

Speichertechnologien in Elektroautos und für  
Photovoltaikstrom in Hinblick auf ein autarkes  
Gesamtsystem

**Studienarbeit**

**TU Bergakademie Freiberg**  
IEC - Institut für Energieverfahrenstechnik  
und Chemieingenieurwesen

**Verfasser: Karl Bedrich**

**Datum der Abgabe: 04.07.2010**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Situation und Überblick zur Elektromobilität in Deutschland</b> .....	<b>5</b>
1.1 Erneuerbare Energien als Zukunftsressource.....	5
1.2 Vorteile stromgetriebener Antriebe gegenüber Verbrennungsmotoren.....	6
1.3 Der nationale Entwicklungsplan Elektromobilität.....	8
<b>2 Speicherung, Pufferung und Verfügbarkeit von Photovoltaikstrom in Bezug auf mobile und stationäre Systeme</b> .....	<b>10</b>
2.1 Grundlagen zur Photovoltaik.....	10
2.1.1 Verfügbarkeit der photoelektrischen Energie.....	10
2.1.2 Technische Umsetzung.....	11
2.2 Möglichkeiten zur Speicherung regenerativer Energie.....	13
2.2.1 Anforderungen an Speichersysteme.....	14
2.2.2 Synthetische Kraftstoffe als Energiespeicher.....	14
2.2.3 Mechanische Energiespeicher.....	15
2.2.4 Elektrische Energiespeicher.....	16
2.2.5 Elektrochemische Energiespeicher .....	17
2.3 Anwendungsbeispiele für Photovoltaikstrom.....	19
<b>3 Beschreibung der physikalischen und chemischen Prozesse elektrochemischer Speicher</b> .....	<b>22</b>
3.1 Vergleichende Kennzahlen.....	23
3.2 Blei-Säure.....	26
3.3 Nickel-basiert.....	29
3.3.1 Nickel-Cadmium.....	29
3.3.2 Nickel-Metallhydrid.....	31
3.3.3 Nickel-Zink.....	33
3.4 Metall-Luft.....	35
3.4.1 Zink-Luft.....	36
3.4.2 Aluminium-Luft.....	37
3.4.3 Lithium-Luft.....	38
3.5 Lithium-Ion.....	39
3.5.1 Batterietypen.....	40
3.5.2 Aufbau und Funktion.....	42
3.5.3 Schaltung für Großbatterien.....	43
3.5.4 Forschungs- und Entwicklungslinien.....	44
3.6 Hochtemperaturbatterien.....	48

3.6.1	Natrium-Nickelchlorid.....	49
3.6.2	Natrium-Schwefel.....	50
3.7	Redox-Flow.....	52
3.7.1	Vanadium.....	53
3.7.2	Vanadium-Brom.....	54
3.7.3	Natrium-Polysulfid-Bromid.....	54
3.8	Hybrid-Flow.....	55
3.8.1	Zink-Brom.....	55
3.8.2	Cer-Zink.....	57
3.9	Auswertung der Vergleichsmatrix.....	58
<b>4</b>	<b>Entwicklungstendenzen zwischen Elektromobilität und Energiewirtschaft</b>	<b>60</b>
4.1	E-Energy / Smart Grid.....	61
4.2	Virtuelle Kraftwerke.....	62
4.3	Ausbau der Stromtrassen.....	64
4.4	Energieladesysteme.....	66
4.4.1	Stromtankstellen.....	66
4.4.2	Austausch der Energiespeicher.....	68
4.4.3	Induktive Energieübertragung.....	68
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>69</b>
	Literaturverzeichnis:.....	70
	Abbildungsverzeichnis.....	77
	Tabellenverzeichnis.....	78
	<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>79</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>80</b>

## **Abstract**

This literature research gives an overview about the various possibilities of energy storage for photovoltaics and electric vehicles. Therefore it discusses the general need for buffering and storage of renewable energy, the political setting and economic progress of electric mobility. Configurations, chemical reactions, advantages and disadvantages of lead-, nickel-based-, metal-air, lithium-, high-temperature and redox-flow-batteries are discussed in concise form. A table of miscellaneous batteries sorted by their electrical and physical characteristics is attached to this document.

# 1 Situation und Überblick zur Elektromobilität in Deutschland

## 1.1 Erneuerbare Energien als Zukunftsressource

Mit einem Marktanteil von ca. 16% an der deutschen Stromversorgung sind die erneuerbaren Energien ein wesentlicher Bestandteil der Energiewirtschaft geworden.

Einige ihrer Vorteile sind:

- Im Rahmen der Energieerzeugung entstehen eher zu vernachlässigende CO<sub>2</sub>-Emissionen.
- Die umgesetzten Rohstoffe sind unerschöpflich bzw. sind nach menschlichen Maßstäben erneuerbar.
- Unabhängigkeit gegenüber Rohstoffimporten. Dies garantiert eine gewisse Preisstabilität und vermeidet rohstoffbezogene Konflikte.
- Die Anlagen zur Erzeugung regenerativer Energie sind recyclebar. Es entstehen weder strahlende Altlasten noch Kohlegruben.
- Als regional verfügbare Energieressource sichern und schaffen sie regionale Arbeitsplätze.
- Da der Zugang zu regenerativen Energien sich nicht an wenigen Orten manifestiert, stellen sie eine Option zum Aufbau in Entwicklungsländern dar.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> vgl. [4] S. 8

## 1.2 Vorteile stromgetriebener Antriebe gegenüber Verbrennungsmotoren

Motoren mit interner Verbrennung konnten sich gegenüber dem Elektromotor bereits Anfang des 20. Jahrhunderts durchsetzen und wurden kontinuierlich weiterentwickelt, während der Elektromotor für Automobile bis heute eher ein Schattendasein führt.

Nachdem mit dem Otto- und Dieselmotor beide Hauptvertreter des Verbrennungsmotors weitestgehend ausgereizt sind und die Begrenztheit fossiler Ressourcen immer mehr ins Bewusstsein geriet begann man Anfang des 21. Jahrhunderts wieder ernsthaft den Elektromotor als Antrieb für Automobile in Betracht zu ziehen. Auf den ersten Blick sind dessen Vorteile gegenüber konventionellen Motoren beträchtlich:

- Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor, welcher durchschnittlich 700 bis 1200 g/kWh<sup>2</sup> ausstößt, arbeitet der Elektromotor nahezu emissionsfrei.
- Eine nahezu ideale Drehmomentcharakteristik gewährleistet bereits bei minimaler Drehzahl das maximale Drehmoment. So übertrifft die Beschleunigung der Elektromotoren selbst die moderner Diesel- und Ottomotoren.
- Die Verteilung des Drehmomentes lässt ein Getriebe, welches bei konventionellen Motoren unerlässlich ist, überflüssig werden. Dies spart sowohl Kosten, als auch Gewicht.
- Durch die Möglichkeit Elektromotoren direkt an den Radantrieb zu koppeln können sonst komplizierte Schaltungen (z.B. für Zwei- und Vierradantrieb sowie ESP) mittels direktem Ansteuern der einzelnen Motoren simuliert werden.
- Diese Integration gibt außerdem mehr Möglichkeiten für die Gestaltung von Karosserie und Funktionsraum.<sup>3</sup>
- Da ein Elektromotor ohne Wirkungsgradverluste ebenfalls als Generator nutzbar ist, kann durch das Aufnehmen der Bremsbeschleunigung zum Einen dem Verschleiß der Bremsscheiben vorgebeugt werden und zum Anderen sonst dissipierte Energie genutzt werden

---

<sup>2</sup> vgl. [1] S. 127

<sup>3</sup> vgl. [1] S. 235

- Der deutlich höhere Wirkungsgrad des Elektromotors ( $\eta > 80\%$ ) gegenüber dem des Ottomotor ( $\eta \approx 35\%$ ) bzw. Dieselmotor ( $\eta \approx 42\%$ ) verringert den Energiebedarf erheblich.<sup>4</sup>
  - Dieser mögliche theoretisch erreichbare Wirkungsgrad wird (wie Abb. 1 zeigt) unter wechselnden Bedingungen, wie zum Beispiel im Stadtverkehr, durch die unterschiedliche Belastung des Motors weiter unterschritten, so dass hierbei mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 20 bzw. 25 % für Otto- bzw. Dieselmotoren zu rechnen ist.<sup>5</sup>

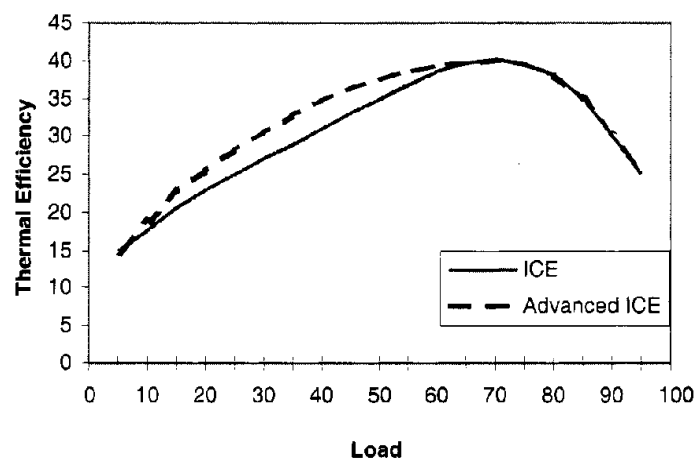


Abb. 1: Thermischer Wirkungsgrad vs. Last von Verbrennungsmotoren  
vgl. [3] Artikel 2, S. 14

4 vgl. [2] S. 6 ff

5 vgl. [3] Artikel 2, S. 14

### 1.3 Der nationale Entwicklungsplan Elektromobilität

Die Bundesregierung hat erkannt, dass elektrische Energie bezüglich der Effizienz des Energietransports den fossilen Kraftstoffen überlegen ist.

*„Inbesondere durch die Nutzung regenerativer Energiequellen, wie z.B. Sonne und Wind, kann die Emission von Treibhausgasen durch den Straßenverkehr erheblich verringert werden. Die Batterien der Fahrzeuge könnten in das Stromnetz eingebunden werden und so mittel- und längerfristig dazu dienen, die Netzstabilität zu steigern, was bei einem wachsenden Anteil an fluktuierenden Energieeinträgen zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.“<sup>6</sup>*

Den Begriff der Elektromobilität grenzt der nationale Entwicklungsplan vornehmlich auf den Straßenverkehr ein. Als Vertreter dieses Konzeptes sieht er vor allem Personenkraftwagen, leichte Nutzfahrzeuge und Zweiräder (Elektroroller, Elektrofahrräder), aber auch Stadtbusse und ähnliche Vehikel. Von diesen sollen bis zum Jahr 2020 bereits eine Million Fahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren.<sup>7</sup> Das Ziel der Bundesrepublik Deutschland sei es *„die Marktvorbereitung von Plug-In-Hybridantrieben sowie von Elektrofahrzeugen zu beschleunigen.“<sup>8</sup>* Doch nicht nur das: Für Deutschland gelte es dabei *„sich in der Spitzenposition zu etablieren“<sup>9</sup>*

Zur Umsetzung dieser ambitionierten Ziele konzentriert sich die Bundesrepublik auf folgende Bereiche<sup>10</sup>:

1. Forschung und Entwicklung
  - Energiespeicher
    - mit Präferenz auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit
  - Fahrzeugtechnik
    - einen hohen Stellenwert genießt hierbei die Senkung des Energieverbrauchs und der Umweltbelastungen

---

6 vgl. [5] S. 4

7 vgl. [5] S. 18

8 vgl. [5] S. 6

9 vgl. ebd. S. 3

10 vgl. ebd. S. 19 ff



- System- und Netzintegration
  - darunter Projekte wie virtuelle Kraftwerke und ein verbessertes Lastmanagement
- 2. Rahmenbedingungen
  - den nötigen politischen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Rahmen zur Markteinführung der Elektromobilität schaffen
- 3. Märkte
  - ein auf vier Jahre angelegter Feldversuch soll nun, nach mehreren Einzelinitiativen, praktische Fragen zur Marktentwicklung klären

Jenseits dieser bereits laufenden Aktivitäten empfiehlt der nationale Entwicklungsplan aus Mitteln des Konjunkturpakets II (welcher für anwendungsorientierte Forschung im Bereich der Elektromobilität 500 Mio. € zur Verfügung stellt<sup>11</sup>) u.a. folgende Projekte<sup>12</sup>:

- Aufbau eines Kompetenznetzwerkes Systemforschung Elektromobilität
- Entwicklung von Produktionstechnologien für Li-Ionen Zellen/Batteriesysteme
- Erweiterung der Projekte im Rahmen von E-Energy<sup>13</sup>
- Feld- und Flottenversuche Elektromobilität im Pkw- und Wirtschaftsverkehr
- Modellregionen mit integrierten Elektromobilitätskonzepten
- Forschung und Entwicklung für eine Pilotanlage im Bereich Recycling von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien

---

11 vgl. Beschluss des Bundeskabinetts: Konjunkturpaket II – Beschluss Ziffer 9 „Förderung anwendungsorientierter Forschung im Bereich Mobilität“ vom 27.01.2009

12 weitere Projekte vgl. [5] S. 25 ff

13 weitere Erläuterung unter Kapitel 4.1

## 2 Speicherung, Pufferung und Verfügbarkeit von Photovoltaikstrom in Bezug auf mobile und stationäre Systeme

### 2.1 Grundlagen zur Photovoltaik

#### 2.1.1 Verfügbarkeit der photoelektrischen Energie

Das globale Strahlungsangebot entspricht mit ca.  $175 \cdot 10^9$  MW dem 24.000-fachen der gesamten Erdöl- und Erdgasförderung. 12% der Wüstenflächen der Sahara würden ausreichen um mit einem Wirkungsgrad von 3% den gesamten gegenwärtigen Energiebedarf zu decken.<sup>14</sup> Dass dies noch nicht umgesetzt wurde, zeigt, dass die solare Stromerzeugung doch ein etwas komplexeres Thema ist, als die obige Rechnung vermuten lässt.

Der Jahresmittelwert der extraterrestrischen Bestrahlungsstärke<sup>15</sup> (Solarkonstante) beträgt  $1367 \text{ W/m}^2$ . Diese spezifische Leistung führt in Deutschland aufgrund folgender Phänomene zu einer jährlichen Strahlungsenergie<sup>16</sup> von  $900 - 1200 \text{ kWh/m}^2$ :

- Variation des Einfallswinkels der Solarstrahlung aufgrund von Deklination und Rotation der Erde, sowie der geografischen Lage
- Verschattung aufgrund des Tages- und Nachtrhythmus, sowie durch Wolkenbildung und weitere atmosphärische Effekte.<sup>17</sup>

Wie Abbildung 2 und 3 zeigen, variiert diese Einstrahlung zum einen täglich zum anderen auch jährlich und kann daher nicht als konstant angenommen werden.

---

14 vgl. [1] S. 14

15 vgl. [6] S. 5

16 vgl. [7]

17 vgl. [10] S. 4 ff

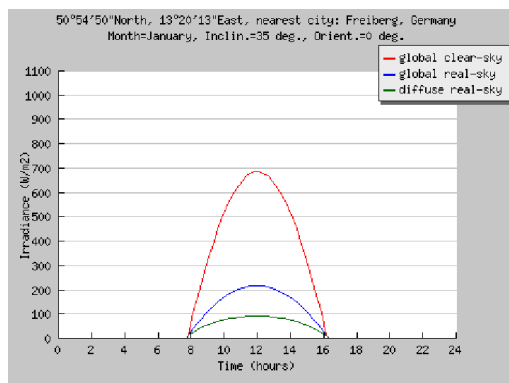


Abb. 2: Verlauf der mittleren solaren Einstrahlung im Januar in Freiburg vgl. [8]

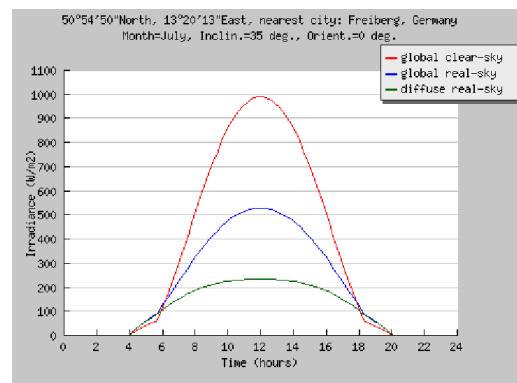


Abb. 3: Verlauf der mittleren solaren Einstrahlung im Juli in Freiburg vgl. [8]

## 2.1.2 Technische Umsetzung

Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) nutzen die direkte Umwandlung von elektromagnetischer Strahlungsenergie (Licht) in elektrische Energie (Strom). Hierfür ist der photoelektrische Effekt verantwortlich, welcher sich bei Halbleitern mit Diodenverhalten beobachten lässt. Dafür müssen beide Wirtshalbleiterschichten durch das Einbringen von Fremdatomen (dotieren) p- bzw. n-leitend gemacht werden.<sup>18</sup>

Obwohl der photoelektrische Effekt bereits Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt wurde, wurden Solarzellen erst Mitte des 20. Jahrhunderts in der Raumfahrt produktiv zur Stromerzeugung genutzt und in den achtziger Jahren in größerem Maßstab erprobt.<sup>19</sup>

Unter Laborbedingungen konnte bereits ein Wirkungsgrad von 41,1% bei einer Mehrfachsolarzelle aus den III-V-Halbleitern GaInP/GaInAs/Ge und 454-fach konzentriertem Sonnenlicht gemessen werden.<sup>20</sup> Allerdings werden diese Spitzenwirkungsgrade nur selten in der Praxis beobachtet, da sich die Standardtestbedingungen (STC) auf eine Einstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup>, eine Zelltemperatur von 25 °C und eine bestimmte Spektralverteilung des Lichts („Air Mass“= 1,5) beziehen.

<sup>18</sup> vgl. [9] S. 61-62

<sup>19</sup> vgl. [6] S. 2-3

<sup>20</sup> vgl. [11]

Praktische Wirkungsgrade handelsüblicher Solarzellen liegen heutzutage eher bei 10 – 20 %, je nach Qualität und Ausgangsmaterial.<sup>21</sup> Für die späteren Beispielrechnungen (siehe Kapitel 2.3) wird daher von einer (monokristallinen) Solarzelle mit dem mittleren Wirkungsgrad von 15 % ausgegangen.

Die Faktoren, welche für die wesentlichen Wirkungsgradverluste verantwortlich sind, sind in der Abbildung 4 dargestellt.

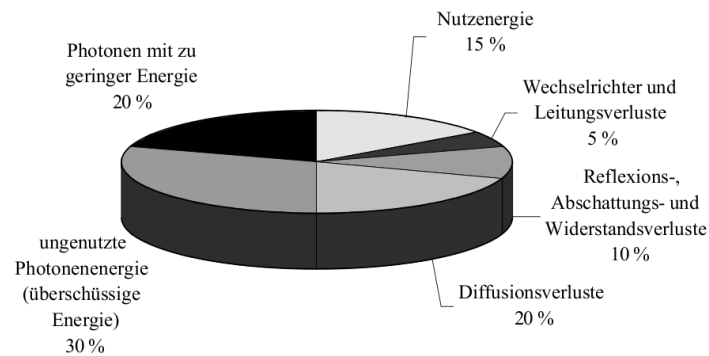


Abb. 4: Typische Verluste und Wirkungsgradanteile von Solarzellenanlagen  
vgl. [9] S. 20

Je Quadratmeter könnten bei einer durchschnittlichen jährlichen Einstrahlung von 1000 kWh und einem mittleren praktischen Wirkungsgrad von 15% also 150 kWh generiert werden. Die teilweise enorme Diskrepanz zwischen solarem Angebot und Strombedarf (siehe Abbildung 5) bzw. der zeitlich eingeschränkte, doch relativ hohe Strombedarf bei elektromobilen Anwendungen machen eine Speicherung des so gewonnenen Stromes allerdings unumgänglich.

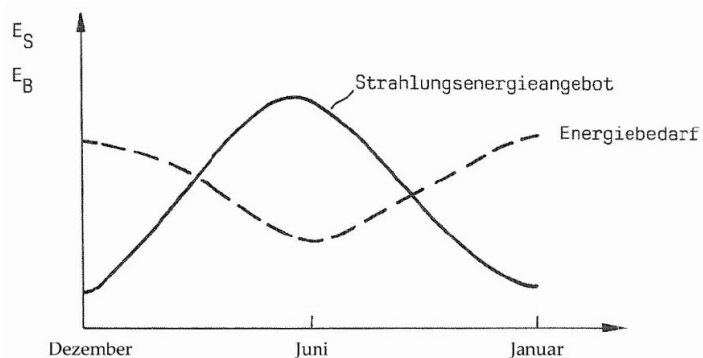


Abb. 5: Inverses Verhalten des solaren Energieangebots und des Energiebedarfs  
vgl. [9] S. 203

<sup>21</sup> vgl. [9] S. 19 ff; [10] S. 14

## 2.2 Möglichkeiten zur Speicherung regenerativer Energie

Geringe zeitliche Verfügbarkeit und hoher Flächenbedarf sind zwei der ausschlaggebenden Probleme der regenerativen Energien. Sollen diese Ressourcen nicht mehr nur Lastspitzen des Energiebedarfs decken können und Schatten-Kraftwerke<sup>22</sup> weiterhin die Versorgungssicherheit gewährleisten, so sind große Energiespeicher notwendig, welche die entstehenden Leistungsspitzen und -ausfälle puffern können.<sup>23</sup>

Die Möglichkeiten der Energiespeicherung sind vielfältig. Eine Übersicht relevanter Speicherformen gibt Tabelle 1.

