhalter« oder Separator von großer Bedeutung. Hier kommen hochisolierende Kunststoffe oder Keramiken zum Einsatz, die jedoch für Ionen durchlässig sein müssen.

Kavalierstarts verbieten sich

Weil sich die Materialien für Kathode, Anode und Elektrolyt baukastenartig austauschen lassen, wächst die Vielfalt der Li-Ionen-Systeme ständig und die Forscher stoßen auf immer neue Eigenschaften. Systeme auf Basis von Lithiumnitrat und Lithiumeisenphosphat (LiFePO₄) etwa weisen mit rund 4000 Watt pro Kilogramm die höchsten Leistungsdichten auf. Davon könnten Fahrer beim »Gas geben« profitieren. Die höchste Energiedichte erreicht man hingegen mit Lithiumnickelkobalt (LiNiCo). Damit lässt sich ein Auto lange und weit fahren, Kavalierstarts verbieten sich jedoch. Den Kostenvergleich gewinnt das LiFePO₄-System, das mit 500 Euro pro Kilowattstunde aktuell die günstigste Li-Ionen-Batterie darstellt. Die höchste Zellspannung wiederum erreicht man mit Lithiumkobaltoxid.

Lithiumnitrat-Zellen schließlich sind derzeit mit 1400 Euro pro Kilowattstunde die

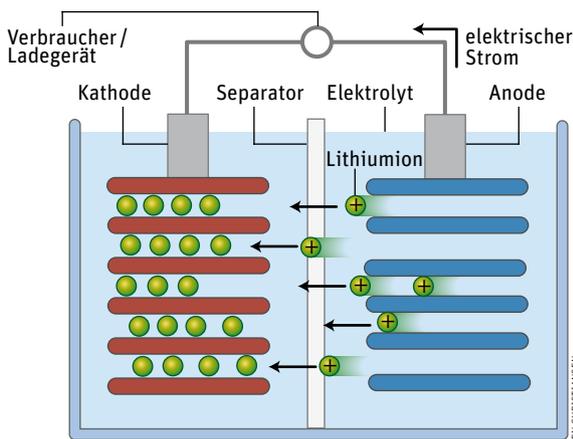
teuersten elektrischen Energielieferanten, allerdings lassen sich damit hohe Spannungen auf kleinem Bauraum realisieren, ebenfalls ein wichtiges Kriterium für Autokonstruktoren. Interessant ist auch das nanostrukturierte Anodenmaterial Li-Titanat, das von der Firma Altairnano aus Reno in Nevada bereits in Akkus integriert wird. Das beeindruckendste daran ist seine hohe Ionenbeweglichkeit: Die Altair-Batterie lässt sich binnen einer Minute auf 80 Prozent ihrer Kapazität laden. Die relativ geringe Energiedichte sorgt allerdings für höheres Gewicht.

Sehr leistungsfähig sind auch die von Saft (einem in Frankreich beheimateten Konzern), JVC, Toyota und Samsung produzierten Systeme aus Lithium-, Nickel-, Kobalt- und Aluminiumoxid. Allerdings können sie infolge hoher Wärmeentwicklung explodieren und müssen daher in spezielle Stahlbehälter eingehaust werden.

Ein weiteres viel versprechendes, allerdings ebenfalls stark temperaturabhängiges System besteht aus Li-Manganoxid (LMO, LiMn₂O₄) und Li-Titanoxid (LTO, Li₄Ti₅O₁₂). Aus LMO lassen sich sehr preiswerte, leistungsfähige und stabile Kathoden herstellen, während LTO als Anode große Leitfähigkeit aufweist und obendrein als unverwundlich gilt, da

KEIN ELEKTROBOOM OHNE LEISTUNGSFÄHIGE BATTERIEN

Das Elektrofahrzeug steht und fällt mit der technischen Beherrschung des grundlegenden Prinzips der elektrochemischen Energiespeicherung. Zunächst wird einer wiederaufladbaren Zelle (Akkumulator) Energie zugeführt, beim Entladen erhält man elektrische Energie zurück. Die für die Elektrochemie entscheidenden Reduktions- und Oxidationsvorgänge laufen dabei an der Phasengrenze zwischen Elektrode und Elektrolyt ab.



In einer Lithiumionen-Batterie wandern positiv geladene Li-Ionen von der Anode durch einen porösen Separator zur Kathode. An der Anode werden dabei Elektronen frei, die als Strom zum Verbraucher fließen. Der Ladevorgang verläuft umgekehrt.

