

Kleine-Möllhoff, Peter; Benad, Holger; Beilard, Frank; Esmail, Mohammed; Knöll, Martina

Working Paper

Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft: Herausforderungen - Potenziale - Ausblick

Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management, No. 2012-03

Provided in Cooperation with:

ESB Business School, Hochschule Reutlingen

Suggested Citation: Kleine-Möllhoff, Peter; Benad, Holger; Beilard, Frank; Esmail, Mohammed; Knöll, Martina (2012) : Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft: Herausforderungen - Potenziale - Ausblick, Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management, No. 2012-03, Hochschule Reutlingen, ESB Business School, Reutlingen, <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:21-opus-60114>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/57925>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Peter Kleine-Möllhoff / Holger Benad / Frank Beilard /
Mohammed Esmail / Martina Knöll

**Die Batterie als Schlüsseltechnologie
für die Elektromobilität der Zukunft
Herausforderungen – Potenziale – Ausblick**

Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management
Reutlingen Working Papers on Marketing & Management

herausgegeben von Carsten Rennhak & Gerd Nufer

Nr. 2012 – 3



Hochschule Reutlingen
Reutlingen University

Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der Zukunft Herausforderungen – Potenziale – Ausblick

Projektarbeit der Gruppe 2 des Projektes Industrial Ecology
unter der Leitung von Prof. Peter Kleine-Möllhoff und MSc. Holger Benad
im MSc Production Management
an der ESB Business School Reutlingen
im Wintersemester 2011/2012

Autoren:

Peter Kleine-Möllhoff

Holger Benad

Frank Beilard

Mohammed Esmail

Martina Knöll

April 2012

Abstrakt

Mit dieser Arbeit wird eine Analyse bezüglich der Herausforderungen, Potenziale und dem Ausblick der Batterie als Türöffner für die Elektromobilität der Zukunft vorgelegt. Zunächst werden die technischen Grundlagen der Batterie dargestellt und die an sie gestellten Anforderungen für automobiler Anwendungen aufgezeigt. Anschließend werden die für den automobilen Einsatz in Fahrzeugen aktuell am stärksten verbreiteten sowie sich in Entwicklung befindliche elektrochemische Speichersysteme vorgestellt. Daran schließt sich eine Erörterung derer Potenziale und Grenzen an. Dazu werden die Batterietechnologien anhand der Anforderungen untereinander verglichen und bewertet. Als vielversprechendste Schlüsseltechnologie zur flächendeckenden Einführung der Elektromobilität wird die Lithium-Ionen-Batterie mit ihren Potenzialen und Spannungsfeldern vertiefender behandelt. Dies erfolgt über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg, beginnend bei der Rohstoffgewinnung über die Produktion und die Nutzung bis hin zum Recycling der Batterie. Im Fazit und Ausblick werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammenfassend dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3 Abgrenzung der Arbeit.....	2
2 Die Batterie als Türöffner zur Elektromobilität	4
2.1 Grundlagen.....	5
2.1.1 Batterie – Design, Aufbau und Funktion	5
2.1.2 Batteriesystem.....	6
2.2 Batterieanforderungen für mobile Anwendungen.....	8
2.2.1 Energiedichte.....	9
2.2.2 Leistungsdichte.....	10
2.2.3 Lebensdauer.....	10
2.2.4 Kosten	12
2.2.5 Umweltverträglichkeit.....	12
2.2.6 Sicherheit.....	13
2.3 Heutige Batterietechnologien für mobile Anwendungen	14
2.3.1 Blei-Säure-Batterie (PbA)	14
2.3.2 Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd)	14
2.3.3 Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH)	15
2.3.4 Natrium-Nickelchlorid-Batterie (NaNiCl)	15
2.3.5 Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion)	16
2.4 Entwicklungen bei Lithium-Batterien.....	17
2.4.1 Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Akku (NCA).....	17
2.4.2 Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Akku (NMC)	17
2.4.3 Lithium-Eisen-Phosphat-Akku (LFP).....	18
2.4.4 Lithium-Titanat-Akku (LTO)	18
2.4.5 Lithium-Polymer-Akku (Li-Poly)	18
2.4.6 Lithium-Schwefel-Akku (Li-S)	19

2.4.7	Lithium-Luft-Akku (Li-Luft)	19
2.5	Potenziale und Grenzen der Batterietechnologien.....	20
3	Wertschöpfungskette Li-Ion-Batterie	25
3.1	Materialien	25
3.2	Produktion.....	36
3.2.1	Produktionstechnologien Batteriezelle.....	36
3.2.2	Zellformen.....	38
3.2.3	Batteriemontage	39
3.2.4	Kosten	40
3.2.5	Industriedynamik	43
3.3	Nutzung	45
3.3.1	Sicherheitskritische Aspekte.....	45
3.3.2	Batterieladung	48
3.4	Batterieverwertung.....	49
4	Fazit und Ausblick	56
	Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Treiber der Elektromobilität.....	1
Abb. 2: Einteilung der Elektrostraßenfahrzeuge.....	2
Abb. 3: Technologien Elektroenergiespeicher.....	3
Abb. 4: Zelldesigns für die Verwendung in Elektrofahrzeugen.....	5
Abb. 5: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle.....	6
Abb. 6: Batteriesystem – Aufbau und Komponenten.....	7
Abb. 7: Spannungsfeld Batterietechnik.....	8
Abb. 8: Energie- und Leistungsdichten der Batterietechnologien für automobile Anwendungen.....	21
Abb. 9: Trade-offs aktueller Lithium-Ionen-Technologien.....	24
Abb. 10: Wertschöpfungskette Li-Ion Batterie.....	25
Abb. 11: Metallmassen typischer Lithium-Ionen-Batterien am Beispiel Tesla 55 kWh.....	27
Abb. 12: Vergleich Metallbedarf für 1 Mio. Tesla EV mit Jahresfördermengen.....	29
Abb. 13: Weltweite Lithium-Reserven, Stand 2011.....	31
Abb. 14: Vergleich Lithiumbedarf für 1 Mio. Elektrofahrzeuge mit Jahresproduktion 2010 / nutzbaren Reserven.....	34
Abb. 15: Kostenzusammensetzung der Batterie.....	36
Abb. 16: Herstellungsprozess Batteriezelle.....	36
Abb. 17: Batteriemontage.....	39
Abb. 18: Kostenzusammensetzung.....	41
Abb. 19: Kostenvergleich 2011/2020.....	42
Abb. 20: Li-Tec: Joint Venture zwischen Daimler und Evonik Industries.....	43
Abb. 21: Primearth EV: Joint Venture zwischen Toyota und Panasonic.....	43
Abb. 22: SB LiMotive: Joint Venture zwischen Samsung und Bosch.....	44
Abb. 23: Johnson Controls - Saft Advanced Power Solutions: Joint Venture zwischen Johnson Controls und Saft.....	44
Abb. 24: Batteriebrand und –explosion verursacht durch Thermal Runaway.....	46
Abb. 25: Verwertbarkeit einer Lithium-Ionen-Batterie, gewichts- und wertbezogen ...	50
Abb. 26: Materialkreislauf Traktionsbatterie LithoRec.....	52
Abb. 27: Recycling-Strategie Tesla Motors.....	54

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anforderung an Batterien in Abhängigkeit vom Antriebskonzept.....	20
Tab. 2: Bewertung der Batterietechnologien hinsichtlich der NPE-Ziele für 2020.....	22
Tab. 3: Hauptkomponenten einer LiFePO ₄ Batteriezelle	26
Tab. 4: Weltweite Lithiumproduktion und –reserven in Tonnen, Stand 2011.....	32
Tab. 5: Übersicht Batteriesicherheit.....	47
Tab. 6: Zusammenfassung von Recyclingprozessen und Behandlungsmethoden.....	51

Abkürzungsverzeichnis

<i>BMS</i>	<i>Batteriemanagement-System</i>
<i>CAN</i>	<i>Controller Area Network</i>
<i>DOD</i>	<i>Depth Of Discharge</i>
<i>EV</i>	<i>Electric Vehicle</i>
<i>FHEV</i>	<i>Full Hybrid Electric Vehicle</i>
<i>HVAC</i>	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>
<i>PHEV</i>	<i>Plug-In Hybrid Electric Vehicle</i>
<i>SEI</i>	<i>Solid Electrolyt Interphase</i>
<i>SOC</i>	<i>State Of Charge</i>
<i>ZEBRA</i>	<i>Zero Emission Battery Research Activities</i>

1 Einleitung

„Die Zukunft gehört dem, der als erster die Kraft der Sonne in den Tank packt, mit Wasserstoff überholt oder CO₂-frei vorankommt.“

Horst Köhler bei der ADAC Preisverleihung Gelber Engel, 14. Januar 2010

1.1 Motivation

Antropogener CO₂-Ausstoß, Klimawandel, begrenzte Ressourcen und erneuerbare Energien sind aktuelle Themen, die weltweit den heutigen Alltag begleiten und einen Einfluss auf die Megatrends der Zukunft haben werden. Diese werden unsere Gesellschaft in den nächsten Jahrzehnten signifikant prägen und verändern. Bedingt durch diese Megatrends sowie weitere treibende Kräfte, wie veränderte Kundenwünsche an die Mobilität der Zukunft und die sich weiter verschärfende Gesetzgebung (siehe Abb. 1) befindet sich auch die Automobilindustrie in einem Wandel: Der elektrische Antriebsstrang wird eine größere Rolle spielen und die Fahrzeugkonzepte technologisch sowie vom Business-Modell grundlegend verändern.

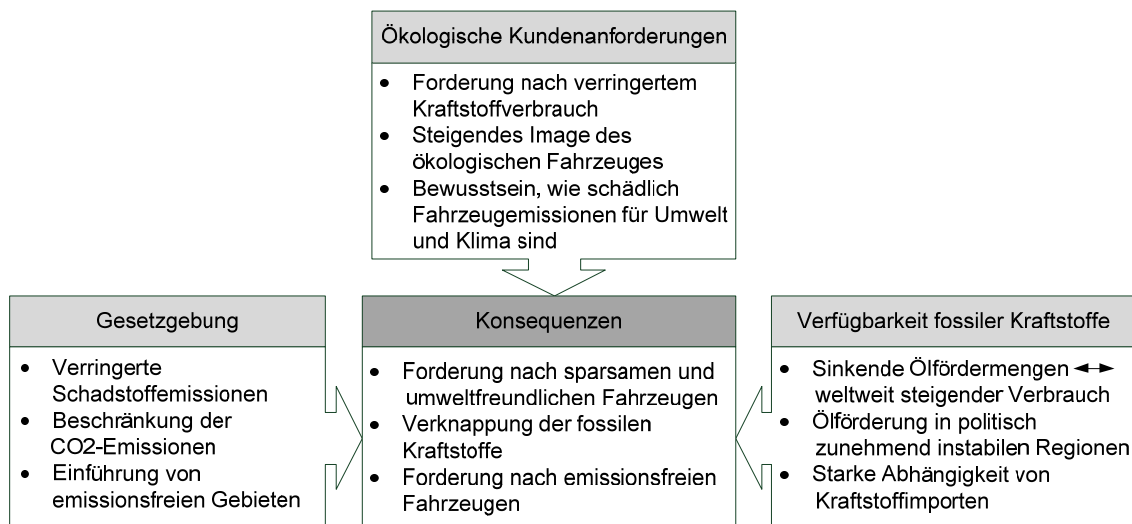


Abb. 1: Treiber der Elektromobilität [eigene Darstellung in Anlehnung an Wall11, S.3 aus Frei09]

Hierbei sind noch einige große Herausforderungen zu lösen, eine davon ist die Batterietechnologie. Deren Kosten sind noch viel zu hoch und die Leistung zu gering; Die Automobilindustrie muss zusammen mit Batterieproduzenten dem Maschinen- und Anlagenbau und eventuell auch den Versorgern Lösungen finden, welche ausgereift genug sind, um den Markt zu bedienen. Eine breitere Akzeptanz kann nur erzielt werden, wenn Kosten, Batterieleistung und Lebensdauer die Kundenerwartungen erfüllen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Im Bereich der Batterietechnologie soll der Status Quo für die Elektromobilität aufgezeigt werden. Es wird ein Überblick über am Markt verfügbare Batterietechnologien sowie sich in der Entwicklung befindende Technologien gegeben. Vergleiche und Bewertungen geben Aufschluss über die vielversprechendste Technologie. Für diese werden die zentralen Herausforderungen, Potenziale und Grenzen über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg analysiert. Die gewonnenen wesentlichen Erkenntnisse werden im Fazit und Ausblick zusammengefasst.

1.3 Abgrenzung der Arbeit

Die Arbeit fokussiert sich auf Elektrofahrzeuge (BEV:Battery Electric Vehicle). Hybridfahrzeuge werden nur zu Vergleichszwecken betrachtet. Im Bereich der Elektrofahrzeuge werden die Elektroautos betrachtet (siehe Abb. 2).

Elektrostraßenfahrzeug			
Elektrofahrzeug		Hybridfahrzeug	
Einspurig	Zweispurig	Einspurig	Zweispurig
E-Scooter	E-PKW	Pedelec	Micro-Hybrid
E-Motorrad	E-Nfz		Mild-Hybrid
			Full-Hybrid
			Plug-In-Hybrid

Abb. 2: Einteilung der Elektrostraßenfahrzeuge [eigene Darstellung in Anlehnung an Pfaf09, S.30]

Im Bereich der Batterietechnologie werden die momentan verfügbaren Technologien sowie Technologien, die sich in der Entwicklung befinden, vorgestellt (siehe Abb. 3).

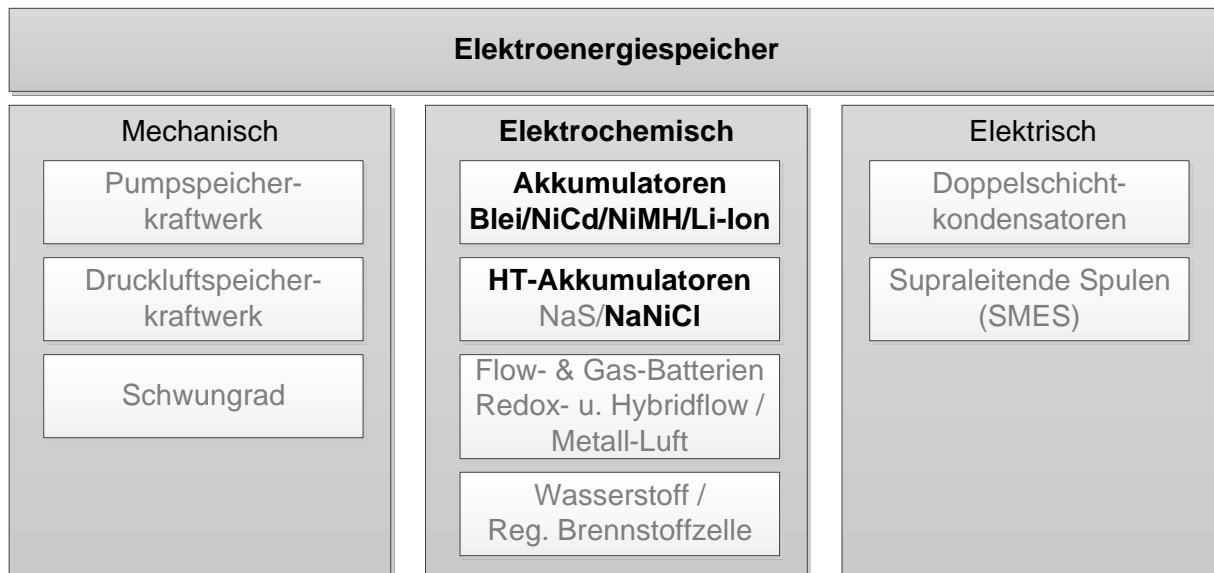


Abb. 3: Technologien Elektroenergiespeicher [eigene Darstellung in Anlehnung an Hann09, S.13]

Die Anforderungen an die Batterietechnologie werden anhand der Parameter Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer, Kosten, Umweltverträglichkeit und Sicherheit beurteilt. Im Bereich der Wertschöpfung werden bei den Materialien nicht alle in den Batterien enthaltenen Materialien betrachtet sondern nur die Bedeutendsten. Für die Batteriekosten und die industriellen Veränderungen wird nur der Zeitraum von 2011 bis 2020 betrachtet. Längerfristige Betrachtungen werden nicht angestellt. Außerdem werden ausschließlich OEMs, Batteriehersteller und Lieferanten betrachtet, die unmittelbar von den Fahrzeugherstellern beauftragt werden (Tier-1 Lieferanten).

2 Die Batterie als Türöffner zur Elektromobilität

„Die Batterien sind heute wie in der Zukunft die Schlüsselkomponente der Elektromobilität – um es nicht negativ zu sagen: ihre Achillesverse.“

acatech – Arbeitsgruppe „Energiespeicher“, Stellungnahme zur Elektromobilität, 2010

Die Fachwelt ist sich einig, dass es ohne geeignete Energiespeicher keine elektrisch angetriebenen Fahrzeuge geben wird. Der Energiespeicher wird dadurch zur entscheidenden Komponente für den nachhaltigen Erfolg der Elektromobilität [vgl. Fort10, S.51]. Derzeit befinden sich eine Reihe unterschiedlicher Konzepte zur Energiespeicherung im Einsatz, darunter Kondensatoren, Schwungräder oder Batterien. Für Zwecke der Elektrifizierung des Antriebstrangs spielt heutzutage neben der Brennstoffzelle vor allem die Batterie als elektrochemischer Energiespeicher eine bedeutsame Rolle [vgl. Wall11, S.104]. Hemmnisse stellen nach wie vor gegenüber zum Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, welcher auf fossile Energiespeicher zurückgreift, der unzureichende Energieinhalt, die geringe Lebensdauer sowie Sicherheitsrisiken und die Kosten der Batterie dar. Die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen auf dem Gebiet der Batterietechnologien lassen hier jedoch Fortschritte erwarten [vgl. Acat10, S.21].

In dem folgenden Abschnitt wird die Batterie als Energiespeicherkonzept für Elektrofahrzeuge vorgestellt. Zunächst werden die technischen Grundlagen dargestellt und danach die Anforderungen an ein Batteriesystem für die Verwendung in Fahrzeugen beschrieben. Anschließend werden die aktuell verbreiteten Batterietechnologien für automobiler Anwendungen vorgestellt. Auf Basis der Anforderungen an marktfähige Batteriesysteme und der Charakteristika verfügbarer technologischer Entwicklungen werden diese untereinander verglichen und bewertet. Aus dem Vergleich werden abschließend Aussagen über Potentiale und Grenzen von Zelltypen bezüglich der Elektromobilität abgeleitet.

2.1 Grundlagen

2.1.1 Batterie – Design, Aufbau und Funktion

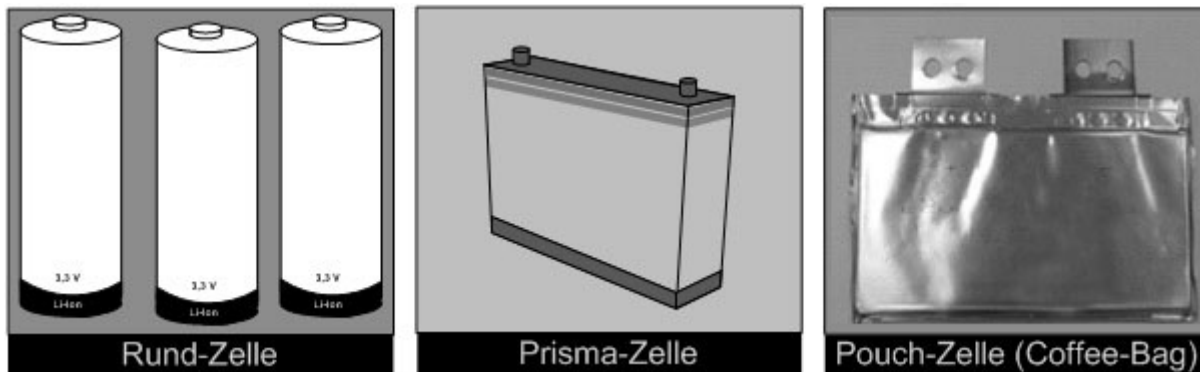


Abb. 4: Zelldesigns für die Verwendung in Elektrofahrzeugen
[eigene Darstellung in Anlehnung an Saft12, Sbli12, Wall11]

Als Batterie wird ein elektrochemischer Energiespeicher bezeichnet, der aus mehreren in Serie geschalteten galvanischen Zellen besteht, die in einem Gehäuse untergebracht sind [vgl. Joan10, S.25]. Das Batteriedesign für die Verwendung in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen reicht von zylindrische über prismatische Formen bis hin zu sogenannten Pouch-Zellen, die aufgrund ihrer Folienverpackung auch „Coffee-Bag“-Zellen genannt werden (siehe Abb. 4).

Beim Aufladen einer Batterie wird durch die sogenannte Redoxreaktion¹ die zugeführte elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt und gespeichert. Wird ein Verbraucher angeschlossen, wird dieser Prozess umgekehrt und die elektrische Energie wieder abgegeben [vgl. Frau09, S.16]. Die Energiewandlung erfolgt in der galvanischen Zelle. Sie besitzt zwei Elektroden, die sich in einem ionisch leitenden Elektrolyt befinden. Zwischen der negativ geladenen Anode und der positiv geladenen Kathode fließt der Elektronenstrom. Um einen Kurzschluss zu verhindern, trennt ein nicht leitender Separator die Elektroden voneinander. Lediglich der Ionenstrom kann den Separator passieren. Lithium-Zellen besitzen darüber hinaus noch eine elektrisch isolierende Deckschicht, die auch als Solid Electrolyt Interphase (SEI) bezeichnet wird. Diese Art „Film“ schützt das Anodenmaterial vor Kontakt mit dem Elekt-

¹ Redoxreaktion (Reduktions-Oxidations-Reaktion): Elektrochemische Reaktion, bei der ein Stoff A Elektronen abgibt (Oxidation), die von einem Stoff B aufgenommen werden (Reduktion).

rolyt [vgl. Wall11, S.109]. Die für die elektrochemische Reaktion verwendeten Elektrodenmaterialien werden auch als „Aktivmaterial“ bezeichnet [vgl. Joan10, S.25].

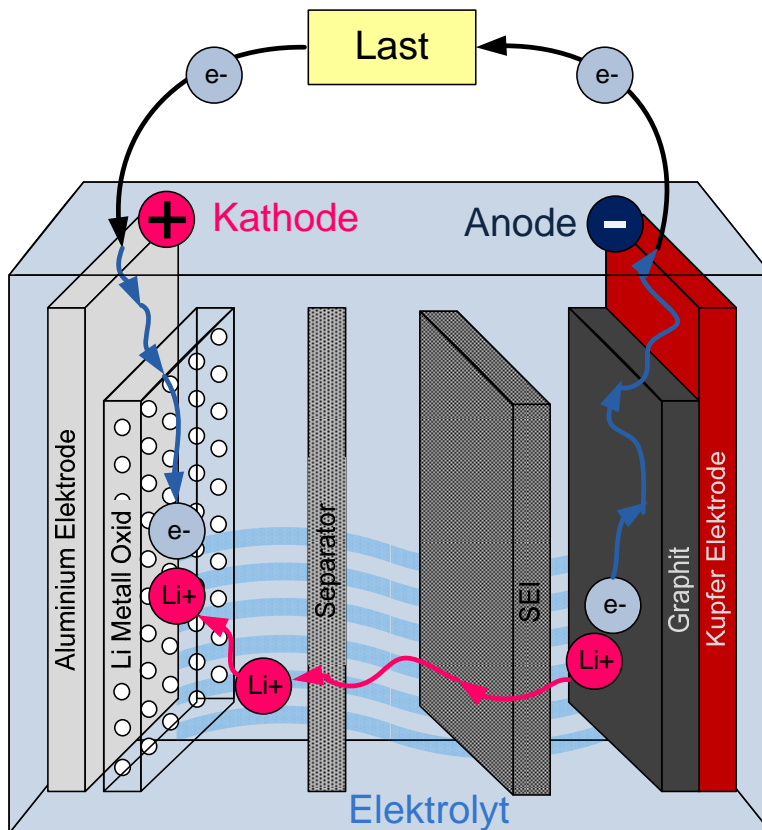


Abb. 5: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle

[eigene Darstellung in Anlehnung an Wall11, S.110, aus Fior09]

Prinzipiell wird zwischen Primär- und Sekundärzellen unterschieden. Primärzellen stellen nicht wiederaufladbare Stromquellen dar. Diese finden überwiegend im Consumerbereich Anwendung [vgl. Wall11, S.104]. Im Gegensatz dazu sind bei den wiederaufladbaren Sekundärzellen die elektrochemischen Vorgänge weitgehend reversibel. Letztere sind auch unter dem Begriff Akkumulator bekannt. Zur Realisierung zukunftsfähiger Elektroantriebe wird derzeit vom Einsatz wiederaufladbarer Sekundärzellen ausgegangen [vgl. Wall11, S.104]. Die Begriffe Batterie, Sekundärzelle und Akkumulator (Abkürzung: Akku) werden in folgenden Ausführungen synonym verwendet.

