

# Elektrische Speicher für Kfz-Anwendungen

Robert Kohlleppel

6. Juni 2005

## 1 Allgemeines Funktionsprinzip von Batterien

Mit Hilfe einer Batterie kann Energie chemisch gespeichert werden. Es sind noch andere chemische Energiespeicher bekannt. Zum Beispiel wird beim Verbrennen von Erdöl oder Braunkohle (also bei einer chemischen Reaktion) in Kraftwerken Wärmeenergie frei, die zum Verdampfen von Wasser verwendet werden kann und über einen Generator schließlich in elektrische Energie umgewandelt wird. Bei dieser Art von Energieumwandlung ist man an die Gesetze der Thermodynamik gebunden, wodurch der Wirkungsgrad einer solchen Umwandlung klein ist.

In Batterien findet ebenfalls eine chemische Reaktion statt, bei der Energie frei wird. Allerdings ist die Reaktion in zwei Teilreaktionen zerlegt, die an zwei verschiedenen Orten stattfinden. Bei einer Teilreaktion werden Elektronen frei, so dass man eine negative Elektrode erhält. Bei der anderen Teilreaktion werden Elektronen benötigt; man erhält eine positive Elektrode.

Die Elektronen fließen über den elektrischen Verbraucher von der negativen zur positiven Elektrode. Gleichzeitig muß es zwischen den Elektroden zu einer Ionenleitung kommen, da sich die Elektroden nicht unbegrenzt elektrisch aufladen können. Die Ionenleitung findet in einem Elektrolyt zwischen den Elektroden statt. Das Elektrolyt darf nicht elektronenleitend sein, da die Elektronen dann nicht den Umweg über den Verbraucher nehmen müssten.

Die Energie, die bei der chemischen Reaktion frei wird, wird also direkt in elektrische Energie umgewandelt.

Welche Reaktionen an den Elektroden jeweils stattfinden und was für Ionen geleitet werden, hängt von dem Batterietyp ab.

Batterien, die wiederaufladbar sind, werden als sekundäre Batterien bezeichnet. Solche, die nur einmal entladen werden können, als primäre.

## 2 Einsatz von Batterien in Kraftfahrzeugen

Neben konventionellen Kraftfahrzeugen, die ausschließlich durch Otto- oder Dieselmotoren angetrieben werden, werden heute auch sogenannte Hybridfahrzeuge immer stärker entwickelt. Hybridfahrzeuge verfügen neben dem Verbrennungsmotor auch über die Möglichkeit, das Auto zusätzlich elektrisch anzutreiben.

## **3 Elektrik im konventionellen Kfz**

### **3.1 Historische Entwicklung**

Bei der berühmten ersten Überlandfahrt eines Automobils 1888 von Mannheim nach Pforzheim Bertha Benz' mußte der Verbrennungsmotor durch Muskelkraft gestartet werden. Viele Jahre blieb Muskelkraft die Startenergiequelle; erst 1913 wurden komplette elektrische Kfz-Anlagen verwendet, die den Motor starten konnten. Bereits 1905 wurden im Automobil eine Batterie und eine Beleuchtungsanlage eingebaut.

### **3.2 Elektrik heute**

Im Automobil befindet sich ein durch den Verbrennungsmotor angetriebener Generator. Über das Bordnetz kann er die erzeugte elektrische Energie an die Batterie und die Verbraucher abgeben. Ist der Motor nicht gestartet, oder liefert der Generator nicht genügend Leistung, werden die Verbraucher aus der Batterie versorgt.

Die Elektrik im Auto lässt sich also in die Bereiche

- Energiequelle Generator
- Energiespeicher Batterie
- Bordnetz zur Energieverteilung
- Verbraucher

einteilen.

Die elektrische Leistung wird im Fahrzeug durch einen Drehstromgenerator zur Verfügung gestellt. Die erzeugten Spannungen werden zu einer 14 V- Gleichspannung gleichgerichtet. Bei höheren Motordrehzahlen gibt der Generator mehr Leistung ab.

