

## Lithiumionen-Batterien, Brennstoffzellen und Erdgasmotoren im Detail

Ob sich eine neue Technologie durchsetzt, hängt nicht nur davon ab, was heute auf dem Markt ist, sondern auch, wo die technischen Grenzen liegen. Eine Übersicht über die Forschung und Entwicklung der Technologien für Elektroautos, Brennstoffzellen und Erdgasmotoren.



Für kleine, leichte Autos macht ein reiner Elektroantrieb Sinn. Für Mittelklassewagen ist eine entsprechende Batterie zu teuer und die Aufladezeiten zu lang.

Bei der ersten hier vorgestellten Technologie, den Elektroautos, ist nach wie vor die Batterie der limitierende Faktor. Sie beschränkt die Reichweite der Fahrzeuge, die zurzeit im realen Einsatz bei rund 100 km liegt, wenn Heizung und Klimaanlage nicht genutzt werden. Als Technologie hat sich die Lithiumionen-Batterie durchgesetzt, die bei relativ geringem Gewicht eine grosse Menge Energie speichert. Heute liegen die Energiedichten bei rund 170 Wh/kg für Elektroautos. Im Vergleich zu den früheren Bleibatterien

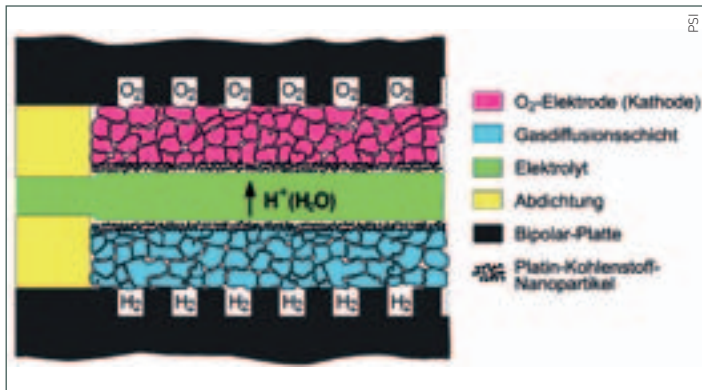
mit rund 10 Wh/kg ist dies viel, für ein Auto mit einer Reichweite von mehreren hundert Kilometern reicht es aber nicht. Jedes Element im Periodensystem hat ein bestimmtes elektrochemisches Potenzial. Die einen Elemente würden gerne Elektronen aufnehmen, andere wiederum möchten Elektronen abgeben. Kombiniert man verschiedene Elemente, entsteht eine Kontaktspannung, die in einer Batterie genutzt werden kann. Die Chemiker suchen nun nach Paaren, die eine möglichst hohe Kontaktspannung aufwei-

sen. Lithium und Lithiumoxid eignen sich besonders gut – es entsteht eine hohe Kontaktspannung und das Metall ist besonders leicht. In kommerziellen Batterien wird das metallische Lithium auf der negativen Elektrode allerdings durch Graphit ersetzt. Dies ergibt maximale Energiedichten von 200 bis 250 Wh/kg. Mehr ist nicht möglich.

### Lithium-Schwefel-Batterie

Um noch mehr zu erreichen, muss metallisches Lithium verwendet und mit anderen

Elementen kombiniert werden. Möglich wäre beispielsweise eine Lithium-Schwefel-Batterie. Experimente im Labor zeigen, dass dies technisch machbar wäre. Erste Prototypen, die unter anderem in einem solarbetriebenen Flugzeug eingesetzt wurden, erreichten eine Energiedichte von 350 Wh/kg. Bis Produkte in grösseren Serien hergestellt werden, dürfte es aber noch 10 Jahre dauern, schätzt Petr Novák, Leiter Sektion Elektrochemische Speicher am PSI. Chemisch das grösste Potenzial überhaupt hätte eine Batterie-



Aufbau einer Brennstoffzelle. Die Polymer-Membran ist grün eingezeichnet.