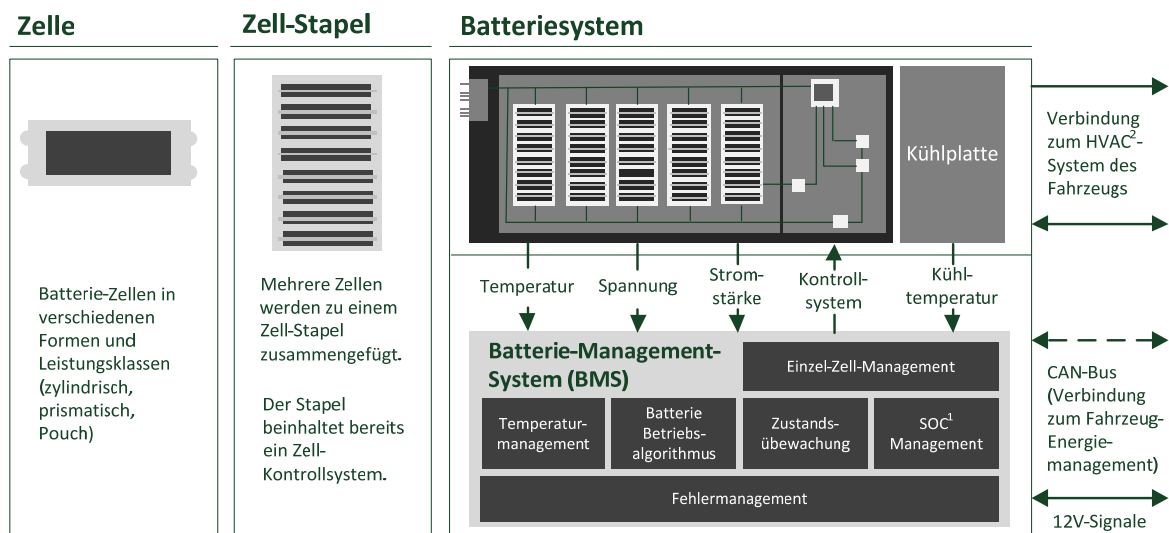
2.1.2 Batteriesystem

Für den Einsatz im Elektroauto werden mehrere Sekundärzellen zu einem Batteriesystem gebündelt (siehe Abb. 6). Dieses besteht im Wesentlichen aus drei Hauptbestandteilen [vgl. Berg11, S.16]:

- Batteriezellen
- Batteriemanagement-System
- Gehäuse mit Isolierung und Kühlsystem

Mehrere Batteriezellen werden zu einem Zellstapel (Modul) zusammengeführt und zur Erhöhung der Spannung in Reihe geschaltet. Diese Zellmodule werden dann gebündelt, um eine ausreichende Kapazität für die Verbraucher im Fahrzeug bereitzustellen [vgl. Wall11, S.104].

Außerdem wird ein Batteriemanagement-System (BMS) als Schnittstelle zwischen Elektroauto und den elektronischen Komponenten in der Batterie benötigt. Ein elektronisches Steuergerät überwacht das Batteriesystem und steuert abhängig vom Betriebszustand des Fahrzeugs relevante Funktionen. So überwacht das BMS z. B. Spannungen und Temperaturen bei Be- und Entladung sowohl von der Gesamtbatterie als auch von Einzelzellen [vgl. Berg11, S.16]. Darüber hinaus übernimmt das BMS das Temperaturmanagement des Batteriesystems. Das BMS reguliert das Temperaturniveau durch Kühlen und Beheizen und fördert dadurch die Leistung und Lebensdauer des Akkus [vgl. Berg11, S.16]. Treten Fehler im Batteriesystem auf werden diese registriert und dem Fahrer über ein Display angezeigt.



¹ State-of-charge – Ladezustand

² Heating, Ventilating and Air Conditioning – Heizung, Lüftung, Klimatechnik

Abb. 6: Batteriesystem – Aufbau und Komponenten [eigene Darstellung in Anlehnung an Berg11, S.16]

2.2 Batterieanforderungen für mobile Anwendungen

Die Eignung eines elektrochemischen Energiespeichers für den Einsatz in Elektrofahrzeugen hängt von einer Vielzahl technischer, ökonomischer sowie ökologischer Aspekte ab. In der Fachwelt werden diese in fünf bis acht Kategorien zusammengefasst (siehe Abb. 7). Beispielsweise hat das USABC² die Kategorien Leistungsdichte, Energiedichte, Sicherheit, Lebensdauer und Kosten als Schlüsselindikatoren für das Setzen von Batterieentwicklungszielen und zur Messung der erreichten Fortschritte bestimmt [vgl. Econ09, S.14]. Mit zunehmendem Umweltbewusstsein nimmt auch der ökologische Aspekt eine immer stärker ausgeprägte Rolle ein. Hierunter fallen der effiziente Einsatz von Rohstoffen und Energie sowie die Verwendung umweltverträglicher Materialien. Die genannten Anforderungen stehen in Wechselwirkung zueinander, wobei durchaus auch Zielkonflikte bestehen (siehe Leistungs- und Energiedichte). Sie sollten daher nicht losgelöst voneinander betrachtet werden [vgl. Wall11, S.105].

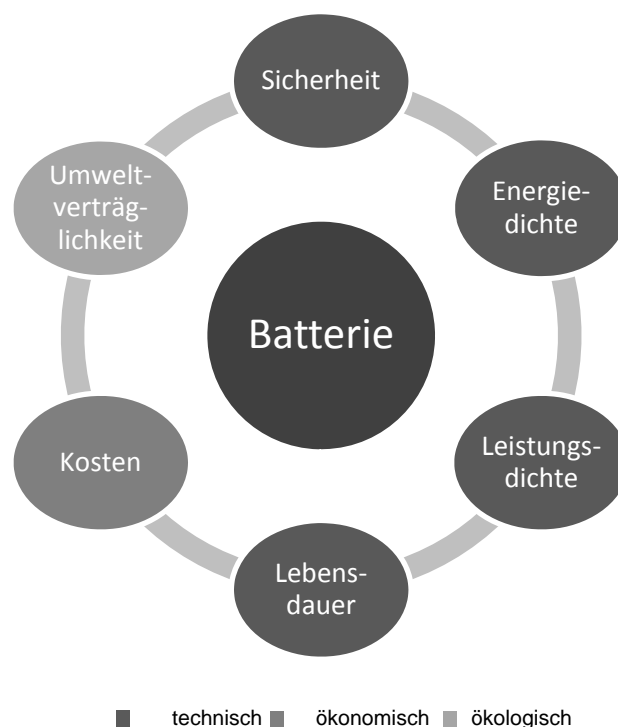


Abb. 7: Spannungsfeld Batterietechnik [eigene Darstellung in Anlehnung an Wall11, S.105]

² USABC (United States Advanced Battery Consortium): Staatlich gefördertes, kooperatives Forschungsprogramm zwischen den drei großen US-Automobilherstellern Ford, Chrysler und GM. Ziel ist es, innovative Batterietechnologien für den mobilen Sektor zu entwickeln.

2.2.1 Energiedichte

„Wenn es um Elektromobilität geht, dann ist auf jeden Fall die Energiedichte eine Schlüsseleigenschaft.“

Dr. Rüdiger Oesten, BASF Future Business

Die Energiedichte beeinflusst das Energiespeichervermögen des Akkus und ist daher ein wichtiges Maß für die erzielbare Reichweite des Fahrzeuges bis zur nächsten Ladung. Sie wird über das Produkt aus Ladungsdichte (Ah/kg) und Zellspannung (V) berechnet und definiert den gespeicherten Energieinhalt pro Masse der Batterie (Wh/kg) [vgl. Joan10, S.26].

Zum heutigen Stand der Technik lassen sich mit einer Sekundärzelle Energiedichten zwischen 20 und 200 Wh/kg (das entspricht 72 bis 720 kJ/kg) erzielen [vgl. Wall11, S.107]. Diese gespeicherte Energiemenge ist noch zu gering, um alltagstaugliche Distanzen zurücklegen zu können. Die Energiedichten fossiler Brennstoffe sind um nahezu den Faktor 100 größer als die aktuell üblichen Energiedichten von Akkumulatoren [vgl. Wall11, S.107]. Dieser Nachteil kann selbst durch den hohen Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs nicht kompensiert werden. Benzin hat beispielsweise einen Heizwert von ca. 41.000 kJ/kg (das entspricht 11.389 Wh/kg). Davon werden im Verbrennungsmotor ca. 33 % in mechanische Energie für den Antriebsstrang umgewandelt.

Den Überlegungen einer größeren Dimensionierung der Energiespeicher sind Grenzen gesetzt. So steigt mit zunehmendem Gewicht des Akkus der Energieverbrauch, was sich negativ auf die zu erzielbare Reichweite auswirkt. Außerdem setzt der verfügbare Bauraum im Fahrzeug den Abmessungen des Energiespeichers Grenzen [vgl. Wall11, S.150]. Neben den Aktivmaterialien müssen auch die notwendigen inaktiven Bauteile wie Gehäuse und Separator in die Gewichts- und Volumenbetrachtung mit einbezogen werden. Nicht zuletzt mindern auftretende Wärmeverluste die Energieausbeute. Aus diesen Gründen lässt sich in der Praxis nur ca. ein Viertel der verfügbaren theoretischen Energiedichte des Akkumulators realisieren [vgl. Joan10, S.26].

Um die Speicherkapazitäten von Akkus zu erhöhen wird versucht, Elektrodenmaterialien, die eine große Ladungsdichte aufweisen, zu kombinieren. Außerdem greift man auf Elemente des Periodensystems zurück, die möglichst weit auseinander liegen,

sodass bei der elektrochemischen Reaktion eine hohe Zellspannung erreicht wird [vgl. Joan10, S.26].

2.2.2 Leistungsdichte

Die Parameter Beschleunigung und Fahrgeschwindigkeit hängen neben der Leistung des Elektromotors selbst hauptsächlich von der Leistungsdichte des Energiespeichersystems ab. Die Leistungsdichte stellt die kurzzeitig maximal verfügbare Batterieleistung dar. Sie beschreibt, wieviel Leistung pro Batteriemasse (W/kg) abgegeben werden kann. Entscheidend für die Leistung der Batterie ist die Reaktionsgeschwindigkeit von Elektronen- und Ionen transfer. Große Reaktionsflächen zwischen Elektrode und Elektrolyt begünstigen diesen Vorgang [vgl. Joan10, S.27]. Aktuelle Batterietechnologien erreichen bereits relativ hohe Leistungsdichten (siehe Kap. 2.5, Abb. 11). Eine hohe Leistungsdichte bedeutet auch, dass die Energieaufnahme zur Ladung des Akkumulators schneller erfolgt.

Die zügige Bereitstellung und Aufnahme kleiner Energiemengen ist insbesondere für Hybrid-Fahrzeuge von großer Bedeutung. Für reine Elektroautos hingegen ist die Energiedichte wichtiger als die Leistungsdichte [vgl. Tbcg10, S.4], da die Reichweite des Fahrzeuges ausschließlich von der Kapazität des Akkumulators abhängt.

In der Entwicklung werden daher hinsichtlich der Anforderungen an Batterien Prioritäten gesetzt.

Im Rahmen der Entwicklung von Hochenergiebatterien setzt man große Massen an Aktivmaterial ein, um die Speicherkapazität zu erhöhen. Da diese für eine ausreichende Reaktionsfläche möglichst dünne Schichten an Aktivmaterial verlangen, lassen sich nur geringere Leistungsdichten erzielen.

Mit Hochleistungsbatterien lassen sich höhere Reaktionsgeschwindigkeiten und somit auch sehr gute Leistungsdichten realisieren. Dies geht jedoch zu Lasten der Energiedichte [vgl. Joan10, S.27].

2.2.3 Lebensdauer

Mit der Zeit baut die Batterie bezüglich vieler Leistungsmerkmale wie Energie, Leistung und Sicherheit durch mechanische und thermische Belastungen sowie chemische Reaktionen ab. Die Lebensdauer einer Batterie ist demnach begrenzt und erstreckt sich von der Inbetriebnahme bis zum Zeitpunkt des Speicherausfalls [vgl. Joan10, S.28]. Im Idealfall entspricht die Lebensdauer der Batterie mindestens der

Lebensdauer des Fahrzeugs, die heutzutage auf eine Betriebszeit von etwa 10 Jahren ausgelegt wird [vgl. Wall11, S.105]. Als Maß für die Lebensdauer werden die Alterungsfestigkeit (auch Kalenderlebensdauer) und die Zyklenfestigkeit herangezogen [vgl. Fort10, S.51].

Die Alterungsfestigkeit ist die Anzahl der zu erwartenden Jahre, in der die Batterie einsatzfähig sein wird. Der Alterungsprozess wird in besonderem Maße durch die Umgebungstemperatur und die Güte des Batteriemanagementsystems beeinflusst und ist dann weitgehend unabhängig von der Nutzung [vgl. Tbcg10, S.4].

Die Zyklenfestigkeit gibt die Häufigkeit der Entlade- und Ladevorgänge an, bevor der Verlust an Energie- und Leistungsdichte die Kriterien der Batterie nicht mehr erfüllen. Nach Teil 4 der DIN 43539 ist dies dann der Fall, wenn die Speicherfähigkeit der Batterie auf weniger als 80 % der Nennkapazität herabgefallen ist [vgl. Joan10, S.28]. Es wird zwischen Voll- und Teilzyklen unterschieden. Ein Vollzyklus bezeichnet die Entladung bis auf eine Restkapazität von 20 % mit anschließender Wiederaufladung bis 100 %. Findet hingegen lediglich eine Teilentladung des Akkus statt, spricht man von einem Teilzyklus [vgl. Schu08, S.14].

Ein wichtiger Parameter der Zyklenfestigkeit ist die Entladetiefe (DOD, depth of discharge). Sie bezeichnet den Batteriezustandswert in Prozent bezogen auf die Gesamtkapazität. Beispielsweise wird bei einer Entladetiefe von 10 % eine 50-Ah-Batterie um 5 Ah entladen [vgl. Joan10, S.27]. Wird eine Batterie ungeachtet der Entladetiefe entladen, können z. B. durch einen eintretenden Memory-Effekt Schäden hervorgerufen werden, welche die Lebensdauer des Akkumulators verkürzen. Generell spricht man vom Memory-Effekt, wenn sich bei häufiger Teilentladung ein Kapazitätsverlust abzeichnet. Der Akku scheint sich zu „merken“, wie stark er entladen wurde und liefert mit der Zeit nur noch die Menge an Energie, die ihm bei den bisherigen Entladevorgängen entnommen wurde.

Zusätzlich zur Kontrolle der aktuellen Entladetiefe wird der Verbrauch auch über den Ladestatus (SOC, state of charge) angezeigt. Der Ladezustand weist die restliche Akkukapazität bezogen auf die Gesamtkapazität bei Vollladung aus. Besitzt eine 50-Ah-Batterie beispielsweise eine Restkapazität von 30 Ah, entspricht dies einem Ladestatus von 60 % [vgl. Joan10, S.27].

2.2.4 Kosten

Die Kosten der Elektrofahrzeugbatterien haben maßgeblichen Einfluss auf den Grad ihrer Einführung. Der überwiegende Teil der Kosten lässt sich der Zellfertigung und der zur Herstellung einsatzfähiger Batteriesysteme notwendigen Komponenten zuschreiben. Da noch überwiegend in Kleinserien produziert wird, sind die Herstellungskosten von Zellen für Elektrofahrzeuge relativ hoch. Je nach Zelltyp können diese über 500 €/kWh betragen [vgl. Wall11, S.153]. Der Aufschlag für die Komponenten wird derzeit pauschal mit 100 % angenommen. Damit ergeben sich Systemkosten von rund 1.000 €/kWh [vgl. Wall11, S.154]. Für ein Batteriesystem mit einem Energieinhalt von 15 kWh ergeben sich somit bereits für die Automobilzulieferer Anschaffungspreise in Höhe von etwa 15.000 €. Die Herausforderung für die Batteriehersteller besteht darin, unter Berücksichtigung der eigenen Wirtschaftlichkeit und der Preissensibilität der Kunden erschwingliche Batterien anzubieten [vgl. Wall11, S.105]. Durch die Erhöhung der Produktionsstückzahlen rechnen Experten für die Zukunft mit einer fortlaufenden Senkung der Kosten [vgl. Tbcg10, S.5]

2.2.5 Umweltverträglichkeit

Das Thema Umweltschutz und Ressourcenschonung hatte bei den Kunden lange Zeit keinen allzu großen Einfluss auf den Fahrzeugkauf. Wie aktuelle Studien zeigen, steht die Umweltfreundlichkeit bei den Kundenpräferenzen mittlerweile an fünfter Stelle [vgl. Wall11, S.25]. Für die erfolgreiche Einführung von Elektro-Fahrzeugen kann dieser Aspekt nicht mehr außer Acht gelassen werden. Gegenüber Autos mit Verbrennungsmotor stoßen batteriebetriebene Fahrzeuge im Fahrbetrieb keine Schadstoffe aus und bieten den Vorteil einer geringeren Lärmentwicklung. Um jedoch beide Antriebsarten miteinander zu vergleichen ist es wichtig, die Umweltauswirkungen von Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Energiespeicher ganzheitlich zu betrachten. Batterien enthalten Schwermetalle, die gesundheitsschädigende Auswirkungen auf den Menschen sowie die Umwelt haben können. Folglich ist die Gewinnung, der Einsatz und die Verwertung der verwendeten Materialien in Bezug auf die Umwelteinflüsse und Gefahrenpotenziale genauer zu betrachten.

Darüberhinaus ist die Erzeugung und Verteilung der elektrischen Energie in die Umweltbetrachtungen einzubeziehen.

2.2.6 Sicherheit

Großformatige Automobilbatterien führen hohe Mengen an Energie mit sich und beinhalten unterschiedlichste Chemikalien. Der Sicherheitsaspekt stellt daher ein sehr wichtiges Kriterium für Elektrofahrzeugbatterien dar. Aufgrund der Medienpräsenz und dem Interesse der Öffentlichkeit könnte z. B. bereits ein einziger Batteriebrandvorfall die positive Einstellung der Bevölkerung bezüglich der Elektromobilität maßgeblich dämpfen und die Entwicklungen der Industrie um Jahre zurückwerfen [vgl. Tbcg, S.3]. Batterien beinhalten Chemikalien, die leicht entzündlich sind oder bei Austreten explosive Gemische bilden können. Kurzschlüsse, Überladung, hohe Wärmeeinwirkungen sowie die Gefahr von Kollisionen bergen das Potenzial, die Batterie zu beschädigen. Das Batteriedesign, speziell die verbaute Mechanik, die Elektronik und das BMS haben einen wesentlichen Einfluss auf die langfristige Performance des gesamten Systems. Marktfähige Batterien werden ihre Tauglichkeit bei alltäglichen als auch extremen Umwelteinflüssen noch unter Beweis stellen müssen. [vgl. Elco09, S.74]

2.3 Heutige Batterietechnologien für mobile Anwendungen

Im Folgenden werden die für den mobilen Einsatz in Fahrzeugen aktuell am stärksten verbreiteten elektrochemischen Speichersysteme kurz vorgestellt. Um dem Leser einen besseren Überblick zu ermöglichen, werden die Vor- und Nachteile (entnommen aus [Frau09, Pfaf09, Wall11, Fort10]) des jeweiligen Batterietyps stichpunktartig aufgezählt.

2.3.1 Blei-Säure-Batterie (PbA)

Die Blei-Säure-Batterie besteht aus einem säurefesten Gehäuse, Bleielektroden, einem Separator und einem Elektrolyt aus Schwefelsäure. Weiterentwicklungen der offenen Bauweise mit flüssigem Elektrolyt sind die Gel- und Vlieskonzepte. Die bekannteste Anwendung der Blei-Säure-Batterie ist der Einsatz als Starterbatterie in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor oder auch als Traktionsbatterie für Gabelstapler. Sie ist der kostengünstigste Batterietyp und wird derzeit insbesondere in kleineren Elektrofahrzeugen verbaut [vgl. Wall11, S.107]. Allerdings ist die Energiedichte von 20-35 Wh/kg sehr gering. Aufgrund nicht zu erwartender gravierender Leistungsverbesserungen werden Blei-Säure-Konzepte für die zukünftige Elektromobilität keine große Rolle besetzen können [vgl. Wall11, S.108].

Vorteile: preiswert da Massenprodukt, etablierte Technologie, relativ hohe Wirkungsgrade, kein Memory-Effekt, ausgebaute Infrastruktur bezüglich Recycling.

Nachteile: geringe Energiedichte, neigen bei mehrmaliger Tiefentladung zu schneller Degradierung, begrenzte Zyklenzahl, wartungsintensiv, temperaturempfindlich, Umweltschädlichkeit durch Verwendung des Schwermetalls Blei.

2.3.2 Nickel-Cadmium-Batterie (NiCd)

Die Nickel-Cadmium-Batterie kann mit rund 30-50 Wh/kg eine wesentlich höhere Energiemenge speichern als die Bleibatterie. In der Anschaffung ist sie jedoch weitaus teurer. In geschlossener Bauweise wurde sie überwiegend im Verbraucherbereich genutzt, beispielsweise bei Fotoapparaten und elektrischen Werkzeugen. Aufgrund des hochgiftigen Cadmiums verbietet eine im Jahr 2008 erlassene EU-Richtlinie die Verwendung dieses Batterietyps im privaten Bereich fast vollständig. Für industrielle Anwendungen darf sie weiterhin genutzt werden [vgl. Frau09, S.18]. Das Unterneh-

men Saft S.A. vermarktet als einer der wenigen Anbieter erfolgreich NiCd-Batterien für Elektrofahrzeuge, vorwiegend auf dem französischen Markt [vgl. Pfaf09, S.18].

Vorteile: robust, hohe Zyklenzahl, relativ hohe Energiedichte, gute Tieftemperatur- und Zyklenfestigkeit, schnellladefähig.

Nachteile: hohe Selbstentladung, schlechter Wirkungsgrad, Memory-Effekt, Umweltschädlichkeit durch Verwendung des Schwermetalls Cadmium.

2.3.3 Nickel-Metallhydrid-Batterie (NiMH)

Die Nickel-Metallhydrid-Batterie gilt als Nachfolger der Nickel-Cadmium-Batterie. Sie weist keinen Memory-Effekt auf und ist zudem umweltfreundlicher, da dieser Batterietyp auf das giftige Cadmium verzichtet. Die Energiedichte ist mit 50-80 Wh/kg weitaus höher als die der Bleibatterie. Bezüglich der Kälte- und Zyklenfestigkeit müssen Abstriche in Kauf genommen werden. Eine Hürde für den Einsatz im Elektroauto stellt die in der Regel nur unzureichende Energie- und Leistungsdichte dar [vgl. Fort10, S.54]. Als Energiespeichersystem werden NiMH-Batterien daher verstärkt in Hybridfahrzeugen verbaut. Dieser Batterietyp wird beispielsweise im Toyota Prius der dritten Generation eingesetzt. Das Zukunftspotenzial der NiMH-Batterien für die reine Elektrotraktion ist aufgrund bereits ausgereizter Batteriekapazitäten als gering einzustufen [vgl. Wall11, S.108].

Vorteile: umweltfreundlich, kein Memory-Effekt, wenig Sicherheitsprobleme

Nachteile: relativ teuer, hohe Selbstentladung, Alterungseffekte

2.3.4 Natrium-Nickelchlorid-Batterie (NaNiCl)

Die Natrium-Nickelchlorid-Batterie ist unter der Bezeichnung ZEBRA-Batterie (Zero Emission Battery Research Activities) bekannt. Mit Werten von 80-100 Wh/kg ist der Energieinhalt um einiges höher als die der vorangestellten Batterietypen. Sie erbringt nicht die geforderten Spitzenleistungen von Full-Hybrids, Plug-In-Hybrids und Elektroautos der Mittelklasse, eignet sich jedoch für den Einsatz in kleinen Elektrofahrzeugen [vgl. Kalh07, S.40]. Die ZEBRA-Batterie zählt zur Gruppe der Hochtemperatur-Akkumulatoren. Zur Aufrechterhaltung der Funktion ist es erforderlich, die ZEBRA-Batterie auf Betriebstemperaturen von rund 300 °C zu halten [vgl. Wall11, S.107]. Selbst im Ruhebetrieb muss der Batterie Energie zugeführt werden, was eine stetige

Entladung zur Folge hat. Dies wird durch eine elektrische Heizung in Kombination mit guter Wärmedämmung erreicht [vgl. Frau09, S.20].

Ein bekannter Hersteller und Ausrüster von Elektrofahrzeugen ist das Schweizer Unternehmen SoNick SA (ehemals MES-DEA). Die derzeit bekanntesten Fahrzeuge mit ZEBRA-Technologie sind der Th!nk City (als erstes Elektroauto mit europaweiter Zulassung) vom norwegischen Hersteller Think Global AS sowie der Smart Fortwo electric drive.

Vorteile: hohe Energiedichte, guter Wirkungsgrad, geringe Produktionskosten, relativ temperaturstabil, wartungsfrei, vollkommen recycelbar.

Nachteile: geringe Leistungsdichte, Stromverbrauch durch permanente Energiezufuhr zur Beheizung.

2.3.5 Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion)

Der Begriff Lithium-Ionen-Batterie vereint eine Reihe an Batterieklassen auf Lithium-Basis. Differenzieren lassen sie sich durch den verwendeten Elektrolyten und den vielfältigen Kombinationen der Elektrodenmaterialien (siehe Abschnitt 2.4). Die Lithium-Ionen-Batterien gelten als die Schlüsseltechnologie wiederaufladbarer Zellen [vgl. Fort10, S.55, Frau09, S.19]. Im Bereich portabler Anwendungen hat sich die Lithium-Ionen-Batterie innerhalb kürzester Zeit zu der wichtigsten Speichertechnologie entwickelt. Ein wesentlicher Grund ist die hohe Energiedichte, mit der sich akzeptable Batteriekapazitäten erzielen lassen [vgl. Wall11, S.109].

Das Ziel heutiger Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist es nun, zuverlässige Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität zu erhalten, um auch das automobiler Anwendungsgebiet zu erschließen [vgl. Ster09, S.186]. Einige Li-Ion-Batterien der Hochleistungs-Klasse erreichen heute bereits Energiedichten von bis zu 200 Wh/kg. So sind sie um fast ein Drittel kleiner und um etwa die Hälfte leichter als NiMH-Batterien mit vergleichbarer Kapazitätsmenge [vgl. Wall11, S.106]. Der Grund für die höheren Energie- sowie auch Leistungsdichten liegt einerseits am guten elektrochemischen Potenzial und andererseits am geringen spezifischen Gewicht des Lithiums [vgl. Fort10, S.55]. Die Minimierung sicherheitstechnischer Risiken spielt aufgrund der Eigenschaften des Lithiums eine zentrale Rolle, worauf im Abschnitt 3.3.1 noch näher eingegangen wird. Als einer von vielen Automobilherstellern plant auch Volkswagen die Einführung von batteriebetriebenen Fahrzeugen auf Lithium-Ionen-Basis. So soll

der für 2013 geplante Stadtwagen E-Up! sowie der Golf Blue-E-Motion mit Lithium-Ionen-Batterie ausgestattet werden [vgl. Aums11].