Die Spannung des Bordnetzes liegt zwischen ca. 12 V und 14 V. Die Batterie liefert eine Spannung von 12 V. Dies ist die Spannung des Bordnetzes, falls der Generator nicht läuft. Läuft der Generator liegt die die Spannung bei 14 V, da bei dieser höheren Spannung die Batterie geladen wird.

Die mittlere Leistungsaufnahme bei einem typischen Fahrzeug betrug im Jahr 2002 ca. 600 W, die Leistungsaufnahme beim gleichzeitigen Betrieb aller Verbraucher betrug 1200 W. Bis heute ist die Leistungsaufnahme bereits weiter gestiegen, da zum Beispiel immer mehr Komfort- und Sicherheitselektronik versorgt werden muß. Es sind bereits weitere größere Verbraucher geplant. Eine elektrische Frontscheibenbeheizung würde für eine Zeit von ein bis drei Minuten nach dem Start 2 kW benötigen.

Der wichtigste Verbraucher, der im Automobil die Batterie belastet, ist der Starter des Verbrennungsmotors. Er hat die Aufgabe, den Motor in Bewegung zu setzen, so dass eine Drehzahl erreicht wird, ab der der Motor selbst laufen kann und ihn dannach noch zu unterstützen, bis er sicher alleine laufen kann. Zum Drehen des Motors muß der Starter Reibungswiderstände überwinden, die bei tiefen Temperaturen ca. zwei bis drei mal so groß sind, wie beim betriebswarmen Motor. Ein typischer vom Starter benötigter Maximalstrom ist 800 A. Der Maximalstrom wird nur kurze Zeit benötigt. Der gesamte Startvorgang dauert wenige Sekunden.

Bei Ottomotor-Pkws liegt die Leistungsaufnahme des Starters zwischen 0,7 kW und 2,0 kW, bei Diesel-Pkws zwischen 1,4 kW und 2,6 kW.

### 3.3 Anforderungen an die Batterie

Die Batterie eines Kraftfahrzeuges muß wiederaufladbar sein. Weiterhin muß sie für den Starter genügend Leistung zur Verfügung stellen. Sie muß auch so viel Energie speichern können, dass die Verbraucher auch noch einige Zeit versorgt werden können, wenn der Verbrennungsmotor nicht läuft.

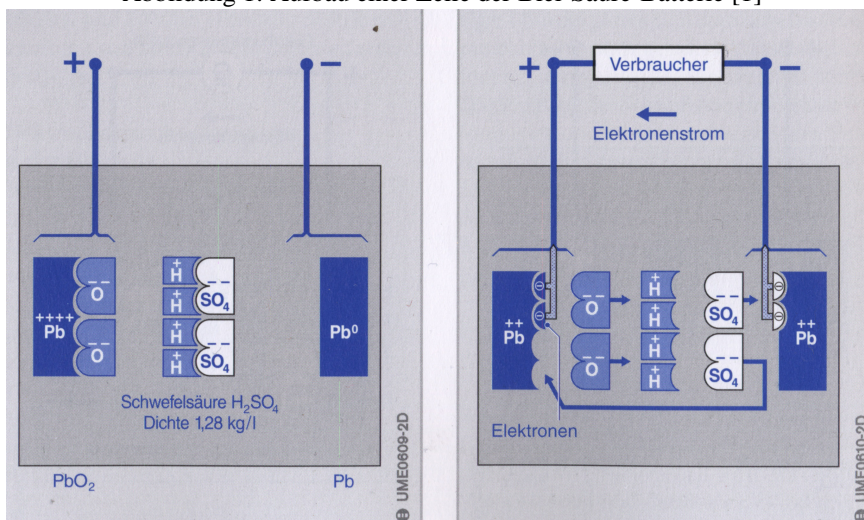
## 4 Die Blei-Säure-Batterie

In heutigen Kraftfahrzeugen wird nahezu ausschließlich die sogenannte Blei-Säure Batterie eingesetzt.