zelle mit Lithium und Sauerstoff. So arbeiten sowohl die IBM als auch das PSI an einer Lithium-Luft-Batterie. Technisch wären Energiedichten bis 2000 Wh/kg denkbar (zum Vergleich: Benzin enthält rund 11 kWh/kg, wobei berücksichtigt werden muss, dass der Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors kleiner ist als der eines Elektromotors). Noch arbeiten die Forscher daran, eine Lithium-Luft-Zelle zu entwickeln, die mehrfach aufgeladen werden kann. Hinzu kommt, dass im Gegensatz zu den heutigen Lithiumionen-Batterien, in denen das Lithium nur in Oxidform vorkommt, es hier in metallischer Form vorliegt – und entsprechend gefährlich ist. Zudem entstehen in der Sauerstoffelektrode Verluste: «Bis zu 30 % der Energie wird beim Laden in Wärme umgewandelt und geht verloren bei den heutigen Versuchszellen im Labor», erklärt Novák. Es dürfte also noch Jahre dauern, bis die technische Machbarkeit der Lithium-Luft-Batterie im Labor nachgewiesen werden kann.

### 15 Stunden an der Ladebuchse

Es darf auch nicht vergessen werden, dass die Batterien aufgeladen werden müssen. Angenommen, es gäbe eine Lithium-Luft-Batterie für ein Elektroauto mit einer Reichweite von 500 km, so hätte diese bei einem Mittelklassewagen eine Kapazität von rund 90 kWh. An einem 400-V-Anschluss zu Hause mit einem maximalen Strom von 16 A würde es 15 Stunden dauern, bis die Batterie voll wäre. Damit solche

Autos in vernünftiger Zeit geladen werden können, braucht es also neue Anschlüsse mit hohen Leistungen. Und es reicht nicht nur der einzelne Anschluss: Solen in einer Tiefgarage 20 Elektroautos geladen werden, braucht es eine Anschlussleistung von 130 kW.

Neben den technischen Spezifikationen wird auch der Preis der Batterien entscheiden, wie viel Marktanteil die Elektroautos erobern werden. Heute liegt der Preis laut Andrea Vezzini von der Berner Fachhochschule bei rund 700 Euro/kWh. In den letzten Jahren ist er kaum gefallen. Die Automobilzulieferindustrie baue nun aber mehrere Produktionsstätten für Lithiumionen-Batterien auf, die sich aufgrund von Abnahmeverträgen bis 2020 rechnen lassen würden. Vezzini erwartet noch vor Ende dieses Jahrzehnts Preise von weniger als 350 Euro/kWh. Die eigentliche Problematik liege nicht so sehr bei den Rohstoffen für die Batterie, sondern in den noch wenig optimierten Prozessen bei der Herstellung. Das gehe von der Bereitstellung der aktiven Materialien bis zur kostengünstigen und zuverlässigen Fertigung von Gehäusen und Anschlüssen. «Ein grosses Potenzial liegt beim Packaging und der Überwachungselektronik, die heute einen Anteil von bis zu 40 % vom Endpreis haben», sagt Vezzini.

### Die Brennstoffzelle

Eine weitere Technologie, die in Zukunft unsere Fahrzeuge antreiben könnte, sind die Brennstoffzellen. Im

Labor arbeiten sie schon seit Jahren ohne Probleme. Die Herausforderungen liegen bei den Betriebsbedingungen im Auto, das nach der Ampel stark beschleunigt wird und beim nächsten Rotlicht wieder steht. Zudem soll das Fahrzeug in den Skiferien auch bei  $-20^{\circ}\text{C}$  zuverlässig starten. Die Forscher arbeiten an der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer der Brennstoffzellensysteme.

Im Fahrzeug werden PEM-Brennstoffzellen eingesetzt. Eine Polymer-Membran trennt als Elektrolyt die beiden Elektroden. Bei der Anode wird Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) zugeführt, das durch Platinpartikel in elementaren Wasserstoff (H) aufgetrennt wird. Das Wasserstoffatom verliert nun sein Elektron und kann als Proton ( $\text{H}^+$ ) die Membran durchdringen. Auf der gegenüberliegenden Seite, der Kathode, wird Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) zugeführt. Hier reagieren die Protonen ( $\text{H}^+$ ) und die Sauerstoffatome zu Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Es fehlen noch die Elektronen, die von der Anode den Weg über den Stromkreis nehmen und bei der Kathode das Wassermolekül vervollständigen.

