

**Lithium-Ionen Batterien:
Stand der Technik und
Anwendungspotenzial in
Hybrid-, Plug-In Hybrid- und
Elektrofahrzeugen**

**Lithium-Ion Batteries:
State of the Art and
Application Potential in
Hybrid-, Plug-In Hybrid- and
Electric Vehicles**

B. Ketterer, U. Karl, D. Möst, S. Ulrich
Institut für Materialforschung I

Oktober 2009

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7503

Lithium-Ionen Batterien:

**Stand der Technik und Anwendungspotenzial in
Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen**

Lithium-Ion Batteries:

**State of the Art and Application Potential in
Hybrid-, Plug-In Hybrid- and Electric Vehicles**

B. Ketterer, U. Karl, D. Möst, S. Ulrich

Institut für Materialforschung I

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2009

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-075035

Abstract

Reducing the impact of road transportation on the environment is a mandatory task for the automotive industry all over the world. As a “zero-emission” vehicle, the electric car is an option for future transportation. Furthermore, the hybrid concept can make cars more environmental friendly by reducing emissions as well as improving gas mileage. As a sort of intermediate between electric and hybrid vehicle, the plug-in hybrid is a compromise between using as much electrical energy as possible from the grid, reducing pollution in urban areas, and still offering long-range utilization with fuel. There are many types of vehicles using electric power, from very large (e.g. hybrid busses) to small (e.g. golf carts), all needing batteries at different level. The choice has been made to focus on full electric, hybrid and plug-in hybrid cars, because they are facing challenges today and have a big stake in the future.

Energy storage is the key technology that governs the development of electric vehicles. Until fuel cells can be adopted in this application, lithium-ion batteries, currently at development and demonstration stages, are the most promising electrochemical energy storage technology today. The main general feature of lithium-ion batteries is firstly a remarkable high specific energy and energy density, surpassing all existing systems. The second feature is that lithium-ion electrochemistry can also be used to build very high power batteries. The significant progress of lithium-ion in large batteries for automotive applications is mainly due to the numerous innovations in materials, design, lifetime and safety aspects of the batteries.

The first part is providing a general background for the advanced lithium-ion electrochemistry and gives an overview of the state of the art for lithium-ion technology. In this context the dependence of the battery performance on the choice of materials for the electrodes, separator and electrolyte as well as the mechanisms of battery ageing and safety are reviewed.

The purpose of the second part is to review the main requirements of batteries as energy storage for motive power. From these requirements, the applicability of lithium-ion technology is discussed. While the high power lithium-ion battery for hybrid cars appears close to commercialization, the demanding cycle life for plug-in hybrids and the limited energy storage capacity for larger electric vehicles remain crucial parameters.

Finally, the economic and ecological impacts of a wide-spread use of lithium-ion batteries in electric cars are assessed. Especially the recycling of the batteries cannot be regarded as entirely satisfactory against the background of an increasing demand of raw materials for battery production. As the high costs of lithium-ion technology are one major impediment to the introduction of electric vehicles, the possibilities and limitations of cost reductions are estimated based on the experience curve concept. However, a complementary bottom-up approach suggests that battery cost remains high even in mass production. A subsequent illustration of the interactions of market actors points up the dependence of European and American automakers on Asian battery manufacturers in a mid-term perspective. Qualitative estimations of the future economic prospects complete this work.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung und Motivation	1
2 Zur Technologie der Lithium-Ionen Batterie	3
2.1 Einführung in die Grundlagen der Lithium-Ionen Technologie	3
2.1.1 Grundbegriffe und Funktionsweise	3
2.1.2 Batteriekenngößen und Leistungsparameter	4
2.1.3 Klassifizierung wiederaufladbarer Lithium-Batterien	6
2.2 Stand der Technik	7
2.2.1 Anodenmaterialien	7
2.2.2 Kathodenmaterialien	8
2.2.3 Separatoren	11
2.2.4 Elektrolyte	12
2.2.5 Zusammenfassende Bewertung von Zellen unterschiedlicher Zellchemie	13
2.3 Alterungs- und Sicherheitsaspekte auf Zellebene	14
2.3.1 Degradationsmechanismen	14
2.3.2 Zellsicherheit	16
2.4 Von einzelnen Zellen zu Modulen und Batteriesystemen	18
2.4.1 Produktion von Lithium-Ionen Zellen	18
2.4.2 Elektrodenherstellung	20
2.4.3 Aufbau von Modulen und Batteriesystemen	22
2.5 Weiterentwicklung der Lithium-Ionen Batterie	25
2.5.1 Neue Materialkonzepte	25
2.5.2 Neue Materialien	26
3 Lithium-Ionen Batterietechnologie für Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeuge	30
3.1 Batterieelektrische Fahrzeuge und Antriebskonzepte	30
3.1.1 Hybridfahrzeuge (<i>Hybrid Electric Vehicle HEV</i>)	30
3.1.2 Elektrofahrzeuge (<i>Electric Vehicle EV</i>)	33
3.1.3 Plug-In Hybridfahrzeuge (<i>Plug-In Hybrid Electric Vehicle PHEV</i>)	34
3.2 Allgemeine technische Anforderungen an Fahrzeugbatterien	35
3.3 Alternative Batterietechnologien	39
3.4 Spezifische Anforderungen und aktueller Status von Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien	41
3.4.1 Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge	41

3.4.2	Hochenergiebatterien für Elektrofahrzeuge	44
3.4.3	Batterien für Plug-In Hybridfahrzeuge	48
3.5	Entwicklungsperspektiven der Lithium-Ionen Technologie in batterieelektrischen Fahrzeugen	52
3.5.1	Roadmap zur Entwicklung der nächsten Generation Fahrzeugbatterien.....	52
3.5.2	Internationale Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen	54
4	Ökologische und ökonomische Betrachtungen	57
4.1	Nutzen und Belastungen für Umwelt und Gesellschaft	57
4.1.1	Beitrag zur Emissionsreduzierung und Kraftstoffeinsparung	58
4.1.2	Verfügbarkeit von Rohstoffen.....	61
4.1.3	Entsorgung und Recycling des Batteriesystems	62
4.2	Kosten des Batteriesystems: eine Erfahrungskurven- und Bottom-up-Analyse	65
4.2.1	Grundlagen des Erfahrungskurven-Konzeptes	65
4.2.2	Ex-post-Analyse	68
4.2.3	Abschätzung der zukünftigen Kostenentwicklung auf Basis des Erfahrungskurven-Konzeptes.....	70
4.2.4	Identifizierung von Kostensenkungspotentialen: Bottom-up-Analyse	73
4.3	Wirtschaftliche Potentiale und Märkte	78
4.3.1	Akteure und Aktivitäten	78
4.3.2	Politische Rahmenbedingungen und Regulierungen	84
4.3.3	Marktchancen und Marktentwicklung.....	85
5	Zusammenfassende Diskussion und Ausblick.....	88
	Anhang:.....	93
	Literaturverzeichnis	94

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Schematische Darstellung einer Lithium-Ionen Zelle mit Graphit-Anode und Übergangsmetalloxid-Kathode während des Entladevorganges.....	4
Abbildung 2-2 Typische Lade- bzw. Entladekurve einer Lithium-Ionen Batterie (a) und Elektrodenpotential verschiedener Elektrodenmaterialien (b)	5
Abbildung 2-3 Klassifizierung wiederaufladbarer Lithiumsysteme	7
Abbildung 2-4 Wesentliche Eigenschaften potentieller Kathodenmaterialien und ihre Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Lithium-Ionen Batterie.....	8
Abbildung 2-5 Wirtsstrukturen mit (a) eindimensionaler Röhren-, (b) zweidimensionaler Schicht- und (c) dreidimensionaler Rahmenstruktur zur Interkalation von Lithium-Ionen	9
Abbildung 2-6 Kapazitäten und Elektrodenpotentiale (a) sowie Entladekurven (b) einiger wichtiger Kathodenmaterialien.....	9
Abbildung 2-7 Lithium-Übergangsmetall-Schichtoxide im System $\text{LiCoO}_2\text{-LiNiO}_2\text{-LiMnO}_2$	10
Abbildung 2-8 Fester trockener Polymerelektrolyt (a), Hybrid-(Gel)-Elektrolyt (b) und mikroporöse Polyolefin-Membran	12
Abbildung 2-9 Vergleich und Bewertung von Lithium-Ionen Batterien unterschiedlicher Zellchemie	13
Abbildung 2-10 Mögliche Degradationsmechanismen auf der Kathodenseite der Lithium-Ionen Zelle	14
Abbildung 2-11 Ursachen für die Alterung der Graphit-Anode einer Lithium-Ionen Batterie ..	15
Abbildung 2-12 Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK oder engl. DSC) verschiedener Kathodenmaterialien im geladenen Zustand	16
Abbildung 2-13 Von der Zelle über das Modul zum Batteriesystem.....	18
Abbildung 2-14 Schematische Darstellung von Zellen in zylindrischer und prismatischer Bauform	18
Abbildung 2-15 Einzelne Produktionsschritte bei der Herstellung zylindrischer Zellen	19
Abbildung 2-16 Aufbau einer Lithium-Ionen-Polymerzelle (a) und durch Gasentwicklung aufgeblähter Softpack (b)	20
Abbildung 2-17 Schematischer Aufbau einer Kathode	20
Abbildung 2-18 Beschichtungsprozess zur Anoden- und Kathodenherstellung.....	21
Abbildung 2-19 Verluste an spezifischer Leistung und Energie beim Aufbau von Modulen und Batteriesystemen	22
Abbildung 2-20 Gefahr des Überladens bzw. Überentladens einzelner Zellen eines Moduls	22
Abbildung 2-21 Grundfunktionen eines Batteriemanagementsystems.....	23