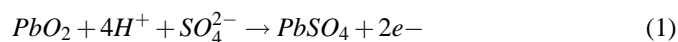
### 4.1 Aufbau und Chemie

Die Grundeinheit der Blei-Säure-Batterie ist eine Zelle mit zwei Elektroden. (siehe Abb. 1) Im geladenen Zustand besteht eine Elektrode aus Blei, die andere aus Bleidioxid. Die Elektroden befinden sich in einer Lösung aus Schwefeldioxid.

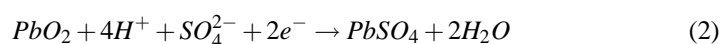
Abbildung 1: Aufbau einer Zelle der Blei-Säure-Batterie [1]



An der Bleielektrode verbinden sich beim Entladen Bleiatome unter Abgabe von jeweils zwei Elektronen mit  $SO_4^{2-}$  aus der Lösung zu Blei(II)-Sulfat. Da Elektronen abgegeben werden, ist die Bleielektrode also die negative Elektrode.



An der positiven Elektrode aus Bleidioxid ( $PbO_2$ ) reagiert Bleidioxid mit vier Wasserstoffionen und  $SO_4^{2-}$  unter Aufnahme von zwei Elektronen zu  $PbSO_4$  und zwei Wassermolekülen.

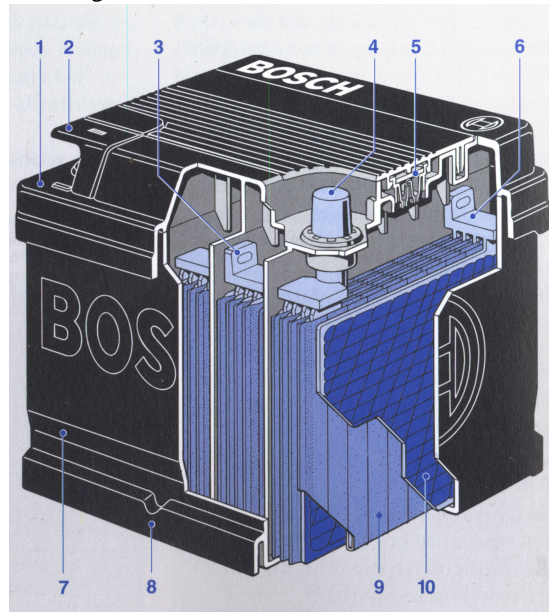


Die Reaktionen finden solange statt, bis sich die Elektroden soweit aufgeladen haben, dass diese Ladung das weiter Ablaufen der Reaktion unterbindet. Dann hat sich zwischen den Elektroden eine Spannung von ca. 2 V eingestellt.

Werden die Elektroden über einen Verbraucher verbunden, entlädt sich die Batterie. Legt man hingegen an den Klemmen eine Spannung an, die höher ist als die, die sich ohne äußeren Einfluss einstellt, wird die Batterie geladen. Die angelegte Spannung darf allerdings nicht zu hoch sein, da an den Elektroden sonst unerwünschte Reaktionen stattfinden.

In einer Blei-Säure-Batterie werden sechs solcher Zellen in Reihe geschaltet, so dass sich eine Gesamtspannung von 12 V ergibt. Die Elektroden sind als Platten ausgeführt, so dass sich eine große Oberfläche ergibt, an der die Reaktionen stattfinden können. Um die Oberfläche noch weiter zu vergrößern besteht eine Elektrode aus mehr als einer Platte. (siehe Abb. 2)

Abbildung 2: Aufbau einer Blei-Säure-Autobatterie [1]



## 4.2 Kenngrößen

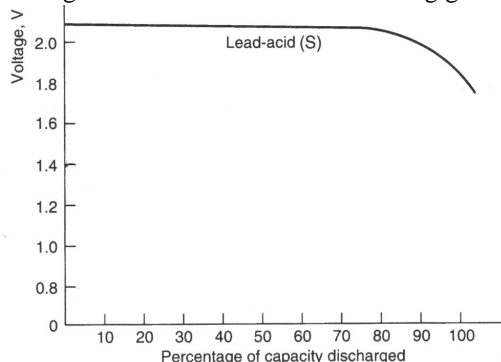
Die **Leerlaufspannung** einer Batterie ist die Spannung, die an ihren Klemmen im unbelasteten Zustand anliegt. Sie beträgt bei der Blei-Säure-Batterie ca. 12V. Während des Entladevorgangs ändert sich diese Spannung kaum; erst kurz bevor die Batterie vollständig entladen ist, bricht sie ein. (siehe Abb. 3)