### Wassersättigung

Damit die Protonen die Membran durchdringen können, wird ein spezielles Polymer eingesetzt, das Sulfonsäuregruppen ( $\text{SO}_2\text{-H}$ ) enthält. Dadurch können Wasser und Protonen durch die Membran diffundieren. Die Schwierigkeit liegt nun darin, dass die Membran zu rund 20 % mit Wasser gesättigt sein muss, damit sie optimal arbeitet. Sie ist wie ein Schwamm: Ist sie zu trocken, nimmt sie keine Protonen auf, ist sie zu feucht, sind alle Kanäle schon besetzt und die Protonen haben keinen Platz mehr. Insbesondere im Stadtverkehr mit dem ständigen Stop-and-Go ist es aber schwierig, die Gase so aufzubereiten, dass die Membran optimal mit Wasser gesättigt ist. Denn es kommt hinzu, dass die Zellen in einem Stack gestapelt sind, die Gase also durch ein System von kleinen, gerippten Metallstrukturen den Weg zu den Membranen finden müssen.

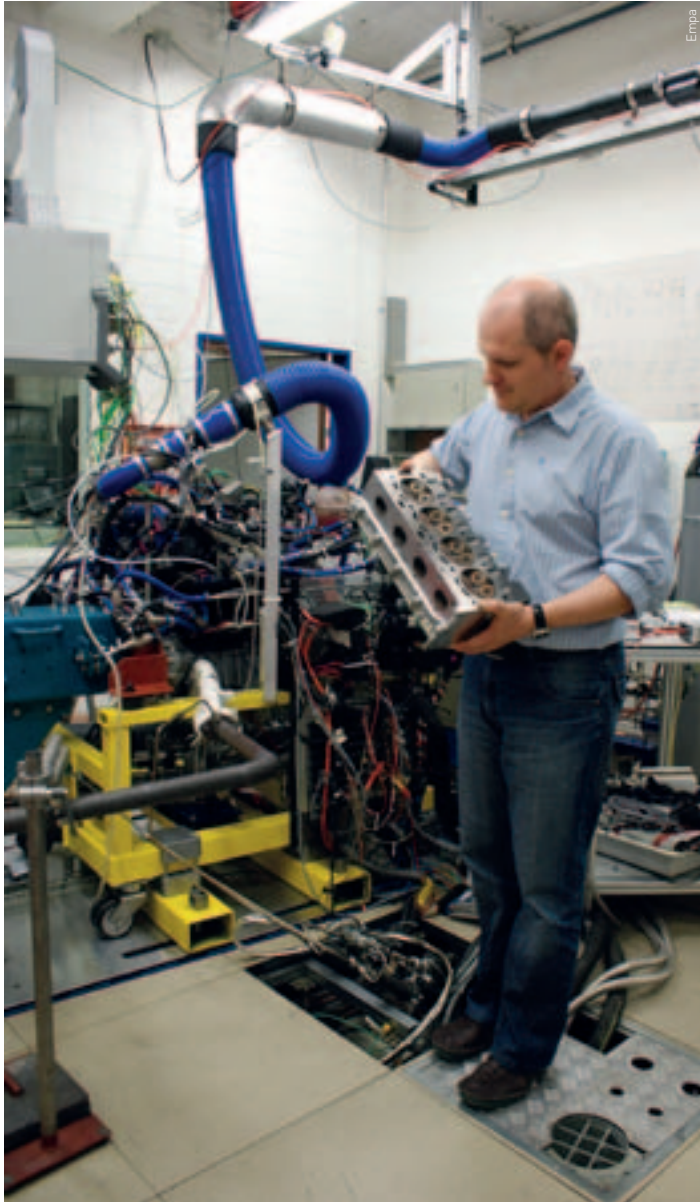
Die Gas- und Feuchteverteilung im Brennstoffzellenstack lässt sich nur zu einem gewissen Grad optimieren. Um das System zusätzlich zu entlasten, wird es mit Supercaps ergänzt, die Energie für eine gewisse Zeit zwischenspeichern. So kann die Brennstoffzelle trotz Stop-and-Go kontinuierlich arbeiten.

