



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Bundesamt für Umwelt BAFU

BATTERIEN FÜR ELEKTRO- UND HYBRID- FAHRZEUGE

BERICHT

Dezember 2008

Ausgearbeitet durch:

Markus Eisenring, Ingenieurbüro Eisenring, markus.eisenring@bluewin.ch
Bienenstrasse 21, CH 9244 Niederuzwil, www.stromboli.ch

Thomas Kuster, Ingenieurbüro Elektronik, t.kuster@bluewin.ch
Weberstrasse 5, CH 9400 Rorschach, www.audiowerkstatt.ch

Impressum

Datum: 30. November 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie,
Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung Verkehr
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen
Postadresse: CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

und

Im Auftrag des Bundesamt für Umwelt BAFU,
Umwelttechnologieförderung
Papiermühlestrasse 172, 3063 Ittigen
Postadresse: CH-3003 Bern

www.bafu.admin.ch

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch und www.bafu.admin.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	1
	Abstract	2
1.	Einleitung	3
2.	Geschichte	4
3.	Batterien und Elektrofahrzeuge	5
4.	Vor- und Nachteile verschiedener Batterietypen	7
5.	Einsatzmöglichkeiten und Markt von Batterien	9
6.	Die Technik von Akkumulatoren	11
7.	Spezielle Anforderungen an Batterien in Elektrofahrzeugen	12
8.	Auslegung des Batteriesystems	13
9.	Batterie Technologien	14
	(jeweils: Chemie, Technische Daten, Bauformen, Entladecharakteristik, Ladetechnik, Lebensdauer, Kosten, für Elektrofahrzeuge wichtige Eigenschaften)	
9.1	Bleiakkumulator	14
9.2	Nickel-Cadmium Akkumulator	18
9.3	Nickel-Metallhydrid Akkumulator	22
9.4	Lithium-Ionen Akkumulator	26
9.5	Natrium-Nickelchlorid Akkumulator	31
9.6	Vergleich der verschiedenen Akkuarten	36
9.7	Typische Batterie Spezifikationen	37
9.7.1	Spezifikation einer erhältlichen Lithium-Polymer Batterie	37
9.7.2	Spezifikation einer Lithium Batterie in Entwicklung	38
10.	Ladetechnik und Ladeverfahren	39
11.	Aktivitäten und Marktsituation	40
11.1	Bisherige Entwicklungserfolge	41
11.1.1	Erhöhte Energiedichte	41
11.1.2	Längere Lebensdauer	41
11.1.3	Grössere Sicherheit	41
11.1.4	Verbesserte Ladegeschwindigkeit	42
11.2	Notwendige Entwicklungsschritte	43
11.2.1	Energiespeicherdichte	43
11.2.2	Kosten	43
11.3.	Behinderungen durch Patentsstreitigkeiten	43
11.3.1	Grössere NiMh Batterien	43
11.3.2	Lithium Batterien	44
12.	Laufende Entwicklungen	44
12.1	Programm der Japanischen Regierung zur Entwicklung von Batterien für Elektrofahrzeuge	45
12.2	Programm von NREL	46
12.3	U.S. Advanced Battery Consortium (USABC)	47
12.3.1	Ziele von USABC für Energiespeicher - Systeme am Ende Ihrer Lebensdauer für PHEV's	47
12.3.2	Ziele von USABC für neuartige Batterien für Elektrofahrzeuge	48
12.4	Weitere Programme	49
12.5	Nanotechnologie	49
12.5.1	A123-Systems	49
12.5.2	Altairnano	49
12.5.3	Nanoröhrchen	50
12.5.4	Weitere Firmen	50
	Abkürzungen	51
	Quellenangaben	52
	Nützliche Links	54
	Verzeichnis der Bilder, Tabellen und Diagramme	58

Zusammenfassung

Die knapper werdenden Ressourcen sowie die Belastung der Umwelt durch Emissionen zwingen zu einem Umdenken bezüglich der Antriebssysteme für Fahrzeuge. Der Einsatz von Elektrofahrzeugen in Leichtbauweise ist eine mögliche Konsequenz daraus. Diese benötigen einen passenden und technisch machbaren, aber auch umweltfreundlichen Energiespeicher in Form eines Akkumulators.

Auf dem Gebiet der Antriebsbatterien wurde in den letzten Jahren besonders intensiv geforscht und entwickelt. Der Anwendungsbereich dieser Batterien ist vorwiegend für Fahrzeuge mit:

- Hybridantrieb (HEV), Elektroantrieb in Kombination mit einem Verbrennungsmotor;
- Plug-in Hybridantrieb (PHEV), bei denen elektrischer Strom „nachgetankt“ werden kann;
- reinem Elektroantrieb (BEV);

Auf dem Markt erhältlich sind einzelne Fahrzeugmodelle mit Hybridantrieb sowie Industriefahrzeuge mit herkömmlichen Batterien. Noch nicht zur Anwendungsreife entwickelt ist der Antrieb mit Brennstoffzellen. Welche technische Lösung sich durchzusetzen vermag, wird bestimmt von Faktoren wie Batterietyp, Fahrzeugkonstruktion und Infrastruktur.

Dieser Bericht gibt einen Überblick über den heutigen Stand der Batterien für Elektrofahrzeuge.

Die Batterien müssen der jeweiligen Anwendung entsprechen, beziehungsweise den Bedürfnissen angepasst werden. Ein Vergleich der meistversprechenden Batterietypen wird in Kap. 4 aufgeführt. Die ideale Batterie soll eine möglichst hohe Energiedichte aufweisen, möglichst leistungsfähig und zudem günstig im Preis sein. (Kap. 7 Anforderungen an Batterien)

Um den Durchbruch in der Anwendung von Batterien im Bereich der individuellen Mobilität zu erreichen, sind noch weitere Entwicklungsschritte notwendig, z.B. tiefere Herstellungskosten bei höherer Energiedichte.

Abstract

The increasing scarceness of resources and pollution through emissions are obliging a new approach towards drive systems for vehicles. The use of electrical vehicles in light construction is a possible answer. This requires adequate and technically feasible and at the same time environmentally acceptable energy storage systems in form of an accumulator.

On the area of batteries for driving systems intensive research and development work has been done during past years. The scope of application of such batteries is for the most part for vehicles with:

- hybrid drive(HEV), electrical drive in combination with a combustion engine;
- plug-in hybrid drive (PHEV), by which electrical energy can be „refilled“;
- pure electrical propulsion (BEV);

Available on the market are a number of vehicles with hybrid drive and also industrial vehicles which are driven by conventional batteries. The development of the fuel cell has not yet reached a practical stage. Which of the technical solutions will finally prevail, is determined by such factors as type of battery, vehicle design and infrastructure.

This paper gives an overview of the present state of development of the batteries for electric vehicles.

The batteries must comply with the relevant application or respectively should be adapted to the requirements. A comparison of the most promising battery types is given under chapter 4. The ideal battery should have a high energy and power density and at the same time have a reasonable price. (Chapt. 7 Requirements for batteries)

In order to come to a breakthrough in the application of batteries for individual mobility some more development steps will be necessary, eg lower production costs combined with higher energy density.

1 Einleitung

Hoher Energieverbrauch der Fahrzeuge, langfristig steigende Kosten der fossilen Energieträger, knapper werdende Ressourcen, Schadstoff Emissionen und Klimaerwärmung sind weltweite Probleme.

Die Belastung der Luft durch Emissionen aus Kraftfahrzeugen im urbanen Bereich wird zunehmend zu einem Problem. Davon betroffen sind Agglomerationen in den Industrieländern, wie auch in zunehmendem Mass Städte in Entwicklungsländern. Gründe dazu sind unter anderen hohes Verkehrsaufkommen, grosse und luxuriöse Fahrzeuge, keine, niedrige oder veraltete Abgasnormen, nicht geprüfte Fahrzeuge, Beimischung von subventionierten Brennstoffen zu den Betriebsstoffen. Eines der markanten Beispiele dafür ist Katmandu, wo auf Grund von Abgasen des innerstädtischen Verkehrs jährlich direkte Gesundheitskosten von mehreren Millionen Dollar entstehen.

Der steigende Preis von Blei ist ein weiterer Grund der die Suche nach alternativen Batterien notwendig macht.

Eine wachsende Zahl von Verantwortlichen sucht Lösungen dieser Probleme durch die Einführung von Fahrzeugen mit reduziertem Energieverbrauch und weniger Schadstoffemissionen, sowie durch die Entwicklung moderner Antriebsbatterien. Weltweit werden deshalb auch grosse Anstrengungen unternommen um Fahrzeugen mit rein elektrischem Antrieb, Hybridantrieb oder Antrieb mit Brennstoffzellen zum Durchbruch zu verhelfen.

Die Eigenschaften der Batterien, welche den Anforderungen nicht genügten, waren bisher in vielen Konzepten ein Haupthindernis zum Erfolg. So war beispielsweise die Energiespeicherdichte der Batterien sehr klein, was ein hohes Gewicht der Batterien und eine ungenügende Reichweite pro Ladung ergibt. Die Lebensdauer der Batterien ist unzureichend, woraus hohe Batteriekosten resultieren. Auch die langen Ladezeiten entsprechen den Anforderungen nicht. Aus diesen und anderen Gründen werden weltweit jährlich hohe Beträge in die Forschung für bessere Batterien investiert. In den letzten Jahren wurden moderne Batteriesysteme entwickelt, die wesentlich bessere Eigenschaften haben. Die Leistungsdichte und Lebensdauer erreicht die Anforderungen für Hybridfahrzeuge und diese sind unterdessen besser als für reine Elektrofahrzeuge erforderlich. Bereits heute sind kleine, leichte Elektrofahrzeuge machbar. Dabei ist eine Reichweite von bis zu 500 km mit einer Batterieladung möglich. Die Energiedichte und die spezifischen Kosten werden laufend verbessert. So wird es in einigen Jahren möglich sein auch grössere reine Elektrofahrzeuge zu bauen, die den heutigen Ansprüchen genügen.

Diese Studie gibt Informationen über den derzeitigen Stand der Entwicklungen und einen Überblick über laufende Projekte für Entscheidungsträger, für interessierte Techniker und für die zunehmende Anzahl Leute, die sich Gedanken machen über die Zukunft der individuellen Mobilität.

2. Geschichte

Um 1800 entdeckte Volta, dass ein kontinuierlicher Fluss einer elektrischen Kraft möglich war, indem gewisse Flüssigkeiten als Leiter eine chemische Reaktion zwischen Metallen erlauben. Volta entdeckte weiter, dass die Spannung erhöht wurde, wenn Spannungszellen gestapelt werden. Dies führte zur Erfindung der Batterie.

1802 entwickelte Dr. William Cruickshank die erste elektrische Batterie, die für Massenproduktion geeignet war.

Viele weitere Schritte führten zum heutigen Stand in der Entwicklung der Batterien.

Geschichte der Batterieentwicklung:

1600	Gilbert (England)	Beginn der elektro-chemischen Untersuchungen
1791	Galvani (Italy)	Entdeckung von Elektrizität bei Tieren
1800	Volta (Italy)	Entdeckung der Volta-Zelle
1802	Cruickshank (England)	Erste elektrische Batterie für Masseproduktion
1820	Ampère (France)	Elektrizität durch Magnetfelder
1833	Faraday (England)	Bekanntgabe des Gesetzes von Faraday
1836	Daniell (England)	Entdeckung der Daniell-Zelle
1859	Planté (France)	Erfindung der Säure-Blei-Batterie
1868	Leclanché (France)	Erfindung der Leclanché-Zelle
1888	Gassner- (USA)	Erfindung von Trocken-Zellen
1899	Junger (Sweden)	Erfindung der Nickel-Cadmium Batterie
1901	Edison (USA)	Erfindung der Nickel-Metall Batterie
1932	Schlecht & Ackenpann (Germany)	Erfindung der gesinterten Elektroden
1947	Neumann (France)	Erfolgreiches Versiegeln der Nickel-Cadmium Batterie
1960	Union Carbide (USA)	Entwicklung der Primär - Alkaline - Batterie
1970		Entwicklung der ventilregulierten Säure-Blei-Batterie
1990		Kommerzialisierung von Nickel-Metallhydrid Batterien
1992	Kordesch (Canada)	Kommerzialisierung von wiederverwendbaren Alkalibatterien
1999		Kommerzialisierung von Lithium-Ion-Polymer
2002		Begrenzte Herstellung von Brennstoff-Zellen (PEM)

Quelle: [1]

3 Batterien und Elektrofahrzeuge

Die lange Zeit der Stagnation in der Entwicklung von Batterien für Antriebszwecke ist vorbei und wichtige Eigenschaften haben sich in den letzten Jahren stark verbessert. Die Entwicklung geht in rasantem Tempo vorwärts und Meldungen von neuen Erfolgen in diesem Bereich sind häufig. Dazu trägt nicht zuletzt der hohe Preis für Erdölprodukte bei, sowie die Einsicht, dass die Abhängigkeit vom Erdöl reduziert werden soll.

Batterien sind der wichtigste Teil für viele zukünftige, alternative Antriebssysteme für den individuellen Verkehr.

Sie spielen eine zentrale Rolle bei

- Fahrzeugen mit Hybridantrieb (HEV)
- Fahrzeugen mit reinem Elektroantrieb (BEV)
- Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb (FCV)

Geeignete Batterien sind eine Vorbedingung für energieeffiziente Fahrzeuge mit Elektro- und Hybridantrieb. Wesentliche Verbesserungen in der Batterietechnik ermöglichen die Herstellung neuer Fahrzeuge in diesem Bereich.

Je nach Anwendung in den Fahrzeugen spielen unterschiedliche Eigenschaften der Batterien eine wichtige Rolle.

Bei Fahrzeugen mit Hybridantrieben stehen vor allem die Leistungsfähigkeit und die Zyklenfähigkeit im Vordergrund, während für reine Elektrofahrzeuge die Energiespeicherdichte im Vordergrund steht. Bei allen Fahrzeugen spielen die Kosten eine wesentliche Rolle.

- **Mild Hybrid** Fahrzeuge führen relativ kleine Batterien mit. Sie brauchen den Elektromotor und die Batterien zur Unterstützung des Verbrennungsmotors beim Anfahren und zum Beschleunigen.
- **Hybrid Elektrofahrzeuge** (HEV) haben zwei Antriebsmotoren. Einer davon ist ein Elektroantrieb. Der zweite ist oft ein Verbrennungsmotor. Verbrennungsmotor und Elektroantrieb können einzeln oder in Verbindung miteinander betrieben werden. HEV's führen die zum Beschleunigen benötigte Energie zur Verfügung und speichern beim Bremsen die Energie. Sie müssen kurzfristig eine grosse Leistung abgeben und aufnehmen können. Die Batterien werden bei Hybridfahrzeugen sehr häufig geladen und entladen. Darum ist die Zyklenfähigkeit ein sehr wichtiges Kriterium. HEV's können nicht oder nur für kurze Distanzen rein elektrisch fahren.
- Moderne **Plugin Hybrid Elektrofahrzeuge** (PHEV) liegen bezüglich Batteriegrösse und spezifischer Leistung- und Energiedichte zwischen den beiden Fahrzeugtypen HEV und BEV. Bei den PHEV dient der Verbrennungsmotor als Unterstützung für den Elektroantrieb und als „range extender.“ HEV's können sich über eine gewisse Distanz rein elektrisch fortbewegen und die Batterien können auch am Netz geladen werden.
- **Batterie Elektrofahrzeuge** (BEV) führen grosse Batterien mit und benötigen zum Erreichen einer grossen Reichweite eine hohe Energiedichte. Der Antrieb ist einfach, da der Elektromotor der einzige Antrieb ist.

Fahrzeug Typ	Mild Hybrid	Full Hybrid	Plugin Hybrid	BEV
Energie [kWh]	sehr klein (0.4)	klein (1.2)	hoch (10)	sehr hoch (40)
Leistung [kW]	klein (12)	hoch (40)	sehr hoch (50)	sehr hoch (50)
Spannung [V]	tief (42)	hoch (270)	hoch (270)	hoch (270)
Energiedichte [Wh/kg]	klein	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Leistungsdichte [W/kg]	klein	sehr hoch	hoch	mittel
Zyklenzahl [-]	mittel	sehr hoch	hoch	hoch
(typische Werte in Klammern)				

Tabelle 1: Anforderungen an die Batterien für verschiedene Typen von HEV und BEV

Nebst diesen Typen gibt es noch eine ganze Reihe von weiteren Bezeichnungen, die je nach Quelle verschiedene Eigenschaften haben, z.B.: Micro Hybrids, Moderate Hybrids (High-Voltage “Power-Assist” Hybrids), Strong Hybrids.