Vorteile: hohe Energie- und Leistungsdichte, hoher Wirkungsgrad, geringe Selbstentladung, gute thermische Stabilität, relativ schneller Ladevorgang, kein Memory-Effekt, keine Verwendung giftiger Stoffe.

Nachteile: anspruchsvoller Fertigungsprozess, hohe Kosten durch Einsatz teurer Materialien und Sicherheitselektronik, fortschreitende Degradation der Zellen, Sicherheitsproblematik durch Verwendung von Lithium, verkürzte Lebensdauer durch hohe Temperaturen und hohe Lade- und Entladeströme.

2.4 Entwicklungen bei Lithium-Batterien

Keine Lithium-Ionen-Technologie ist heute alleinstehend in allen Batterieanforderungen führend. Es gibt eine Vielzahl an Technologien, die auf variierende Metalloxide in der Kathode basieren. Je nach Materialwahl entstehen dadurch Vorteile in einer Kategorie, die meist aber zu Nachteilen in anderen führen. Im Folgenden sollen zunächst diejenigen Lithium-Ionen-Technologien kurz aufgeführt werden, die bereits heute verfügbar sind und anschließend einige, die mittel- bis langfristig potenziell interessant sein könnten [vgl. Tbcg10, S.2, Pfaf09, S.19, Elco09, S.84].

2.4.1 Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Akku (NCA)

NCA ist eine heute bereits verfügbare Technologie, die aus einem Lithium-Mischoxid sowie Nickel, Kobalt und Aluminium besteht. Sie besitzt im Vergleich zu anderen Technologien heute eine sehr hohe Energie- und Leistungsdichte, weist jedoch im Bereich Sicherheit einige Mängel auf. NCA-Batterien müssen daher mit aufwendigen Sicherheitsmaßnahmen versehen werden, indem die Zellen entweder ummantelt werden und das Verhalten der Batterie stets überprüft wird. Preislich ist dieser Typ dennoch konkurrenzfähig [vgl. Tbcg10, S.2f., Elco09, S.84, Kahl07, S.26f.].

2.4.2 Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Akku (NMC)

Die Materialzusammensetzung ist hier beinahe identisch zur NCA-Batterie. Lediglich das Aluminium wurde hier durch Mangan ersetzt. Sie besitzt ebenfalls wie die NCA-Batterie eine sehr hohe Energiedichte, weist jedoch eine geringere Lebensdauer und Leistungsdichte auf. Weiterhin verfügt dieser Typ über zwei Spannungspegel. Bei

hohen Spannungen (4.1 bis 4.2 V) besitzt sie eine exzellente Speicherkapazität und relativ geringe Kosten pro kWh. Die Zersetzung des Mangans reduziert diese Vorteile jedoch nach einer gewissen Zeit. Bei geringen Spannungen ist die Speicherkapazität geringer und die Kosten pro kWh höher. Die Stabilität scheint dafür jedoch angemessener. Preislich ist die NCM-Batterie günstiger als die NCA [vgl. Kahl07, S.26, Tbcg10, S.3].

2.4.3 Lithium-Eisen-Phosphat-Akku (LFP)

LFP wird bereits erfolgreich als potenziell günstiges Kathodenmaterial verwendet. Durch sein geringes elektrochemisches Potential weist es selbst bei stark variierenden Temperaturen die höchste Sicherheit im Vergleich zu den anderen heute verfügbaren Technologien auf. Weiterhin vorteilhaft sind die lange Lebensdauer und die vergleichsweise geringen Kosten von Eisen im Vergleich zu Nickel und Kobalt. Zudem können LFP-Batterien sehr schnell Energie aufnehmen und sind somit in wenigen Minuten aufladbar. Gegen LFP spricht die geringe Energiedichte im Vergleich zu NCA- und NCM-Batterien [vgl. Berg09, S.31, Tbcg10, S.3, Kahl07, S.27, Pfaf09, S.19f.].

2.4.4 Lithium-Titanat-Akku (LTO)

LTO-Batterien basieren auf Nanotechnologie und weisen vor allem Vorteile in den Bereichen Lebensdauer und Sicherheit auf. Sie besitzen zudem eine geringe thermische Anfälligkeit. Nachteilig ist, dass diese Technologie im Vergleich zu NCA-Batterien eine um etwa ein Drittel geringere Energiedichte aufweist, das in einem hohen Gesamtgewicht der Batterie resultiert. Vom Kostenpunkt betrachtet ist sie um einiges teuer als die anderen heute verfügbaren Technologien [vgl. Pfaf09, S.20, Tbcg10, S.3, Elco09, S.86].

2.4.5 Lithium-Polymer-Akku (Li-Poly)

Bei Lithium-Polymer-Batterien besteht die Anode aus dem gleichen Metalloxid wie bei den bereits genannten Lithium-Ionen-Batterien. Der Elektrolyt weist hier jedoch eine Polymerbasis in Form einer gelartigen Folie auf. Diese Technologie ist sehr preiswert und besitzt im Vergleich zu anderen Lithium-Ionen-Technologien eine höhere Energiedichte. Nachteilig ist hier die hohe elektrische und thermische Anfälligkeit [vgl. Pfaf09, S.19]. Die Leistungsdichte sowie der stabile Betrieb leiden maßgeblich bei

tiefen Temperaturen. Falls die thermische und elektrische Anfälligkeit dieses Batterietyps reduziert werden kann, ist diese Technologie mit Markteintritt 2020 eine vielversprechende Option [vgl. Frau10, S.11].

2.4.6 Lithium-Schwefel-Akku (Li-S)

Lithium-Schwefel-Akkus sind sehr günstig und selbst bei extremen Temperaturen sehr beständig. Ansonsten jedoch sind sie im Vergleich zu heute verfügbaren Technologien noch eher durchschnittlich zu bewerten. Mit einem Markteintritt wird ab 2020 gerechnet [vgl. Frau10, S.11].

2.4.7 Lithium-Luft-Akku (Li-Luft)

Die Lithium-Luft-Technologie weist die mit Abstand höchste Energiedichte von allen bekannten Lithium-Ionen-Technologien auf. Preislich könnte sie wettbewerbsfähig sein, befindet sich aber momentan noch im Entwicklungsstatus. Mit einem Markteintritt wird nicht vor 2030 gerechnet [vgl. Frau10, S.11].

2.5 Potenziale und Grenzen der Batterietechnologien

Im vorherigen Abschnitt wurden die wesentlichen Eigenschaften aktueller und sich in Entwicklung befindlicher Elektrofahrzeug-Akkumulatoren kurz beschrieben. Nun sollen deren Potenziale und Grenzen für automobiler Anwendungen, insbesondere in Hinblick auf die reine Elektromobilität, verdeutlicht werden. Dazu werden die Batterietechnologien anhand des eingangs genannten Anforderungsspektrums an mobile elektrochemische Energiespeicher untereinander verglichen und bewertet.

Tabelle 1 gibt zunächst einen Überblick über die heute üblichen, technischen Mindestanforderungen an Akkumulatoren mit Bezug auf die Kenngrößen Leistung und Energie unterschiedlicher Antriebskonzepte.

Tab. 1: Anforderung an Batterien in Abhängigkeit vom Antriebskonzept

[Daten entnommen aus Kalh07, S.21]

Anforderung Antriebskonzept	Gewicht [kg]	Spitzenleistung [min. kW]	Leistungsdichte [min. W/kg]	Kapazität [min. kWh]	Energiedichte [min. Wh/kg]
Full-Hybrid (FHEV)	50	40 - 60	800 - 1200	1,5 - 3	30 - 60
Plug-In-Hybrid (PHEV)	120	50 - 65	400 - 540	6 - 12	50 - 75
Elektrofahrzeug (EV)	250	50³ ; 100⁴	200 ³ ; 400 ⁴	25 ³ ; 40 ⁴	100³ ; 160⁴

Die Kapazität von 25 kWh, wie sie für einen Kleinwagen gefordert wird, entspricht dem Energiegehalt von ca. 3 l Benzin, wobei bei der Verwendung von Benzin ca. 2/3 der im Brennstoff enthaltenen Energie als Verlustwärme in die Umwelt dissipiert wird. Bei Annahme ähnlicher mechanischer Wirkungsgraden bei konventionellen und rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen entsprechen 25 kWh Akkumulatorkapazität ca. 10 l Benzin (Energie für Heizung und Energierückgewinnung beim Bremsen nicht berücksichtigt).

Zur vergleichenden Darstellung der Leistungs- und Energiedichten unterschiedlicher Akkumulatortechnologien wird das sogenannte Ragone-Diagramm herangezogen. Dabei wird die Leistungsdichte in Abhängigkeit der Energiedichte des Akkumulators in ein kartesisches Koordinatensystem aufgetragen. Abbildung 8 weist dies für die vor-

³ Anspruch eines EV (Kleinwagen), wobei das Gewicht, die Leistung und der Komfort dem eines vergleichbaren Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor entspricht.

⁴ Anspruch eines EV (Mittelklasse), wobei das Gewicht, die Leistung und der Komfort dem eines vergleichbaren Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor entspricht.

gestellten Akkumulatoren aus. Weiterhin werden die in Tabelle 2 enthaltenen Antriebskonzepte entsprechend ihrer Anforderungen im Diagramm positioniert.

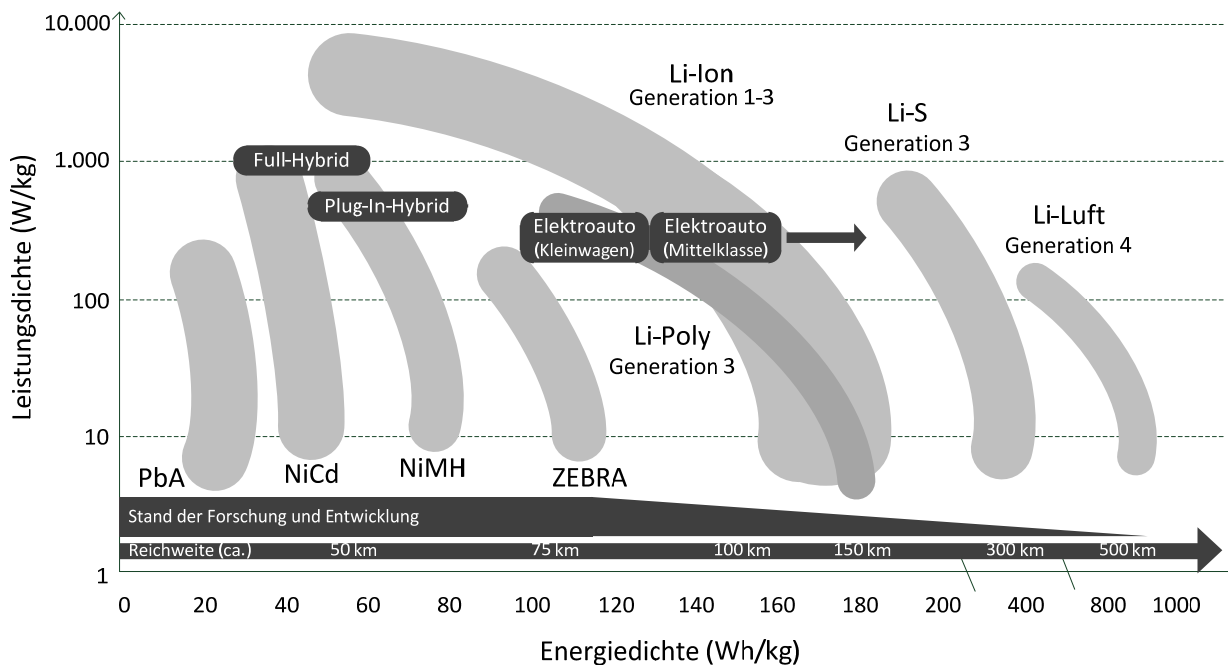


Abb. 8: Energie- und Leistungsdichten der Batterietechnologien für automobilen Anwendungen
[eigene Darstellung in Anlehnung an Kalh07, S.25 und Npez11, S.19]

Das Ragone-Diagramm in Abbildung 8 lässt den Kompromiss zwischen Energie- und Leistungsdichte erkennen, wonach die Akkumulatoren entweder über hohe Energiedichten (Hochenergiezellen) oder aber hohe Leistungsdichten (Hochleistungszellen) verfügen [vgl. Frau09, S.17]. Weiterhin geht aus der Darstellung hervor, dass sich in Abhängigkeit vom Antriebskonzept unterschiedliche Prioritäten ergeben. Beispielsweise stellen Full-Hybrid-Fahrzeuge die höchsten Ansprüche bezüglich der Leistungsdichte. Dies beruht einerseits darauf, dass der Elektromotor kurzzeitig in der Lage sein muss hohe Leistungen auch ohne Unterstützung des Verbrennungsmotors zu erbringen. Neben der Abgabe kurzfristiger Leistungsspitzen spielt auch die Energieaufnahme, bspw. bei Rekuperation während des Bremsvorgangs eine wichtige Rolle. Reine Elektrofahrzeuge hingegen fordern vielmehr eine höchstmögliche Energiedichte, um alltagstaugliche Reichweiten zu erzielen [vgl. Fort10, S.53]. In dieser Hinsicht stellen allein die heute verfügbaren Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Technologien aussichtsreiche Kandidaten für Batterie-Elektrofahrzeuge dar.

In der Tabelle sind ergänzend zur Abbildung 8 weitere technischen und die erforderlichen ökonomischen und ökologischen Aspekte (soweit vorhanden) gegenübergestellt. Als Messlatte wurden in der zweiten Spalte der Tabelle die Key-Performance Batterie-Parameter für den automobilen Einsatz 2020 der NPE-Arbeitsgruppe „Batterietechnologie“ eingetragen [vgl. Npeb10, S.8].

Tab. 2: Bewertung der Batterietechnologien hinsichtlich der NPE-Ziele für 2020

[Daten abgeleitet von Npeb10, S.8, Frau09, S.25, 107, Frau10, S.10, 11, Wall11, S.106]

Eigenschaft	Ziel NPE 2020	PbA	NiCd	NiMH	NaNiCl	Li-Ion	Li-Poly	Li-S	Li-Luft
Energiedichte [Wh/kg]	150	-- 20–35	-- 30–50	- 50–80	o 80–100	+ 90–200	+ 180	++ 400	++ 850
Leistungsdichte [W/kg]	600	-- 100	o 600	+ 1.000	-- 170	++ 300–4.000	++	++	--
K. Lebensdauer [Jahre]	10	- 3–5	o 5–15	- < 5	o 8–10	o 5–15	+	o	+
Zyklusfestigkeit [Zyklenzahl]	2.500	- 1.200	- 2.000	-- 1.000	- 1.500	+ 500–4.000	++	o	+
Kosten [€/kWh]	250	++ 100–250	o 250–500	++ 180–220	- 500	-- 300–1.800	--	+	o
Sicherheit [EUCAR ⁵ Level]	3	+	+	+	o	-	--	--	--
Umweltverträglichkeit	k. A.	o	-	o	+	o	o	+	+
Potenzial		☹	☹	☹	☹	☺	☺	☺☺	☺☺

Bewertungsschema: ++ = sehr gut, + = gut, o = befriedigend, - = ausreichend, -- = nicht ausreichend

Aus der Tabelle 2 lässt sich ableiten, dass etablierte Batterietechnologien wie Blei-Säure-, NiCd- und NiMH-Akkumulatoren vor allem in Bezug auf ihre begrenzten Energiedichten die Ziele der NPE-Arbeitsgruppe weit verfehlen und daher für zukünftige reine Elektrotraktion eine untergeordnete Rolle einnehmen werden. Die NaNiCl- (ZEBRA-) Batterie erzielt hinsichtlich Energiedichte und Zyklusfestigkeit angemessene Werte und wird heutzutage nach wie vor überwiegend im Segment der Hybridantriebe

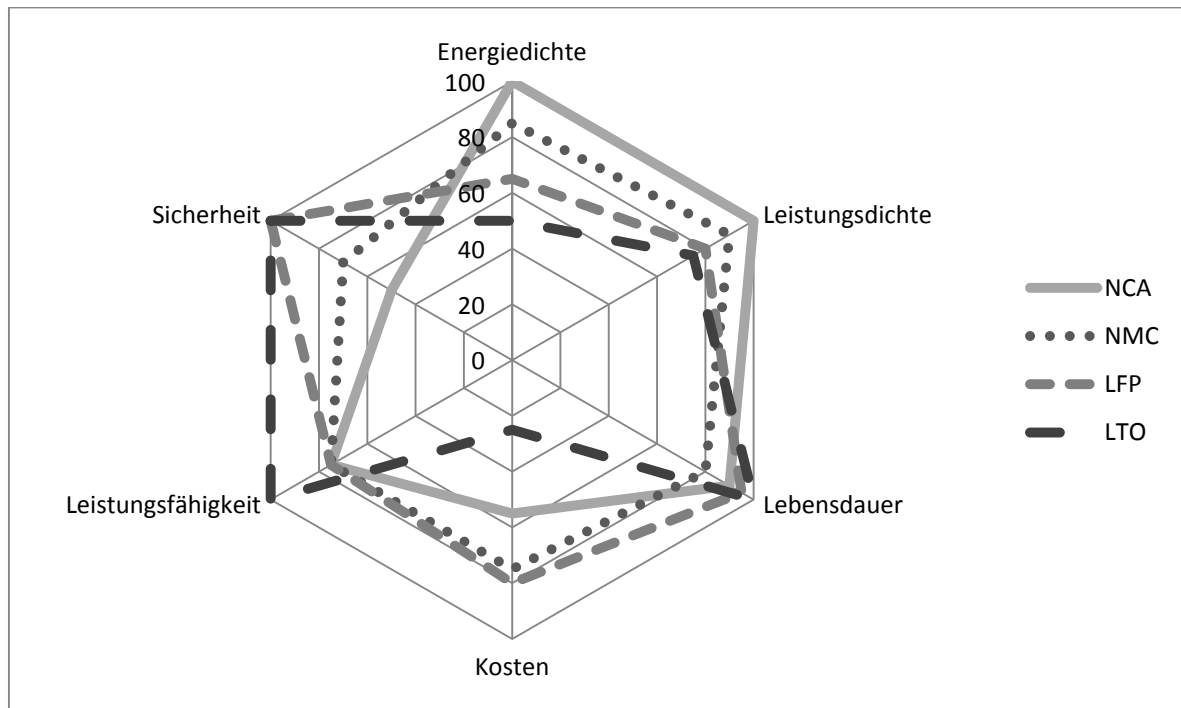
⁵ EUCAR (European Council for Automotive R&D) Hazard-Level: Einstufung von Lithium-Ionen-Batteriesystemen in Gefährungsklassen von 0 (kein Effekt) bis 7 (Explosion) nach durchgeführtem Test.

vermarktet. Ein gravierender Nachteil ist der Energieverlust für das Halten der Betriebstemperatur [vgl. Frau09, S.25]. Die sogenannten Post-Lithium-Ionen-Technologien (z.B. Li-S, Li-Luft, Festkörperbatterien) bergen das größte Potenzial. Die Forschung und Entwicklung zu dieser Technologie befindet sich hier noch sehr weit in den Anfängen, sodass diese Akkus erst nach 2020 interessant werden [vgl. Frau10, S.10, 11].

Unter den heute verfügbaren Batterien für mobile Zwecke erzielt der Lithium-Ionen-Akkumulator bezüglich spezifischer Energie und Zyklenzahl die mit Abstand besten Ergebnisse. Dass die Lithium-Ionen-Technologie für die reine Elektrotraktion großes Potenzial birgt zeigt sich an den derzeitigen Entwicklungstrends.

Um eine entsprechende Marktposition wie im portablen Sektor zu erreichen sind jedoch weiterhin einige ernstzunehmende Hürden zu meistern. Die Kosten eines Lithium-Ionen-Batteriesystems für Elektroautos können heutzutage noch rund die Hälfte der Gesamtfahrzeugkosten ausmachen [vgl. Fort10, S.56]. Darüber hinaus stehen einem Einsatz die zum Teil unzureichende Lebensdauer und Sicherheitsrisiken im Weg. Auch werden mit steigender Nachfrage der Lithium-Ionen-Technik immer häufiger Fragen über die Versorgungssicherheit und des Recyclings benötigter Ressourcen wie Lithium, Kobalt oder Nickel gestellt [vgl. Wint09].

Das Spinnendiagramm in Abbildung 9 weist den Grad der NPE-Ziel-Erreichung für kurz- und mittelfristig interessante Lithium-Ionen-Technologien in Prozent aus. Es wird deutlich, dass die Herausforderung darin liegt, allen Anforderungen gleichermaßen gerecht zu werden. Es bestehen Zielkonflikte, sogenannte „Trade-offs“, die es in den nächsten Jahren zu lösen gilt [vgl. Tbcg10, S.3].



NCA = Li-Ni-Co-Al **NMC** = Li-Ni-Mg-Co **LFP** = Li-Fe-P **LTO** = Li-T-O

Abb. 9: Trade-offs aktueller Lithium-Ionen-Technologien

[Daten abgeleitet von Tbcg10, S.3, Tueb10, S.9]

Als Schlüsseltechnologie zur flächendeckenden Einführung der Elektromobilität wird die Lithium-Ionen-Batterie mit ihren Potenzialen und Spannungsfeldern über die gesamte Wirkkette hinweg im nachfolgenden Kapitel vertieft.

3 Wertschöpfungskette Li-Ion-Batterie

Im vorangegangenen Kapitel wurden verschiedene Batteriespeichertechnologien für automobiler Anwendungen hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Eigenschaften beleuchtet und bewertet. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Lithium-Ionen-Batterie in dem zu betrachtenden Zeitraum bis 2020 die größten Marktchancen besitzt. Im Folgenden sollen daher Potenziale und Grenzen anhand der Wertschöpfungskette detaillierter untersucht werden.



Abb. 10: Wertschöpfungskette Li-Ion Batterie [eigene Darstellung]

Die nachfolgenden Unterkapitel Materialien, Produktion, Nutzung und Recycling sind entsprechend der in Abbildung 10 dargestellten Wirkkette geordnet.

3.1 Materialien

„Abhängigkeit von Lithium anstelle von Öl?“

[vgl. Wolk09]

Die Fragestellung der Abhängigkeit von Lithium wird in der Literatur, zahlreichen Studien sowie in den Medien regelmäßig aufgegriffen; mit unterschiedlichen Ergebnissen. Einige Studien kommen zu dem Ergebnis, dass keine Gefahr eines Lithium-Engpasses besteht [vgl. Wolk09, Elco09, S.79, Fort10, S.56]. Vertreter dieser Meinung gehen davon aus, dass z. B. die Wiederverwertung gebrauchter Li-Ionen-Batterien und die Verwendung kleinerer Kapazitäten die Rohstoffnachfrage nach primärem Lithium begrenzt.

Tahil, auf dessen Aussagen sich spätere Veröffentlichungen ebenfalls beziehen [vgl. Econ09, S.15, Wall11, S.150ff.], kommt zu dem Schluss, dass die bekannten Lithium-Reserven nicht ausreichen werden, um die in Zukunft stark ansteigende Nachfrage durch die Elektromobilität zu befriedigen. *Tahil* geht von einem Bedarf für 1 Mrd. Fahrzeuge aus, die jeweils mit einer Batteriekapazität von 60 kWh ausgerüstet werden, um

vom Kunden akzeptierte Reichweiten von 240 Meilen zu ermöglichen [vgl. Tahi06, S.11].

Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht jedoch nicht ausschließlich aus Lithium. In den folgenden Ausführungen wird dargestellt, aus welchen Bestandteilen und Rohstoffen eine typische Lithium-Ionen-Batterie zusammengesetzt ist. Dieser Rohstoffbedarf wird mit der Jahresfördermenge der jeweiligen Rohstoffe verglichen. Daraus wird dann abgeleitet, bei welchen benötigten Rohstoffen für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien in Zukunft Engpässe auftreten könnten.

Die Hauptkomponenten einer typischen Lithium-Ionen-Zelle sind die meist aus Graphit bestehende Anode (negative Elektrode) sowie die Kathode (positive Elektrode), bestehend aus Lithiumcarbonat (Li_2CO_2) oder Lithiumhydroxid (LiOH) [vgl. Elco09, S.79]. Tabelle 3 veranschaulicht detailliert die Hauptkomponenten und ihren Masseanteil beispielhaft an einer Lithium-Eisen-Phosphat-Batteriezelle (LiFePO_4).

Tab. 3: Hauptkomponenten einer LiFePO_4 Batteriezelle [Daten entnommen aus Berg09, S.26]

Bestandteil	Masseanteil in %
Kathode	40
Anode	21
Elektrolyt	15
Kupferfolie	11
Gehäuse / Verpackung	6
Alufolie	5
Separator	2

Anhand des Masseanteils in Tabelle 3 wird deutlich, dass die Kathode 40 % der Zellmasse einnimmt. Die Kathode besteht immer zu einem Teil aus Lithium und je nach Lithium-Ionen-Batterie-Typ zusätzlich aus den Übergangsmetallen Mangan, Eisen, Kobalt oder Nickel [vgl. Elco09, S.85]. Weiterhin macht die Anode, die größtenteils aus Kohlenstoff besteht, welches in der Natur in Form von Graphit vorkommt, 21 % der Zellmasse aus [vgl. Gain10, S.3]. Als Stromsammler, die zusammen 16 % zu der gesamten Masse beitragen, werden Aluminium- sowie Kupferfolie verwendet. Weiter zu beachten ist, dass für die 15 % Elektrolyt-Bestandteil ebenfalls Lithium benötigt wird [vgl. Tahi06, S.4]. Die restlichen Bestandteile sind das Gehäuse und der Separator [vgl. Berg09, S.26].