Tab. 1: Energiedichte bzgl. Masse und Volumen und Kreiswirkungsgrad verschiedener Speichermedien  
vgl. [12] S. 555

Storage form	Energy density		Cycle efficiency
	kJ kg <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-3</sup>	
<i>Conventional fuels</i>			
Crude oil	42 000	37 000	
Coal	32 000	42 000	
Dry wood	12 500 <sup>a</sup>	10 000	
<i>Synthetic fuels</i>			
Hydrogen, gas	120 000	10	0.4–0.6
Hydrogen, liquid	120 000	8 700	
Hydrogen, metal hydride	2 000–9 000	5 000–15 000	
Methanol	21 000	17 000	
Ethanol	28 000	22 000	
<i>Thermal – low quality</i>			
Water, 100°C → 40°C	250	250	
Rocks, 100°C → 40°C	40–50	100–140	
Iron, 100°C → 40°C	~30	~230	
<i>Thermal – high quality</i>			
Rocks, e.g., 400°C → 200°C	~160	~430	
Iron, e.g., 400°C → 200°C	~100	~800	
Inorganic salts, heat of fusion > 300°C	> 300	> 300	
<i>Mechanical</i>			
Pumped hydro, 100 m head	1	1	0.65–0.8
Compressed air		~15	0.4–0.5
Flywheels, steel	30–120	240–950	
Flywheels, advanced	> 200	> 100	~0.95
<i>Electrochemical</i>			
Lead–acid	40–140	100–900	0.7–0.8
Nickel–cadmium	~350	~350	varying
Lithium ion (other advanced batteries)	700 (> 400)	1400 (> 300)	0.7 (> 0.8)
<i>Superconducting</i>		~100	~0.85

In den folgenden Kapiteln werden ausschließlich Speicherformen für regenerative Energien (explizit Photovoltaik) und Elektromobilität, mit dem Fokus auf elektrochemische Speicher, betrachtet. Fossile und erneuerbare Brennstoffe (in Tab. 1 „Conventional Fuels“) fallen daher genauso wie Speichermedien für thermische Energie (aufgrund zu hoher Exergieverluste bei der Umwandlung von Strom zu Wärme) heraus.

<sup>22</sup> Nicht regenerative Kraftwerke, welche den Energiebedarf beim Ausfall (regenerativer) Energieerzeuger decken.

<sup>23</sup> vgl. [9] S. 197 ff

### 2.2.1 Anforderungen an Speichersysteme

Unger nennt in seinem Werk „Alternative Energietechnik“ einige Faktoren, welche Energieträger erfüllen sollten. Darunter fallen:

- eine hohe Leistungsdichte
- unbegrenzte Verfügbarkeit oder zumindest die Möglichkeit eines Recyclings
- die Vermeidung von klimaschädlichen Stoffen beim Gebrauch
- und gefahrlose Lagerung und Transport ohne großen Aufwand.

Für das Gesamtsystem aus Energieträger und -wandler fordert er Einfachheit und Langlebigkeit, um so gute Erntefaktoren zu erreichen.<sup>24</sup>

Dabei sollten die spezifischen Kosten der Speicher nicht außer Acht gelassen werden.

Sollen die Energiespeicher zusätzlich in mobilen Anwendungen, wie z.B. Elektroautos eingesetzt werden, kommen außerdem folgende Bedingungen hinzu:

- eine hohe Sicherheit, auch gegenüber mechanischer Beanspruchung
- eine hohe Energie und Leistungsdichte (sowohl gravimetrisch, als auch volumetrisch) um zum einen hohe Drehmomente zu erzeugen und zum anderen große Reichweiten zu ermöglichen
- eine große Anzahl an Ladezyklen, sowie ein geringer Wartungsaufwand.<sup>25</sup>

Diese Kriterien lassen eine grobe Einordnung der folgenden Speichersysteme hinsichtlich ihrer Potenziale zu.

### 2.2.2 Synthetische Kraftstoffe als Energiespeicher

Wird der Zyklus Wasserstoffsynthese durch Elektrolyse über den Transport und die Speicherung dieses Gases bis zur Verstromung in Brennstoffzellen betrachtet, so kann von einem elektrochemischen Energiespeicher gesprochen werden. Da die Effizienz der Elektrolyseure besonders im Teillastbereich hoch ist, erscheint eine Umwandlung solarer Strahlung in Wasserstoff sinnvoll, zumal die Herstellung und der Verbrauch von Wasserstoff (über Elektrolyse und PEM-Brennstoffzelle) keinerlei umweltschädigende Stoffe freisetzt und Wasserstoff nahezu unbegrenzt vorhanden ist. Die kommerzielle Umsetzung dieses Prozesses wird u.a. von zwei Faktoren beeinträchtigt:

---

24 vgl. [9] S. 211 ff

25 vgl. [20] S. 37.3

- der vergleichsweise geringe Gesamtwirkungsgrad von weniger als 5 % gegenüber der eingehenden solaren Strahlung
- die technisch aufwändige Speicherung des Wasserstoffes entweder verflüssigt (mit einer Temperatur von  $-253\text{ °C}$ ) oder unter hohem Druck, welches aber einen hohen Druckgradienten zur Umgebung und somit ein Ausströmpotential dieses flüchtigsten aller Elemente schafft.

Momentan werden zudem gerade einmal 1-2 % der jährlich produzierten  $5 \cdot 10^{11}\text{ m}^3$  des Wasserstoffs weltweit elektrolytisch hergestellt. Der überwiegende Teil wird aus Erdgas unter Freisetzung von  $\text{CO}_2$  gewonnen.<sup>26</sup>

Eine vielversprechende Lösung des Speicherproblems könnte nun die zusätzliche Umwandlung des Wasserstoffs in Methan darstellen. Dieser als Power-to-Gas bezeichnete Prozess würde zugleich  $\text{CO}_2$  binden und einen erneuerbaren Kraftstoff herstellen. Das Reaktionsprodukt könnte außerdem in dem gut ausgebauten Erdgasnetz Deutschlands gespeichert und transportiert werden.<sup>27</sup>

### 2.2.3 Mechanische Energiespeicher

Drei Verfahren der mechanischen Energiespeicherung sind:

Druckluftspeicher: Dieser verpresst Luft in unterirdischen Hohlräumen (z.B. Salzkavernen) und gewinnt einen Teil der dafür aufgewandten Energie über die spätere Expansion der eingelagerten Luft. Dieser eher für stationäre Anwendungen relevante Speicher unterliegt momentan der technische Hürde, dass die beim Komprimieren gewonnene Wärme abgeführt und beim Expandieren extern Wärme (z.B. über Erdgas) zugeführt werden muss.<sup>28</sup> Eine mögliche Lösung dafür stellen sogenannte „adiabate“ Druckluftspeicher-Kraftwerke dar, welche die überschüssige Energie beim Komprimieren der Luft direkt zur Erwärmung während der Expansion nutzen. Mit dieser noch in der Entwicklung befindlichen Technologie könnten Wirkungsgrade bis zu 70% realisiert werden.<sup>29</sup>

Pumpspeicher: Dieses ausschließlich stationär anwendbare Kraftwerk kann die potentiell gespeicherte Energie von Wasser, welches in einer gewissen Höhe gelagert wird über dessen Ablassen in eine tiefere Ebene zu kinetischer Energie umwandeln. Die Wirkungsgrade liegen dabei bei 70-80%. Die in Deutschland installierte

---

26 vgl. [9] S. 203-206; [16] S. 70-73; [1] S. 207-209

27 vgl. [62]

28 vgl. [16] S. 31-32

29 vgl. [63]

Gesamtleistung von 6.610 MW wird aber nur geringfügig steigerbar sein, da zum einen die möglichen Standorte hierfür sehr begrenzt sind und zum anderen der Ausbau neuer Pumpspeicher-Kraftwerke einen erheblichen Eingriff in das Ökosystem darstellt.<sup>30</sup>

Schwungrad: Schwungräder speichern elektrische Energie in Form von kinetischer Energie eines rotierenden Körpers. Das Rad wird durch einen Elektromotor beschleunigt, welcher zum Abgreifen der kinetischen Energie ebenfalls als Generator fungieren kann und das Rad wieder abbremst. Vorteile dieses Systems sind der hohe Wirkungsgrad von 90-95% sowie die sehr kurzen Ansprechzeiten. Nachteilig sind aber die hohen Ruheverluste, welche bis zu 20 %/h betragen können.<sup>31</sup> Eine erfolgversprechende Anwendung könnte der zusätzliche Einbau in Rennsportautos z.B. dem Hybrid-Porsche 911 GT3 darstellen. Die bei Bremsvorgängen gespeicherte Energie in diesem Auto kann analog dank dieser Technik innerhalb von Sekunden nahezu vollständig zur Beschleunigung umgesetzt werden.<sup>32</sup>

#### 2.2.4 Elektrische Energiespeicher

Bei diesen Speichersystemen wird die Energie in Form von elektrischen – oder elektromagnetischen Feldern gespeichert. Zwei bedeutendere Vertreter sind Superkondensatoren und supraleitende magnetische Energiespeicher.

Superkondensatoren: Hier wird die Energie zwischen zwei Elektroden gespeichert, welche durch ein Dielektrikum voneinander isoliert sind. Die aufnehmbare Kapazität ist hierbei von der spezifischen Oberfläche abhängig, welche 1000 bis 3000 m<sup>2</sup>/g erreichen kann. Obwohl Superkondensatoren (Super-Caps) eine sehr hohe Leistungsdichte (bis zu 1000 kWh/kg) und eine sehr hohen Wirkungsgrad (90 %) erreichen können, ist die Energiedichte im Vergleich zu Batterien gering und die Selbstentladung relativ hoch. Daher beschränkt sich ihre Anwendung eher auf die kurzfristige Energiebereitstellung sowie das Decken des Spitzenstrombedarfs (z.B. bei Beschleunigung eines Hybrid-Fahrzeuges).

Supraleitende magnetische Energiespeicher: Hier wird die Energie durch eine stark abgekühlte Spule in einem Magnetfeld gespeichert. Die supraleitenden Eigenschaften der Spule ermöglichen es dabei durch das fast vollständige Aufheben des internen Widerstandes Energie sehr verlustarm über lange Zeit zu speichern. Der hohe Kühlungsbedarf dieses Systems führt allerdings zu einer für Langzeitanwendungen

---

30 vgl. [16] S. 35-36

31 vgl. ebd. S. 37-39

32 vgl. [64]



inakzeptablen Selbstentladerate von 10 – 12 % pro Tag. Da aber keinerlei bewegliche Teile in diesem Bauteil vorhanden sind und keinerlei chemische Prozesse ablaufen erreichen diese Energiespeicher üblicherweise eine Lebensdauer von 30 Jahren.<sup>33</sup>

## 2.2.5 Elektrochemische Energiespeicher

Diese Energiespeicher (auch Batterien genannt) bestehen aus mindestens zwei miteinander verbundenen elektrischen Zellen. Diese Zellen wandeln chemische Energie in elektrische Energie. Eine Zelle besteht aus einer positiven und einer negativen Elektrode, welche über einen Elektrolyt verbunden sind. In der chemischen Reaktion zwischen Elektrode und Elektrolyt wird Gleichstrom generiert. Im Falle von wiederaufladbaren Batterien (Akkumulatoren) läuft diese chemische Reaktion durch Zugabe elektrischen Stromes reversibel ab (siehe Abb. 6).<sup>34</sup>

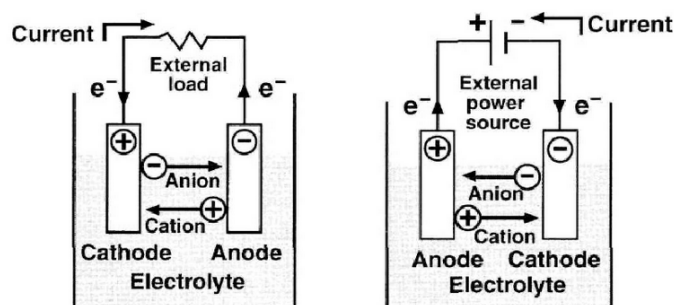


Abb. 6: Entlade- bzw. Ladevorgang der Batterie  
vgl. [14] S. 2

Die Zelle besteht im Wesentlichen aus drei aktiven Komponenten:

- Negative Elektrode:
  - Hier wird das Element bzw. die Komponente (Anode) während des Entladevorgangs elektrochemisch oxidiert. Das hierbei gebildete Elektron durchläuft einen externen Schaltkreis und erreicht so die gegenüberliegende Elektrode. Wird die Zelle wieder aufgeladen, kehrt sich die Reaktion um. Die Elektrode wird nun Kathode genannt.
- Positive Elektrode:
  - Diese Komponente (Kathode) wird während des Entladevorgangs durch das freigewordene Elektron reduziert.
- Elektrolyt:
  - Das Elektrolyt ermöglicht den Austausch der An- und Kationen und schließt somit den Stromkreis.<sup>35</sup>

<sup>33</sup> vgl. [13] S. 74-77; [16] S. 86-95

<sup>34</sup> vgl. [13] S. 23

<sup>35</sup> vgl. [14] S. 1

Die limitierenden Faktoren für den Einsatz dieser Technologie für Elektroautos sind in Tabelle 2 dargestellt. Hier divergieren weiterhin Anspruch und technische Bereitstellung. So lange die Forschung hierzu keine entsprechenden Ergebnisse liefert, wird das batteriegetriebene Elektroauto weiterhin eine Nischenanwendung bleiben.

Tab. 2: Kriterien für Batterien in Elektroautos

	Zielsetzung	Ist-Zustand
<b>Spezifische Energie</b> in Wh/kg	200 <sup>38</sup> (bis zum Jahr 2015)	90 - 120 <sup>36</sup>
<b>Lebensdauer</b> in Anzahl Ladezyklen	3000 – 5000 <sup>38</sup> (entspricht 10 - 15 Jahre)	300 - 3000 <sup>37</sup>
<b>Kosten</b> in €/kWh	300 - 500 <sup>38</sup>	1000 - 1200 <sup>38</sup>

Für den Einsatz in Kraftfahrzeugen werden die bereits beschriebenen Zellen (in Reihenschaltung und Parallelschaltung) zu Modulen zusammengefasst, welche oft bis zu 400V Spannung erreichen. Um den sicheren Einsatz der Batterie zu gewährleisten, schließt sich im Gesamtsystem das Batterie- sowie das Temperaturmanagement an.

- Batteriemangement:
  - Überwachung des Ladezustandes der Module, sowie der einzelnen Zellen (Cell-Balancing), verhindern von Über- oder Tiefentladung
  - Überwachung relevanter Sensordaten. Bei Abweichungen: Steuerung von Maßnahmen zur Behebung bzw. Sicherheitsabschaltung bei kritischem Zustand
- Temperaturmanagement:
  - Einstellen der Betriebsbedingungen durch Erwärmung und Kühlung der Module<sup>39</sup>

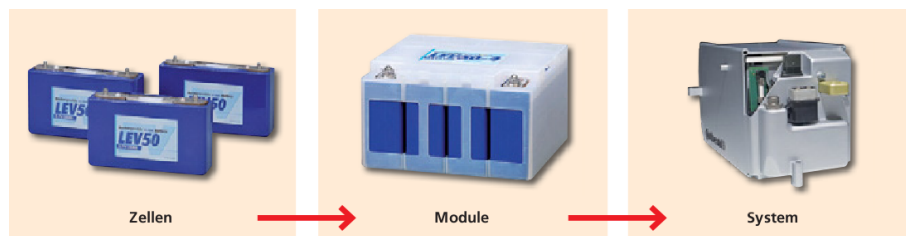


Abb. 7: Die Wertschöpfungsstufen der Batterieherstellung  
vgl. [15] S. 14

36 Li-Ion-Batterie bei 2h Entladung vgl. [1] S. 241

37 vgl. Anhang A1

38 vgl. [5] S. 10

39 vgl. [15] S. 14-15

## 2.3 Anwendungsbeispiele für Photovoltaikstrom

Neben den vielen batteriegetriebenen Elektrofahrzeugen<sup>40</sup>, welche bereits auf dem Markt sind, wurden als Beweis der Leistungsfähigkeit solargetriebener Fortbewegungsmittel in den letzten Jahren u.a. folgende Forschungsprojekte angetrieben und durchgeführt:

Modell	Technik	Zielsetzung
Solar Impulse <sup>41</sup> 	<u>Batterie:</u> 70 Stk. Li-Polymer 400 kg (¼ der Masse des Flugzeuges) Spannweite: 63,4 m <u>PV-Zellen:</u> 11628 auf 200m <sup>2</sup>	Weltumrundung 2012 mit 5 Zwischenstops á 3-4 Tage
Planet Polar <sup>42</sup> 	<u>Batterie:</u> 700 Stk. Li-Ion, 1 MWh, 11.000 kg <u>PV-Zellen:</u> 120 kW auf 470 m <sup>2</sup> Wirkungsgrad 22%	Weltumsegelung 2011 in 160 Tagen
Solar Taxi <sup>43</sup> 	<u>Batterie:</u> ZEBRA <u>PV-Zellen:</u> 6m <sup>2</sup> auf Anhänger	Weltumrundung in 17 Monaten 2008 beendet

Dass diese Projekte vorerst nicht massentauglich sind, zeigt folgende überschlägige Rechnung am Beispiel des Mitsubishi „i-MiEV“: Mit seiner gespeicherten Kapazität von 16 kWh ließe sich eine Reichweite von 144 km erreichen<sup>44</sup> – vorausgesetzt die Batterie würde komplett entladen.

40 eine umfangreiche Auflistung gibt: [http://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_Elektroautos](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Elektroautos)

41 vgl. [49]

42 vgl. [48]

43 vgl. [51]; [50]

44 vgl. [42]

Würden auf dem 2,5m<sup>2</sup> großen Autodach<sup>45</sup> Solarzellen (mit einem Wirkungsgrad von 15 %) angebracht, ließen sich mit der summierten jährlichen solaren Einstrahlung in Freiberg<sup>46</sup> von ca. 1070 kWh/m<sup>2</sup> jeden Tag mit 1,13 kWh gewinnen.

$$\frac{1070 \frac{kWh}{a * m^2} * 2,5 m^2 * 0,15}{356 d} = 1,13 kWh * d$$

Damit könnten jeden Tag im Durchschnitt gerade einmal 10,17 km zurückgelegt

werden.  $\frac{144 km * 1,13 kWh}{16 kWh} = 10,17 km$

Die sonst ungenutzte Fläche auf dem Dach und am Kühler dennoch mit PV-Zellen auszustatten kann aufgrund des niedrigen zusätzlichen Gewichtes trotzdem, wenn auch nicht deutlich zur Reichweitenerhöhung, dann doch zumindest für Zwecke des Marketings sinnvoll sein, wie das Bluecar der Firma Véhicules Électriques Pininfarina Bolloré zeigt.<sup>47</sup>

Eine weitere Möglichkeit das eigene Auto mit eigenem Solarstrom zu speisen stellt z.B. das mit PV-Modulen bedeckte „SunCarport“ der Firma SolarWorld dar. Mit seinen 10° Neigung würde er bei Aufstellung in südlicher Richtung pro m<sup>2</sup> einen mittleren täglichen solaren Ertrag von 2,95 kWh/m<sup>2</sup> erreichen<sup>48</sup>. Multipliziert mit seiner Fläche<sup>49</sup> von 16,2 m<sup>2</sup> und dem Wirkungsgrad der Solarzelle würde das eine tägliche bereitgestellte Energie von 7,17 kWh bedeuten.

$$2,95 \frac{kWh}{m^2} * 16,2 m^2 * 0,15 = 7,17 kWh \quad \frac{144 km * 7,17 kWh}{16 kWh} = 64,52 km$$

Gerechnet auf den Verbrauch des i-MiEV wären das immerhin 64,52 km pro Tag.

Mit dieser überschlägigen Rechnung konnte gezeigt werden, dass der Betrag des entsprechend benötigten Stromes für den Betrieb eines Elektroautos durchaus selbst gewonnen werden kann – auch wenn der Strom des Carports, wie in diesem Modell,

---

45 vgl. [42] unter der Annahme, dass das Dach des i-MiEV die Hälfte der multiplizierten Fahrzeugmaße ausmacht und horizontal in beide Achsen ausgerichtet ist, die Summe der täglichen solaren Einstrahlung jeden Tag gleich ist und das komplette Dach mit Solarzellen bedeckt ist.

46 vgl. [7]

47 vgl. [43]

48 vgl. [45]

49 vgl. [44] unter der Annahme dass die komplette Fläche mit Solarzellen bedeckt ist

direkt ins Netz eingespeist wird und das Elektroauto seine Energie aus dem Netz bezieht. Möchte man nun im Sinne einer energetischen Autarkie das Auto mit dem „eigenen“ Strom betreiben, sind weitere Überlegungen notwendig.

Da der oben errechnete Wert statistischer Natur ist und es in diesem Beispiel auch Tage oder Wochen geben kann, in welchen dieser Wert über- oder unterschritten würde, müssten Möglichkeiten geschaffen werden überschüssigen Strom, welcher über die Kapazitäten des eigenen Energiespeichers geht, einzuspeisen. Ebenso sollte im Sinne der Versorgungssicherheit trotzdem ein Netzanschluss für den Fall, dass die Kapazität des Energiespeichers nicht mehr ausreicht, gelegt werden. Doch ein Energiespeicher bedeutet Mehraufwand.

Rechnen würde er sich in urbanen Gebieten nicht, da ab Juni 2010 die Vergütungssätze für die Einspeisung mit 24,17 ct pro kWh für eine solche PV-Anlage deutlich höher wären als die Vergütung bei Direktverbrauch, welche dann 20,88 ct pro kWh betragen würden<sup>50</sup>.