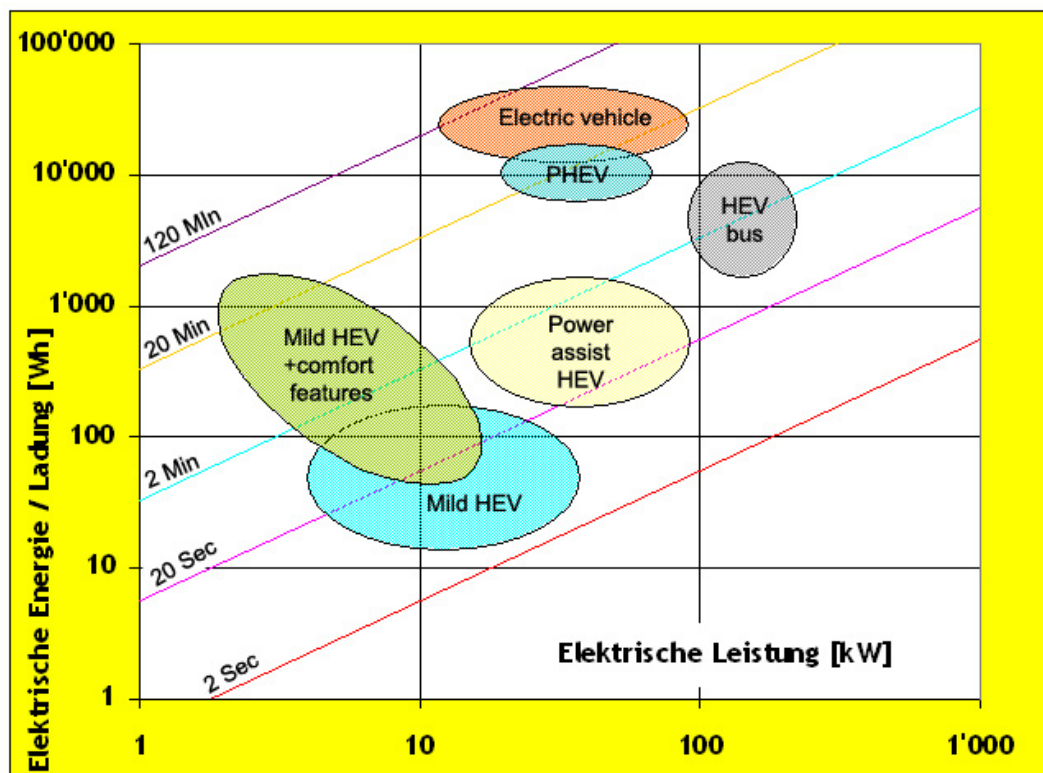


Diagramm 1: Leistung und Energie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Quelle: [2]

4. Vor- und Nachteile verschiedener Batterietypen

Je nach Anwendung stehen verschiedene Eigenschaften der Batterien im Vordergrund, z.B. das Volumen, der Energieinhalt, die Leistungsfähigkeit, die Zyklenzahl, die Lebensdauer oder andere.

Tabelle 2: Vor und Nachteile einiger gängiger Batterietechnologien		
	- Vorteile	- Nachteile
Blei-Säure-Batterie	- Nicht teuer und einfach in der Herstellung - Ausgereift, zuverlässig und bekannte Technologie - wenn richtig verwendet, ist eine Blei-Säure-Batterie dauerhaft und verlässlich - Die Selbstentladung ist bei den tiefsten unter den wiederaufladbaren Batteriesystemen - Kleiner Bedarf an Unterhalt - kein Memory-Effekt - kein Nachfüllen von Elektrolyt bei den versiegelten Versionen - Hohe Entladeströme sind möglich	- Tiefe Energiedichte - Schlechtes Gewicht - -Energieverhältnis beschränkt den Einsatz auf ortsfeste oder fahrbare Applikationen - Kann nicht in entladem Zustand gelagert werden - die Zellenspannung sollte nie unter 2.10 V fallen - Gestattet nur eine beschränkte Anzahl Vollenladungen - gut anwendbar für Notstromanlagen, welche nur sporadisch einer Vollenladung ausgesetzt sind - Bleianteil und Elektrolyt machen die Batterie Umwelt unfreundlich - Transportbeschränkungen bei flüssigen Blei-Säure-Batterien - es bestehen Umweltschutzbedenken im Zusammenhang mit möglichem Verschütten. Thermische Kettenreaktion kann entstehen bei unsachgemäßem Laden
Nickel-Cadmium-Batterie	- Schnelle und einfache Aufladung - Hohe Anzahl von Lade-/Entladezyklen - wenn gut gewartet, können Nickel-Cadmium über 1000 Lade-/Entladezyklen erreichen - Gute Ladeeigenschaften - Nickel-Cadmium erlauben eine Ladung auch bei tiefen Temperaturen - Lange Lagerungsfähigkeit - 5 Jahre Lagerung ist möglich. Erneute Formatierung vor Gebrauch ist notwendig - Einfache Lagerung und Transport - die meisten Fluggesellschaften akzeptieren Nickel-Cadmium Batterien ohne spezielle Bedingungen - Gute Leistungen bei tiefen Temperaturen - Erträgt schlechte Behandlung - Nickel-Cadmium ist eine der robustesten wiederaufladbaren Batterien - Wirtschaftlicher Preis - Nickel-Cadmium ist die günstigste Batterie, in Bezug auf Kosten pro Zyklus - Erhältlich in vielen Grössen, Varianten und Leistungsoptionen - die meisten Nickel-Cadmium Zellen sind zylindrisch	- Verhältnismässig tiefe Energiedichte - Memory-Effekt - Nickel-Cadmium müssen regelmässig untersucht und gewartet werden, um den Memory-Effekt zu vermeiden - Nicht umweltfreundlich - Nickel-Cadmium enthält giftige metallische Substanzen. Gewisse Länder schränken ihre Verwendung ein. - Verhältnismässig hohe Selbstentladung - verlangt eine Aufladung nach Lagerung

Nickel-Metallhydrid Batterie	- 30 bis 40% höhere Kapazität als die Standard Nickel-Cadmium Batterie - Nickel-Metallhydrid hat das Potenzial für noch höhere Kapazitäten - Weniger Tendenz zu Memory-Effekt als Nickel-Cadmium - müssen weniger oft gewartet werden - Einfache Lagerung und Transport - Transporte sind keinen speziellen Kontrollen unterworfen - Umweltfreundlich - enthält nur schwache Gifte, günstig für die Entsorgung	- Begrenzte Lebensdauer: die Leistungsfähigkeit beginnt abzunehmen nach 200 bis 300 Zyklen, wenn wiederholt stark entladen wurde - Begrenzter Entladestrom: auch wenn Nickel-Metallhydrid geeignet ist, einen hohen Strom abzugeben; starke Entladung reduziert die Lebenserwartung der Batterie - Komplexere Ladealgorithmen sind nötig: Nickel-Metallhydrid produziert mehr Wärme während der Ladung und benötigt eine etwas längere Ladezeit als Nickel-Cadmium. Die Schwebeladungs-Einstellungen sind kritisch, weil die Batterie keine Überladung absorbieren kann - Hohe Selbstentladung: typischerweise 50% höher als bei Nickel-Cadmium. Neue chemische Zusätze haben die Selbstentladung etwas verkleinert, aber auf Kosten von tieferen Energiedichten - Die Leistungsfähigkeit wird verschlechtert bei Lagerung unter hohen Temperaturen: Nickel-Metallhydrid sollte an einem kühlen Ort gelagert werden und bei ca. 40%-Ladezustand - Wartung: Nickel-Metallhydrid benötigt regelmässige komplette Entladung, um die Formierung von Kristallen zu verhindern. Nickel-Cadmium sollte einmal pro Monat gewartet werden, Nickel-Metallhydrid einmal alle 3 Monate
Lithium-Ion Batterie	- Hohe Energiedichte - Potential für noch höhere Kapazitäten ist vorhanden - Benötigt keine längere Formatierung, wenn neu. Eine einzige normale Ladung genügt - Verhältnismässig kleine Selbstentladung - die Selbstentladung ist weniger als die Hälfte jener auf Nickel basierenden Batterien - Kleine Wartung - Da kein Memory-Effekt besteht, wird keine regelmässige Entladung benötigt	- Benötigt eine eingebaute Schutzschaltung, um Spannung und Strom innerhalb den Sicherheitslimiten zu halten - Ist der Alterung unterworfen, auch wenn sie nicht gebraucht wird - lagern der Batterie in einem kühlen Raum bei einer 40%-Ladung reduziert den Alterungseffekt - Entladestrom ist moderat - nicht verwendbar für starke Belastung - Einschränkung bei Transporten - Transporte per Schiff von grösseren Mengen können zu Kontrollen führen. Diese Einschränkungen beziehen sich nicht auf persönlich mitgeführte Batterien - Aufwendig in der Herstellung - ca. 40% höhere Herstellungskosten als bei Nickel-Cadmium - Nicht total ausgereift - Metalle und Chemie ändern kontinuierlich, weitere Optimierungen sind wahrscheinlich
Lithium-Polymer Batterie	- Ausgesprochen dünn - Batterien, die in der Form einer Kreditkarte gleichen, sind herstellbar - Flexibler Formfaktor - die Hersteller sind nicht mehr an die Standardzellen-Formate gebunden. Bei grossen Stückzahlen können beliebige Formen günstig hergestellt werden - Leicht - die Gelelektrolyte gestatten vereinfachtes Verpacken ohne metallische Hülle - Bessere Sicherheit als Lithium-Ion - widerstandsfähiger gegen Überladung, kleineres Risiko gegen auslaufende Elektrolyte	- Kleinere Energiedichte und weniger Ladezyklen, verglichen mit Lithium-Ion - Aufwendige Herstellung - Keine Standardgrössen. Die meisten Zellen sind für einen Markt mit grossen Stückzahlen gebaut - Höhere Kosten betreffend Energieverhältnis als Lithium-Ion

Quelle: [1]

Bemerkung zur Tabelle 2: Lithium-Polymer Batterien können mit verschiedener Chemie realisiert werden.

5. Einsatzmöglichkeiten und Markt von Batterien

Der Hauptmarkt für wiederaufladbare Batterien (Akkumulatoren) sind die von der Massenfertigung geprägten Artikel wie Laptops, Funktelefone, Digitalkameras und MP3-Player. Auch das Gebiet der netzunabhängigen Elektrowerkzeuge hat in den letzten Jahren steigenden Absatz generiert.



Bild 1: Massenartikel, die Batterien erfordern

Industrielle Anwendungen wie z.B. Notstromversorgungen von Telefon-Zentralen spielen in der Entwicklung eher eine untergeordnete Rolle, kommen aber oft von der Grösse der Speicher näher an die Anforderungen für Elektro- und Hybridfahrzeuge heran.



Bild 2: Prototyp eines ultraleichten Autos mit reinem Elektroantrieb (BEV)

Bei den Elektrofahrzeugen ist eigentlich nur das beste Akkusystem gut genug, weil die Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge direkt von der Leistungsfähigkeit des eingebauten Energiespeichers abhängt. Weil aber der Markt der Elektro- und Hybridfahrzeuge weltweit nach wie vor klein ist, rechnet sich die Entwicklung neuer Batteriesysteme speziell für diese Fahrzeuge in den wenigsten Fällen.

Dadurch ist man oft auf Entwicklungen angewiesen, welche für einen ganz anderen Markt gedacht sind.

Weil es den idealen Akkumulator nicht gibt, muss für jedes Fahrzeug die beste Lösung gefunden werden. So leuchtet es zum Beispiel ein, dass bei Elektrogabelstaplern noch immer mit den schweren Bleiakkus gearbeitet wird, während in ein möglichst leichtes Rennfahrzeug heute gerne Lithium-Ionen Akkus eingebaut werden.



Bild 3: Elektrogabelstapler



Bild 4: Solar Rennfahrzeug

In Entwicklungsländern sind die Voraussetzungen für den Betrieb von Elektrofahrzeugen teilweise besser als in den Industrieländern. Insbesondere werden die Batterien als Folge der tieferen Durchschnitts- und Spitzengeschwindigkeit weniger beansprucht. Auch die durchschnittliche Umgebungstemperatur ist oft höher, was für einige Batterietypen (z.B. Bleiakkumulatoren) ein Vorteil ist. Ferner werden mit Fahrzeugen für den öffentlichen Verkehr in der Regel feste Routen gefahren, was an den Endstationen ein Nachgeladen oder einen Wechsel der Batterien ermöglicht. Diese Punkte ergeben ein Potential für eine bessere Lebensdauer der Batterien, was die Betriebskosten der Fahrzeuge senkt.

Auch in Indien und besonders in China werden grosse Anstrengungen für den Einsatz von Elektrofahrzeugen und für die Entwicklung von Batterien gemacht.

Es mag für viele erstaunlich sein, dass Katmandu bis vor kurzem weltweit die Stadt war mit der grössten Anzahl von BEV- Elektrofahrzeugen. In Katmandu sind 650 3- rädige Fahrzeug im öffentlichen Verkehr im Einsatz. Quellen: [3], [4]

6. Die Technik von Akkumulatoren

Elektrische Ersatzschaltung eines Akkumulators mit Last (vereinfacht) :

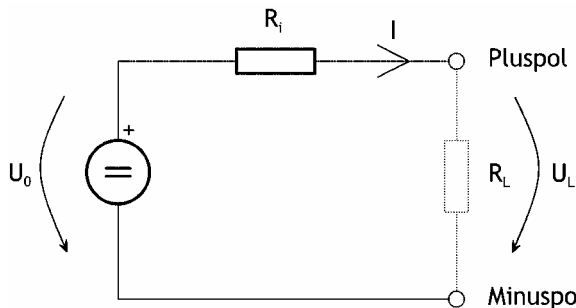


Diagramm 2: Ersatzschaltung eines Akkumulators



Bild 5: NiMH Akkumulator

Dabei ist:

Leerlaufspannung	U_0	[in Volt]
Laststrom	I	[in Ampere]
Innenwiderstand	R_i	[in Ohm]
Lastwiderstand	R_L	[in Ohm]

Damit können folgende Größen berechnet werden :

Laststrom	I	$= U_0 / (R_i + R_L)$	[A]
Lastspannung	U_L	$= U_0 - I * R_i$	[V]
Ausgangsleistung	P_{out}	$= I * U_L$	[W]
Verlustleistung	P_V	$= I^2 * R_i$	[W]

Ferner gilt:

Zeit	t		[h]
Kapazität des Akkus	C	$= I * t$	[Ah]
Gespeicherte Energie	E	$= U_0 * C$	[in Wh] (/ 1000 in kWh)

Eine Schwierigkeit bei Elektrofahrzeugen ist, dass die Stromentnahme starken Schwankungen unterliegt, im Rekuperationsbetrieb sogar negativ sein kann (Strom fließt in den Akkumulator zurück). Die gesamte gespeicherte Energie kann in 1- 2 Stunden entladen werden, so dass der Energiespeicher einer hohen Beanspruchung unterliegt. Der Alterungsprozess der Batterien kann in Elektrofahrzeugen schneller verlaufen, weil eventuell nicht alle in das Fahrzeug eingebauten Zellen genau die gleichen physikalischen Bedingungen haben (z.B. durch Temperaturunterschiede).

7. Spezielle Anforderungen an Batterien in Elektrofahrzeugen

Batterien (Akkus) für Elektrofahrzeugen sollen folgende Eigenschaften aufweisen:

- Grosse Speicherdichte (viel Energie in einem kleinen Volumen)
- **Möglichst leicht** (kleines Gewicht pro gespeicherte Energie) *
- **Gut teilbar** (für Gewichts-Balance und einfachen Einbau) *
- **Hochstromfähigkeit beim Entladen und beim Laden** (beides in 1h) *
- **Umgebungstemperaturbereich möglichst -20° bis mindestens 60 °C** *
- Genügend grosse Zellen (Ah) für direkte Serieschaltung
- **Einfache Ladetechnik, robustes Betriebsverhalten** *
- **Unempfindlich gegen Erschütterungen** *
- Guter Gesamtwirkungsgrad, kleine Verluste im Betrieb und Stillstand
- **Grosse Zyklenzahl** (> 1500) und lange Lebensdauer (> 5 Jahre) *
- **Ungefährlich** im Betrieb und bei einem Unfall *
- **Geringe Unterhaltskosten**, möglichst wartungsfrei *
- **Einfache Rezyklierbarkeit**, keine giftigen Stoffe enthaltend *
- **Günstiger Anschaffungspreis** *

* Besonders wichtig beim Einbau in Hybridfahrzeuge (HEV)



Bild 6: Toyota Prius, das bisher erfolgreichste Hybridfahrzeug

Bis jetzt ist es unmöglich, alle diese Wünsche mit einer einzigen Technologie abzudecken. Deshalb ist jeder Einsatz eines Akkus in ein Elektrofahrzeug ein Kompromiss, den es für jedes Fahrzeug wieder neu abzuwägen gilt.

8. Auslegung des Batteriesystems

Die Eigenschaften eines Fahrzeuges, der geplante Einsatz des Fahrzeuges, der Antrieb und das Batteriesystem müssen aufeinander abgestimmt sein und beeinflussen sich gegenseitig. Damit ist für jeden Einsatz einer Batterie in einem Elektrofahrzeug ein Optimierungsprozess notwendig.

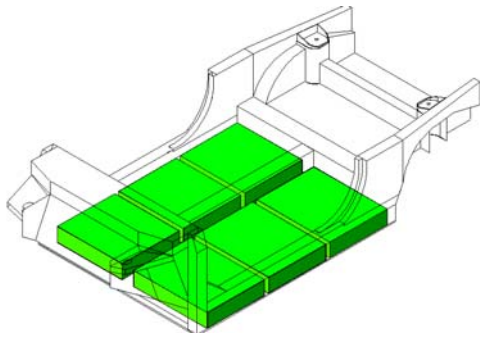


Bild 7: Batteriekonzept für das Fahrzeug Stromboli II



Bild 8: BEV- Elektrofahrzeug Stromboli II
Quelle: [5]

Das Konzept für die Batterie eines Elektrofahrzeugs richtet sich einerseits nach dem Fahrzeug selbst:

- Grösse	Möglichkeit zum mechanischen Einbau der Batterien	
- Gewicht	Rollwiderstand, Beschleunigung und Steigfähigkeit	
- Zuladung	Fahrzeuggewicht	
- Rollwiderstand	Kraft-Berechnung zur Überwindung des Rollwiderstands	
- Frontfläche	Kraft-Berechnung Windwiderstand	
- cw- Wert	Kraft-Berechnung Windwiderstand	
- Wirkungsgrad des Antriebs	Leistungsberechnung -> Strom	
- Höchstgeschwindigkeit	Leistungsberechnung - Strom1	Maximalstrom
- Steigfähigkeit	Strom2	
- Beschleunigungsvermögen	Strom3	
- Elektrische Bremsleistung	Rekuperations- Strom	

Andererseits spielt der Einsatz (die Betriebsbedingungen) des Fahrzeugs eine wichtige Rolle:

- | | |
|--|---|
| - Maximale Reichweite | max. Kapazität des Akkus ohne Schädigung |
| - Zeit zum Laden | Stromfestigkeit Ladebetrieb |
| - Anzahl der Ladezyklen | Lebensdauer |
| - Typisches Streckenprofil | Wünschbare Grösse und Kapazität des Akkus |
| - Klima | Betriebstemperaturbereich |
| - Kosten für die Anschaffung und den Betrieb des Fahrzeugs | Welche Technologie kommt in Frage ? |

9. Batterie Technologien

Die folgende Aufzählung ist nicht vollständig, umfasst aber die wichtigsten Technologien, welche in Elektrofahrzeuge eingebaut werden oder bis vor kurzem noch eingebaut worden sind.