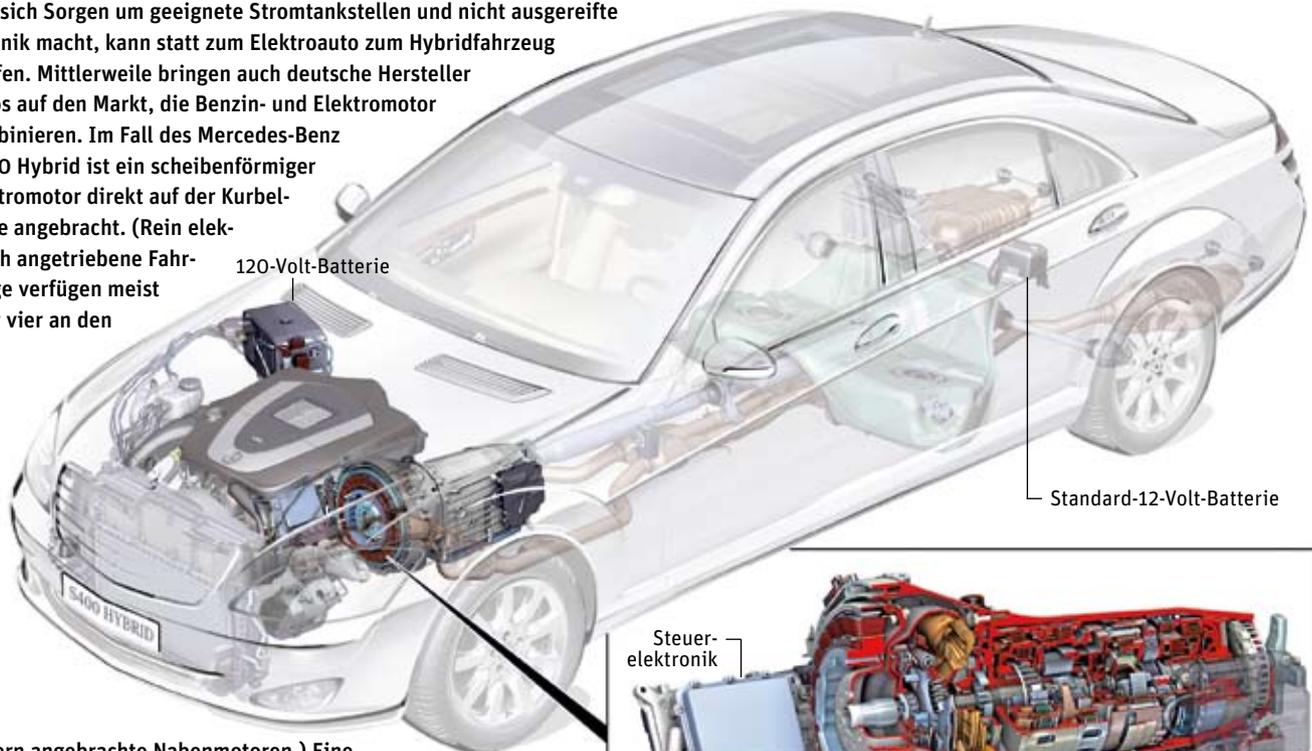
Bei galvanischen Elementen (»nicht aufladbaren« Batterien) bildet die negative Elektrode die Kathode, bei wiederaufladbaren Akkumulatoren fungiert die Elektrode abwechselnd als Anode oder Kathode, abhängig davon, ob die Batterie geladen oder entladen wird. Die Nennspannung der Zelle wird durch die eingesetzten Elektrodenmaterialien festgelegt, höhere Spannungen lassen sich durch Hintereinanderschalten mehrerer Zellen erreichen (daher auch der Begriff »Batterie«). Das Produkt aus Spannung und Kapazität ergibt den Energiegehalt des Akkus.

Bei der Aufladung werden Ionen aus der chemischen Bindung der positiven Anode zur negativen Kathode gezogen, wo sie sich anlagern und eine chemisch energiereichere Bindung eingehen. Wichtig ist dabei die Aufnahmefähigkeit der Oberfläche für Elektronen, was sich im Maß für die Kapazität (gemessen in Amperestunden), also für die gespeicherte elektrische Ladung ausdrückt.