Abbildung 2-22 Laden einer Lithium-Ionen Zelle im Constant-Current/Constant-Voltage-Verfahren	24
Abbildung 2-23 Phasen in der Entwicklung neuer Lithium-Ionen Batterien.....	25
Abbildung 2-24 Neue Materialkonzepte zur Verbesserung der Elektrodeneigenschaften	25
Abbildung 2-25 Neue Anodenmaterialien für Lithium-Ionen Batterien	27
Abbildung 3-1 Mögliche Aufbauten des Antriebsstranges eines Hybridfahrzeugs	31
Abbildung 3-2 Hybridvarianten und Funktionalitäten entsprechend der installierten Elektroleistung	32
Abbildung 3-3 Einsparpotentiale bei Hybridfahrzeugen	32
Abbildung 3-4 Gegenüberstellung der Effizienz des Elektromotors und des Verbrennungsmotors	33
Abbildung 3-5 Grundfunktionalitäten eines Plug-In Hybridfahrzeuges	34
Abbildung 3-6 Darstellung von Leistung, Leistungsspitzen und Energie (a) und typische Verteilungen der auftretenden Leistungsspitzen für Fahrten mit unterschiedlichen Stadt- und Überlandanteilen (b).....	35
Abbildung 3-7 Energie-Anforderungen an die Batterie eines Mittelklassewagens im Elektrobetrieb für typische Fahrprofile mit Stadt- und Highway-Anteilen (a) und Fahrzeugreichweite als Funktion des Batteriegewichts für verschiedene spezifische Energien des Batteriesystems (b).....	36
Abbildung 3-8 Schematische Darstellung der Abnahme der Zyklenlebensdauer mit zunehmender Entladungstiefe	37
Abbildung 3-9 Anstieg der Zellimpedanz einer Lithium-Ionen Hochleistungszelle bei tiefen Temperaturen (a) und Abnahme der Entladekapazität durch das Zyklieren bei erhöhter Temperatur (b)	38
Abbildung 3-10 Vergleich von spezifischer Leistung und spezifischer Energie verschiedener Batterietechnologien	39
Abbildung 3-11 Steigerung der Energiedichten von Lithium-Ionen, Ni-MH- und Ni-Cd-Batterien	40
Abbildung 3-12 Betriebsbereich für optimale Leistungsaufnahme bzw. -abgabe und Verhältnis von genutzter Kapazität zur Gesamtkapazität einer Hochleistungszelle für Hybridfahrzeuge	41
Abbildung 3-13 Entwicklungsstand von Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge verglichen mit den Minimalanforderungen des USABC (100% = USABC-Ziele).....	43
Abbildung 3-14 Batteriesystem und Hybridmodul im Mercedes-Benz S400 BlueHYBRID	44
Abbildung 3-15 Nutzungsprofil der Batterie eines Elektrofahrzeuges	45
Abbildung 3-16 Entwicklungsstand von Hochenergiebatteriesystemen für Elektrofahrzeuge verglichen mit den Minimalanforderungen des USABC (100% = USABC-Ziele).....	46
Abbildung 3-17 Aufbau des Batteriesystems eines Mitsubishi 'i MiEV'	47
Abbildung 3-18 Nutzungsprofil der Batterie eines Plug-In Hybridfahrzeuges.....	48

Abbildung 3-19 Möglichkeit zur Erhöhung der Reichweite durch das Absenken des Sweet-Spot-Niveaus (a) und reduzierte Leistungsanforderungen im kombinierten („blended“) CD-Modus (b).....	49
Abbildung 3-20 Entwicklungsstand von Lithium-Ionen Batteriespeichern für Plug-In Hybride verglichen mit den Zielvorgaben des USABC für eine PHEV40 Mittelklasselimousine (100% = USABC-Ziele).....	50
Abbildung 3-21 Möglichkeit zur Integration des Elektroantriebs in ein Plug-In Hybridfahrzeug am Beispiel des Chevrolet Volt	52
Abbildung 3-22 Roadmap zur F&E der nächsten Generation von Fahrzeugbatterien und zum Aufbau einer Infrastruktur des japanischen NEDO	53
Abbildung 3-23 Szenario zur Entwicklung zukünftiger Fahrzeugbatterien	54
Abbildung 3-24 Nationale Forschungs- und Entwicklungsprogramme	55
Abbildung 4-1 Lebensphasen eines Batteriesystems mit Angabe von Material- und Energieflüssen und CO ₂ -Emissionen während einzelner Lebensabschnitte für verschiedene Batterietechnologien.....	57
Abbildung 4-2 CO ₂ -Reduktionspotential und damit verbundenen Zusatzkosten in Abhängigkeit des Hybridisierungsgrades eines Fahrzeuges	58
Abbildung 4-3 Kraftstoffeinsparung eines Diesel-Hybrid gegenüber dem konventionellen Diesel-antrieb im europäischen Artemis-Fahrzyklus für Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten	59
Abbildung 4-4 Abhängigkeit des CO ₂ -Ausstosses von Elektrofahrzeugen von der gewählten Stromversorgung und vom Verbrauch	60
Abbildung 4-5 Reduzierter Treib-stoffverbrauch bei Plug-In Hybriden	60
Abbildung 4-7 Anteile verschiedener Zellkomponenten am ökonomischen und physikalischen Gewicht einer Lithium-Ionen-Batterie mit LiCoO ₂ -Kathode und Graphit-Anode für Mobiltelefone	62
Abbildung 4-8 Val'Eas® Schmelz- und Raffinations-Prozess der Firma Umicore zum Recycling von Lithium-Ionen Batterien	63
Abbildung 4-9 Das Unternehmen als lernendes System unter Einfluss des Wettbewerbsumfeldes und staatlicher Entwicklungs- und Förderungsmaßnahmen	66
Abbildung 4-11 Verhältnis von Preisen zu Kosten bei der Markteinführung neuer Produkte .	67
Abbildung 4-10 Häufigkeitsverteilung der Aus-prägung verschiedener Erfahrungskurven	67
Abbildung 4-12 Produktionsvolumen und Preisentwicklung von Lithium-Ionen Zellen in den Jahren 1991-2003.....	69
Abbildung 4-13 Erfahrungskurve für die Produktion von Lithium-Ionen Zellen im Zeitraum 1991- 2003.....	69
Abbildung 4-14 Kostenstand und Kostenziel von Lithium-Ionen Batteriesystemen	71
Abbildung 4-15 Erfahrungskurven für ein Batteriesystem mit Ausgangskosten von 2000 US\$/kWh.....	72
Abbildung 4-16 Abschätzung des Kostenstandes nach 100000 produzierten Batteriesystemen	72

Abbildung 4-17 Verkaufspreisermittlung von Lithium-Ionen Zellen auf Basis der Zuschlagskalkulation	73
Abbildung 4-18 Gewichtsanteile einzelner Zellkomponenten am Gesamtgewicht einer typischen 10-Ah Hochleistungs- bzw. 100-Ah Hochenergie-Lithium-Ionen-Zelle	74
Abbildung 4-19 Aufschlüsselung der Kosten einer Hochleistungszelle mit $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ -Kathode bzw. einer Zelle mit günstigerer Lithium-Manganoxid-Kathode	77
Abbildung 4-20 Übersicht der wichtigsten auf dem Markt der Lithium-Ionen Technologie für Fahrzeugantriebe tätigen Akteure, der derzeitigen Verbindungen zwischen Batterieproduzenten und der Automobilindustrie sowie der von den Batterieherstellern hauptsächlich verwendeten Zellchemie.....	80
Abbildung 4-21 Politische Rahmenbedingungen und Motive zur Einführung umweltfreundlicherer Automobile den USA, Europa und Japan.....	84
Abbildung 4-22 Umfrage zur Bereitschaft zum Kauf eines Hybridfahrzeugs.....	85
Abbildung 4-23 Marktdurchdringung der Hybridfahrzeuge nach dem Moore'schen Modell ...	86
Abbildung 5-1 Gewicht und Volumen des Energiespeichersystems eines Mittelklassewagens für 500 km Reichweite im Falle der Diesel- bzw. Lithium-Ionen-Technologie	89
Abbildung 5-2 Vermeidungskostenkurve für den Transportsektor in Deutschland bis zum Jahr 2020.....	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vor- und Nachteile verschiedener Batterietechnologien des Fahrzeugbereich	40
Tabelle 2 Unter- und Obergrenzen der vom USABC spezifizierten Anforderungen an Vollhybridfahrzeuge	42
Tabelle 3 Mindestvorgaben und langfristige Zielanforderungen des USABC für ein mit konventionellen Mittelklasselimousinen vergleichbares Elektrofahrzeug	45
Tabelle 4 Anforderungen des USABC, EPRI und MIT an verschieden konzipierte Plug-In Hybride	50
Tabelle 5 Darstellung der Verfügbarkeit wichtiger Rohstoffe zur Produktion von Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen Batterien	61
Tabelle 6 Recycling-Raten der Zellkomponenten einer Lithium-Ionen Batterie mit LiCoO ₂ -Kathode und Graphit-Anode im Val'Eas-Prozess.....	64
Tabelle 7 Preise verschiedener im Fahrzeugbereich etablierter Kathodenmaterialien	74
Tabelle 8 Faktoren zur Skalierung der Kosten von Zellen auf die von Modulen und Batteriesystemen	76
Tabelle 9 Hochleistungszellen verschiedener Hersteller und daraus aufgebaute Batteriesystem	93
Tabelle 10 Hochenergiezellen verschiedener Hersteller und daraus aufgebaute Batteriesysteme	93

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMS	Batteriemanagementsystem
CC/CV	Constant-Current/Constant-Voltage
CD	Charge-Depletion
CID	Current Interrupt Device
CS	Charge-Sustaining
DDK	Dynamische Differenzkalorimetrie
DOE	Unites States Department of Energy
DPMO	Defects Per Million Opportunities
EBRA	European Battery Recycling Association
EPRI	Electric Power Research Institute
EU25	25 Mitgliedstaaten der Europäischen bis einschließlich 2006
EUCAR	European Council for Automotive Research and Development
EV	Electric Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HWFET	Highway Fuel Economy Test
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KETI	Korea Electronics Technology Institute
LA92	Los Angeles 1992 Cycle (Unified Cycle)
LIB	Lithium-Ionen Batterie
METI	METI Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
Ni-MH	Nickel Metallhydrid Batterie
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
PTC	Positive Temperature Coefficient
SEI	Solid Electrolyte Interphase
SOC	State of Charge
SUV	Sport Utility Vehicle

UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
US06	US06 Supplemental Federal Test Procedure
USABC	United States Advanced Battery Consortium
USCAR	United States Council for Automotive Research
ZEBRA	Zeolite Battery Research Africa Project

1 Einleitung und Motivation

Die tägliche Fahrt zum Arbeitsplatz, ein Kurztrip übers Wochenende, mal eben in den Supermarkt – wer kann sich heutzutage vorstellen, was es bedeuten würde, auf diese grenzenlose „Automobilität“ zu verzichten? Nicht zu vergessen die für unser Wirtschaftssystem und unseren Wohlstand elementare Beförderung von Gütern und Waren auf der Straße. Die allgemeine Mobilität hat sich im vergangenen Jahrhundert zu einem zentralen Element aller wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aktivitäten entwickelt. Allein in der EU25 stieg im Zeitraum 1995 bis 2004 die Verkehrsleistung im Personenverkehr um 17,7% von 5149 auf 6061 Milliarden Personenkilometer, bei einem PKW-Anteil von 73,5% [EU06]. Zusammen mit der zunehmenden Motorisierung in den aufstrebenden Schwellenländern wächst der globale Treibstoffbedarf unentwegt. Weltweit werden gegenwärtig 29 Millionen Barrel Erdöl im Personenverkehr an Land verbraucht – täglich! Allein in den USA benötigen PKW und Kleintransporter rund 570 Milliarden Liter Benzin pro Jahr [HEY07]. Dabei gehen die Erdölvorräte zur Neige. Schon in 10 bis 15 Jahren, so prognostiziert die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, wird die Hälfte des auf der Erde förderbaren Öls verbraucht sein [BGR08]. Als Folge ist ein weiterer Anstieg des Ölpreises vorprogrammiert.