9.1 Bleiakkumulator

Der aus den Autos als Starterbatterie altbekannte Bleiakkumulator ist zwar schwer und hat eine eher kleine Speicherfähigkeit, ist aber sehr robust und preiswert.

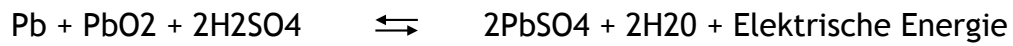
Obwohl er sehr grosses Gewicht hat, kommt er dank seiner Robustheit und Einfachheit in vielen Elektrofahrzeugen zum Einsatz: In Behindertenfahrzeugen, Golfwagen, elektrischen Gabelstaplern, aber auch in Elektro- und Hybridfahrzeugen. Er ist noch immer der am häufigsten eingesetzte Energiespeicher für Elektrofahrzeuge.

Zudem steht die Entwicklung - entgegen landläufiger Meinung - beim Bleiakkumulator nicht etwa still, sondern könnte mit neuen Dotierungen z.B. in Hybridfahrzeugen eine neue Zukunft haben.

Reine Elektrofahrzeuge, welche mit Bleiakkumulatoren ausgerüstet sind, sollten ungefähr das halbe Fahrzeuggewicht im Akku haben, damit sie genug leistungsfähig sind.

Obwohl Blei zu den umweltschädigenden Problemstoffen gehört, entstehen heute durch die hohe Rücklaufquote beim Recycling für Bleiakkus wenig Probleme und deshalb gehören sie zur Gruppe, welche von der RoHS- Verordnung nicht betroffen sind. Die meisten Bleiakkushersteller können ihre Batterien selbst recyceln.

9.1.1 Chemie



9.1.2 Technische Daten

Zellenspannung :	2,0		Volt
Leistungsdichte :	10	- 180	W/kg
Energiedichte :	2.0	- 40	Wh/kg
Temperaturbereich :	-25	- + 65	°C

9.1.3 Bauformen

Bild 9: Offener Bleiakkumulator mit flüssigem Elektrolyt



Bild 10: Batterie in geschlossener Bauform (Blei-Gel oder Blei-Vlies)



9.1.4 Entladecharakteristik

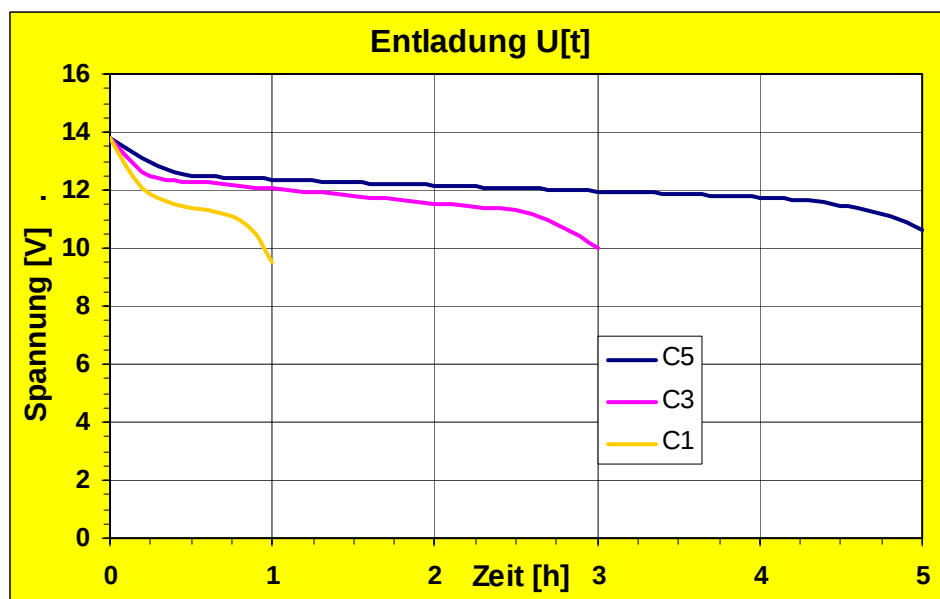


Diagramm 3: Entladecharakteristik eines Blei Akkumulators

Blei-Akkus haben im Allgemeinen den Vorteil, dass sie mit hohen Strömen entladen werden können. Je höher der Entladestrom ist, desto kleiner wird die nutzbare Energiemenge, welche dem Akkumulator entnommen werden kann.

Im Elektrofahrzeug hat man normalerweise einen nicht regelmässigen Stromverbrauch, was die Voraussage bezüglich Reichweite schwierig macht.

9.1.5 Ladetechnik



Bild 11: Hochleistungs- Ladegerät für den Einbau in Fahrzeug

Durch die Möglichkeit der Gasung ist das Laden der nassen Bleiakkumulatoren relativ einfach möglich, unter der Voraussetzung, dass der dadurch entstehende Wasserverlust wieder ausgeglichen wird. In der Gasungsphase kann somit eine Symmetrierung der Serieschaltung erreicht werden.

Üblicherweise wird mit einem IU Verfahren, zuerst konstanter Strom und dann konstante Spannung, geladen. Das Umschaltkriterium ist das Erreichen der End- Ladespannung. Die End- Ladespannung ist dabei in geringem Mass temperaturabhängig.

Beim Laden von geschlossenen Bleiakkumulatoren (Blei-Gel oder Blei-Vlies) ist es besonders wichtig, dass die Zellen nicht überladen werden, weil sonst durch die Bildung von flüchtigem Sauer- und Wasserstoff der Elektrolyt reduziert wird.

9.1.6 Lebensdauer

Mit der richtigen Ladetechnik und unter Einhaltung der max. Entladeströme kann mit einem Bleiakkusatz eine Lebensdauer von ein paar hundert Zyklen erreicht werden, die Laborangaben der Hersteller (800 bis 1'200 Zyklen) hingegen lassen sich in Elektrofahrzeugen kaum erreichen.

Die Alterung des Akkus geschieht vor allem über die Sulfatierung der Bleiplatten, was die chemisch aktive Fläche verkleinert. Diese Sulfatierung der Platten geschieht eigentlich vom Moment an, wo die Zelle gefüllt wird, besonders schnell jedoch, wenn eine Tiefentladung stattfindet. Eine einzige Tiefentladung kann die Lebensdauer um die Hälfte verringern, auch wenn der Akkumulator gleich anschliessend wieder geladen wird. Zu langes Stehen lassen im tief entladenen Zustand macht den Akkumulator meist völlig unbrauchbar.

9.1.7 Kosten

Blei-Akkus sind in der Anschaffung relativ günstig, sie kosten etwa 70 - 250 \$/kWh

9.1.8 Für Elektrofahrzeuge wichtige Eigenschaften von Bleibatterien

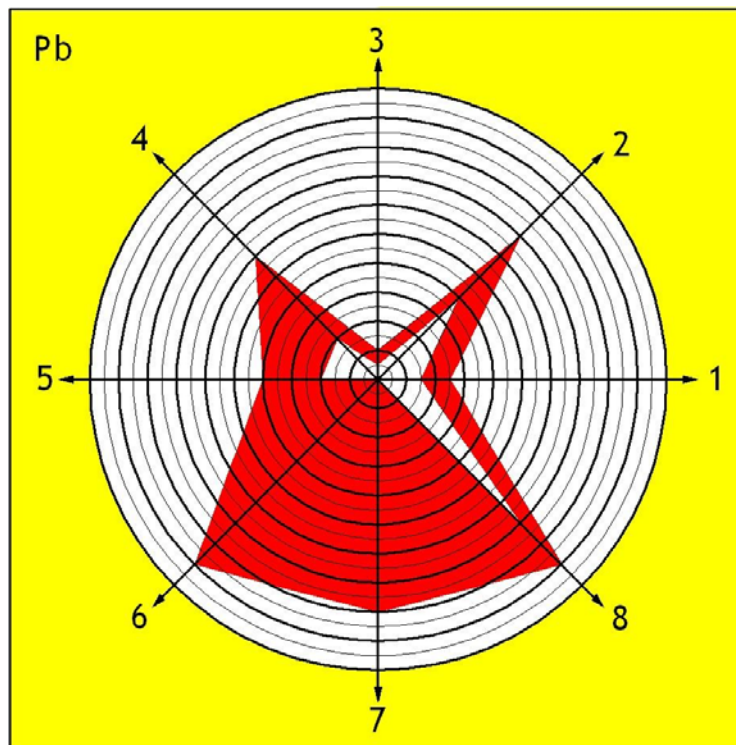


Diagram 4: Eigenschaften von Bleibatterien

	Pb- Akku		Min.	Max.
1	Leistungsgewicht	[Wh/kg]	30	50
2	Betriebstemperatur	[°C]	-20	60
3	Laststrom	[C]	0.2	5
4	Schnellladezeit	[h]	8	16
5	Zyklenfestigkeit	[Anzahl]	400	800
6	Selbstentladung	[%/Monat]		<5
7	Preis / Kosten	[CHF/kWh]	>400	
8	bewertete Sicherheit	[%]		90

Tabelle 3: Eigenschaften von Bleibatterien



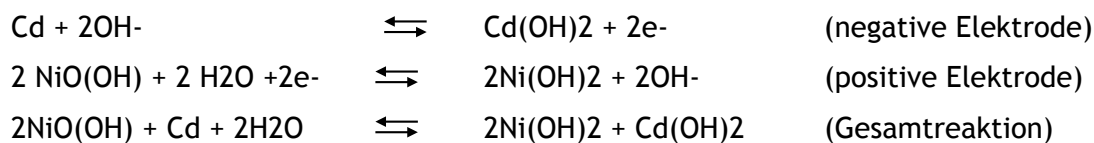
9.2 Nickel-Cadmium Akkumulator

Der Nickel-Cadmium Akkumulator ist heute noch weit verbreitet in mobilen Handwerkzeugen (z.B. in Akku-Bohrmaschinen) und wird gerne in Hochstromanwendungen eingesetzt. Auch grosse, offene Akkumulatoren (z.B. von der französischen Firma Saft) sind in Elektrofahrzeugen im Einsatz. Für Neuentwicklungen sollten sie aber nicht mehr eingesetzt werden, da wegen des umweltschädigenden Cadmiums in der EU bereits ein Verbot erlassen wurde und mit den Nickel-Metallhydrid Akkus eine recht gute Alternative zur Verfügung steht.

Trotzdem gibt es immer wieder Anwendungen, wo man nicht auf NiCd- Zellen verzichten kann. Der Grund ist die hervorragende Stromfestigkeit, verbunden mit einer guten Lebensdauer und einer Tieftemperaturbeständigkeit, welche bisher noch von keinem anderen offenen Batteriesystem erreicht wurde.

Typischerweise wird den NiCd- Akkus der sogenannte Memory-Effekt zugeschrieben, welcher auch tatsächlich in vielen Anwendungen in Erscheinung tritt. Moderne NiCd- Akkus haben diesen Nachteil nicht mehr.

9.2.1 Chemie



9.2.2 Technische Daten

Zellenspannung :	1.25		Volt
Leistungsdichte :	10	- 1'100	W/kg
Energiedichte :	8	- 80	Wh/kg
Temperaturbereich :	-45	- + 75	°C

9.2.3 Bauformen

Offener NiCd- Akkumulator mit flüssigem Elektrolyt



Bild 12: NiCd System der Firma Saft

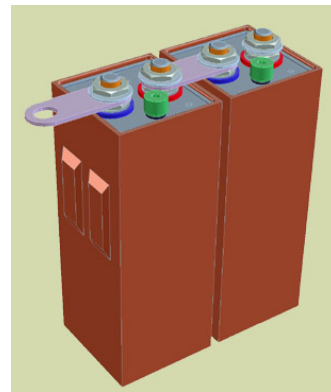


Bild 13 NiCd System der Firma Leclanché

Akkumulatoren in geschlossener Bauform



Bild 14: NiCd Rundzellen zu einem Block geformt



Bild 15: NiCd Einzelzelle der Bauform AAA

9.2.4 Entladecharakteristik

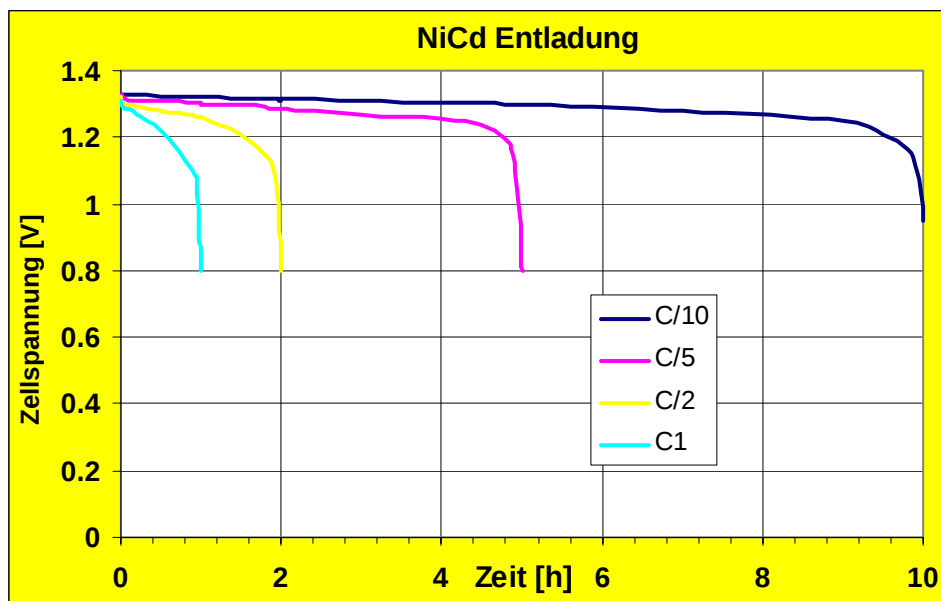


Diagram 5: Entladecharakteristik eines Nickel-Cadmium Akkumulators

9.2.5 Ladetechnik



Bild 16: Ladegerät für NiCd Batteriepakete

Üblicherweise wird über eine gewisse Zeit mit konstantem Strom geladen (It- Verfahren). Als Abbruchkriterium wird meist das Absinken der Klemmenspannung (ΔU) verwendet, verbunden mit einer vorgegebenen Maximalladezeit. Viele NiCd Ladegeräte enthalten auch noch eine Einrichtung zur vollständigen Entladung der Zellen vor dem Laden. Dies wirkt dem gefürchteten Memory-Effekt entgegen. Bei Reflex-Ladegeräten wird nicht mit einem reinen Gleichstrom geladen, wodurch ein Rückstrom aus dem Akku während dem Laden stattfindet. Solche ausgefeilten Ladetechniken können die Lebensdauer des Akkumulators erheblich verlängern.

9.2.6 Lebensdauer

Mit der richtigen Ladetechnik und unter Einhaltung idealer Betriebsparameter kann mit NiCd- Akkus eine Lebensdauer von bis zu 3000 Zyklen innerhalb von 10 Jahren erreicht werden.

Ältere NiCd- Akkus haben oft einen stark ausgeprägten Memory-Effekt, das heisst, dass nur noch soviel Kapazität benutzt werden kann, wie bei der letzten Entladung entnommen wurde. Vor allem bei billigen Massenartikeln, wo bei der Ladetechnik gespart wird, bewirkt dieser Effekt fast immer das Ende der Gebrauchsdauer.

Moderne NiCd- Akkus haben diesen Effekt nicht mehr, zudem verlängert sich die Lebensdauer bei Anwendung guter Ladetechnik, welche bei Elektrofahrzeugen sowieso immer eingesetzt werden sollte.

9.2.7 Kosten

NiCd- Akkus sind in der Anschaffung teurer als Bleiakkus, aber billiger als NiMh. Sie kosten etwa 450 - 1100 \$/kWh.