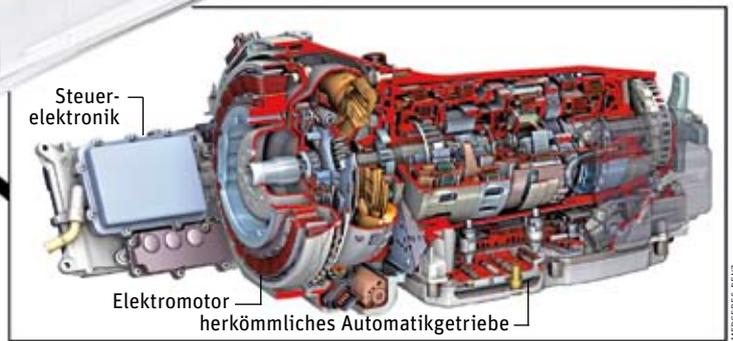
Die theoretische Kapazität hängt von der Menge beziehungsweise Oberflächencharakteristik des Elektrodenmaterials ab. Sie unterscheidet sich häufig von der entnehmbaren »praktischen« Ladung und lässt sich durch Vergrößerung der Oberflächen und durch Parallelschaltung von Zellen erhöhen, was aber das Gewicht erhöht und mehr Bauraum verlangt. Außerdem hängt sie entscheidend von den konkreten Entladebedingungen ab, darunter Belastung, Temperatur, Alter und Ladehistorie.

Im Allgemeinen nimmt die nutzbare Kapazität einer Batterie mit zunehmendem Entladestrom ab. Grund dafür sind wachsende Verluste am Innenwiderstand der Batterie, Veränderungen an der

Wer sich Sorgen um geeignete Stromtankstellen und nicht ausgereifte Technik macht, kann statt zum Elektroauto zum Hybridfahrzeug greifen. Mittlerweile bringen auch deutsche Hersteller Autos auf den Markt, die Benzin- und Elektromotor kombinieren. Im Fall des Mercedes-Benz S400 Hybrid ist ein scheibenförmiger Elektromotor direkt auf der Kurbelwelle angebracht. (Rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge verfügen meist über vier an den



Rädern angebrachte Nabenmotoren.) Eine Steuerelektronik koordiniert das Zusammenspiel der beiden Aggregate. Die in den Kofferraum ausgelagerte übliche 12-Volt-Batterie und die 120-Volt-Lithiumionen-Batterie für den Elektroantrieb sind an je eigene Stromkreise angeschlossen.



MERCEDES-BENZ

Geometrie und Einflüsse der Temperatur. Auch die Geschwindigkeit der elektrochemischen Prozesse und der Transportvorgänge in der Batterie beeinflussen die Kapazität. Insbesondere liegt im Verschleiß von Elektroden und Elektrolyt eine weitere Hürde für die Effizienz von Systemen. Manche Stoffe können viele Elektronen speichern oder an sich binden, geben sie aber nicht so schnell ab, andere wiederum besitzen leicht bewegliche Ionen, aber begrenzte Speicherfähigkeit. Diese Faktoren bestimmen daher auch die nötigen Ladezeiten und die Fähigkeit der Akkus, auf lange Sicht viele Lade-/Entladezyklen zu überstehen.

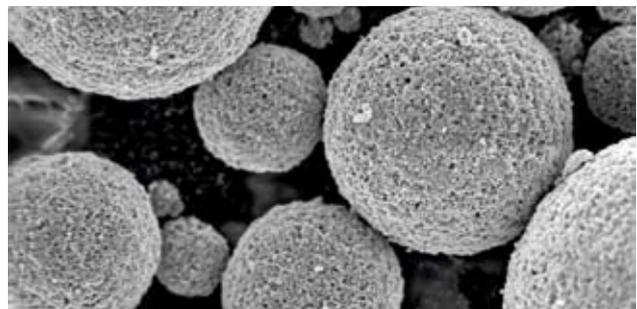
Als Leistung einer Batterie bezeichnet man die Menge an elektrischer Energie, die sich pro Zeiteinheit entnehmen lässt. Sie ist das Produkt aus Entladestrom und Entladespannung und wird in Watt (W) angegeben. Allerdings entladen sich alle Batterien allmählich selbst, wenn sie nicht im Gebrauch sind. Die Geschwindigkeit der Selbstentladung hängt von Materialien und Batterietyp, aber auch von der Häufigkeit der Zyklen, der vorangegangenen Entladetiefe und der Temperatur ab.