Da die Dimensionierung einer PV-Anlage mit Stromspeicher für elektromobile Anwendungen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird darauf verzichtet. Es sei aber auf das bestellfertige Modell „Solartankstelle Typ Perugia“ der Firma cellstrom verwiesen. Diese würde gerechnet auf den Standort Rom mit einer „Solarernte“ von 13.194 kWh/Jahr ein „km-Budget“ von 65.240 km/Jahr liefern. Ermöglicht wird dies durch eine Vanadium-Redox-Flow-Batterie, welche 10 kW und 100 kWh liefern soll.<sup>51</sup>

---

50 vgl. [46]

51 vgl. [47]

### **3 Beschreibung der physikalischen und chemischen Prozesse elektrochemischer Speicher**

Im Folgenden werden einige Energiespeicher vorgestellt und beschrieben. Da die Aufzählung aller möglichen Werkstoffkombinationen und Umsetzungen elektrochemischer Energiespeicher im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, beschränkt sich die Auswahl auf wiederaufladbare Speicher, welche den Anforderungen der Elektromobilität genügen bzw. als Energiespeicher für regenerative Kraftwerke in Frage kommen könnten. Nicht betrachtet werden u.a. Silber-Zink-Akkus,  $\text{Li/V}_2\text{O}_5$ ;  $\text{Li / Fe}_x$  sowie die Kombinationen Metall-Hydrid und Metall-Wasser.

Um die im Anhang befindliche Vergleichsmatrix, welche Herstellerangaben aktueller Speichersysteme enthält, mit der Literatur vergleichen zu können, wurde versucht alle relevanten Akkumulatoren auch mit Kennzahlen aus der Literatur zu versehen.

### 3.1 Vergleichende Kennzahlen

Der ähnliche Aufbau sowie die ähnliche Funktionsweise der elektrochemischen Energiespeicher ermöglichen ihre Vergleichbarkeit mittels formaler Kennzeichen. Einige davon, welche auch in der Vergleichsmatrix genutzt werden, werden nun erläutert:

Typ: Bezieht sich auf die Kombination der verwendeten Elektroden bzw. Elektrolyte, welche in den Batterien bzw. hier in den Akkumulatoren verwendet werden.

Bauform (Z; M; S): Unterscheidet Zellen (Z), welche den Grundstock mit Elektroden, Elektrolyt, evtl. Separator und Mantel bilden, von Modulen (M), in welchen mehrere Zellen parallel und/oder in Reihe verschaltet sind. Module in welchen, falls notwendig, Vorrichtungen zur Wartung der Batterie, des Batteriemangements und Thermomangements integriert sind, werden als Batteriesystem (S) bezeichnet.

Nennspannung (V): Bezeichnet die gemittelte Spannung, welche beim Entladen der Batterie auftritt. In der Praxis verändert sich diese Spannung mit der abgegebenen Stromstärke.

Nennkapazität (Ah): Gibt das Speichervermögen bezüglich der Stromstärke einer Batterie an. Die SI-Einheit dafür lautet C, welche sich aus dem Produkt Stromstärke mal Sekunde ( $A \cdot s$ ) ergibt. Da dieser Wert für Praxisanwendungen zu klein ist, wird meist die Einheit Amperestunde (Ah) verwendet. Bei Batterien für Traktionsanwendungen bezieht sich dieser Wert meist auf eine Entladung von 5 Stunden.

Gespeicherte Energie (Wh): Das Produkt aus Nennkapazität der Batterie und ihrer Nennspannung gibt die gespeicherte Energie an. Um Kapazität und Energie vergleichbar zu halten, sollten sich beide auf die gleiche Entladezeit beziehen. Da Spannung und Nennkapazität stark von der Benutzung der Batterie abhängen, kann auch dieser Wert variieren.

Maximale Leistung (W): Gibt die (unter gewissen Bedingungen erreichbare) maximale Leistung an.

Spezifische Energie (Wh/kg): Bezieht die gespeicherte Energie auf die Masse der Batterie und gibt somit Auskunft, wie viel Energie sich theoretisch in einem Kilogramm der Batterie speichern lässt.

Energiedichte (Wh/dm<sup>3</sup>): Bezieht die gespeicherte Energie auf einen dm<sup>3</sup> bzw. einen Liter und gibt somit Auskunft wie viel Energie sich in diesem Volumen speichern lässt.

Spezifische Leistung (W/kg): Bezieht die Leistung der Batterie auf deren Masse bzw. die spezifische Energie auf die Zeit, in der diese abgegeben werden kann. Wird der Wert mit der maximalen Leistung errechnet, verringert sich dessen Aussagekraft, da die maximale Leistung meistens nur für einige Sekunde, ohne Schäden an der Batterie zu erzeugen, gehalten werden kann.

Leistungsdichte (W/dm<sup>3</sup>): Bezieht die Leistung auf das Volumenelement dm<sup>3</sup> bzw. Liter.

Volumen (dm<sup>3</sup>): Gibt das Volumen der Batterie an. Bei errechneten Werten wird – je nach Grundform – von einem Quader oder einem Zylinder ausgegangen.

Maße (mm): Gibt die Abmessungen der Batterie an. Je nach Grundform werden entweder Höhe, Breite und Tiefe oder Durchmesser und Höhe angegeben.

Masse (kg): Gibt die Masse der Batterie inklusive der dazugehörigen Komponenten an.

Spannungsbereich (V): Gibt den Bereich der Spannung an, in welchem die Batterie betrieben werden kann.

Ladespannung (V): Gibt die benötigte Spannung zum Laden der Batterie an.

Maximaler Dauerentladestrom (A): Gibt die maximale Stromstärke an, welche bei Entladung der Batterie dauerhaft abgenommen werden kann.

Maximaler Spitzenentladestrom (A): Gibt die maximale Stromstärke an, welche (meist bezogen auf eine gewisse Zeit) bei Entladung der Batterie abgenommen werden kann.

Maximaler Ladestrom (A): Gibt die maximal mögliche Stromstärke bei der Ladung an.

Ladewirkungsgrad (%): Verhältnis der eingesetzten Ladeenergie zur letztendlich in der Batterie gespeicherten Energie. Dieser Wirkungsgrad variiert mit Temperatur und Laderate.

Selbstentladerate (% /Monat): Gibt das Verhältnis der Energie, um welche sich die Batterie in einem gewissen Zeitraum (z.B. Monat) selbst entlädt zur gesamten gespeicherten Energie an. Dieser Wert kann mit steigender Temperatur stark zunehmen.

Anzahl an Ladezyklen: Gibt die Anzahl der Ladezyklen an bis z.B. die Kapazität einer Batterie deutlich nachlässt. Beispielsweise erreicht die Batterie danach nur noch 80 % ihrer ursprünglichen Ladekapazität.



Lebensdauer (a): Zeitspanne, bis zu der eine vorher bestimmte Betriebsspannung erreicht wird.

Einsatztemperatur (°C): Temperaturbereich in welchem die Batterie ohne Leistungseinbußen betrieben werden kann.

Lagertemperatur °C: Temperaturbereich in welchem die Batterie ohne Beschädigung der Struktur gelagert werden kann.

Ladedauer (h): Gibt die Dauer einer (im Normalfall) vollständigen Ladung an.

Kosten (€): Bezeichnet den Verkaufspreis bzw. das Preisniveau in welchem die Batterie zu erwerben ist. Da viele Anbieter Stillschweigen darüber bewahren und viele der vorgestellten Modelle nicht an Privatpersonen verkauft werden, sind nur sehr wenige Daten öffentlich zugänglich.

Spezifische Kosten (€/Wh): Bezieht die Kosten für die gesamte Batterie auf deren gespeicherte Energie und gibt somit Aufschluss darüber, wie teuer das Speichern einer Wh mit dem jeweiligen System ist.

Anwendungsbereich: Beschreibt, in welchem der beiden Komplexe Elektromobilität und Speicherung von erneuerbare Energien die jeweilige Batterie eingesetzt werden kann.

Memory-Effekt: Häufige Teilentladungen können bei Batterien, welche diesen Effekt aufweisen zu einem Kapazitätsverlust führen.

Innenwiderstand( $\Omega$ ): Die Folge des Innenwiderstandes ( $R$ ) ist das Absinken der Zellspannung ( $V$ ) unter die Spannung welche bei einem offenen Stromkreis anliegt ( $E$ ). Die Formel hierfür lautet:  $V = E - I \cdot R$        $I$ ... Stromstärke

Death of Discharge (DoD: %): Verhältnis der entnommenen Kapazität zur gesamten Kapazität der Batterie.<sup>52</sup>

---

52 vgl. [13] S. 24 ff; [14] S. 6 ff, 263 ff; [15] S.14

## 3.2 Blei-Säure

Blei-Säure-Batterien haben sich seit über 100 Jahren als sicherer, preisgünstiger und technisch ausgereifter Standard vor allem als Starterbatterien in Automobilen, aber auch als Puffer für stationäre Anwendungen (z.B. als Speicher für Solarstrom im Inselbetrieb) zur unterbrechungsfreien Stromversorgung etabliert. Sie weisen:

- eine geringe Selbstentladung
- keinen Memoryeffekt
- hohe Spannung bei hoher Belastbarkeit
- fast vollständige Wiederverwendbarkeit
- einen geringen Wartungsaufwand
- relativ geringe Kosten
- und einen sehr niedrigen internen Widerstand

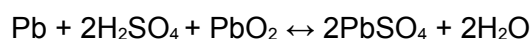
auf.

Folgende Nachteile machen ihren Einsatz als Stromspeicher für elektromobile Anwendungen fragwürdig:

- keine Eignung zur Schnellladung
- keine Tiefentladung möglich
- eine geringe Energiedichte von ca. 20 – 25 Wh/kg<sup>53</sup>
- Empfindlichkeit gegenüber hohen Temperaturen (über 45°C)
- bei Zerstörung ist das Auslaufen der Säure (sofern sie nicht gebunden ist) möglich.

Im geladenen Zustand bestehen Blei-Säure-Akkumulatoren aus Blei- und Bleioxid-Elektroden, welche sich in einem Elektrolyt aus Schwefeläure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) befinden. Wird die Batterie entladen (siehe Abb. 8), wandern die Sulfat(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)-Ionen zur Anode und bilden dort mit dem Blei Bleisulfat (PbSO<sub>4</sub>). Dabei werden zwei Elektronen freigesetzt. An der Kathode wird die Oxidschicht des vierwertigen Bleis mit den zwei Elektronen zu zweiwertigem Blei reduziert. Hierbei entsteht ebenfalls Bleisulfat. Das freigewordene O<sub>2</sub> (mit insgesamt vier Elektronen geladen) verbindet sich mit den übrigen Wasserstoffionen zu Wasser.

Die Gesamtreaktion lässt sich wie folgt beschreiben:



---

<sup>53</sup> vgl. [12] S. 579

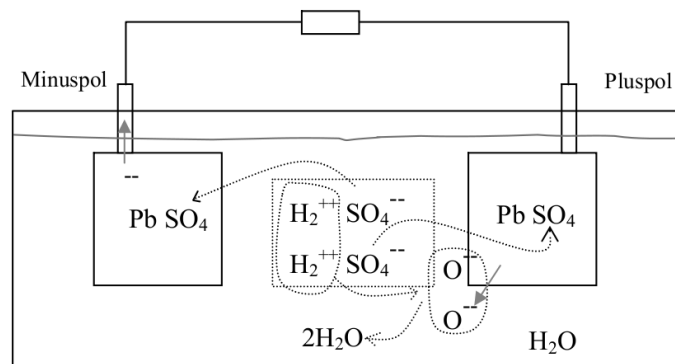


Abb. 8: Entladevorgang im Bleisäureakkumulator  
vgl. [2] S. 25

Damit die bei Nebenreaktionen (wie z.B. Überladen) entstehenden Stoffe, Wasserstoff und Sauerstoff, nicht entweichen können, wird bei moderneren Batterien das Elektrolyt mittels Gel-, AGM- und/oder VRLA-Technologie immobilisiert.

Bei Gel-Batterien wird dem Elektrolyt  $\text{SiO}_2$ -Pulver zugesetzt. Außerdem wird ein zusätzlicher Absorber zwischen den Zellen angebracht und die Menge an Elektrolyt (um 10ml/Ah) erhöht. Beide Maßnahmen erhöhen den Abstand zwischen den Elektroden und den Innenwiderstand.

AGM steht für „Absorbent Glass Material“ und dient dem Elektrolyt als hochporöse Matrix. Im Gegensatz zur Gel-Technologie fallen die Herstellungskosten um 15 - 20% geringer aus. Dafür wird der Elektrolyt allerdings schlechter gebunden, was zu einer einseitigen Belastung der Batterie führen kann.

Die Ventilregulierung dieser Batterie wird als VRLA („Valve Regulated Lead Acid“) bezeichnet. Hierbei wird das Ausströmen der Gase ebenfalls verhindert.

Das Vermindern der Gasverluste reduziert den Wasserverlust erheblich und ermöglicht eine Lebensdauer von 10 - 12 Jahren ohne anfallende Wartungsarbeiten.<sup>54</sup>

Tab. 3: Nennparameter für Blei-Säure-Batterien  
vgl. [13] S. 31

spezifische Energie	20 – 35 Wh/kg (je nach Anwendung)
Energiedichte	54 – 95 Wh/dm <sup>3</sup>
spezifische Leistung	~ 250 W/kg
Zellspannung	2 V
Ladewirkungsgrad	80 % (je nach Entladerate und Temperatur)
interner Widerstand	~ 0,022 Ω (je Zelle mit 1 Ah)
Selbstentladungsrate	~ 2 % pro Tag
Anzahl an Ladezyklen	bis 800 bei 80% DoD
Ladezeit	8h (aber 90% Ladung in 1h möglich)

<sup>54</sup> vgl. [2] S. 25ff, [16] S. 55 ff, [13] S. 30

Die Lebensdauer der Blei-Säure-Batterie ist vor allem durch die Sulfatierung beschränkt. Bleibt die Batterie längere Zeit entladen, bildet das gebildete Bleisulfat größere Kristalle, welche als isolierende Schicht wirken und sich nur schwer wieder in Blei oder Bleioxid zurückbilden können. Dieser Effekt kann vermindert werden, wenn die Batterie immer auf einem guten Ladezustand gehalten wird.<sup>55</sup>

Dass dieser Batterietypus für elektromobile Anwendungen recht unattraktiv ist, zeigt folgendes Beispiel:

Eine moderne Blei-Säure-Batterie mit  $1\text{dm}^3$  wiegt ca. 2,4 kg und enthält 0,07 kWh elektrische Energie. Damit würde ein Auto gerade einmal ca. 100 Meter fahren können. Im Vergleich dazu wiegt ein Liter Benzin 0,85 kg und enthält 11 kWh. Damit können ca. 10 km zurückgelegt werden. Bezüglich der spezifischen Energie ist Benzin also 100 Mal leichter und benötigt 40 Mal weniger Platz. Zudem beträgt die Aufnahmerate von Benzin beim Tankvorgang nur 45 l/min was ca. 582 kWh/min entspricht. Bei einer Ladung der Batterie können aber nur 50 Wh/min aufgenommen werden. Der Ladevorgang würde für die gleiche Energie also das 10.000-fache der Zeit in Anspruch nehmen<sup>56</sup>.

---

55 [13] S. 34

56 [3] S. 27-28

## 3.3 Nickel-basiert

### 3.3.1 Nickel-Cadmium

Momentan stellen Nickel-Cadmium-Batterien einen sehr guten Kompromiss zwischen spezifischer Energie, spezifischer Leistung, Lebensdauer und Sicherheit dar. Sie:

- sind ebenso technisch ausgereift wie Blei-Säure-Batterien
- haben mit 1000 – 2000 Zyklen aber eine wesentlich längere Lebensdauer
- sind leichter
- weisen eine bis zu 10 mal höhere spezifische Energie auf (50 Wh/kg; Blei-Säure-Batterie ab 5 Wh/kg)
- sind schnellladefähig
- sind in einem breiteren Temperaturbereich funktionsfähig (bis -30°C).

Der Memoryeffekt, welcher bei häufiger Teilentladung die Kapazität der Akkumulatoren verringerte, konnte durch verbesserte Elektroden weitestgehend ausgeschaltet werden.<sup>57</sup>

Besonders ältere Modelle setzen hierfür große Kristalle an der Cadmium-Elektrode an, welche deren Oberfläche verkleinern und den internen Widerstand erhöhen.

Einzig die

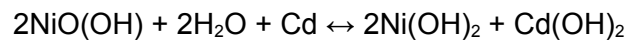
- möglichen negativen Einwirkungen auf die Umwelt im Falle einer Zerstörung der Batterien (durch das Cadmium, sowie den Elektrolyten)
- die weiterhin nicht erreichte nötige spezifische Energie
- die vergleichsweise höheren Kosten

erschweren die Anwendung für die Elektromobilität.

---

<sup>57</sup> vgl. [16] S. 57

Die Ni-Cd-Batterie besteht im geladenen Zustand aus Nickel(III)-oxidhydroxid (NiO(OH)) an der Kathode und aus fein verteiltem Cadmium an der Anode. Beide Stoffe befinden sich in einem Elektrolyten aus Kaliumhydroxid (KOH) welcher in einer wässrigen Lösung vorhanden ist und nicht an der folgenden Gesamtreaktion beteiligt ist.



Während des Entladevorgangs wird das NiO(OH), aufgrund einer Änderung der Oxidationszahl des Nickels von +3 auf +2, zu Ni(OH)<sub>2</sub> und Cd zu Cd(OH)<sub>2</sub> umgewandelt. Die Nennspannung einer Zelle liegt bei 1,2 V. Ähnlich zu den ventilregulierten Blei-Säure-Akkumulatoren wird der freigesetzte Sauerstoff ebenfalls in einem internen Kreislauf gehalten. Die Möglichkeit des gasdichten Verschließens der Zellen ermöglicht auch hier einen wartungsfreien Betrieb und ermöglicht die Anwendung u.a. in Militär und Raumfahrt.<sup>58</sup>

Tab. 4: Nennparameter für Nickel-Cadmium-Akkumulatoren  
vgl. [13] S. 37

spezifische Energie	40 - 55 Wh/kg (je nach Anwendung)
Energiedichte	70 - 90 Wh/dm <sup>3</sup>
spezifische Leistung	~ 125 W/kg
Zellspannung	1,2 V
Ladewirkungsgrad	gut
interner Widerstand	~ 0,06 Ω (je Zelle mit 1 Ah)
Selbstentladungsrate	~ 0,5% pro Tag
Anzahl an Ladezyklen	bis 1200 bei 80% DoD
Ladezeit	1h (20 min zum Erreichen von 60% Ladung)
Temperaturbereich	-40 bis 80°C

<sup>58</sup> vgl. [18] S. 143, [19] S. 291, [16] S. 56-57

### 3.3.2 Nickel-Metallhydrid

Als Ersatz für das giftige Cadmium der Ni-Cd-Systeme werden seit der letzten Dekade des 20. Jahrhunderts zunehmend Ni-MH-Akkumulatoren eingesetzt.

Damit verbinden sich weitere Vorteile:

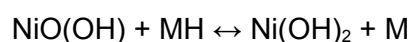
- einfachere Entsorgung (da kein Cadmium verwendet wird)
- eine 30 – 50 % höhere Energiedichte als bei Ni-Cd
- schnelle Lade- und Entladerate

...aber auch Nachteile:

- höhere Empfindlichkeit gegenüber Überladung, Überhitzung und falscher Polung
- ca. 50 % höhere Selbstentladung als bei Ni-Cd
- Leistungseinbußen bei tiefen Temperaturen (aufgrund der langsameren Desorption des Wasserstoffs)
- geringere Anzahl an Ladezyklen
- vergleichsweise fünf mal höhere Kosten als bei Blei-Säure-Systemen.

Ni-MH-Akkumulatoren besitzen eine große Ähnlichkeit mit dem verwandten Ni-Cd-System. Allerdings nutzt die negative Elektrode anstelle des Cadmiums Wasserstoff, welches im Metallhydrid gebunden vorliegt. Interessant hierbei ist, dass sich diese Elektrode exakt wie eine Brennstoffzelle verhält. Das Verwenden von Wasserstoff macht eine Versiegelung der Batterie allerdings unumgänglich, da das Metallhydrid bei der Reaktion mit Luft geschädigt würde.

Um den Wasserstoff reversibel zu speichern wird an der Anode Nickel, sowie ein Seltenerdmetall, bzw. eine -legierung oder aber ein Übergangsmetall (z.B. Titan, Zirkonium oder Vanadium) verwendet. Im Falle der Verbindung mit Seltenerdmetallen wird eine niedrigere Selbstentladungsrate erzielt. Wird hingegen ein Übergangsmetall verwendet wird eine höhere Energiedichte erreicht. Diese Konstruktion baut nur einen geringen Innendruck im geladenen Zustand auf. Die Gesamtgleichung lautet:



Im geladenen Zustand stellt Nickel(III)-oxidhydroxid die aktive Komponente der Kathode und Wasserstoff (in Form des Metallhydrids) die der Anode dar. Der Elektrolyt besteht größtenteils aus einer wässrigen Lösung aus Kaliumhydroxid.

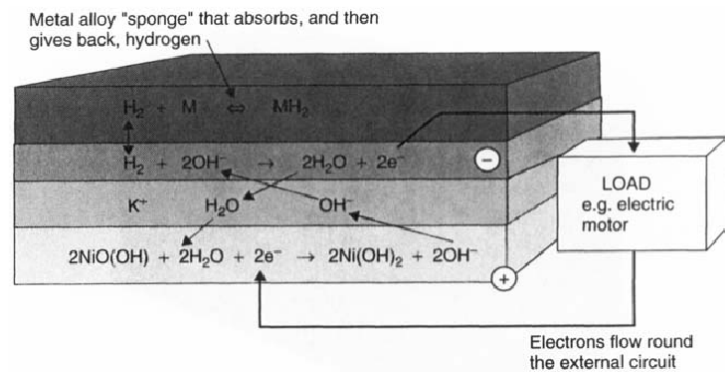


Abb. 9: Reaktionen während des Entladens einer Ni-MH-Zelle  
vgl. [13] S. 39

Wie Abbildung 9 zeigt, wird während des Entladevorgangs das Metallhydrid (MH) reversibel zu der Metalllegierung (M) oxidiert. Die zwei dabei freigesetzten Elektronen ermöglichen wiederum die Reduktion von Nickel(III)-oxidhydroxid zu Nickelhydroxid.