Der **innere Widerstand** der Blei-Säure-Batterie setzt sich aus mehreren Teilwiderständen zusammen: unter anderem aus dem Widerstand der Elektroden gegenüber dem Elektronenstrom und aus dem Widerstand des Elektrolyts gegenüber dem Ionenstrom. Der innere Widerstand ist eine entscheidende Größe, weil er bestimmt, welche Leistung aus einer Batterie entnommen werden kann.

Mit der Kenntnis der Leerlaufspannung und dem inneren Widerstand lässt sich ein einfaches Ersatzschaltbild zeichnen.

Die **Kapazität** einer Batterie wird in  $Ah$  angegeben. Sie gibt die Elektrizitätsmenge an, die mit einem konstanten Entladestrom der Batterie entnommen werden kann, so dass nach 20 Stunden die Spannung  $10,5\text{ V}$  beträgt. Die Kapazität ist dann das Produkt aus diesem Strom und der Entladezeit von 20 Stunden.

Abbildung 3: Spannung einer Blei-Säure-Zelle in Abhängigkeit des Ladezustands [2]



Die Kapazität einer Batterie ist allerdings von der Temperatur und vom Entladestrom stark abhängig. Wählt man zum Entladen einen größeren Strom, dann ergibt sich eine geringere Kapazität.

Die **Energiedichte** gibt an, welche Energie die Batterie pro Volumeneinheit speichern kann. Die **Leistungsdichte** bestimmt, welche Leistung die Batterie auf das Volumen bezogen abgeben kann. Werden diese Angaben auf die Masse bezogen spricht man von der **spezifischen Dichte** und der **spezifischen Leistung**.

Die spezifische Energie einer Blei-Säure-Batterie liegt zwischen  $35 \frac{Wh}{kg}$  und  $40 \frac{Wh}{kg}$ . Die Energiedichte beträgt ca.  $70 \frac{Wh}{kg}$ . Die Blei-Säure-Batterie hat mit  $250 \frac{W}{kg}$  eine hohe Leistungsdichte.

## 5 Einsatz von Batterien im Hybridfahrzeugen - Anforderungen

Hybridautos haben wesentlich höhere Anforderungen an Batterien. Neben einer hohen Energiedichte müssen sie auch eine hohe Leistungsdichte vorweisen, um genügend Beschleunigungsenergie zu liefern und um beim Bremsen zurückgewonnene Energie schnell genug speichern zu können.

Weiterhin sollten sie eine lange Lebensdauer aufweisen, sicher sein und vertretbare Kosten verursachen.

General Motors, Ford und Daimler-Crysler haben das United States Advanced Battery Consortium (USABC) gegründet, um die Entwicklung von Batterien für elektrisch angetriebene Kfz anzuschließen.

Das USABC hat Kriterien für die gewünschten Leistungen von Batterien festgelegt. (siehe Tabelle 1)

Tabelle 1: USABC-Kriterien für die gewünschte Batterieleistung elektrischer Fahrzeuge [3]

Eigenschaft	kurzfristiges Ziel	langfristiges Ziel
spezifische Energie	$80 \frac{Wh}{kg}$	$200 \frac{Wh}{kg}$
Energiedichte	$137 \frac{Wh}{L}$	$300 \frac{Wh}{L}$
spezifische Leistung	$150 \frac{W}{kg}$	$+400 \frac{W}{kg}$
Leistungsdichte	$250 \frac{W}{L}$	$600 \frac{W}{L}$

## 6 Li-Ionen-Batterie

Die Bezeichnung der Lithium-Ionen-Batterie rührt daher, dass beim Laden und Entladen Lithium-Ionen zwischen ihren Elektroden ausgetauscht werden.