Den Dauereinsatz in Kraftfahrzeugen limitiert auch die Zyklenfestigkeit. Feste Elektrolyten können »verstopfen«, flüssige auslaufen, gasförmige entweichen. Bei einigen Elektroden korrodieren die Oberflächen, ihre Speicherfähigkeit nimmt so mit der Zeit ab. Aus anderen wächst eine Art Kristalle, wodurch sich der Elektrodenabstand verkleinert. Dadurch verringert sich die Kapazität, was zu Spannungsabfall führt, die chemischen Reaktionen aber

auch so beschleunigen kann, dass sie immer mehr Wärme produzieren und schließlich zur Explosion führen.

Aus all diesen Gründen suchen Autoingenieure weltweit Spezialisten, die sichere und leistungsfähige Batterien herstellen. Außerdem sollen sie eine lange Lebensdauer (gleichbedeutend mit einer hohen Zahl von Zyklen) besitzen und sich in kurzer Zeit wieder aufladen lassen. Weitere wichtige Vergleichsgrößen für Autobauer sind die Energiedichte (Energie pro Gewicht beziehungsweise Volumen in Wattstunden pro Kilogramm) und Leistungsdichte (entnehmbare Leistung pro Gewicht beziehungsweise Volumen in Watt pro Kilogramm), entweder absolut oder bezogen auf das Bauraumvolumen.

>> R. L.



ALTAINANO

In den Batterien von Altairnano verhindert eine nanostrukturierte Anode aus Lithiumtitanat (Bild), dass sich um die Anode herum eine Grenzschicht ausbildet, die den Fluss der Lithiumionen bremst.

WOHER NEHMEN?

Woher kommt der für die Elektromobilität benötigte Strom? Das Problem könnte kleiner sein, als es scheint. Laut einer Studie unter anderem der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie würden 40 Millionen Hybrid- und Elektroautos den deutschen Strombedarf um nur zehn Prozent ansteigen lassen. Auch wenn es beim heutigen Strommix bliebe, sparte man in der Summe viel Öl – und knapp 30 Millionen Tonnen Kohlendioxid. Erneuerbare Energien ließen diesen Wert auf 67 Millionen Tonnen ansteigen.



Reinhard Löser ist promovierter Physiker, habilitierter Volkswirt sowie intimer Kenner der Automobilindustrie. Als freier Autor lebt er in Ebenhausen bei München.

Auto der Zukunft. Sonderausgabe 1/2009 von Technology Review. Heise, Hannover 2009.

ecomobil spezial. Sonderausgabe von ecomobil – das zeitgemäße automagazin. München, Juli 2008.

Naunin, D. et al.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. Technik, Strukturen und Entwicklungen. Expert-Verlag, Renningen 2006.

Stan, C.: Alternative Antriebe für Automobile. Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. Springer, Heidelberg 2008.

Tollefson, J.: Charging up the Future. In: Nature 456, S. 436 – 440, 27. November 2008.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/979759.

es mehr als 20 000 Lade-/Entladezyklen übersteht. Überdies erlaubt das Materialgemisch LMO/LTO, den Produktionsprozess einfach, sicher und kostengünstig zu gestalten. So überrascht es nicht, dass die traditionellen japanischen Batteriehersteller Toshiba und Hitachi auf diese Technologie setzen und sie patentrechtlich weitläufig absichern.

Deutsche Forscher wieder mitten im Geschehen

Doch Neuerungen gibt es allerorten. Während Wissenschaftler an der kalifornischen Stanford University zur Kapazitätserhöhung die Graphitanode durch Silizium-Nanoröhren ersetzen, arbeiten Forscher des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung in Ulm an innovativen Elektrolyten. Weil organische Elektrolyte gegenüber hohen Temperaturen empfindlich sind, sollen sie durch ionische Flüssigkeiten oder Gels ersetzt werden, denn beispielsweise der Tesla benötigt für seine Akkus noch eigens eine separate Klimaanlage.