Durch die u.a. schnellen Be- und Entladungsmöglichkeiten werden Ni-MH-Akkus z.B. in Elektro- und Hybridfahrzeugen<sup>60</sup> eingesetzt. Im Konsumbereich werden sie sehr breit genutzt (z.B. in Mobiltelefonen und Camcordern), allerdings mehr und mehr von Li-Ion-Akkus verdrängt. Für stationäre Anlagen werden sie nicht eingesetzt, da dies aufgrund der zu niedrigen Anzahl an Ladezyklen nicht wirtschaftlich wäre.<sup>61</sup>

Tab. 5: Nennparameter für Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren  
vgl. [13] S. 39

spezifische Energie	~ 65 Wh/kg (je nach Leistung)
Energiedichte	~ 150 Wh/dm <sup>3</sup>
spezifische Leistung	200 W/kg
Zellspannung	1,2 V
Ladewirkungsgrad	gut
interner Widerstand	~ 0,06 Ω (je Zelle mit 1 Ah)
industr. Anwendung	in Form von kleineren Zellen, selten auch als Traktionsbatterie
Selbstentladungsrate	wenig, 5% pro Tag
Anzahl an Ladezyklen	~ 1000 bei 80% DoD
Ladezeit	1h (20 min zum Erreichen von 60% Ladung)
Einsatztemperatur	Umgebungstemperatur

<sup>60</sup> Einsatz z.B. im Toyota Highlander Hybrid, Prius und Lexus RX

<sup>61</sup> vgl. [16] S. 57-58; 72 S. 29.1 ff; [19] S. 291; [18] S. 143-144



### 3.3.3 Nickel-Zink

Für Traktionsanwendungen, sowie Anwendungen mit hohem Leistungsbedarf könnte der Nickel-Zink-Akkumulator eine Alternative darstellen.

Einige wesentliche Vorteile des von Thomas Edison entwickelten Systems sprechen für die Anwendung in der Elektromobilität:

- höhere Leistungsdichte bei vergleichbarer bzw. besserer Energiedichte als bei Ni-Cd-Systemen
- niedrigere Kosten im Vergleich zu Li-Ion-Akkus (siehe Abb. 10)
- höhere Umweltverträglichkeit
- eine mit 1,6 V hohe Zellspannung
- die Möglichkeit der Schnellladung und hoher Zyklenfolgen
- wartungsfreier Aufbau
- es werden keine seltenen Werkstoffe verwendet.

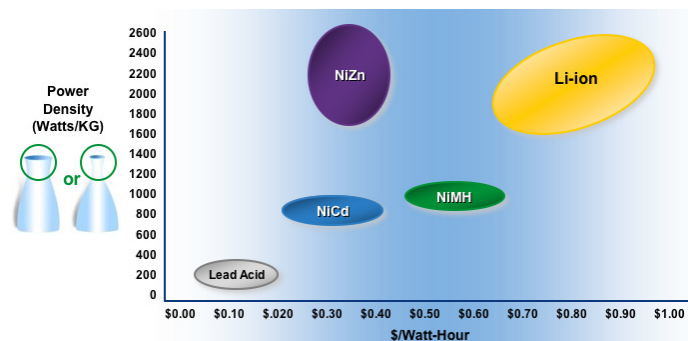


Abb. 10: Leistungsdichte vs. spezifische Kosten einiger Batteriesysteme vgl. [17]

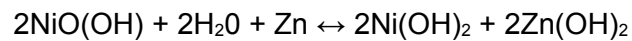
Dem gegenüber stehen folgende Nachteile:

- höhere Kosten als bei Blei-Säure-Akkus
- bisher noch kein Modell in Serienfertigung, welches eine für stationäre und elektromobile Anwendungen entsprechende Kapazität aufweist.
- relativ kurze Lebensdauer (infolge Dendritenbildung beim Aufladen an der Zinkelektrode)

Das Problem der Lebensdauer verhinderte bisher eine Kommerzialisierung, konnte aber mit modifizierten Elektroden, Zusätzen des Elektrolyts und korrosionsresistenten Separatoren gelöst werden.

Wie auch bei dem Ni-Cd-Akkumulator wird an der Kathode Nickel(III)-oxidhydroxid und ein alkalischer Elektrolyt verwendet. An der Anode wird Zink bzw. Zinkoxid eingesetzt.

Die Gesamtreaktion lautet hierfür:



---

spezifische Energie	50 - 60 Wh/kg
Energiedichte	80-120 Wh/dm <sup>3</sup>
Zellspannung	1,55 – 1,65 V
Anzahl an Ladezyklen	~ 500 bei 100% DoD

---

Tab. 6: Nennparameter für Nickel-Zink-Akkumulatoren  
vgl. [20] S. 31.1

### 3.4 Metall-Luft

Als Metall-Luft-Batterien werden Batterien bezeichnet, in welchen das Metall der Anode in einem alkalischen Elektrolyten zusammen mit Sauerstoff (aus der Luft) als Kathode oxidiert wird. Dabei ist die maximale Kapazität von der Kapazität der Anode, sowie der Nutzungs- und Lagerungstechnik des Reaktionsproduktes abhängig. Momentan existieren zwei Ansätze diese Batterien wieder aufzuladen:

#### Mechanisch:

Hierbei wird die entladene Metall-Anode einfach ausgetauscht. Solche Systeme sind technisch einfacher zu realisieren, aber eigentlich nicht als Akkumulatoren zu bezeichnen, sondern eher als Energiewandler.

#### Elektrisch:

Das Elektrische Laden geschieht entweder über eine dritte Elektrode, welche die Sauerstoffentwicklung beim Ladevorgang aufrecht erhält oder über eine bifunktionale Kathode, welche reversibel den Sauerstoff sowohl reduzieren als auch wieder erzeugen können sollte.

Für dieses Systeme kommen Aluminium, Zink, Eisen, Lithium, Calcium und Magnesium in Betracht, wobei bei den drei letztgenannten Metallen Probleme bzgl. der Kosten, der Polarisation bzw. Instabilität, der schädigenden Korrosion, der ungleichmäßigen Auslösung und Sicherheit bisher die kommerzielle Einführung verhindert haben.

Metall-Luft-Batterien haben einige Vorteile, welche sie als Energiespeicher für elektromobile Anwendungen in Betracht kommen lassen:

- die Kathode kann nicht verbraucht werden
- hohe Energiedichte (~ 200 Wh/kg)
- lange Haltbarkeit (wenn trocken gelagert)
- keine ökologischen Probleme – keine Brennbarkeit
- kompakte Bauform
- niedrige Kosten
- teilweise hohe Verfügbarkeit der Rohstoffe.

Probleme werden aber in folgenden Punkten gesehen:

- beschränkte Leistungsdichte
- beschränkter Einsatztemperaturbereich
- Korrosion der Anode durch einwirkenden Wasserstoff
- Karbonisierung an der Luft-Elektrode (behindert den Luftzugang und kann zu mechanischen Schäden führen) durch Einwirkung von CO<sub>2</sub>
- Metallabscheidungen an der Anode beim Ladevorgang.

Die allgemeinen Reaktionsgleichungen aufgeteilt auf die Elektroden lauten:<sup>62</sup>



### 3.4.1 Zink-Luft

Die Zink-Luft-Batterie wird gerade sehr intensiv erforscht, da Zink das größte elektrochemische Potential hierfür aufweist. Im Vergleich zu einem Ni-MH-Akku kann diese Batterie sehr viel mehr Energie speichern. Zink verhält sich zudem stabil in wässrigen und alkalischen Elektrolyten (ohne signifikante Korrosion). Allerdings benötigt eine solche Batterie ein Belüftungsmanagement, welches den nötigen Sauerstoff für die jeweilige Leistung gewährleistet.

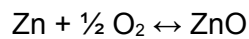
Bisher wurden Zink-Luft-Batterien mit ca. 300 Wh/kg in ihrer nicht wiederaufladbaren Form kommerziell als Energiespeicher für Gleissignalanlagen, zur Funkkommunikation und für Anlagen der Meeresnavigation genutzt, welche langanhaltende und niedrige Entladung benötigten.

Um eine wiederaufladbare Batterie auf den Markt zu bringen müssten vorher aber noch die Probleme der Dendritenbildung, der ungleichmäßigen Auflösung und Ablagerung des Zinks, die begrenzte Löslichkeit des Reaktionsproduktes und die nicht zufriedenstellende Leistung der Luft-Kathode gelöst werden. Auch müssten Wege gefunden werden CO<sub>2</sub> zu entfernen, damit die Karbonisierung des KOH-Elektrolytes ausgeschlossen wird. Um diese Batterie in Elektroautos einzusetzen müsste, um die niedrigen Leistungen zu kompensieren, ein zusätzlicher Hochleistungs-Energiespeicher eingesetzt werden.

---

62 vgl. [20] S. 38.1 ff; [16] S. 69-70; [31] S. 34-35

Die Gesamtgleichung lautet:



Das Zinkoxid bildet hierbei in der alkalischen Lösung Zinkationen  $[\text{Zn}(\text{OH})_4]$ .

Eine mögliche Umsetzung eines Zink-Luft-Akkus für Elektroautos könnte aus pastösen Zinkpartikeln als Anode und einer bifunktionalen Luft-Kathode aus Karbon und Kunststoff mit entsprechenden Katalysatoren sein. Als Elektrolyt könnte Kaliumhydroxid mit gelbildenden Zusätzen und faserförmigen Absorbermaterialien eingesetzt werden.

So lange die Probleme der elektrisch aufladbaren Zink-Luft-Akkus allerdings nicht gelöst sind, könnten sich evtl. die mechanisch aufladbaren Systeme etablieren, welche wegen ihrer hohen Energiedichte und der sehr hohen Sicherheit interessant sind. Ob sie sich allerdings gegenüber Brennstoffzellen und Flow-Batterien durchsetzen, bleibt offen.<sup>63</sup>

Tab. 7: Nennparameter eines Zink-Luft-Akkus für Traktionsanwendungen der Firma Dreisbach Electromotive, Inc. welcher nicht mehr weiterentwickelt wird  
vgl. [20] S. 38.25

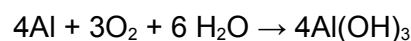
Zellgröße	330   350   75 mm
Zellgewicht	1 kg
Zellspannung	1,2 V
spezifische Energie	180 Wh/kg bei 10 W/kg bzw. 100 Wh/kg bei 200 W/kg
Lebensdauer	~ 1500 h

### 3.4.2 Aluminium-Luft

Die nahezu unerschöpflichen Vorkommen (Aluminium ist das dritthäufigste Element der Erdkruste), die niedrigen Kosten und die relativ einfache Verarbeitung ließen Aluminium bereits in den 1980er Jahren als Energieträger attraktiv erscheinen.

Als Speichersystem bietet sich die Kombination mit neutralen und alkalischen Elektrolyten an.

Die Gesamtreaktion für neutrale Elektrolyte lautet:



Die Gesamtreaktion für alkalische Elektrolyte lautet:

<sup>63</sup> vgl. [20] S. 38.6 ff; [16] S. 70; [31] S. 35-36; [18] S. 144



Da allerdings beide Systeme nicht wirklich elektrisch regenerierbar sind und das externe mechanische Aufladen dem Sinn der Autarkie widerstrebt, wird die Kombination Aluminium-Luft hier nicht weiter betrachtet.<sup>64</sup>

### 3.4.3 Lithium-Luft

Mit einer theoretischen Zellspannung von 3 V und einer möglichen Energiedichte von 8000 – 13000 Wh/kg könnte dieser längst nicht marktreife Energieträger die Energiedichte des Diesel-Kraftstoffes erreichen. Doch auch dieses System ist elektrisch nicht wiederaufladbar. Die Gesamtgleichung dafür lautet:<sup>65</sup>



---

64 vgl. [20] S. 38.4 ff; [31] S. 36

65 vgl. [20] S. 38.6 ff; [31] S. 37

### 3.5 Lithium-Ion

Lithium-Ionen-Akkumulatoren wird momentan das größte Potenzial aller Batteriesysteme (u.a. für elektromobile Anwendungen) zugeschrieben. Wie aus Abbildung 11 ersichtlich wird, führen sie mit Abstand bzgl. Leistungs- (5000 W/kg) und Energiedichte (mit 50 – 200 Wh/kg) die Riege der Batteriesysteme an.

Folgende Vorteile werden in dieser Technologie gesehen:

- hohe spezifische Energie
- hohe Zell-Nennspannung
- gute Zyklenfestigkeit und Lebensdauer
- kein Memory-Effekt
- keine Selbstentladung
- niedriger Innenwiderstand (somit höhere Schnelladefähigkeit)

Einige gravierende Nachteile erzwingen allerdings auch hier noch weitere

Anstrengungen in Forschung und Entwicklung:

- hohe Kosten aufgrund hoher Material- und Maschinenkosten (siehe dazu: Kostendegression in Abb. 12)
- beschränkte Verfügbarkeit des Lithiums
  - *“Zur Zeit sind weltweit eine Milliarde Fahrzeuge vorhanden. Die heute bekannten Lithiumvorräte reichen allerdings nur für die Ausrüstung einiger Prozent an Fahrzeugen aus.“*<sup>66</sup>
  - laut dem Fraunhofer ISI könnten die Reserven für Lithium bei einer Dominanz des Verbrauches durch Fahrzeugbatterien und der 25% Nutzung von Sekundärlithium<sup>67</sup> bereits 2045 verbraucht sein. Die Lithium-Ressourcen würden aber bis 2050 erst zu 49% (ohne Berücksichtigung der Lithiumvorkommen im Ozeanen) erschöpft sein.<sup>68</sup>
- reaktiv mit Luft und Feuchtigkeit
- je nach Material: Temperaturanfälligkeit (bis zur Selbstentzündung)
- aufwändiges Batteriemangement (elektrisch und thermisch).

---

66 vgl. [2] S. 35

67 wiederverwertetes Lithium

68 vgl. [28] S. 42

Das Potenzial dieser Batterien manifestiert sich aktuell an dem Sportwagen „Tesla Roadster“ der Firma Tesla Motors, welcher mit 6831 Li-Ion-Zellen des Typs 18650 aus dem Consumer Products Bereich eine maximale Leistung von 215 kW und eine maximale Reichweite von 380 km erreichen soll<sup>69</sup>. Allerdings sprechen Preis (84.000€<sup>70</sup>) und Komplexität klar gegen eine Vermarktung jenseits der Nische.

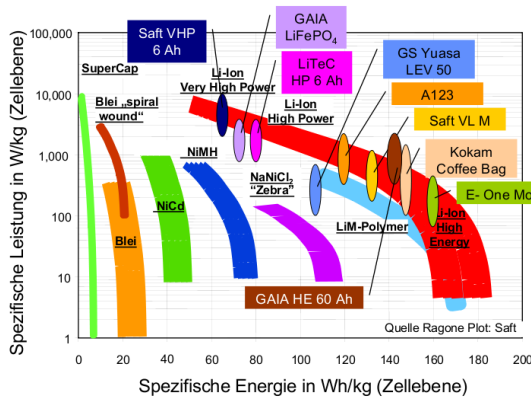


Abb. 11: Gravimetrische Leistungsdichte vs. Energiedichte vgl. [21] S. 19

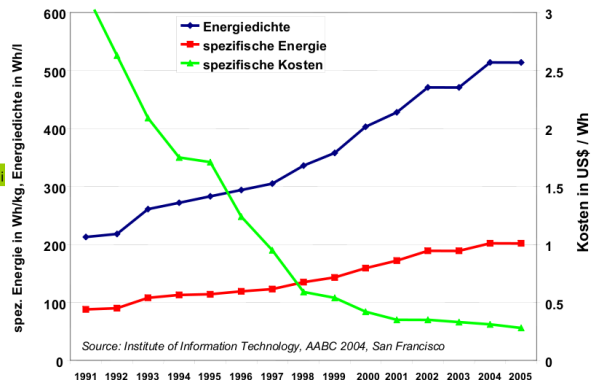


Abb. 12: Kostenentwicklung Konsumierzellen der Bauart 18650 vgl. [21] S. 21

### 3.5.1 Batterietypen

Li-Ionen-Akkumulatoren stehen für ein System verschiedenster Materialkombinationen und technischer Umsetzungen, welche sich hinsichtlich Kosten, Leistungs- und Energiedichte, Spannung und Lebensdauer unterscheiden.

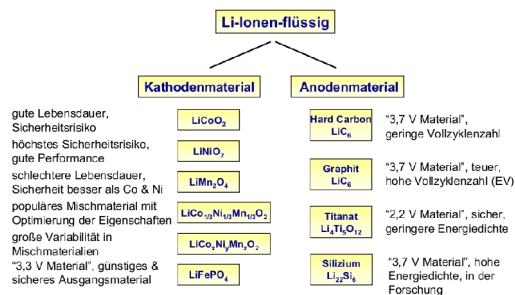


Abb. 14: Aktuelle Hauptentwicklungslinien bei Lithium-Ionen-Batterien vgl. [21] S. 9

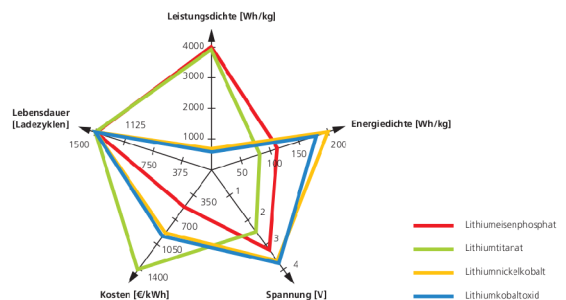


Abb. 13: Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterietypen vgl. [15] S. 12

Abbildung 13 zeigt, dass die verschiedenen Batterietypen unterschiedliche, teilweise diametrale Eigenschaftsausprägungen besitzen. Daher bietet sich die Differenzierung in Hochleistungs- und Hochenergiebatterien an.

69 vgl. [22], lt. [26] soll sogar eine Reichweite von 501km mit einer Batterieladung möglich sein

70 vgl. ebd.



Während der erst genannte Typus eine starke Leistungsaufnahme und -abgabe ermöglicht (wie z.B. bei Hybridantrieben benötigt), kann der zweite Typus für eine hohe Reichweite eines Elektroautos oder das hohe Speichervermögen für eine Photovoltaikanlage stehen.<sup>71</sup>

Des Weiteren können Lithium-Ionen-Batterien in verschiedene Generationen unterteilt werden:

#### 1. Generation:

Dieser derzeitige Standard wird vornehmlich im Consumer Bereich eingesetzt. Als Kathodenmaterial nutzt er Lithium-Kobalt-Oxid und als Anodenmaterial Lithium/Graphit. Weiter besteht er aus einem organischen Elektrolyt und nutzt Polyethylen als Separator. Bezüglich der geringen Energiedichte und Sicherheit ist er noch als problematisch anzusehen.

#### 2. Generation:

Es existieren bereits erste Batterien dieser Generation, welche Lithium-Eisen-Phosphat als Kathode, sowie Lithium/Kohlenstoff als Anode bei gleichem Elektrolyt nutzen. Der Separator besteht aus Polymeren oder keramischen Folien.

#### 3. Generation

Diese Batterien sollen Hoch-Volt-Kathoden mit unterschiedlichen Lithium-Metall-Oxiden oder Lithium-Eisen-Phosphaten enthalten, welche gegebenenfalls auch mit weiteren Metallen dotiert werden. Lithium/Kohlenstoff/Silizium/Zinn-Systeme aus Lithium-Titanaten oder aus Silizium-Nanoröhren könnten die Anode bilden. Bei dem erst genannten System könnte allerdings die drastische Volumenänderung während des Ladevorgangs problematisch werden. Der Elektrolyt sollte in dieser Generation weiterentwickelt werden (z.B. mit verbesserten Polymerelektrolyten, anorganischen Elektrolyten oder ionischen Flüssigkeiten) und Zellspannungen bis zu 6 V ermöglichen.

#### 4. Generation:

Der genaue Aufbau dieser Batterie wird noch diskutiert, sollte aber die geforderten Eigenschaften einer modernen Hochleistungsbatterie aufweisen. Es könnten Metall/Luft- z.B. Lithium/Luft- und Lithium/Schwefel-Batterien, oder Magnesium-basierte Batterien infrage kommen.<sup>72</sup>

---

71 vgl. [15] S. 11-12

72 vgl. [5] S. 28

### 3.5.2 Aufbau und Funktion

Der Grundaufbau eines Li-Ionen-Akkumulators unterscheidet sich nicht maßgeblich von dem anderer Akkumulatoren. Auch hier wird in Kathode, Anode und Elektrode unterschieden. Beide Elektroden besitzen allerdings die Möglichkeit Li<sup>+</sup>-Ionen in einer zwei- oder dreidimensionalen Struktur einzulagern. Metallisches Lithium wird in diesen Batterien nicht verwendet.

Die Kathode besteht bei Akkumulatoren der 1. Generation vornehmlich aus LiCoO<sub>2</sub>. Weitere Mögliche Stoffe wären: LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, LiNiO<sub>2</sub>, LiNi<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>O<sub>2</sub>. Die Zwischenräume des hexagonal geschichteten CoO<sub>2</sub> werden hierbei von eingelagerten Lithiumschichten getrennt, welche sich möglichst reversibel von ihrer Trägerschicht lösen bzw. daran anbinden sollten.