9.2.8 Für Elektrofahrzeuge wichtige Eigenschaften von Nickel-Cadmium Batterien

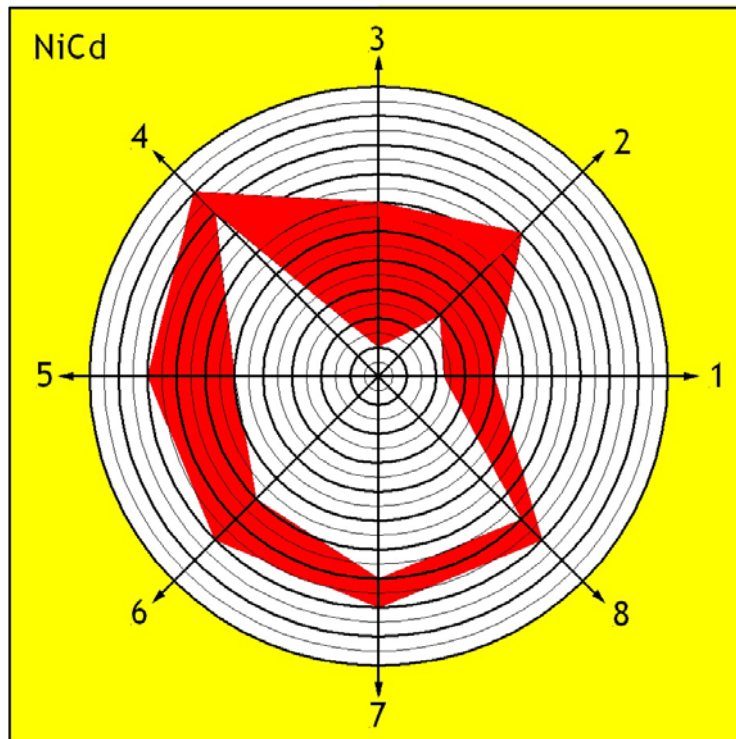


Diagram 6: Eigenschaften von Nickel-Cadmium Batterien

	NiCd- Akku		Min.	Max.
1	Leistungsgewicht	[Wh/kg]	45	80
2	Betriebstemperatur	[° C]	-40	60
3	Laststrom	[C]	1	20
4	Schnellladezeit	[h]	>1h	
5	Zyklenfestigkeit	[Anzahl]	1000	3000
6	Selbstentladung	[%/Monat]		<20
7	Preis / Kosten	[CHF/kWh]	>600	
8	bewertete Sicherheit	[%]		80

Tabelle 4: Eigenschaften von Nickel-Cadmium Batterien



9.3 Nickel-Metallhydrid Akkumulator

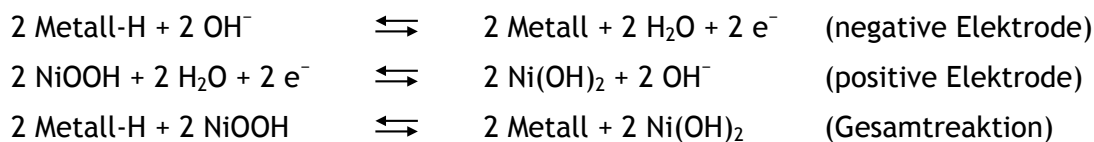
Eine Weiterentwicklung der früher weit verbreiteten Ni-Cd Akkus sind die Nickel-Metallhydrid Akkus. Anfänglich kämpfte man mit zu kleinen Entladeströmen und einer zu grossen Selbstentladungsrate. Inzwischen scheinen diese Nachteile weitgehend behoben zu sein, dieser Batterietyp wird zurzeit in den Toyota-Hybridfahrzeugen in grossen Stückzahlen verwendet.

Neben dem Vorteil, dass sie das giftige Cadmium nicht mehr enthalten, bieten sie bei gleicher Bauform bis zu 60% höhere Kapazitäten. Ihr grösster Nachteil ist jedoch nach wie vor die relativ grosse Selbstentladung. Zellen, welche in dieser Hinsicht verbessert wurden (z.B. der Typ eneloop von Panasonic) sind aber leider nicht für Hochstrom-Anwendungen optimiert.

Auch die normalen Zellen konnten in der Hochstrom- Festigkeit nie ganz das hohe Niveau der NiCd- Zellen erreichen. Die bei den Toyota Hybriden verwendeten Nickel-Metallhydrid-Akkus werden nur im Bereich von 40 - 80 % der Nennkapazität beansprucht, wodurch die Selbstentladung markant kleiner ist und auch die Lebensdauer stark erhöht wird.

Im Recycling sind sie recht unkritisch, weil sie keine hochgiftigen Teile enthalten.

9.3.1 Chemie



9.3.2 Technische Daten

Zellenspannung :	1.2		Volt
Leistungsdichte :	11	-	1'000 W/kg
Energiedichte :	15	-	100 Wh/kg
Temperaturbereich :	0	-	+ 45 °C

9.3.3 Bauformen



Bild 17: NiMh Rundzellen mit $Q < 10 \text{ Ah}$



Bild 18: System Serieschaltung von NiMh Flachzellen mit $Q > 10 \text{ Ah}$

9.3.4 Entladecharakteristik

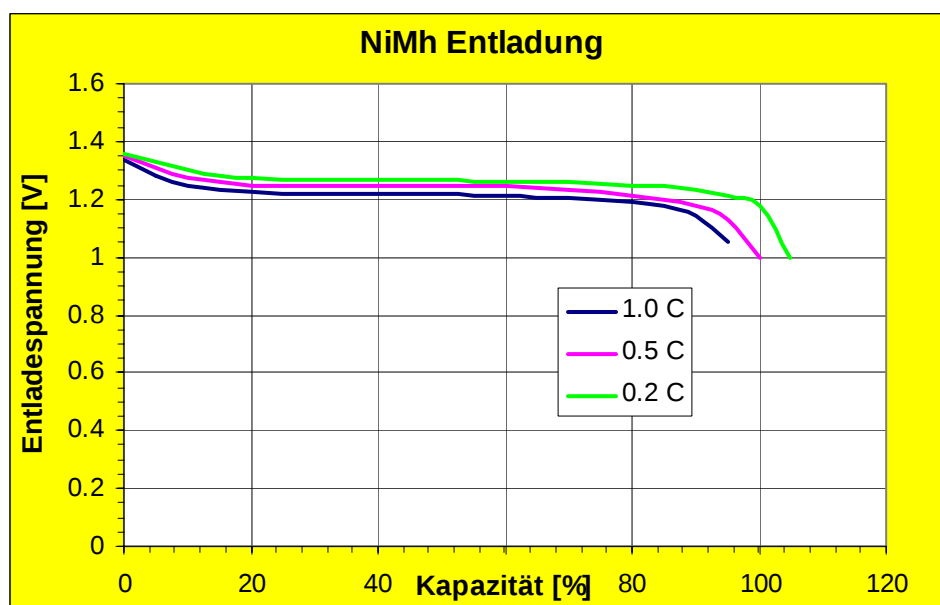


Diagram 7: Entladecharakteristik eines Nickel-Metallhydrid Akkumulators

9.3.5 Ladetechnik



Bild 19: Strangladegerät für NiMh Akkumulatoren für den Einbau in Fahrzeuge

Das Laden der Ni-MH Akkus geschieht gleich wie das der NiCd- Akkus, nur dass die Zellen heikler auf Überladung und Übertemperatur reagieren. Das erfordert den Einsatz eines intelligenten Batterie-Management Systems, welches die Zellen im erlaubten Bereich hält.

9.3.6 Lebensdauer

Mit der richtigen Ladetechnik und unter Einhaltung der max. zulässigen Entladeströme kann mit einem NiMh- Akkusatz eine Lebensdauer bis zu 1000 Zyklen erreicht werden, die Lebensdauer erhöht sich, wenn die Akkus nur zwischen 40 und 80% ihrer Kapazität genutzt werden, wie das zum Beispiel in Hybridfahrzeugen der Fall ist.

Die Alterung der NiMh Akkus zeigen sich einerseits in einer Ermüdung, welche eine kleinere Zellenspannung bewirkt und andererseits schwindet die Kapazität gegen Ende der Lebensdauer stark.

9.3.7 Kosten

NiMh- Akkus sind in der Anschaffung teuer, sie kosten etwa 550 -1'250 \$/kWh.

Zudem ist es schwierig, grosse Zellen zu beschaffen, weil Patentstreitigkeiten einen echten Wettbewerb zwischen den Herstellern verunmöglicht.

9.3.8 Für Elektrofahrzeuge wichtige Eigenschaften von Nickel-Metallhydrid Batterien

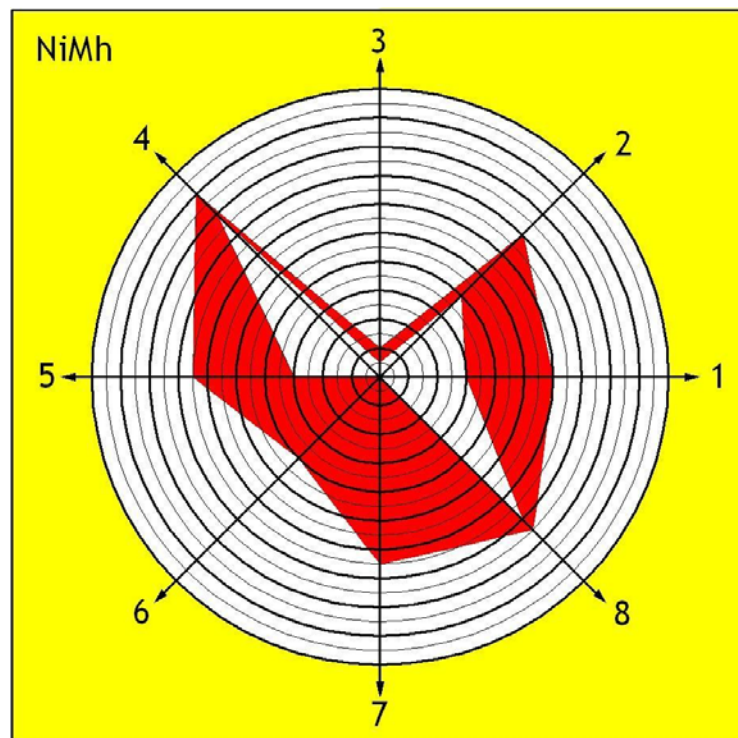


Diagram 8: Eigenschaften von Nickel-Metallhydrid Batterien

	NiMh- Akku		Min.	Max.
1	Leistungsgewicht	[Wh/kg]	60	120
2	Betriebstemperatur	[°C]	-20	60
3	Laststrom	[C]	0.5	5
4	Schnellladezeit	[h]	2	4
5	Zyklenfestigkeit	[Anzahl]	600	1500
6	Selbstentladung	[%/Monat]		<30
7	Preis / Kosten	[CHF/kWh]	>700	
8	bewertete Sicherheit	[%]		70

Tabelle 5: Eigenschaften von Nickel-Metallhydrid Batterien



9.4 Lithium-Ionen Akkumulator

Die höchste Speicherdichte von allen heute verfügbaren Niedertemperatur-Akkus hat bis jetzt der Lithium-Ionen Akkumulator. Die anfänglichen Sicherheitsprobleme konnten durch den Einsatz neuer Metalle (z.B. Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO₄) Zellen) gelöst werden, auch die Hochstromfestigkeit und die Lebensdauer ist bei diesen Zellen enorm gesteigert worden. Es kann gut sein, dass die Zukunft der Elektromobil-Energiespeicher in dieser Technik liegt. Heute sind sowohl die Batterie, wie auch das dazu notwendige Batterie-Management-System noch teuer und schwierig zu beschaffen. Neben dem eigentlichen Ladegerät sind auch ein Batterie-Management System und eine Balanciereinrichtung notwendig.

Lithium-Ionen Akkus mit flüssigem Elektrolyt können als runde oder als prismatische Zellen gebaut werden. Wird der Elektrolyt in Gel- Form verwendet, wird der Bau von flachen Polymer Akku möglich, unabhängig von der eingesetzten Chemie. Diese Polymer Akkus können auf Grund ihrer grösseren Oberfläche besser gekühlt werden.

Im Recycling sind die Zellen nicht ganz unproblematisch, weil sich zusammen mit den in den Batterien eingesetzten Salzen und kleinsten Anteilen von Wasser die gefürchtete Flusssäure bilden kann. Die gleiche Gefahr besteht auch bei Unfällen, falls das Gehäuse des Akkus Beschädigungen erleidet.

9.4.1 Chemie :



9.4.2 Technische Daten

Zellenspannung :	3.7		Volt
Leistungsdichte :	200	- 1'000	W/kg
Energiedichte :	20	- 200	Wh/kg
Temperaturbereich :	0	- + 45	°C (Laden)
	-20	- + 60	°C (Entladen)

9.4.3 Bauformen



Bild 20: Li-Ionen Zellen, Quelle: [6]



Bild 21: Li-Ionen Akkumulatoren, wie sie in Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingesetzt werden, Quelle: [7]



Bild 22: Rundzellen in Lithium-Mangan Technologie

9.4.4 Entladecharakteristik

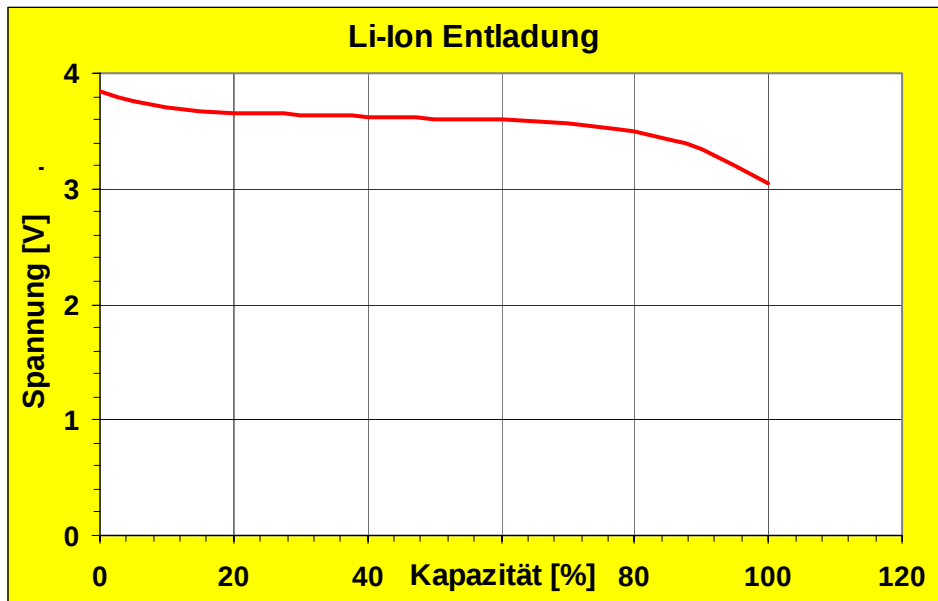


Diagram 9: Entladecharakteristik eines Lithium Ionen Akkumulators

Li-Ionen Akkus mit konventioneller Technologie haben zwar eine hohe Speicherdichte, können aber dauerhaft nur mit ca. 2C entladen werden. Das bedeutet, dass aus einer 10 Ah- Zelle nur ein maximaler Strom von 20 A entnommen werden kann. Zudem muss auf eine ausreichende Kühlung geachtet werden: allen Explosionen von Li-Ionen Akkus war immer eine Überhitzung vorausgegangen.

Neue Entwicklungen wie die Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO_4) Batterie sind sehr viel unempfindlicher gegen Überhitzung, haben aber eine geringere Speicherdichte.

Grosse Hoffnung kann man in die Nanotechnologie setzen, weil dadurch spezifisch die Eigenschaften der Lithium Batterien verbessert werden können. In welchem Mass diese Batterien aber auch in Serie gefertigt werden können und dadurch in bezahlbare Preisregionen kommen, ist eine ganz andere Frage.

9.4.5 Ladetechnik



Bild 23: Batterie-Management System (BMS)



Bild 24: Li-Ionen Balancer

Üblicherweise wird mit einem IU Verfahren geladen. Das Abbruchkriterium ist das Erreichen der End- Ladespannung, welche noch in kleinem Mass temperaturabhängig ist.

Das Batteriemanagement-System erfasst Strom, Temperatur und die Teilspannungen innerhalb der Serieschaltung. Sobald beim Entladen eine minimale Zellenspannung erreicht wird, muss die Stromentnahme beendet werden. Während dem Laden wird der Ladestrom bei Erreichen einer höchst zulässigen Zellenspannung der Ladestrom so reduziert, dass das Balancier-System das Überladen der vollen Zelle verhindern kann. Dadurch verlängert sich natürlich die Gesamtladezeit, je grösser die Kapazitätsunterschiede innerhalb der Serieschaltung sind, desto länger dauert eine vollständige Ladung des Batteriesatzes.

9.4.6 Lebensdauer

Mit der richtigen Ladetechnik und unter Einhaltung der max. Entladeströme kann mit einem Li-Ionen Akku eine Lebensdauer ca. 800 Zyklen erreicht werden. Die Li-Ionen Akkus altern, unabhängig davon, ob sie gebraucht werden oder auch nicht.