Die Problematik des Erdölverbrauchs und der Verknappung dieses fossilen Energieträgers vollzieht sich vor einem noch bedrohlicherem Hintergrund, dem fortschreitenden Klimawandel. Der Weltklimarat IPCC warnt vor einer beispiellosen Klimaerwärmung um bis zu 6,4°C bis zum Ende des Jahrhunderts. Mit mehr als 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit trägt dafür der Mensch durch den Ausstoß von Treibhausgasen allein die Verantwortung. Heute werden ungefähr ein Viertel der weltweiten Kohlenstoffdioxidemissionen durch den Verkehr, das meiste davon durch den Straßenverkehr, verursacht [IPC07].

Angesichts der Brisanz dieser wissenschaftlichen Prognosen ist ein Umdenken unumgänglich. Doch welche Optionen bieten sich an, den Treibstoffbedarf zu verringern und den Straßenverkehr durch reduzierten Ausstoß von Treibhausgasen zu annehmbaren Kosten zukunftsfähig zu machen? Verbesserte Technik, neuartige Kraftstoffe und Technologien und nicht zuletzt einsichtigeres Verhalten stehen zur Diskussion. Eine der Alternativen begegnet uns in den vergangenen Monaten immer wieder in den Medien: das batterieelektrische Fahrzeug. Kaum ein Automobilhersteller, der nicht entsprechende Fahrzeuge entwickelt bzw. bereits am Markt anbietet. Das Elektromobil verspricht dabei als „*zero-emission vehicle*“ nicht nur die Emissionsfreiheit im lokalen Betrieb, sondern vor allem auch die Unabhängigkeit vom Primärenergieträger Öl. Doch scheiterte diese Technik bisher an einer preisgünstigen Batterie, die genügend Energie für eine akzeptable Reichweite speichert. Als Ausweg wurden verschiedene hybride Antriebsformen entwickelt. Während beim Hybridfahrzeuge ein Elektromotor den Verbrennungsmotor unterstützt und dadurch zur Effizienzsteigerung beiträgt, dient im Konzept des Plug-In Hybrids ein kleiner zusätzlicher Verbrennungsmotor lediglich dazu, die ansonsten an der Steckdose aufgeladene Batterie bei Bedarf während des Fahrbetriebs nachzuladen.

Hybridfahrzeuge sind schon seit einigen Jahren am Markt erfolgreich. Die dabei eingesetzte Batterietechnologie, die Nickel-Metallhydrid Batterie, stößt jedoch darüber hinaus bei der Verwendung in Plug-In Hybriden und Elektrofahrzeugen an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit. Der bereits im Bereich der Gebrauchselektronik etablierten Lithium-Ionen-Technologie wird nun aber das Potential zugesprochen, in Zukunft den hohen Anforderungen an die Fahrzeugbatterie zu genügen. Ihr wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Batterietechnologien ist ihr höherer Energieinhalt und die Fähigkeit zu höherer Batterieleistung, wodurch leichtere Batteriesysteme mit geringerem Bauvolumen realisierbar werden [TAR01].

Die von Mobiltelefonen und Notebook-PCs bekannten Lithium-Ionen Akkumulatoren und die für den Fahrzeugantrieb benötigten Lithium-Ionen Speicher basieren zwar auf dem gleichen elektrochemischen Grundprinzip, doch bedenkt man die beim Elektrofahrzeug auf kleinstem Raum gespeicherte Energiemenge im Zusammenhang mit den strengen Sicherheitsauflagen im Automobil oder die mit den extremen Leistungsanforderungen verbundenen hohen Lade- und Entladeströme, so wird deutlich, dass die Lithium-Ionen Technologie in Zukunft vollkommen neuen Herausforderungen begegnen muss. Ein ganzer Forschungszweig beschäftigt sich deshalb seit einigen Jahren mit der Entwicklung neuer Materialien und Zelldesigns für die nächste Generation von Hochleistung- und Hochenergiebatterien.

Diese Arbeit knüpft an eine bereits von mir am Forschungszentrum Karlsruhe im Fachbereich Physik verfasste Diplomarbeit an. Während sich diese mit Grundlagenforschung zu Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen Batterien beschäftigte, soll dasselbe Forschungsfeld nun aus einem anderen Blickwinkel, unter techno-ökonomischen Gesichtspunkten, betrachtet werden. Dies geschieht am Beispiel des Bereichs batterieelektrischer Personenkraftwagen, welcher unter den zahlreichen potentiellen Anwendungsgebieten der Lithium-Ionen Batterie derzeit die höchste Entwicklungsdynamik aufweist und deshalb auch beispielhaft für die Entwicklungstendenzen der Lithium-Ionen Technologie in anderen Verwendungsbereichen steht

In Kapitel 2 wird dazu zunächst in die Grundlagen der Lithium-Ionen Technologie eingeführt und deren technischer Stand bezüglich des Zelldesigns und den in den Zellen verwendeten Materialien sowie zukünftige Entwicklungstendenzen aufgezeigt. Die technischen Anforderungen an die Batteriesysteme von Hybrid-, Plug-In Hybrid und Elektrofahrzeugen werden in Kapitel 3 analysiert und dem aktuellen Stand der Lithium-Ionen Technologie für die jeweilige Verwendung gegenübergestellt. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung der Entwicklungsperspektiven von Lithium-Ionen Speichern im Fahrzeugbereich. Kapitel 4 diskutiert ökonomische und ökologische Aspekte der Verwendung von Lithium-Ionen Batterien in batterieelektrischen Fahrzeugen. Untersuchungen der Treibstoff- und CO₂-Einsparpotentiale sowie Betrachtungen zur Verfügbarkeit notwendiger Rohstoffe und zu den Möglichkeiten des Batterierecyclings schließt sich eine Prognose der Kostenentwicklung von Lithium-Ionen Batterien auf Grundlage des theoretischen Konzepts der Erfahrungskurve an. Reale Kostensenkungspotentiale werden im Anschluss mittels eines Bottom-Up-Ansatzes analysiert. Nach einer Übersicht der wichtigsten Akteure am Markt werden abschließend die Marktchancen batterieelektrischer Fahrzeuge diskutiert.

2 Zur Technologie der Lithium-Ionen Batterie

Als Energiespeicher in Mobiltelefonen, tragbaren Computern oder Kameras leisteten Lithium-Ionen Batterien einen entscheidenden Beitrag zur rasanten Entwicklung der unseren heutigen Alltag bestimmenden mobilen Kommunikations-, Informations- und Unterhaltungstechnik. Dabei handelt es sich bei der Lithium-Ionen Batterie um eine noch sehr junge Technologie – wurde sie doch erst im Jahr 1991 in den Markt eingeführt. Ziel dieses Abschnitts ist es, die Entwicklung der Lithium-Ionen Speicher der vergangenen zwei Jahrzehnten nachzuzeichnen und den aktuellen Stand der Technik aufzuzeigen.

Aufbauend auf einer Einführung in die Funktionsweise der Lithium-Ionen Batterie und der Definition wichtiger Grundbegriffe (Kapitel 2.1) wird auf den technischen Stand von Zellen und Zellkomponenten eingegangen (Kapitel 2.2). Nach einer Zusammenfassung der für das Verständnis von Alterungseffekten und der Batteriesicherheit wichtigsten Aspekte (Kapitel 2.3) werden abschließend die Produktion von Zellen und der Aufbau von Batteriesystemen (Kapitel 2.4) besprochen sowie Entwicklungstendenzen aufgezeigt (Kapitel 2.5).

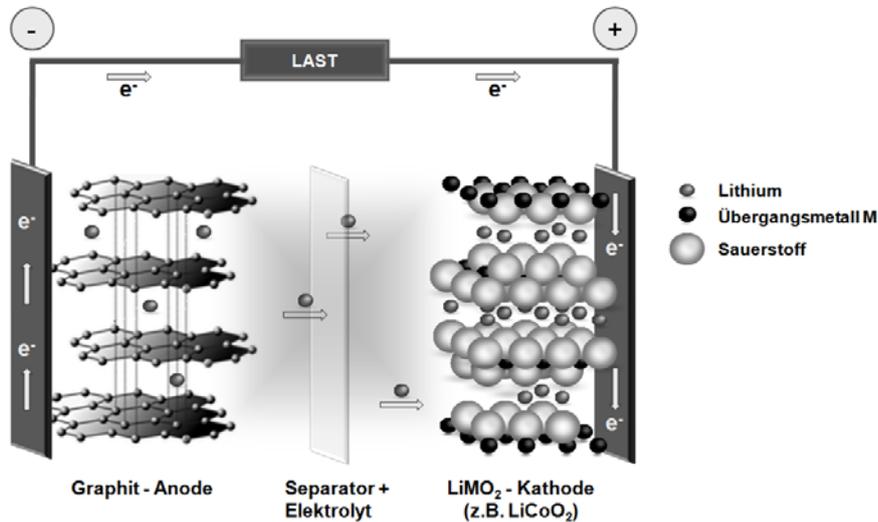
2.1 Einführung in die Grundlagen der Lithium-Ionen Technologie

2.1.1 Grundbegriffe und Funktionsweise

Der Begriff „Batterie“ bezeichnet die Zusammenschaltung mehrerer galvanischer Zellen, wird umgangssprachlich aber auch für einzelne galvanische Elemente verwendet. In der galvanischen Zelle wird eine spontane chemische Reaktion zur Erzeugung eines elektrischen Stromes genutzt. Zwei räumlich getrennte Elektroden, bestehend aus elektrochemisch umsetzbaren Materialien (Aktivmaterial) und einem elektrisch leitenden Kontakt (Stromsammler), sind über einen ionenleitenden Elektrolyten miteinander verbunden. Eine für Ionen permeable Separator-Membran isoliert die Elektroden elektronisch voneinander. An den Elektroden findet eine in zwei Halbreaktionen getrennte Redoxreaktion statt. Die bei der Oxidation an der Anode frei werdenden Elektronen bewirken, nachdem sie den externen Stromkreis durchlaufen haben, eine Reduktion an der Kathode. Zur Erhaltung der Ladungsneutralität fließt eine äquivalente Menge von Ionen durch den Elektrolyten. Mit der Energie, welche die Redoxreaktion freisetzt, kann Arbeit verrichtet werden [WEN99]. Man unterscheidet drei Klassen von Batterien. Primärbatterien verbrauchen bei der Entladung die in ihnen enthaltenen Reaktionsstoffe, während sekundäre Batterien (Akkumulatoren) nach der Entladung durch Zuführung elektrischer Energie wieder aufgeladen werden können. In tertiären Zellen (z.B. Brennstoffzellen) müssen die Reaktanden während des Betriebes kontinuierlich von außen zugeführt werden [LIN02].