Die Anode besteht heutzutage aus Hart- oder Weichkohlenstoff bzw. Graphit unterschiedlicher Ausprägung, welcher ebenfalls die Eigenschaft besitzt Li<sup>+</sup>-Ionen einzulagern.

Der Elektrolyt besteht aus einem brennbaren organischen Lösungsmittel (z. B. Propylen-, Ethylencarbonat), in dem Lithiumsalze (meist LiPF<sub>6</sub>) gelöst bzw. als Salzschnmelzen vorliegen. Es kann in flüssiger Form, als Gel oder auch als Keramik vorkommen.

Als Separator dienen dünne mikroporöse Polyolefinfilme, welche beide Elektroden von einander trennen und ausschließlich für Li-Ionen durchlässig sein sollen.

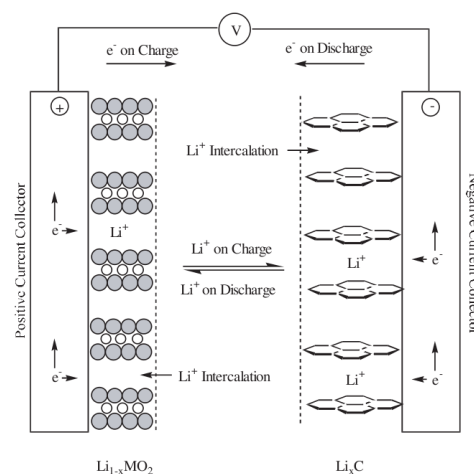
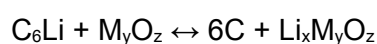


Abb. 15: Schema der elektrochemischen Prozesse einer Li-Ion-Zelle vgl. [20] S. 35.5

Die Gesamtgleichung für die Li-Ionen-Zelle lautet:



Während des Ladevorgangs wandern die Li-Ionen durch Elektrolyt und Separator zur Kathode, bei welcher sie sich in den Zwischenräumen der dortigen Schichten einlagern.

Die obere Betriebstemperatur wird von der beim ersten Ladevorgang gebildeten nicht brennbaren Schutzschicht (Solid Elektrolyt Interface SEI) auf der Kathode limitiert, welche sich ab Temperaturen von 120°C lösen kann und eine Selbstentzündung des Systems hervorrufen kann. Dieser Effekt kann allerdings mit neueren Elektroden (u.a. Nano-Titan oder Eisenphosphat) verhindert werden, welche eine thermische Stabilität bis 200°C aufweisen.<sup>73</sup>

Tab. 8: Nennparameter für Li-Ion-Akkumulatoren  
vgl. [20] S. 35.35

spezifische Energie	100 - 158 Wh/kg (je nach Leistung)
Energiedichte	245 - 430 Wh/dm <sup>3</sup>
spezifische Leistung	700 - 1300 W/kg
Zellspannung	2,5 - 4,2 V
interner Widerstand	~ Ω (je Zelle mit 1 Ah)
Selbstentladungsrate	wenig, 2 - 10% pro Monat
Anzahl an Ladezyklen	~3000 bei 1000% DoD
Lebensdauer	über 5 Jahre

### 3.5.3 Schaltung für Großbatterien

Wird nur eine Zelle z.B. für Mobiltelefone verwendet, stellen temporäre Spannungsschwankungen kein Problem dar, da die Spannung hier elektronisch auf 3 V heruntergeregelt wird. Soll aber eine Großbatterie mit 400 V z.B. für ein Elektroauto geladen werden, müssen (wenn eine Zelle eine Nennspannung von 3,6 V hat) alle 96 in Reihe geschalteten Zellen die gleiche Spannung von 3,6 Volt erreichen, da sonst einige Zellen einer zu hohen Spannung ausgesetzt werden könnten, was zu deren Zerstörung führen würde. Daher ist für diese Anwendung eine aufwändige Symmetrierungsschaltung erforderlich.<sup>74</sup>

<sup>73</sup> vgl. [2] S. 33 ff; [13] S. 45; [14] S. 114 ff; [20] S. 35.1 ff; [16] S. 58-59

<sup>74</sup> vgl. [2] S. 34

### 3.5.4 Forschungs- und Entwicklungslinien

Li-Ionen-Akkumulatoren gelten technisch als noch längst nicht ausgereift. Das Potenzial, welches in dieser Technologie gesehen wird, ließe allerdings eine breite Anwendung u.a. in der Elektromobilität und der Speicherung regenerativer Energie zu.<sup>75</sup> Daher versuchen viele verschiedene Initiativen und Firmen<sup>76</sup> dieses System in folgenden Punkten weiterzuentwickeln:

- verbessertes Batteriemangement (um eine hohe Lebensdauer und Zyklenzahl bei gleichbleibend tiefer Entladung zu ermöglichen)
- Senken der Herstellungskosten
- Verbessern von Performance und Sicherheit
- Steigern von Energie- und Leistungsdichte.<sup>77</sup>

Die Ansätze jene Probleme zu lösen gehen hauptsächlich in zwei Richtungen:

- das Ersetzen der Graphit- und Lithium-Cobalt-Oxid-Elektroden mit billigeren Materialien, welche zugleich eine höhere Zellspannung ermöglichen sollen
- das Ersetzen des organischen Elektrolyten mit sichereren und zuverlässigeren Systemen.<sup>78</sup>

#### Verbesserung der spezifischen Energie:

Die Optimierung des Zell-Designs (z.B. mit leichteren Aluminium- anstatt Stahlmängeln) ist weitestgehend ausgereizt. Zur Steigerung der spezifischen Energie sind Veränderungen der Zellchemie notwendig geworden.

Hierfür bieten sich Lithium-Metall-Verbindungen, wie z.B. Lithium-Silizium (Li-Si) oder Lithium-Selen (Li-Se) an, welche die kohlenstoffbasierte Anode ersetzen. Deren spezifische Energie wäre mit 4000 mAh/g für Li-Si und 990 mAh/g für Li-Se zehn, bzw. drei mal höher als bei konventionellen Li-C-Verbindungen.

Durch die hohen Volumenänderungen dieser Werkstoffe bei Lade- und Entladevorgängen, ist ihr Einsatz in Li-Ionen-Zellen momentan noch mit großen Einbußen in der Anzahl der Ladezyklen verbunden. Mit einer veränderten Morphologie (z.B. durch Nanostrukturierung), welche die Volumenänderung puffert, könnte dieses

---

<sup>75</sup> vgl. [23] S. 2422

<sup>76</sup> u.a. Lithium-Initiative-Freiberg; Innovationsallianz "Lithium Ion Batterie LIB 2015", darunter Li-Tec Kamenz

<sup>77</sup> vgl. [15] S. 10 ff; [2] S. 33 - 35

<sup>78</sup> vgl. [23] S. 2422

Problem umgangen werden. Titanoxid ( $\text{TiO}_2$ ) und Lithiumtitanoxid ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) wären weitere alternative Werkstoffe für Anoden, welche Vorteile in folgenden Gebieten hätten:

$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ :

- sehr geringe (<1%) Volumenänderungen bei Ladevorgängen
- keine Zersetzung des Elektrolyts
- Ermöglichung sehr niedriger und sehr hoher Einsatztemperaturen
- thermische Stabilität im geladenen und entladenen Zustand

$\text{TiO}_2$ :

- gutes Verhältnis von Kosten, Sicherheit und Umweltverträglichkeit.

Ein Ersatz für das teure und teilweise giftige Kathodenmaterial Lithiumcobaltoxid könnte der gut verfügbare und umweltfreundlichere Lithiummanganspinell darstellen. Hierfür müsste allerdings dessen Dissoziation im Elektrolyt vermindert werden. Weitere interessante Verbindungen für Kathoden wären:  $\text{LiMnPO}_4$ ,  $\text{LiCoPO}_4$  und  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ .

#### Verbesserung der Leistung:

Entscheidend für die Leistung gewöhnlicher Li-Ion-Akkumulatoren ist die Fähigkeit Li-Ionen in den Elektroden einzulagern. Die Rate der Ein- und Auslagerung sowie die Diffusionslänge können mit neuartigen Nanotechnologien wie Nanopartikeln und Nanoröhren entscheidend verringert werden.

Allerdings könnte dieses dann stark vergrößerte Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis nicht nur die Leistung beeinträchtigen, sondern außerdem die Reaktivität der Zelle inakzeptabel steigen lassen. Es scheint daher angebracht zu sein, konventionelle Morphologien zu nutzen, dafür aber die Dichte der Elektroden zu verringern.

Verschiedene Forschungseinrichtungen des Fraunhofer-Institutes für Silicatiforschung ISC versuchen nun die Vorteile der Nanotechnologie zusammen mit innovativen Werkstoffen zu verbinden.

So wird beispielsweise versucht die Leistungsabgabe der Akkumulatoren zu erhöhen, indem man „mesoporöse Kohlenstoffe mit maßgeschneiderten Poren“ oder eine Art „Rasen aus Carbon-Nanotubes auf den Elektroden wachsen“ entwickelt um die aktive Oberfläche zu vergrößern.

Um die speicherbare Gesamtenergie zu erhöhen, könnten den Elektroden „Zusätze von fein verteiltem Silizium“ zugeführt werden.<sup>79</sup>

---

79 vgl. [27] S. 23

Verbesserung von Sicherheit und Zuverlässigkeit:

Von allen Anstrengungen, die von Li-Ion-Zellen ausgehenden Gefahren zu verringern wird vermutet, dass diese die spezifische Energie der Zelle beeinträchtigen werden. Ein Kompromiss zwischen Sicherheit und Energie könnte darin bestehen, Elektrodenkombinationen zu nutzen, welche in dem Sicherheitsbereich des Elektrolyts liegen.  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  mit der niedrigen Systemspannung von 1,5 V als Anode zusammen mit  $\text{LiFePO}_4$  mit einer Spannung von 3,5 V an der Kathode wären hierfür eine gute Wahl.

Altair Nanotechnologies, Inc., der Hersteller des Lithium-Titanat-Akkus „nanoSafe™ Battery“ gibt hierfür bereits ansprechende Zahlen heraus:

- bis zu 4.000 W/kg bzw. 7.500 W/dm<sup>3</sup>
- nach 25.000 Ladezyklen verbleibende Restkapazität von 80%<sup>80</sup>
- Einsatztemperaturbereich: -50 bis 75 °C
- in einer Minute auf 80% seiner Kapazität aufladbar<sup>81</sup>

Sicherheitsrelevante Bedenken an der bisher genutzten organischen  $\text{LiFP}_6$ -Lösung sind:

- der relativ geringe Stabilitätsbereich welcher den Einsatz von Hochspannungselektroden gefährdet
- der hohe Dampfdruck und die Entflammbarkeit
- die Gefährdung von Mensch und Natur bei direktem Kontakt.

Ansätze, welche die Gefahren, die vom Elektrolyt des Li-Ion-Akkumulators ausgehen, vermindern sind:

- Beimischung von Zusätzen zum dem Elektrolyt, welche eine Feststoff-Elektrolyt-Trennfläche (SEI: solid electrolyte interface) bilden und/oder die thermische Stabilität erhöhen
- Redox-Shuttle, welche vor Überladung schützen
- (keramische) Separatoren, welche Kurzschlüsse bei Überhitzung verhindern
- Lithiumsalze als Alternative zu  $\text{LiFP}_6$  um die Toxizität zu verringern.<sup>82</sup>

Ein weitergehender Schritt wäre der Verzicht auf fluide Elektrolyte, welcher z.B. mit dem Einsatz von Feststoff-Polymer-Elektrolyten umgesetzt werden könnte.

---

80 vgl. [24]

81 vgl. [16] S. 61

82 vgl. [23] S. 2422-2425

Die Firma DBM Energy GmbH gibt vor mit ihrem Li-Ion-Polymer-Akku Meilensteine in Punkto Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit gesetzt zu haben. So soll der „KOLIBRI AlphaPolymer Akku“ dem Beschuss eines 6mm Kalibers standhalten und im Einsatz als Hauptenergiespeicher für Gabelstapler eine Kosteneinsparung von bis zu 70% gegenüber einem Blei-Säure-Akku ermöglichen.<sup>83</sup>

---

<sup>83</sup> vgl. [25]; genauere Angaben zu den „beeindruckenden“ Kennzahlen der Batterie wurden trotz Nachfrage nicht gegeben

### 3.6 Hochtemperaturbatterien

Hochtemperaturbatterien unterscheiden sich hinsichtlich zweier Merkmale von den bisher vorgestellten Systemen:

- die Elektroden liegen flüssig, der Elektrolyt liegt fest vor
- zur Aktivierung der Elektroden und des Elektrolyts kommen sehr hohe Temperaturen (300 – 350 °C) zum Einsatz.

Die sich dadurch ergebenden Vorteile sind:

- ein vergleichsweise hoher Wirkungsgrad (da bei diesen Temperaturen nahezu keine Nebenreaktionen ablaufen)
- eine geringe elektrochemische Alterung

Besonders aber die Temperierung bedingt auch einige Nachteile:

- Temperaturschwankungen über den Betriebsbereich hinaus führen zu hohen mechanischen Belastungen und können bis zur Unbrauchbarkeit des Akkumulators führen. Ein thermisches Management ist daher essenziell.
- Lange Wartezeiten vermindern durch die fortlaufende Heizung des Systems den Wirkungsgrad. Wurde der Heizkreis unterbrochen kann der Lade- und Heizprozess bis zu zwei Tage in Anspruch nehmen.

Die aufwändige Isolation und das thermische Management schließen dieses System für die mobile Nutzung etwa in Handys oder Laptops aus. Praktische Anwendung erhält dieses System aber bei der Pufferung regenerativen Stroms<sup>84</sup> und Nutzung batteriegetriebener Automobile (ZEBRA-Batterie).<sup>85</sup>

---

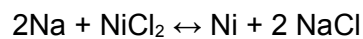
<sup>84</sup> vgl. [29] mit dem (nach eigenen Angaben) „weltweit Größten Energiespeicher“ von 34 MW für einen 51 MW Windpark

<sup>85</sup> vgl. [13] S. 41; [16] S. 61-62; [18] S. 146



### 3.6.1 Natrium-Nickelchlorid

Diese eher für den mobilen Bereich bestimmten Batterien (ZEBRA-Batterien) werden zur Zeit nur noch von der Firma MES-DEA S. A. hergestellt. Im geladenen Zustand besteht die Anode aus Natrium und die Kathode aus Nickelchlorid sowie einem weiteren flüssigen, nicht mischbaren Elektrolyt  $\text{NaAlCl}_4$ , welches die Leitfähigkeit der Natriumionen zur Kathode gewährleistet. Beide Elektroden sind zusätzlich durch einen keramischen Elektrolyt von einander getrennt, welcher zwar für Natriumionen, aber nicht für Elektronen leitfähig ist. Die Gesamtreaktion lautet:



Während des Entladevorgangs spalten sich Chlor-Ionen von der Kathode ab und verbinden sich mit dem Natrium der Anode. Im späteren Verlauf des Entladevorgangs kommt es zu einer weiteren Reaktion, in der das  $\text{NaAlCl}_4$  reduziert wird und die Zellspannung deutlich von 2,5 V auf 1,6 V abnimmt.

Diese hermetisch abriegelten und vakuumisolierten Zellen sind wartungsfrei, da keine Nebenreaktionen, welche z.B. zu Dendritenbildung führen können, auftreten. Verbesserungen hinsichtlich der Leistungsdichte können mit dem teilweisen Ersatz des Nickels der Kathode durch Eisen bzw. durch den Einsatz dünnwandiger, hochporöser Keramiken erreicht werden, welche mit erwarteten 150 W/kg bzw. 400 W/kg die Anforderungen für den Einsatz in Elektroautos übertreffen könnten.<sup>86</sup> Allerdings verhinderte u.a. auch der relativ große Bedarf an Wärmeleistung (eine Batterie mit 17,8 kWh verliert über 24 h ganze 2,4 kWh, was 13% der Gesamtladung entspricht) das Durchsetzen gegenüber anderen Energiespeichern.<sup>87</sup>

Tab. 9: Nennparameter für Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren  
vgl. [13] S. 34

spezifische Energie	100 Wh/kg
Energiedichte	150 Wh/dm <sup>3</sup>
spezifische Leistung	150 W/kg
Zellspannung	~ 2 V (2,5 V wenn voll geladen)
interner Widerstand	sehr niedrig, steigt aber bei hoher Entladung
Selbstentladungsrate	durch Temperierung des Systems ~ 10% pro Tag
Anzahl an Ladezyklen	> 1000
Ladezeit	8 h

<sup>86</sup> vgl. [13] S. 42-44; [20] S. 40.5-40.6; [16] S. 62; [18] S. 145-146

<sup>87</sup> vgl. [13] S. 43-44

### 3.6.2 Natrium-Schwefel

Natrium-Schwefel-Akkumulatoren werden zur Zeit aufgrund der aufwändigen Isolierung und Heizung sowie der Sicherheitsbedenken bzgl. des Austrittes beider  $\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  heißen Elektroden ausschließlich im stationären Bereich eingesetzt. Dabei können sie in der unterbrechungsfreien Stromversorgung und zum Fluktuationsausgleich für erneuerbare Energien eingesetzt werden. Die theoretische spezifische Energie ist sechs mal größer als die des Blei-Säure-Akkus. In der Praxis halbiert sich allerdings dieses Potenzial.

Die Anode besteht auch hier aus geschmolzenem Natrium, die Kathode aber aus geschmolzenem Schwefel. Als Elektrolyt dient eine feste  $\beta$ -Aluminium-Keramik, welche beide Elektroden von einander trennt, aber für  $\text{Na}^+$ -Ionen durchlässig ist.

Zum Erreichen der Betriebstemperatur muss die Batterie langsam vorgewärmt werden. Während des Lade/- und Entladevorgangs kann die benötigte Temperatur aber größtenteils durch die Batterie selbst gehalten werden, da der interne Widerstand des Systems entsprechend groß ist. Die Gesamtgleichung lautet:



Während des Entladevorgangs des Akkumulators wird das Natrium am Übergang zum Elektrolyten ionisiert und tritt als  $\text{Na}^+$ -Ion durch das Elektrolyt. Auf der Kathodenseite bildet es bis zur 60 – 75 prozentigen Entladung der Zelle zusammen mit dem Schwefel  $\text{Na}_2\text{S}_5$ , welches zu einer konstanten Spannung von 2,076 V führt. Der gebildete Stoff ist in der Kathode unlöslich, was zu einem Zweiphasengemisch führt.

Bei fortschreitender Entladung überwiegen in nachstehender Aufstellung folgende  $\text{Na}_2\text{S}_x$  Stoffe:  $\text{Na}_2\text{S}_4$  bei einer Zellspannung von 1,9 V, gefolgt von  $\text{Na}_2\text{S}_3$  mit 1,78 V.

Spätestens jetzt sollte die Entladung der Zelle beendet werden, da sich zum einen die Korrosivität der gebildeten Stoffe mit steigender Entladung erhöht und zum anderen bei weiterer Entladung das feste  $\text{Na}_2\text{S}_2$  gebildet wird, welches einen hohen internen Widerstand aufweist, schlecht wiederaufladefähig ist und zu einem strukturellen Schaden der Zelle führen kann. Das Vorhandensein von flüssigen Elektroden vermindert die typischen Alterungserscheinungen der Zelle, welches zu einer hohen Anzahl an Ladezyklen führt.<sup>88</sup>

---

<sup>88</sup> vgl. [13] S. 41-42; [20] S. 40.4-40.5; [16] S. 63-64

Tab. 10: Nennparameter für Natrium-Schwefel-Akkumulatoren  
vgl. [13] S. 42

---

spezifische Energie	100 Wh/kg (theoretisch bis zu 200 Wh/kg)
Energiedichte	150 Wh/dm <sup>3</sup>
spezifische Leistung	200 W/kg
Zellspannung	2 V
interner Widerstand	größtenteils vergleichbar mit NaCd
Temperaturbereich	300 – 350 °C
Selbstentladungsrate	wenig, aber Verluste durch Temperierung des Systems
Anzahl an Ladezyklen	~ 1000 bis 80% Kapazität
Ladezeit	8 h

---

### 3.7 Redox-Flow

Redox-Flow-Batterien unterscheiden sich grundlegend von den bisher vorgestellten Systemen, da das energiespeichernde Material (aus Salzen, die im Elektrolyten gelöst sind) extern gelagert wird. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben das Grundsystem, bestehend aus Anode, Kathode und ionenleitender Membran, mittels variablen Elektrolyttanks beliebig zu skalieren.

Im Gegensatz zu einer Brennstoffzelle wird der „Brennstoff“ hierbei allerdings nicht verbraucht, sondern lediglich die Wertigkeit der darin vorliegenden Ionen und damit das Mischungsverhältnis von ge- und entladenen Redoxspezies in den Tanks verändert. Damit ist der Redox-Flow-Prozess umkehrbar.