Allen Unkenrufen zum Trotz scheint Deutschland nun wieder das Heft in die Hand zu nehmen. Die Litec Battery in Sachsen – seit Ende 2008 ein Gemeinschaftsunternehmen von Evonik Industries und Daimler – kann komplette, serientaugliche Li-Ionen-Zellen fertigen, die zu Batterien weiterverarbeitet werden. Konkurrenzprodukte stellt die Litec-Batterie klar in den Schatten. So sind ihre speziellen Kompositanoden in der Lage, dreimal mehr Energie als die Lithiumbatterie des französischen Unternehmens Saft zu speichern. Außerdem ist ihr Volumen um 30 Prozent geringer als das der Toyota-Panasonic-Batterie: Die Zelle der Kamenzer ist mit 23 mal 18 Zentimetern kaum größer als ein Schulheft und wiegt ein Kilogramm. Litec-Geschäftsführer Andreas Gutsch schwärmt von ihrem Leistungsvermögen, sie sei »hundertmal so stark wie ein Bleiakku«. Damit markiert das langlebige Produkt, das auch für die Massenfertigung geeignet ist, die Spitze der Technologie.

Sämtliche Komponenten, welche die Leistungsfähigkeit der Batterie bestimmen – Kathode, Anode, Elektrolyt und Separator –, werden bei Litec mit speziellem Knowhow zusammengeführt. Herzstück sind dabei der von der Evoniktochter Degussa entwickelte keramische Separator »Separion« sowie die »Litarion«-Elektroden von Evonik, für die das Unternehmen sogar eigene Forschungskapazitäten aufgebaut hat.

Von besonderer Bedeutung ist der keramische Separator. Er ist hitzebeständig sowie physikalisch und chemisch stabiler als die bislang verwendeten Folien aus Polyolefinen. We-

der bei Überlastung noch bei Beschädigung schmilzt er. Das ist entscheidend, denn die hohen Energiedichten insbesondere auch der Kamenzer Zellen ließen sich sonst nicht unter Kontrolle halten. Käme es einmal zum Kurzschluss, würde der Energieinhalt der Batterie schlagartig in einem Plasmabogen freigesetzt.

Daimler wiederum bringt weitere 600 Patente zu batteriegetriebenen Fahrzeugen in die Litec-Ehe ein, davon über 230 auf dem Gebiet der Li-Ionen-Technologie. Ein noch gesuchter Dritter im Bunde soll über Kompetenzen in der Systemintegration Elektrik/Elektronik verfügen. Geplant ist zudem ein Joint Venture der Großunternehmen speziell für die Entwicklung und Produktion von Pkw- und Lkw-Batteriesystemen. Vorerst soll Litec allerdings nur für den Bedarf von Mercedes produzieren, später ist auch ein Verkauf von Zellen und Batteriesystemen an Dritte vorgesehen.

Damit sind die Deutschen wieder mitten im Geschehen. Vom Markt der Lithiumionen-Batterien, der mit jährlichen Raten von über zehn Prozent innerhalb der nächsten zehn Jahre auf mehr als zehn Milliarden Euro wachsen soll, werden sie sich wohl ein ordentliches Stück abschneiden.

Angesichts der Fortschritte, dank derer sich nun immer leistungsfähigere, leichtere und kleinere Batterien herstellen lassen, wird vielleicht auch endlich ein Preis abgeholt, der bereits seit 1925 ausgeschrieben ist. Sakichi Toyoda, der Gründer von Toyota, hatte eine Million Yen für eine Autobatterie mit der gleichen Energiedichte wie Benzin ausgelobt. 36 Stunden lang soll sie eine Leistung von 100 PS (74 Kilowatt) abgeben. Darüber hinaus darf die so genannte Sakichi-Batterie ein Höchstgewicht von 225 Kilogramm und ein Volumen von 280 Litern – Werte, die der Nutzung in einem Auto noch entsprechen – nicht überschreiten.

Doch selbst wenn sich die Preisverleihung weiter verzögert: Technisch aufgeschlossene und ökologiebewusste Autofahrer würden lieber heute als morgen ein Elektroauto nutzen – vor allem für ihre täglichen Stadtfahrten, wofür die heute verfügbaren Reichweiten schon genügen. Das ist zumindest das Ergebnis einer aktuellen weltweiten Studie der Strategieberater Bain & Company. Demnach fehlen in Europa bereits jetzt rund 600 000 Elektrofahrzeuge pro Jahr. Die Industrie muss sich anstrengen. <

Wie lassen sich Elektroautos intelligent betanken und als rollende Stromspeicher nutzen? Mehr dazu erfahren Sie im nächsten Teil unserer Serie in der Aprilausgabe.