Lithium-Ionen-Batterien gehören zur Gruppe der wiederaufladbaren Sekundärbatterien. Damit ein Akkumulator mehrfach geladen und entladen werden kann, müssen die Zellreaktionen reversibel verlaufen. Diese Reversibilität der Umwandlung der in den Aktivmaterialien

gespeicherten chemischen Energie in elektrische Energie basiert bei der Lithium-Ionen Batterie auf der wiederholten Ein- und Auslagerung von Lithium-Ionen in die Kristallgitter der Elektrodenmaterialien, welche dazu über eine geeignete stabile Wirtsstruktur mit einem Netzwerk freier Zwischengitterplätze verfügen (s. Abbildung 2-1).



Quelle: eigene Darstellung nach [NAZ04]

Abbildung 2-1 Schematische Darstellung einer Lithium-Ionen Zelle mit Graphit-Anode und Übergangsmetalloxid-Kathode während des Entladevorganges

Dieser Vorgang der Ein- bzw. Auslagerung wird als Interkalation bzw. Deinterkalation bezeichnet. Beim Entladen der Zelle deinterkalieren Lithium-Ionen auf der Anodenseite, bewegen sich durch den Elektrolyten, um dann wiederum in die Wirtsstruktur der Kathode zu interkalieren. Gleichzeitig fließen Elektronen über den äußeren Leiterkreis zur Kathode. Beim Ladevorgang findet der Prozess in umgekehrter Reihenfolge statt. Aufgrund dieser ständigen Hin- und Herbewegung der Lithium-Ionen zwischen den Elektroden wird die Lithium-Ionen Batterie in der Literatur häufig auch „rocking chair“-Batterie genannt [TAR01].

2.1.2 Batteriekenngrößen und Leistungsparameter

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit einer Lithium-Ionen Batterie dienen verschiedene Kenngrößen und Parameter [EIC90]:

Speicherfähigkeit:

Synonym zur „Batterieladung“ als das Integral über die Entladestromstärke wird meist der Begriff „Kapazität“ verwendet, angegeben in Ah. Sie wird anschaulich durch die Anzahl der Li^+ -Ionen bestimmt, die reversibel in die Wirtsstruktur der Elektrode aufgenommen bzw. wieder abgegeben werden können. Die Zahl der bei der Entladung an den Elektroden aufgenommenen oder freigesetzten Elektronen bzw. Li^+ -Ionen pro Massen- („gravimetrisch“) bzw. pro Volumeneinheit („volumetrisch“) wird als spezifische Ladung Q_G in $\text{Ah}\cdot\text{kg}^{-1}$ bzw. als Ladungsdichte Q_V in $\text{Ah}\cdot\text{cm}^{-3}$ bezeichnet.

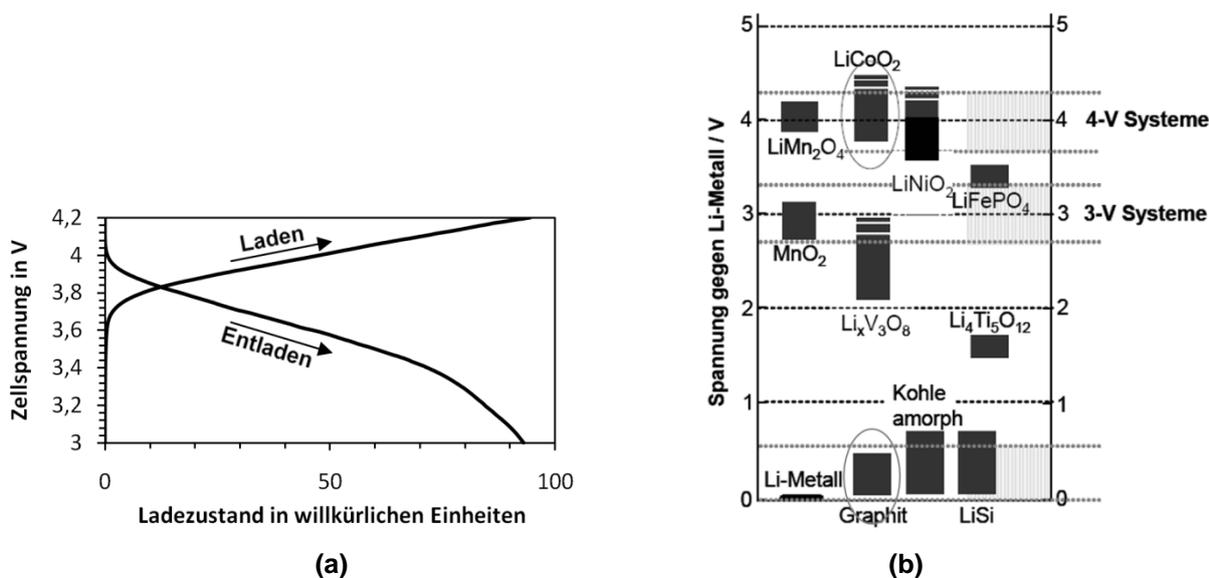
Zellspannung und Elektrodenpotential:

Im stromlosen Zustand ist die Zellspannung oder Elektromotorische Kraft ΔE der Lithium-Ionen Batterie proportional zur freien Reaktionsenthalpie ΔG der Zellreaktion und somit proportional zur Differenz der chemischen Potentiale $\mu_{Li}^{K/A}$ der Lithium-Atome im Anoden- und Kathodenmaterial [GER94]:

$$\Delta E \sim \Delta G \sim \mu_{Li}^A - \mu_{Li}^K \quad \text{Gleichung (2-1)}$$

Fließen Ströme, so weicht die tatsächliche Zellspannung jedoch unter anderem aufgrund von Ohmschen Verlusten von diesem theoretisch berechneten Wert ab.

Da das chemische Potential von Lithium in Anode und Kathode mit der Lithium-Konzentration variiert, ist auch die Zellspannung abhängig vom jeweiligen Ladezustand der Zelle. Diese Abhängigkeit wird in so genannten Lade- und Entladekurven dargestellt (s. Abbildung 2-2 (a)), welche für jede Kombination von Kathoden- und Anodenmaterialien charakteristische Verläufe aufweisen.



Quelle: eigenes Experiment und [WOH07]

Abbildung 2-2 Typische Lade- bzw. Entladekurve einer Lithium-Ionen Batterie (a) und Elektrodenpotential verschiedener Elektrodenmaterialien (b)

Jeder Elektrode kann ein Potential zugeordnet werden. Um das Elektrodenpotential verschiedener Kathoden- und Anodenmaterialien vergleichbar zu machen, wird es in der Regel gegenüber einer Standardelektrode aus metallischem Lithium gemessen, dessen Potential auf den Wert Null festgelegt wird (das Elektrodenpotential von metallischem Lithium ist konstant). Beispiele von Elektrodenpotentialen verschiedener Interkalationsverbindungen sind in Abbildung 2-2 (b) dargestellt. Werden zwei dieser Materialien, z.B. LiCoO₂ und Graphit, in einer galvanischen Zelle kombiniert, so ergibt sich die resultierende Zellspannung als einfache Differenz dieser Elektrodenpotentiale, im Beispiel also ~3,6 V.

Energieinhalt der Zelle:

Die spezifische Energie W_G in $\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ bzw. (volumetrische) Energiedichte W_V in $\text{Wh}\cdot\text{cm}^{-3}$ einer Zelle errechnet sich aus dem Produkt der spezifischen Ladung bzw. Ladungsdichte und der Zellspannung. Eine Zelle mit hohem Energieinhalt setzt somit eine Kombination zweier Elektrodenmaterialien mit großer Kapazität und hoher Potentialdifferenz voraus. Synonym zum Begriff "spezifischen Energie" wird in der Literatur oft auch der Ausdruck „Energiedichte“ verwendet, jedoch dann im Sinne einer gravimetrischen Größe.

Strombelastbarkeit der Zelle:

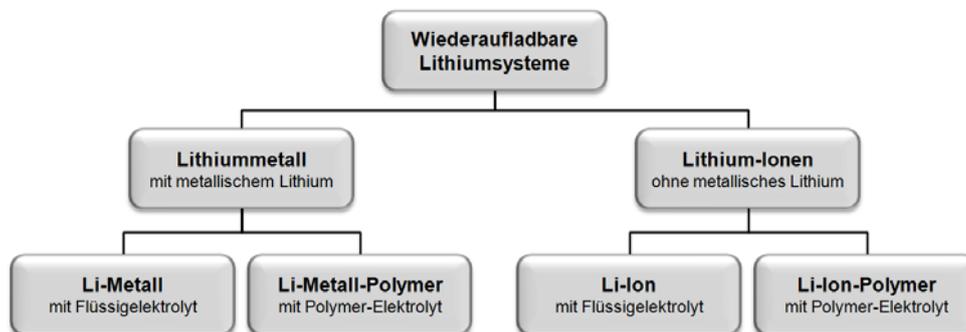
Die Strombelastbarkeit der Zelle ist für eine hohe spezifische Leistung P_G in $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ bzw. Leistungsdichte P_V in $\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ entscheidend. Die Geschwindigkeit der elektrochemischen Reaktionen an den Elektroden ist begrenzt durch den Elektronen- und Ionentransfer innerhalb der Elektroden und an der Elektrode/Elektrolyt-Phasengrenze. Mit der so genannten „C-Rate“ kann die Größe des Lade- bzw. Entladestromes unabhängig von der Kapazität verschiedener Zellen angegeben werden. Die jeweils fließenden Ströme werden mit der Bezeichnung C als Bruchteile bzw. Vielfache einer vom Hersteller spezifizierten Nennkapazität Q_{nenn} angegeben. Wird beispielsweise bei einer Zelle mit einer Nennkapazität von 1000 mAh die Entladerate $1C$ gewählt, so fließt eine Stunde lang ein Strom von 1000 mA. Wird dieselbe Zelle bei $0.5C$ entladen, so fließt für zwei Stunden ein Strom von 500 mA, bei $2C$ entsprechend 2000 mA in 30 Minuten [LIN02].

2.1.3 Klassifizierung wiederaufladbarer Lithium-Batterien

Wie Abbildung 2-2 (b) verdeutlicht, ist metallisches Lithium aufgrund seines niedrigen Elektrodenpotentials (aber auch wegen seiner geringen Äquivalentmasse) als Anodenmaterial grundsätzlich sehr gut geeignet, da damit die höchsten Zellspannungen realisierbar sind. So genannten Lithium-Metall Batterien mit metallischer Anode wurden tatsächlich vor der Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterie, die durch zwei Interkalationselektroden sowohl auf der Kathoden- als auch auf der Anodenseite gekennzeichnet ist, verwendet. Durch erhebliche Sicherheitsprobleme der ersten Lithium-Metall-Batterien aufgrund von Dendritenbildung auf der Lithium-Oberfläche, welche beim Durchwachsen zur Kathode zu innerem Kurzschluss, lokaler Überhitzung und Entzündung der Zelle führen können, konnte sich diese jedoch nicht am Markt durchsetzen. Als Anodenmaterialien in heutigen Lithium-Ionen Batterien werden deshalb hauptsächlich lamellare Kohlenstoffe wie Graphit eingesetzt, die ebenfalls als Interkalationsverbindungen Li^+ -Ionen reversibel aufnehmen können (vgl. Abbildung 2-1).