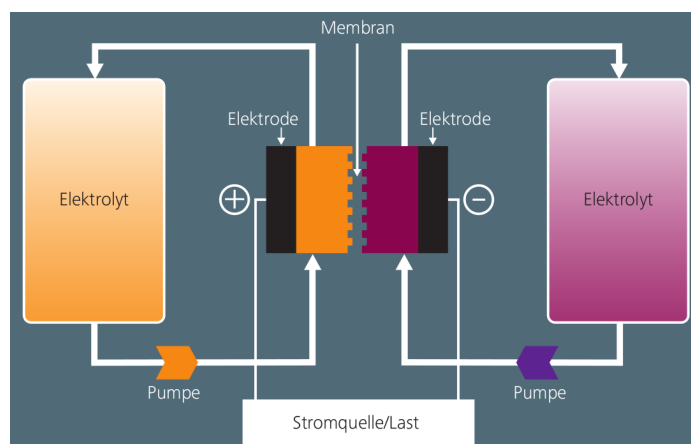


Abb. 16: Schematische Beschreibung einer Redox-Flow-Zelle  
vgl. [30] S. 15

Weitere Vorteile dieses Systems sind:

- kein Memoryeffekt
- keine nennenswerte Selbstentladung (bei Vernachlässigung des Energiebedarfs der Elektrolytpumpen)
- Unempfindlichkeit gegenüber Tiefentladung
- Betrieb bei Umgebungstemperatur

Dem gegenüber steht allerdings die relativ niedrige Energiedichte (typisch bei 18 bis 28 Wh/kg) die, bedingt durch die schlechte Löslichkeit der Salze im Elektrolyt, vergleichbar mit der einer Blei-Säure-Batterie ist.

Beim Be- und Entladen wird der Elektrolyt durch die jeweilige Elektrode gepumpt. Dabei treten positiv geladene Ionen durch die Membran zwischen den beiden Elektroden hindurch.

Die einfache Vergrößerung des Systems macht diesen Akkumulator zum geeigneten Energiepuffer für regenerative Systeme. Durch die Möglichkeit den Elektrolyten in einem „Tankprozess“ zu tauschen, kommt es auch für Elektroautos in Betracht. Relevante Anwendungen gibt es für diese, in den 70er Jahren entwickelte, Technik allerdings noch nicht. Redox-Flow-Batterien können anhand der Elektrolytenkombinationen unterschieden werden.

Mögliche Elektrolytkombinationen sind:

- Vanadium-Vanadium, Brom-Polysulfid, Vanadium-Brom, Eisen-Chrom, Zink-Brom, Zink-Cer, Blei-Säure (gelöst)<sup>89</sup>

### 3.7.1 Vanadium

Beide Elektrolyte bestehen bei Vanadium-Redox-Flow-Batterien (VRB) aus Vanadium, welches in Wasser und Schwefelsäure gelöst ist. VRB-Systeme konnten sich gegenüber anderer Elektrolytkombinationen aus folgenden Gründen durchsetzen:

- Da nur ein Gemisch in beiden Elektrolyttanks (mit unterschiedlichen Wertigkeiten) vorliegt tritt kein „Crossing-over-Effekt“ (Verunreinigung beim Durchtritt der Ionen durch die Membran) auf.
- Das Vanadium, welches bei der Erdölaufbereitung und Titanherstellung anfällt, kann so sinnvoll genutzt werden.
- Da keine strukturellen Änderungen die Komponenten während des Be- und Entladens gefährden bzw. keine Komponente verbraucht wird, sind Zyklenzahlen von mehr als 10.000 möglich.

Problematisch wären nur im Falle eines Unfalls austretende Schwefelsäure (welche als Lösungsmittel fungiert) und Vanadiumstäube, welche bei der Verbrennung entstehen.

Die Gesamtreaktion lautet:



---

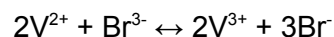
<sup>89</sup> vgl. [16] S. 64-66; [31] S. 37-40; [30] S. 14-15; [31] S. 37-39

In der ablaufenden Redox-Reaktion während des Entladevorgangs wird fünfwertiges Vanadium aus dem einen Tank zu vierwertigem reduziert und zweiwertiges Vanadium aus dem anderen Tank zu dreiwertigem oxidiert. Die elektrische Ausbeute liegt, unter der Berücksichtigung der Verluste durch die dazugehörigen Aggregate bei 70-80 %. Wirkungsgrade bis zu 90 % werden möglich, wenn Elektroden aus Karbonfasern verwendet werden, die dem Elektrolyten weniger Widerstand bieten.

Derzeit kostet der Bau einer solchen Redox-Flow-Batterie ca. 600 € pro kW. Bezogen auf eine kWh wären dies Kosten von ca. 60 €. Zur Zeit werden VRB-Anlagen (im kW- bis einstelligem MW-Bereich) hauptsächlich zur Lastnivellierung vor allem in Japan und den USA eingesetzt.<sup>90</sup>

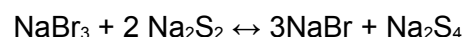
### 3.7.2 Vanadium-Brom

Bei der sich noch in der Entwicklung befindlichen Vanadium-Brom-Redox-Flow-Batterie besteht das Redoxpaar an der Anode aus zwei- bis dreiwertigem Vanadium und an der Kathode aus Brom/Bromid. Mit dieser Kombination sind mit 25 bis 50 Wh/kg höhere Energiedichten als bei reinen Vanadiumsystemen mit 15 bis 25 Wh/kg möglich. Damit wird dieses System auch für den mobilen Bereich attraktiver. Die Gesamtgleichung lautet:<sup>91</sup>



### 3.7.3 Natrium-Polysulfid-Bromid

Um mittels geringerer Materialkosten größere Leistungsklassen (im MW-Bereich) zu erreichen wurden zwei Natrium-Polysulfid-Bromid-Testanlagen mit 1 MW und 15 MW gebaut. Der Vorteil dieses Systems bestand darin, Natrium, Schwefel und Brom sehr kostengünstig in das System einzubinden. Das technische Problem der Kontamination der Elektrolyte durch Diffusion von Komponenten durch die Nafionmembran beendete 2003 das Projekt. Die Gesamtgleichung lautet:<sup>92</sup>



---

90 vgl. [30] S. 14-15; [16] S. 66-67

91 vgl. [16] S. 67

92 vgl. [16] S. 68

## 3.8 Hybrid-Flow

Anders als bei Redox-Flow-Batterien kommen bei Hybrid-Flow-Batterien eine oder mehrere elektroaktive Komponenten in fester Form vor. Damit ist die speicherbare Energie durch die Menge des in die Zelle passenden Materials beschränkt. Dafür lassen sich diese Batterien innerhalb von Minuten bis Stunden anstatt von Minuten bis Tagen bei Redox-Flow entladen.<sup>93</sup>

### 3.8.1 Zink-Brom

Obwohl dieses System bereits seit 100 Jahren bekannt ist, konnte es wegen folgender Probleme die Marktreife bisher nur in kleinerem Maße erreichen:

- Zink tendiert zur Dendritenbildung. Deren Ablagerung kann Kurzschlüsse verursachen.
- Brom besitzt eine hohe Löslichkeit in dem Zinkbromid-Elektrolyt. Dies begünstigt die Diffusion und direkte Reaktion mit der Zink-Elektrode, welches die Selbstentladung der Zelle erhöht.

Folgende Vorteile motivieren zur weiten Erforschung als Pufferspeicher, aber auch für batteriegetriebene Fahrzeuge:

- Möglichkeit einer Schnellladung
- Betriebstemperatur ist die Umgebungstemperatur
- Tiefentladung schädigt die Zelle nicht
- hohe spezifische Energie
- die benötigten Stoffe lassen sich als Abprodukte industrieller Prozesse gewinnen
- geringe Kosten der verwendeten Materialien.

Nachteilig daran ist:

- die Aggressivität des Broms gegenüber Kunststoffen
- die Giftigkeit des Broms für die Umwelt

---

93 vgl. [16] S. 68

- die hohe Selbstentladungsrate, wenn die Batterie während des Ladevorgangs heruntergefahren wird.

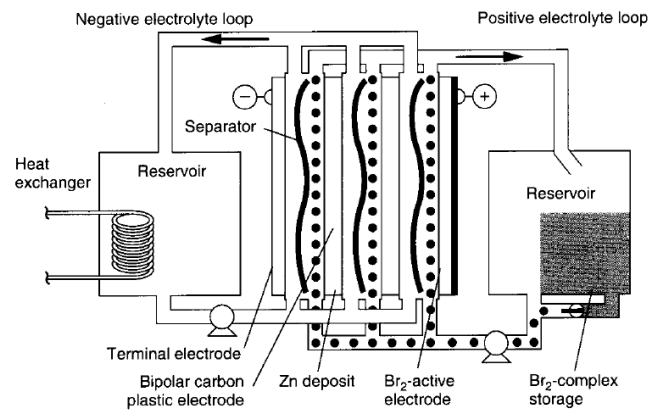
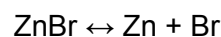


Abb. 17: Schema eines Drei-Zellen Zink/Bromid-Moduls  
vgl. [20] S. 39.2

Der Elektrolyt, bestehend aus einer wässrigen Lösung aus Zinkbromid, wird hier mittels Pumpen an beiden Oberflächen der Elektroden vorbei geführt. Anode und Kathode sind durch einen mikroporösen Plastikfilm, welcher nur für Zink- und Bromionen durchlässig ist, getrennt. Die Gesamtreaktion lautet:



Wird die Batterie entladen, bilden sich Zink- und Bromionen an beiden Elektroden und reagieren zu Zinkbromid. Wird die Zelle geladen, scheidet sich elementares Zink an der Kathode und Brom an der Anode ab, welches dort aber an organischen Aminen chemisch gebunden wird und als ölige Flüssigkeit zum Tankboden sinkt.

Bereits 1994 wurde, im Rahmen des „Endura“-Projektes, eine solche 1595 kg schwere „Zinc-Flow-Battery“ in einen gewöhnlichen PKW eingebaut, mit erstaunlichen Ergebnissen: Das Auto legte eine Entfernung von 281,6 km ohne Zwischenladung zurück, konnte in 15 Sekunden von 0 auf 100 km/h beschleunigen und erreichte eine Spitzengeschwindigkeit von 125 km/h. Im direkten Vergleich mit einer Blei-Säure-Batterie stellte sich heraus, dass mit der „Zinc-Flow-Battery“ zwei- bis dreimal höhere Reichweiten möglich waren.

Als zentraler Energiespeicher wurden von der Firma „ZBB Energy“ seit 2001 mehrere Anlagen mit Kapazitäten zwischen 50 kWh – 2 MWh installiert.<sup>94</sup>

<sup>94</sup> vgl. [16] S. 68-69; [20] S. 39.1 ff



### 3.8.2 Cer-Zink

Wegen der starken Redoxpaare Cer(III)/Cer(IV) und Zink(0)/Zink(II) beträgt die Zellspannung hier ca. 2,4 V, wovon ca. 1,9 – 2,1 V technisch nutzbar sind.

Des Weiteren wird nur ein Elektrolyt (Methansulfonsäure) verwendet. Verunreinigungen beim Ladungsaustausch sind damit ausgeschlossen. Insgesamt sollen mit diesem noch nicht marktreifen System zwei- bis dreifach höhere Energiedichten als bei anderen Flowbatterien möglich sein.<sup>95</sup>

---

<sup>95</sup> vgl. [16] S. 69

### 3.9 Auswertung der Vergleichsmatrix

Die Vielfalt der oben aufgelisteten Batteriesysteme zeigt, dass die Forschung und Entwicklung in viele Richtungen durchaus berechtigt ist. Momentan ist keines der Systeme so überlegen, dass die Fixierung allein darauf sinnvoll wäre. Neben dem spezifischen Preis und der Praxistauglichkeit könnten Energie- und Leistungsdichte prägnante Faktoren für die Bewertung der Akkumulatoren untereinander darstellen. Während für stationär eingesetzte Systeme, wie z.B. Systeme zur Speicherung von Photovoltaikstrom eher die beiden zuerst genannten Faktoren von Bedeutung sind, kommen – je nach Präferenz (große Reichweite bzw. hohes Drehmoment) bei elektromobilen Anwendungen die beiden zuletzt genannten Parameter hinzu.

Ist man zusätzlich bestrebt nachhaltig zu wirtschaften, sollten natürlich Verfügbarkeit und Umweltverträglichkeit der verwendeten Materialien nicht außer Acht gelassen werden.

Datenmatrix, Forschungsschwerpunkt und politische Bestrebungen zeigen deutlich, dass Li-Ionen-Akkumulatoren mit ihren spezifischen Energien von fast 200 Wh/kg für den Moment bevorzugt entwickelt und etabliert werden. Interessant ist, dass dieser Wert dem Richtwert für 2015<sup>96</sup> bereits jetzt gleicht. Für zwei der grundlegenden Nachteile dieses Systems (Sicherheit und Verfügbarkeit der Rohstoffe) werden, wie bereits in Kapitel 3.5.4 beschrieben mögliche Ansätze zur Lösung diskutiert.

Dass die spezifischen Kosten, welche in der Datenmatrix leider nicht ausreichend aufgenommen werden konnten<sup>97</sup>, weiter sinken, bleibt abzuwarten.

Mit 119 Wh/kg erreicht die ZEBRA-Batterie Z5-278-ML3X-76 als erste nicht Lithium-basierte Batterie den sechsten Platz. Das Verwenden umweltverträglicher Stoffe, sowie die relativ geringen Kosten<sup>98</sup> können auch diesem System eine führende Rolle in der Elektromobilität ermöglichen.

---

96 vgl. [5] S. 10

97 hierfür konnten nur wenige Werte ermittelt werden, da viele der Batteriehersteller keine Vertriebsstruktur haben bzw. viele der Batterien privat nicht oder nur schwer erworben werden können

98 vgl. [50]

Bezüglich der Leistungsdichte stellen sich Ni-MH besonders für Hybrid-Automobile als attraktiv dar. Ihre eher magere spezifische Energie kann mit der Kombination Elektro- und Verbrennungsmotor kompensiert werden. Auch können die hier nicht näher betrachteten Supercaps für diesen Bereich interessant werden.

Sollten zukünftig keine Batterien auf den Markt kommen, welche sowohl eine hohe Energie- als auch Leistungsdichte haben, so könnte auch die Kombination der beiden Typen (High Power und High Energy) erfolgversprechend sein.

Die Blei-Säure-Batterie wird für die Elektromobilität zukünftig wenn, dann eher für besonders preisgünstige Modelle von Bedeutung sein. Mit der mittleren Energiedichte von 37 Wh/kg<sup>99</sup> würde der Speicher für ein Elektroauto mit 16 kWh umgerechnet zwar 432,43 kg wiegen, dafür aber „nur“ 3200 € kosten<sup>100</sup>. Die Li-Ion-Polymer Batterie „SLPB 160460330“ würde im Vergleich dazu nur 90,09 kg wiegen allerdings 17600 € kosten.

Der Vorteil des Preises, sowie die hohe technische Reife und gute Praxistauglichkeit werden für die Blei-Säure-Batterie wahrscheinlich weiterhin Anwendung für stationäre Systeme z.B. der Speicherung von Photovoltaikstrom bedeuten.

Durch die Möglichkeit der einfachen Skalierbarkeit werden Redox-Flow-Batterien besonders für Großanlagen interessant. Deren niedrige spezifische Energie (in der Tabelle von 4,55 – 9,71 Wh/kg) kann dabei durch die lange Lebensdauer und die vergleichsweise einfache Wartung kompensiert werden.<sup>101</sup>

---

99 vgl. Anhang A1

100 bei mittleren spezifischen Kosten von 0,2€/Wh, vgl. Anhang A1

101 Tendenzen vgl. [5] S. 27; [3] S. 32; [14] S. 247; [15] S. 23; [16] S. 72-73, 114; [31] S. 9-10 bzw. die jeweiligen detaillierten Betrachtungen der oberen Unterkapitel

## 4 Entwicklungstendenzen zwischen Elektromobilität und Energiewirtschaft

Im Zuge des Umstiegs auf eine nachhaltige Energiewirtschaft, welche momentan durch die fast ausschließliche Nutzung fossiler Ressourcen und einem extrem unausgewogenen Zugang zu deren Reserven besteht, müssen drei zentrale Strategieelemente diskutiert und etabliert werden: Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. Kein einzelner Ansatz, welcher eines dieser Themen bearbeitet, kann für sich allein das Ziel nachhaltiger Energiewirtschaft erreichen. Vielmehr bauen viele der folgenden Ansätze aufeinander auf. Welches der Systeme aus verbessertem Lastmanagement, sinnvollerer Verknüpfung der vorhandenen Energiespeicher und Ausbau der Versorgungsstrukturen sich letzten Endes durchsetzen wird, bleibt offen.<sup>102</sup>

---

102 vgl. [32] S. 16ff, 53 ff

## 4.1 E-Energy / Smart Grid

Die zunehmende dezentrale und fluktuierende Energieeinspeisung und die flexibler und intelligenter reagierenden Verbraucher benötigen eine ebenso dynamische Infrastruktur, welche Lastflüsse sinnvoll verteilen kann.

E-Energy bzw. das „Internet der Energie“ möchte die verschiedenen Bereiche aus Energieproduzenten, -netzen und -verbrauchern digital miteinander verknüpfen. So soll die Integration von Informations- und Kommunikationstechnologie und energietechnischen Systemen maximale Effizienzgewinne bringen und den steigenden Anteil an regenerativen Energien sinnvoll abnehmen können.

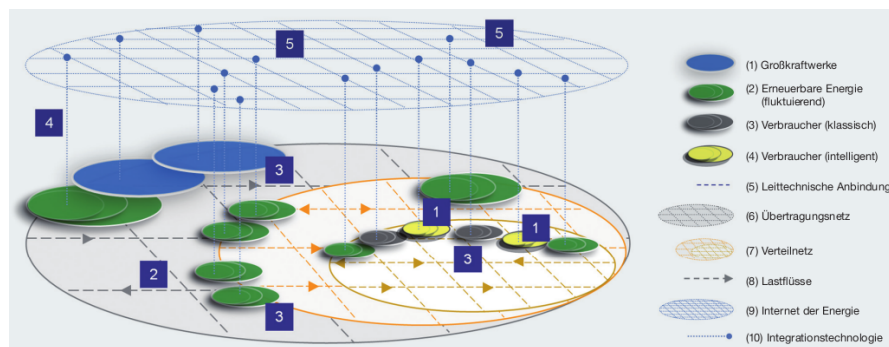


Abb. 18: Das Internet der Energie  
vgl. [65] S. 13

Durch die Abbildung dieser Bereiche auf einer virtuellen Ebene wird es möglich, die zeitnahe Kommunikation und damit verbunden die effiziente Koordination des Netzes weiterhin zu gewährleisten.

Die Komponenten dieses Netzes sind:

- Technologien zur Hausautomatisierung und zur dezentralen Energieerzeugung
- Intelligente Netzmanagementsysteme auf Übertragungs- und Verteilebene (Smart-Grids)
- Installierte Smart Metering-Technologie
- Dienstleistungen, welche die Koordination des Energienetzes auf betriebswirtschaftlicher Ebene umsetzen.

Ziel dessen ist vorrangig, den Verbrauchern, über transparente Kosten-Nutzen-Relationen, zu ermöglichen Energie einzusparen<sup>103</sup> und Energieerzeugungs- sowie -verbrauchsgeräte und Energiespeicher (inklusive derer in Elektroautos) in das Informationssystem einzupflegen. So könnten die dezentral gelagerten Speicher als Puffer zum Auffangen von Überangeboten und zur Netzglättung eingesetzt werden.<sup>104</sup>

<sup>103</sup> das BMWi schätzt das jährliche Einsparpotential auf 9,5 Twh pro Jahr

<sup>104</sup> vgl. [65] S. 13-26

## 4.2 Virtuelle Kraftwerke

Virtuelle Kraftwerke bezeichnen ein Netzwerk von kleineren dezentralen Stromerzeugungsanlagen, welche so miteinander verbunden sind, dass sie in der Lage sind zentrale dispositive Kraftwerksleistung zu ersetzen.<sup>105</sup>

Zwar sind Wind- und Photovoltaikanlagen witterungsabhängig, doch können diese zusammenschlossen mit weiteren Anlagen, welche unabhängig steuerbar sind, wie z.B. Biogasanlagen und Energiespeichern, wie Pumpspeicherkraftwerken befähigt werden die vom Verbraucher vorgegebene Lastkurve abzufahren.

Unterstützend könnten auch Mikro-KWK-Anlagen, wie Brennstoffzellen für Haushalte in ihrem Zusammenschluss in ein virtuelles Kraftwerk integriert werden.

Eine zunehmende Anzahl an Elektrofahrzeugen bietet das Potenzial, zusätzlich Strom aus Spitzenlastzeiten zu speichern und bei Zeiten niedrigen Angebotes Strom wieder in das Netz zurückzuführen. Durch diese Verknüpfung ist es letztendlich möglich mehr Strom aus erneuerbaren Energien nutzbar zu machen. Windkraftanlagen müssten nicht mehr abgeschaltet werden, wenn ein Überangebot das Netz belastet. Ebenso würden sich neue Vertriebsgemeinschaften, wie private Energiegenossenschaften und Stadtverbände ergeben.<sup>106</sup>

Diese Vernetzung bedingt die Notwendigkeit, Kommunikationsmöglichkeiten zur Steuerung dieser Anlagen zu etablieren. Je nach Möglichkeit die einzelnen Stromerzeuger zu steuern (was u.a. auch von deren Fahrweise z.B. stromgeführte Fahrweise bei Brennstoffzellen abhängt) würden Managementsysteme geschaffen werden. Ein zentraler Gateway-Rechner könnte z.B. mittels Modem/ISDN oder LAN/DSL Daten, wie z.B. Lastkurven mit den verschiedenen Erzeugern austauschen.<sup>107</sup>

Diese Modelle sind in kleinerem Rahmen bereits unter praxisnahen Bedingungen getestet worden.