Um die Ressourcensicherheit der oben genannten Übergangsmetalle und Metalle zu analysieren muss zunächst aufgezeigt werden, wie hoch deren Masseanteil an einer typischen Lithium-Ionen-Batterie ist. Da heutzutage Nickel und Kobalt die am häufigsten verwendeten Übergangsmetalle für die Kathode sind [vgl. Elco09, S.79], sollen die Metallmassen einer Lithium-Kobalt-Oxid- (LiCoO_2) sowie einer Lithium-Nickel-Oxid-Batterie (LiNiO_2) mit 55 kWh, wie im Tesla Roadster verwendet, dargestellt werden. Da die Lithium-Eisen-Phosphat-Batterie ebenfalls eine der wesentlichen Lithium-Ionen-Batterie-Typen ist [vgl. Bcgr10, S.3, Elco09, S.84], wird sie diesem Vergleich hinzugezogen (siehe Abb. 11).

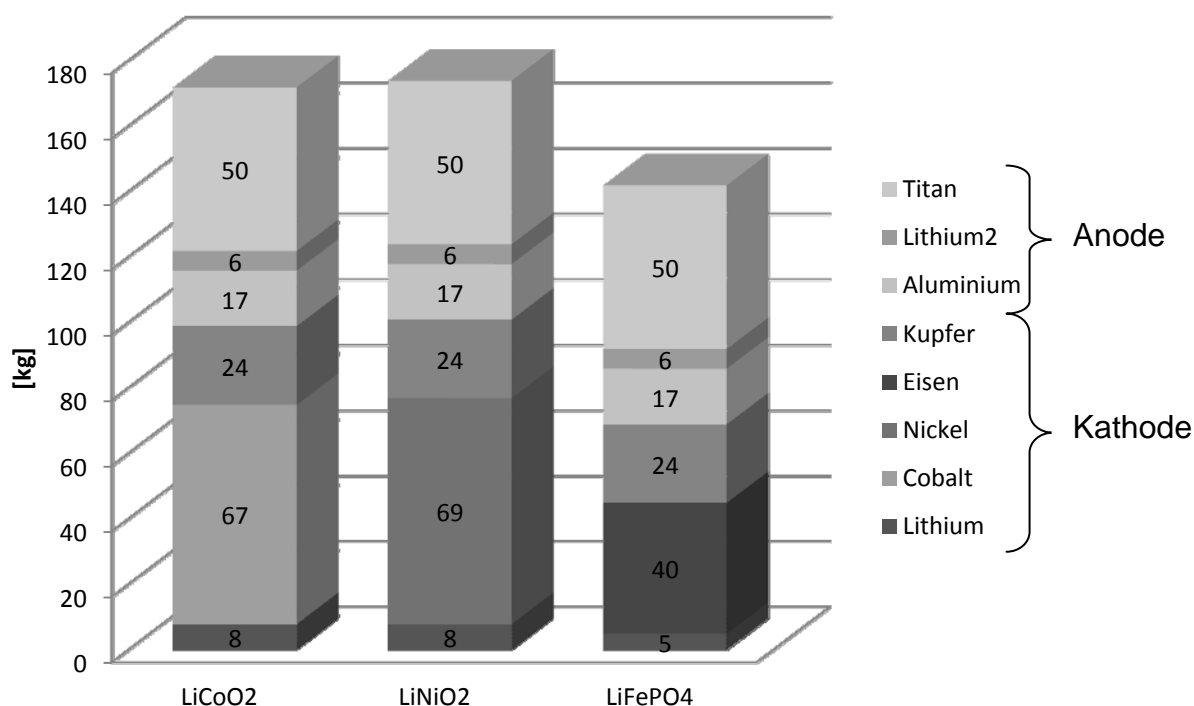


Abb. 11: Metallmassen typischer Lithium-Ionen-Batterien am Beispiel Tesla 55 kWh [vgl. Beer11, S.8]

Abbildung 11 zeigt, dass der Masseanteil an Lithium in allen drei Lithium-Ionen-Batterie-Typen verhältnismäßig gering ist. In der LiCoO_2 und LiNiO_2 sind bei einem Gesamtgewicht von ca. 170 kg jeweils nur 14 kg Lithium enthalten. Bei der LiFePO_4 , die insgesamt 142 kg wiegt und damit weitaus leichter als die zuvor genannten Lithium-Ionen-Batterie-Typen ist, beträgt der Anteil an Lithium lediglich 11 kg.

Den größten Anteil am Gesamtgewicht nimmt das jeweilige Kathodenmaterial ein. Je nach Typ ist dies Kobalt (67 kg), Nickel (69 kg), Eisen (40 kg). Das Kathodenmaterial macht bei der LiCoO_2 und LiNiO_2 ca. 40 % der gesamten Masse der Batteriezelle aus.

Ähnlich verhält es sich mit dem Kathodenmaterial Mangan in LiMn_2O_4 . Die Lithium-Ionen-Batterie basierend auf Mangan ist in Abbildung 11 nicht aufgeführt. Bei diesem Typ hat Mangan den größten Gewichtsanteil.

Bei der Anode beträgt der Anteil an Titan in allen drei in der Abbildung 11 dargestellten verschiedenen Lithium-Ionen-Batterie-Typen im oben genannten Beispiel 50 kg und steuert damit ebenfalls einen Großteil zu der gesamten Zellmasse bei. Ebenfalls konstant sind in allen dargestellten Batterietypen der Kupferanteil (24 kg) sowie der Aluminiumanteil (17 kg). Der Preis einer Lithium-Ionen-Zelle wird folglich hauptsächlich durch Kathodenmaterial wie Nickel oder Kobalt dominiert. Bei Eisen sieht es aufgrund des geringeren Masseanteils und der geringeren Rohstoffpreise günstiger aus [vgl. Joan10, S.34].

Daher muss die Frage gestellt werden, warum fast ausschließlich die Ressourcenverfügbarkeit des Alkalimetalls Lithium diskutiert wird. Abbildung 11 zufolge ist der Bedarf pro Lithium-Ionen-Batterie an dem Anodenmaterial Titan oder dem jeweiligen Kathodenmaterial Kobalt, Nickel bzw. Eisen weitaus höher. Weshalb wird die Verfügbarkeit dieser Übergangsmetalle nicht vergleichbar diskutiert?

In Abbildung 12 ist der Metallbedarf für 1 Million LiFePO_4 bzw. LiCoO_2 im Tesla Roadster mit den jeweiligen Jahresfördermengen 2009 der benötigten Metalle zur Herstellung dieser beiden Batterietechnologien im Vergleich dargestellt.

Bis auf das jeweilige Kathodenmaterial Eisen bzw. Kobalt ist der Metallbedarf beider Lithium-Ionen-Batterien identisch. In Abbildung 12 ist der Lithium-Bedarf für die Herstellung von Lithium-Eisen-Phosphor-Batterien dargestellt. Er beträgt für diesen Batterietyp 44 % der Jahresfördermenge. Bei der Herstellung von LiCoO_2 -Batterien wird mehr Lithium benötigt. Hier würde 56 % der Jahresproduktion beansprucht (in Abbildung 12 nicht dargestellt) [vgl. Beer11, S.10]. Für die nachfolgenden Ausführungen wird dieser Unterschied nicht berücksichtigt.

Kritisch zu sehen ist der Bedarf an Kobalt für die Herstellung dieser Batterietechnologie. Abbildung 12 verdeutlicht, dass der Bedarf an Kobalt für die Herstellung von 1 Million LiCoO_2 Batterien die heutige Jahresproduktion um 17 % überschreiten würde. Der Eisenbedarf für die Herstellung der LiFePO_4 Batterien ist mit 0,002 % der weltweiten Fördermenge an Eisen verschwindend gering.

Betrachtet man den restlichen Bedarf an Metallen, stellt lediglich das Lithium neben dem Kobalt einen potenziellen Ressourcenengpass dar, da 44 % (bzw. 56 %, wie

oben ausgeführt) der Jahresproduktion an diesen Metallen zur Batterieherstellung benötigt werden würden.

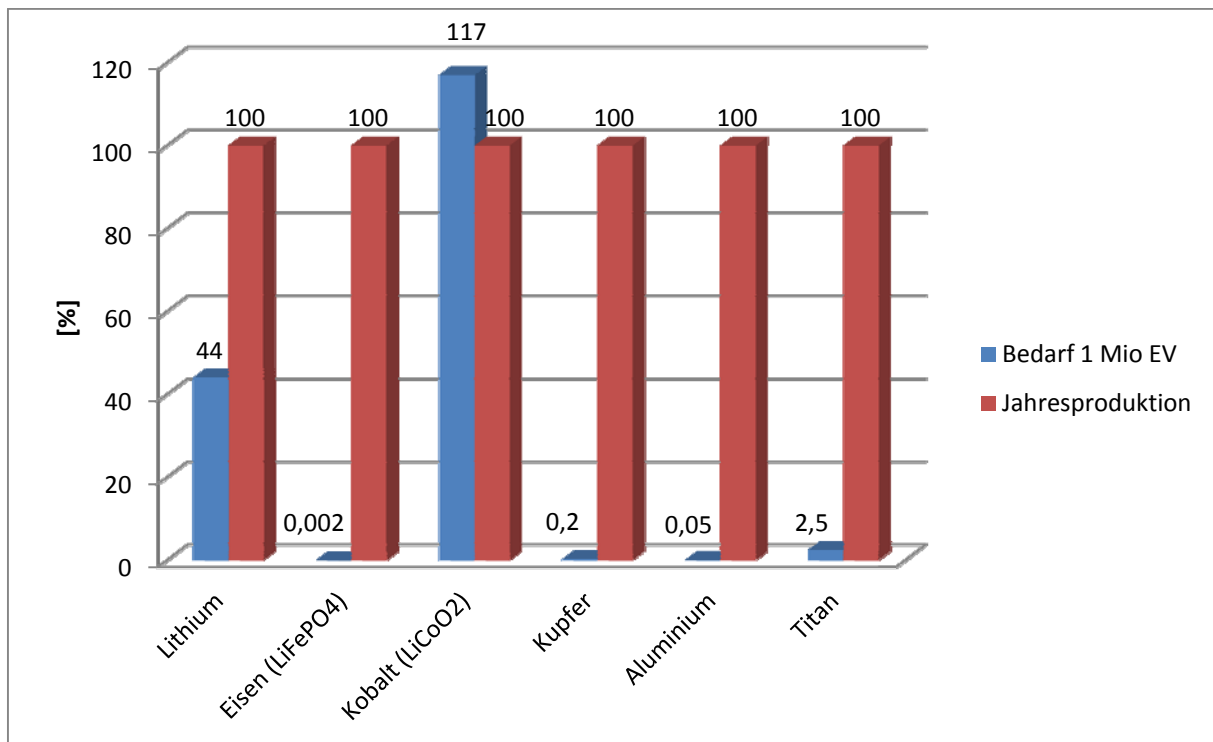


Abb. 12: Vergleich Metallbedarf für 1 Mio. Tesla EV mit Jahresfördermengen
[eigene Darstellung in Anlehnung an Beer11, S.9f.]

Kobalt ist ein seltenes Element, das in der Liste der nach Häufigkeit geordneten Elemente an 30. Stelle steht. Da es in der Regel zusammen mit Kupfer und Nickel auftritt, wird es zusammen mit diesen abgebaut. Der Preis für Kobalt scheint sich durch den teilweise gemeinsamen Abbau mit Kupfer auch an dessen Preis zu orientieren [vgl. Joan10, S.144, Elco09, S.85].

Die Jahresfördermenge belief sich im Jahr 2010 auf geschätzte 88.000 Tonnen, bei heutzutage wirtschaftlich nutzbaren Reserven von 7,3 Millionen Tonnen, wobei 46 % sich im Kongo befinden. Der Kongo steuerte im Jahr 2010 mit 51 % zur weltweiten Jahresproduktion bei. Weltweit werden die Reserven auf ca. 15 Millionen Tonnen geschätzt [vgl. Usgs11a, S.2]. Basierend auf diesen Daten und der Wiederverwendbarkeit von Kobalt als Sekundärmetall sieht die Studie „Electrification Roadmap“ führender Unternehmen im Bereich der Elektromobilität wie Nissan, Fedex und A123 Systems keine Versorgungsengpässe der Automobilindustrie in absehbarer Zeit [vgl. Elco09, S.85]. Aufgrund der hohen Konzentration an Kobaltvorkommen im seit Jahren politisch instabilen Kongo besteht aus ökologischen und ökonomischen Gründen den-

noch das Bemühen, Kathodenmaterial in Lithium-Ionen-Batterien durch Nickel, Mangan oder auch Eisen zu ersetzen [vgl. Fazn10, Joan10, S.144].

Zusätzlich zu den beiden Rohstoffen Lithium und Kobalt wird im Folgenden die Ressourcensicherheit von Nickel analysiert, da es Hauptbestandteil der LiNiCo_2 Batterie ist. Nickel steht in der Häufigkeitsliste der Elemente an 24. Stelle und tritt drei bis viermal so häufig auf wie Kobalt [vgl. Joan10, S.144f.]. Es wird in vielen Bereichen, besonders jedoch in der Edelstahlproduktion verwendet [vgl. Elco09, S.85]. Die weltweite Jahresproduktion im Jahr 2010 belief sich auf ca. 1,5 Millionen Tonnen, wobei Australien, Kanada, Indonesien, Neukaledonien, Philippinen und Russland in gleichen Anteilen zu den größten Produzenten zählen. Derzeit sind 76 Millionen Tonnen wirtschaftlich erschließbar. Wie bei den gefördert Mengen im Jahr 2010 verteilen sich auch die weltweiten Reserven auf mehrere Länder, sodass keine Abhängigkeit von einzelnen Regionen bzw. Länder herrscht [vgl. Usgs11b, S.2]. Folglich gibt es weitaus weniger Bedenken bezüglich der Ressourcensicherheit von Nickel im Vergleich zu Kobalt [vgl. Elco09, S.85].

Wie sieht nun in Bezug auf Häufigkeit und Vorkommen die Situation bei Lithium aus? Lithium nimmt den 27. Platz in der Häufigkeitsliste der Elemente ein. Sein elektrochemisches Potential sowie seine niedrige Äquivalenzmasse führen zu einer hohen spezifischen Energiedichte, weshalb Lithium in den letzten 15 Jahren eine herausragende Stellung in der Batterietechnologie eingenommen hat [vgl. Joan10, S.143]. Weiterhin wird dieses Alkalimetall für die Herstellung von Glas, Keramik sowie Primäraluminium verwendet. Bei der Aluminiumproduktion ist der Bedarf an Lithium rückläufig, wohingegen die Batteriefertigung in den letzten Jahren stetig zunahm und seit 2007 mit einem Anteil von 25 % den größten Nachfrager an Lithium darstellt [vgl. Wall11, S.150, Berg09, S.27].

Es gibt zwei Formen von Lithium-Lagerstätten. Zum einen als hartes Silikat-Mineral, auch Spodumen bezeichnet, und zum anderen in Form von Salzseen. Ausschließlich Lithium aus letztgenannten Lagerstätten wird jemals für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien in Frage kommen. Spodumen dagegen ist ein Silicat aus Lithium und Aluminium, in anderen Worten eine Form von Glas. Früher wurden daraus noch geringe Mengen an Lithiumcarbonat hergestellt. Um die heutzutage geforderte Menge an Lithium zu befriedigen, ist dieser Herstellungsprozess nicht wirtschaftlich. Er ist zu energieintensiv. Lediglich China produziert heute auf diese Weise noch geringe Mengen an Lithiumcarbonat [vgl. Tah10, S.4ff., Joan10, S.143, Elco09, S.81].

In Abbildung 13 sind die weltweit bedeutendsten Lithium-Reserven geographisch dargestellt. Die schwarz gefärbten Bereiche stellen die Regionen bzw. Länder mit den größeren Reserven dar. In den grau gefärbten Regionen finden sich ebenfalls Lithium-Vorkommen, allerdings in deutlich geringerem Ausmaß.

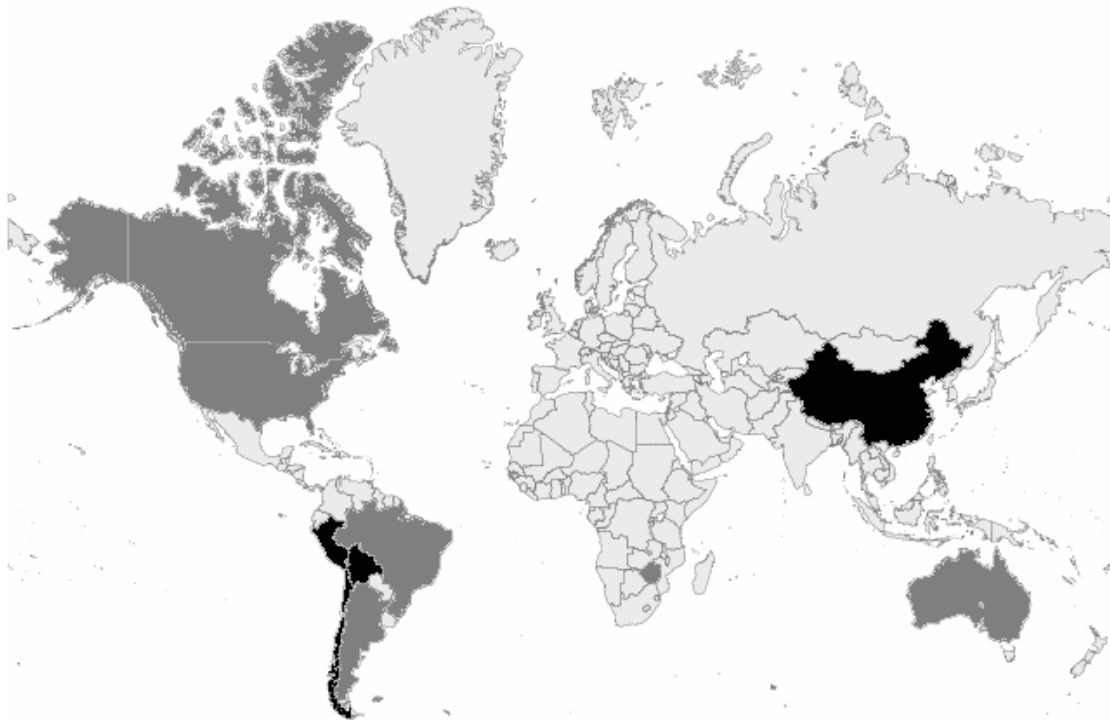


Abb. 13: Weltweite Lithium-Reserven, Stand 2011 [eigene Darstellung in Anlehnung an Elco09, S.82f.]

Die weltweiten Lithium-Reserven verteilen sich auf wenige Regionen. Der Rohstoff ist in Amerika, insbesondere Südamerika, Australien, China sowie in geringen Mengen in Zimbabwe zu finden. In Europa befinden sich keine erwähnenswerten Vorkommen. Fast 90 % der heute unter ökonomischen Aspekten nutzbaren Vorkommen sind in lediglich zwei Ländern zu finden: China und Chile, wobei Chile mit 7,5 Millionen Tonnen allein 60 % der heute nutzbaren Ressourcen besitzt [vgl. Usgs11].

Im Jahre 2010 wurden schätzungsweise ca. 25.000 Tonnen Lithium gefördert. Im Vergleich zu 2009 ein Anstieg um 35 %. Größte Produzenten im Jahr 2010 waren Chile mit knapp 35 %, China mit 18 % und Australien mit 33 %, wobei dessen heute nutzbaren Reserven sich auf lediglich 580.000 Tonnen belaufen [vgl. Usgs11].

Betrachtet man die gesamten Reserven, d. h. zusätzlich zu den heute nutzbaren Lagerstätten diejenigen Vorkommen, die unter heutigen Fördertechniken und politischen Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich abgebaut werden können, dann rangiert ein

Land an der Spitze der lithiumreichsten Länder, das bereits als Saudi Arabiens des Lithiums bezeichnet wird: Bolivien [vgl. Dogg09]. Es verfügt über Reserven in Höhe von 9 Millionen Tonnen. Das entspricht ca. 28 % der globalen Lithium-Reserven. Bis heute hat Bolivien jedoch keine Tonne Lithium gefördert. Zurückzuführen ist dies auf die politische Situation. Ziel der Regierung unter Evo Morales ist es, die Vorkommen ohne Hilfe ausländischer Investoren zu fördern [vgl. Frie09]. Weitere unbezifferte Vorkommen werden in Mitteleuropa, Zentralafrika sowie vor allem in Russland vermutet [vgl. Elco09, S.82ff, Tah06, S.5].

Die aktuellen Produktionsmengen sowie Reserven der einzelnen Länder sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

Tab. 4: Weltweite Lithiumproduktion und –reserven in Tonnen, Stand 2011

[Daten entnommen und abgeleitet aus Usgs11, Elco09, S.82f.]

	Produktion 2009	Produktion 2010	nutzbare Reserven	Reserven
USA	2000*	2000*	38.000	4.000.000
Argentinien	2.220	2.900	850.000	2.600.000
Australien	6.280	8.500	580.000	630.000
Bolivien	-	-	-	9.000.000
Brasilien	160	180	64.000	1.000.000
Kanada	310	-	-	360.000
Chile	5.620	8.800	7.500.000	7.500.000
China	3.760	4.500	3.500.000	5.400.000
Kongo	-	-	-	1.000.000
Portugal	-	-	10.000	k.A.
Serbien	-	-	-	1.000.000
Zimbabwe	400	470	23.000	k.A.
Total	18.750	25.350	12.565.000	32.490.000

Kritisch anzusehen ist, dass sich die Lithium-Reserven auf wenige Länder konzentrieren, deren Stabilität unter geopolitischen Gesichtspunkten als bedenklich einzustufen ist [vgl. Fort10, S.56]. Verglichen mit den Ölreserven ist Südamerika mit fast 60 % der gesamten Lithium-Reserven der neue Mittlere Osten des Lithiums [vgl. Wolk09]. Weitere 30 % verteilen sich auf die beiden Großmächte China und die USA, wodurch beide über einen ausreichenden Grad an Selbstversorgung verfügen. Vor allem bei China ist es sehr wahrscheinlich, dass es kein Interesse daran hat, wichtige Ressourcen anderen Ländern zugänglich zu machen. Besonders die Industrie der Elektromobilität in Europa und Japan bzw. Südkorea wird daher in absehbarer Zeit auf Importe aus diesen Ländern angewiesen sein.

Aufgrund dieser Entwicklung investieren vor allem asiatische Technologiekonzerne verstärkt in Lithium-Abbauprojekte in anderen Ländern. Sie versuchen, damit in Zukunft eine stabile Versorgung mit diesem Rohstoff zu gewährleisten [vgl. Usgs11, S.95]. Beispielsweise hat der japanische Automobilhersteller Toyota bereits im Jahre 2010 eigenständig in ein Lithium-Projekt in Argentinien investiert [vgl. Amah10].

Der Preis für Lithium ist sehr intransparent, da dieser Rohstoff nicht öffentlich gehandelt wird [vgl. Fazn10a]. In der Regel wird daher oftmals der Preis für Lithiumcarbonat als Maßstab herangezogen [vgl. Wall11, S.153]. *Berger* zufolge vervierfachte sich der Preis für Lithiumcarbonat von 2002 bis 2008 [vgl. Berg09, S.27]. Diese Angabe ist jedoch irreführend. Betrachtet man die Preisentwicklung über einen längeren Zeitraum so stellt man fest, dass Lithium von 1990 an bis 2000 bereits dem heutigen Preisniveau entsprach, um die Jahrtausendwende jedoch schlagartig um ca. 75 % einbrach.

Im Jahr 2010 wurde der Preis für eine Tonne Lithium auf 4.500 bis 5.000 \$ geschätzt. [vgl.Usgs11c, S.44]. Es wird vermutet, dass der weltgrößte Lithiumproduzent Sociedad Quimica y Minera de Chile den Preis derart gestaltet, dass potenzielle Konkurrenten mit hohen Kosten am Markteintritt gehindert werden. Zudem geht der Markt von ausreichenden Ressourcen aus, weshalb in den nächsten Jahren nicht mit einer signifikanten Preissteigerung zu rechnen ist [vgl. Fazn10a]. Da Lithium lediglich 2-3 % der gesamten Zellkosten ausmacht, würde auch ein potenzieller Preisanstieg keine bedeutenden Auswirkungen auf die Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien besitzen [vgl. Tbcg10, S.7].

Abschließend wird nun der zukünftige Bedarf an Lithium am Beispiel des Opel Amperas, der mit einer 16 kWh-Batterie ausgerüstet ist [vgl. Opel12], für 1 bzw. 100 Millionen Elektrofahrzeuge berechnet und daraus ein Fazit bezüglich der zukünftigen Lithiumversorgung abgeleitet.

Die Berechnungen basieren auf der Aussage *Tahils*, dass für die Herstellung einer Fahrzeugbatterie mit einem Energiegehalt von 1 kWh 2-3 kg Lithiumcarbonat benötigt werden [vgl. Tah10, S.1]. Bei einem Umrechnungsfaktor von 5.3 zwischen der Menge an Li_2CO_3 und dem Bedarf an reinem Lithium [vgl. Fren11] folgt ein reiner Lithiumbedarf in Höhe von ca. 0,4 – 0,6 kg pro kWh. Um die Berechnungen zu vereinfachen wurde der Mittelwert von 0,5 kg pro kWh verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 14 veranschaulicht.