In den letzten Jahren sind die Verkaufszahlen von Li-Ionen-Polymer Batterien stark angestiegen, in denen der flüssige Elektrolyt durch einen Elektrolyten auf Polymerbasis, der als feste bis gelartige Folie vorliegt, ersetzt wurde. Diese zeichnen sich vor allem durch eine hohe Flexibilität in der Bauform der Zelle aus. Auch an einer Lithium-Metall Batterie mit polymerem Elektrolyt wird heute speziell für Automotivanwendungen wieder geforscht [OSA01]. Insgesamt kann anhand der verwendeten Anodenmaterialien und Elektrolyte die in Abbil-

dung 2-3 dargestellte Untergliederung wiederaufladbarere Lithiumsysteme vorgenommen werden.



Quelle: [WOH07]

Abbildung 2-3 Klassifizierung wiederaufladbarer Lithiumsysteme

2.2 Stand der Technik

Die heute im Bereich der Gebrauchselektronik verwendeten Lithium-Ionen Batterien sind fast ausschließlich aus einer Lithium-Kobaltoxid-Kathode LiCoO_2 und einer Graphit-Anode aufgebaut. LiCoO_2 besitzt gute elektrochemische Eigenschaften, ist aber teuer, umweltschädlich sowie in seiner Kapazität eingeschränkt und somit für den Gebrauch in großen Batteriesystemen, z.B. für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, ungeeignet. Deshalb wurden die weltweiten Aktivitäten zur Erforschung neuer Materialien in den letzten Jahren intensiviert.

2.2.1 Anodenmaterialien

Die heute in den meisten Lithium-Ionen Batterien verwendeten Graphitanoden zeichnen sich vor allem durch ein niedriges Elektrodenpotential und eine relativ geringe Volumenausdehnung bei der Einlagerung von Li^+ -Ionen aus. Anoden auf Basis von Kohlenstoff sind in hunderterten von Strukturmodifikationen und Qualitäten kommerziell erhältlich. Ihr elektrochemisches Leistungsvermögen ist jedoch stark abhängig von der Kristallinität, der Mikrostruktur und Morphologie des Materials [NOE02].

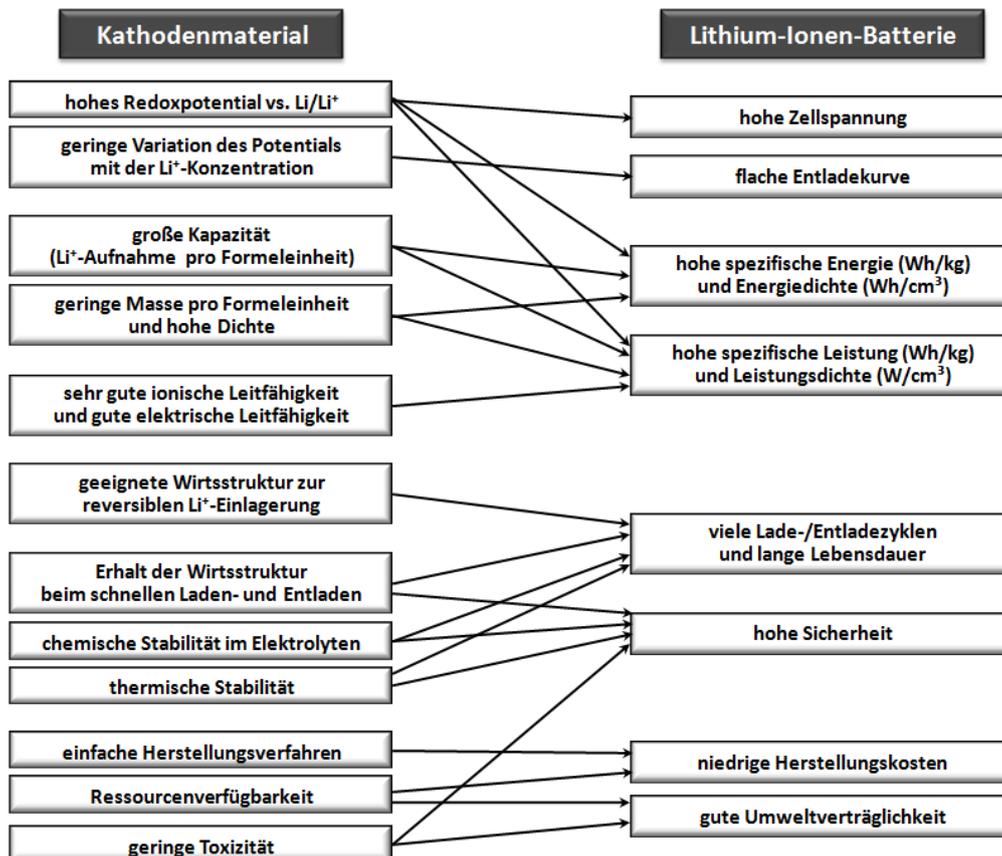
Auch Titanoxide, vor allem $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, werden als Anodenmaterialien untersucht. $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ mit einer Kapazität von ca. 160 mAh/g zählt zu den so genannten „zero-strain“ Materialien, da seine Volumenausdehnung bei der Einlagerung von Li^+ -Ionen vernachlässigbar gering ist. Wegen seines hohen Elektrodenpotentials von 1,55 V vs. Li/Li^+ ist $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ außerdem im Elektrolyten chemisch stabil. Dies macht Titanoxid als Anodenmaterial langlebig und sehr sicher, weshalb es gerade im Automobilbereich von Interesse ist. Jedoch sind aufgrund des höheren Elektrodenpotentials nur relativ niedrige Zellspannungen und somit geringere spezifische Energien bzw. Energiedichten möglich [KOS01].

Zinn reagiert mit Lithium unter Bildung einer Legierung. Auf dieser Basis sind Elektroden mit sehr hohen Kapazitäten realisierbar. Aus dieser Reaktion resultieren aber große Volumenänderungen, die das Elektrodenmaterial nachhaltig schädigen. Deshalb wird versucht, nanoskalige Zinn-Partikel in eine Matrix, z.B. aus Kohlenstoff, einzulagern, welche die Volumen-

expansion absorbiert [TRI07]. Eine Zelle mit zinnbasierter amorpher Sn-Co-C-Kompositanode mit 50% höherer Kapazität gegenüber einer Graphitanode wird vom Unternehmen Sony als Nexelion®-Batterie bereits kommerziell vertrieben [SON08].

2.2.2 Kathodenmaterialien

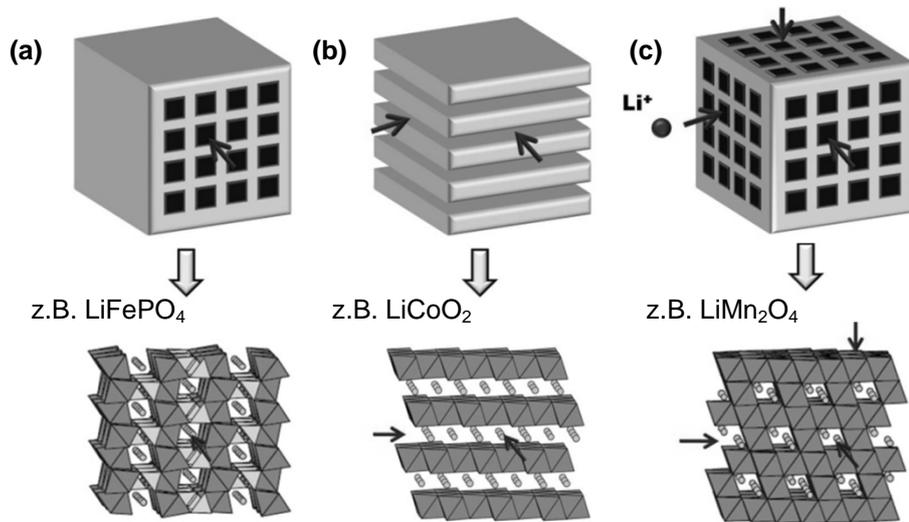
Da sich die Eigenschaften des Kathodenmaterials besonders stark auf das Leistungsverhalten der gesamten Zelle auswirken, müssen potentielle Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen Batterien einige grundlegende Kriterien erfüllen. Diese Merkmale und deren Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit der gesamten Lithium-Ionen Batterie sind in Abbildung 2-4 zusammengefasst. In der Realität kann keines der bekannten Kathodenmaterialien all diese Anforderungen gleichzeitig erfüllen, sondern einzelne Merkmale sind bei verschiedenen Materialien unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Wahl eines Materials zum Aufbau einer Zelle stellt deshalb immer einen Kompromiss dar.



Quelle: eigene Darstellung nach [DES90], [BRU97]

Abbildung 2-4 Wesentliche Eigenschaften potentieller Kathodenmaterialien und ihre Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Lithium-Ionen Batterie

Die heute vorwiegend untersuchten Kathodenmaterialien sind anorganische Übergangsmetall-Oxide. Diese Interkalationsverbindungen untergliedern sich anhand der Dimensionalität der Wirtsstruktur für die Lithium-Ionen-Diffusion in eindimensionale Röhren-, zweidimensionale Schicht und dreidimensionale Rahmenstrukturen [WIN05].