### Die Lebensdauer

Ein weiterer Knackpunkt ist die Lebensdauer der Brennstoffzelle. So wird die Polymermembran im Stapel zwischen Metallelementen eingeklemmt. In diese Metallelemente sind die Strukturen zur Gasverteilung eingearbeitet, wobei die Polymermembran gleichzeitig als Abdichtung genutzt wird. Ein Teil des Polymers bleibt also trocken, während die übrige Fläche mal feucht und dann wieder trocken ist – sich ständig ausdehnt und wieder zusammenzieht, was die Membran mechanisch beansprucht. «Durch geeignete Polymere und angepasste Konstruktionen konnten diese Probleme teilweise gelöst werden», sagt Günther Scherer, Leiter des Labors Elektrochemie am Paul-Scherrer-Institut. Bei tiefen Temperaturen ist es notabene nicht das Problem, dass die Brennstoffzelle nicht anlaufen würde. Aber das Wasser, das bei der Reaktion entsteht, gefriert typischerweise nach rund 20 Minuten in den Kanälen der Metallstrukturen. Dann kommt kein Sauerstoff mehr zur Membran und das System stoppt. Ist es hingegen schon längere Zeit in Betrieb, ist der Stapel genügend warm und das Wasser gefriert nicht.

### Hohe Temperaturen

Aber auch hohe Temperaturen sind ein Problem. Bei Temperaturen ab  $80$  bis  $90^{\circ}\text{C}$  trocknet die Membran rasch aus und leitet keine Protonen mehr. Nun muss ein Auto aber auch im Death Valley bei  $50^{\circ}\text{C}$  im Schatten die Wärme abführen können. Der Temperaturgradient ist jetzt allerdings so klein, dass nur noch wenig Wärmeenergie abgeführt werden kann, das System überhitzt. Einige For-



Projektleiter Patrik Soltic inspiziert einen Zylinderkopf, der für die Wasserstoff-Erdgasversuche eingesetzt werden soll. Im Hintergrund ist der Empa-Prüfstand für Vierzylindermotoren zu sehen.

schungsgruppen arbeiten deshalb an alternativen Polymeren, die nicht befeuchtet werden müssen und bei Temperaturen von bis zu 220 °C arbeiten. Günther Scherer ist neben den technischen Herausforderungen auch der hohe Preis der Membrane ein Dorn im Auge. Seine Forschungsgruppe arbeitet an einer neuen Membran, die aus einer Plastikfolie hergestellt wird, wie sie für Gewächshäuser verwendet wird. Die Folie leitet im ursprünglichen Zustand keine Protonen. Sie kann aber in einem standardisierten Verfahren mit Elektronen beschossen werden, wie es bei der Her-

stellung von Kabeln getan wird, um die Polymere zu vernetzen. Die Elektronen brechen die Polymere auf und schaffen Stellen, wo die Sulfonsäuregruppen andocken können. Durch einfache chemische Schritte entsteht so aus dem günstigen Plastik eine Brennstoffzellenmembran. Günther Scherer ist zuversichtlich, dass in 5 Jahren Fahrzeuge mit zuverlässigen und bezahlbaren Brennstoffzellensystemen hergestellt werden können.