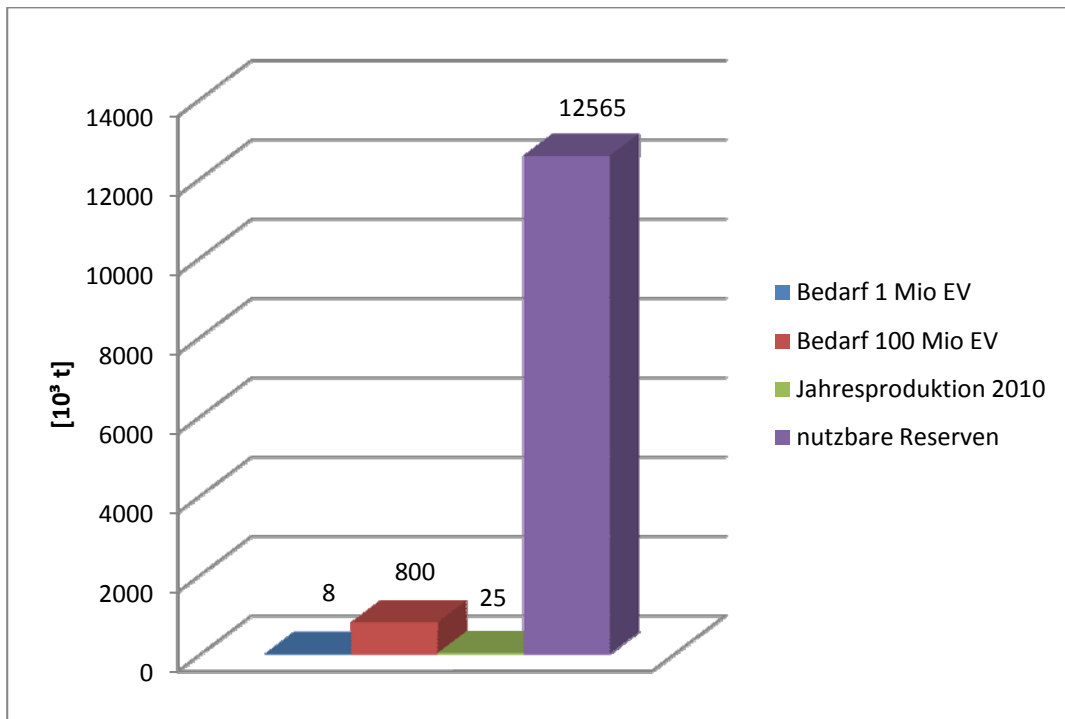


Abb. 14: Vergleich Lithiumbedarf für 1 Mio. Elektrofahrzeuge mit Jahresproduktion 2010 / nutzbaren Reserven [eigene Darstellung]

Um das Ziel der Nationalen Plattform Elektromobilität für 2020 in Deutschland von 1 Million Elektrofahrzeugen zu realisieren [vgl. Npez11, S.5], würden 8.000 Tonnen Lithium notwendig sein. Die Jahresproduktion 2010 in Höhe von ca. 25.000 Tonnen reicht dafür aus. Der Bedarf für 100 Millionen Elektrofahrzeuge, sprich 10 % des heutigen weltweiten Fahrzeugbestandes [vgl. Sous11], würden dementsprechend 800.000 Tonnen Lithium voraussetzen. Dies übersteigt die Jahresproduktion 2010 um den Faktor 32. Verglichen mit den heute nutzbaren Reserven macht diese Menge jedoch nur 6 % aus. Selbst wenn der Durchschnitt aller Fahrzeuge mit einer 60 kWh-Batterie versehen würde, würden 3 Mio. Tonnen Lithium benötigt und damit knapp ein Viertel der bekannten nutzbaren Reserven. Nur die komplette Umstellung des gesamten heutigen Fahrzeugbestand auf die Lithium-Ionen-Batterietechnologie mit der o. g. Batterie-Kapazität von 60 kWh würden Engpässe bei der Lithiumversorgung hervorgerufen. Beide Annahmen sind aber nicht realistisch, weder die komplette Fahrzeugumstellung, noch die benötigte Batteriekapazität, da letztere durch intelligente Ladekonzepte kleiner gehalten werden kann.

Die Bedenken, dass der Elektromobilität eine Ressourcenknappheit an Lithium droht, können anhand dieser Untersuchungen widerlegt werden. Der Vergleich mit der Situation bei den fossilen Brennstoffen Öl und Erdgas, der oft angeführt wird, ist nicht

korrekt. Die beiden Ressourcen unterscheiden sich in einem Punkt ganz wesentlich. Öl und Erdgas verlieren, nachdem sie in einem Motor verbrannt wurden, ihr Energiepotenzial für immer.

Lithium dagegen ist ein Speichermaterial für Energie und ist zudem recycelbar [vgl. Elco09, S.84]. Vor allem Europa sowie Japan und Südkorea werden für die Elektromobilität frühzeitig ein tragfähiges Recyclingsystem etablieren müssen (siehe Kapitel 3.4), um ihre Abhängigkeit von Importen aus Ländern mit hohen Lithium-Reserven zu reduzieren [vgl.Fort10, S.56].

3.2 Produktion

Die Produktion der Lithium-Ionen-Batterie spielt eine bedeutende Rolle um die Kosten- und Qualitätsziele der Automobilbranche zu erreichen. Im wertschöpfenden Bereich der Produktion wird im Rahmen der folgenden Ausführungen zunächst die Zellproduktion beleuchtet und die verschiedenen Zellformen erläutert. Anschließend wird die Batteriemontage betrachtet. Eine Kostenbetrachtung der Batterieproduktion findet sich ebenfalls in diesem Kapitel. Zum Schluss wird die zu erwartende Industriedynamik der Automobilindustrie hinsichtlich der Elektromobilität analysiert.

3.2.1 Produktionstechnologien Batteriezelle

Die Fertigung der Batteriezelle verursacht annähernd 50 % der gesamten Batteriekosten (siehe Abb. 15) [vgl. Berg11, S.16].

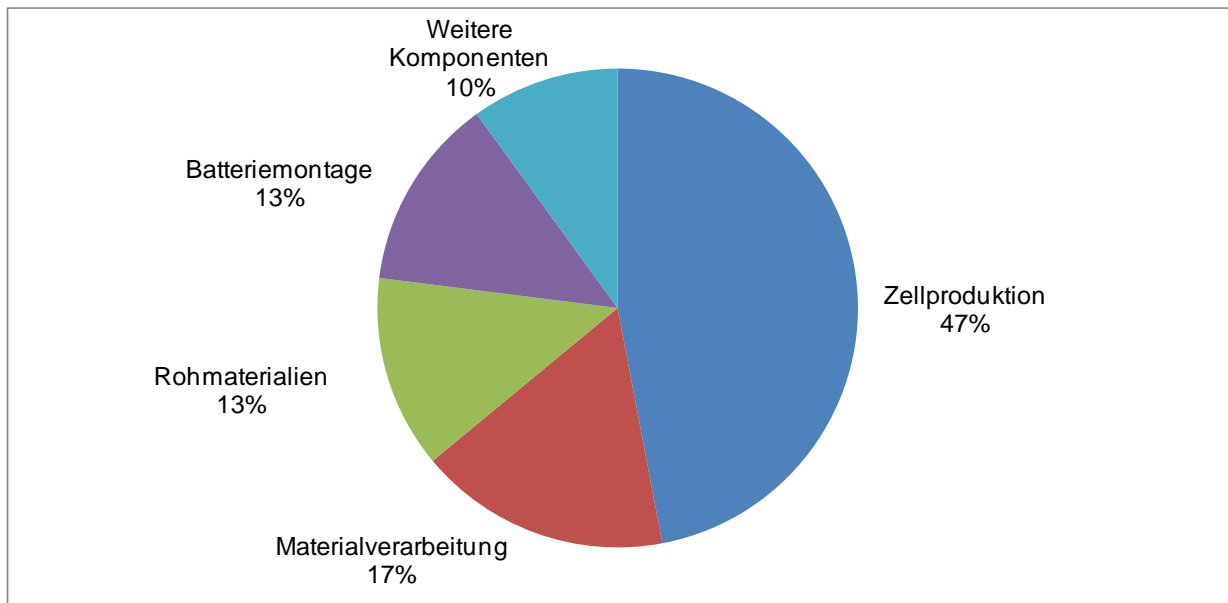


Abb. 15: Kostenzusammensetzung der Batterie [vgl. Berg11 S.17]

Berger zufolge lässt sich die Batteriezellen-Fertigung in acht Produktionsschritte einteilen (siehe Abb. 16):

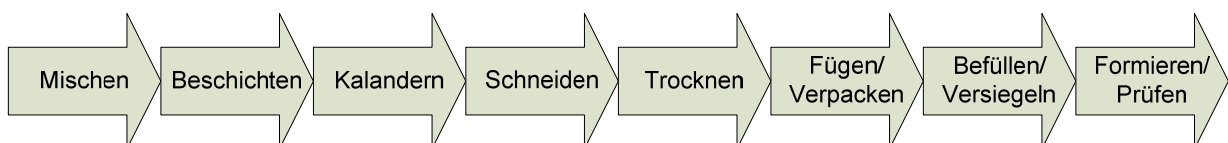


Abb. 16: Herstellungsprozess Batteriezelle [eigene Darstellung in Anlehnung an Berg11, S.19]

Im ersten Produktionsschritt, dem Mischen, werden die chemischen Komponenten der Elektrodenbeschichtung in einer Suspension gemischt (sog. Slurry). Die Herausforderung dieses Prozessschrittes stellt die Reproduzierbarkeit des Mischverhältnisses der einzelnen Komponenten dar. Die Einhaltung des richtigen Mischverhältnisses ist notwendig, um die maximale Leistungsfähigkeit der Batterie zu erreichen. Die chemischen Komponenten werden in einem Batch-Verfahren gemischt, welches mehrere Stunden beansprucht [vgl. Berg11, S.19]. Zur Senkung der Kosten des Produktionsverfahrens gehen die Bestrebungen dahin, die Geschwindigkeit des Mischprozesses zu steigern.

Nach dem Mischen folgt das Beschichten. Hierbei wird die Suspension (Slurry) auf die Elektrodenfolien aufgetragen. Auch an diesen Prozessschritt werden hohe Anforderungen gestellt. Wiederum spielt die Reproduzierbarkeit eine sehr große Rolle. Gleichzeitig besteht auch hier die Forderung, den Durchsatz der Anlagen zu steigern. Eine weitere Herausforderung des Beschichtungsprozesses stellt die Verwendung von organischen Lösungsmitteln dar. Diese werden verwendet, um die richtige Viskosität der Suspension zu erhalten und eine schnelle Trocknung der Beschichtung zu ermöglichen. Die Rückgewinnung der Lösungsmittel ist sehr kostenintensiv. Daher gibt es Bestrebungen, organische Lösemittel durch wässrige zu ersetzen.

Beim Kalandern wird die Schichtdicke der Suspension eingestellt [vgl. Berg11, S.19]. Hierbei werden die Elektrodenfolien gewalzt, um die nötige Oberflächenporosität zu gewährleisten [vgl. Vdin11].

Im nächsten Fertigungsschritt erfolgt das Ausschneiden der Elektrodenblätter aus der Folie. Momentan werden hierzu häufig Schneideblätter verwendet. Wenn diese durch Abnutzung stumpf werden, entstehen an der Außenseite der Elektroden Grate, welche langfristig die Leistungsfähigkeit der Batterie beeinflussen können. Andere Fertigungstechnologien, wie z. B. das Laser-Schneiden, könnten die Qualität dieses Fertigungsschrittes verbessern [vgl. Berg11, S.19f].

Die geschnittenen Elektrodenblätter werden im nächsten Schritt getrocknet und das verwendete Lösungsmittel entzogen [vgl. Berg11, S.19f].

Sind die Elektrodenblätter getrocknet, werden sie im nächsten Fertigungsschritt dem Fügen/Verpacken zusammen mit den Separatoreinheiten gestapelt. Hierbei werden Anode, Separator und Kathode aufeinander gelegt und durch Wickeln, Z-Falten oder

Stapeln gepackt [vgl. Kift12, Berg11, S.19f, Mobi11]. Die verschiedenen Verfahrensschritte beim Fügen und Packen haben unterschiedliche Prozessgeschwindigkeiten. Hohe Prozessgeschwindigkeiten weisen beispielsweise die Wickel- und Faltprozesse auf. Diese eignen sich jedoch nicht zur Bearbeitung von Elektroden mit dicken Beschichtungen aufgrund der engen Biegeradien. Umgekehrtes gilt für den Stapelprozess [vgl. Mobi11]. Der fertige Elektrodenstapel wird dann foliert oder in ein starres Gehäuse eingelegt [vgl. Mobi11, Berg11, S.19f]. Die thermischen und elektrischen Eigenschaften der späteren Zellen hängen sehr stark von den Prozessgeschwindigkeiten beim Fügen und Packen ab.

Im nächsten Schritt, dem Befüllen und Versiegeln, wird das Zellpaket mit dem Elektrolyt befüllt und danach versiegelt [vgl. Berg11, S.19f].

Der letzte Prozessschritt stellt das Formieren/Prüfen der Zelle dar. Beim Formieren wird die Zelle an eine Stromquelle angeschlossen. Dies kann bis zu 24 Stunden in Anspruch nehmen. Danach folgt eine abschließende Qualitätskontrolle, welche die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer der Zelle beurteilt [vgl. Mobi11, Berg11, S.19f.].

Da Wassermoleküleinschlüsse in den Batteriezellen einen schädlichen Einfluss haben, muss die gesamte Produktion in einer klimatisch angepassten Umgebung mit sehr niedriger Luftfeuchtigkeit stattfinden [vgl. Mobi11].

3.2.2 Zellformen

Eingangs wurden in Abbildung 4 die drei unterschiedlichen Grundtypen für die Verwendung in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen vorgestellt. Im Folgenden wird auf deren spezifischen Aufbau eingegangen und die daraus resultierenden Vorteile und Nachteile der verschiedenen Typen beschrieben.

Beim Aufbau einer Rundzelle (zylindrische Zelle) werden Anode, Separator und Kathode als geschnittene Bänder übereinander gelegt und um einen Dorn herum aufgewickelt. Dieser Zellwickel wird dann in ein festes Aluminiumgehäuse gepackt [vgl. Accu11]. Für die zylindrische Zelle spricht die hohe Fertigungserfahrung mit dieser Bauform. Außerdem hat sie eine hohe Lebensdauererwartung [vgl. Kamp11]. Weitere Punkte die für diese Bauform sprechen sind die mechanische Robustheit sowie eine gute Abdichtung der Zelle [vgl. Wohl11].

Die aufwendige Kühlung der Zelle und die geringe Packdichte ist ein Nachteil dieser Zellausführung [vgl. Wohl11].

Bei der prismatischen Zelle handelt es sich meist auch um gewickelte Zellen. Diese sind allerdings flachgewickelt und werden in einem prismatischen Gehäuse verpackt [vgl. Accu11]. Der einfache Verbau der prismatischen Zelle ist ein klarer Vorteil dieser Zellform. Allerdings wird zum Fügen und Verpacken der Stapel in das Gehäuse hoher Druck benötigt [vgl. Kamp11].

Die Pouch-Zelle oder Coffeebag-Zelle wird durch geschichtete Zellstapel aufgebaut. Im Gegensatz zu den anderen Zellformen hat die Pouch-Zelle kein festes Gehäuse sondern nur eine Kunststofffolie, welche mit Aluminium beschichtet ist [vgl. Accu11]. Die Pouch-Zelle hat den Vorteil einer sehr guten Kühleigenschaft und einer hohen Energiedichte [vgl. Kamp11]. Des Weiteren ist die Verpackung sehr günstig und die Gestaltung der Zelle in Form von Größe und Dicke flexibel [vgl. Wohl11]. Die Nachteile sind die Dichtheit der Zelle sowie die Stapelbarkeit der Elektroden [vgl. Kamp11]. Außerdem kann sich die Zelle aufblasen, wenn sich der Innendruck erhöht. Weiterhin ist sie empfindlich gegen mechanische Beanspruchung [vgl. Wohl11].

Aus heutiger Sicht ist noch keine klare Tendenz zu einer Zellform erkennbar [vgl. Kamp11].

3.2.3 Batteriemontage

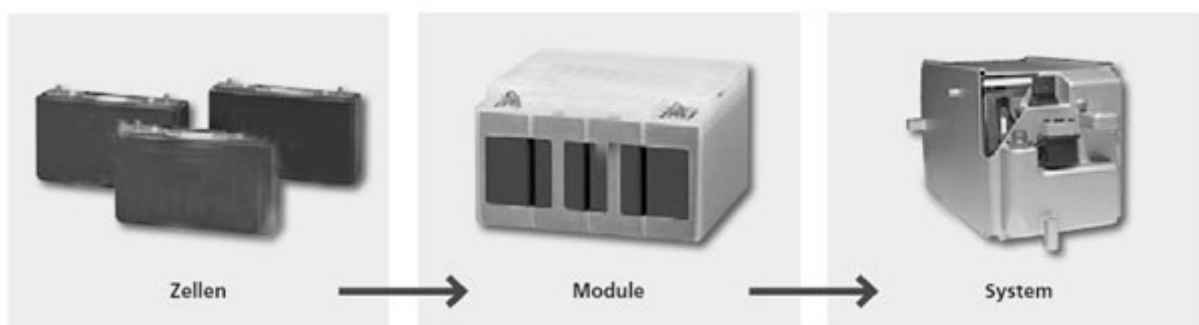


Abb. 17: Batteriemontage [in Anlehnung an Wibw10, S.14]

Bei der Batteriemontage werden zuerst die Zellmodule montiert. Die einzelnen Batteriezellen werden hierzu gestapelt, in das Batteriegehäuse eingesetzt und dann mit dem Batteriemanagementsystem verbunden. Daraufhin werden die Stromableiter mit der Stromführung verbunden, die Verbindungen überprüft und das Gehäuse ver-

schlossen. Anschließend werden Stromführungen und Kontakte verbunden, bevor die fertigen Module geprüft werden können. Die einzelnen Zellmodule werden auf einem Bodenelement über Kontaktschienen verbunden und verschraubt. Elektronikträger und Dichtungen können angebracht werden. Danach wird die fertige Batterie geprüft und eventuell geladen [vgl. Kamp11].

3.2.4 Kosten

Die Herstellungskosten der Lithium-Ionen-Batteriezellen sind abhängig vom Batterietyp, wobei derzeit nicht selten 1000 €/kWh anfallen. Durch Serienfertigung und Weiterentwicklung der Fertigungstechnologien wird mit einer starken Reduzierung der Kosten gerechnet. Nach *Wallentowitz* halten Experten die Absenkung der Zellkosten auf 200 €/kWh bis 2020 für realistisch [vgl. Wall11, S.153]. Bezüglich der Kosten herrscht keine Einigkeit bei den Experten. *Berger* zufolge liegen die Kosten für eine Lithium-Ionen-Batterie derzeit bei 600 bis 700 €/kWh. Bis 2020 wird für die Produktion in Europa eine Senkung der Kosten auf 475 €/kWh als realistisch angesehen. Im Gegensatz dazu wird in China durch Wettbewerbsvorteile eine Reduktion der Kosten auf 200 bis 320 €/kWh als möglich angesehen [vgl. Berg09, S.28]. Beispiele für die chinesischen Wettbewerbsvorteile sind die geringeren Rohmaterialkosten [vgl. Berg09, S.22], da in China 17 % der weltweiten Reserven an Lithium liegen [vgl. Berg09, S. 27]. Außerdem ist die Basis an Herstellern für Lithium-Ionen-Batterien in China fortgeschrittener. Mit dem Anstieg der nachgefragten Mengen können hier Skaleneffekte ausgenutzt werden [vgl. Berg09, S.22]. Laut einem Report der TU Graz liegen die Kosten momentan bei 800 bis 960 €/kWh. Die Schätzungen für Kosten im Bereich von 200 bis 320 €/kWh werden als sehr optimistisch angesehen und stützen sich auf die Preissituation für Lithium-Ionen-Batterien für die Unterhaltungselektronik. Aufgrund höherer Ansprüche in der Automobilindustrie bezüglich Sicherheit und Lebensdauer sind diese Preise aber nicht direkt übertragbar [vgl. Joan10, S.37].

In Abbildung 18 ist dargestellt, wie sich die Kosten der Batterie in Bezug auf Aktivmaterial, Zukaufteile, direkte und indirekte Arbeit, Abschreibungen, Forschung und Entwicklung sowie den Ausschuss aufteilen.

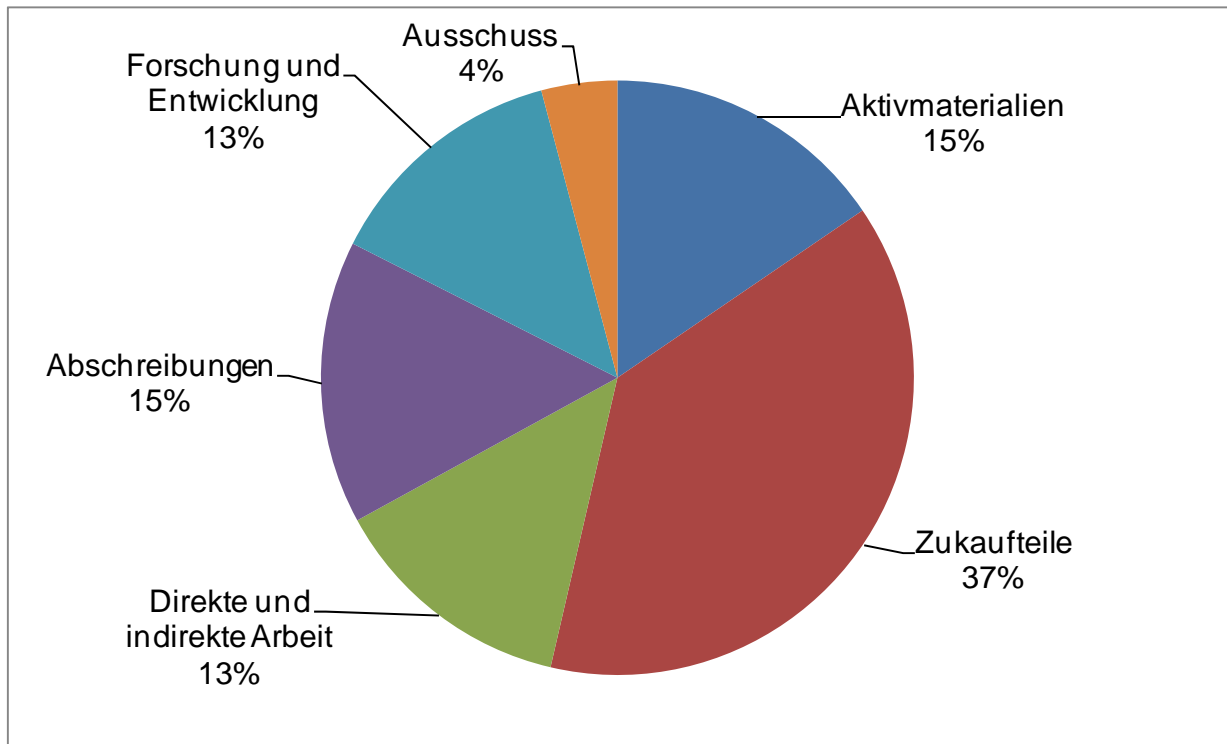


Abb. 18: Kostenzusammensetzung [eigene Darstellung in Anlehnung an Joan10, S.37]

Für die Ausschusskosten von 4 % wurde hierbei mit einer reduzierten Ausschussrate von 10 % gerechnet. Momentan sind deutlich höhere Ausschussraten von 30 bis 60 % durchaus üblich. Derart hohe Ausschussraten würden die Batteriepreise allerdings auf 1.200 bis 1.500 €/kWh treiben [vgl. Joan10, S.37, Tbcg10, S.6]. Aus diesem Grund stellt eine Erhöhung der Produktionsqualität bedingt durch Automatisierung einen bedeutenden Faktor zur Reduzierung der Kosten dar. Des Weiteren werden durch die Automatisierung der Prozesse die Personalkosten sinken [vgl. Joan10, S.37f.].

Produktionsanlagen zur Herstellung von Batteriezellen entsprechend des in 3.2.1 dargestellten Fertigungsprozesses fordern hohe Investitionen mit entsprechenden Abschreibungen. Für eine Anlage mit einer Produktionskapazität von ungefähr 100.000 EV-Äquivalenten⁶ müssten momentan 200 Mio. € investiert werden. Davon sind mit ca. 49 Mio. € das Formieren und 45 Mio. € das Beschichten die kostenintensivsten Prozesse. Für Produktionen mit hohen Stückzahlen ist eine Produktionslinie nicht ausreichend. Mehrere Produktionslinien müssen parallel betrieben werden, was das Investment weiter erhöht [vgl. Berg11, S.20f]. Allerdings werden mit steigenden Produktionskapazitäten die Kosten und Abschreibungen sinken [vgl. Joan10, S. 38].

⁶ Ein EV-Äquivalent entspricht der Anzahl an Batterien, welche für ein vollwertiges Elektroauto benötigt werden [vgl. Fmau10].

Durch Lerneffekte und steigende Produktionsstückzahlen werden die Batteriekosten deutlich sinken [vgl. Wall11, S.154]. Dennoch sind ungefähr 25 % der Kosten nahezu unabhängig von den Produktionsstückzahlen, beispielsweise Rohstoffe und Standardteile, wodurch sich kaum Kostenänderungen über die Zeit ergeben [vgl. Joan10, S.38] [vgl. Tbcg10, S.7]. Der Report der TU Graz hält es deshalb für unwahrscheinlich die Zielkosten für Batteriezellen von 200 €/kWh bis 2020 zu erreichen. Das Ziel wäre nur erreichbar, wenn entscheidende Erfolge bei höheren Energiedichten erzielt werden, die keine Erhöhung der Kosten mit sich führen [vgl. Joan10, S.38].

Wallentowitz hingegen hält eine Kostenreduktion für Batteriezellen auf 200 €/kWh bis 2020 für realistisch. Die Kosten für eine Batterie würden sich damit auf weniger als ein Drittel der heutigen Kosten belaufen (siehe Abb. 19). Die Kosten für eine Batterie mit 15 kWh lägen nach seinen Schätzungen 2020 bei 4.500 €, davon 3.000 € für die Batteriezellen. 50 % der Zellkosten wurden für die weiteren Komponenten der Batterie aufgeschlagen [vgl. Wall11, S.154].