9.4.7 Kosten

Li-Ionen Akkus sind teuer in der Anschaffung, sie kosten etwa 700 - 1'350 \$/kWh

9.4.8 Für Elektrofahrzeuge wichtige Eigenschaften von Lithium Batterien

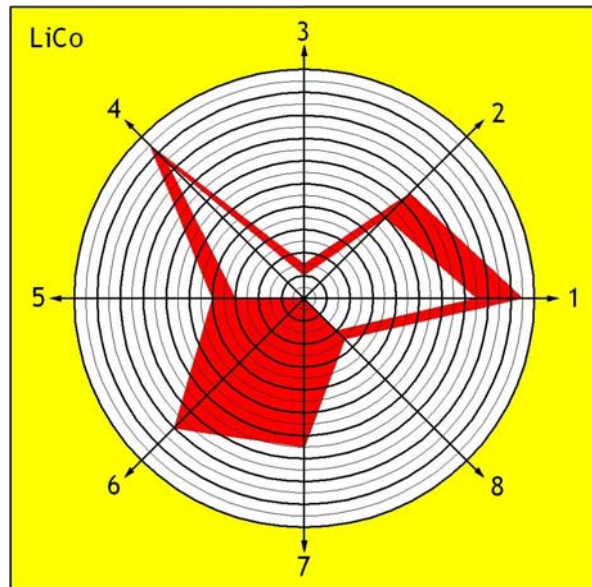


Diagram 10: Eigenschaften von Lithium-Kobalt Batterien

	LiCo- Akku		Min.	Max.
1	Leistungsgewicht	[Wh/kg]	150	190
2	Betriebstemperatur	[°C]	0	50
3	Laststrom	[C]	1	3
4	Schnellladezeit	[h]	1.5	3
5	Zyklusfestigkeit	[Anzahl]	600	800
6	Selbstentladung	[%/Monat]		<10
7	Preis / Kosten	[CHF/kWh]	>800	
8	bewertete Sicherheit	[%]		30

Tabelle 6: Eigenschaften von Lithium-Kobalt Batterien

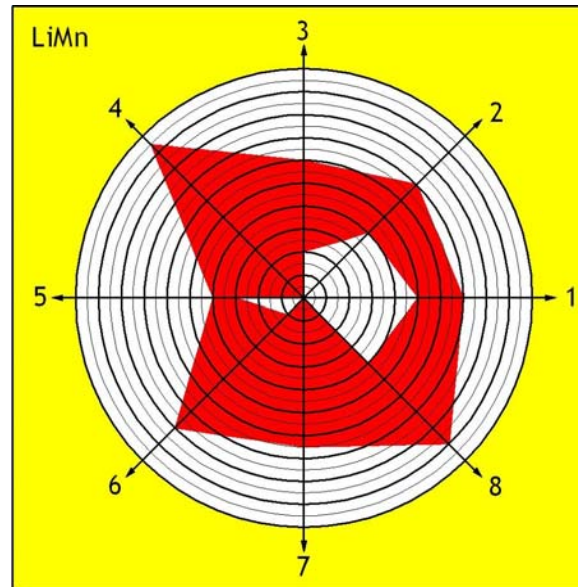


Diagram 11: Eigenschaften von Lithium-Mangan Batterien

	LiMn- Akku		Min.	Max.
1	Leistungsgewicht	[Wh/kg]	100	140
2	Betriebstemperatur	[°C]	-20	60
3	Laststrom	[C]	10	30
4	Schnellladezeit	[h]	>1	
5	Zyklusfestigkeit	[Anzahl]	600	800
6	Selbstentladung	[%/Monat]		<10
7	Preis / Kosten	[CHF/kWh]	>800	
8	bewertete Sicherheit	[%]		50

Tabelle 7: Eigenschaften von Lithium-Mangan Batterien

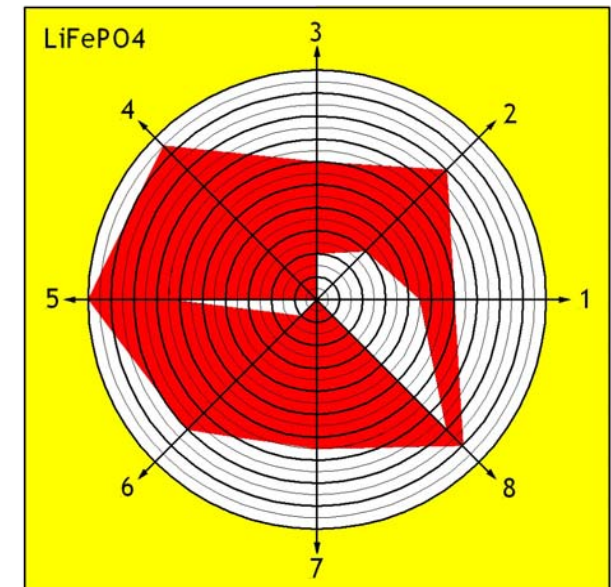


Diagram 12: Eigenschaften von Lithium-Eisen-Phosphat Batterien

	LiFePO4-Akku		Min.	Max.
1	Leistungsgewicht	[Wh/kg]	90	120
2	Betriebstemperatur	[°C]	-40	80
3	Laststrom	[C]	10	30
4	Schnellladezeit	[h]	>1	
5	Zyklusfestigkeit	[Anzahl]	1500	3000
6	Selbstentladung	[%/Monat]		<10
7	Preis / Kosten	[CHF/kWh]	>700	
8	bewertete Sicherheit	[%]		90

Tabelle 8: Eigenschaften von Lithium-Eisen-Phosphat Batterien



9.5 Natrium-Nickelchlorid Akkumulator

Stellvertretend für alle existierenden Hochtemperatur- Akkus soll der Typ beschrieben werden, welcher am häufigsten in Fahrzeuge eingebaut wird. Das ist der Natrium-Nickelchlorid Akkumulator der Firma MES- DEA, welche unter dem Markennamen Zebra® verkauft werden.

Der Natrium-Nickelchlorid Akku hat nahezu ideale Eigenschaften für den Betrieb in Elektrofahrzeugen: Eine hohe Speicherdichte, für BEV gute Hochstrom-Eigenschaften, einen guten Energiewirkungsgrad und er ist durch die vollständige Kapselung des Systems sehr sicher und weitgehend unabhängig von der Umgebung.

Ein Nachteil ist, dass ein solches System nur als grosser Block einsetzbar ist und im aktiven Zustand dauernd geheizt werden muss, damit die im Innern der Batterie erforderlichen ca. 300°C aufrecht erhalten werden kann. Weil dieser Akkumulator systembedingt immer als Gesamtsystem verkauft wird, eignet es sich aber eher für grössere Fahrzeuge.

In der Vergangenheit haben immer wieder Fertigungsschwierigkeiten die Zuverlässigkeit der Systeme beeinträchtigt. Man muss sich aber immer vor Augen halten, dass jedes Hochtemperatursystem relativ heikel im Betrieb ist.

Bei Systemen, welche regelmässig viel Energie brauchen (wie z.B. Elektrotaxis oder Lieferfahrzeuge und Busse) fällt die Heizenergie nicht so stark ins Gewicht:

Wenn pro Jahr 260 Zyklen mit einer Entladung von 80 % gefahren werden, beträgt die zusätzliche Heizenergie nur noch 10,2 % des Gesamtenergieverbrauchs.

Berechnung zur Heizenergie:

Nutzenergie ist gleich 260 Zyklen zu 32 kWh * 0.8 = 6'656 kWh (entspricht 26'600 km/Jahr)

Heizenergie ist gleich 24h * 365Tage * 0.105 kW = 920 kWh

Minus 260 * (2h Fahrt + 4h Laden) * 0.105 kW = 163.8 kWh

Total Heizen = 756.2 kWh

Heizenergie in % = $756.2 / (756.2 + 6656) * 100\%$ = 10.2 %

Die Entsorgung ist bei diesem System unproblematisch und wird vom Herstellerwerk übernommen.

9.5.1 Chemie



9.5.2 Technische Daten

Zellenspannung :	2.6		Volt
Leistungsdichte :	160	- 180	W/kg
Energiedichte :	100	- 120	Wh/kg
Temperaturbereich :	270	- + 350	°C (Laden)

9.5.3 Bauform



Bild 25: Zebra® Batterie, Quelle: [8]

9.5.4 Entladecharakteristik

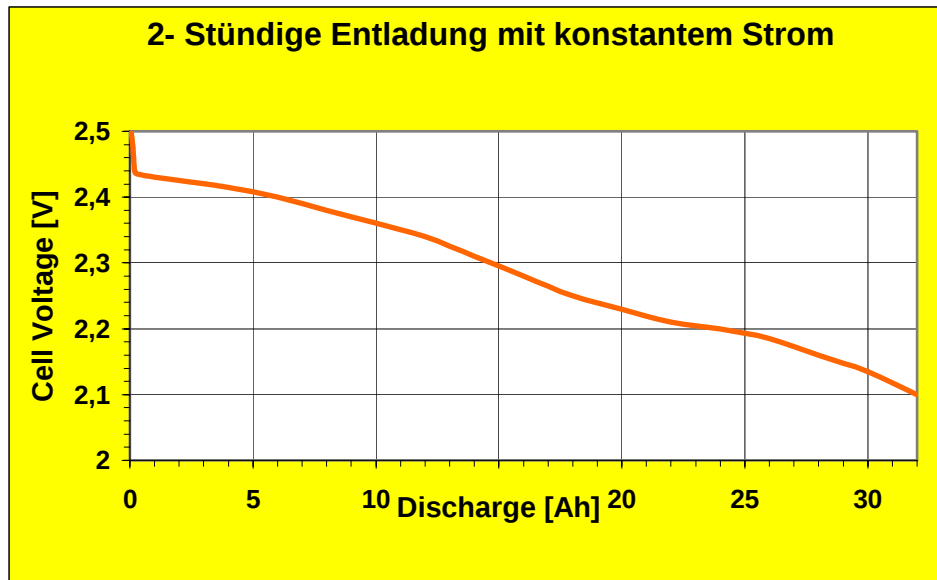


Diagram 13: Entladecharakteristik eines Zebra® Akkumulators
(Nach MES-DEA)

Zebra®-Akkumulatoren sind so ausgelegt, dass in einer zweistündigen Entladung 80% der Nennkapazität entnommen werden kann. Eine stärkere Entladung als 80% kann zu einem Ausfall des Akkus führen. Dabei zeigen die Zebra®-Akkus über die gesamte Lebensdauer einen erstaunlich kleinen Innenwiderstand.

Die Zellen müssen für die Ladung und die Entladung dauernd auf der Betriebstemperatur von 270 - 350 °C gehalten werden.

9.5.5 Ladetechnik

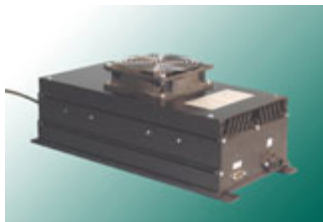


Bild 26: Hochleistungs-ladegerät der Firma MES-DEA

Interessant beim Laden ist, dass der Zebra®-Akkumulator einen Ah-Wirkungsgrad von 100 % besitzt. Die Spannung beim Laden ist jedoch höher als beim Entladen, aber der Gesamtwirkungsgrad des Akkumulators ist trotzdem erstaunlich hoch.

Im Prinzip ist der Zebra®-Akkumulator mit einer Stunde Ladezeit schnell ladefähig. Meist begrenzt daher die Leistung des Ladegeräts die Zeit, die für die Vollladung gebraucht wird.

Während dem Laden (wie auch beim Entladen) reichen die Verluste im Innen-Widerstand des Akkus aus, um die Betriebstemperatur aufrecht zu erhalten, in gewissen Betriebszuständen muss das Paket sogar gekühlt werden.

Sollte durch ein Betriebsunterbruch das Paket einmal erkalten, ist es möglich, das System innerhalb von 24 Stunden am Netz wieder aufzuheizen.

9.5.6 Lebensdauer

Die Zebra[®]-Akkus können unter Einhaltung idealer Betriebsbedingungen ein Alter >10 Jahre erreichen und dabei mit bis zu 3'000 Zyklen betrieben werden. Damit haben sie die höchste Lebensdauer aller zurzeit verfügbaren Batteriesysteme.

Die Alterung des Akkus geschieht vor allem durch Ausfall einzelner Zellen. In der Serieschaltung ist der Ausfall einer einzelnen Zelle nicht so tragisch, weil die Zelle niederohmig ausfällt. Zudem besteht die Möglichkeit, defekte Zellen im Werk auszutauschen.

Erst der Ausfall einer ganzen Reihe von Einzelzellen kann durch Überladung der restlichen Zellen eine Überhitzung verursachen, was im schlimmsten Fall zu einem Brand führen kann.

9.5.7 Kosten

Im Betrieb fallen die Kosten für die Heizung ins Gewicht. Beispielsweise 105 W über 24 h ergibt einen Heizenergiebedarf von 2,52 kWh / Tag (= 920 kWh im Jahr). Deshalb sind die Zebra[®]-Akkus vor allem wirtschaftlich, wenn jeden Tag viel Energie entnommen und wieder nachgeladen wird.

In der Anschaffung sind Zebra[®]-Akkus gemessen an ihrer Leistungsfähigkeit relativ günstig, sie kosten zurzeit etwa 600 Fr/kWh.

Das Problem ist eher die Beschaffung der Akkupakete, weil die Nachfrage grösser ist als die Produktion der Zellen. Zudem öffnen sich für diese Technologie dauernd neue Märkte: Von stationären Stromversorgungen bis zum Einsatz in U-Booten, wo die Zebra[®]-Akkus bestehende Bleiakkus ersetzen.

9.5.8 Für Elektrofahrzeuge wichtige Eigenschaften von Natrium-Nickelchlorid Batterien

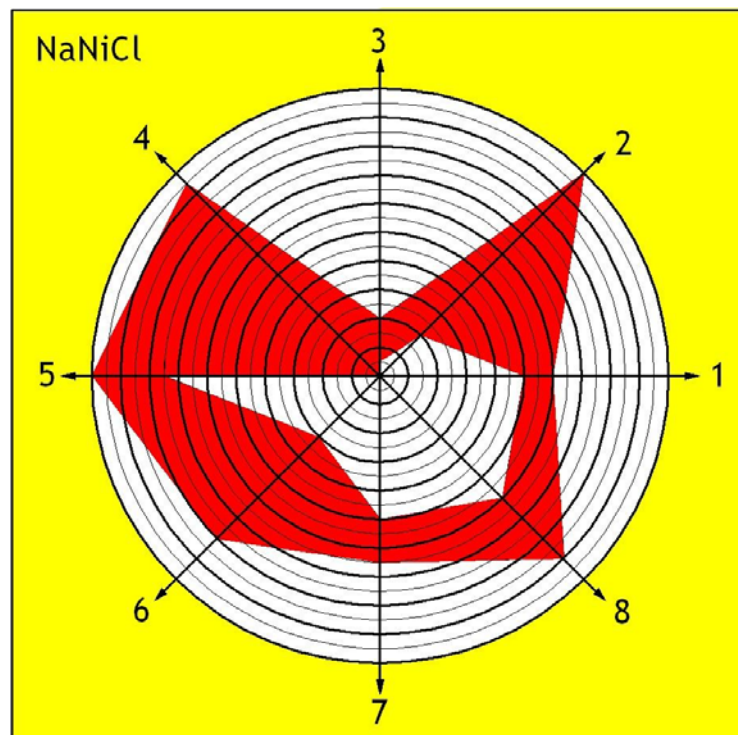


Diagram 14: Eigenschaften von Natrium-Nickelchlorid Batterien

	NaNiCl- Akku		Min.	Max.
1	Leistungsgewicht	[Wh/kg]	100	120
2	Betriebstemperatur	[° C]	-60	120
3	Laststrom	[C]	0.5	5
4	Schnellladezeit	[h]	>1	
5	Zyklenfestigkeit	[Anzahl]	2000	3000
6	Selbstentladung *)	[%/Monat]	10	25
7	Preis / Kosten *)	[CHF/kWh]	800	1000
8	bewertete Sicherheit	[%]	60	90
	*) unter Berücksichtigung der Heizung			

Tabelle 9: Eigenschaften von Natrium-Nickelchlorid Batterien

9.6 Vergleich der verschiedenen Akkuarten

		Pb Akku	NiCd Akku	NiMh Akku	LiCo Akku	LiMn Akku	LiFePO4 Akku	NaNiCl Akku
Energiedichte	[Wh/kg]	30 - 50	45 - 80	60 - 120	150-190	100-135	90 - 120	100-120
Innenwiderstand pro Zelle	[mOhm]	< 16	20 - 40	40 - 60	100-130	25 - 75	25 - 50	-
Zellspannung	[V]	2	1.25	1.25	3.7	3.6	3.3	2.6
Laststrom Spitze	[A]	5 C	20 C	5 C	3 C	30 C	30 C	5 C
Laststrom dauernd	[A]	0.2 C	1 C	0.5 C	1 C	10 C	10 C	0.5 C
Ladezeit Schnell- Ladung	[h]	8 bis 16	1	2 bis 4	1.5 bis 3	1	1	1
Selbstentladungsrate im Monat	[%]	5	20	30	< 10	< 10	< 10	< 25
Überladetoleranz		gut	mittel	klein	nein	nein	nein	nein
Minimale Betriebstemperatur	[Grad C]	-20	-40	-20	0	-20	-40	-60
Maximale Betriebstemperatur	[Grad C]	60	60	60	50	60	75	120

Tabelle 10: Vergleich verschiedener Akkumulatoren

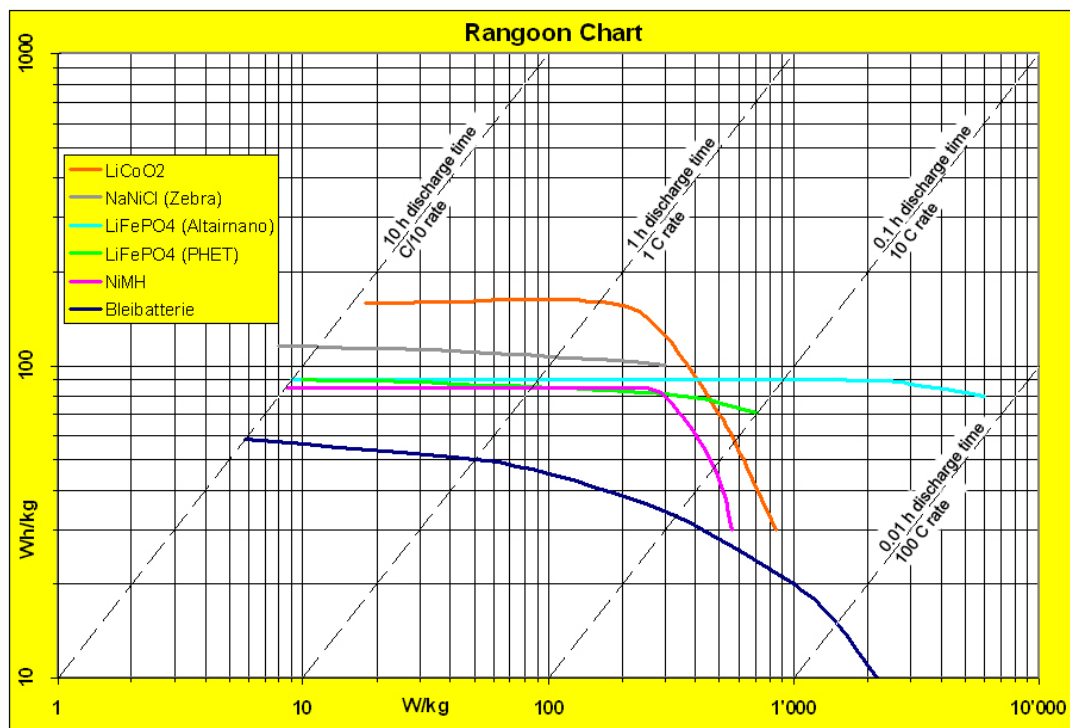


Diagramm 15: Vergleich von Leistungsgewicht und Leistungsdichte einiger Batterien
Quelle: [9]

9.7 Typische Batterie Spezifikationen

Die besten Eigenschaften, wie zum Beispiel die beste Leistungsdichte und die beste Energiedichte, sind nicht alle in derselben Lithium Technologie vereinigt. Es wird jedoch intensiv daran gearbeitet um die besten Eigenschaften zu vereinigen und alle Technologien zu verbessern.