### Die Erdgasmotoren

Die dritte Technologie, die hier vorgestellt wird, ist im Vergleich schon weiter in der Ent-

wicklung – entsprechende Fahrzeuge sieht man seit Jahren auf der Strasse. Im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung könnte sie aber einen starken Auftrieb erhalten, weil Erdgasmotoren im Vergleich zu Benzinmotoren weniger CO<sub>2</sub> ausstossen. Erdgas besteht zu einem grossen Teil aus Methan (CH<sub>4</sub>), während Benzin und Diesel aus langkettigen Kohlenwasserstoffmolekülen bestehen. Das Verhältnis von Kohlenstoff zu Wasserstoff ist dadurch günstiger – verglichen mit einem Benzinmotor entsteht allein durch die chemische Zusammensetzung des Erdgases rund ein Viertel weniger CO<sub>2</sub>. Es könnte zudem mit Wasserstoff vermischt werden. Wasserstoff ist extrem zündwillig, dadurch hätte das Gasgemisch ein besseres Entflammungsverhalten. Der Empa-Forscher Christian Bach untersucht mit seiner Gruppe das Zünd- und Brennverhalten solcher Gemische in einem Verbrennungsmotor. Längerfristig könnten daraus Brennverfahren mit kontrollierter Selbstzündung entwickelt werden – ähnlich wie beim Dieselmotor. Dies hätte eine effiziente und sehr schadstoffarme Verbrennung zur Folge. Heute, bei den konventionellen Motoren, fressen sich Flammfronten durch den Verbrennungsraum, die auf der Vorderseite sehr heiss sind und Schadstoffe wie Stickoxide entstehen lassen.

Doch der Schritt in der Motorenentwicklung muss nicht einmal so weit sein, um die Vorteile des Wasserstoffs zu nutzen. Dadurch, dass sich das Gasgemisch verlässlich zündet, kann mehr Abgas in den Motor zurückgeführt werden. So könnte beispielsweise die Stickoxidbildung im Motor drastisch vermindert werden.

### Aufladen mit dem Turbo

Erdgas hat weiter den Vorteil, dass es eine hohe Oktanzahl hat – bis zu 130. Das bedeutet, dass der Motor höher verdichtet und zusätzlich mit einem Turbo aufgeladen werden kann, ohne dass er zu klopfen beginnt. Bei einem Benzinmotor entzün-

det sich das Gemisch schneller von alleine, was zur Folge hat, dass die Verbrennung bei hohen Ladedrücken zu früh beginnen kann. Der Motor beginnt zu klopfen und kann dabei zerstört werden. Die Leistung eines Erdgasmotors hingegen kann mit Turboaufladung ohne Klopfgefahr stark erhöht werden. Ein kleiner, effizienter Motor erreicht damit eine hohe Leistung.

Bach und sein Team denken noch an weitere Tricks, um den Wirkungsgrad der Motoren zu verbessern, beispielsweise mit dem Miller-Zyklus: Hier wird das Einlassventil geschlossen, bevor der Kolben ganz unten ist. Dadurch erhält man beim Ansaugen und Verdichten quasi einen 1-Liter-Motor, hat aber im Arbeitszyklus einen 1,4-Liter-Motor. Damit können die Gaswechselerluste im Teillastbetrieb reduziert werden. Die dadurch verringerte Leistung wird durch das Aufladen mit einem Turbo kompensiert. Für einen Benzinmotor eignet sich der Miller-Zyklus nicht, weil beim Ansaugen, wenn das Ventil geschlossen wird, ein Unterdruck entsteht. Das Benzin könnte zu diesem Zeitpunkt kondensieren und die Tropfen würden die Verbrennung massiv verschlechtern. Hier wichen die Konstrukteure des Toyota Prius beispielsweise auf den Atkinson-Zyklus aus, der das Einlassventil etwas länger offen hält als normal. Nun wird ein Teil des Benzin-Luft-Gemisches in das Saugrohr zurückgestossen, womit ein ähnlicher Effekt erreicht wird. Diese Art von Motor kann aber nicht so stark aufgeladen werden.

### 150 PS mit einem Liter Hubraum

Bei den Verbrennungsmotoren und insbesondere den Erdgasmotoren geht also das Downsizing weiter. 1,4-Liter-Motoren mit einer Leistung von 150 PS sind bereits heute auf der Strasse. Die Entwickler der Autokonzerne arbeiten nun an Motoren, die solche Leistungen mit noch kleineren Motoren erbringen sollen. (gs) 