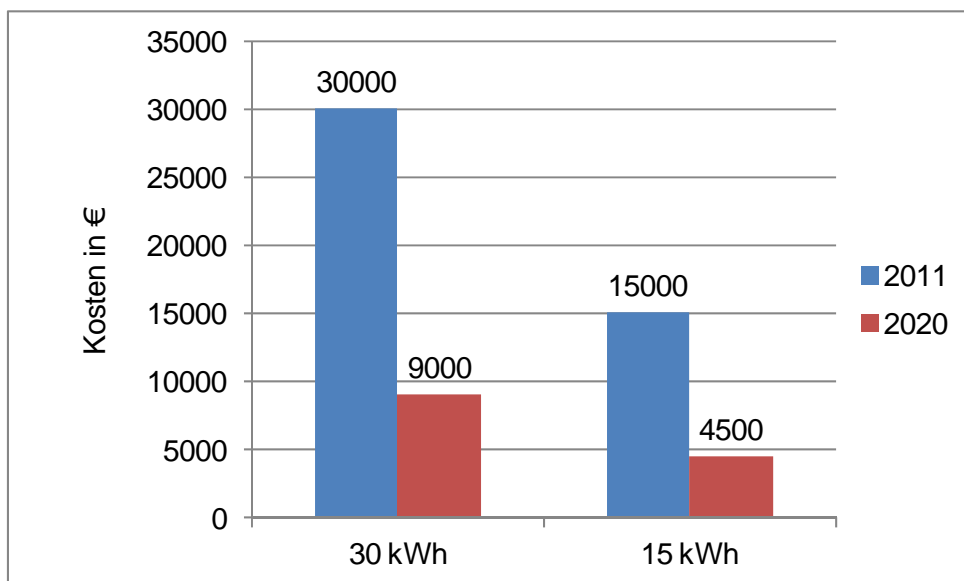


Abb. 19: Kostenvergleich 2011/2020 [eigene Darstellung in Anlehnung an Wall11, S.154]

Die Boston Consulting Group prognostiziert einen Preisabfall von 60 bis 65 % von 2009 bis 2020. Eine 15 kWh Batterie hatte 2009 einen Preis von 16.000 \$, was ungefähr 12.300 € entsprach und 2020 einen Preis von 6.000 \$, was ungefähr 4.600 € entspricht [vgl. Tbcg10, S.7f.]. Beide Schätzungen liegen somit für 2020 auf einem vergleichbaren Niveau, der Preis pro kWh bei ca. 300 bis 310 €/kWh.

3.2.5 Industriedynamik

Durch die Änderungen in der Wertschöpfungskette werden neue strategische und operative Kooperationen und Joint Ventures entstehen [vgl. Joan10, S.33]. Hierzu lassen sich zwei mögliche Szenarien darstellen: Zum einen bilden sich Kooperationen oder Joint Ventures zwischen OEMs und Batterieherstellern, zum anderen zwischen Batterieherstellern und Tier-1 Lieferanten [vgl. Tbcg10, S.10].

Ein Beispiel für ein Joint Venture zwischen einem OEM und einem Batteriehersteller ist Daimler und Li-Tec [vgl. Tbcg 10, S.10]. Das Gemeinschaftsunternehmen Li-Tec gehört zu 50,1 % der Evonik Industries GmbH und zu 49,9 % der Daimler AG [vgl. Lite12].

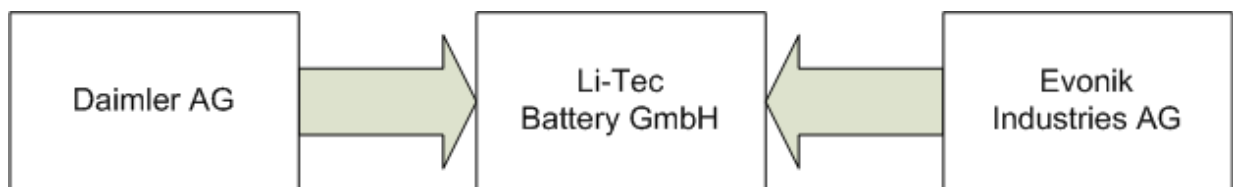


Abb. 20: Li-Tec: Joint Venture zwischen Daimler und Evonik Industries [eigene Darstellung]

Ein weiteres Beispiel ist das Joint Venture von Toyota Motor Corporation und Panasonic Corporation, die gemeinsam das Unternehmen Primearth EV Energy gegründet haben. An dem Gemeinschaftsunternehmen hält Toyota 80 % und Panasonic 20 % [vgl. Fitd11].

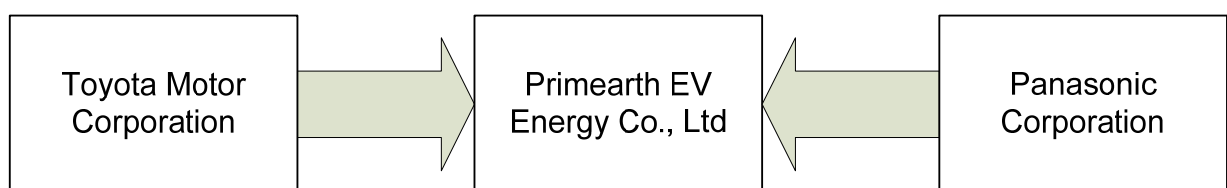


Abb. 21: Primearth EV: Joint Venture zwischen Toyota und Panasonic [eigene Darstellung]

Diese Joint Ventures bieten den OEMs exklusiven Zugang zu Know-How, der Technologie und der Produktionskapazität der Batteriehersteller. Außerdem bietet sich die Möglichkeit einer Fahrzeugdifferenzierung durch Auswahl verschiedener Batterietechnologien. Andererseits werden die OEMs durch diese Konstellation beim Zugriff auf die technologischen Fortschritte anderer Batteriehersteller eingeschränkt. Diese Exklusivität kann auch Skaleneffekte begrenzen und die Senkung der Fertigungskosten verzögern [vgl. Tbcg10, S.10f.].

Beispiele für Kooperationen und Joint Ventures von Tier-1 Lieferanten und Batterieherstellern bilden Bosch und Samsung. Die beiden Unternehmen gründeten das Joint Venture SB LiMotive [vgl. Tbcg10, S.11].

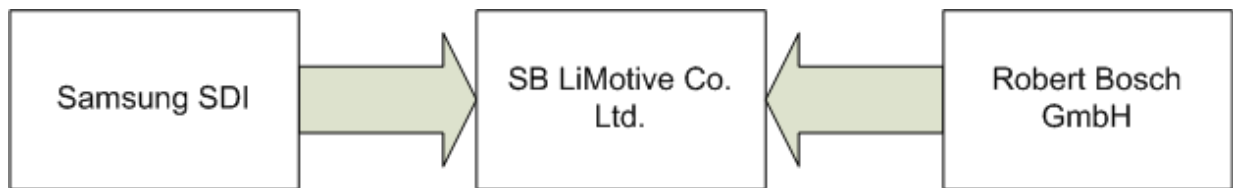


Abb. 22: SB LiMotive: Joint Venture zwischen Samsung und Bosch [eigene Darstellung]

Ein weiteres Joint Venture bestand von 2006 bis 2011 zwischen Johnson Controls und dem französischen Batteriehersteller Saft [vgl. Joco12, Tbcg10, S.11].

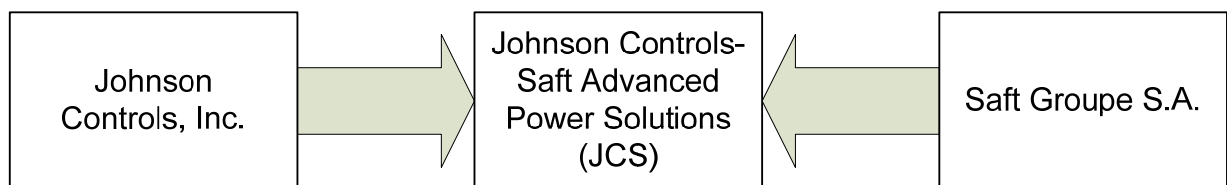


Abb. 23: Johnson Controls - Saft Advanced Power Solutions: Joint Venture zwischen Johnson Controls und Saft [eigene Darstellung]

In diesem Fall öffnen die Tier-1 Lieferanten den Batterieherstellern den Zugang zu den OEMs über etablierte Geschäftsbeziehungen. Ebenso geben sie Erfahrungen aus der Automobilindustrie weiter. Gleichzeitig können sie ihren Status als Tier-1 Lieferanten halten. Für die OEMs bedeutet eine solche Verbindung, dass sie weniger Wissen im Bereich der Batterietechnologie aufbauen. Andererseits profitieren sie von Skaleneffekten und ein Wechsel zu neueren Technologien auch anderer Hersteller ist deutlich einfacher realisierbar [vgl. Tbcg10, S.11].

Für die nächsten Jahre prognostiziert die Boston Consulting Group verstärkte Kooperationen zwischen OEMs und Batterieherstellern. Die OEMs werden sich ein Basiswissen über die Technologie aneignen und durch schnelle und exklusive Lösungen am Markt Wettbewerbsvorteile sichern. Mit der reifenden Technologie und dem Übergang der Batterie zur Massenware werden sich Kooperationen zwischen Tier-1 Lieferanten und Batterieherstellern verstärken [vgl. Tbcg10, S.11].

3.3 Nutzung

Aus Kundensicht sind neben den bereits genannten Anforderungen sicherheitsrelevante Aspekte von sehr hoher Bedeutung. Aktuellen Studien zufolge belegt das Thema Sicherheit immerhin den zweiten Platz in der Rangfolge der Kundenpräferenzen beim Kauf eines Fahrzeugs [Wall11, S.25, aus Wyma07]. Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Erwartung, leergefahrene Batteriesysteme unkompliziert und innerhalb kürzester Zeit zu laden, um eine möglichst hohe Verfügbarkeit des Elektroautos zu gewährleisten. Beide Aspekte werden im Folgenden näher betrachtet.

3.3.1 Sicherheitskritische Aspekte

Die hohe Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien birgt nicht nur Vorteile. Je mehr Energie auf engstem Raum gespeichert wird desto höher ist auch die Gefahr, dass diese unkontrolliert und unter Umständen auch schnell freigesetzt wird [Lipo08]. Der mobile Einsatz von Lithium-Ionen-Technik ist daher mit einer Reihe sicherheitskritischer Aspekte verbunden.

Eine nicht zu unterschätzende Gefahr geht von einer möglichen thermischen Belastung des Batteriesystems aus. Lithium-Ionen-Batterien reagieren äußerst empfindlich, wenn sie nicht innerhalb des definierten Temperaturfenster betrieben werden (empfohlen: 0 °C bis 65 °C). Tiefe Temperaturen sind hohen Werten generell vorzuziehen, da sich die Alterungseffekte verlangsamen und somit die Lebensdauer erhöht wird. Sinkt die Temperatur allerdings zu weit in den Minusbereich, leidet darunter die Leistungsfähigkeit, da der Elektrolyt nicht mehr optimal leitet. Auch Tiefentladungen sollten aufgrund auftretender Korrosion vermieden werden [vgl. Wall11, S.112].

Lithium-Ionen-Batterien bestehen zum Großteil aus brennbaren und leicht entzündbaren Materialien. Die thermische Energiemenge aller Komponenten entspricht ungefähr dem 10-fachen der gespeicherten elektrischen Energie [vgl. Basy10, S.6]. Demzufolge sind Beschädigungen aufgrund einer Überhitzung ab 100 °C kritisch zu betrachten. Diese kann durch externe Wärmezufuhr wie bspw. Feuer sowie auch intern durch Überschreiten der zulässigen Zellspannung (> 4,2 V) und Überentladung der Zelle verursacht werden [vgl. Lipo08]. Auch ein Kurzschluss in Folge eines Zellfehlers bei der Fertigung oder einem Crash kann die Zelltemperatur erhöhen. Im günstigsten Fall

kommt es lediglich zu einem Defekt der Zelle. Im ungünstigsten Fall führt die Wärme- einwirkung zur Selbsterwärmung der Zellen, dem „Thermal Runaway“⁷. Dieser Pro- zess beschreibt den unkontrollierten Temperaturanstieg einer exothermen chemi- schen Reaktion innerhalb der Zelle [vgl. Wall11, S.111]. Dabei reagiert das Graphit mit dem hochreaktiven Lithium, was in der Folge weitere Komponenten erhitzen und eine zerstörerische Kettenreaktion auslösen kann. Schmilzt der Separator, kann dies einen inneren Kurzschluss zur Folge haben. Durch die Temperaturerhöhung besteht einer- seits die Gefahr eines Batteriebrands sowie einer Explosion aufgrund eines entste- henden Überdrucks innerhalb der Zelle (siehe Abb. 24) [vgl. Wall, S.111].



Abb. 24: Batteriebrand und –explosion verursacht durch Thermal Runaway [Beau08, S.9]

Um die Zellen gegen solche Ereignisse zu schützen, werden in der Praxis allgemein drei Herangehensweisen verfolgt [Ener09]:

- Batteriechemie mit höheren Sicherheitsmerkmalen verwenden
- Zellengehäuse mit Schutzvorrichtungen auslegen
- Zellen zu Batteriepack mit integriertem BMS verschalten

Der Schwerpunkt liegt insbesondere darauf, die Eigensicherheit der Einzelzelle zu verbessern. Die Zellen sollen kurzschlussfest, nicht brennbar, nicht explosiv und nicht anfällig für einen Thermal Runaway sein [vgl. Ener09]. Die Auswahl einer geeigneten Batteriechemie hat dabei einen entscheidenden Einfluss. So lässt sich die Zellsicher- heit durch Verwendung alternativer Kathodenmaterialien wie z.B. Lithiumeisenposphat (LiFePO_4) oder Lithiummanganphosphat (LiMnPO_4) erhöhen [vgl. Wall11, S.112]. Bei den Elektrolyten scheint es sinnvoll, auf ionische Flüssigkeiten zurückzugreifen,

⁷ zu Deutsch: thermisches Durchgehen

da diese schlecht entflammbar sind und eine gute elektrochemische Stabilität aufweisen [Ener09]. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die brennbaren flüssigen Stoffe durch Polymere zu ersetzen [vgl. Wall11, S. 112]. Zur Optimierung ist zunehmend auch vom Einsatz sogenannter „Shut-down“-Separatoren die Rede. Diese bestehen aus dem Kunststoff Polyethylen, der bei Erhitzung schmilzt, die Poren der Membran verschließt und somit einen weiteren Ladungsaustausch unterbindet [vgl. Fazn07]. In der Tabelle 5 sind die Maßnahmen zur Erhöhung der Batteriesicherheit zusammengefasst.

Tab. 5: Übersicht Batteriesicherheit [entnommen aus Wall11, S. 112]

Crashsicherheit	Betriebssicherheit (BMS)	Servicesicherheit
<ul style="list-style-type: none"> - Crashesichere Unterbringung der Batterie in einem korrosionsbeständigen Gehäuse mit feuerhemmenden Schaum - Ventile zur Abblasung der Reaktionsgase im Fehlerfall - Kontrollierte Entladereaktion der Batteriezellen bei Zerstörung des Separators (Nageltest) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mikroprozessorgesteuerte Zellüberwachung, selbständiges Ausschalten der Batterie, bevor sicherheitskritische Grenzwerte überschritten werden - Thermomanagement (Kaltstartverhalten) - Überladeschutz, Zellausgleich 	<ul style="list-style-type: none"> - Unverwechselbare Kennzeichnung sämtlicher HV-Kabel - Berührschutz durch Isolierung und Spezialstecker, die einen Kontakt mit stromführenden Teilen verhindern - Aufteilen der Batterie in mehrere Module, die über einen Sicherheitsschalter verbunden sind

Dass bezüglich der Sicherheitsvorkehrungen noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht, zeigten im Dezember 2011 Negativschlagzeilen über einen Batteriebrand im Elektroauto Chevrolet Volt. Im Mai 2011 erhielt dieses Elektrofahrzeug nach einem erfolgreich durchgeführten Crashtest durch die NHTSA⁸ eine sehr gute Bewertung bezüglich der Sicherheit. Drei Wochen später fing das getestete Autowrack plötzlich Feuer. Die Ermittler fanden heraus, dass der durch den Seitenaufprall beschädigte Lithium-Ionen-Akkupack infolge fehlender Kühlung allmählich überhitzte. Aufgrund des Vorfalls verzögerte sich die für November 2011 geplante Markteinführung des baugleichen Elektroautos Ampera von Opel in den Januar 2012 [vgl. Ftdo11, Zeit11, Spie12].

⁸ NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration): Zivile US-Behörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit

3.3.2 Batterieladung

Um ein leergefahrenes Elektroauto wieder betriebsbereit zu machen, wird derzeit die leitungsgebundene (konduktive) Ladetechnik favorisiert [vgl. Fort10, S.66]. Der Energiespeicher wird über eine Ladestation geladen, wobei das Elektroauto über ein Stromkabel mit dieser verbunden ist [vgl. Fort10, S.64].

Wenn es um den kritischen Aspekt der Ladezeit geht, ist die Ladeleistung eine entscheidende Größe. Zu Hause ist nur eine sehr langsame Ladung möglich (Normalladung). Die Batterie wird hier über die Haushaltssteckdose bei einphasiger 230 V-Wechselspannung mit einer Leistung von ca. 3,5 kW geladen. Bei diesem Vorgang muss mit einer Ladezeit von rund 6 Stunden gerechnet werden [vgl. Fort10, S.25]. Das Ladegerät ist hier üblicherweise im Fahrzeug verbaut. Ergänzend werden im öffentlichen Bereich Ladesäulen installiert, die gegen Bezahlung oder gar kostenlos Strom liefern. Dies ist insbesondere für Parkflächen an Einkaufszentren und in der Innenstadt interessant. Ein Vorteil liegt darin, dass das Ladegerät in der Stromsäule integriert sein kann, was eine direkte Versorgung mit Gleichspannung ermöglicht (Schnellladung) [vgl. Wall11, S.115]. Der Aufbau einer Lade-Infrastruktur für Elektroautos erfordert eine Standardisierung des Ladesteckers und der Steckdose. Aus diesem Grund haben sich europäische Automobil- und Energieunternehmen auf einen einheitlichen Ladeanschluss geeinigt. Grundlage bildet die „Typ 2-Steckvorrichtung“ der Firma Mennekes Elektrotechnik GmbH & Co. KG, die im Dezember 2010 als erste Ladesteckvorrichtung durch das VDE-Institut zertifiziert wurde. Der dreiphasige 400 V-Anschluss ermöglicht einen Ladestrom bis zu 63 A, wodurch sich die Batterie unter optimalen Bedingungen in einer halben Stunde laden lässt [vgl. Wall11, S.113, S.116]

Eine komfortablere, jedoch weitaus kostenintensivere Alternative stellt die Batterieladung über induktive Ladestationen dar. In diesem Fall verfügt das Elektrofahrzeug über eine spezielle Ladespule und wird über eine sich im Boden befindliche zweite Ladespule abgestellt. Der Energiespeicher wird dann berührungslos und kabelfrei per Induktion mit Strom versorgt. Diese Technik kann nicht nur stationär sondern auch mobil angewandt werden. So findet die Stromübertragung während der Fahrt über ein in der Fahrbahn verlegtes Kabel statt [vgl. Wall11, S.116, 117, Fort10, S.64].

Neben den beschriebenen Lösungsvorschlägen die ein Laden des Energiespeichers vorsehen, werden auch Konzepte zum Batterieaustausch an Wechselstationen verfolgt. Ein Roboter tauscht dabei die leeren Batterien gegen geladene Batterien aus.

Um künftig nicht nur eine Nischenrolle einzunehmen, ist eine hohe Standardisierung der Batterien erforderlich. Wegbereiter auf dem Gebiet der Batterie-Wechseltechnik ist das Unternehmen Better Place, welches die Einführung einer flächendeckenden Infrastruktur für den Betrieb von Elektrofahrzeugen zum Ziel hat [vgl. Fort10, S.65].

3.4 Batterieverwertung

“There is no green car without green recycling.”

Manager des belgischen Materialtechnologiekonzerns Umicore [Kant11]

Auch wenn die Automobilhersteller die Batterien nicht selber herstellen, werden sie durch gesetzliche Vorschriften für die finale Entsorgung verantwortlich gemacht [vgl. Newt11]. In Europa herrschen aufgrund der EU-Direktive 2006/66/EC strenge Vorschriften die besagen, dass mindestens 50 % des Batterieabfalls recycelt werden muss [vgl. Joan, S.35]. In Zukunft wird das Materialrecycling vor allem in rohstoffarmen Ländern wie beispielsweise Deutschland und Japan an Bedeutung gewinnen. Nur durch eine Reduzierung des Primärbedarfs an knappen Ressourcen und damit einer gleichzeitigen Reduzierung der Abhängigkeit von den exportierenden Ländern kann die Wettbewerbsfähigkeit im Bereich der Elektromobilität sichergestellt werden [vgl. Bund11, Npez11, S.23, Elco09, S.80].

Da Elektrofahrzeuge jedoch noch vor dem Marktdurchbruch stehen, liegen heute kaum Erfahrungswerte für das Recycling bzw. die Wiederverwendung von Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen vor. Insbesondere der Recyclingprozess befindet sich international noch in der Entwicklungsphase [vgl. Bund11]. Abbildung 25 soll zunächst aufzeigen, welche Bestandteile einer typischen Lithium-Ionen-Batterie überhaupt recycelt werden können.

Abbildung 25 zeigt auf, dass alle in Lithium-Ionen-Batterien verwendeten Metalle zu 100 % recycelt werden können. Kohlenstoff, andere Elektrodenmaterialien und der Polymerseparator lassen sich zu mehr als 90 % wiederverwerten. Anderweitig genutzte Polymere können lediglich zu maximal 20 % im Verwertungskreislauf geführt werden. Lösungen und das Gehäuse sind nicht verwertbar. Wie bereits in Abbildung 11, S. 27 aufgezeigt, macht Lithium verglichen mit den anderen Metallen lediglich einen sehr

geringen Anteil an der Gesamtmasse aus. Da zudem der Preis im Vergleich zu Kobalt und Nickel geringer ist, ist das Recycling von Lithium heute nicht wirtschaftlich [vgl. Fren11]. Es zu recyceln ist immer noch ungefähr fünf Mal teurer als es primär abzubauen. Zukünftig werden insbesondere Umweltgesetze aber auch der höhere Bedarf das Recycling von Lithium jedoch vorantreiben [vgl. Newt11].

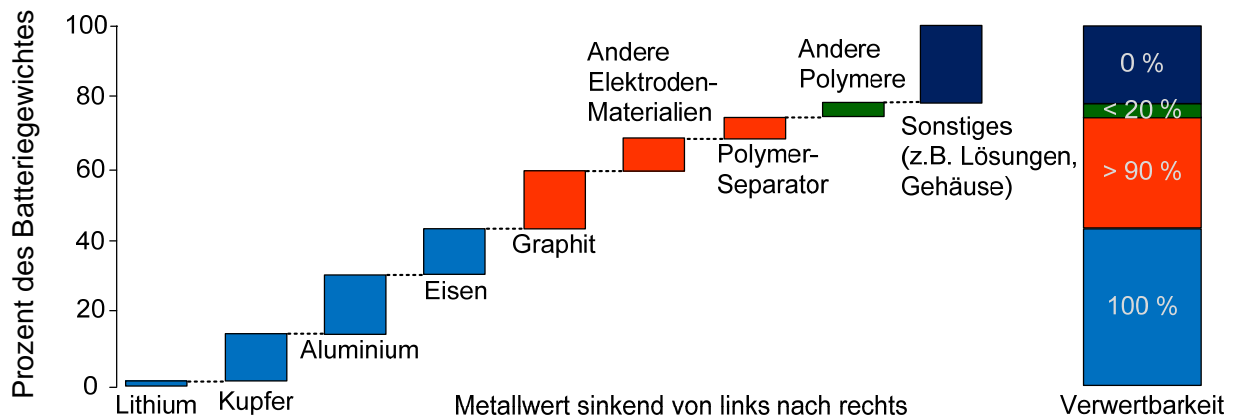


Abb. 25: Verwertbarkeit einer Lithium-Ionen-Batterie, gewichts- und wertbezogen [eigene Darstellung in Anlehnung an Elco09, S.84]

In der Vergangenheit gab es aufgrund der o. g. Gründe keine nennenswerte Verwertung von Lithium. Im Jahr 2009 wurde beispielsweise weniger als 1 % des gesamten Lithiumbedarfes aus Kreislaufmaterial gedeckt [vgl. Dund09, S.23]. Die bekannten Verfahren zum Verwerten von Lithium-Ionen-Batterien aus der Unterhaltungselektronik sind nicht effizient genug. Aus diesem Grunde wird derzeit Lithium als wichtige Ressource noch vernachlässigt [vgl. Bund11]. Es wird stofflich nicht wiederverwertet und wird bei den metallurgischen Prozessen lediglich als Reduktionsmittel genutzt. Ausschließlich Kobalt, Nickel, Mangan und Kupfer stehen nach dem Recycling erneut als Ausgangsmaterialien zur Verfügung [vgl. Fraun09, S.56]. Mit der zukünftigen Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen wird das Recycling von Lithium jedoch zunehmend an Bedeutung gewinnen [vgl. Usgs11a, S.94]. Vorstellbar wäre ein ähnlicher Zyklus wie bei der Bleibatterie, die heute der am weitest verbreitete Batterietyp ist. Diese bestehen heute zu 60 bis 80 % aus wiederverwertbaren Materialien [vgl. Fren11]. In Deutschland ist die GRS Batteriestiftung für die Entsorgung und Wiederverwertung verantwortlich. Sie wird von Batterieherstellern und –importeuren finanziert [vgl. Fraun09, S.56].

Bei Recyclingprozessen für Batterien ist grundlegend zwischen physikalischen und chemischen Verfahren zu differenzieren. Die Aufgabe physikalischer Prozesse ist es primär, die Gehäuse aufzutrennen und metallische sowie polymere Bestandteile zu trennen. Trennverfahren die hierfür eingesetzt werden sind mechanische, thermische und lösemittelunterstützte Trennverfahren. Chemische Prozesse verwenden Techniken wie das Auslaugen, Aufschließen und Fällern, um vor allem metallische Bestandteile wie Nickel, Kobalt, Mangan oder Lithium zurückzugewinnen [vgl. Joan10, S.35]. Tabelle 6 verschafft einen Überblick, welche Batteriebestandteile durch welche Recyclingprozesse wiedergewonnen werden können.