Im Folgenden werden Beispiele von typischen Spezifikationen für Batterien angegeben, wie sie für Elektrofahrzeuge gebraucht werden.

9.7.1 Spezifikation einer erhältlichen Lithium-Polymer Batterie

Kokam, High Energy Cells, SLPB 460330 series, 100 Ah cell

Typical Capacity	100	Ah
Nominal Voltage	3.7	V
Charge Condition	Max.Current	100 A
	Voltage	4.20 ± 0.03 V
Discharge Condition	Continuous Current	100 A
	Peak Current	300 A
	Cut-off Voltage	2.7 V
Cycle Life(at 80% DOD, Voltage range: 4.15V ~ 3.40V)	> 800	Cycles
Operating Temp.	Charge	0 ~ 40 °C
	Discharge	-20 ~ 60 °C
Dimension	Thickness (mm)	7.2 mm
	Width (mm)	455 mm
	Length (mm)	325 mm
Weight	2.32 ± 0.07	kg
Power Density	480	W/kg
	1'850	W/ℓ
Energy Density	176	Wh/kg
	377	Wh/kg

Diese Batterien sind erhältlich, wenn auch noch zu hohen Kosten. Andere Ah- Kapazitäten sind ebenfalls erhältlich. Quelle: [6]

9.7.2 Spezifikation einer Lithium Batterie in Entwicklung

Altairnano's NanoSafe™

Feature	Description
Cell sizes	various
Performance	energy or power types
EV applications	EV / PHEV / HEV
Power density	4'000 W/kg 700 W/l
EV applications	EV / PHEV / HEV
Energy density	80 - 90 Wh/kg
Life span	Over 20+ year life
Charge rate	Very fast; Rechargeable in < 10 minutes
Extremely wide operating range:	
Temperature range	From -50°C to +75°C
Charge temperature range	-50 °C to +75 °C
Discharge temperature range	-60 °C to +75 °C
Discharge C rate	Up to 100+
Charge C rate	Up to 50+ (20C charge rate @ -30°C)
Cycle life	Over 15,000 full depth of charge and discharge cycles
Annual maintenance	None
Memory-Effect	none
Calendar life	20+ years
Safety	With no graphite anode, and thus no SEI layer, this battery is safe to over 200°C No explosion No thermal runaway
Environmental	Green – no toxics or heavy metals
Self discharge	low
Quelle: [10]	

Von dieser Batterie muss noch bestätigt werden, dass die publizierten Werte in realen Batterien erreicht werden.

10. Ladetechnik und Ladeverfahren

Jede Batterieart braucht zum Erreichen der angegebenen Anzahl Ladezyklen und der Lebensdauer ihre eigene, auf die Batterie abgestimmte Ladetechnik.

Eine bei vielen Batteriearten gute Ladetechnik ist das CCCV-Prinzip (oder IU- Verfahren). Bei diesem Ladeverfahren wird am Anfang mit einem konstanten Strom geladen, die dabei entstehende Zellenspannung wird von der Ladeelektronik gemessen.

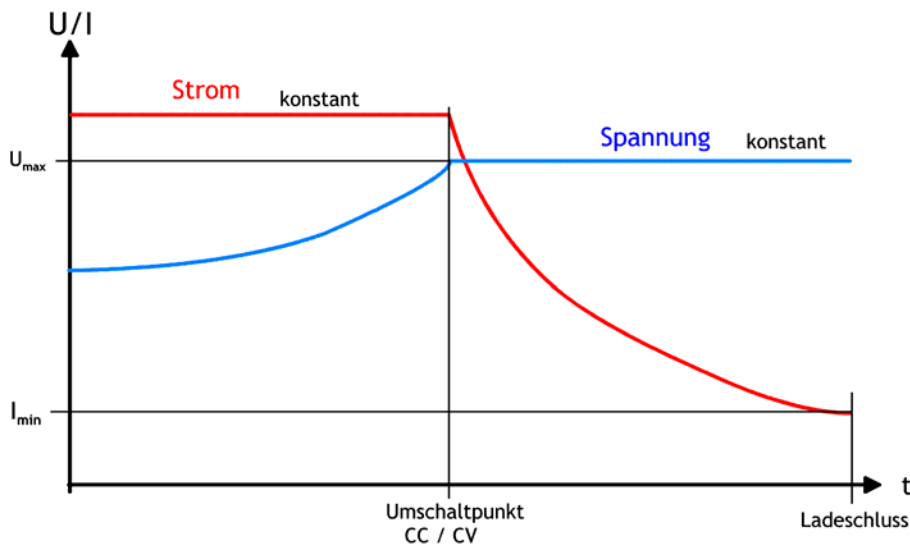


Diagramm 16: IU- Batterie Ladeverfahren

Wenn während dieser Konstantstromladung eine vorgegebene Zellenspannung erreicht wird, schaltet das Ladegerät um und hält die Zellenspannung konstant, dann wird der Ladestrom immer kleiner. Unterschreitet der Strom dabei ein vorgeschriebenes Minimum, ist die Zelle voll und die Ladung wird damit beendet.

Sowohl Bleiakkus wie auch NiMh und Li-Ionen Akkus werden mit diesem Verfahren geladen. Obwohl dasselbe Verfahren verwendet wird, sind die Ladetechniken komplett verschieden: Li-Ionen Akkus reagieren sehr empfindlich auf Unter- bzw. Überladung und alle Zellen müssen daher aktiv auf den exakt gleichen Ladezustand gebracht werden. Das geschieht mit relativ aufwendigen Balanciersystemen, welche in der Serieschaltung die Spannung jeder einzelnen Zelle überwachen und für einen Ladungsausgleich im Strang sorgen. Zusätzlich wird auch der konstante Anfangsstrom reduziert und nur langsam hochgefahren, um die Zellen ja nicht zu beschädigen.

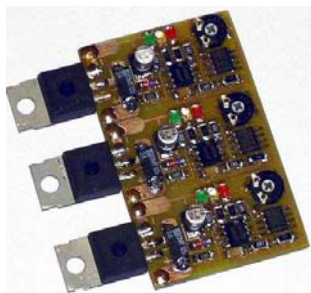


Bild 27: Lithium-Ionen balancer

11. Aktivitäten und Marktsituation

Die Entwicklung der wichtigsten Eigenschaften der Batterien für den Antrieb von Fahrzeugen stagnierte lange Zeit. In den letzten Jahren hat sich diesbezüglich jedoch vieles getan und die Entwicklung geht in rasantem Tempo vorwärts. Es gab zwar immer wieder Meldungen von sagenhaft guten Entwicklungen für Batterien, die dann in 5 Jahren auf den Markt kommen würden. Allzu oft hat man dann aber später aus verschiedenen Gründen nicht mehr viel davon gehört. Nun hat sich aber wirklich sehr viel getan und Meldungen von grossen Erfolgen in diesem Bereich sind häufig.

Die Fortschritte in der Entwicklung der Batterien wurden wesentlich durch die Bedürfnisse der HEV bestimmt. HEV benötigen eine sehr hohe Leistungsdichte und eine hohe Zyklenzahl. In dieser Richtung wurde auch mit grossem Erfolg weiterentwickelt. Bis jetzt werden in den käuflichen HEV NiMh Batterien eingesetzt.

A Modernes, effizientes,einfaches Auto			
Anzahl Plätze	4 - 5		
Maximale Geschwindigkeit	120	km/h	
Energieverbrauch ab Steckdose	100	Wh/km	
Leergewicht	900	kg	
davon Batteriegewicht	250	kg	
B Grösseres Auto, konventioneller Art, mit allem Komfort (z.B.: SUV)			
Anzahl Plätze	5 - 6		
Maximale Geschwindigkeit	> 120	km/h	
Energieverbrauch ab Batterie	300 - 400	Wh/km	
Leergewicht	3'000	kg	
davon Batteriegewicht	500	kg	
C Kleines leichtes Fahrzeug für den Nahverkehr			
Anzahl Plätze	2		
Maximale Geschwindigkeit	40 - 85	km/h	
Energieverbrauch ab Steckdose	35 - 70	Wh/km	
Leergewicht	100 - 270	kg	
davon Batteriegewicht	17 - 87	kg	
D Fahrrad, Skooter			
Anzahl Plätze	1		
Maximale Geschwindigkeit	20 - 40	km/h	
Energieverbrauch ab Batterie	12 - 25	Wh/km	
Leergewicht	15 - 24	kg	
davon Batteriegewicht	2 - 10	kg	

Tabelle 11: Ausgewählte Elektrofahrzeug- Typen

In den vergangen 10 - 15 Jahren wurden bei den Eigenschaften der Batterien, die auf Lithium Technologie basieren, die grössten Fortschritte erzielt. Die theoretischen Werte für Leistungsdichte und Zyklenzahl der Lithium Batterien sind mittlerweile so gut, dass sie den Anforderungen für reine Elektrofahrzeuge weitgehend entsprechen.

11.1 Bisherige Entwicklungserfolge

11.1.1 Erhöhte Energiedichte

Inzwischen ist die Energiedichte so weit entwickelt, dass Fahrzeuge vom Typ A (Tabelle 11) mit einem LiCoO₂- Batteriesystem eine Reichweite von bis zu 500 km pro Ladung erreichen können. Solche Fahrzeuge sind mit 4 Plätzen ausgerüstet, können innerorts und ausserorts mit dem Verkehr gut mithalten und erreichen eine Spitzengeschwindigkeit von 120 km/h. Die Reichweite pro Batterieladung ist sehr stark vom Gewicht des Fahrzeuges abhängig.

Batterie:	Blei	NiMH	LiCoO ₂	LiFePO ₄	NaNiCl
Typ A	166	266	500	281	356
Typ B	73 - 108	133 - 177	250 - 333	141 - 188	172 - 233
Typ C	31 - 81	52 - 132	97 - 249	55 - 140	68 - 174
Typ D	10 - 25	18 - 43	33 - 80	19 - 45	

Tabelle 12: Reichweiten [km/Ladung] der Elektrofahrzeuge von Tabelle 11 mit verschiedenen Batterietypen

Während die LiCoO₂ Technologie eine Energiedichte von etwa 120 - 180 Wh/kg hat, sind bei diesen System die Anforderungen für ein BMS wesentlich höher als bei der LiFePO₄ Technologie.

Die LiFePO₄ Technologie hat jedoch eine Energiedichte von nur etwa 80 - 100 Wh/kg. Demgegenüber gibt es damit weniger thermische Probleme. Dadurch wird das Batteriesystem sicherer und es kann ein einfacheres BMS verwendet werden. Allerdings können damit noch nicht Fahrleistungen erreicht werden die allen Ansprüchen genügen.

11.1.2 Längere Lebensdauer

Die Zyklenzahl ist bei einigen Batterien so gut, dass die Lebensdauer der Batterien diejenige des Fahrzeuges erreicht. Über die kalendarische Lebensdauer ist es noch schwierig genaue Aussagen zu machen. A123 Systems beansprucht eine kalendarische Lebensdauer von voraussichtlich mehr als 10 Jahren und eine 80 % Kapazität nach 7000 Zyklen mit 100% Entladetiefe. Andere Hersteller geben noch höhere Zyklenzahlen an. Die nutzbare Energie und dadurch die Reichweite nehmen gegen Ende der Lebensdauer ab. Um diesen Effekt auszuschliessen fordert die Automobilindustrie Zyklenzahlen von über 20'000.

11.1.3 Grössere Sicherheit

Ebenfalls weiter entwickelt wurden die Eigenschaften bezüglich Sicherheit. Das LiFePO₄ System erreicht eine hohe Sicherheit. Damit werden die Anforderungen an ein BMS wesentlich tiefer.

Akku- Chemie	LiFePO ₄	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiNiCoO ₂
Sicherheit	Sicherste Technologie keine Explosion, kein Rauch, kein Brand auch unter wenn nicht unter normalen Bedingungen eingesetzt	Sehr instabil, benötigt eine sehr gutes BMS, kann Feuer fangen oder explodieren im Falle eines, wenn sie überladen wird, im Falles eines Kurzschlusses oder wenn sie zu warm wird.	Akzeptierbar, kann aber auch explodieren und brennen wenn sie nicht normal behandelt wird	Nicht stabil, kann brennen, wenn sie zu warm wird
Umwelt-Verträglichkeit	Am Umwelt freundlichsten	Sehr gefährlich		Sehr gefährlich
Zyklenzahl	Sehr hohe Zyklenzahl, bis zu 5'000 Zyklen, am höchsten der hier erwähnten Technologien	Mittelmässige Zyklenzahl von 300 - 500. Kann nicht schnell entladen werden	Kleine Zyklenzahl von 100 - 800. Zyklenzahl hängt von der Entlade-Geschwindigkeit ab.	Mittelmässige Zyklenzahl von 300 - 500. Kann nicht schnell entladen werden
Leistungs-dichte	Mittelmässig	Gut	Mittelmässig	Am besten
Lebensdauer-Kosten	Am wirtschaft-lichsten/ sehr gut	Hoch	Mittelmässig	Hoch
Temperatur Einsatz	Sehr gut (-20 °C bis 70 °C)	Fällt ab darüber (-20 °C bis 55 °C)	Fällt über 50° C sehr schnell ab	-20 °C to 55 °C

Tabelle 13: Wichtige Eigenschaften verschiedener Lithium Akkus, Quelle: [11]

Bemerkung zu Tabelle 13: Lithium-Polymer Battereien wurden bisher vorwiegend mit LiCoO₂ und mit LiMn₂O₄ Chemie realisiert.

11.1.4 Verbesserte Ladegeschwindigkeit

Ebenfalls stark verbessert hat sich die Ladegeschwindigkeit. Weil sich die thermische Stabilität der Lithium Batterien stark verbessert hat, ist auch die Ladegeschwindigkeit entsprechend gestiegen.

Mit einem 1-phasigen on-board Ladegerät (10 A), das für jede Steckdose geeignet ist, kann ein Fahrzeug vom Typ A nach einer Stunde Laden wieder 23 km weit fahren (= Ladegeschwindigkeit von 23 km in der Stunde). Mit einem 3-phasigen Ladegerät ist die Ladegeschwindigkeit schon über 100 km in der Stunde). Die Begrenzung liegt hier im Gewicht des Ladegerätes, das ständig mitgeführt werden muss und in der Infrastruktur des Hausanschlusses.

Neuartige Lithium Batterien können theoretisch in sehr kurzer Zeit aufgeladen werden. Mehrere Hersteller geben an, dass in 5 - 10 Minuten 80 - 90 % geladen werden kann. A123 Systems beansprucht mit Ihrer „m1 ultra Elektrode“ [12] sogar mehr als 90 % Ladung in 5 Minuten. Für kurze Ladezeiten müsste eine geeignete Infrastruktur mit stationären

Ladegeräten aufgebaut werden, welche mit heutigen Mitteln noch nicht realisierbar ist. Realistisch erscheint ein System zum modulartigen Batteriewechsel.

11.2 Notwendige Entwicklungsschritte

Die Kosten der Batterien und die Energiespeicherdichte sind noch die grössten Hindernisse dafür dass sich Elektrofahrzeuge auf dem Markt durchsetzen können.

11.2.1 Energiespeicherdichte

Um die Fahrleistungen für alle Fahrzeugtypen auf ein gutes Niveau zu bringen, muss die Energiedichte noch weiter gesteigert werden. Wenn die Dichte der nutzbaren Energie auf 1000 Wh/kg Batterie gesteigert werden könnte, würde das den Durchbruch für reine Elektrofahrzeuge bedeuten.

11.2.2 Kosten

Zurzeit betragen die Kosten der Lithium Batterie etwa 500 US\$/ kWh. Um mit einem Fahrzeug vom Typ A die oben erwähnten Leistungen zu erreichen, müssten etwa 40 kWh mitgeführt werden. Die Kosten müssen wesentlich tiefer sein um den reinen Elektrofahrzeugen zum Durchbruch zu verhelfen. Staatliche oder privat finanzierte Vorfinanzierungs- Systeme könnten die Kosten so aufsplitten, dass diese mit herkömmlichen Treibstoffkosten vergleichbar würden.

11.3 Behinderungen durch Patentsstreitigkeiten

Patentsstreitigkeiten sind ebenfalls eine Behinderung für die rasche Entwicklung der Batterien.

11.3.1 Grössere NiMh Batterien

1994 übernahm General Motors die Kontrolle über die Entwicklung und Herstellung der Batterien von Ovonic [13]. Nachdem der California Air Resources Board (CARB) [14] ihr Null-Emissions-Mandat wegen dem Druck der Automobilindustrie aufhob, verkaufte GM im Jahre 2001 die NiMh Patente an Texaco. Einige Monate später erwarb Chevron Texaco [15]. 2003 wurde Texaco Ovonic Battery Systems in Cobasys [16] umgeliedert.

Dann klagte Cobasys Panasonic [17] ein, welche NiMh Batterien für Toyota [18] machte für den Einsatz in ihrem RAV4 Electric [19], und zwangen diese die Herstellung des Fahrzeuges zu stoppen.