So konnte das Projekt „Kombikraftwerk“, welches hauptsächlich durch die Firmen Schmack Biogas AG, Solarworld und Enercon gestützt wurde zeigen, dass es möglich ist mit dem erwarteten Energievermögen von Wind, Sonne und Biomasse den Strombedarf Deutschlands rein quantitativ zu decken. Zusätzlich zeigten sie mit einem

---

<sup>105</sup> vgl. [35] S. 81

<sup>106</sup> vgl. [5] S. 22; [35] S. 80 ff; [32] S. 58

<sup>107</sup> vgl. [35] S. 80 ff

um den Faktor 1/10.000 verkleinerten Modell (bzgl. des möglichen Energievermögens) eines Zusammenschlusses von drei Windparks, 19 Städten mit Photovoltaiknutzung, vier Biogasanlagen und einem Pumpspeicherkraftwerk dass es möglich war, in Echtzeit eine kalkulierte Lastkurve nachzufahren ohne zusätzliche Kraftwerke auf Basis fossiler Brennstoffe hinzuzuschalten.<sup>108</sup>

Das europäische Projekt „FENIX“ konnte die erwarteten Vorteile der virtuellen Kraftwerke sogar in zwei Pilotanlagen in Spanien und England praktisch aufzeigen.<sup>109</sup>



Abb. 19: Schema eines regenerativen Kombikraftwerkes  
vgl. [33]

108 vgl. [34] S. 12 ff

109 vgl. [36]

### 4.3 Ausbau der Stromtrassen

Das Prinzip der verbrauchsnahe Stromerzeugung kollidiert mit dem wachsenden Anteil an regenerativen Energien, von denen Windenergie mit dem darin liegenden Anteil von 61% im Jahr 2030<sup>110</sup> einer der Hauptfaktoren für einen zukünftigen Ausbau darstellen wird. Diese Verlagerung des Erzeugungsschwerpunktes in den windreichen Norden bedingt einen Netzausbau auf der Höchstspannungsebene (220–380 kV) bis zum Jahr 2015 von 400 km in der bereits vorhandenen Struktur sowie 850 km Neubau<sup>111</sup>. Dies entspräche 5% des bestehenden Höchstspannungsnetzes und wird mit Kosten von 1,1 Mrd. € beziffert. Die Anbindung der Offshore Windparks der Nord- und Ostsee würde allein für das 220 kV-Netz und das 400 kV-Netz einen weiteren Trassenbedarf von ca. 1000 km ergeben.<sup>112</sup>

Wechselt man nun vom Umgang mit dem Ist- zur Arbeit mit dem Soll-Zustand, welcher die 100-prozentige Versorgung mit regenerativer Energie als Ziel sieht, so kommen ganz neue Dimensionen ins Spiel: Die ursprüngliche Struktur der nationalen Stromnetze, welche nur rudimentär miteinander verbunden sind, wird zur Aufnahme der erneuerbaren Energien (auch der Solaren aus dem Süden) in ein europäisches Stromnetz übergehen. Bis 2050 soll dieses Supersmart-Grid in der Verbindung von Europa und Afrika in der Lage sein die Einspeisung 100% erneuerbarer Energie und Versorgungssicherheit zu gewährleisten<sup>113</sup>.

Diese Hochspannungs-Gleichstromleitungen (HVDC) sollen über Koppelstellen mit den regionalen Smart-Grids und den verstärkten Hochspannungswechselstromleitungen (HVAC) verbunden sein und mittels digitaler Kommunikation die Energie bedarfsgerecht zum Verbraucher führen und über einen Lastausgleich das Netz auf regionaler Ebene effizient machen.

Planen will dies die Agency for the Cooperation of Energy Regulators (Acer) und umsetzen die „Friends of the Supergrid“ (IOSG) – eine Gruppe von Unternehmen, denen z.B. Hochtief, Areva, Mainstream und Siemens angehören. Das erste 11 cm dicke und für 1 GW ausgelegte HVDC-Seekabel zum Anschluss des ersten deutschen Offshore-Windparks „BARD Offshore 1“ wurde bereits verlegt.

---

110 insgesamt sollen laut dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung bis dahin 25% vom gesamten Stromverbrauch regenerativ erzeugt worden sein

111 so die Netzstudie der Deutsche Energie-Agentur im Jahre 2005

112 vgl. [59] S. 32-34

113 so die Roadmap der Prince Waterhouse Coopers vom März 2010



Das erste HVDV-Kabel zwischen Europa und Nordafrika könnte dann 2015 verlegt werden und das gesamte Supergrid-Netz durch Europa in den nächsten 10 Jahren fertiggestellt sein. Bis 2050 soll dann dieses Supergrid mit den regionalen Smart-Grids zu einem europäischen Supersmart-Grid ausgebaut sein.

Dem entgegen stehen u.a. zwei Probleme:

- eine solches Netz benötigt Normen – z.B. für Umrichter-Stationen, so dass Produkte mehrerer Hersteller gleichermaßen eingesetzt werden können
- die langfristig ausgelegten internationalen Pläne unterliegen momentan noch mittelfristigen nationalen Kalkulationen – so wird es schwer sein den Umfang und die Kosten von veranschlagten 23 bis 28 Mrd. €<sup>114</sup> für die nächsten fünf Jahre zu decken.<sup>115</sup>

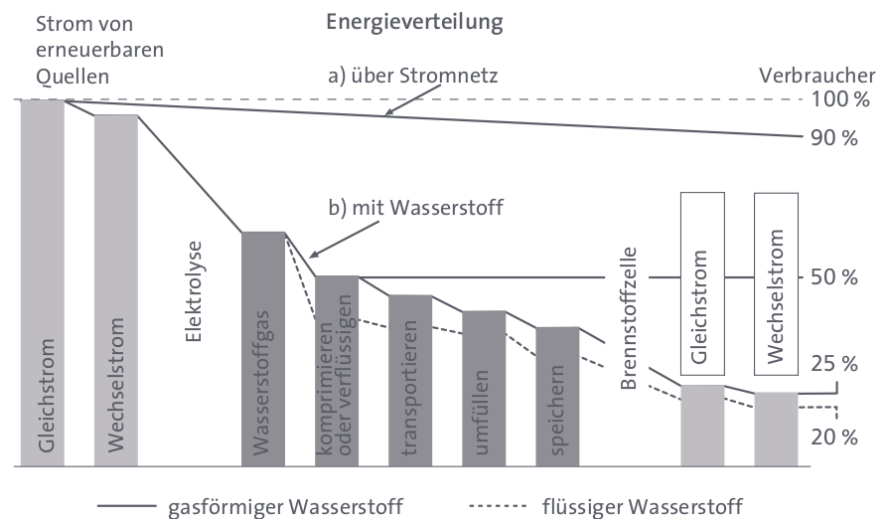


Abb. 20: Die Betrachtung der Energieverluste zeigt die Überlegenheit eines ausgebauten Stromnetzes gegenüber der Zwischenspeicherung von Wasserstoff vgl. [16] S. 100

114 so der Europäische Verbund der Übertragungsnetzbetreiber (Entso-E)

115 vgl. [53]; [60]; [61]

## 4.4 Energieladesysteme

Als eins der acht Modellregionen in Deutschland möchte Berlin die Elektromobilität mit einem Car-Sharing-Angebot etablieren, welches neben Elektroautos auch Elektrofahräder und -roller umfasst. Um dies zu ermöglichen, soll eine „diskriminierungsfrei zugängliche Ladeinfrastruktur im öffentlichen Straßenraum“ errichtet werden. Drei wesentliche Möglichkeiten dieses Vorhaben umzusetzen werden folgend vorgestellt.<sup>116</sup>

### 4.4.1 Stromtankstellen

Europa weist bereits eine große Anzahl an sog. Stromtankstellen auf. Darunter befindet sich neben vielen Anbietern<sup>117</sup>, wie z.B. RWE und E.on auch das seit 1992 etablierte „Park&Charge“ System. Um die „Zapfsäulen“ dieses Systems nutzen zu können, kann einmalig ein Schlüssel geordert werden, welcher Zugang zu den Anschlüssen verschafft und jährlich eine Vignette erworben werden, welche es ermöglicht für ein Jahr zu parken und unbegrenzt Strom an allen Tankstellen dieses Systems zu tanken.<sup>118</sup> Andere Systeme z.B. von der Plug n' Charge KG authentifizieren mittels eines RFID-Chips, welcher den Tankdeckel entsperrt<sup>119</sup> oder wie RWE direkt über das Ladekabel<sup>120</sup>.

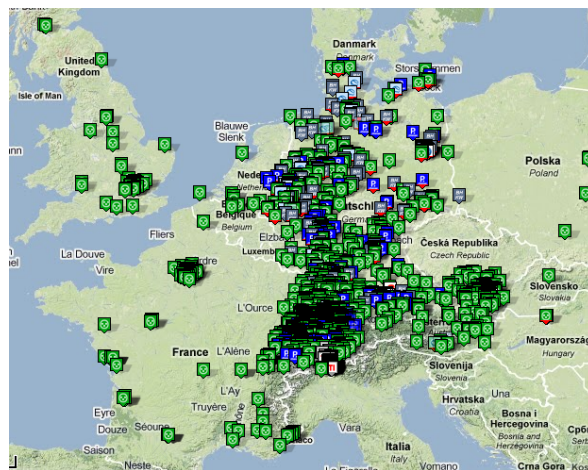


Abb. 21: Karte der Stromtankstellen  
vgl. [41]

116 vgl. [37]; [15] S. 37

117 weitere Anbieter: Tanksolar, SGTE Power, EBG energy equipment

118 vgl. [40]

119 vgl. [38]

120 vgl. [39]

Im Gegensatz zum Abrechnungssystem, welches noch sehr unterschiedlich gehandhabt wird, wurde der 7-Polige-Ladestecker für elektromobile Anwendungen bereits durch den VDE genormt und wird in der nächsten Zeit voraussichtlich als internationale Norm anerkannt. Der Stand der Abstimmung hierzu kann unter [52] verfolgt werden.

Die Vorzüge dieser Steckverbindung sind:

- Möglichkeit der internationalen Anwendung, trotz unterschiedlicher Stromnetze
- Unterstützung unterschiedlicher Ladebetriebsarten:
  - Einphasen- und Drehstrom bei 20, 32, 63 A
  - Einphasenstrom bei 70 A
  - Betriebsspannung maximal 500 V bei 50 bis 60 Hz
- durch „doppelgerichtete“ Energieübertragung ist die Einbindung in Smart Grids möglich.<sup>121</sup>

Zudem ermöglichen die dort übertragenen Stromstärken eine Schnellladung, welche mit dem eher rudimentären Stromanschluss im Keller nicht zu vergleichen ist.<sup>122</sup>

Dass die 500 Zapfsäulen, welche RWE allein in Berlin im Jahr 2010 aufstellen will, auch ausgelastet werden ist aber unwahrscheinlich. In Berlin fahren bisher insgesamt 150 Elektro-Fahrzeuge im Testbetrieb. Eine Marktstudie der Unternehmensberatung Bain & Company kam zu dem Ergebnis, dass lediglich 15 % der Nutzer von Elektro-Fahrzeugen auf diese öffentlichen Zapfsäulen angewiesen sind. Der Großteil der Nutzer wird sein Fahrzeug eher mit dem heimischen Stromanschluss aufladen. Doch selbst wenn die Zapfsäulen nicht wie erwünscht frequentiert werden, so sind sie zumindest eine gute Möglichkeit auf das Thema Elektromobilität aufmerksam zu machen.<sup>123</sup> Ein weiterer Vorteil der Stromtankstellen ist, dass sie, wenn sie denn genutzt werden, zu einem gewissen Teil Lastspitzen des Stromnetzes puffern können. Doch dafür müssen Anreize geschaffen werden. Dem eher als lästig wahrgenommenen Anschließen des Fahrzeuges an das Stromnetz könnte z.B. mit attraktiven Angeboten, wie Ökostrom oder einer Preisstaffelung, ähnlich dem Tag- und Nachtstrom entgegengetreten werden.<sup>124</sup>

---

<sup>121</sup>vgl. [55]

<sup>122</sup> vgl. [15] S. 52-53

<sup>123</sup> vgl. [53]

<sup>124</sup> vgl. [54]

#### 4.4.2 Austausch der Energiespeicher

Um den immer noch relativ langen Ladezeiten von mehreren Stunden (bis zu möglichen 30 min bei Starkstromladung) zu entgehen werden besonders von der Firma Better Place sogenannte Batterieladestationen vorangetrieben. Hierbei wird die Batterie (innerhalb von 2 min<sup>125</sup>) maschinell entfernt, extern geladen, und eine volle Batterie wird wieder eingesetzt. Die Batterien verbleiben über die Nutzungsdauer im Eigentum von Better Place und werden im Rahmen eines „Mobilitätspaktes“ an die Kunden vermietet.<sup>126</sup> Nachteilig an diesem Projekt ist, dass es bisher erst von dem Autohersteller Renault/Nissan gestützt wird<sup>127</sup> und noch keine entsprechende Normung für Batterien existiert, aber angestrebt wird<sup>128</sup>.

#### 4.4.3 Induktive Energieübertragung

Um nicht auf Kabelverbindungen für das Laden der Elektroautos angewiesen zu sein entwickeln die beiden Firmen IAV GmbH und WTB Datensysteme die Möglichkeit der induktiven Ladung. Dafür würde eine Platte mit integrierter Kupferspule in den Boden eingelassen, welche bei Serienfertigung nur noch 2000 € kosten sollte. Mit ihr ließen sich bis 15 cm überbrücken. Die relativ großen Verluste bei der Energieübertragung, das mangelnde Interesse der Autohersteller und keine existenten Normen für diese Technik werden das Laden per Induktion wenn überhaupt, dann erst in naher Zukunft an Bedeutung gewinnen lassen<sup>129</sup>.

Im öffentlichen Personennahverkehr scheint diese Idee aber bereits an Form zu gewinnen: Die Firma Bombardier führt auf ihrem Testgelände eine Straßenbahn, welche mit der als „Primitive“ bezeichneten Technik getestet wird. Bombardier verspricht sich damit eine sicherere und zuverlässigere Stromübertragung, welche zudem des Stadtbild weniger beeinträchtigt.<sup>130</sup>

---

125 so das Demonstrationsvideo von Better Place

126 vgl. [56]

127 vgl. [15] S. 52

128 vgl. [55]

129 vgl. [57]; [58]

130 vgl. [66]

## 5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird deutlich, dass das Thema der Energiespeicherung für Photovoltaiksysteme und für elektromobile Anwendungen nicht allein für sich sondern im Kontext zukünftiger Energieversorgung betrachtet werden muss. Nicht nur der Markt für Speichersysteme ist international organisiert, sondern auch politische und wirtschaftliche Bestrebungen.

Die USA allein stellt 2,4 Mrd. US\$ für Elektroautos und deren Batterien bereit.<sup>131</sup>

In China, den USA und Frankreich gibt es bereits eine Förderung von 5000 € bis 6000 € je Elektroauto.<sup>132</sup>

Auf Chinas Straßen befinden sich jetzt schon über 120 Mio. Elektrofahrräder.

Der Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. rechnet 2020 mit dem Kohle- und 2021 mit dem Atomausstieg Deutschlands. In der gleichen Zeit sollen bereits virtuelle Kraftwerke marktfähig sein und fluktuierende Energieerzeuger gezielt zum Ausgleich des Strombedarfs genutzt werden können.<sup>133</sup>

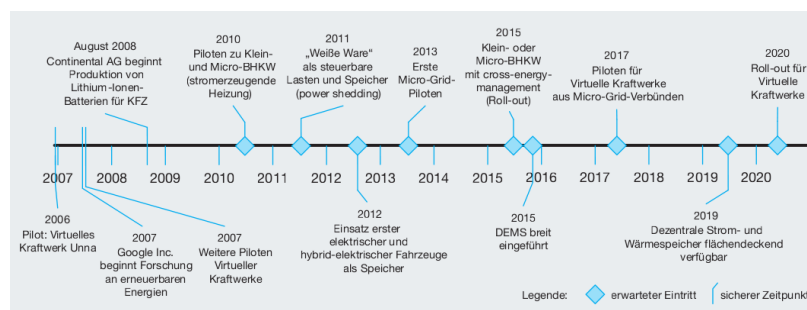


Abb. 22: Szenario für Deutschland: Dezentrale Energieerzeugung und Speicherung vgl. [65] S. 17

Der Schlüssel zur Umsetzung dieser Pläne wird zweifellos der Energiespeicher sein. Wie sich die Umgestaltung der Energieversorgung und -speicherung in Zukunft gestalten wird, ist ungewiss. Das theoretische Potenzial, der politische Wille und wirtschaftliche Ziele lassen aber keinen Zweifel daran, dass der hier vorgestellte Komplex zukünftig keine Vision mehr sondern Realität sein wird.

Es geht voran.

<sup>131</sup> vgl. [67] S. 9

<sup>132</sup> vgl. [68]

<sup>133</sup> vgl. [65] S. 8, 17

## Literaturverzeichnis:

- [1] Stan, Cornel: Alternative Antriebe für Automobile: Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. 2., erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-76372-7
- [2] Babel, Gerhard: Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik - 2., verbesserte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner, 2009. ISBN 978-3-8348-0563-8
- [3] Professional Engineering Publishing Limited (Hrsg.): Alternatively Fuelled Vehicles. Suffolk: Professional Engineering Publishing Limited, 2000. ISBN 1 86058 302 4
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung, 1. Auflage Stand Juni 2009. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Referat Öffentlichkeitsarbeit 11055 Berlin
- [5] Die Bundesregierung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Verabschiedet am 18. August 2009
- [6] Wagner, Andreas: Photovoltaik Engineering - Handbuch für Planung, Entwicklung und Anwendung - 2., bearbeitete Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. ISBN-10 3-540-30732-x
- [7] Deutscher Wetterdienst: Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland 2009. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima- und Umweltberatung Hamburg
- [8] European Commission, Joint Research Centre: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>. 28.04.2011
- [9] Unger, Jochem: Alternative Energietechnik. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner, 2009. ISBN 978-3-8348-0625-3

- [10] Watter, Holger: Nachhaltige Energiesysteme - Grundlagen, Systemtechnik und Anwendungsbeispiele aus der Praxis . 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg +Teubner, 2009. ISBN 978-3-8348-0742-7
- [11] Fraunhofer ISE: <http://www.ise.fraunhofer.de/presse-und-medien/presseinformationen/presseinformationen-2009/weltrekord-41-1-wirkungsgrad-fuer-mehrfachsolarzellen-am-fraunhofer-ise>. 28.04.2010
- [12] Sørensen, Bent: Renewable Energy - Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects. Third Edition. Roskilde: Elsevier Science, 2004. ISBN 0-12-656150-8
- [13] Larminie, James; Lowry, John: Electric Vehicle Technology Explained. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2003. ISBN 0-470-85163-5
- [14] Pistoia, Gianfranco: Batteries for Portable Devices. Amsterdam: Elsevier B. V., 2005. ISBN 0-444-51672-7
- [15] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (WRS): Strukturstudie BWe mobil - Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität. Stuttgart 2010
- [16] Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Dagmar Oertel: Energiespeicher, Stand und Perspektiven - Sachstandsbericht zum Monitoring »Nachhaltige Energieversorgung« . Arbeitsbericht Nr. 123 . Februar 2008
- [17] Powergenix: <http://www.powergenix.com/applications.php>. 28.04.2010
- [18] Shukla, A.K. ; Arico A.S.; Antonucci V.: An appraisal of electric automobile power sources . Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2001
- [19] Sørensen, Bent: Renewable Energy Conversion, Transmission, and Storage. 1. edition. Academic Press 2007. ISBN 978-0123742629

- [20] Linden, David; Reddy, Thomas B.: Handbook of batteries — third edition. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002. ISBN 0-07-135978-8
- [21] Sauer, Dirk Uwe: Elektrische Energiespeicher in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Seminarunterlage des Seminars für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik Berlin, 29.01.2009 . Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
- [22] Tesla Motors: [http://www.teslamotors.com/performance/perf\\_specs.php](http://www.teslamotors.com/performance/perf_specs.php). 29.04.2010
- [23] Scrosati, Bruno; Garche, Jürgen: Lithium batteries - status, prospects and future. Journal of Power Sources 195 (2010) 2419–2430. Elsevier, 2009
- [24] Altair Nanotechnologies, Inc.:  
<http://www.altairnano.com/profiles/investor/fullpage.asp?f=1&BzID=546&to=cp&Nav=0&LangID=1&s=0&ID=10702>. 03.05.2010
- [25] DBM Energy GmbH: <http://www.dbm-energy.com/index.php?ms=Oekonomie&PHPSESSID=6fdlqtjukop82g9ajbohs7u6d2&ft=1272919987>,  
<http://www.dbm-energy.com/index.phpms=KolibriAkkuUnterBeschuss&PHPSESSID=6fdlqtjukop82g9ajbohs7u6d2&ft=1272919484>. 03.05.2010
- [26] wattgehtab.com: <http://www.wattgehtab.com/batterie/tesla-roadster-fahrt-501-kilometer-mit-einer-batterieladung-2603>. 03.05.2010
- [27] Fraunhofer Magazin „weiter.vorn“: Mit neuer Energie. München: Fraunhofer-Gesellschaft, 2010. ISSN 1868-3436
- [28] Angerer, Gerhard et al.: Lithium für Zukunftstechnologien - Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität . Karlsruhe: Fraunhofer ISI, Dezember 2009
- [29] NGK Insulators, Ltd.: <http://www.ngk.co.jp/english/products/power/nas/installation/index.html>. 04.05.2010