Tab. 6: Zusammenfassung von Recyclingprozessen und Behandlungsmethoden

[Daten entnommen aus Joan10, S.153]

Komponenten	Elemente	Prozess
Mantel	Fe	Mechanische Prozesse, Thermische Behandlung
	Kunststoff	Mechanische Prozesse
Aluminiumfolie	Al	Mechanische Prozesse, Säureunterstütztes Auslaugen, Chemische Fällung
Anode	Cu	Mechanische Prozesse
	C (Graphit)	Mechanische Prozesse, Thermische Behandlung
Adhesive Komponenten	PVDF-Binder	Mechanische Prozesse
Elektrolyt (organische LM, LiPF ₆ , LiBF ₆ , LiClO ₄)		Thermische Behandlung, Flüssigextraktion
Kathode (LiCoO ₂ , LiNiO ₂ , LiMn ₂ O ₄)	Co	Mechanochemische Prozesse, Solvolyse, Thermische Behandlung, Flüssigextraktion, Chemische Fällung, Säureunterstütztes Auslaugen, Elektrochemische Prozesse
	Li	Mechanochemische Prozesse, Solvolyse, Thermische Behandlung, Flüssigextraktion, Säureunterstütztes Auslaugen
	Ni	Mechanochemische Prozesse, Chemische Fällung, Elektrochemische Prozesse
	Mn	Chemische Fällung

Es ist heute bereits erkennbar, dass in Zukunft verschiedene Materialzusammensetzungen für Lithium-Ionen-Batterien angeboten werden. Hierfür wird es unterschiedliche Recyclingverfahren geben müssen. In Deutschland werden daher beispielsweise zwei eigenständige Forschungsprojekte im Bereich Batterierecycling gefördert, die verschiedene Ansätze in der Metallurgie verfolgen: Zum einen das Projekt „LithoRec“ mit dem hydrometallurgischen Verfahren und zum anderen „LiBRi“, das sich auf das pyrometallurgische Verfahren konzentriert [vgl. Bund11]. LithoRec ist ein Verbund aus zehn Industriepartnern, unter anderem Audi und Volkswagen sowie sechs Hochschulinstituten, das insgesamt mit 8,4 Millionen € gefördert wird. Abbildung 26 stellt die Lebensphasen einer Traktionsbatterie visuell zusammen, die in diesem Projekt untersucht werden [vgl. Bärw10].

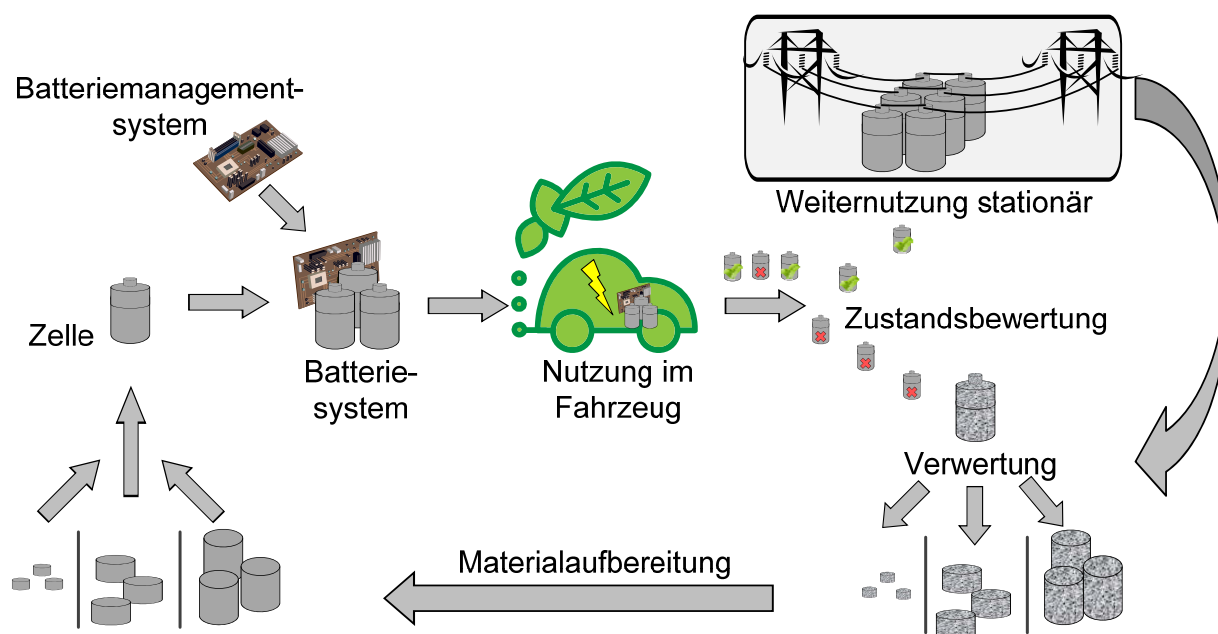


Abb. 26: Materialkreislauf Traktionsbatterie LithoRec
[Eigene Darstellung in Anlehnung an Bärw10]

Nach der Nutzung als mobiler Energiespeicher oder beim Eintritt eines Defektes wird anhand einer Zustandsbewertung entschieden, ob die Batterie anderweitig, z. B. als stationärer Speicher im Stromnetz, weiterverwendet werden kann oder recycelt werden muss. Das Konzept zur Rücknahme, Transport und einer sicheren Demontage muss noch erstellt werden. Nach der Demontage der einzelnen Zellen wird das hydrometallurgische Recyclingverfahren angewendet. Falls das somit gewonnene Sekundärmaterial über eine ausreichende Güte verfügt, kann es für einen erneuten Einsatz in Batteriezellen verwendet werden [vgl. Bärw10]. Im Dezember 2011 eröffnete

Projektmitglied Chemetall die weltweit erste Recyclinganlage, die sich ausschließlich auf die Wiedergewinnung von Lithium spezialisiert [vgl. Beck11].

Zu den weltweit bekanntesten Unternehmen die sich auf das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien spezialisiert haben zählen der belgische Materialtechnologiekonzern Umicore sowie der amerikanische Batterierecycling-Spezialist Toxco Inc. [vgl. Fren11, Joan10, S.156]. Sie verwenden verschiedene Recyclingverfahren, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

Umicore demontiert die Batterien und führt sie dann einem Hochofen zu. Bei den im Ofen herrschenden Temperaturen von 1300 °C zersetzt sich das Plastikgehäuse und erzeugt ein Plasma oder ein „ultrahigh-temperature“ Gas, mit welchem die Metalle von den anderen Bestandteilen getrennt werden. Dieser Prozess liefert Stücke aus knorri-gen Metalllegierungen, welche die Größe eines Baumstammes annehmen können und bis zu 2 Tonnen wiegen. Diese werden weiterverarbeitet und veredelt bevor sie weiterverkauft werden können. Kobalt wird nach einem weiteren Prozess dabei direkt in

Kobalt-Lithium-Oxid umgewandelt. Umicore führt auf, dass die Verwendung von recyceltem Kobalt die benötigte Energie für die Produktion von LiCoO_2 um 70 % reduziert. Zudem wird bei dem gesamten Recyclingprozess eine steinhaltige Substanz bzw. Schlacke gewonnen, die von der französischen Chemiefirma Rhodia weiter verwertet wird. Daraus wird die seltene Erde Neodymium gewonnen. Diese Schlacke kann außerdem für die Produktion von Beton verwendet werden [vgl. Newt11, Fren11, Revu11, Argo10, S.20]. Für diesen Recyclingprozess wurde Umicore bei den „Belgian Business Awards for the Environment“ ausgezeichnet [vgl. Recy11].

Toxco lagert die Batterieabfälle in mit Erde bedeckten Betonbunkern. In einem ersten Schritt werden zunächst die größeren reaktionsfreudigen Batterien elektrisch entladen. Mit Hilfe der Kryotechnik werden die Batterien dann auf eine Temperatur von ca. -200 °C abgekühlt. Lithium, das bei Raumtemperatur explosiv ist, wird dadurch reaktionsträge gemacht. Anschließend werden die Batterien zerkleinert und die Materialien getrennt. Die Metalle können danach verkauft werden. Lithiumbestandteile werden ebenfalls getrennt und zu Lithiumcarbonat weiterverarbeitet. Gefährliche Elektrolyte werden neutralisiert um stabile Verbindungen zu erstellen. Zurückgebliebene Plastikgehäuse und andere Bestandteile werden in geeigneten Recyclingverfahren weiterbehandelt oder verschrottet. Ungefähr 90 % des gesamten Prozesses sind automatisiert. Das Personal befindet sich in sicherer Entfernung [vgl. Toxc11, Fren11]. Im Jahr 2009

wurde Toxco vom US-Energieministerium mit 9,5 Millionen \$ honoriert, um eine bestehende Produktionsstätte derart zu erweitern, damit in Zukunft auch Lithium-Ionen-Batterien in den USA recycelt werden können [vgl. Usgs11a, S.94, Elco09, S.84].

Automobilhersteller denken natürlich bereits an Recyclingkonzepte für ihre Batterien. Der amerikanische Elektroautohersteller Tesla Motors wird dabei mit den beiden zuvor genannten Unternehmen Umicore und Toxco kooperieren [vgl. Fren11]. Das Recyclingkonzept ist in Abbildung 27 veranschaulicht.

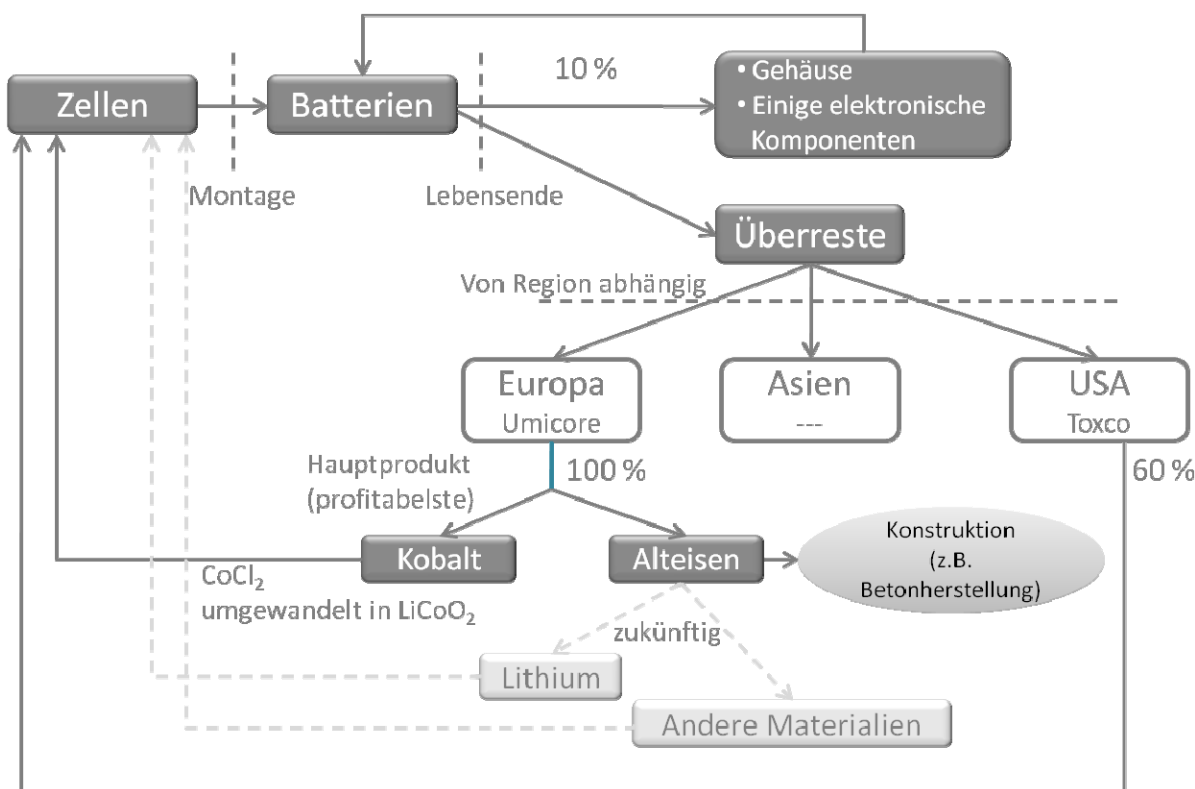


Abb. 27: Recycling-Strategie Tesla Motors [eigene Darstellung in Anlehnung an Bärw10]

Tesla Motors hat sich für seine Recycling-Strategie verschiedene regionale Partner ausgewählt. In den USA wird die Firma Toxco für das Batterierecycling verantwortlich sein und Batterieabfall mit einer Rückgewinnungsquote von 60 % recyceln. Der europäische Partner Umicore wird dann bereits eine Rückgewinnungsquote von nahezu 100 % aufweisen. Der Recycling-Partner für die Region Asien muss noch gefunden werden.

Andere Automobilhersteller wie beispielsweise Toyota besitzen bereits Partnerschaften in den USA und Europa, um ihre Batterien, eingeschlossen die des Hybridfahrzeugs Prius, zu recyceln. Im Jahr 2011 begann Toyota jedoch Batterien des Prius, die in den USA verkauft wurden, nach Japan zu verschiffen, da man hier effizientere Re-

cyclingverfahren besitzt. General Motors und Nissan mit ihren Elektrofahrzeugen Chevrolet Volt und Nissan Leaf gehen einen anderen Weg. Sie schieben das Recycling von Fahrzeugbatterien so lange wie möglich auf und sind Kooperationen mit Energieversorgern eingegangen, um nach Wegen zu forschen, alte Fahrzeugbatterien als stationäre Energiespeicher für die erneuerbare Energiegewinnung einzusetzen. Sie gehen davon aus, dass eine Fahrzeugbatterie am Ende ihrer Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren noch 70 % ihrer Speicherkapazität besitzt. Die erste Lebenszeit als mobiler Energiespeicher könnte somit um geschätzte 20 Jahre als stationärer Energiespeicher verlängert werden. Einige deutsche Hersteller wie beispielsweise BMW mit seinem Mini-E sind sich dagegen noch unschlüssig, ob ihre Lithium-Ionen-Batterien recycelt oder anderweitig weiterverwendet werden sollen [vgl. Newt11].

Bei einer Lebensdauer von 10 bis 15 Jahren einer typischen Lithium-Ionen-Batterie wird sich das Recycling nicht vor 2020 spürbar auf Angebot und Nachfrage auswirken [vgl. Dund09, S.23]. In Zukunft wird es dennoch die Hauptbezugsquelle für Lithium werden. Im Jahr 2016 rechnet man mit der ersten signifikanten Anzahl an Lithium-Ionen-Batterien im Verwertungskreislauf. Der Markt hierfür wird bis 2022 auf 2 Milliarden \$ geschätzt, was 500.000 Batterien entsprechen würde [vgl. Fren11].

Abschließend soll anhand der USA beispielhaft aufgezeigt werden, wie sich der Primär- sowie Sekundärbedarf an Lithium bei einer erfolgreichen Implementierung eines großflächigen Recyclingsystems entwickeln könnte.

Nach den Studien des Centers for Transportation Research, Argonne National Laboratory wird der Bedarf in den USA im Jahr 2030 ca. 28.000 Tonnen Lithium geschätzt, was in etwa der heutigen Weltproduktion entspricht. Der Primärbedarf an Lithium wird bis 2035 ansteigen und hier seinen Höhepunkt erreichen. Ab diesem Zeitpunkt befindet sich ausreichend Lithium im Recyclingkreislauf und der Bedarf kann folglich zunehmend durch recyceltes Lithium gedeckt werden. Diese Art der Versorgung wird daraufhin in den folgenden Jahren stetig ansteigen und der Primärbedarf gleichzeitig zurückgehen (vgl. Elco09, S.80).

4 Fazit und Ausblick

Aufgrund des hohen Wirkungsgrades von Elektroantrieben und der geringen Emissionen im Fahrbetrieb könnten sich Elektrofahrzeuge bei Verfügbarkeit ausreichender Mengen umweltfreundlich erzeugter elektrischer Energie zumindest für Teilbereiche des Individualverkehrs zu dem idealen Antriebskonzept der Zukunft entwickeln. Die Frage ist, wie schnell und in welchem Ausmaß eine derartige Entwicklung stattfinden kann.

Entscheidend für eine erfolgreiche Akzeptanz batteriebetriebener Fahrzeuge ist ein effizientes Energiespeicherkonzept, das zuverlässig, langlebig und darüber hinaus kostengünstig ist. Die angebotenen verschiedenen Batteriekonzepte haben einen direkten Einfluss auf die Eigenschaften des Elektroautos. Diese wiederum legen den Verbrauchernutzen fest. Somit stellen die Energiedichte als Maß für die Reichweite, die Lebensdauer sowie der Sicherheitsaspekt Kernparameter dar, die zur Differenzierung im Wettbewerb genutzt werden müssen.

In den vergangenen Jahrzehnten wurde eine Vielzahl an elektrochemischen Energiespeichern für automobiler Anwendungen entwickelt, darunter z. B. die Nickel-Metall-Hydrid- und die Natrium-Nickelchlorid-Batterie. Letztere wurde unter der Bezeichnung ZEBRA-Batterie bekannt. Die bislang angebotenen technologischen Lösungen können es jedoch im direkten Vergleich mit dem Leistungsprofil des verbrennungsmotorischen Antriebs bis heute bei weitem noch nicht aufnehmen.

Der Lithium-Ionen-Akkumulator gilt als Schlüsseltechnologie für die Zukunft von Elektrofahrzeugen und soll in den nächsten Jahren den Durchbruch dieser Fahrzeuge unterstützen. Mit Werten von bis zu 90 % besitzt er den größten Wirkungsgrad unter den heute verfügbaren Batterietechniken. Dies bedeutet, dass die zugeführte Energie dem Elektromotor mit wenig Verlusten zur Verfügung gestellt werden kann. Dies stellt den Benzinmotor mit einem Wirkungsgrad der Umwandlung der chemischen Energie im Brennstoff in mechanische Antriebsenergie von rund 30 % weit in den Schatten. Außerdem kann die Lithium-Technik unter den elektrochemischen Systemen die meiste Energie speichern.

Laut den Experten der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) bergen heutige und künftige Lithium-Ionen-Batterien der Generationen 1 bis 3 das Potenzial, bis 2020 die geforderten 1 Mio. Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen zu bringen. Als aussichtsreiche Kandidaten für 2020 verweist die Technologie-Roadmap „Lithium-Ionen-

Batterien 2030“ des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung insbesondere auf die Lithium-Schwefel-, Lithium-Hochvolt- und Lithium-Polymer-Batterie.

Zur Erreichung der NPE-Ziele sind jedoch sowohl auf Material- und Systemebene einige ernstzunehmende Hürden zu meistern. Keiner der favorisierten Lithium-Speichertechniken gelingt es bisher, allen Anforderungen für eine problemlose Verwendung in Elektrofahrzeugen gerecht zu werden. Der Schwerpunkt liegt darin, akzeptable Lösungen für die noch hemmenden Kompromisse zwischen technischer, ökonomischer und ökologischer Aspekte aussichtsreicher Lithium-Ionen-Technologien zu bieten:

Herausforderung Reichweite

Lithium-Ionen-Batterien liefern die mit Abstand besten Ergebnisse bezüglich der Energie- und Leistungsdichte. Das ermöglicht es ihnen, ausgezeichnete Gewichts-Leistungsverhältnisse zu erzielen. Dies lässt sich zum einen auf das gute elektrochemische Potenzial und andererseits auf das geringe Gewicht von Lithium zurückführen. Dennoch sind heute realisierbare Energiemengen weiterhin zu gering, um längere Distanzen zurücklegen zu können. Die Forschung konzentriert sich derzeit insbesondere auf die Kathodenmaterialien, da diese maßgeblich für die Limitierung der Speicherkapazität verantwortlich sind. Ziel ist es, Materialien so zu wählen und zu kombinieren, dass eine möglichst hohe Ladungsdichte und Zellspannung erreicht wird. Dabei dürfen die Optimierungen nicht zu Lasten der Kosten und der Sicherheit gehen. Mittelfristig werden nicht allzu sprunghafte Verbesserungen der Energiedichte prognostiziert. Ob sich die Lithium-Luft-Batterie langfristig als revolutionär neues Konzept behaupten wird, muss sich durch weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten erst noch zeigen.

Herausforderung Wertschöpfung

Schätzungsweise 30 bis 40 % der Wertschöpfung des gesamten Elektrofahrzeugs entfallen auf die Batterie. Das erhebliche Geschäftspotenzial wird einen harten, internationalen Wettbewerb der Industrie um Wertschöpfungsanteile von der Herstellung über die Integration bis zum Recycling führen. Bedingt durch neue Batterietechnologien integrieren sich neue Lieferanten in der Wertschöpfungskette der Automobilindustrie. Durch Kooperationen mit diesen werden bereits bestehende Lieferanten ver-

suchen, ihre Position zu erhalten und neuen Lieferanten Zugang zu ihrem Vertriebsnetzwerk eröffnen.

Herausforderung Kosten

Die Kosten eines Lithium-Ionen-Batteriesystems für Elektroautos entscheiden darüber, inwieweit sich dieses Energiespeichersystem gegen Komplementärtechnologien wie z. B. Supercaps und der Brennstoffzelle behaupten kann. Sie bestimmen den Grad der Wettbewerbsfähigkeit batteriebetriebener Elektrofahrzeuge. Durch steigende Produktionsmengen und Erfahrungswerte werden die Kosten sinken. Uneinigkeit herrscht darüber, welches Preisniveau Batterien erreichen. Maschinen- und Anlagenbauer sind gefordert, Fertigungstechnologien weiterzuentwickeln, um die Qualität zu erhöhen und Ausschussraten zu senken. Sichere Fertigungsprozesse werden dazu beitragen, die Kosten weiter zu senken. Die Kooperation zwischen Maschinen- und Anlagenbauern, Batterieherstellern und OEMs ist daher unerlässlich.

Herausforderung Sicherheit

Die im Elektrofahrzeug mitgeführten Energie sowie die hochreaktiven Eigenschaften des Lithiums bergen nicht zu unterschätzende Sicherheitsrisiken. Insbesondere die erhöhte Gefahr eines Thermal Runaways der Zellen aufgrund thermischer Belastung muss unter allen Umständen vermieden werden. Das Ziel weiterer Entwicklungen sind einerseits innovative Schutzkonzepte für die Zellgehäuse und den Batteriepack, um die Crashesicherheit zu erhöhen. Des Weiteren müssen verbesserte Batteriemangement-Systeme (BMS) für die notwendige Betriebssicherheit sorgen, indem Spannungen bei Be- und Entladevorgängen überwacht, Temperaturen reguliert und Fehler im Batteriesystem dem Fahrer angezeigt werden. Das größte Potenzial liegt darin, die Eigensicherheit der Einzelzelle an sich zu optimieren. Alternative Batteriechemikalien mit höheren Sicherheitsmerkmalen, wie es z. B. das Kathodenmaterial Lithiumeisenphosphat besitzt, bieten Ansätze für die Forschung in diese Richtung. Ergänzend müssen verbindliche Mindeststandards bezüglich Leistungsfähigkeit und Sicherheit vorgegeben werden.

Herausforderung Materialverfügbarkeit

Für den zukünftigen Materialbedarf der Elektromobilitätsbewegung sind ausreichend nutzbare Ressourcen verfügbar. Besonders beim nicht substituierbaren Lithium besteht jedoch eine große Abhängigkeit von wenigen Ländern. Mittelfristig gilt es, sich

durch langfristige Verträge sowie Partnerschaften den Zugang zu diesen Rohstoffen zu sichern, um eine stabile Versorgung zu gewährleisten. Parallel dazu gilt es bei der Forschung nach leistungsfähigeren Batterietechnologien die Materialzusammensetzung der Batterien weiterhin zu optimieren, um den Bedarf an knappen Rohstoffen zu verringern. Zudem müssen vor allem rohstoffarme Länder frühzeitig nach wirtschaftlichen Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien forschen und ein tragfähiges Recyclingsystem etablieren, um den Primärbedarf an wichtigen Ressourcen und damit die Abhängigkeit von rohstoffreichen Ländern langfristig zu reduzieren. Dies ist aber auch vor dem Hintergrund der Minimierung der Umweltbelastung durch Rohstoffgewinnung und Weiterverarbeitung unabdinglich.

Literaturverzeichnis

- [Acat10] Möller, A.; Rothfuss, F. (2010): Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann: Status Quo – Herausforderungen – Offene Fragen. Acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, acatech bezieht Position – Nr. 6, Springer, München.
- [Accu11] Deutsche ACCUmotive GmbH & Co. KG. (2011): Online im Internet: URL: <http://www.accumotive.de/web/glossar.html> [Stand 02.01.2012].
- [Amah10] Amaha E., Layne N. (2010): Toyota in Argentine lithium deal for hybrid car push, Reuters, Online im Internet: URL: <http://www.reuters.com/article/2010/01/20/us-toyota-lithium-idUSTRE60J0A920100120> [Stand 10.04.2012].
- [Aums11] Auto motor sport (2011): VW E-Up auf der IAA, Elektro-Studie gibt Ausblick auf den neuen Käfer, Stuttgart, Online im Internet: URL: <http://www.auto-motor-und-sport.de/eco/vw-e-up-auf-der-iaa-elektro-studie-gibt-ausblick-auf-neuen-kaefer-1411168.html> [Stand 10.04.2012].
- [Argo10] Argonne National Laboratory (2010): A Review of Battery Life-Cycle Analysis: State of Knowledge and Critical Needs, Online im Internet: URL: <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/B/644.PDF> [Stand 02.01.2012].
- [Basy10] Groß, R.; Jossen, A. (2010): Sicherheitsaspekte beim Testen von Lithium-Ionen Batterien. BaSyTec GmbH, Öllingen, Online im Internet: URL: http://www.basytec.de/Literatur/2010_Sicherheit_Testen.pdf [Stand 10.04.2012]
- [Bärw10] Bärwaldt, G.(2010): LithoRec – Recycling von Lithium-Ionen-Batterien, Online im Internet: URL: http://www.lithorec.de/fileadmin/lithorec/Ver%C3%B6ffentlichungen/100208_GB_Graz_LithoRec.pdf [Stand 02.01.2012].
- [Bcgr10] Bosten Consulting Group (2010): Batteries for Electric Cars Challenges, Opportunities and the Outlook to 2020., Düsseldorf.
- [Beau08] Garrett P. Beauregard (2008): Report of investigation: Hybrid Plus Plug In Hybrid Electric Vehicle, National Rural Electric Cooperative Association, Inc. and U.S. Department of Energy, Idaho National Laboratory by etec, Online im Internet: URL: http://www.evworld.com/library/prius_fire_forensics.pdf [Stand 11.04.2012].