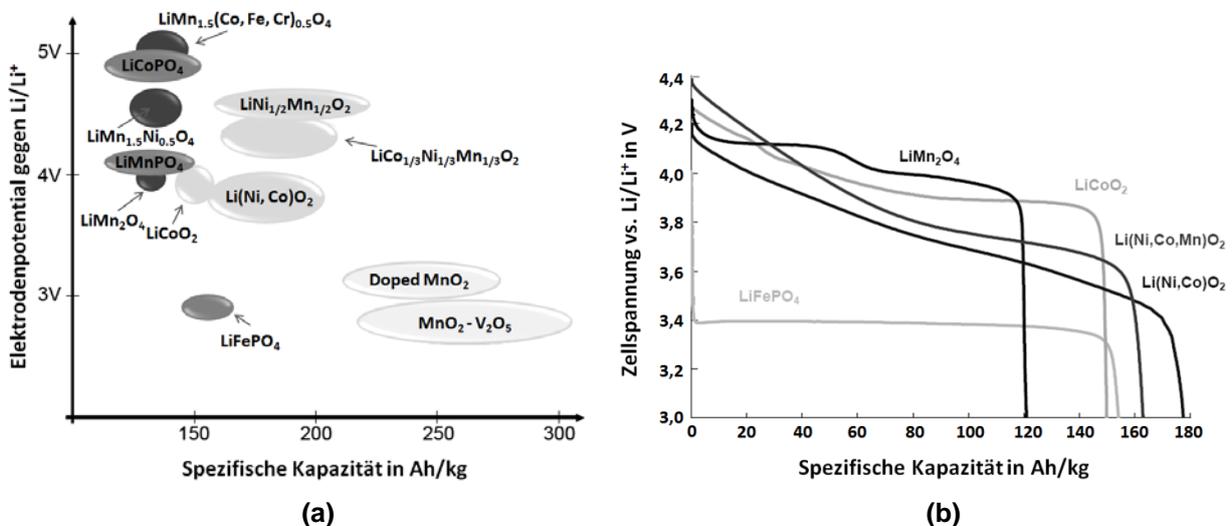


Quelle: eigene Darstellung nach [OHZ07]

Abbildung 2-5 Wirtsstrukturen mit (a) eindimensionaler Röhren-, (b) zweidimensionaler Schicht- und (c) dreidimensionaler Rahmenstruktur zur Interkalation von Lithium-Ionen

Zu den Verbindungen mit eindimensionaler Wirtsstruktur zählen Übergangsmetall-Verbindungen wie Lithium-Eisenphosphat LiFePO_4 mit Olivinstruktur (s. Abbildung 2-5 (a)). Die größte Gruppe der in der Literatur diskutierten Kathodenmaterialien sind die in Abbildung 2-5 (b) dargestellten Lithium-Übergangsmetalloxide LiMO_2 mit zweidimensionaler Schichtstruktur ($M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe}, \text{Mn}$). Verbindungen mit Spinellstruktur, z.B. Lithium-Manganoxid LiMn_2O_4 , bieten ein dreidimensionales Netzwerk zur Einlagerung von Lithium-Ionen (s. Abbildung 2-5 (c)) [OHZ07].

Abbildung 2-6 zeigt die Kapazitäten, Elektrodenpotentiale und Entladekurven wichtiger Verbindungen dieser drei Materialgruppen.



Quelle: [WOH07]

Abbildung 2-6 Kapazitäten und Elektrodenpotentiale (a) sowie Entladekurven (b) einiger wichtiger Kathodenmaterialien

LiFePO₄ mit Olivinstruktur:

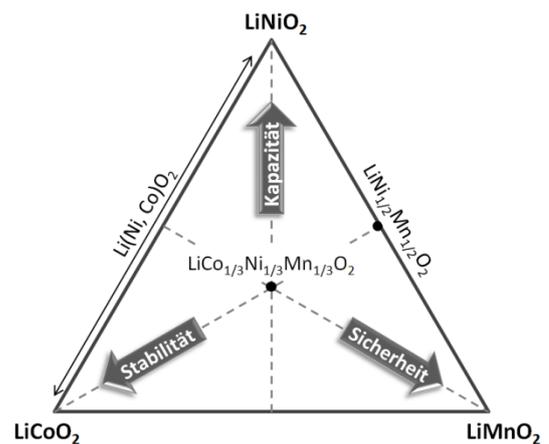
Lithium-Eisenphosphat LiFePO₄ zeigt einen flachen Verlauf der Entladekurve bei 3,4 V (vgl. Abbildung 2-6 (b)). Mit ca. 165 mAhg⁻¹ werden für kleine Entladeströme ca. 90% der theoretischen Kapazität des Materials erreicht, aber auch bei höheren Entladestromstärken sind die Kapazitätsverluste vergleichsweise gering. Ein großer Vorteil der LiFePO₄-Kathode ist die Stabilität der Kristallstruktur auch bei hohen Temperaturen. Dies verspricht ein höheres Maß an Sicherheit, eine geringere Degradation des Materials bei höheren Lade- und Entladeströmen und somit eine verlängerte Lebensdauer. Als weitere positive Punkte sind die gute Umweltverträglichkeit und die geringen Kosten gegenüber kobalt- und nickelbasierter Elektroden zu nennen. Nachteile sind vor allem die geringe Leitfähigkeit (LiFePO₄ ~ 10⁻¹⁰ S/cm vs. LiCoO₂ ~ 10⁻³ S/cm) sowie die niedrige Entladespannung [LAM03]. Um trotz geringer Leitfähigkeit hohe Ströme und somit eine hohe Batterieleistung zu ermöglichen, ist es notwendig, die Kathode aus kleinen LiFePO₄-Nanopartikeln aufzubauen, welche mit leitfähigem Kohlenstoff beschichtet bzw. in eine Kohlenstoffmatrix eingelagert sind [PAT08].

LiMO₂ (M = Co, Ni, Al, Fe) mit Schichtstruktur:

Zahlreiche Übergangsmetall-dioxyde mit Schichtstruktur wurden in den letzten Jahren untersucht. Aus den drei strukturgleichen Verbindungen LiCoO₂, LiNiO₂ und LiMnO₂ sind die Li(Ni,Co,Mn)O₂-Mischkristalle mit derselben Schichtstruktur abgeleitet. Diese sollen die stabile Kristallstruktur von LiCoO₂, die höhere Kapazität von LiNiO₂ sowie die besseren Sicherheitseigenschaften und höhere Umweltverträglichkeit von LiMnO₂ kombinieren (s. Abbildung 2-7). Durch Dotierung mit weiteren Metallen wie z.B. Aluminium oder Eisen wird zudem versucht, die elektrochemischen Eigenschaften noch weiter zu verbessern. Materialien dieser Verbindungsgruppe verfügen in der Regel über relativ hohe Kapazitäten und eine gute elektrische Leitfähigkeit. Die Kristallstruktur ist jedoch weniger stabil als beispielsweise die Spinell-Struktur. Deshalb tritt thermische Zersetzung schon bei tieferen Temperaturen auf. Außerdem kann beim Laden und Entladen durch Platzwechsel zwischen Lithium- und Übergangsmetall-Kationen die geordnete Schichtstruktur zerstört und somit das elektrochemische Verhalten der Kathode negativ beeinträchtigt werden [GOO07]. Derzeit große Beachtung finden die Verbindungen:

- **LiNi_{0,85}Co_{0,1}Al_{0,05}O₂**

LiNi_{0,85}Co_{0,1}Al_{0,05}O₂ besitzt eine größere Kapazitäten als LiCoO₂, dieser Vorteil wird jedoch bei der Berechnung der spezifischen Energie durch eine gegenüber LiCoO₂ geringere Zellspannung zum Teil ausgeglichen [NON08].



Quelle: eigene Darstellung nach [WIN07]

Abbildung 2-7 Lithium-Übergangsmetall-Schichtoxide im System LiCoO₂-LiNiO₂-LiMnO₂

- **$\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ und $\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_2$**

$\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ weist bei gleichzeitig höherer Kapazität ein etwas geringeres Elektrodenpotential als LiCoO_2 auf, so dass die Verbindung bezüglich der spezifischen Energie mit LiCoO_2 vergleichbar ist. $\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_2$ zeigt bei geringen irreversiblen Kapazitätsverlusten und niedrigen Polarisationsverlusten eine gleich große Zellspannung und Kapazität ($\sim 200 \text{ mAhg}^{-1}$) wie $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$. Die Präparation von $\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_2$ mit perfekter Schichtstruktur ist jedoch sehr schwierig und aufwendig [OHZ07].

LiMn_2O_4 mit Spinellstruktur:

Ein hohes Elektrodenpotential und flacher Potentialverlauf zwischen 3,95 und 4,1 V zeichnen Lithium-Manganoxid LiMn_2O_4 -Kathoden aus (vgl. Abbildung 2-6 (b)). Bei einer theoretischen Kapazität von 148 mAhg^{-1} werden unter realen Bedingungen in der Zelle praktisch ca. 120 mAhg^{-1} erreicht. Durch die hohe inhärente Stabilität der Spinell-Kristallstruktur tritt thermische Zersetzung erst bei höheren Temperaturen ein, was zur Sicherheit des Materials beiträgt. Mangan-Verbindungen sind zudem weniger umweltschädlich und kostengünstiger als kobaltbasierte Materialien. Problematisch ist jedoch die chemische Stabilität des Materials, da die Auflösung von Mn^{2+} -Ionen im Elektrolyten die Oberfläche der Anode beeinträchtigen und somit zu hohen Kapazitätsverlusten führen kann [GOO07]. Auch die Energiedichte ist verglichen mit anderen Materialien relativ gering.

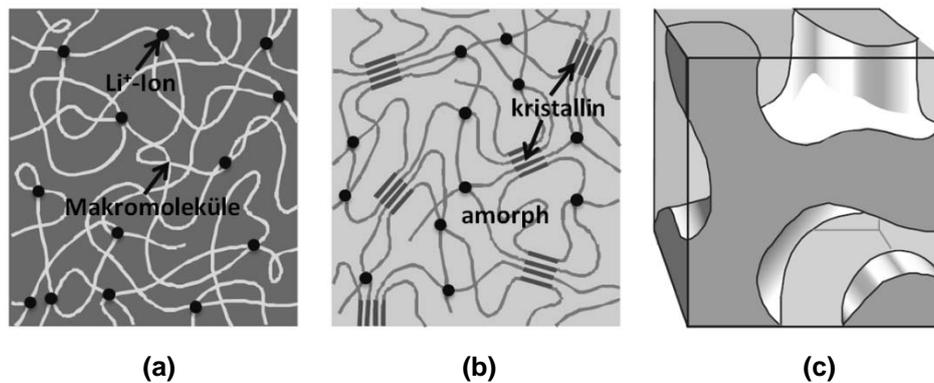
2.2.3 Separatoren

Der isolierende, ionendurchlässige Separator verhindert bei Zellen mit flüssigem Elektrolyten den direkten Kontakt zwischen Anode und Kathode. Als wesentliche Anforderungen an das Separatormaterial sind zu nennen: die chemische Stabilität gegenüber dem Elektrolyten und den Elektroden, eine geringe Dicke für hohe Energie- und Leistungsdichten bei gleichzeitiger mechanischer und thermischer Stabilität, eine ausreichende Porosität und Porengröße, eine hohe Permeabilität für Li^+ -Ionen sowie ein gutes Benetzungsverhalten gegenüber dem Elektrolyten. Für Lithium-Ionen Batterien im Gebrauchselektronikbereich werden hauptsächlich mikroporöse Polymer-Membrane basierend auf semikristallinen Polyolefinen verwendet. Durch ihre niedrige Schmelztemperatur ($\sim 165^\circ\text{C}$ für Polypropylen) bieten sie jedoch weniger Sicherheit als keramische Separatoren [ZHA07]. Diese bestehen aus hochporösen und flexiblen keramischen Folien, deren Porengröße im Produktionsprozess gezielt eingestellt werden kann. Die keramische Matrix ist stark hydrophil und damit hervorragend mit Elektrolyt benetzbar. Keramische Separatoren sind sehr dünn ($< 30 \mu\text{m}$) und zeichnen sich durch einen niedrigen Ionen-Widerstand aus. Die höhere thermische Stabilität soll auch in Extremfällen, z.B. bei einem Brand infolge eines Unfalles eines Elektrofahrzeuges, ein hohes Maß an Sicherheit gewährleisten. Zu erwähnen ist hierbei der neu entwickelte keramische Separator SEPARION® von Degussa (Evonik Industries), der vielversprechende Eigenschaften aufweist [EVO08].