- [30] Fraunhofer Magazin „weiter.vorn“: Mit neuer Energie. München: Fraunhofer-Gesellschaft, 2009. ISSN 1868-3428
- [31] Goodenough, John B.: Basic research needs for electrical energy storage. Office of Basic Energy Sciences Department of Energy . Juli 2007
- [32] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien - Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft, 7. aktualisierte Auflage Stand Juni 2009. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) - Öffentlichkeitsarbeit 11055 Berlin
- [33] Agentur für Erneuerbare Energien: <http://www.kombikraftwerk.de/>. 09.05.2010
- [34] Mackensen, R. et al.: Das regenerative Kombikraftwerk – Abschlussbericht. ISET e.V.. 31. April 2008
- [35] Droste-Franke, Bert et al.: Brennstoffzellen und virtuelle Kraftwerke - Energie-, umwelt- und technologiepolitische Aspekte einer effizienten Hausenergieversorgung. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. ISBN 978-3-540-85796-9
- [36] Braun, Martin: Virtual Power Plants in Real Applications - Pilot Demonstrations in Spain and England as part of the European project FENIX. Institut für Solare Energieversorgungstechnik e.V.. Kassel, 2007
- [37] TSB Innovationsagentur Berlin GmbH–FAV: Modellregion Berlin/Potsdam. Berlin 2009
- [38] Plug n' Charge KG: <http://www.plugcharge.de/produkte/index.php>. 09.05.2010
- [39] RWE Mobility: <http://www.rwe-mobility.com/web/cms/de/236726/rwemobility/>. 09.05.2010
- [40] Park and Charge: <http://www.park-charge.ch/d/benutzer.htm>. 09.05.2010
- [41] LEMnet: [http://www.lemnet.org/LEMnet\\_Map.aspx?l=de&ll=50.110000,8.671000&z=5&t=p&p1=4225&p2=126&ic=3&sc=D](http://www.lemnet.org/LEMnet_Map.aspx?l=de&ll=50.110000,8.671000&z=5&t=p&p1=4225&p2=126&ic=3&sc=D). 09.05.2010

- [42] Mitsubishi Motors: <http://www.mitsubishi-motors.de/modelle/neuheiten/imiev/1>. 10.05.2010
- [43] Véhicules Électriques Pininfarina Bolloré: <http://www.bluecar.fr/de/pages-accueil/espace-presse.aspx>. 10.05.2010
- [44] Solarworld AG: <http://www.solarworld.de/SunCarport.4039.0.html>. 10.05.2010
- [45] S@tel-light: <http://www.satel-light.com/pub/Rescue05102010174158/map2.htm>. 10.05.2010
- [46] SMA Solar Technology AG: <http://www.solar-is-future.de/solarstrom-fuer-ihr-haus/planung-ihrer-anlage/einspeiseverguetung-nach-eeq/>. 10.05.2010
- [47] cellstrom GmbH: <http://www.cellstrom.com/>. 10.05.2010
- [48] Planet Solar: <http://www.planetsolar.org>. 10.05.2010
- [49] Solar Impulse SA: [http://www.solarimpulse.com/en/documents/challenge\\_solar.php?lang=en&group=challenge](http://www.solarimpulse.com/en/documents/challenge_solar.php?lang=en&group=challenge). 10.05.2010
- [50] Solartaxi Technopark® Luzern: <http://www.solartaxi.com>. 10.05.2010
- [51] International Buissnes Times: <http://de.ibtimes.com/articles/20081204/weltumrundung-solarauto-poseden.htm>. 10.05.2010
- [52] International Electrotechnical Commission: <http://www.iec.ch/cgi-bin/procgi.pl/www/iecwww.p?wwwlang=e&wwwprog=pro-det.p&progdb=db1&He=IEC&Pu=61851&Pa=22&Se=&Am=&Fr=&TR=&Ed=2>. 10.05.2010
- [53] Bundesverbandes WindEnergie e. V.: [http://neueenergie.net/index.php?id=657&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=4316&tx\\_ttnews\[backPid\]=621&cHash=06fa3f790e](http://neueenergie.net/index.php?id=657&tx_ttnews[tt_news]=4316&tx_ttnews[backPid]=621&cHash=06fa3f790e). 11.05.2010
- [54] Henrich Publikationen GmbH: <http://www.energiespektrum.de/index.cfm?pid=1705&pk=90900>. 11.05.2010

- [55] Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG: <http://www.heise.de/autos/artikel/VDE-standardisiert-Elektroauto-Stecker-851667.html>. 11.05.2010
- [56] Better Place: <http://www.betterplace.com/solution/charging/>. 11.05.2010
- [57] Speer, Roger: <http://www.pressemitteilungen-online.de/index.php/stromt-ankstellen-fuer-elektroautos-ladesaeulen-explodieren-bundesweit/>. 11.05.2010
- [58] IAV GmbH: [http://www.iav.com/de/1\\_engineering/fahrzeugelektronik/Elektromobilitaet/Aufladekonzepte.php](http://www.iav.com/de/1_engineering/fahrzeugelektronik/Elektromobilitaet/Aufladekonzepte.php). 11.05.2010
- [59] Steger, Ulrich; Büdenbender, Ulrich; Feess, Eberhard; Nelles, Dieter: Die Regulierung elektrischer Netze - Offene Fragen und Lösungsansätze. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-68417-6
- [60] Henrich Publikationen GmbH: <http://www.energiespektrum.de/index.cfm?pid=1705&pk=90927>. 11.05.2010
- [61] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR): <http://www.iwr.de/news.php?id=15250>. 11.05.2010
- [62] Solar Fuel Technology GmbH & Co KG: <http://solar-fuel.com/>. 12.05.2010
- [63] Bundesverbandes WindEnergie e. V.: <http://www.neueenergie.net/index.php?id=663>. 12.05.2010
- [64] wattgehtab.com: <http://www.wattgehtab.com/elektro-rennfahrzeuge/hybrid-porsche-911-gt3-mit-schwungradtechnik-2698>. 12.05.2010
- [65] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.: Internet der Energie – IKT für Energiemärkte der Zukunft. Industrie-Förderung Gesellschaft mbH. Berlin, 2008. ISSN 0407-8977

- [66] Bombardier: <http://www.bombardier.com/de/transportation/nachhaltigkeit/technologie/primove-fahrdrahtloser-betrieb?docID=0901260d80048cc6>.  
02.06.2010
- [67] US Department of Energy: FY 2009 Annual Progress Report.  
[http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/technologies/energy\\_storage/index.html](http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/technologies/energy_storage/index.html). 03.06.2010
- [68] VDI Nachrichten: [http://www.vdi-nachrichten.de/vdi-nachrichten/aktuelle\\_ausgabe/akt\\_ausg\\_detail.asp?cat=1&id=46566&source=homepage](http://www.vdi-nachrichten.de/vdi-nachrichten/aktuelle_ausgabe/akt_ausg_detail.asp?cat=1&id=46566&source=homepage).  
03.06.2010

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Thermischer Wirkungsgrad vs. Last von Verbrennungsmotoren .....	7
Abb. 2: Verlauf der mittleren solaren Einstrahlung im Januar in Freiberg.....	11
Abb. 3: Verlauf der mittleren solaren Einstrahlung im Juli in Freiberg.....	11
Abb. 4: Typische Verluste und Wirkungsgradanteile von Solarzellenanlagen.....	12
Abb. 5: Inverses Verhalten des solaren Energieangebots und des Energiebedarfs...	12
Abb. 6: Entlade- bzw. Ladevorgang der Batterie.....	17
Abb. 7: Die Wertschöpfungsstufen der Batterieherstellung.....	18
Abb. 8: Entladevorgang im Bleisäureakkumulator.....	27
Abb. 9: Reaktionen während des Entladens einer Ni-MH-Zelle.....	32
Abb. 10: Leistungsdichte vs. spezifische Kosten einiger Batteriesysteme.....	33
Abb. 11: Gravimetrische Leistungsdichte vs. Energiedichte.....	40
Abb. 12: Kostenentwicklung Konsumerzellen der Bauart 18650.....	40
Abb. 13: Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterietypen.....	40
Abb. 14: Aktuelle Hauptentwicklungslinien bei Lithium-Ionen-Batterien.....	40
Abb. 15: Schema der elektrochemischen Prozesse einer Li-Ion-Zelle.....	42
Abb. 16: Schematische Beschreibung einer Redox-Flow-Zelle.....	52
Abb. 17: Schema eines Drei-Zellen Zink/Bromid-Moduls.....	56
Abb. 18: Das Internet der Energie.....	61
Abb. 19: Schema eines regenerativen Kombikraftwerkes.....	63
Abb. 20: Die Betrachtung der Energieverluste zeigt die Überlegenheit eines ausgebauten Stromnetzes gegenüber der Zwischenspeicherung von Wasserstoff.....	65
Abb. 21: Karte der Stromtankstellen.....	66
Abb. 22: Szenario für Deutschland: Dezentrale Energieerzeugung und Speicherung.	69

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Energiedichte bzgl. Masse und Volumen und Kreiswirkungsgrad verschiedener Speichermedien .....	13
Tab. 2: Kriterien für Batterien in Elektroautos.....	18
Tab. 3: Nennparameter für Blei-Säure-Batterien .....	27
Tab. 4: Nennparameter für Nickel-Cadmium-Akkumulatoren .....	30
Tab. 5: Nennparameter für Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren .....	32
Tab. 6: Nennparameter für Nickel-Zink-Akkumulatoren.....	34
Tab. 7: Nennparameter eines Zink-Luft-Akkus für Traktionsanwendungen der Firma Dreisbach Electromotive, Inc. welcher nicht mehr weiterentwickelt wird .....	37
Tab. 8: Nennparameter für Li-Ion-Akkumulatoren .....	43
Tab. 9: Nennparameter für Natrium-Nickelchlorid-Akkumulatoren .....	49
Tab. 10: Nennparameter für Natrium-Schwefel-Akkumulatoren .....	51

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Ort, Abgabedatum

Unterschrift des Verfassers

## **Anhang**

- A1: Vergleichsmatrix: Kenngrößen verschiedener elektrochemischer Akkumulatoren
- A2: auf CD: A1 als editierbare ODS-Datei
- A3: auf CD: die für Studienarbeit und Datenbank genutzten Quellen
- A4: auf CD: die Studienarbeit als PDF-Datei



# Kenngrößen verschiedener elektrochemischer Akkumulatoren

Anhang A 1 zur Studienarbeit: "Speichertechnologien in Elektroautos und für Photovoltaikstrom in Hinblick auf ein autarkes Gesamtsystem"

i	Typ	Name	Bauform <small>Z: Zelle M: Modul S: System</small>	Systemgrößen					Mechanische Größen					Elektrische Größen					Einsatzbedingungen					Kosten		Hersteller	Anwendungsbereich								
				Nennspannung V	Nennkapazität Ah	Energie Wh	Maximale Leistung W	spez. Energie Wh/kg	Energiedichte Wh/dm³	spez. Leistung W/kg	Leistungsdichte W/dm²	Volumen dm³	Maße mm	Masse kg	Spannungsbereich V	Ladespannung V	Max. Dauerentladestrom A	Max. Spitzenentladestrom A	Max. Ladestrom A	Ladewirkungsgrad %	Selbstentladrate % (Monat)	ebendauer a	Anzahl an Ladezyklen bis 80% DoD	Einsatztemperatur °C	Lagertemperatur °C			Ladedauer h	spez. Kosten €/Wh	Kosten €					
1	Li-Ion	ICR18650K <sup>11</sup>	Z	3,7	2,6	9,80	196	568			0,02	ø18,6   65,2	0,05	4,2±0,05																			Molicel	- Multimedia	
2	Li-Ion-Polymer	SLPB 160460330 <sup>6</sup>	Z	3,7	240	888,00					2,37	16   455   325	5±0,15	4,3±0,03	240	480															Kokam Co., Ltd.	- E-scooter, HEV, BEV			
3	LI-Ni-Co-Ma	IB-B-CHE-200 <sup>13</sup>	Z	3,7	200	740	3000 (23 OCV, 60% DoD)	133	203,86	545,45	826,446	280,9   182   71,1	5,5	...	200-600 (bei aktiver Kühlung)	1000-1400 (+2,5V -30, aktive Kühlung)	100-200 (bei aktiver Kühlung)	90	<3	10	>800 (bei 100% DoD)	0 - 45 -20 - 60	<35			1,10	975,68 <sup>25</sup>			International Battery	- BEV, E-Scooter, E-Bus - regenerative Energie				
4	Li-Ion	HE 602030 NCA <sup>16</sup>	Z	3,6	55	198,00					0,57	ø60   232	1,5	<4,2	110 (15s)	55						>1000	-30 - 60	-40 - 60						Gaia	- EV, regenerative Energie				
5	Li-Ion-Polymer	904823 <sup>4</sup>	Z	3,7	22	81,40					0,298	157   154   12,3	0,65	3 - 4,2																	Leclanché	- EV			
6	NaCl-Ni	Z5-278-ML3X-76 <sup>18</sup>	M	278	76	21200	30000 (70% DoD)	119	181	169	257	826   530   296	182	186 - 335		224																Zebra	- EV		
7	Li-Ion	IMR26700A <sup>11</sup>	Z	3,8	2,9	11,22					0,04	ø26,7   70,5	0,102	4,2±0,05	40	<3,7																Molicel	- BEV		
8	Li-Ion	IBR26700A <sup>11</sup>	Z	3,75	2,8	10,61					0,04	ø26,4   70,5	0,101	4,2±0,05	40	<8,4																Molicel	- BEV, PHEV		
9	Li-Me-Polymer	LMP <sup>17</sup>	M	410	75	30000	45000 (30s)	100	100		300		300	300 - 435																		Bolloré	- BEV		
10	Li-Ion	Intensium Flex Energy <sup>7</sup>	S	48	42 (20°C)	2250	9500	100	120	410 (für 30s)	510 (für 30s)	424   132   332	23	42-56	100	250 (bei 30s)	25	96			20 (bei 20°C) >10 (bei 40°C)	3000	-25 - 60									Saft Industrial Battery Group	- regenerierbare Energieträger u. Micro Grids - Traktionsfähig		
11	Li-Ion-Eisenphosphat	VM4824A-C <sup>4</sup>	M	48	24	1152,00	3456,00	94,43			283,28		12,2±0,2		48	72 (bei 60s)																BYD	- BEV, E-Scooter, E-Bus - regenerative Energie		
12	LiFePO4	IB-B-FHE-160 <sup>13</sup>	Z	3,2	160	512	3000 (23 OCV, 60% DoD)	94	141,05	555,55	826,446	280,9   182   71,1	5,4	975,68	160-480 (bei aktiver Kühlung)	800-1120 (+2,4V -30, aktive Kühlung)	80-160 (bei aktiver Kühlung)	90	<3	10	>2000 (bei 100% DoD)	0 - 50	-30 - 60									International Battery	- BEV, E-Scooter, E-Bus - regenerative Energie		
	Li-Ion	Intensium Flex Medium Power <sup>7</sup>	S	48	41 (20°C)	2000	12800	87	108	550 (für 30s)	690 (für 30s)	424   132   332	23	42-56	150	300 bei 30s	40	96			20 (bei 20°C) >10 (bei 40°C)	3000	-25 - 60									Saft Industrial Battery Group	- regenerierbare Energieträger u. Micro Grids - Traktionsfähig		
13	LiFeYPO4	TS-LFP90AHA <sup>14</sup>	Z	2,8	90	252,00					84,00	218   143   61	3±0,1	4	3	20	<3		<3		3000	-45 - 85			0,56	141,36 <sup>28</sup>					Thunder Sky	- BEV, HEV, regen Energieträger			
14	Ni-MH	NHE 10-100 <sup>1</sup>	M	12	100	1227,60	2790,00	66	137	150	310	120   195   390	18,6																			Saft Industrial Battery Group	- BEV, HEV, regen Energieträger		
15	Ni-MH	NHE 5-200 <sup>1</sup>	M	6	200	1227,60	2790,00	66	137	150	310	120   195   390	18,6																			Saft Industrial Battery Group	- BEV, HEV, regen Energieträger		
16	Li-Ion	Intensium Flex High Power <sup>7</sup>	S	48	30 (20°C)	1500	15000	65	80	650 (für 30s)	800 (für 30s)	424   132   332	23	42-56	200	325 (bei 30s)	60	96			20 (bei 20°C) >10 (bei 40°C)	3000	-25 - 60									Saft Industrial Battery Group	- regenerierbare Energieträger u. Micro Grids - Traktionsfähig		
17	Ni-MH	Series 9500 <sup>12</sup>	M	12	85	1040	4273 (20°C, 80% DoD)	60	155	245,58	633,04	6,75	375   176   102	17,4								1200										Cobasys	- Heavy Duty HEV, EV		
18	Li-Ion	Hymotion L5 <sup>3</sup>	S			5000				58,82			85	120																			A123Systems	- HEV	
19	Ni-MH	Plastic Case Prismatic Module <sup>2</sup>	M	7,2	6,5	46,80	1350	46	79,32	1298,08	2288,14	0,59	19,6   106   285	1,04																		Panasonic EV Energy Co., Ltd	- HEV		
20	Ni-MH	Metal Case Prismatic Module <sup>2</sup>	M	9,6	6,5	62,40	1800	41	93,13	1192,05	2686,57	0,67	18,4   96   382	1,51																		Panasonic EV Energy Co., Ltd	- HEV		
21	Blei-Säure	PG-6V210 FR <sup>20</sup>	M	6	226	1261,00					38,8		32,5			630 (10s)										0,20	247,62 <sup>27</sup>					Power Sonic	- BEV, regenerative Energieträger		
22	Blei-Vlies	BTL 12-200 <sup>9</sup>	M	12	200	2400,00					36,92	522   240   218	65													0,10	234,99 <sup>23</sup>					Effekta	- leichte EV, Photovoltaik		
23	PbCa	2M-12200HR <sup>15</sup>	M	12	200	2400,00					36,92	530   238   220	65	13,5-14,5	2200	5400										0,31	727,89 <sup>9</sup>					All Power Battery Discover Energy	- BEV, regenerative Energieträger		
24	Blei	EV185A-A <sup>7</sup>	M	12	198	2376,00					35,73	386   180   346	66,5	13,6-14,7						3 (bei 20°C)													Cellstrom GmbH	- Puffersystem - Solarstromtankstelle	
25	Vanadium Redox-Flow	FB10/100 <sup>21</sup>	S	48-400	250-2083	100000	8000-15000			9,71	4,20	0,78-1,46	0,34-0,63	23789,70	4500   2200   2403	10300				70-75 (gesamt)													Prudent Energy	- Puffersystem - Solarstromtankstelle	
26	Vanadium Redox-Flow	Mark III kW-Class VRB-ESS <sup>22</sup>	S	49-57	500-1000	20000-40000		6000	4,55-9,09	2,9-5,8	1,36	0,87	6897	>42	<59	125	175 (100s)	140		65 (gesamt)	11,70412	>10000 (bei 100% DoD)											BYD	- E-Bike	
27	Fe	R12150A-C <sup>4</sup>	M		150						18,24	442   196   210,5	28,0±0,2			450 (bei 5s)			95			>2000												GSYUASA	- E-Bike
28	Li-Ion	LV-50 <sup>6</sup>	M	3,7	50	185,00					0,85	171   43,8   113,5	1,7																					EnerSys	- BEV
29	Li-Ion	RKU100-V28-C360 <sup>10</sup>	M	28,2 ± 0,3	360	10152,00					58,79	575   169   605									10 (bei 20°C)													Minamoto	- BEV
30	Li-Ion-Polymer	LP-9574135 <sup>19</sup>	Z	3,7	10	37,00					172,68																								
31	Li-Ion-Polymer	LP-9574135 <sup>19</sup>	Z	3,7	10	37,00					172,68																								
31	Li-Ion-Polymer	LP-9574135 <sup>19</sup>	Z	3,7	10	37,00					172,68																								
31	Li-Ion-Polymer	LP-9574135 <sup>19</sup>	Z	3,7	10	37,00					172,68																								

Quellen:	Abgerufen am:
(1) http://www.saftbatteries.com	02.05.10
(2) http://peve.jp	02.05.10
(3) http://www.a123systems.com/	02.05.10
(4) http://bydit.com	02.05.10
(5) http://kokam.com/english/product/battery_main.html	02.05.10
(6) http://lithiumenergy.jp/en/products/index.html	02.05.10
(7) http://www.discover-energy.com	02.05.10
(8) http://blei-akkus.org/Discover-AGM-Bleiakku-12V-234Ah-20h-Traction-Dry-Cell-EV185A-A	02.05.10
(9) http://www.effekta.de	02.05.10
(10) http://www.modenergy.com/products.html	02.05.10
(11) http://www.molicel.com	02.05.10
(12) http://www.cobasys.com	02.05.10
(13) http://www.internationalbattery.com	02.05.10
(14) http://www.thunder-sky.com	02.05.10
(15) http://www.battery2000.com	02.05.10
(16) http://www.gaia-akku.com	02.05.10
(17) http://www.bluecar.fr/de	02.05.10
(18) http://www.cebi.com	02.05.10
(19) www.minamoto.com	02.05.10
(20) http://www.power-sonic.com/	02.05.10
(21) http://www.cellstrom.com/Downloads.6.0.html?&L=0	06.05.10
(22) http://www.pdenergy.com/en/technology/energy_storage_systems/technical_specifications/technical_specifications.html	06.05.10
(23) http://www.bleiakku.info/AGM-Batterien-Akkus/Effekta-BTL-Serie/EFFEKTA-BTL-12-200-AGM-Batterie-Bleiakku-12V-200Ah-193.html	07.05.10
(24) http://www.leclanche.eu/high-capacity-lithium-ion.21.0.html	09.05.10
(25) https://www.superlatticeinc.com/store3/index.php?act=viewProd&productId=12	11.05.10
(26) http://www.tucsonelectricbikes.com/store/products/TS%252dLFP90AHA.html	11.05.10
(27) http://lead.acidbatteries.com/Power-Sonic-PG-6V210-FR-Battery-p/pg-6v210fr.htm	11.05.10

Legende:	
12,345	Werte aus Firmenangaben
12,345	errechnete Werte
BEV	Battery electric vehicle
EV	Electric vehicle
HEV	Hybrid electric vehicle
LEV	Light electric vehicle
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle