

Eigenschaften heutiger Batterie- und Wasserstoffspeichersysteme für eine nachhaltige elektrische Mobilität

Dipl.-Ing. Andreas Schuster Autor

Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Technische Universität Wien,
Gusshausstraße 25, 1040 Wien, Österreich, schuster@ea.tuwien.ac.at,
<http://www.ea.tuwien.ac.at/>

Kurzfassung:

Die Zieldefinition dieser Arbeit umfasst die strukturellen Überlegungen und Vergleiche zwischen der Energiespeicherung mittels Batterie und Wasserstoff in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Dabei ist für diese Betrachtung die Energiequelle in beiden Fällen der elektrische Strom. Um die Funktionsweise sowie den Aufbau der derzeitigen und zukünftigen Batterietypen (NiMH, Na/NiCl₂, Li-Ionen und Nano-Batterien) zu kennen, wird zuerst darauf eingegangen. Anschließend wird der Ladeprozess der zurzeit zukunftssträchtigen Li-Ionen-Systeme näher betrachtet. Auch die Struktur und die Probleme der Wasserstoffketten (Elektrolyse, Aufbereitung, Transport, mobile Speicherung, Brennstoffzelle und Nebengeräte) werden behandelt. Beide Technologiepfade haben ihre Vor- und Nachteile und sind je nach Anwendung besser geeignet. Verglichen werden sie in puncto Effizienz und Preisentwicklung.

Keywords: Batterie, Wasserstoff, Elektrofahrzeug, Ladeprozess, Effizienz

1 Einleitung

Die bevorstehende Erdölverknappung und die evidente Umweltverschmutzung zwingen uns unsere gesamte derzeitige motorisierte Individualmobilität neu zu überdenken. Nur der elektrische Antrieb kann diese Probleme dauerhaft lösen. Die Frage, mit welchen Systemen im Fahrzeug die notwendige Energieversorgung bereitgestellt wird, ist hierbei schon etwas schwerer zu beantworten.

Die direkte Speicherung mittels Sekundärbatterien bietet dabei das einfachste Konzept. Dennoch setzte sich das erste Elektroauto aufgrund schlechter Batterieeigenschaften nicht durch. Bedingt durch die derzeitigen Entwicklungssprünge in den Batterietechnologien wird der zukünftige Einsatz im Fahrzeug wieder interessant.

Alternativ dazu begeistert seit einigen Jahren die Speicherung mittels Wasserstoff und Umwandlung durch die Brennstoffzelle nicht nur technische Gemüter. Im Sinne einer nachhaltigen Betrachtung kann die Energie nur aus erneuerbaren Quellen kommen und daher fast ausschließlich durch Elektrolyse gewonnen werden. Die dadurch resultierende effizienzmindernende Kette stellt das größte Problem dar.

Im Folgenden werden daher strukturelle Überlegungen und Vergleiche zwischen der Energiespeicherung mittels verschiedener Batteriearten und unterschiedlicher Wasserstoffketten in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen angestellt. Dabei ist für diese Betrachtung im Sinne der Nachhaltigkeit die Energiequelle in beiden Fällen der elektrische Strom. Die zu untersuchenden Eigenschaften sind dabei der **Aufbau**, die **Aufladung**, die **Effizienz** und die **Investitionskosten** diverser Batterien und Wasserstoffsysteme.

2 Aufbau und Eigenschaften

Betrachtet man den schematischen Aufbau, siehe Abbildung 2.1, der zwei Speichermethoden, so erkennt man die prinzipielle Ähnlichkeit der Verfahren. Beide speichern die elektrische Energie in *chemischer Form*.

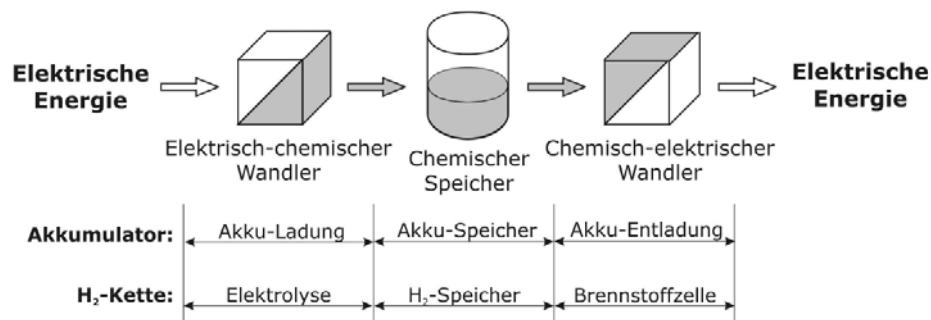


Abbildung 2.1: Schematische Gliederung der chemischen Energiespeicherung (Schuster, 2008)

Folgend werden heutige Batterietechnologien und Komponenten der Wasserstoffketten in ihrem **Aufbau** etwas näher beschrieben sowie auf jeweilige **Probleme** und **Vorteile** hingewiesen.

2.1 Aufbau und Eigenschaften der Batteriearten

In den wenigen zurzeit aktiven elektrischen Fahrzeugen werden hauptsächlich *NiMH*- und *Na/NiCl₂-ZEBRA-Zellen* verwendet. Bedingt durch ihre sehr hohen Energie- und Leistungswerten werden im Bereich der *Li-Ionen-Typen* momentan sehr viel geforscht. Diese drei Zelltypen bilden das hier betrachtete Batteriefeld.

Neben den schon erwähnten spezifischen **Energie-** und **Leistungswerten** sind **Nenn-** und **Leerlaufspannungen**, **Entladeeigenschaften**, **Selbstentladungen** und **Alterungsmechanismen** als wichtige Parameter bei der richtigen Wahl des Batterietyps zu nennen.

2.1.1 NiMH

Bei diesem Zellentyp wird die Energie in Form von Wasserstoff gespeichert. Bei Auf- und Entladung wird dieser Wasserstoff von der positiven Elektrode, heute meist Nickelhydroxid (NiOOH), zur negativen, meist AB₅-Legierungen, und umgekehrt transportiert. Der Elektrolyt besteht aus Kalilauge.

Das Nickelhydroxid besitzt eine schlechte Leitfähigkeit, welche mittels Cobalt-Additiven verbessert wird, und eine starke Volumenzunahme beim Überladen, welches dadurch

unbedingt zu vermeiden ist. Als Vorteil sei die hohe Lebensdauer bedingt durch die geringe Löslichkeit in Kalilauge hervorstreichend.

Der erlaubte *Temperaturbereich* der NiMH-Zellen wird mit -40 bis 50°C angegeben (Stan, 2005). Die durch die Reaktionsgleichungen theoretisch erzielbare Energiedichte von rund 215 Wh/kg wird praktisch nie erreicht. In *Abbildung 2.2* sind einige Energie- und Leistungswerte der NiMH-Zellen im *Ragone-Diagramm* eingezeichnet.

Die theoretische *Ruhe-spannung* liegt zwischen $U_0 = 1,3 \dots 1,35 \text{ V}^1$ und die *Nennspannung* wurde bei allen NiMH-Systemen auf $U_N = 1,2 \text{ V}$ festgesetzt. Die Ruhe-spannung schwankt zwischen der *Entladeschlussspannung* $U_{ES} = 1,0 \text{ V}$ und der *Ladeschlussspannung* $U_{LS} = 1,45 \text{ V}$. Da diese Schwankungen kaum Aufschluss auf den momentanen Ladezustand geben, sind die Verfahren zur Bestimmung dieses Zustandes sehr komplex und in der Praxis meist ungenau.

Die *Entladeeigenschaft* ist einerseits vom Entladestrom und andererseits von der Außentemperatur abhängig. Bedingt durch den negativen Temperaturkoeffizienten besitzen NiMH-Zellen ein sehr gutes Hochstromverhalten mit Strömen bis zu 15 C-Rate² (Jossen & Weydanz, 2006). Da der Innenwiderstand der negativen Elektrode sehr stark temperaturabhängig ist, verliert das System bei Minusgraden sehr viel von ihrer Kapazität und es resultiert ein allgemein schlechtes Temperaturverhalten.

Die *Selbstentladung* ist nicht nur bei der NiMH-Type sehr stark temperaturabhängig. Mit zunehmender Außentemperatur wächst sie dramatisch an. Die verschiedenen Literaturen sprechen bei Raumtemperatur von rund 4 – 5 %/Tag (Vincent & Scrosati, 1997) bzw. 20 – 25 %/Monat (Conte, 2006) und (Dhameja, 2002). Diese Werte sind sehr hoch.

Der wichtigste Parameter unter den *Alterungsmechanismen* ist bei der NiMH-Zelle die Entladetiefe DOD (=Depth of Discharge), da die negative Elektrode nicht vollständig korrosionsbeständig ist, das Aktivmaterial außerdem um bis zu 20 % größer wird beim Laden und die dadurch entstehenden Mikrocracks immer wieder erneut korrodieren (Jossen & Weydanz, 2006). Dadurch wird die Überladereserve mehr als aufgebraucht was beim Ladevorgang losen Wasserstoff entstehen und zu gefährlichen Druckerhöhung kommen lässt. Bei 80 % DOD erreicht man rund 2 500 Zyklen und bei 5 % DOD rund 160 000 Zyklen (das entspricht einem vierfachen Ladungsumsatz) (Naunin et al., 2007). Vollentladungen sind dennoch im Abstand von rund drei Monaten regelmäßig durchzuführen, da sonst die Zellspannung um rund 50 mV reversibel einbricht (Jossen & Weydanz, 2006). Über- und Tiefenentladungen sind unbedingt zu vermeiden, da sie die Zellen dauerhaft schädigen und zu Kristallbildungen führen.

2.1.2 Na/NiCl₂ – ZEBRA

Bei diesem Zellentypen, benannt nach dem Entdeckungsprojekt „Zero Emission Battery Research Activity“, treten Natriumionen durch den keramischen Elektrolyten durch. Dieser trennt die positive Nickelchlorid- mit der negativen Natrium-Elektrode. Am besten geeignet für den Elektrolyten ist das im festen Zustand befindliche β -Aluminiumoxid, dass aber eine

¹ je nach betrachteter Literatur: (Jossen & Weydanz, 2006), (Reisch, 2007) oder (Stan, 2005)

² 1 C-Rate ist jener Strom, bei der die volle Zelle in einer Stunde entladen ist.

Temperatur von rund 300°C benötigt (Besenhard, 1999). Um diesen befindet sich noch das flüssige NaAlCl₄, welches die notwendige Leitfähigkeit gewährleistet und außerdem die Zelle robuster gegen Über- und Tiefenentladung macht (Besenhard, 1999).

Im Gegensatz zu den anderen Zellentypen ist der erlaubte *Temperaturbereich* der ZEBRA-Systeme im Bereich von 280 – 350°C (Stan, 2005). Somit zählt sie zu den so genannten Hochtemperaturbatterien. In der allgemeinen Anwendung benötigt man daher ein externes Heizsystem, welches die Batterie erst nach mehreren Wochen ohne Benutzung wieder kalt werden lässt, da mit einer Wiederaufheizzeit von über 24 Stunden zu rechnen ist. Trotz hochentwickelter Wärmeisolierung muss man mit einer Heizleistung von rund 5W pro kWh Speichervermögen rechnen (Naunin et al., 2007).

Die theoretische *Energiedichte* ist mit 796 Wh/kg riesig hoch und mit den anderen Zellen nicht mehr vergleichbar. Die praktische Energiedichte jedoch ist bedingt durch die zwei Elektrolyten im Bereich zwischen 80 und 120 Wh/kg. In *Abbildung 2.2* sind wieder einige Energie- und Leistungswerte der ZEBRA-Zellen im *Ragone-Diagramm* eingezeichnet.

Die *Leerlauf-* oder *Gleichgewichtsspannung* ist temperaturabhängig und beträgt bei 300°C $U_0 = 2,58$ V, sowie die *Ladeschluss-* wird mit $U_{LS} = 3,05$ V und die *Entladeschlussspannung* mit $U_{ES} = 1,58$ V angegeben (Besenhard, 1999).

Die *Entladeeigenschaften* der ZEBRA-Zellen sind abhängig vom Entladestrom und zusätzlich von der momentanen Entladetiefe DOD. Fast ausschließlich durch die positive Nickelchlorid-Elektrode hervorgerufen steigt der Innenwiderstand annähernd gleichmäßig von rund 10 mΩ bei 0% DOD auf 30 mΩ bei 100% DOD an (Besenhard, 1999). In vielen Datenblättern ist daher die maximale DOD sehr oft mit 80% angegeben (CEBI Deutschland Vertriebs-GmbH). Als Vorteil aller ZEBRA-Systeme sei hier die fast vollkommene Außentemperaturunabhängigkeit zu nennen.

Die von den anderen Zellentypen bekannte *Selbstentladung* wird in den diversen Literaturen und Datenblättern für diese Batterieart nicht erwähnt. Wichtiges Faktum ist die notwendige Heizleistung bei mittleren Stehzeiten. Diese überschreitet die schon hohen Selbstentladungswerte der NiMH-Systeme bei weitem. Die genaue Beurteilung hängt nun sehr stark vom Benutzerverhalten ab.

Die sehr robuste ZEBRA-Batterie kann mit einem bis zu 5 prozentigen Anteil ausgefallener Zellen, welche durch den Bruch des Keramikelektrolyten niederohmig sind, noch immer betrieben werden (Ingenieure, 1998). Die somit auf *Alterungsmechanismen* eher unempfindlichen Systeme haben in Elektroautos bereits über 1 700 Vollzyklen (80 % DOD) und rund 5 Lebensjahre problemlos überstanden (Besenhard, 1999). Die bekannte Praxistauglichkeit dieser Batterien ist auch der größte Vorteil.

2.1.3 Li-Ionen

Die Energiespeicherung in Li-Ionen-Zellen beruht im Gegensatz zu den anderen Systemen auf ein ganz anderes chemisches Grundprinzip. In den Elektroden werden die Lithiumatome jeweils als Gastatome in einem Wirtsgitter gespeichert (Interkalation). Diese Gitter können nun aus verschiedenen Materialien, welche lediglich Lithium aufnehmen müssen, bestehen.

Durch die Kombinationsmöglichkeiten der Materialien ergeben sich sehr unterschiedliche Eigenschaften. Generell eignen sich als negative Elektrode Materialien, welche ein Potential

nahe dem Lithiummetall besitzen. Heute am häufigsten verwendet wird hierfür Graphit. Für die positive Elektrode hingegen sollte die Substanz ein möglichst hohes Potential von rund 3 – 5 V mehr als Lithium³ aufweisen. Zurzeit ist LiCoO₂ sehr üblich. Der Potentialunterschied ermöglicht eine möglichst hohe Zellspannung. Als weitere wichtige Eigenschaften der zwei verwendeten Materialien sind ihre jeweilige gravimetrische Speicherkapazität in mAh/g, die Reversibilität der Speicherung des Lithiums, die Stabilität, die elektrische und ionische Leitfähigkeit sowie die Umweltverträglichkeit, die Sicherheit und der Preis zu nennen.

Wird bei der negativen Elektrode erstmalig das Potential von 1 V vs. Li/Li⁺ unterschritten, so bildet sich eine Deckschicht – ein so genannter *SEI-Film* (= Solid Electrolyte Interface). Dieser Effekt zeigt sich bei allen Aktivmaterialien bei Unterschreitung des Spannungslevels. Durch Verwendung von Zusätzen im Elektrolyt soll die sich bildende Deckschicht gut durchlässig für die Li-Ionen sein und vor allem über die Zeit stabil bleiben. Der SEI-Film ist ein wichtiger Faktor, der die Alterung und damit die Lebensdauer der Zelle beeinflusst.

Das für die positive Elektrode heutzutage verwendete LiCoO₂ zersetzt sich oberhalb von rund 4,4 V oder bei hohen Temperaturen durch eine *starke exotherme Reaktion* mit Sauerstoffabgabe. Deshalb werden für diese Zellen unbedingt elektronische Schaltungen, die die Spannung – besonders beim Laden – begrenzen, benötigt

Je nach verwendeten Elektrolyten und darauf abgestimmten Gehäuse unterscheidet man zwischen:

- Lithium-Ionen-Zellen
- Lithium-Polymer-Gel-Zellen
- Lithium-Fest-Polymer-Zellen

Die in stabilen Metallgehäusen verpackten Lithium-Ionen-Zellen sind am aufwendigsten zu produzieren und werden heute im Handy- und Laptopbereich verwendet. Hingegen die Lithium-Polymer-Gel-Zellen können kostengünstig in so genannte „Coffee bags“ bestehend aus kunststoffbeschichteten Aluminiumfolien hergestellt werden. Die mit einem geringeren Sicherheitsrisiko verbundenen Lithium-Fest-Polymer-Zellen funktionieren im Gegensatz zu den anderen Typen bei rund 60°C.

Der erlaubte *Temperaturbereich* der Lithium-Ionen-Zellen wird mit -40 bis 60°C angegeben (Stan, 2005). Die durch die Reaktionsgleichungen der zurzeit meist verwendeten Aktivmaterialien theoretisch erzielbare Energiedichte von rund 410 Wh/kg wird praktisch nie erreicht. In *Abbildung 2.2* sind einige Energie- und Leistungswerte der Lithium-Ionen-Zellen im *Ragone-Diagramm* eingezeichnet.

Die *Nennspannung* U_N ist bei den Li-Ionen-Systemen bedingt durch die verschiedenen Wirtsmaterialien nicht festgesetzt. Sie schwankt grob zwischen 3,5 und 3,7 V (zusammengefasst aus (Jossen & Weydanz, 2006), (Reisch, 2007) und (Böhmer, Ehrhardt, & Oberschelp, 2007)). Die maximale *Ladeschlussspannung* $U_{LS} = 4,2$ V ist jedoch bei jedem Li-Ionen-Typs gleich und sollte aus Gründen der Sicherheit und einer großen Zyklenfestigkeit eine Genauigkeit von ± 20 mV einhalten. Hingegen bei der unteren Spannungsgrenze – der *Entladeschlussspannung* U_{ES} – gibt es einen möglichen Bereich von 2,3 bis 3,0 V

³ wird in der Literatur oft als V vs. Li/Li⁺ notiert

(zusammengefasst aus (Jossen & Weydanz, 2006), (Reisch, 2007) und (Böhmer, Ehrhardt, & Oberschelp, 2007)).

Die *Entladeeigenschaft* der Lithium-Ionen-Zelle ist einerseits vom Entladestrom und andererseits von der Außentemperatur abhängig. Hochstromfähige Zellen können mit kaum merklichen Kapazitätsverlust Entladeströme bis zu 12 C-Rate liefern (Jossen & Weydanz, 2006). Dabei tritt jedoch anfänglich ein starker Spannungseinbruch ein, der nachdem sich alle Diffusionsprozesse eingependelt haben und der Stromfluss die Zelle erwärmt hat, wieder verschwindet. Wichtig dabei ist, dass die Zellenspannung durch den Spannungseinbruch zu Beginn nicht kleiner als die Entladeschlussspannung wird, da sonst das Entladen unnötig und frühzeitig beendet wird.

Unterhalb von 0°C nimmt die verfügbare Kapazität stärker ab und Temperaturen oberhalb von 30°C haben einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle (Jossen & Weydanz, 2006). Bei Temperaturen unter 20°C zeigt sich zusätzlich ein signifikanter Unterschied in der Kapazität der Zelle in Abhängigkeit des Ladestroms. Wird das System mit höheren Strömen (>0,1 C-Rate) geladen, so verringert sich die verfügbare Kapazität bei der darauffolgenden Entladung drastisch – die Zelle kann mit niedriger Temperatur und hohem Ladestrom nicht vollständig geladen werden.

Die *Selbstentladung* ist bei der Li-Ionen-Type ebenfalls sehr stark temperaturabhängig. Mit zunehmender Außentemperatur wächst sie an. Die verschiedenen Literaturen sprechen bei Raumtemperatur von rund 1 – 5 %/Monat (Conte, 2006) und (Böhmer, Ehrhardt, & Oberschelp, 2007). Rückblickend betrachtet verlieren NiMH-Systeme diese Menge schon innerhalb eines Tages.

Betrachtet man die *Alterungsmechanismen* der Li-Ionen-Zellen, so erkennt man eine Abhängigkeit bezüglich der Entladetiefen DOD wie bei allen anderen Typen auch. Diese Batteriesysteme besitzen aber zusätzlich eine kalendarische Lebensdauer von nur rund 5 Jahren auch wenn sie nicht benutzt werden (Jossen & Weydanz, 2006). In den verschiedenen Literaturen werden Lebensdauern von rund 2 000 Zyklen (80 % DOD) angegeben (Conte, 2006) und (Naunin et al., 2007).

2.1.4 Nano-Batterien

Heutige Aktivmaterialien von Li-Ionen-Zellen haben eine Partikelgröße von rund 500 nm bis 20 µm. Von Nano-Li-Ionen-Zellen spricht man, wenn die Partikelgrößen etwa 50 nm betragen. Dadurch wird die Speicherfähigkeit erhöht, größere Lade- und Entladeströme werden möglich (Schnellladung), höhere Zyklenfestigkeit wird erreicht und viele Eigenschaften werden reversibel. Demgegenüber stehen das schlechte Sicherheitsverhalten durch reaktiver Oberfläche und deutlich höhere Herstellungskosten. Zurzeit befinden sich die Entwicklungen erst am Anfang. In Anbetracht der zurzeit noch fehlenden Kennwerte aus der Praxis werden diese Batterietypen im Folgenden nicht mehr betrachtet.

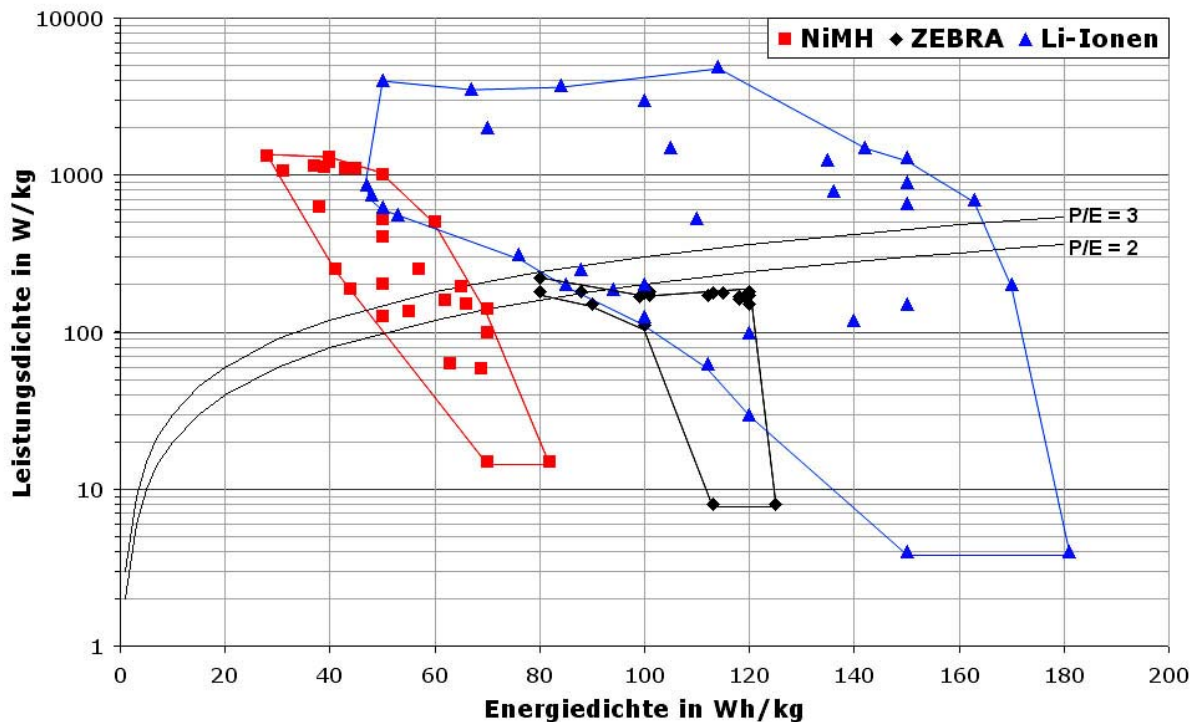


Abbildung 2.2: Ragone-Diagramm mit den drei Batterietechnologien NiMH, ZEBRA und Li-Ionen. Die P/E-Linien stellen die konstanten Verhältnisse Leistung zu Energie von 2 bzw. 3 dar. (Schuster, 2008)

2.2 Ladeprozesse der Li-Ionen-Batterien

Gegenwärtig werden vor allem bedingt durch hohe Energie- und Leistungsdichten die Lithium-Ionen-Systeme für Anwendungen im mobilen Bereich sehr stark forciert. Für die zukünftigen Belastungen des elektrischen Netzes sind die verwendeten Ladeverhalten der aktiven Elektrofahrzeugbatterien von großer Bedeutung.

Für Li-Ionen-Zellen wird die **I_U-Ladung**, im empfohlenen Temperaturbereich zwischen 0 und 40°C, hauptsächlich verwendet. Abbildung 2.3 zeigt dieses Aufladeverhalten. Ist die Spannung des Systems unterhalb der so genannten *Schnellladeschwelle* mit rund 3,0 V ist die Zelle tiefenentladen und muss daher mit einem kleinen Strom (kleiner 0,1 C-Rate) vorgeladen (in engl.: „pre-charge“ oder „conditioning charge“) werden, da sonst bedingt durch kleine Kurzschlüsse in der Zelle die Temperatur zu stark ansteigen würde (Jossen & Weydanz, 2006). Dann beginnt mit rund 1 C-Rate für Konsumerzellen und rund 4 C-Rate für Hochstromzellen die erste *I-Phase* (Konstantstrom). Die normale Zelle hat damit nach rund einer Stunde und die hochstromfähige schon nach 1,5 Minuten die *Ladeschlussspannung* und rund 80 % SOC (=State Of Charge) erreicht (Jossen & Weydanz, 2006).

Bei der damit anschließenden *U_a-Ladung* (Konstantspannung mit Abschaltung) ist auf eine exakte Einhaltung (± 20 mV) der Ladeschlussspannung, wie schon in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, zu achten. Die Vollladung dauert insgesamt rund 2 Stunden bzw. rund 1 Stunde, wenn man die Ladung mittels *Stromkriterium* bei einem üblichen Level zwischen 0,03 – 0,1 C-Rate abschaltet (Jossen & Weydanz, 2006).

Eine *Erhaltungsladung* wie bei NiMH-Systemen wird nicht durchgeführt, da sich diese negativ auf die Lebensdauer auswirken würde. Die Ladealgorithmen schalten nach dem

Erreichen der Vollladung vollständig ab. Erst wenn die Spannung wieder unter rund 4,0 V sinkt wird die IUa-Ladung wieder neu gestartet (Jossen & Weydanz, 2006).

Die für Li-Ionen-Systeme typische *coulombsche Wirkungsgrad*, also der Quotient aus der zuvor entnommenen zu der eingelagerten Ladungsmenge, $\eta_{Ah} = 0,999$ und der *Energiewirkungsgrad*, welcher zusätzlich auch die Spannungsverluste beinhaltet, $\eta_{Wh} = 0,95$ sind beachtlich gut.

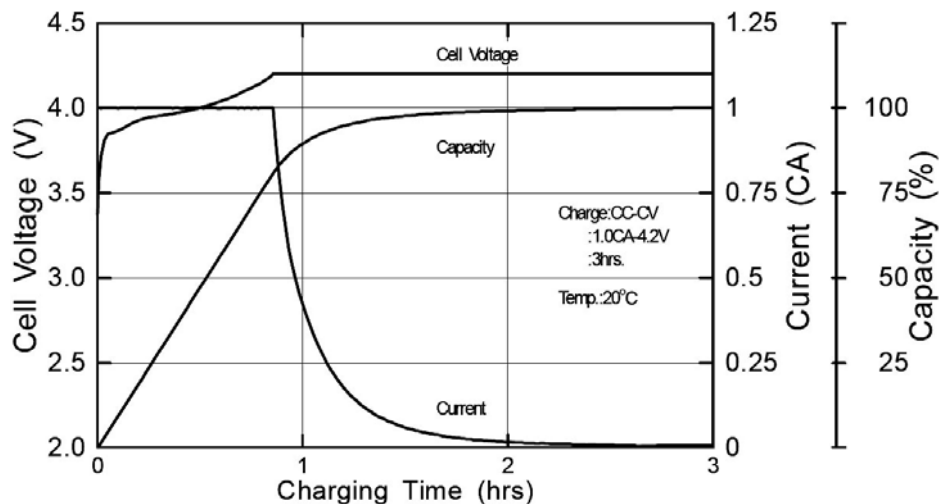


Abbildung 2.3: Aufladeverhalten einer herkömmlichen Li-Ionen-Batterie (Prinzip der Li-Ionen-Zelle)

2.3 Aufbau und Eigenschaften der Wasserstoffketten

Wie schon in der Einleitung erwähnt muss im Sinne der Nachhaltigkeit die Primärenergie aus erneuerbaren Quellen, wie Wasser-, Wind- und Solarkraft, stammen. Die Energiezwischenstufe wird hierbei immer eine elektrische sein. Demnach wird der Wasserstoff direkt aus, der zurzeit kaum verwendeten, Elektrolyse hergestellt.

Anschließend wird der Wasserstoff für die Speicherung aufbereitet um dann über ein Transport- oder Versorgungsnetz zum mobilen Speicher im Fahrzeug zu gelangen. In dieser Arbeit werden dann die drei Hauptspeicher (Druckwasserstoff-, Flüssigwasserstoff- und Metallhydridtank) noch näher behandelt. Abschließend wird der Wasserstoff mittels BZ (= Brennstoffzelle) wieder in elektrische Energie umgeformt. Die im mobilen Bereich zu favorisierende PEM (= Proton Exchange Membrane), welche anschließend ebenfalls näher betrachtet wird, benötigt außerdem diverse Nebengeräte wie Druckregelventile, Wasserstoffrückführung, Luftfilter, Kompressor, Kühlwassersystem, Heizung und eine konventionelle Batterie zum Hochfahren.

2.3.1 Elektrolyse

Die Elektrolyse ist die Zersetzung von Wasser in Wasser- und Sauerstoff durch Beifügung von elektrischer Energie mit einer Gleichspannung von 1,229 V bei 20°C. Typisch braucht man rund 50 kWh/kgH₂ für die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse (Romm, 2006). Interessante Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Erbauung eines Hochdruckelektrolyseurs mit Ausgangsdrücken von 150 bar oder mehr.

2.3.2 Aufbereitung des Wasserstoffs

Bei Umgebungsdruck und einer Temperatur von 20°C hat Wasserstoff eine Dichte von 0,09 kgH₂/m³ und einen Energiegehalt von 120 MJ/kg (Naunin et al., 2007). Diese geringe volumetrische Energiedichte macht es erforderlich den Wasserstoff aufzubereiten um höhere Speicherdichten zu erlangen. Zwei Methoden sind heutzutage üblich – die Kompression und die Verflüssigung.

Bei der *Kompression* wird der Wasserstoff in mehreren Stufen auf bis zu 700 bar zusammengedrückt. Die Dichte erhöht sich damit auf rund 40 kgH₂/m³ (Naunin et al., 2007) und man benötigt rund 5 kWh/kgH₂ (Romm, 2006).

Die *Verflüssigung* von Wasserstoff erreicht man mittels Claude-Prozesse bei einer Temperatur von 20,27 K bzw. -252,88°C. Die Dichte erhöht sich damit auf rund 50 – 71 kgH₂/m³ (Heinzel & Mahlendorf, 2006) und rund 12,5 – 15 kWh/kgH₂ (Romm, 2006) Energie ist notwendig.

2.3.3 CHG

Der Druckwasserstofftank CHG (= Compressed Hydrogen Gas) speichert den Wasserstoff bei heute schon üblichen 700 bar. Eine weitere Druckerhöhung würde keinen Anstieg bei der Energiedichte von rund 40 kgH₂/m³ ergeben.

Eine Schnellbetankung derartiger Speicher ist heute in wenigen Minuten möglich (Heinzel & Mahlendorf, 2006). Dabei erwärmt sich das einströmende Gas, was hohe thermische Anforderungen an die Behälter stellt. Befindet sich das System im erlaubten Bereich, so entstehen *keine Verluste* während der Speicherung. Bei der Entnahme müssen ein oder mehrere Druckregler das Gas auf den Betriebsdruck von etwa 3 bar herunterregeln.

Dieses System ist für die Zukunft zu favorisieren und mit dem folgend beschriebenen Flüssigwasserstofftank das zurzeit meist verwendete Speichermedium im mobilen Bereich.

2.3.4 LHG

Der Flüssigwasserstofftank LHG (= Liquid Hydrogen Gas), welcher den Wasserstoff bei -252,88°C mit einer Energiedichte von rund 50 – 71 kgH₂/m³ speichert, ist mit hohem Aufwand stark wärmeisoliert.

Die Betankung, die zurzeit mittels Roboterarm durchgeführt wird, kann ebenfalls in wenigen Minuten erfolgen. Wird der zulässige Betriebsdruck während der Speicherung von maximal 10 bar überschritten, so muss ein Sicherheitsventil ein Teil des Wasserstoffs ablassen – dies sind die so genannten „*Boil-Off*“-Verluste. Trotz sehr guter Isolierung verliert man dadurch rund 1 – 5 %/Tag (Romm, 2006) und (Gerl, 2002). Zur Wasserstoffentnahme wird der flüssige H₂ durch einen elektrischen Heizer (rund 2 – 3 W) im Tank verdampft und strömt über ein elektromagnetisches Absperrventil in Richtung BZ (von Helmholtz & Eberle, 2007).

Flüssigwasserstoffspeicher werden deshalb aus Gewichts- und Platzgründen überwiegend bei größeren und leistungsstarken Fahrzeugen, welche täglich in Betrieb sind, zum Einsatz kommen.

2.3.5 MH

Metallhydridspeicher MH verwenden ähnliche Materialien wie NiMH-Zellen wobei sie den Wasserstoff bei niedrigen Temperaturen absorbieren und bei höheren wieder abgeben. Die volumetrische Energiedichte ist mit rund $70 \text{ kgH}_2/\text{m}^3$ sehr hoch (Gerl, 2002). Doch bedingt durch das hohe Gewicht ist die gravimetrische Dichte niedriger als bei den anderen zwei Tanks.

Die Einbindung des Wasserstoffs läuft sehr stark exotherm ab, daher sind Schnellladungen nicht möglich und entweder der Wasserstoff oder das Tanksystem müssen vorgekühlt werden. Während der Speicherung entstehen *keine Verluste*, da erst bei Erreichen einer gewissen Temperatur Wasserstoff wieder freigesetzt wird. Zur Entnahme des Wasserstoffs wird zusätzlich zur Abwärme der BZ ein Heizsystem benötigt.

Neben dem hohen Gewicht, welches das größte Problem des zurzeit in Fahrzeugen noch nicht verwendeten Metallhydridspeichers darstellt, sind die Materialkosten hoch und eine aufwendige Tankstelleninfrastruktur wäre notwendig.

2.3.6 PEM-Brennstoffzelle

Brennstoffzellen wandeln, wie elektrochemische Elemente, chemische Energie direkt in elektrische Energie und Wärme um. Der Wärmeanteil ist bei den unterschiedlichen Brennstoffzellen meist größer als bei den Batterien. Als Energielieferant des Antriebsstranges bei mobilen Anwendungen, wie PKW, ist die durch ihren idealen Temperatur- und Leistungsbereich ausgezeichnete PEM-Brennstoffzelle zurzeit zu favorisieren. Deshalb wird im Folgenden nur auf diesen Typus näher eingegangen.

Bei dieser BZ besteht der *Elektrolyt* aus festen Polymerelementen, welche die Wasserstoffionen (Protonen) durchlassen. Entscheidend für die Leistungsdichte des gesamten Stacks ist, dass die Membran hohe Stromdichten zulässt. Es ist wichtig, dass der Elektrolyt immer einen konstanten Wassergehalt je nach verwendeter Membran zwischen rund 30 und 50 % besitzt. Dieses Wasser, welches ebenfalls zur Kühlung verwendet wird, begrenzt den erlaubten Temperaturbereich stark ein. Neu entwickelte Membranen aus Polybenzimidazol werden mit Phosphorsäure statt mit Wasser gefüllt, wodurch die Probleme sehr stark gelindert werden.

Um die Reaktion der Gase bei der Betriebstemperatur zu ermöglichen benötigt man einen *Katalysator*, der heutzutage aus Kohlefasern mit kostenintensivem Platin besteht. Außerdem ist Platin sehr empfindlich gegen CO-Verunreinigungen, was reinen Wasserstoff zwingend macht.

Die gesamte funktionsfähige BZ ist dann 800 – 900 μm dick (Jossen & Weydanz, 2006). In einer typischen Anwendung werden mehrere Hundert solcher Schichten zu einem *Brennstoffzellenstack* hintereinander geschaltet. Aus der Zahl der Zellen ergibt sich die Gesamtspannung und aus der Fläche der einzelnen Zelle die Stromstärke des gesamten Stacks.

Der erlaubte *Temperaturbereich* der BZ wird mit -25 bis 45°C angegeben, wobei in der Zelle Temperaturen zwischen 0 und max. 180°C möglich sind. Allgemein sind Leistungen von 1 W bis 100 kW erreichbar, wobei von Leistungsdichten von rund 1 – 2 kW/kg ausgegangen wird (Reisch, 2007), (Naunin et al., 2007) und (von Helmholt & Eberle, 2007).

Die theoretische *Ruhespannung* ist $U_0 = 1,23 \text{ V}$ und die *Leerlaufspannung* pendelt aufgrund von geringen Oxidationen von Platin sowie diversen Verunreinigungen zwischen rund $0,4 - 1,1 \text{ V}$ (Gerl, 2002).

Im Gegensatz zu den Akkumulatoren sind die *Entladeeigenschaften* der BZ völlig unabhängig vom Ladestand des Energiespeichers, wenn dieser nicht ganz leer ist. Hingegen mit steigender Stromdichte nimmt die tatsächliche Zellspannung bedingt durch diverse Überspannungen weiter ab. Dennoch steigt die Leistungsdichte kontinuierlich an und erreicht zwischen $0,4$ und $0,5 \text{ V}$ sein Maximum. Erhöht man den Strom weiter so brechen die Leistungsdichte und die Zellspannung sehr schnell ein. Der maximale Wirkungsgrad von rund 65% wird nur bei sehr niedrigen Stromdichten erreicht (Dilley, 2005).

Die hauptsächlichen *Alterungsmechanismen* sind wie schon oben beschrieben eine unzureichende Versorgung der Membranen mit Wasser sowie Wasserstoff mit zu hohem CO-Anteil. Unter optimalen Bedingungen ergibt sich eine Lebensdauer von rund $5\ 500 \text{ h}$ oder $80\ 000 \text{ km}$ (von Helmholt & Eberle, 2007).

3 Effizienzverhalten

Folgende Effizienzberechnungen beginnen bei der elektrischen Energie aus der Steckdose und enden wieder bei der elektrischen Energie für den Elektromotor bzw. Stromrichter im Fahrzeug. Ebenfalls wird die positiv nutzbare Rückgewinnung nicht berücksichtigt. Daher sind die folgenden Werte nicht zu verwechseln mit den in der Literatur oft verwendeten Grid-to-Wheel-Verbräuchen.

Bei den Wasserstoffketten sind die Verluste der Elektrolyse, Aufbereitung und Nebengeräte der BZ unabhängig vom verwendeten Tank und von den äußeren Bedingungen. Der Mittelwert aller Angaben aus den Quellen (Berger, 2007), (Boulouchos & Eberle, 2007), (Dilley, 2005), (Larminie & Dicks, 2005), (Romm, 2006) und (Geitmann, 2003) ergibt rund 30% Verluste bei der Elektrolyse.

Bei der Kompression ergeben die Quellen (Romm, 2006), (Berger, 2007), (Gerl, 2002), (Boulouchos & Eberle, 2007), (Heinzel & Mahlendorf, 2006) und (von Helmholt & Eberle, 2007) 13% Verluste des Wasserstoffenergiegehaltes. Umgerechnet auf die elektrische Energie aus der Steckdose ergibt dies 9% Verluste.

Im Durchschnitt braucht man bei der Verflüssigung schon 33% der H_2 -Energie, laut (Trueb & Rüetschi, 1998), (Dilley, 2005), (Romm, 2006), (Heinzel & Mahlendorf, 2006), (von Helmholt & Eberle, 2007), (Larminie & Dicks, 2005) und (Geitmann, 2003). Bezogen auf den elektrischen Strom aus der Steckdose ergibt dies 23% Verluste.

Die Nebengeräte der PEMFC, wie z.B. der Luftkompressor, Anodenpumpe und der Kühlkreislauf, brauchen laut (Gerl, 2002) und (Dilley, 2005) $21,3\%$ des Wasserstoffenergiegehaltes vor der BZ.

Im Folgenden werden die Effizienzberechnungen in vier verschiedene Anwendungsbereiche durchgeführt um sofort die einzelnen Schwächen bzw. Stärken der drei Batterie- sowie H_2 -BZ-Fahrzeugtanktypen zu erkennen.

3.1 Effizienzverhalten unter Idealbedingungen

Unter den Idealbedingungen wird das Elektrofahrzeug täglich benutzt, die Umgebungstemperatur beträgt 20°C und der Entladestrom ist 1 C-Rate.

3.1.1 Idealbedingungen – Batteriesysteme

Die Ladeschaltungen der *NiMH-Batterien* benötigen rund 3 % (Berger, 2007) und aus dem Energiewirkungsgrades von $\eta_{Wh} = 0,65$ (Jossen & Weydanz, 2006) dieser Zellen ergibt sich ein zusätzlicher Verlust von 33,9 % der Gesamtenergie durch das Ladeverfahren. Aus der Entladekurve von (Datenblatt) lassen sich Entladeverluste von 3,2 % der Gesamtenergie herauslesen. Daher wird bei **NiMH-Systeme unter Idealbedingungen 59,9 %** der elektrischen Energie aus der Steckdose dem Elektromotor zugeführt.

Bei der *ZEBRA-Batterie* hat die Ladeschaltung und das Ladeverfahren einen Wirkungsgrad von 90 % (CEBI Deutschland Vertriebs-GmbH). Um das System auf der hohen Betriebstemperatur zu halten benötigt man wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben 5 W pro kWh Speichergröße. Unter diesen Bedingungen soll die Batterie 24 Stunden betriebsbereit sein und daher verbraucht die Heizung 12 % der Speicherenergie oder 10,8 % der Gesamtenergie. Die Entladeverluste während der Fahrt werden direkt zur Temperaturstabilisierung genutzt. Unter dem Strich bleibt für den Elektromotor bei Verwendung einer **ZEBRA-Batterie unter Idealbedingungen 79,2 %** der eingesetzten elektrischen Energie übrig.

Auch bei den *Li-Ionen-Systemen* verbrauchen die Ladeschaltungen 3 % (Berger, 2007), aber der Energiewirkungsgrad ist wie in Abschnitt 2.2 ersichtlich mit 95 %, das ergibt einen Verlust von weiteren 4,8 % der elektrischen Energie aus der Steckdose, sehr viel besser. Auch die Entladeverluste wie in (Jossen & Weydanz, 2006) ersichtlich betragen nur 1,8 % der Gesamtenergie. Demnach werden bei **Li-Ionen-Systeme unter Idealbedingungen 90,4 %** der eingesetzten elektrischen Energie weitergegeben.

3.1.2 Idealbedingungen – Wasserstoffsysteme

Beim *CHG-Tanksystem* werden durch Elektrolyse und Kompression wie schon am Anfang des Kapitels 3 berechnet 39 % vergeudet. Beim Auftanken gehen laut (von Helmholtz & Eberle, 2007) rund 5% des komprimierten Wasserstoffs verloren. Wieder umgerechnet auf die elektrische Energie ergibt dies 3% Verluste/Auftanken. Unter Idealbedingungen fallen in der BZ im Durchschnitt 30% Verluste bezogen auf den Wasserstoffenergiegehalt vor der BZ an, laut (Gerl, 2002), (Ingenieure, 1998), (Dildey, 2005), (Berger, 2007), (Boulouchos & Eberle, 2007) und (Reisch, 2007). Das sind für die BZ 17 % und für die Nebengeräte unter Verwendung des schon am Anfang des Kapitels 3 berechneten Werts 12 % bezogen auf die Gesamtenergie. Somit ist der Wirkungsgrad des H₂-BZ-Systems mit **CHG-Tank unter Idealbedingungen 29 %**.

Das Elektrofahrzeug mit *LHG-Tank* hat bedingt durch Elektrolyse und Verflüssigung schon 53 % Verluste. Laut (Romm, 2006) und (Gerl, 2002) ergeben sich im Durchschnitt 3% Boil-Off-Verluste pro Tag. Bezogen auf die Gesamtenergie ergibt das 1,5 % Boil-Off-Verluste, 14 % Verluste der BZ und 10 % Verluste der Nebengeräte. Daher wird bei einem H₂-BZ-System mit **LHG-Tank unter Idealbedingungen 21,5 %** der elektrischen Energie aus der Steckdose dem Elektromotor zugeführt.

Beim *MH-Tank* verfällt die Aufbereitung und daher sind anfangs nur die 30 % der Elektrolyse einzurechnen. Dann ergeben sich beim Auftanken Verluste von rund 20% nach Berechnungen mit den Werten aus (von Helholt & Eberle, 2007). Bezogen auf die elektrische Energie ergibt dies 14% Verluste/Auftanken. Die BZ verliert weitere 17 % und die Nebengeräte 12 % der Gesamtenergie. Demnach werden bei H₂-BZ-Systemen mit **MH-Tank unter Idealbedingungen 27 %** der eingesetzten elektrischen Energie weitergegeben.

3.2 Effizienzverhalten unter sporadischer Verwendung

In diesem Anwendungsfall wird das Elektroauto nur einmal im Monat verwendet. Die Umgebungstemperatur von 20°C und der Entladestrom von 1 C-Rate sind gleich wie unter Idealbedingungen.

3.2.1 Sporadische Verwendung – Batteriesysteme

Beim *NiMH-System* kommt zu den schon bekannten Ladeschaltungs- und Ladeverfahrensverluste noch die Selbstentladung, wie in Abschnitt 2.1.1 schon beschrieben, mit 23 %/Monat bzw. 14,5 % der Gesamtenergie dazu. Die schon deklarierten Entladeverluste ergeben dann 2,4 % der Ausgangsenergie. Daher wird bei **NiMH-Systeme unter sporadischer Verwendung 46,2 %** der elektrischen Energie aus der Steckdose dem Elektromotor zugeführt.

Unter diesen Rahmenbedingungen ist es bei Verwendung der *ZEBRA-Zelle* aus energetischer Sicht unbedingt notwendig das Heizsystem abzuschalten und rund 2 Tage vor Gebrauch wieder einzuschalten. Damit ergibt sich neben den Verlusten aus der Ladeschaltung und des –verfahrens eine gesamte Heizdauer von 60 Stunden inklusive Entladeverluste beim Fahren. Die Heizverluste betragen dann 27 % der Gesamtenergie. Unter dem Strich bleibt für den Elektromotor bei Verwendung einer **ZEBRA-Batterie unter sporadischer Verwendung 63 %** der eingesetzten elektrischen Energie übrig.

Bei den *Li-Ionen-Systemen* ist bei dieser Verwendung im Unterschied zu Idealbedingungen nur noch die Selbstentladung von, wie in Abschnitt 2.1.3 schon beschrieben, 3 %/Monat bzw. 2,8 % der Gesamtenergie dazuzurechnen. Die Entladeverluste sind dann mit 1,8 % der eingesetzten Energie zu betiteln. Demnach werden bei **Li-Ionen-Systeme unter sporadischer Verwendung 87,6 %** der eingesetzten elektrischen Energie weitergegeben.

3.2.2 Sporadische Verwendung – Wasserstoffsysteme

Da im *CHG-Tank* bei Stillstand des Fahrzeugs kein Wasserstoff verloren geht, sind die Verluste der Wasserstoffkette bei einmaliger Verwendung innerhalb eines Monats gleich wie unter Idealbedingungen. Somit ist der Wirkungsgrad des H₂-BZ-Systems mit **CHG-Tank unter sporadischer Verwendung 29 %**.

Hingegen beim *LHG-Tank* werden noch zusätzlich 43,7 % der Gesamtenergie als Boil-Off-Verluste abgezogen. Die BZ verliert dann nur noch 1 % und die Nebengeräte 0,5 % der elektrisch eingesetzten Energie. Daher wird bei einem H₂-BZ-System mit **LHG-Tank unter sporadischer Verwendung nur mehr der theoretische Wert von 1,8 %** der elektrischen Energie aus der Steckdose dem Elektromotor zugeführt.

Beim *MH-Tank* ist es analog wie im komprimierten Fall, also keine zusätzlichen Verluste durch die Standzeit. Demnach werden bei H_2 -BZ-Systemen mit **MH-Tank unter sporadischer Verwendung 27 %** der eingesetzten elektrischen Energie weitergegeben.

3.3 Effizienzverhalten unter Niedrigtemperaturbedingungen

In dieser Kategorie wird das Elektroauto wieder täglich benutzt und der Entladestrom ist noch immer 1 C-Rate, aber die Umgebungstemperatur beträgt -10°C .

3.3.1 Niedrigtemperaturbedingungen – Batteriesysteme

Betrachtet man vergleichend die Werte der *NiMH-Systeme* unter Idealbedingungen so entstehen bei niedrigen Temperaturen ausschließlich höhere Entladeverluste von 15,8 % der Gesamtenergie, herausgelesen aus der Kurve von (Datenblatt). Daher wird bei **NiMH-Systeme unter Niedrigtemperaturbedingungen 47,3 %** der elektrischen Energie aus der Steckdose dem Elektromotor zugeführt.

Bei den *ZEBRA-Systemen* sind die Verluste komplett gleich wie unter Idealbedingungen, da bei einer Betriebstemperatur von 300°C diese äußere Umstandsänderung nur marginal ist. Demnach werden bei **ZEBRA-Batterien unter Niedrigtemperaturbedingungen 79,2 %** der eingesetzten elektrischen Energie weitergegeben.

Werden, wie in Abschnitt 2.1.3 schon beschrieben, *Li-Ionen-Zellen* unter niedrigen Temperaturen mittels normalen oder hohen Strömen aufgeladen, so verliert man beim folgenden ebenfalls bei -10°C stattfindenden Entladevorgang 25,1% der Gesamtenergie (dieser Wert stammt aus einer Abschätzung aus (Jossen & Weydanz, 2006)). Dafür sind bei den Verlusten der Ladeschaltung und des –verfahrens die gleichen Werte wie unter Idealbedingungen anzunehmen. Unter dem Strich bleibt für den Elektromotor bei Verwendung einer **Li-Ionen-Batterie unter Niedrigtemperaturbedingungen 67,1 %** der eingesetzten elektrischen Energie übrig. Nach einer eigenen groben Abschätzung aus dem Kapitel in (Jossen & Weydanz, 2006) kann man sich rund 10% der Verluste ersparen, wenn man nur die Aufladung bei 20°C durchführt.

3.3.2 Niedrigtemperaturbedingungen – Wasserstoffsysteme

Bis auf das BZ-System im Fahrzeug ist kein Schritt in der Ablaufkette abhängig von der Außentemperatur. Die BZ muss, wenn sie Wasser im Elektrolyten hat, immer eine Temperatur über 0°C besitzen. Daher wird das System vor Antritt der Fahrt beheizt werden müssen. Während des Betriebs ist die niedrige Temperatur sogar sehr gut für die Kühlung. Aufgrund der geringen Verluständerung und der fehlenden Daten in den Literaturen sind die gleichen Werte wie unter Idealbedingungen anzunehmen.

Unter Niedrigtemperaturbedingungen besitzt der CHG-Tank 29 %, der LHG-Tank 21,5 % und der MH-Tank 27 % Wirkungsgrad.

3.4 Effizienzverhalten unter Hochstrombedingungen

Zuletzt wird unter sonstigen Idealbedingungen noch der Entladestrom auf 5 C-Rate erhöht.

3.4.1 Hochstrombedingungen – Batteriesysteme

Bei den *NiMH-Systemen* erkennt man aus der Entladekurve in (Jossen & Weydanz, 2006) einen höheren Verlust von 7,8 % der Gesamtenergie. Bei der Ladung ändert sich zur Idealbedingung nichts. Daher wird bei **NiMH-Systeme unter Hochstrombedingungen 55,3 %** der elektrischen Energie aus der Steckdose dem Elektromotor zugeführt.

Bei der *ZEBRA-Zelle* macht sich der unter Abschnitt 2.1.2 beschriebene Innenwiderstand deutlich bemerkbar und erhöht die Verluste des Heizens und der Entladung auf 28,8 % der Gesamtenergie. Unter dem Strich bleibt für den Elektromotor bei Verwendung einer **ZEBRA-Batterie unter Hochstrombedingungen 61,2 %** der eingesetzten elektrischen Energie übrig.

Aus der Entladekurve einer *Li-Ionen-Zelle* in (Jossen & Weydanz, 2006) ist ersichtlich, dass der erhöhte Strom keine weiteren Verluste verursacht. Demnach werden bei **Li-Ionen-Systeme unter Hochstrombedingungen 90,4 %** der eingesetzten elektrischen Energie weitergegeben.

3.4.2 Hochstrombedingungen – Wasserstoffsysteme

Einzig die BZ verändert ihre Verluste auf 58 % bezogen auf den Wasserstoffenergieinhalt laut (Gerl, 2002), (Ingenieure, 1998), (Dildey, 2005), (Berger, 2007), (Boulouchos & Eberle, 2007) und (Reisch, 2007).

Unter Verwendung eines *CHG-Tanks* ergibt sich der Verlust für die BZ zu 34 % der Gesamtenergie. Somit ist der Wirkungsgrad des H₂-BZ-Systems mit **CHG-Tank unter Hochstrombedingungen 12 %**.

In einem Elektrowasserstofffahrzeug mit *LHG-Tank* sind dies 26 % der Gesamtenergie allein für die BZ. Daher wird bei einem H₂-BZ-System mit **LHG-Tank unter Hochstrombedingungen 9,5 %** der elektrischen Energie aus der Steckdose dem Elektromotor zugeführt.

Eine BZ kombiniert mit einem *MH-Tank* verursacht Verluste in der Höhe von 32,5 % der Gesamtenergie. Demnach werden bei H₂-BZ-Systemen mit **MH-Tank unter Hochstrombedingungen 18,5 %** der eingesetzten elektrischen Energie weitergegeben.

3.5 Zusammenfassung der Effizienzen

Abbildung 3.1 zeigt eine Zusammenfassung der Effizienzwerte der drei Batterie- sowie H₂-BZ-Fahrzeugsysteme unter den vier unterschiedlichen Bedingungen.

Die NiMH- und die ZEBRA-Systeme besitzen ihre niedrigsten Effizienzwerte unter sporadischer Verwendung. Bei Li-Ionen-Batterien bewirken die niedrigen Temperaturen die größten Einbußen.

Der CHG- und der MH-Tank bringen unter der Hochstrombedingung ihr schlechtestes Ergebnis. Den LHG-Tank versagt bei sporadischer Verwendung fast gänzlich.

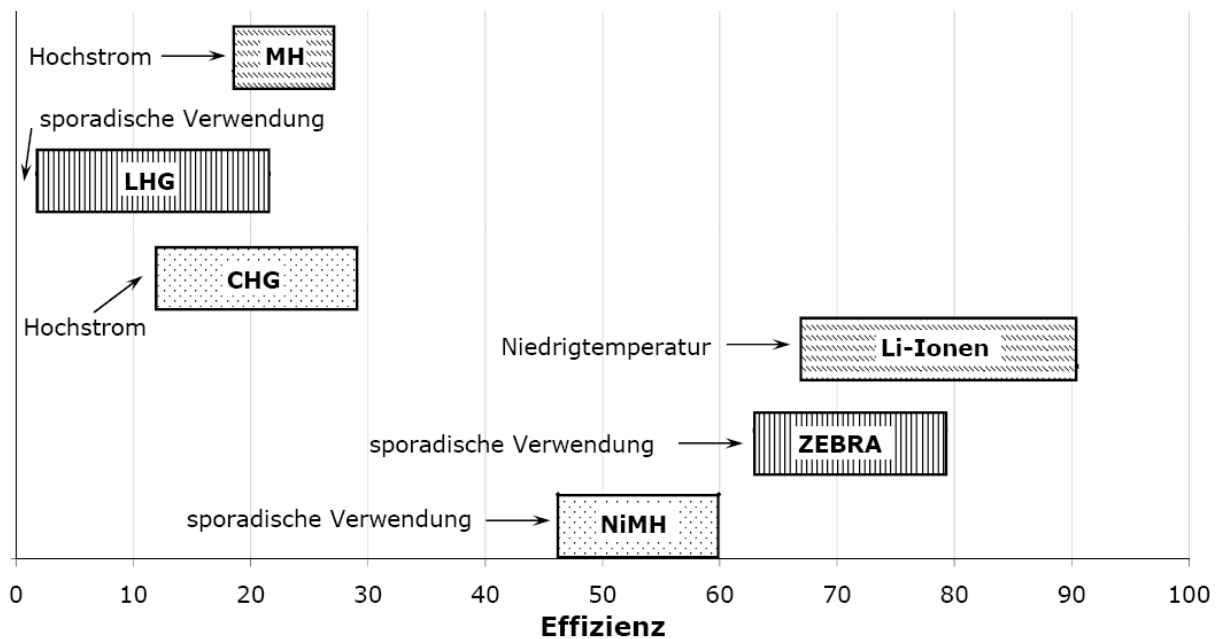


Abbildung 3.1: Vergleich der resultierenden Effizienzbänder der drei Batterie- sowie H₂-BZ-Fahrzeugsysteme unter den oben beschriebenen Bedingungen

4 Statische Investitionskosten

Die folgenden wirtschaftlichen Berechnungen beruhen auf rein statischen Ermittlungsmethoden. Die energie- bzw. leistungsbezogenen Kosten werden ohne Abschreibungen bzw. Annuitäten kalkuliert. Allgemein gelten Preise der drei Batterie- bzw. Wasserstofftechnologien als gut gehütete Geheimnisse und sind in Literaturen nur sehr schwer zu finden.

4.1 Statische Investitionskosten der Batterietypen

Die *NiMH-Systeme* brauchen am meisten immer teuer werdendes Nickel und könnten dadurch in den massestarken Traktionsanwendungen zukünftig einen großen Nachteil erfahren. Die Erhöhung des Nickelpreises ist auch der Grund für die steigenden Preise der NiMH-Batterien in den Jahren 2006 und 2007 wie in Abbildung 4.1 gut ersichtlich ist. Der für das Jahr 2010 prognostizierte sehr niedrige NiMH-Batterienpreis ist aus diesem Grund noch sehr fragwürdig und vielleicht eher als Wunschdenken einzuordnen.

Bei der *ZEBRA-Technologie* spricht die Quelle (Ingenieure, 1998) von einem langfristigen Ziel von 140 €/kWh. Laut (Gerl, 2002) ist heutzutage mit einem Preis von rund 300 €/kWh und in näherer Zukunft mit rund 225 €/kWh zu rechnen.

Bei *Li-Ionen-Batterien* ist der allgemeine Abwärtstrend der Preisentwicklung in Abbildung 4.1 klar ersichtlich. Für das vergangene Jahr 2007 sprechen die zwei Quellen (Sauer, 2007) und (Engel, 2007) von zwei sehr unterschiedlichen Preisbändern. Nach der niedrigeren Berechnung sind die Li-Ionen-Systeme schon billiger als die mit NiMH.

Nach allen diesen Prognosen wird das von der USABC (= engl.: United States Advanced Battery Consortium), das ist eine Plattform die mit Forschungsgeldern der amerikanischen Regierung Firmen in aller Welt bei der Neuentwicklung von Batteriesystemen unterstützt, ausgesprochene wirtschaftliche Ziel von keiner Batterietechnologie erreicht.

Die leistungsbezogene Preise hingegen lagen in den Jahren 2006 und 2007 bei NiMH-Batterien ziemlich stabil auf rund 20 €/kWh. Bei den Li-Ionen-Systemen ergab sich 2006 laut (Conte, 2006) ein Preisband von rund 60 bis 100 €/kWh und im Jahr 2007 laut (Sauer, 2007) sogar von rund 10 bis 120 €/kWh. Auch bei dieser Berechnung gab es 2007 Li-Ionen-Zellen die billiger als die älteren Kollegen bestehend aus NiMH waren.

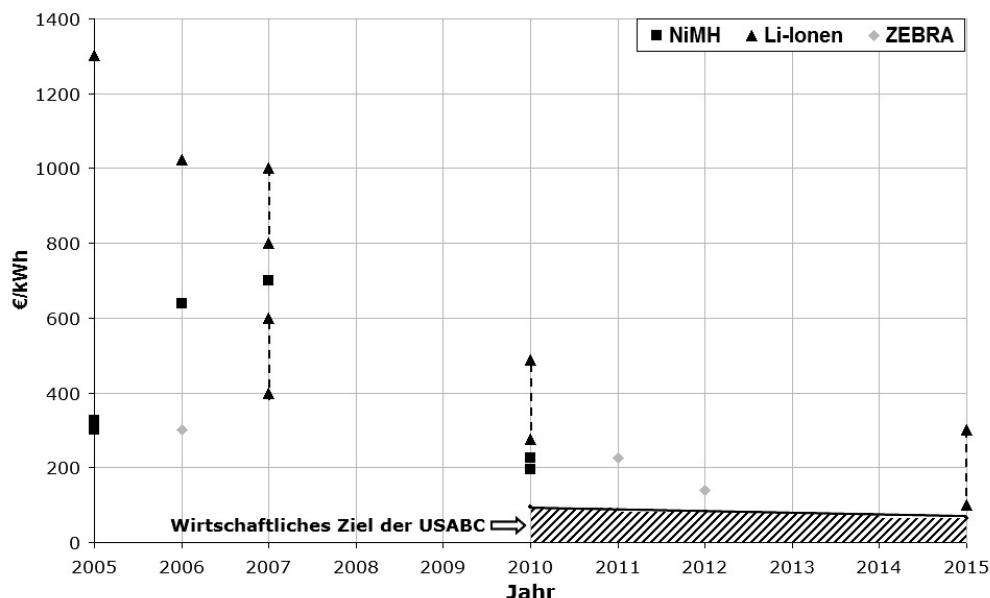


Abbildung 4.2: Derzeitige und zukünftige Preisentwicklung der drei Batterietypen sowie das wirtschaftliche Ziel der USABC (Schuster, 2008)

4.2 Statische Investitionskosten der Wasserstoffketten

Neben der Anschaffung des eigentlichen H₂-BZ-Fahrzeugs muss noch viel Geld in die Erschaffung einer Wasserstoffinfrastruktur gesteckt werden. Elektrolyseure, Hochdruckkompressoren, Verflüssiger, H₂-Pipelines und H₂-Tankstellen um nur die wichtigsten Elemente zu nennen müssen flächendeckend installiert werden.

Im H₂-BZ-Fahrzeug kann prinzipiell die Tankgröße völlig unabhängig von der Brennstoffzellenleistung dimensioniert werden. Der Tank wird hierbei nach dem Energieinhalt, also kWh, und die BZ nach der Leistung, also kW, berechnet. In der Praxis wird zurzeit noch beide Größen durch den Hersteller abgestimmt, da der verfügbare Platz und die gewünschte Leistung durch die Verwendung bestehender Karosserietypen sowie bekannter Fahrzeugklassen fest stehen. So findet man in verschiedenen Quellen Absolutpreise für Tanks sowie BZ.

Die 700 bar *CHG-Tanks* sind die billigsten. Das jetzige Preisniveau bewegt sich zwischen 2 000 und 3 700 € und bei Massenproduktion kann es auf rund 400 – 600 € fallen (Gerl, 2002), (Dildey, 2005). Laut (Schoenung & Hassenzahl, 2003) besitzen CHG-Tanks einen energiespezifischen Preis von rund 13 €/kWh.

Für die zurzeit teuerste Variante, der *LHG-Tank*, muss rund 12 000 € gezahlt werden (Gerl, 2002). Unter einer Massenproduktion muss man mit einem Preis von rund 1 000 € rechnen.

Ein typischer *MH-Speichertank* kostet jetzt rund 10 000 € (Gerl, 2002). Dieser Wert liegt im Mittelfeld. Da dieser Tanktyp von den Rohstoffpreisen sehr abhängig ist und die meisten Bestandteile in ihren Vorkommen begrenzt sind, erwartet man unter zukünftiger Massenproduktion im Gegensatz zu den anderen Technologien keinen Preisfall.

Bei der Anschaffung einer PEMFC ist nun die gewünschte Nennleistung in kW entscheidend. Alle Nebengeräte sind natürlich auf diese Leistung abgestimmt. Abbildung 4.2 zeigt den Preisverlauf der PEMFC mit allen notwendigen Nebengeräten und das wirtschaftliche Ziel für eine erfolgreiche Masseneinführung.

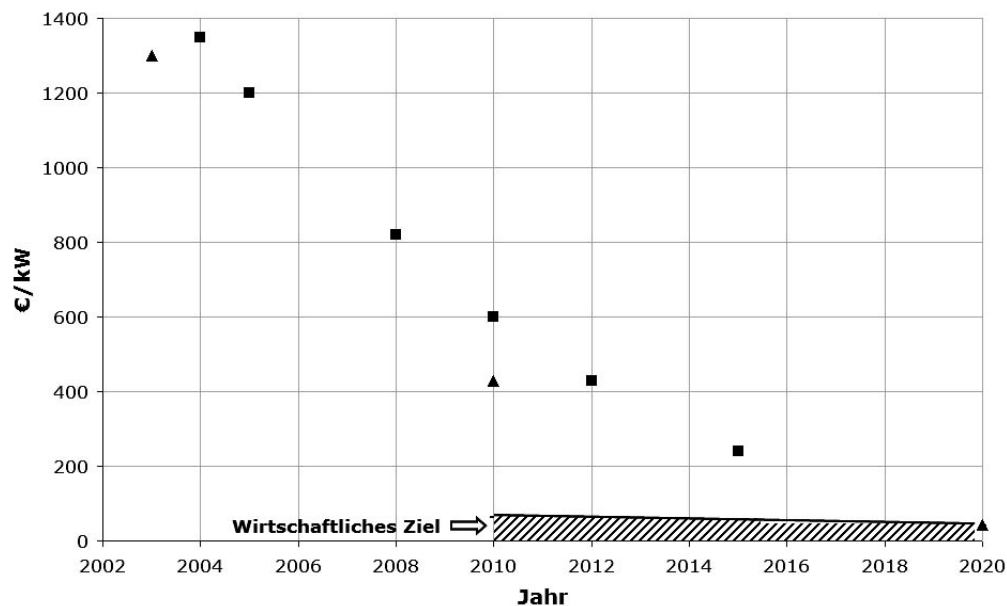


Abbildung 4.3: Derzeitige und zukünftige Preisentwicklung der PEMFC mit allen Nebengeräten sowie das wirtschaftliche Ziel der Masseneinführung (Schuster, 2008)

5 Schlussfolgerungen

Im direkten Vergleich der drei Batterietechnologien stechen die **Li-Ionen-Systeme** mit ihren hohen Energie- und Leistungsdichten, den höchsten Effizienzwerten und den immer niedriger werdenden Kosten stark heraus. Der große Vorteil der zwei anderen Batterietypen ist, dass sie schon in der erforderlichen Speichergröße hergestellt und in Elektrofahrzeuge verwendet wurden. Werden jedoch die Probleme der zur kurzen kalendarischen Lebensdauer sowie der Sicherheit gelöst, so setzen sich die Li-Ionen-Zellen durch.

Im Sinne der anfangs beschriebenen Nachhaltigkeit verlieren alle Wasserstoffketten bedingt durch die notwendige Elektrolyse in puncto Effizienz sehr stark. Am besten schlägt sich noch der **CHG-Tank**, da er kostengünstigster und marktreifer als der beinahe effizienzgleiche MH-Tank ist. Auch ist die gesamte Kette komplex und mit der notwendigen Infrastruktur viel teurer als die Batterielösung. Beim Wiederaufladen bzw. Tanken ist der Zeitvorteil der H₂-BZ-Fahrzeuge nicht zu schlagen und auch die Reichweiten mit einer Tankfüllung sind rund doppelt so hoch.

6 Literaturverzeichnis

- (kein Datum). Abgerufen am 5. Juni 2008 von CEBI Deutschland Vertriebs-GmbH: http://www.cebi.com/cebi/content/index_en.html?a=5&b=9&c=19&d=72
- Berger, H. (2007). Was treibt Autos von morgen an? *Vortrag an der FH Joanneum*. Kapfenberg.
- Besenhard, J. O. (Hrsg.). (1999). *Handbook of battery materials*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Böhmer, E., Ehrhardt, D., & Oberschelp, W. (2007). *Elemente der angewandten Elektronik: Kompendium für Ausbildung und Beruf* (15. Ausg.). Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- Boulouchos, K., & Eberle, M. K. (2007). Szenarien einer automobilen Zukunft. *Vortragstagung SSM*. ETH Zürich.
- Conte, F. V. (2006). *Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review*. Arsenal Research, Geschäftsfeld Monitoring. Berlin: Springer-Verlag.
- Datenblatt*. (kein Datum). Abgerufen am 20. März 2008 von Nickel Metal Hydride Batteries: High-energy Batteries to Launch a New Era of Products: http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_NiMH_Overview.pdf
- Dhameja, S. (2002). *Electric vehicle battery systems*. Amsterdam: Elsevier Verlag.
- Dilley, A. (2005). *Die PEM-Brennstoffzelle als alternativer PKW-Antrieb*. Aachen: Shaker Verlag.
- Engel, T. (2007). *Plug-in Hybrids: Studie zur Abschätzung des Potentials zur Reduktion der CO₂-Emissionen im PKW-Verkehr bei verstärkter Nutzung von elektrischen Antrieben im Zusammenhang mit Plug-in Hybrid Fahrzeugen*. München: Verlag Dr. Hut.
- Geitmann, S. (2003). *Wasserstoff & Brennstoffzellen: Die Technik von morgen!* Christiani Verlag.
- Gerl, B. (2002). *Innovative Automobilantriebe: Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien und alternativen Kraftstoffen*. Landsberg: Verlag Moderne Industrie.
- Heinzel, A., & Mahlendorf, F. (2006). *Brennstoffzellen: Entwicklung, Technologie, Anwendung* (3. Ausg.). Heidelberg: C. F. Müller Verlag.
- Ingenieure, V. D. (Hrsg.). (1998). *Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybrid-Fahrzeuge: Tagung Dresden, 17. und 18. Februar 1998*. Düsseldorf: VDI Verlag.
- Jossen, A., & Weydanz, W. (2006). *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Neusäß: Ubooks Verlag.
- Larminie, J., & Dicks, A. (2005). *Fuel cell systems explained* (zweite Ausg.). Wiley Verlag.
- Naunin et al., D. (2007). *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen* (4. Ausg.). Renningen: Expert Verlag.
- Prinzip der Li-Ionen-Zelle*. (kein Datum). Abgerufen am 5. Mai 2008 von SANYO Component Europe GmbH: <http://www.sanyo-component.com/mc/products/industrial-batteries/technical-handbooks/li-ion.html>
- Reisch, M. (2007). *Elektronische Bauelemente: Funktion, Grundschaltungen, Modellierung mit SPICE* (zweite Ausg.). Berlin: Springer-Verlag.
- Romm, J. J. (2006). *Der Wasserstoff-Boom*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Sauer, D. U. (2007). *Energiespeicher in Fahrzeugen. "Life needs power" - Hannovermesse 2007*. Hannover: RWTH Aachen.

Schoenung, S. M., & Hassenzahl, W. V. (2003). *Long- vs. Short-Term Energy Storage Technologies Analysis - A Life-Cycle Cost Study - A Study for the DOE Energy Storage Systems Program*. Sandia National Laboratories.

Schuster, A. (2008). *Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen*. Wien: Diplomarbeit.

Stan, C. (2005). *Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger*. Berlin: Springer-Verlag.

Trueb, L. F., & Rüetschi, P. (1998). *Batterien und Akkumulatoren: mobile Energiequellen für heute und morgen*. Berlin: Springer-Verlag.

Vincent, C. A., & Scrosati, B. (1997). *Modern Batteries: An Introduction to electrochemical power sources* (zweite Ausg.). London: Arnold.

von Helmolt, R., & Eberle, U. (Jänner 2007). Fuel cell vehicles: Status 2007. *Journal of Power Sources* (165), S. 833-843.