- [Beck11] Beckendorf, J. (2011): LithoRec: Deutsche Pilotanlage recyclet Rohstoff Lithium aus Batteriematerialien, erschienen in RadMarkt Bike Shop News, Bielefeld, Online im Internet: URL: <http://www.radmarkt.de/rm/content/home/news.php?id=5885> [Stand 10.04.2012]
- [Beer11] Beermann, M.(2011): Quo vadis Elektroauto? Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich, Online im Internet: URL: http://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/events/iewt/iewt-2011/uploads/presentation_iewt2011/Pr_303_Beermann_Martin.pdf [Stand 17.12.2011].
- [Berg09] Roland Berger Strategy Consultants (2009).: Powertrain 2020, China's ambition to become market leader in E-Vehicles. Studie, Munich/Shanghai.
- [Berg11] Schlick, T.; Hertel, G.; Hagemann, B.; Maiser, E.; Kramer, M.(2011): Zukunftsfeld Elektromobilität: Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Studie, VDMA, Roland Berger Strategy Consultants, Frankfurt/München, Online im Internet: URL: http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Zukunftsfeld_Elektromobilitaet_rev_20110509.pdf [Stand 10.4.2012].
- [Bund11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012): Batterierecycling, Berlin, Online im Internet: URL: <http://www.pt-elektromobilitaet.de/projekte/batterierecycling> [Stand 10.04.2012].
- [Dogg09] Doggett, S.(2009): Edmunds Auto Observer: Bolivia, the Saudi Arabia of Lithium, Says Raw Material for EV Batts Won't be Cheap, Santa Monica, Online im Internet: URL: <http://www.autoobserver.com//2009/01/bolivia-the-saudi-arabia-of-lithium-says-raw-material-for-ev-batts-wont-be-cheap.html> [Stand 10.04.2012].
- [Dund09] Dundee Securities Operation (2009): Lithium – Hype or Substance? A look at Lithium Demand and Supply, Toronto/Montréal, Online im Internet: URL: <http://research.dundeesecurities.com/Research/Lithium102809.pdf> [Stand 10.04.2012].
- [Econ09] Smole, E. et al.(2009): Abschlussbericht e-connected. E-connected – Initiative für Elektromobilität und nachhaltige Energieversorgung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Wien.
- [Elco09] Conner, T. et al. (2009): Electrification Roadmap: Revolutionizing Transportation And Achieving Energy Security. Electrification Coalition, Washington DC.

- [Ener09] Tübke J., (2009): Sicherheitskonzepte für Lithium-Ion-Batterien, erschienen in Energy 2.0-Kompendium, 2009, S. 203, Energy20.net, München, Online im Internet: URL: <http://www.energy20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=152657> [Stand 10.04.2012].
- [Fazn07] Bilow, Uta (2007): Lithium-Ionen-Batterie – Ein Kraftpaket mit Zukunft, Internetauftritt Frankfurter Allgemeine Zeitung, 05.12.2007, Online im Internet: URL: <http://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-chemie/lithium-ionen-batterie-ein-kraftpaket-mit-zukunft-1492884.html> [Stand 05.12.2011].
- [Fazn10] Ruhkamp C., Höfinghoff T. (2010): Kobalt aus Afrika für deutsche Elektroautos, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Online im Internet: URL: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/rohstoffe-kobalt-aus-afrika-fuer-deutsche-elektroautos-1572460.html> [Stand 19.12.2011].
- [Fazn10a] Frankfurter Allgemeine (2010): Lithium bietet wenig PreisphantasiInternetauftritt, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Frankfurt, Online im Internet: URL: <http://www.faz.net/aktuell/finanzen/devisen-rohstoffe/rohstoffe-lithium-bietet-wenig-preisphantasie-1998597.html> [Stand 10.04.2012].
- [Fior09] Fiorentino, Calerio Conte (2009): Sicherheitsrelevantes Design von Lithium-Ionen-Batterien. Springer, ATZelektronik, Ausgabe 01/2009, Wiesbaden, Online im Internet: URL: <http://www.atzonline.de/Artikel/3/9259/Sicherheitsrelevantes-Design-von-Lithium-Ionen-Batterien.html>. [Stand 10.04.2012].
- [Fitd11] Financial Times Deutschland (2011): BMW und Toyota forschen gemeinsam an Akkutechnik, Hamburg, Online im Internet: URL: <http://www.ftd.de/unternehmen/industrie/zukunftsinvestition-bmw-und-toyota-forschen-gemeinsam-an-akku-technik/60135567.html> [Stand 10.04.2012].
- [Fort10] Hoberg, P.; Leimeister, S.; Jehle, H.; Krcmar, H.: Elektromobilität (2010): Grundlagenstudie zu Voraussetzungen der Entwicklung von Elektromobilität in der Modellregion München, fortiss GmbH – An-Institut der Technischen Universität München, München.
- [Ftdo11] Financial Times Deutschland (2011): Opel blamiert sich mit E-Auto Ampera, Hamburg, Online im Internet: URL: <http://www.ftd.de/unternehmen/industrie/gefaehrliche-batterien-opel-blamiert-sich-mit-e-auto-ampera/60142522.html> [Stand 10.04.2012].
- [Frau09] Hannig, F.; Smolinka, T.; Bretschneider, P.; Nicolai, S.; Krüger, S.; Meißner, F.; Voigt, M. (2009): „Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie“. BMWi-Auftragsstudie 08/28, Fraunhofer, VKPartner, Berlin.

- [Frau10] Thielmann, A.; Isenmann, R.; Wietschel, M.(2010): Technologie-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- [Frei09] Freialdenhoven, A.: Dissertation. Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Automobilindustrie durch Vernetzung von Wissenschaft und Industrie. Schriftenreihe Automobiltechnik, Aachen, 2009
- [Fren11] The Science Office at the French Consulate in San Francisco (2011): The Lithium used in electric cars is not a renewable resource (Part 2 /2) Online im Internet: URL: <http://frenchsciencesf.wordpress.com/2011/03/25/the-lithium-used-in-electric-cars-is-not-a-renewable-resource-part-2-2/#comments> [Stand 10.04.2012].
- [Gain10] Gaines, L.; Nelson, P. (Jahr nicht benannt, 2009 bis 2011): Lithium-Ion Batteries: Examining Material Demand and Recycling Issues, Argonne National Laboratory, Argonne. Online im Internet: URL: <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/B/626.PDF> [Stand 18.12.2011]
- [Hann09] Hannig, F., et.al.(2009): „Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie – Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie“. Fraunhofer ISE, Fraunhofer AST, VKPartner, München, Karlsruhe, Berlin.
- [Joan10] Beermann, M.; Jungmeier, G.; Wenzel, J.; Spitzer, J.; Canella, L.; Engel, A.; Schmuck, M.; Koller, S.(2010): Quo Vadis Elektroauto? Grundlagen einer Road Map für die Einführung von Elektro-Fahrzeugen in Österreich. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Institut für Energieforschung, Graz.
- [Joco12] Johnson Controls (2012): Batterie-Technologiezentren für Forschung und Entwicklung, Burscheid, Online im Internet: URL: http://www.johnsoncontrols.de/publish/de/de/products/power_solutions/Battery_Technology_Centers/Research_and_development/Product_Technology.html [Stand 10.04.2012].
- [Kalh07] Kalhammer, F.; Kopf B.; Swan, D.; Roan, V.; Walsh, M.(2007): Chairman Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology. Report for the ARB Independent Expert Panel, State of California Air Resources Board, Sacramento, Online im Internet: URL: http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevreview/zev_panel_report.pdf [Stand 10.04.2012].
- [Kamp11] Kampker, A. (2011): StreetScooter- an affordable BEV, Vortrag Technologie-Transfer-Ring Handwerk NRW am 30.03.2011, Aachen, Online im Internet: URL: http://www.tth-nrw.de/cms/upload/pdf/Franssen/WS1_01_110330_Innovationstag_Handwerk_v01_rlt.pdf [Stand 10.04.2012].

- [Kant11] Kanter J. (2011): Waste problem for green cars: What to do with the batteries, erschienen in International Herald Tribune, The Global Edition Of The New York Times Hoboken, Online im Internet: URL: http://www.batteryrecycling.unicore.com/UBR/media/pressCoverage/2011/20110831_HT_UBR.pdf [Stand 02.01.2012].
- [Kift12] Karlsruher Institut für Technologie (2012): Anorganische Festkörperelektrolyte für Li-Ionen Batterien, Karlsruhe, Online im Internet: URL: http://www.iwe.kit.edu/forschung_2788.php [Stand 10.04.2012].
- [Lipo08] Welter, P (2008): Weiter, schneller, sauberer! Mehrere hundert Kilometer Reichweite sind auch bei Elektroautos möglich, Photon, Aachen, .Online im Internet: URL: <http://www.lithium-power.de/> [Stand 10.04.2012].
- [Lite12] Li-Tec battery GmbH (2012): Unternehmen, Kamenz, Online im Internet: URL: <http://www.li-tec.de/unternehmen.html> [Stand 10.04.2012].
- [Mobi11] Kurfer J.,Westermeier M. Tobias, Zeilinger T (2011): Auf dem Weg zur Massenproduktion vonLithium-Ionen-Zellen: Anforderungen an die Produktion von Lithium-Ionen-Zellen, IWB TU München, erschienen in Mobility 2.0, Oktober 2011, S. 51, Online im Internet: URL: <http://www.mobility20.net/pi/index.php?StoryID=1392&articleID=197135> [Stand 10.04.2012].
- [Newt11] The New York Times (2011): In green cars, battery disposal proves a headache, August 31, 2011, S. 17. Online im Internet: URL: http://www.batteryrecycling.unicore.com/UBR/media/pressCoverage/2011/20110831_NYT_UBR.pdf [Stand 10.04.2012].
- [Npeb10] Lamm, A., Schulz, M. (2010): Bericht der AG-2 Batterietechnologie für den Zwischenbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Berlin.
- [Npez11] Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), CPC Caspari Prokop Consulting (2011): Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität. Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), Berlin.
- [Opel12] Adam Opel AG (2012): Von Innovation zu Revolution, Rüsselsheim, Online im Internet: URL: <http://www.opel.de/fahrzeuge/modelle/personenwagen/ampera/highlights/technology.html> [Stand 10.04.2012].
- [Pfaf09] Pfaffenbichler, P. C.; Emmerling, B.; Jellinek, R.; Krutak, R.(2009): Pre-Feasibility-Studie zu „Markteinführung Elektromobilität in Österreich“. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Abteilung Mobilität und Verkehrstechnologien, Austrian Energy Agency, Wien.

- [Recy11] Recycling Magazin (2011): Umicore mit zwei Preisen ausgezeichnet, Recycling Magazin, München, .Online im Internet: URL: http://www.recyclingmagazin.de/rm/news_detail.asp?ID=15310&SID=717921192168100100&NS=1 [Stand 10.04.2012].
- [Revu11] Automobil Revue (2011): Batterie-Recycling, Online im Internet: URL: http://www.batteryrecycling.umicore.com/UBR/media/pressCoverage/2011/20110316_AutomobilRevue_BR.pdf [Stand 10.04.2012].
- [Saft12] Saft S.A. (2012): Lithium-Ion (Li-ion), Online im Internet: URL: http://www.saftbatteries.com/Technologies_Lithium_Liion_301/Language/fr-FR/Default.aspx [Stand 10.04.2012].
- [Sbli12] SB Li-Motive (2012): Produkte, Yongin, Online im Internet: URL: <http://www.sblimotive.com/de/products.html> [Stand 10.04.2012].
- [Schu08] Schulz, C.(2008): Optimierung der Leistungsaufnahme eines solarbetriebenen Ad-Hoc-Netzwerk-Knotens, Hamburg, Diplomica Verlag GmbH.
- [Sous11] Sousanos, J. (2011): World Vehicle Population Tops 1 Billion Units, Wardsauto, Oakland, Online im Internet: http://wardsauto.com/ar/world_vehicle_population_110815/ [Stand 25.12.2011].
- [Spie12] Spiegel-online (2012): Zukunftsmodell Ampera: Opel-Mutterkonzern kriegt Flammengefahr in den Griff, Hamburg, Online im Internet: URL: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,807467,00.html> [Stand 08.04.2012].
- [Ster09] Sternad, M.; Cifrain, M.; Watzenig, D.; Brasseur, G.; Winter, M.(2009): Condition monitoring of Lithium-Ion Batteries for electric and hybrid electric vehicles. In: Elektrotechnik & Informationstechnik, Vol. 126 Nr. 5, S. 186-193, Springerlink, Heidelberg.
- [Tahi06] Tahil, W.(2006): The Trouble with Lithium: Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand, Meridian International Research, Martainville, Online im Internet: URL: http://tyler.blogware.com/lithium_shortage.pdf [Stand 10.04.2012].
- [Tahi10] Tahil, W.(2010): How much Lithium does a Lilon EV battery really need?, Meridian International Research, Martainville, Online im Internet: URL: http://www.meridian-int-res.com/Projects/How_Much_Lithium_Per_Battery.pdf [Stand 10.04.2012]
- [Tbcg10] Dinger A.; Ripley M.; Mosquet X.; Rabl M.; Rizoulis D.; Russo, M.; Sticher, G.(2010): Batteries for Electric Cars: Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. The Boston Consulting Group, 2010

- [Frie09] Friedman-Rudovski, J. (2009): For Lithium Car Batteries, Bolivia Is in the Driver's Seat, Time World. La Paz, Online im Internet: URL: <http://www.time.com/time/world/article/0,8599,1872561,00.html?xid=rs-s-topstories> [Stand 10.04.2012].
- [Toxc11] Toxco (2012): Safe Recycling Processes, Anheim, Online im Internet: URL: <http://www.toxco.com/processes.html> [Stand 10.04.2012].
- [Tueb10] Tübke, J.(2010): Grenzen der Elektromobilität: Energieeffizienz, Reichweite und Lebensdauer, 27. Deutscher Logistik-Kongress, Fraunhofer Institut für Chemische Technologie Pfinztal, Berlin.
- [Usgs11] U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2011): Lithium, Reston, Online im Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2011-lithi.pdf> [Stand 10.04.2012].
- [Usgs11a] U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries (2011): Cobalt, Reston, Online im Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/mcs-2011-cobal.pdf> [Stand 19.12.2011].
- [Usgs11b] U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries: Nickel, Reston, Online im Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/nickel/mcs-2011-nicke.pdf> [Stand 19.12.2011].
- [Usgs11c] U.S. Geological Survey (2011): 2010 Minerals Yearbook: Lithium, Reston, Online im Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/myb1-2010-lithi.pdf> [Stand 24.12.2011].
- [Vdin11] VDI Nachrichten (2011): Noch fehlt Produktionstechnik für großformatige Lithium-Ionen-Akkumulatoren, Düsseldorf, Online im Internet: <http://www.vdi-nachrichten.com/artikel/Noch-fehlt-Produktionstechnik-fuer-grossformatige-Lithium-Ionen-Akkumulatoren/54104/2> [Stand 10.04.2012]
- [Wall11] Wallentowitz, H, Freialdenhoven A. .(2011): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges -Technologien, Märkte und Implikationen. 2., überarbeitete Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- [Wibw10] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (2010): Strukturstudie BWe mobil Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH (WRS), Stuttgart, , Online im Internet: <http://www.iao.fraunhofer.de/images/studien/strukturstudie-bwe-mobil.pdf> [Stand 10.04.2012].

- [Wint09] Winter M. (2009): Schlüsseltechnik Lithium-Ionen-Akkumulator, Interview mit Faktor-X. Aachener Stiftung Kathy Beys, Aachen, Online im Internet: URL: <http://www.faktor-x.info/ressourcen/lib-2015juni-2009.html> [Stand 10.04.2011].
- [Wohl11] Wohlfahrt-Mehrens, M.(2011): Energiespeicher für die Elektromobilität: Stand der Technik und Perspektiven, Vortrag anlässlich der DPG Frühjahrstagung, Arbeitskreis Energie in Dresden am 14.03.2011, , Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Stuttgart.
- [Wolk09] Wolkin, M. V.(2009):, The truth about lithium: abundant and recyclable, Better Place, Palo Alto, Online im Internet: URL: <http://blog.betterplace.com/2009/12/the-truth-about-lithium-abundant-and-recyclable/> [Stand 10.04.2012].
- [Wyma07] Wyman, O.(2007): Oliver Wymann-Studie „Auto und Umwelt“, Klimadebatte verändert Kaufverhalten, na presseportal, München, Online im Internet: URL: <http://www.presseportal.de/pm/66435/1044443/oliver-wyman-studie-auto-umwelt-2007-klimadebatte-veraendert-kaufverhalten> [Stand 10.04.2012.7
- [Zeit11] Breitinger, J. (2011): GM kämpft gegen Imageschaden an, Zeit Online GmbH, Hamburg, Online im Internet: URL: <http://www.zeit.de/suche/index?q=GM+k%C3%A4mpft+gegen+Image+schaden+an> [Stand 10.04.2012].

**Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management –
Reutlingen Working Papers on Marketing & Management**

herausgegeben von

Prof. Dr. Carsten Rennhak

Hochschule Reutlingen – Reutlingen University

ESB Business School

Alteburgstraße 150

D-72762 Reutlingen

Fon: +49 (0)7121 / 271-6010

Fax: +49 (0)7121 / 271-6022

E-Mail: carsten.rennhak@reutlingen-university.de

Internet: www.esb-business-school.de

und

Prof. Dr. Gerd Nufer

Hochschule Reutlingen – Reutlingen University

ESB Business School / Reutlingen Research Institute (RRI)

Alteburgstraße 150

D-72762 Reutlingen

Fon: +49 (0)7121 / 271-6011

Fax: +49 (0)7121 / 271-906011

E-Mail: gerd.nufer@reutlingen-university.de

Internet: www.esb-business-school.de

Internet: www.marketing-kfru.de

Bisher erschienen

- 2006 - 1** *Felix Morlock / Robert Schäffler / Philipp Schaffer / Carsten Rennhak:*
Product Placement – Systematisierung, Potenziale und Ausblick
- 2006 - 2** *Marko Sarstedt / Kornelia Huber:*
Erfolgsfaktoren für Fachbücher – Eine explorative Untersuchung verkaufsbeeinflussender Faktoren am Beispiel von Marketing-Fachbüchern
- 2006 - 3** *Michael Menhart / Carsten Rennhak:*
Drivers of the Lifecycle –
the Example of the German Insurance Industry
- 2006 - 4** *Siegfried Numberger / Carsten Rennhak:*
Drivers of the Future Retailing Environment
- 2006 - 5** *Gerd Nufer:*
Sportsponsoring bei Fußball-Weltmeisterschaften:
Wirkungsvergleich WM 2006 versus WM 1998
- 2006 - 6** *André Bühler / Gerd Nufer:*
The Nature of Sports Marketing
- 2006 - 7** *Gerd Nufer / André Bühler:*
Lessons from Sports:
What Corporate Management can learn from Sports Management

- 2007 - 1** *Gerd Nufer / Anna Andresen:*
Empirische Untersuchung zum Image der
School of International Business (SIB) der Hochschule Reutlingen
- 2007 - 2** *Tobias Kesting:*
Marktsegmentierung in der Unternehmenspraxis:
Stellenwert, Vorgehen und Herausforderungen
- 2007 - 3** *Marie-Sophie Hieke / Marko Sarstedt:*
Open Source-Marketing im Unternehmenseinsatz
- 2007 - 4** *Ahmed Abdelmoumene:*
Direct-to-Consumer-Marketing in der Pharmaindustrie
- 2007 - 5** *Mario Gottfried Bernards:*
Markenmanagement von politischen Parteien in Deutschland –
Entwicklungen, Konsequenzen und Ansätze der erweiterten
Markenführung
- 2007 - 6** *Christian Führer / Anke Köhler / Jessica Naumann:*
Das Image der Versicherungsbranche unter angehenden
Akademikern – eine empirische Analyse

- 2008 - 1** *Gerd Nufer / Katharina Wurmer:*
Innovatives Retail Marketing
- 2008 - 2** *Gerd Nufer / Victor Scheurecker:*
Brand Parks als Form des dauerhaften Event-Marketing
- 2008 - 3** *Gerd Nufer / Charlotte Heine:*
Internationale Markenpiraterie
- 2008 - 4** *Gerd Nufer / Jennifer Merk:*
Ergebnisse empirischer Untersuchungen zum Ambush Marketing
- 2008 - 5** *Gerd Nufer / Manuel Bender:*
Guerilla Marketing
- 2008 - 6** *Gerd Nufer / Christian Simmerl:*
Strukturierung der Erscheinungsformen des Ambush Marketing
- 2008 - 7** *Gerd Nufer / Linda Hirschburger:*
Humor in der Werbung

- 2009 - 1** *Gerd Nufer / Christina Geiger:*
In-Game Advertising
- 2009 - 2** *Gerd Nufer / Dorothea Sieber:*
Factory Outlet Stores – ein Trend in Deutschland?
- 2009 - 3** *Bianca Frank / Carsten Rennhak:*
Product Placement am Beispiel des Kinofilms
Sex and the City: The Movie
- 2009 - 4** *Stephanie Kienzle / Carsten Rennhak:*
Cause-Related Marketing
- 2009 - 5** *Sabrina Nadler / Carsten Rennhak:*
Emotional Branding in der Automobilindustrie –
ein Schlüssel zu langfristigem Markenerfolg?
- 2009 - 6** *Gerd Nufer / André Bühler:*
The Importance of mutual beneficial Relationships
in the Sponsorship Dyad

- 2010 - 1** *Gerd Nufer / Sandra Oexle:*
Marketing für Best Ager
- 2010 - 2** *Gerd Nufer / Oliver Förster:*
Lovemarks – emotionale Aufladung von Marken
- 2010 - 3** *Gerd Nufer / Pascal Schattner:*
Virales Marketing
- 2010 - 4** *Carina Knörzer / Carsten Rennhak:*
Gender Marketing
- 2010 - 5** *Ottmar Schneck:*
Herausforderungen für Hochschulen und Unternehmen durch
die Generation Y – Zumutungen und Chancen durch die neue
Generation Studierender und Arbeitnehmer
- 2010 - 6** *Gerd Nufer / Miriam Wallmeier:*
Neuromarketing
- 2010 - 7** *Gerd Nufer / Anton Kocher:*
Ingredient Branding
- 2010 - 8** *Gerd Nufer / Jan Fischer:*
Markenmanagement bei Einzelsportlern
- 2010 - 9** *Gerd Nufer / Simon Miremadi:*
Flashmob Marketing

- 2011 - 1** *Hans-Martin Beyer / Simon Brüseken:*
Akquisitionsstrategie "Buy-and-Build" –
Konzeptionelle Aspekte zu Strategie und Screeningprozess
- 2011 - 2** *Gerd Nufer / Ann-Christin Reimers:*
Looking at Sports –
Values and Strategies for International Management
- 2011 - 3** *Ebru Sahin / Carsten Rennhak:*
Erfolgsfaktoren im Teamsportsponsoring
- 2011 - 4** *Gerd Nufer / Kornelius Prell:*
Operationalisierung und Messung von Kundenzufriedenheit
- 2011 - 5** *Gerd Nufer / Daniel Kelm:*
Cross Selling Management
- 2011 - 6** *Gerd Nufer / Christina Geiger:*
Ambush Marketing im Rahmen der
FIFA Fußball-Weltmeisterschaft 2010
- 2011 - 7** *Gerd Nufer / Felix Müller:*
Ethno-Marketing
- 2011 - 8** *Shireen Stengel / Carsten Rennhak:*
Corporate Identity – Aktuelle Trends und Managementansätze
- 2011 - 9** *Clarissa Müller / Holger Benad / Carsten Rennhak:*
E-Mobility – Treiber, Implikationen für die beteiligten Branchen und
mögliche Geschäftsmodelle
- 2011 - 10** *Carsten Schulze / Carsten Rennhak:*
Kommunikationspolitische Besonderheiten regulierter Märkte
- 2011 - 11** *Sarina Rehme / Carsten Rennhak:*
Marketing and Sales – successful peace-keeping
- 2011 - 12** *Gerd Nufer / Rainer Hirt:*
Audio Branding meets Ambush Marketing

2011 - 13 *Peter Kleine-Möllhoff / Martin Haußmann / Michael Holzhausen / Tobias Lehr / Mandy Steinbrück:*

Energie- und Ressourceneffizienz an der Hochschule Reutlingen – Mensa, Sporthalle, Aula, Containergebäude 20, Kindertagesstätte

2011 - 14 *Peter Kleine-Möllhoff / Manuel Kölz / Jens Krech / Ulf Lindner / Boris Stassen:*

Energie- und Ressourceneffizienz an der Hochschule Reutlingen – Betriebshalle, Vorlesungsgebäude Textil & Design, Hochschulservicezentrum

2011 - 15 *Peter Kleine-Möllhoff / Svenja Gerstenberger / Junghan Gunawan / Michael Schneider / Bernhard Weisser:*

Energie- und Ressourceneffizienz an der Hochschule Reutlingen – Verwaltung, Bibliothek, Rechenzentrum, Betriebswirtschaft, Chemie, Wirtschaftsingenieurwesen

2012 - 1 *Gerd Nufer / Aline Kern:*

Sensation Marketing

2012 - 2 *Gerd Nufer / Matthias Graf:*

Kundenbewertung

2012 - 3 *Peter Kleine-Möllhoff / Holger Benad / Frank Beillard /*

Mohammed Esmail / Martina Knöll:

Die Batterie als Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität der
Zukunft

Herausforderungen – Potenziale - Ausblick

ISSN 1863-0316