Chevron Texaco / Cobasys besitzt die wichtigsten Patente für die Herstellung von NiMh Batterien und verhindert, dass Zellen, die grösser als 14 Ah sind, wirtschaftlich hergestellt werden könne. So wurden diese nie wirklich auf dem Markt erhältlich, obwohl dies technisch machbar ist.

Ferner ist bekannt, dass ein Gericht Panasonic und Toyota mit einer Geldstrafe von über \$30 Million verurteilte, welche sie an Cobasys zu bezahlen hatten wegen Verletzung von Cobasys' NiMh Patenten und als rückwirkende Zahlung für Lizenzgebühren, um diese Batterien in Ihrem Hybrid Fahrzeug Prius einsetzen zu können. Quelle: [20]

Cobasys's Patentrechte bezüglich NiMh Batterien enden 2015.

11.3.2 Lithium Batterien

Auch bei den Lithium Batterien wird die Produktion durch Patentstreitigkeiten gehemmt! Ein Vorteil bei den Lithium Systemen gegenüber den NiMH Batterien ist, dass es hier verschiedene Technologien gibt und dass somit die Entwicklung nicht durch den Inhaber der wesentlichen Patente einer Technologie die Produktion verhindert werden kann. Deshalb besteht Hoffnung, dass es bei den Lithium Systemen nicht zu der gleichen Situation kommt wie bei den NiMh Batterien, wo die Herstellung von grossen Batterien für Elektrofahrzeuge blockiert wird.

Doch auch bei den Lithium Technologien sind Patent Prozesse im Gang, z.B. bezüglich der LiFePO₄ Technologie. Die Universität Texas und HydroQuebec haben im September 2006 A123 Systems (Black & Decker kauft die Batterien von A123 Systems und verkauft sie unter der Handelsmarke DeWald), China BAK, Valence und verschiedene andere Firmen wegen Patentverletzung bezüglich der LiFePO₄- Technologie eingeklagt. Gemäss den Einklägern hat weder Black & Decker noch A123 Systems Lizenzen um die Patente zu verwenden.

Ein grosser Unterschied bei der LiFePO₄ Technologie gegenüber der NiMh Technologie ist auch, dass Phostech, eine Tochterfirma von Süd-Chemie, welche die Rechte zur Herstellung von Grundmaterial erworben hat, dieses auch verkauft und mehrere Firmen dieses zur Herstellung von LiFePO₄ Batterien benützen.

12. Laufende Entwicklungen

Leider sind nicht alle guten Eigenschaften in dem gleichen System vereinigt.

Die Entwicklung geht zurzeit in rasantem Tempo weiter und es sind weitere wesentliche Verbesserungen zu erwarten, sowohl bei den technischen Eigenschaften, als auch bei den Kosten. Die Lebensdauerkosten von modernen Lithium Systemen sind bereits heute vergleichbar mit den Lebensdauerkosten von Bleibatterien.

Meistversprechende Technologien:

- Lithium-Eisen-Phosphate (LiFePO₄):
sicher, hohe Leistungsdichte, verschiedene Hersteller
- nano-structured lithium titanate spinel oxide (Altairnano):
sehr sicher, hohe Leistungsdichte, sehr hohe Zyklenzahl,
- nanotubes (pipes): hohe Energiedichte

Die Anstrengungen für die weitere Entwicklung der Antriebsbatterien sind heute enorm gross. Deshalb können hier nur einige Beispiele der vielfältigen Aktivitäten aufgezeigt werden.

Es bleibt zu hoffen, dass die neuen Entwicklungen, insbesondere in der Nanotechnologie, die in sie gesetzten Erwartungen erfüllen. Im Folgenden wird auf einige Programme und hoffnungsvolle Entwicklungen eingegangen.

12.1 Programm der Japanischen Regierung zur Entwicklung von Batterien für Elektrofahrzeuge

Das METI, Ministry of Economy, Trade and Industry, der Japanischen Regierung [21] hat ein Programm um die Batterien für Elektrofahrzeuge zu verbessern [22]. METI hat Teams aus der Automobilbranche, von Batterieherstellern und von Universitäten zusammengesetzt. Ziel dieses Programms ist es den Preis der Batterien bis 2030 in Stufen um 92.5 % zu reduzieren. Ein weiteres Ziel ist es, dass bis 2015 Fahrzeuge erhältlich sind, die nur wenig mehr kosten als herkömmliche Fahrzeuge. Die höheren Kosten sollten nach weiteren 10 Jahren durch den reduzierten Energieverbrauch kompensiert sein. Diese Entwicklungen werden sowohl für Hybrid Fahrzeuge (hohe Leistungsdichte, kleiner Energieinhalt) als auch für reine Elektrofahrzeuge (kleine Leistungsdichte, hohe Energiedichte) angestrebt. METI hat sich auch zum Ziel gesetzt, bis 2030 Elektrofahrzeuge auf dem Markt zu bringen, die 500 km Reichweite mit einer Ladung haben. Quelle: [23]

	Status August 2006	Improved batteries (2010)	Advanced batteries (2015)	Innovative batteries (2030)
Vehicles expected to be realised	Small-sized EVs for electric power companies	Business use commuter EVs More Fuel Efficient HVs	Household commuter EVs Plug-in hybrid vehicles	Standard-sized EVs
Performance	1	1	1.5 times	7 times
Cost	1	1/2	1/7	1/40
Development system	Industry initiative	Industry initiative	Industry- government- academia collaboration	Universities and research institutions

Tabelle 14: Ziele des METI in ihrem „Action Plan - R&D strategies“, Quelle: [22]

Schon die kurzfristigen Ziele für das Jahr 2010 sind sehr gut und die mittelfristigen Ziele für das Jahr 2015 werden den Durchbruch auch für grössere rein elektrisch betriebene Fahrzeuge bringen.

12.2 Programm von NREL

Das Energy Storage Project des National Renewable Energy Laboratory (NREL) [24] leitet ein Programm bezüglich Temperaturverhalten von Batterien, Batteriemodelling und Systemlösungen für Batterien um die Eigenschaften von FCVs, HEVs, and EVs zu verbessern, mit dem Ziel einer saubereren und sicheren Zukunft des Transportes.

Die Experten von NREL arbeiten eng mit dem U.S. Department of Energy (DOE), der Industrie und mit Automobil Herstellern zusammen um Energiespeicher zu verbessern, wie zum Beispiel Batterie Einheiten und Ultracapacitors.

12.3 U.S. Advanced Battery Consortium (USABC)

Das U.S. Advanced Battery Consortium (USABC) [25] hat sich zum Ziel gesetzt langfristige Forschung und Entwicklung zu fördern auf dem Gebiet der einheimischen elektrochemischen Energiespeicher (EES) Industrie und ein Konsortium von Automobilherstellern, Hersteller von EES, nationale Laboratorien, Universitäten und andere wichtigen Interessensvertreter zu leiten. Ihr Ziel ist es Energiespeicher-Technologien zu entwickeln, welche die Kommerzialisierung von Brennstoffzellen-, Hybrid- und Elektrofahrzeugen fördert.

USABC [26] hat mehrere Entwicklungsziele. Dazu zählen unter anderem die Punkte wie in den unten stehenden Tagbellen zusammengefasst.

12.3.1 Ziele von USABC für Energiespeicher - Systeme am Ende Ihrer Lebensdauer für PHEV's

Characteristics at EOL		High Power/Energy Ratio Battery	High Energy/Power Ratio Battery
Reference Equivalent Range	miles	10	40
Peak Pulse Discharge Power - 2s / 10s	kW	50 / 45	46 / 38
Peak Regen Pulse Power (10 sec)	kW	30	25
Available Energy for CD (charge depleting) mode, 10 kW rate	kWh	3.4	11.6
Available Energy for CS (charge sustaining) mode	kWh	0.5	0.3
Minimum Round-trip Energy Efficiency (USABC HEV cycle)	%	90	90
Cold cranking power at -30°C, 2s - 3 Pulses	kW	7	7
CD Life /Discharge Throughput	Cycles/MWh	5,000 / 17	5,000 / 58
CS HEV Cycle Life, 50 Wh Profile	Cycles	300,000	300,000
Calendar Life, 35°C	year	15	15
Maximum System Weight	kg	60	120
Maximum System Volume	Liter	40	80
Maximum Operating Voltage	Vdc	400	400
Minimum Operating Voltage	Vdc	>0.55 x Vmax	>0.55 x Vmax
Maximum Self-discharge	Wh/day	50	50
System Recharge Rate at 30°C	kW	1.4 (120V/15A)	1.4 (120V/15A)
Unassisted Operating & Charging Temperature Range	°C	-30 to +52	-30 to +52
Survival Temperature Range	°C	-46 to +66	-46 to +66
Maximum System Production Price @ 100k units/yr	\$	\$1,700	\$3,400

Tabelle 15: Ziele von USABC für Energiespeicher - Systeme am Ende Ihrer Lebensdauer für PHEV's

12.3.2 Ziele von USABC für neuartige Batterien für Elektrofahrzeuge

Parameter (Units) of fully burdened system	Minimum Goals for Long Term Commercialization	Long Term Goal
Power Density (W/L)	460	600
Specific Power - Discharge, 80% DOD/30 sec (W/kg)	300	400
Specific Power - Regen, 20% DOD/10 secW/kg	150	200
Energy Density - C/3 Discharge Rate (Wh/L)	230	300
Specific Energy - C/3 Discharge Rate (Wh/kg)	150	200
Specific Power/Specific Energy Ratio	2:1	2:1
Total Pack Size (kWh)	40	40
Life (Years)	10	10
Cycle Life - 80% DOD (Cycles)	1,000	1,000
Power & Capacity Degradation (% of rated spec)	20	20
Selling Price - 25,000 units @ 40 kWh(\$/kWh)	<150	100
Operating Environment(°C)	-40 to +50 20% Performance Loss (10% Desired)	-40 to +85
Normal Recharge Time	6 hours (4 hours Desired)	3 to 6 hours
High Rate Charge	20-70% SOC in <30 minutes @ 150W/kg (<20min @ 270W/kg Desired)	40-80% SOC in15 minutes
Continuous discharge in 1 hour - No Failure (% of rated energy capacity)	75	75

Tabelle 16: Ziele von USABC für neuartige Batterien für Elektrofahrzeuge, Quelle: [27]

12.4 Weitere Programme

Es gibt eine ganze Reihe weiterer Programme zur Verbesserung der Antriebsbatterien. Im Folgenden werden nur einige genannt:

- The Electrochemical Energy Storage Team [28]
- The Batteries for Advanced Transportation Technologies (BATT) Program [29]
- The Applied Battery Research Program [30]

12.5 Nanotechnologie

Nanotechnologie wird auch bei neuartigen Batterien eingesetzt. Zahlreiche Firmen forschen auf diesem Gebiet. Wesentliche Fortschritte werden bezüglich Leistungsdichte, Energiedichte, Zyklenzahl, Fähigkeit zur Schnellladung und Sicherheit erwartet.

12.5.1 A123-Systems

A123-Systems bietet Lithium-Eisen-Phosphat Akkumulatoren unter dem Namen Lithium-Nanophosphat Akku. Quelle: [31]

12.5.2 Altairnano

Altairnano hat ein neues Anodenmaterial entwickelt. Der hauptsächliche Fortschritt von Altairnano besteht in der Optimierung von "nano-structured lithium titanate spinel oxide (LTO)" Elektroden-Material. LTO ersetzt das Graphit Elektroden Material, das sich in negativen Elektroden von herkömmlichen Lithium-Ionen Batterien befindet und hier oft Ursache von Problemen war. Bis jetzt wurde LTO mit den positiven Elektroden der herkömmlichen Lithium-Ionen Batterien kombiniert. Quelle: [32]

Laut Angaben von Altairnano sind einige der wichtigen Eigenschaften:

- Keine Sicherheitsprobleme im Betrieb
- 3-fache Leistungsdichte gegenüber konventionellen Li- Ionen Batterien
- Ladung möglich in 1 Minute
- Grosse Zyklenzahl – 10,000 bis 15,000 Ladezyklen, gegenüber 750 Ladezyklen bestehender Batterien
- Fähigkeit unter extremen Temperaturbedingungen von -30° bis 205° Celsius eingesetzt zu werden zu können

12.5.3 Nanoröhrchen

Ein grosses Potential zum Verbessern der Eigenschaften der Batterien wird auch der Technologie von Nanoröhrchen zugeschrieben.

Forscher der Stanford Universität haben eine Möglichkeit gefunden um die Eigenschaften der Lithium-Ionen Batterien wesentlich zu verbessern. Gemäss Angaben der Forschungsgruppe um Assistenzprofessor Yi Cui, kann die Energiedichte um den Faktor 10 verbessert werden gegenüber herkömmlichen Lithium-Ionen Batterien. Ebenfalls stark erhöht wird die Zyklenfestigkeit. Quellen: [33], [34]

12.5.4 Weitere Firmen

Weitere Firmen, unter anderem Toshiba und Valence (Saphion Li-Ion Technology) arbeiten mit Nanotechnologie, zum Beispiel zum verbessern der Ladegeschwindigkeit und der Lebensdauer.

Nicht alle Entwicklungen sind immer mit Erfolg gekrönt. Toshiba arbeitet an einer vergrösserten Oberfläche des Lithiums. Im April 2005 sprachen sie von Li-Ionen Akku mit Nanopartikeln, die 80% in 1 Minute laden können, dass sie in wenigen Minuten voll geladen sind, dass sie nur 1% Kapazitätsverlust nach 1000 Zyklen haben und einen weiten Temperaturbereich aufweisen. Diese Batterien sollten Ende 2006 erhältlich sein. Ende 2007 nahm Toshiba einen neuen Anlauf und sprachen von einer "Super Charge ion Battery" SCiB mit 90% Ladung in 5 Minuten, 5000 Zyklen, 2,4V Nennspannung. Auslieferung ab März 2008. Quelle: [35]

Abkürzungen

Ah	Kapazität eines Akkumulators
BATT	Batteries for Advanced Transportation Technologies Program
BEV	Battery Electric Vehicle (Elektrofahrzeug)
BMS	Battery Management System
C	Entladegeschwindigkeit eines Akkumulators z.B.: 2C = Entladung in einer halben Stunde z.B.: C2 oder C/2 = Entladung in zwei Stunden
CARB	California Air Resources Board
CD	Charge-Depleting HEV Mode: Betrieb eines HEV mit nachlassendem Ladezustand der Batterien
CS	Charge-Sustaining HEV Mode: Betrieb eines HEV mit konstantem Ladezustand der Batterien
DOE	U.S. Department of Energy
EES	Electrochemical Energy Storage (Hybrid Elektrofahrzeug)
EV	Electric Vehicle (Elektrofahrzeug)
EOL	End of Life (Ende der Lebensdauer einer Batterie)
FCV	Fuel Cell Vehicle (Brennstoffzellen Fahrzeug)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hybrid Elektrofahrzeug)
LiFePO4	Lithium-Eisen-Phosphat (Akkumulator)
LiCoO2	Lithium-Cobalt-Oxide (Akkumulator)
Li- Ion	Lithium-Ionen (Akkumulator)
LiMn2O4	Lithium-Mangan-Oxide (Akkumulator)
LiNiCoO2	Lithium-Nickel-Cobalt-Oxide (Akkumulator)
LTO	Nano-structured Lithium Titanate Spinel Oxide (Elektrodenmaterial)
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry (Japan)
NaNiCl	Natrium-Nickelchlorid (Akkumulator)
NEV	Neighborhood Electric Vehicle (Elektrofahrzeug, für den Nahverkehr und niedrige Geschwindigkeit)
NiCd	Nickel-Cadmium (Akkumulator)
NiMh	Nickel-Metallhydrid (Akkumulator)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (USA)
Pb	Bleiakkumulator
PEM	Polymer Electrolyte Membran (Brennstoffzelle)
PHEV	Plugin Hybrid Electric Vehicle (Hybrid Elektrofahrzeug, das an einer Steckdose aufgeladen werden kann und rein elektrisch eine Distanz von 20 - 60 km weit fahren kann)
RoHS	(engl. Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment: „Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten“) bezeichnet zusammenfassend die EG-Richtlinie 2002/95/EG zum Verbot bestimmter Substanzen bei der Herstellung und Verarbeitung von elektrischen und elektronischen Geräten und Bauteilen, sowie die jeweilige Umsetzung in nationales Recht
SciB	Super Charge ion Battery
SEI Layer	Solid Electrolyte Interface, (Auflösung des Elektrolyten an der Kohlenstoff Elektrode und Bildung einer Schicht an der Oberfläche in Lithium-Ionen Batterien)
USABC	United States Advanced Battery Consortium
Zebra®	Natrium-Nickelchlorid (Batterie)

Quellenangaben

- [1] www.batteryuniversity.com, on-line resource with practical battery knowledge
- [2] <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/symposium/presentations/andrew.pdf>, CARB ZEV Symposium Sept. 27, 2006, Johnson Controls - Saft Advanced Power Solutions
- [3] <http://www.energyhimalaya.com/energy-efficiency/transportation.html>, Electric Vehicle in Kathmandu Nepal
- [4] <http://www.tiempocyberclimate.org/newswatch-update/feature060527.htm>, Electric Vehicles in Nepal
- [5] http://stromboli.ch/index.php?option=com_content&task=view&id=32&Itemid=53, Stromboli II, Advanced Battery Project
- [6] <http://www.kokam.com/english/index.html>, Kokam
- [7] http://www.saftbatteries.com/Technologies_Lithium_Liion_301/Default.aspx, Saft Li-Ion batterien
- [8] http://www.cebi.com/cebi/content/index_en.html?a=5&b=9&c=19&d=72, Mes Dea Bild, Zebra[®] Batterie
- [9] www.altairnano.com/documents/AltairnanoEDTAPresentation.pdf, Altairnano Dokument
- [10] http://www.mobilitaet21.de/projekte/dokumente/InnovativeTechnik/NanoSafe/NanoSafe_Datasheet.pdf, Altairnano's NanoSafe™ Information and Battery Datasheet
- [11] <http://www.iloveebikes.com/batteries.html>, Vergleich verschiedener auf Lithium basierender Batteriesysteme
- [12] <http://www.a123systems.com> A123 Systems LiFePO Batterien, die mit hohen Strömen belastbar und schnellladefähig sind.
- [13] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ovonics>, Energy Conversion Devices (ECD Ovonics), Hersteller von NiMh Batterien, jetzt im Besitze von Cobasys
- [14] <http://www.arb.ca.gov>, California Air Resources Board
- [15] <http://www.chevron.com>, Chevron Texaco
- [16] <http://www.cobasys.com>, Cobasys, Manufacturer of NiMh batteries
- [17] <http://www.panasonic.com>, Panasonic Manufacturer of NiMh batteries
- [18] <http://www.toyota.com>, Toyota Hersteller von HEV und BEV Fahrzeugen
- [19] <http://www.toyota.com/vehicles/rav4ev>, Elektrofahrzeug von Toyota bis 2003 hergestellt
- [20] <http://www.evworld.com/blogs/index.cfm?page=blogentry&authorid=51&blogid=104>
- [21] <http://www.meti.go.jp/english>, METI, Ministry of Economy, Trade and Industry, der Japanischen Regierung
- [22] <http://www.meti.go.jp/english/information/downloadfiles/PressRelease/060828VehicleBatteries.pdf>, Programm des METI um die Batterien für Elektrofahrzeuge zu verbessern. METI hat Teams aus der Automobilbranche, von Batterieherstellern und von Universitäten
- [23] http://www.greenprices.com/eu/newsletter/GPBE_47_070411/Battery.asp, Green Prices, independent information provider
- [24] <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/>, NREL's Energy Storage Project
- [25] http://www.uscar.org/guest/view_team.php?teams_id=12, U.S. Advanced Battery Consortium
- [26] http://www.uscar.org/guest/article_view.php?articles_id=85, Entwicklungszeile in der langfristigen Forschung und Entwicklung des USABC
- [27] http://www.uscar.org/commands/files_download.php?files_id=27, USABC Goals for Advanced Batteries for EVs
- [28] http://www.uscar.org/guest/view_team.php?teams_id=11 Programm des Electrochemical Energy Storage Teams

- [29] <http://batt.lbl.gov/> Batteries for Advanced Transportation Technologies (BATT) Program
- [30] <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/resources.html#progs>, Applied Battery Research Program
- [31] <http://www.a123systems.com/#/technology/> Lithium-Nanophosphat Akku der Firma A123-Systems
- [32] <http://www.b2i.us/profiles/investor/fullpage.asp?f=1&BzID=546&to%20=cp&Nav=0&LangID=1&s=236&ID=9307>, Altarinanos's batteries
- [33] <http://news-service.stanford.edu/news/2008/january9/nanowire-010908.html>, Nanowire battery
- [34] <http://www.heise.de/newsticker/Nanoroehrchen-verbessern-Akkus--/meldung/101898>, Nanoröhrchen
- [35] <http://wiki.oliverbetz.de/owiki.php/LiPos>, Lithium-Polymer-Akkus, EV World Blog

Nützliche Links

(Die unten stehenden links sind weder ausschliesslich noch komplett)

Reports

SUBAT: SUSTAINABLE BATTERIES, Work package 5: Overall Assessment, Final Public Report, 2005, J. Matheys and W. Van Autenboer, under the supervision of Prof. Dr. ir. J. Van Mierlo, Vrije Universiteit Brussel - ETEC

http://ec.europa.eu/research/fp6/ssp/subat_en.htm

download: <http://www.battery-electric.com/subatdocs/WP5-006.pdf>

ADVANCED AUTOMOTIVE BATTERIES, Menahem Anderman, PhD, President, [Status and Prospects of Battery Technology for Hybrid Electric Vehicles](#), Including Plug-in Hybrid Electric Vehicles

Status von Batteriesystemen für E-Mobile, Paul Rüetschi, Bundesamt für Energie
Mühlestrasse 4, Ittigen, CH-3003 Bern,

<http://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?page=Grunddaten&projectid=4905>

2000 ZERO EMISSION VEHICLE PROGRAM, BIENNIAL REVIEW, State of California, California Environmental Protection Agency, AIR RESOURCES BOARD

2000 ZERO EMISSION VEHICLE PROGRAM, BIENNIAL REVIEW

www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/2000review/execsumm.pdf

Programs

Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry (METI),

[Recommendations for the Future of Next-Generation Vehicle Batteries](#),

CARB ZEV Symposium Sept. 27, 2006,

<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/symposium/presentations/presentations.htm>

Viele nützliche Präsentationen über Batterien

NREL National Renewable Energy Laboratory

NREL ist eine ausgezeichnete Quelle für Publikationen über Batterien

[Publications and Presentations](#)

<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/publications.html>

2007

FY 2007 Energy Storage Program Report, Report:

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/42716.pdf>)

Source: Pesaran, A. et al Report to U.S. Department of Energy. November 2007.

Multi-Dimensional Electrochemical-Thermal Coupled Model of Large Format

Cylindrical Lithium Ion Cells, Presentation:

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/42451.pdf>),

Source: Kim, G.; Smith, K. Presented at the 212th ECS Meeting, Washington, DC, Oct 7-12, 2007.

PHEV Energy Storage and Drive Cycle Impacts

Presentation:

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/42026.pdf>),

Source: Pesaran, A.; Markel, T. Presented at the 7th Advanced Automotive Battery Conference, Long Beach, California, May 17, 2007.

Analysis of Heat Dissipation in Li-Ion Cells and Modules for Modeling of Thermal Runaway

Presentation:

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/41531.pdf>),

Source: Kim, Gi-Heon; Pesaran, A. Presented at the 3rd International Symposium on Large Lithium Ion Battery Technology and Application, Long Beach, California, May 15-18, 2007.

Battery Requirements and Cost-Benefit Analysis for Plug-In Hybrid Vehicles

Presentation:

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/42082.pdf>),

Source: Pesaran, A. Markel, T. Presented at the 24th International Battery Seminar, Fort Lauderdale, Florida, March 19-22, 2007.

Battery Choices and Potential Requirements for Plug-In Hybrids

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/41328.pdf>),

Source: Pesaran, A. Presented at the Plug-in Hybrid Electric Truck Workshop Hybrid Truck Users Forum, Los Angeles, California, Feb. 13, 2007.

2006

Energy Storage Requirement Analysis for Advanced Vehicles (Fuel Cell, Mild Hybrid, and Plug-In), Milestone Report/CD-ROM:

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/40658.pdf>),

Source: Pesaran, A.; Markel, T.; Gonder, J. December 2006

Battery Thermal Management System Design Modeling

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/40446.pdf>),

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/40848.pdf>),

Source: G. Kim, A. Pesaran. Presented at the 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Conference and Exhibition (EVS-22) Yokohama, Japan, October 23-28, 2006.

Recent Analysis of UCAPs in Mild Hybrids

(<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/39731.pdf>),

Source: Pesaran, A.; Gonder, J. Presented at the 6th Advanced Automotive Battery Conference, Baltimore, Maryland, May 17-19, 2006.

2005

Electro-Thermal Modeling to Improve Battery Design: Preprint

Paper: (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/38621.pdf>),

Source: D. Bharathan, A. Pesaran, G. Kim, A. Vlahinos. Presented at 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 7-9, 2005.

Ultracapacitors and Batteries in Hybrid Vehicles

Presentation: (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/38484.pdf>),

Source: Pesaran, A.; Markel, T.; Zolot, M.; Sprik, S. Presented at the Advanced Capacitors conference in San Diego, California, July 11-13, 2005.

Analysis of Ultracapacitor-VRLA Energy Storage Systems for Mild Hybrids

Presentation: (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/41038.pdf>),

Source: Markel, T.; Pesaran, A.; Sprik, S. Presented at 5th Advanced Automotive Battery Conference, Honolulu, Hawaii, June 13-15, 2005

Energy Storage Fuel Cell Vehicle Analysis

Paper (Preprint: (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/37567.pdf>),

Presentation: (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/38143.pdf>),

Source: Markel, T.; Pesaran, A.; Zolot, M.; Sprik, S.; Tataria, H.; Duong, T. Presented at the 21st Electric Vehicle Symposium, Monte Carlo, Monaco, April 2-6, 2005.

Improving Battery Design with Electro-Thermal Modeling

Paper (Preprint): (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/37652.pdf>),

Presentation: (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/38164.pdf>),

Source: Pesaran, A.; Bharathan, D.; Kim, G.; Vlahinos, A.; Duong, T. Presented at the 21st Electric Vehicle Symposium, Monte Carlo, Monaco, April 2-6, 2005.

2004

Analysis of Fuel Cell Hybridization and Implications for Energy Storage Devices

Conference Paper: (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/36169.pdf>),
Presentation: (<http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/41039.pdf>),
Source: Zolot, M.; Markel, T.; Pesaran, A. Presented at the 4th International Advanced Automotive Battery Conference, San Francisco, California, June 2-4, 2004

Fuel Cell/Battery Hybrids: A Review of Energy Storage Hybridization in Fuel Cell Vehicles

Presentation: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/uetct9_pesaran.pdf),
Source: A. Pesaran, M. Zolot, T. Markel, K. Wipke (NREL). Presented at 9th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, Germany, May 17-18, 2004.

EDLC Modeling and Integration for Hybrid Electric Vehicles

Presentation:
(http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/nrel04_fl_edlc_conf_animate_v4.pdf),
Source: M. Zolot, T. Markel, S. Sprik, K. Kelly, A. Pesaran (NREL). Presented to the 14th International Seminar on Double Layer Capacitors and Hybrid Energy Storage Devices, December 6-8, 2004.

2003

Improving Battery Thermal Management Using Design for Six Sigma Process

Paper: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/evs_20paper.pdf),
Presentation: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/evs_20pres.pdf),
Source: A. Vlahinos (Advanced Engineering Solutions), J. Rugh, K. Kelly, A. Pesaran (NREL). Presented At EVS-20 Conference, November 2003.

Dual-Source Energy Storage - Control and Performance Advantages in Advanced Vehicles

Paper: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/dualsource_v13.pdf),
Poster: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/dualsource_poster.pdf),
Source: M. Zolot (NREL). Presented at the EVS-20 Conference, November 2003. Included in EVS-20 Proceedings.

Thermal Characterization of Advanced Lithium-Ion Polymer Cells

Paper: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/aabc03_paper_nrel_cpi.pdf),
Poster: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/aabc_poster.pdf),
Source: M.A. Keyser, A. Pesaran, and M. Mihalic (NREL). Presented at Third Advanced Automotive Battery Conference, June 2003.

Energy Storage System Requirements for Hybrid Fuel Cell Vehicles

Paper: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/aabc03_nrel_esfc_vr3.pdf),
Presentation:
(http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/aabc03_pesaran_final.pdf), Source:
T. Markel, M. Zolot, K. Wipke, and A. Pesaran (NREL). Presented at Advanced Automotive Battery Conference, June 2003.

Cooling and Preheating of Batteries in Hybrid Electric Vehicles

Paper: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/jte_2003-633_sw_ap.pdf),
Presentation: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/jtec_hawaii_pres02.pdf),
Source: A. Pesaran (NREL), A. Vlahinos (Advanced Engineering Solutions), T. Stuart (University of Toledo). Presented at the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Conference, March 2003.

2002

Energy Efficient Battery Heating in Cold Climates

Paper: (http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/1a_2002_01_1975.pdf),
Source: A. Vlahinos, A. Pesaran, Presented at the Future Car Congress, June 2002.

Fact Sheets

Battery Thermal Analysis and Testing

Brochure: <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/brochure.pdf>)

Current-Interrupt Charging Algorithm: Extending Deep Cycle Life of Valve-Regulated Lead Acid Batteries

Fact Sheet (http://www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/inter_charging.pdf)

Auswahl verschiedener Links

Blei-Traktionsbatterien von Händlern und Hersteller in der Schweiz :

http://www.levobatterien.com/index.php?thema=produkte&nav=2&id_kat=58

<http://www.oerlikonbatterien.com/accutraktion/>

Lithium-Eisen-Phosphat Akkumulatoren :

<http://www.a123systems.com/>

http://www.thunder-sky.com/home_en.asp

(<http://www.altairnano.com/>)

Lithium-Polymer Akkumulatoren :

<http://www.kokamamerica.com/>

<http://www.kokam.com/english/index.html>

Zebra® Akkumulatoren :

http://www.cebi.com/cebi/content/index_en.html?a=5&b=9&c=19

Alle Batteriearten :

http://shop.contrel.com/batterie_power.html

Ladegeräte für Traktionsbatterien :

http://www.levobatterien.com/index.php?thema=produkte&nav=2&id_kat=180

<http://www.brusa.biz/welcome.html>

[http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-C9E267E5-](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-C9E267E5-DE223C0C/fronius_international/hs.xsl/17_93_DEU_HTML.htm)

[DE223C0C/fronius_international/hs.xsl/17_93_DEU_HTML.htm](http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-C9E267E5-DE223C0C/fronius_international/hs.xsl/17_93_DEU_HTML.htm)

<http://www.zivan.it/ENG/index.html>

Wikis:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulator>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Zebra-Batterie>

http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery

http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery

<http://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Polymer-Akku>

http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_metal_hydride_battery

http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_ion_polymer_battery

<http://en.wikipedia.org/wiki/Nanobatteries>

<http://www.seattleeva.org/wiki/Batteries>

http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle

Verzeichnis der Bilder, Tabellen und Diagramme

Bilder:

Nr.	Bezeichnung	Seite
1	Massenartikel, die Batterien erfordern	9
2	Prototyp eines ultraleichten Autos mit reinem Elektroantrieb (BEV)	9
3	Elektrogabelstapler	10
4	Solar Rennfahrzeug	10
5	NiMh Akkumulator	11
6	Toyota Prius, das bisher erfolgreichste Hybridfahrzeug	12
7	Batteriekonzept für das Fahrzeug Stromboli II	13
8	BEV- Elektrofahrzeug Stromboli II	13
9	Offener Bleiakkumulator mit flüssigem Elektrolyt	15
10	Batterie in geschlossener Bauform (Blei-Gel oder Blei-Vlies)	15
11	Hochleistung - Ladegerät für den Einbau in Fahrzeug	16
12	NiCd System der Firma Saft	19
13	NiCd System der Firma Leclanché	19
14	NiCd Rundzellen zu einem Block geformt	19
15	NiCd Einzelzelle der Bauform AAA	19
16	Ladegerät für NiCd Batteriepakete	20
17	NiMh Rundzellen mit $Q < 10 \text{ Ah}$	23
18	System Serieschaltung von NiMh Flachzellen mit $Q > 10 \text{ Ah}$	23
19	Strangladegerät für NiMh Akkumulatoren den Einbau in Fahrzeuge	24
20	Li-Ionen Zellen	27
21	Li-Ionen Akkumulatoren, wie sie in Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingesetzt werden	27
22	Rundzellen in Lithium-Mangan Technologie	27
23	Batterie-Management System (BMS)	29
24	Li-Ionen Balancer	29
25	Zebra® Batterie	32
26	Hochleistungsladegerät der Firma MES-DEA	33
27	Lithium-Ionen balancer	39

Tabellen:

Nr.	Bezeichnung	Seite
1	Anforderungen an die Batterien für verschiedene Typen von HEV und BEV	6
2	Vor und Nachteile einiger gängiger Batterietechnologien	7
3	Eigenschaften von Bleibatterien	17
4	Eigenschaften von Nickel-Cadmium Batterien	21
5	Eigenschaften von Nickel-Metallhydrid Batterien	25
6	Eigenschaften von Lithium-Kobalt Batterien	30
7	Eigenschaften von Lithium-Mangan Batterien	30
8	Eigenschaften von Lithium-Eisen-Phosphat Batterien	30
9	Eigenschaften von Natrium-Nickelchlorid Batterien	35
10	Vergleich verschiedener Akkumulatoren	36
11	Ausgewählte Elektrofahrzeug- Typen	40
12	Reichweiten [km/Ladung] der Elektrofahrzeuge von Tabelle 11 mit verschiedenen Batterietypen	41
13	Wichtige Eigenschaften verschiedener Lithium Akkus	42
14	Ziele des METI in ihrem „Action Plan - R&D strategies“	45
15	Ziele von USABC für Energiespeicher - Systeme am Ende Ihrer Lebensdauer für PHEV's	47
16	Ziele von USABC für neuartige Batterien für Elektrofahrzeuge	48

Diagramme:

Nr.	Bezeichnung	Seite
1	Leistung und Energie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge	6
2	Ersatzschaltung eines Akkumulators	11
3	Entladecharakteristik eines Blei Akkumulators	15
4	Eigenschaften von Bleibatterien	17
5	Entladecharakteristik eines Nickel-Cadmium Akkumulators	19
6	Eigenschaften von Nickel-Cadmium Batterien	21
7	Entladecharakteristik eines Nickel-Metallhydrid Akkumulators	23
8	Eigenschaften von Nickel-Metallhydrid Batterien	25
9	Entladecharakteristik eines Lithium-Ionen Akkumulators	28
10	Eigenschaften von Lithium-Kobalt Batterien	30
11	Eigenschaften von Lithium-Mangan Batterien	30
12	Eigenschaften von Lithium-Eisen-Phosphat Batterien	30
13	Entladecharakteristik eines Zebra [®] Akkumulators	33
14	Eigenschaften von Natrium-Nickelchlorid Batterien	35
15	Vergleich von Leistungsgewicht und Leistungsdichte einiger Batterien	36
16	IU- Batterie Ladeverfahren	39