2.2.4 Elektrolyte

Als wichtigste Eigenschaften von Elektrolyten in Batterieanwendungen sind deren ionische Leitfähigkeit und thermische Stabilität zu nennen. Da der Elektrolyt ebenfalls Redoxreaktionen mit den Elektroden eingehen kann, ist außerdem die elektrochemische Stabilität des Elektrolyten von großer Bedeutung. In Lithium-Ionen Batterien werden heute größtenteils flüssige Elektrolyte eingesetzt. Diese bestehen aus hochreinen wasserfreien organischen Lösungsmitteln, in der Regel Mischungen aus Alkylcarbonaten (z.B. Ethylen-, Dimethyl-, Diethyl- oder Ethylmethylcarbonat), in denen Leitsalze wie z.B. LiPF_6 gelöst sind [AUR04].

In zunehmendem Maße werden polymere Elektrolyte verwendet. Diese weisen zwar gegenüber flüssigen Elektrolyten eine geringere Leitfähigkeit auf, da aber bei Undichtigkeit der Zelle keine Elektrolytlösung austreten kann, können die Zellen anstelle von stabilen Edelstahlgehäusen auch in flexible Verbundfolie eingeschweißt werden. Die Polymer-Elektrolyte untergliedern sich, wie in Abbildung 2-8 dargestellt, in drei Gruppen [TAR01]:



Quelle: [TAR01]

Abbildung 2-8 Fester trockener Polymerelektrolyt (a), Hybrid-(Gel)-Elektrolyt (b) und mikroporöse Polyolefin-Membran

- Bei der Li-LSP (*Li solid polymer electrolyte*) Batterie ist der flüssige Elektrolyt durch ein trockenes hochmolekulares Polymer ersetzt. Die Li^+ -Diffusion wird durch die Bewegung der Polymer-Kettenmoleküle unterstützt (s. Abbildung 2-8 (a)), jedoch erfordert eine ausreichende Diffusion hohe Betriebstemperaturen von bis zu 80°C .
- Der Hybrid- oder Gelelektrolyt der Li-HPE (*Li hybrid polymer electrolyte*) Batterie besteht aus drei Komponenten: ein Leitsalz, das in einer polaren Flüssigkeit gelöst wird, wozu ein inertes semikristallines Polymer gegeben wird. Dabei werden die amorphen Bereiche des Polymers mit dem Lösungsmittel getränkt, während kristalline Regionen die mechanische Stabilität erhöhen (s. Abbildung 2-8 (b)). Die erste kommerzielle Li-HPE Batterie wurde 1999 in Dünnschichttechnik von der Firma Bellcore unter dem Namen PLiON (plastic Li ion) entwickelt.
- Ein neuartiger Elektrolyt besteht aus einer mikroporösen Polyolefin-Membran, deren Poren mit einem Flüssigelektrolyt gefüllt sind (s. Abbildung 2-8 (c)).

2.2.5 Zusammenfassende Bewertung von Zellen unterschiedlicher Zellchemie

In Abbildung 2-9 sind die wichtigsten Eigenschaften verschiedener Kombinationen von Anoden- und Kathodenmaterialien bewertet, die für die zukünftige Anwendung im Automotivbereich diskutiert werden. Ebenso ist der aktuelle Entwicklungsstand für die Verwendung der Zelle im Fahrzeugbereich angegeben. Beim Aufbau einer Zelle ist immer zu beachten, dass eine Kombination des „besten“ Kathodenmaterials mit dem „besten“ Anodenmaterial nicht automatisch die „beste“ Lithium-Ionen Batterie ergibt. Vielmehr können unterschiedlichste Wechselwirkungsprozesse in der Zelle die Leistungsfähigkeit insgesamt verschlechtern. Beispielsweise ist die Kombination einer LiMn_2O_4 -Kathode mit einer Graphit-Anode bezüglich der Zellsicherheit problematisch, da im Elektrolyt gelöste Mn^{2+} -Ionen mit der Anodenoberfläche wechselwirken und irreversible Schäden verursachen können [BRU97]. Dieser Effekt tritt bei der Kombination von LiMn_2O_4 mit einer $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ -Anode jedoch nicht auf, woraus die guten Sicherheitseigenschaften der entsprechenden Zelle resultieren.

Positive (Negative) Elektrode	Hersteller	Automotive Status	Leistung	Energie	Sicherheit	Lebensdauer	Kosten
LiCoO_2 (Graphit)	Zahlreiche Hersteller	begrenzt einsetzbar	↗	↗	↘	↘	↓
$\text{Li}(\text{Ni}_{0,85}\text{Co}_{0,1}\text{Al}_{0,04})\text{O}_2$ (Graphit)	JCS, GAIA, Matsuhita, Toyota	Pilot	↗	↗	⇒	↗	⇒
LiFePO_4 (Graphit)	A123, Valence, GAIA	Pilot	↗	⇒	⇒	↗	⇒ (↗)
$\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ (Graphit)	Litcel (Mitsubishi), Kokam, NEC Lamillion	Pilot	⇒	⇒ (↗)	⇒	↓	⇒
LiMn_2O_4 ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)	GS Yuasa, Litcel (Mitsubishi), NEC Lamillion, EnerDel	Entwicklung	⇒	↓	↑ (↗)	↑ (⇒)	⇒
LiMn_2O_4 (LiTiO_2)	Altairnano, EnerDel	Entwicklung	↓ (⇒)	↓	↗	↗	↓
$\text{LiMn}_{1,5}\text{Ni}_{0,5}\text{O}_4$ ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)		Forschung	↗	⇒	↑	-	⇒
$\text{Li}_{1,2}\text{Mn}_{0,6}\text{Ni}_{0,2}\text{O}_2$ (Graphit)		Forschung	↑	↑	↑	-	⇒

Quelle: eigene Darstellung nach [AXS08]

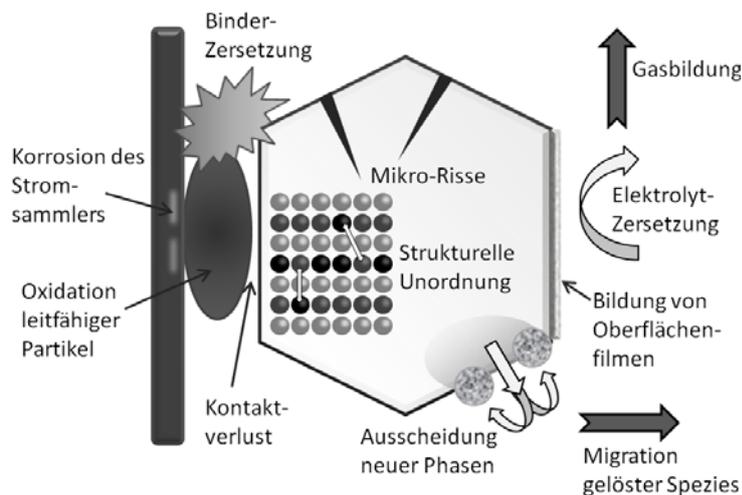
Abbildung 2-9 Vergleich und Bewertung von Lithium-Ionen Batterien unterschiedlicher Zellchemie (bei den in Klammern angegebenen Bewertungen unterscheiden sich die Expertenmeinungen)

2.3 Alterungs- und Sicherheitsaspekte auf Zellebene

Besonders bei Anwendungen im Fahrzeug rückt die Lebensdauer und Sicherheit der Batterien immer weiter in den Vordergrund. Deshalb sollen an dieser Stelle die wichtigsten Aspekte diskutiert werden, die zur Zelldegradation und zur Sicherheit auf Zellebene beitragen.

2.3.1 Degradationsmechanismen

Alterung einer Batterie bedeutet eine Verschlechterung der elektrochemischen Eigenschaften wie beispielsweise der verfügbaren Kapazität, Energie und Leistung oder der mechanischen Integrität der Zelle (z.B. Undichtigkeit). Diese Schäden oder Verluste entstehen einerseits aufgrund der dynamischen Belastung beim Laden- und Entladen, andererseits auch zeitlich bedingt durch die Lagerung der Zelle. Während das Laden und Entladen vor allem die aktiven Elektrodenmaterialien beeinflusst und irreversibel schädigen kann, tragen während der Lagerung insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Elektroden und Elektrolyt zur Alterung bei [SCH02]. Dabei unterscheiden sich die Degradationsmechanismen auf der Kathoden- und Anodenseite der Zelle. Die vielfältigen Mechanismen, die auf Seiten der Kathode zur Alterung der Zelle beitragen können, sind in Abbildung 2-10 skizziert.

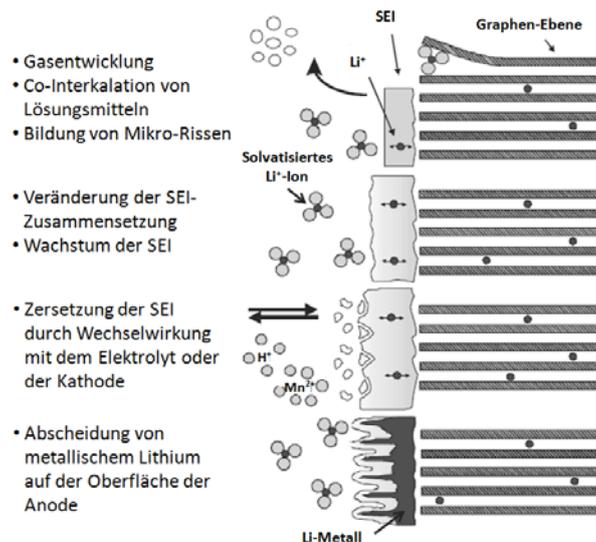


Quelle: [VET05]

Abbildung 2-10 Mögliche Degradationsmechanismen auf der Kathodenseite der Lithium-Ionen Zelle