Die spezifische Energie von Lithium-Ionen-Batterien liegt zwischen  $80 \frac{Wh}{kg}$  und  $200 \frac{Wh}{kg}$ . Ihre Energiedichte liegt um  $500 \frac{Wh}{L}$ . Lithium-Ionen-Batterien erreichen eine spezifische Leistung von  $300 \frac{W}{kg}$  bis  $3000 \frac{W}{kg}$ .

Damit können Lithium-Ionen-Batterien die Anforderungen des USABC erfüllen.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Li-Ionen-Batterien [5]

Vorteile	Nachteile
versiegelte Zellen, keine Wartung nötig	Anschaffungskosten
viele Ladezyklen möglich	permanenter Kapazitätsverlust bei hohen Temperaturen
Betrieb in einem weiten Temperaturbereich	benötigt Schutzelektronik
geringe Selbstentladung	Kapazitätsverlust bei Überladen
hohe spezifische Energie und Energiedichte	

## 7 NiMH-Batterie

Die NiMH-Batterie ist nach den Bestandteilen ihrer Elektroden benannt, denn im geladenen Zustand besteht die positive Elektrode der NiMH-Batterie aus Nickel-Oxyhydroxide und die negative Elektrode aus einem Metall-Hydrid.

Prototypen von NiMH-Batterien haben bereits spezifische Energien von  $85 \frac{Wh}{kg}$  bis  $90 \frac{Wh}{kg}$ . Ihre Energiedichten liegt bei  $220 \frac{Wh}{L}$  bis  $250 \frac{Wh}{L}$ . NiMH-Batterien erreichen eine spezifische Leistung von  $220 \frac{W}{kg}$  bis  $240 \frac{W}{kg}$ . [4] Damit sind NiMH-Batterien in der Lage, die Energie- und Leistungsanforderungen der USABC zu erfüllen. Insgesamt sind NiMH-Batterien in der Entwicklung für Anwendungen in Hybridfahrzeugen am weitesten fortgeschritten.

## 8 SuperCap

SuperCaps sind Kondensatoren mit extrem hohen Kapazitäten von bis zu mehreren 1000 F. Blöcke von solchen Kondensatoren haben eine Energiedichte von ca.  $5 \frac{Wh}{kg}$ . Beeindruckend ist ihre Leistungsdichte, die zwischen  $1000 \frac{W}{kg}$  und  $5000 \frac{W}{kg}$  liegt. Mit diesen Werten eignen sich SuperCaps zwar nicht als Energiespeicher zum längeren

Antrieb eines Fahrzeugs, wohl aber, um Bremsenergie aufnehmen zu können und zur schnellen Abgabe von Energie zum Beschleunigen.

Es ist zu beachten, dass sich die Spannung, die von Supercaps abgegeben wird, während des Entladens stark ändert. Bei konstantem Entladestrom ändert sich die Spannung linear, da am Kondensator  $i_c = C \frac{du_c}{dt}$  gilt.

## 9 Zusammenfassung

Die Anforderungen für Batterien in Hybridfahrzeugen sind wesentlich höher als für Batterien in ausschließlich durch Verbrennungsmotor angetriebenen Fahrzeugen.

In konventionellen Fahrzeugen wird nahezu ausschließlich die bewährte Blei-Säure-Batterie eingesetzt.

Für Hybrid-Fahrzeuge werden einerseits Batterien wie die Li-Ionen-Batterie und die Ni-MH-Batterie untersucht, die hohe Energiedichten sowie hohe Leistungsdichten aufweisen. Andererseits sind SuperCaps in Entwicklung, die eine hohe spezifische Leistung aufweisen.

## Literatur

- [1] Bosch: Autoelektrik / Autoelektronik, 4. Auflage (2002)
- [2] David Linden, Thomas B. Reddy: Handbook Of Batteries (2002)
- [3] David Linden, Thomas B. Reddy: Handbook Of Batteries (2002), Kapitel 37.5
- [4] David Linden, Thomas B. Reddy: Handbook Of Batteries (2002), Kapitel 30.2
- [5] David Linden, Thomas B. Reddy: Handbook Of Batteries (2002), Kapitel 35.2