Neben der Degradation nicht aktiver Elektrodenbestandteile, wie z.B. der Korrosion des metallischen Stromsammelers, sind die durch das Aktivmaterial der Kathode bedingten Kapazitätsverluste im Wesentlichen auf strukturelle Änderungen während des Ladens und Entlades, chemische Zersetzungsreaktionen im Elektrolyten und die Modifikation von Oberflächenfilmen zurückzuführen [VET05]. Das Ausmaß dieser Degradationseffekte ist stark von den Lade- und Betriebsbedingungen der Zelle abhängig (z.B. Stromstärke, Umgebungstemperatur), kann aber zum Teil durch Wahl einer geeigneten Mikrostruktur, z.B. der Korngröße, beeinflusst werden [JIA06]. Zu den strukturellen Einflüssen zählt die Volumenausdehnung des Materials bei der Einlagerung von Lithium-Ionen. Darüber hinaus können auch Phasenübergänge, die in Abhängigkeit der Lithium-Konzentration auftreten und zu Modifikationen

der Kristallstruktur des Kathodenmaterials führen können, von starken Volumenausdehnungen begleitet sein [BRU97]. Die aus dieser Volumenexpansion resultierenden makroskopischen Scherkräfte können zu Schäden im Gefüge des Elektrodenmaterials und dadurch zu einer Verminderung der Kapazität und Lebensdauer führen. Mögliche Wege, dieser Zerstörung der Elektrode zu begegnen, sind einerseits die Verwendung von Nanomaterialien, welche die auftretenden Volumenänderungen besser absorbieren können, oder andererseits die Einbettung des Elektrodenmaterials in eine elastische Matrix, z.B. aus Kohlenstoff [JIA06]. Wesentlich ist auch die chemische Stabilität der Materialien gegenüber dem Elektrolyten. Zersetzungsreaktionen und die Lösung des Übergangsmetalls im Elektrolyten sind z.B. ein Problem der LiMn_2O_4 -Kathode [BRU97]. Weitere Effekte an der Kathode/Elektrolyt-Grenzfläche können das Leistungsverhalten beeinträchtigen. So ist durch eine Oxidation des Elektrolyten und die Zersetzung des Leitsalzes LiPF_6 die Bildung von Oberflächenfilmen aus LiF oder Polykarbonaten möglich. Da die Übergangsmetalloxide selbst als Sauerstoffquelle dieser Oxidationsreaktionen dienen, können lithium- oder sauerstoffdefizitäre Phasen mit geringerer Li-Leitfähigkeit im Oberflächenbereich des Kathodenmaterials entstehen [VET05]. Ebenso ist durch Oberflächenreaktionen eine Gasentwicklung in der Zelle möglich. Ein neuer Ansatz, solche Grenzflächen- und Zersetzungseffekte zu verringern, ist das Aufbringen passivierender Schichten, z.B. aus ZrO_2 oder Al_2O_3 , auf die Kathodenoberfläche [LI06].



Quelle: [WOH08], [VET05]

Abbildung 2-11 Ursachen für die Alterung der Graphit-Anode einer Lithium-Ionen Batterie

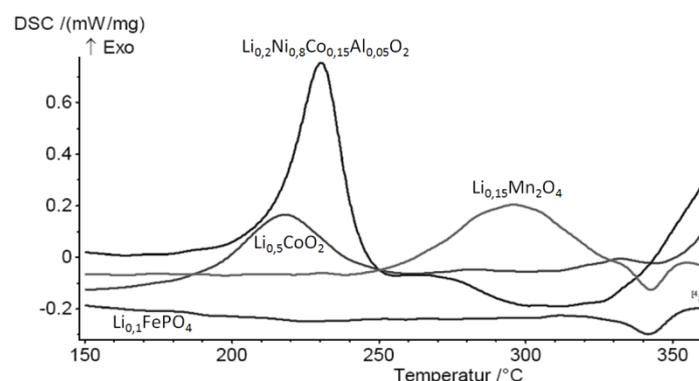
Gegenüber der starken Reduktionswirkung einer Graphit-Anode sind die heute verwendeten Elektrolyte nicht stabil, weshalb eine Zersetzung des Elektrolyten eintritt. Jedoch bilden sich bei geeigneter Wahl des Elektrolyten Deckschichten aus Produkten der Elektrolytzersetzung auf der Anodenoberfläche aus. Diese so genannte SEI (*Solid Electrolyte Interphase*) verhindert den weiteren Zersetzungsprozess und schützt die geladene Elektrode vor Korrosion [BOR03]. Wie Abbildung 2-11 veranschaulicht, ist die Zellalterung auf Seiten der Graphit-Anode wesentlich von der Stabilität dieser SEI beeinflusst. Beispielsweise kann sich bei erhöhter Temperatur die Morphologie und chemische Zusammensetzung der SEI ändern, was

im schlimmsten Fall zu deren Zerstörung führen kann. Ist bei zu tiefen Temperaturen die Li^+ -Diffusion eingeschränkt oder ist bei hohen Strömen die Li^+ -Diffusion nicht ausreichend groß, so kann sich metallisches Lithium auf der Anodenoberfläche abscheiden. Durch die chemische Reaktion dieses Lithium-Metalls mit dem Elektrolyten wird die Zellalterung ebenfalls beschleunigt und die Sicherheit beeinträchtigt. Aber auch Wechselwirkungen mit der Kathode sind möglich. In einer Zelle mit LiMn_2O_4 -Kathode können im Elektrolyten gelöste Mn^{2+} -Ionen die SEI der Graphitanode beeinträchtigen [VET05].

2.3.2 Zellsicherheit

Nach einigen spektakulären Rückrufaktionen von Lithium-Ionen Batterien in Notebook-PCs fürchten Kunden wie Hersteller um die Sicherheit dieser Batterien. Die Lithium-Ionen Batterie kombiniert Materialien hohen Energieinhalts mit brennbaren Elektrolyten auf engstem Raum. Dies kann vor allem dann zu Zwischenfällen führen, wenn die Zellen extremen äußeren Einflüssen ausgesetzt sind, für die sie ursprünglich nicht ausgelegt wurden. Durch Hitze, Überladen, externe Kurzschlüsse oder mechanische Deformationen können spontane exotherme Reaktionen ausgelöst werden, die zur Entzündung oder Explosion der Batterie führen können. Die Zellen werden deshalb verschiedenen Sicherheitstests unterzogen, die sich in elektrische Tests (z.B. schnelles Laden- und Entladen bei hohen Strömen oder externer Kurzschluss), mechanische Tests (z.B. Deformation der Zelle, Fallen aus großer Höhe oder der Nageltest, bei dem ein Nagel durch die Zelle getrieben wird) sowie Versuchen unter extremen Umgebungsbedingungen (z.B. Erhitzung der Zelle oder Untersuchungen der Dichtheit im Flüssigkeitsbad) untergliedern [SCH02].

Während des Betriebs der Zelle entsteht Wärme, die nach außen abgeführt werden muss. Erwärmt sich die Zelle über eine bestimmte Temperatur (ca. $130 - 150^\circ\text{C}$), so können exotherme Reaktionen zwischen Elektroden und Elektrolyt einsetzen, die zusätzliche Wärme generieren. Bei noch höheren Temperaturen kann eine thermische Zersetzung der Elektroden eintreten. Dieser Effekt ist stark abhängig von der Wahl der Elektrodenmaterialien (s. Abbildung 2-12). Während $\text{Li}_{0,2}\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ bereits bei ca. 230°C exotherm reagiert, zeigt $\text{Li}_{0,1}\text{FePO}_4$ keine exotherme Reaktion im geladenen Zustand.



Quelle: [WOH07]

Abbildung 2-12 Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK oder engl. DSC) verschiedener Kathodenmaterialien im geladenen Zustand

Steigt durch diese Prozesse der Druck in der Zelle, so kann mechanisches Versagen zu inneren Kurzschlüssen oder zum Austritt und zur Entzündung des Elektrolyten führen. Eine solche Kettenreaktion wird als „*thermal runaway*“ bezeichnet.

Verschiedene Maßnahmen können zur Sicherheit auf Zellebene beitragen [BAL06]:

- **Elektrolyt-Additive:**

Als Kompromiss, um den hohen Ansprüche an die Leistungsfähigkeit der Zelle gerecht zu werden, müssen heute organische Elektrolytlösungen verwendet werden, die auch entflammbar sind. Um dieses Risiko zu reduzieren, werden den gängigen Elektrolyten entzündungshemmende Additive, z.B. Trimethylphosphat, beigefügt.

- **„Shutdown“-Separatoren:**

Schmilzt der Separator bei einer Überhitzung der Zelle, so hat dies einen inneren Kurzschluss zur Folge, weshalb bevorzugt Separatoren mit hoher Schmelztemperatur eingesetzt werden. Außerdem kann die Verwendung so genannter „*Shutdown*“-Separatoren die Zellsicherheit maßgeblich erhöhen. Diese verschließen ihre Mikroporen unter Wärmeeinwirkung, so dass ein weiterer Ionen-transport verhindert und somit der Stromfluss unterbrochen wird.

- **„Redox-Shuttles“**

„*Redox-Shuttles*“ sind ein vielversprechender Mechanismus zur Vermeidung einer Überladung der Zelle. Diese dem Elektrolyten beigemischten Moleküle werden bei überhöhter Ladespannung an der Kathode oxidiert, wandern dann zur Anode, wo sie durch eine Reduktionsreaktion wieder ihren ursprünglichen Zustand annehmen. Somit wird die überschüssige Ladung in einer Art kontrolliertem inneren Kurzschluss abgeführt.

- **„Shutdown“-Additive:**

Beim Überladen der Zelle setzen die dem Elektrolyten beigefügten „*Shutdown*“-Additive entweder Gase frei, woraufhin ein drucksensibler Schalter den Stromfluss unterbricht, oder sie behindern den Ionen-transport im Elektrolyten durch eine spontane Polymerisation.

- **Sicherheitsventile:**

Sie öffnen bei steigendem Zell-Druck, um entstandene Gase entweichen zu lassen.

- **PTC und CID (*Positive Temperature Coefficient-* bzw. *Current Interrupt Device*):**

Das in den Stromkreislauf integrierte PTC erhöht seinen Widerstand beim Erreichen bestimmter Temperaturen oder Ströme und stoppt somit einen „*thermal runaway*“. Wenn durch Gasbildung in der Zelle ein vorgegebener Druck überschritten wird, trennt ein CID die Verbindung zwischen positiver Elektrode und der Kontaktierung.

- **Schmelzsicherung:**

Durch die Erwärmung bei zu hohen Strömen schmilzt die integrierte Sicherung.

2.4 Von einzelnen Zellen zu Modulen und Batteriesystemen

Jährlich werden von zahlreichen Produzenten mehrere hundert Millionen Lithium-Ionen Batterien für den Gebrauch in Mobiltelefonen, Notebook PCs oder Digitalkameras hergestellt. Während Anwendungen im Bereich der Gebrauchselektronik relativ kleine Zellen mit Energieinhalt von weniger als 100 Wh benötigen, erfordert der Einsatz von Lithium-Ionen Batterien im Automotivbereich größer dimensionierte Zellen mit höherer Energie und Leistung. Die grundlegenden Fertigungsschritte unterscheiden sich aber nur wenig voneinander und gelten sowohl für die Produktion kleinerer Zellen als auch für die Herstellung großer Li-Ionen Zellen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Aus diesen Lithium-Ionen Zellen werden zunächst durch Parallel- oder Serienschaltung Module aufgebaut. Mehrere dieser Module können dann zu einem Batteriesystem („battery pack“) zusammengefasst werden. Diesen prinzipiellen Aufbau großer Lithium-Ionen Batteriesysteme zeigt Abbildung 2-13 [SCH02].

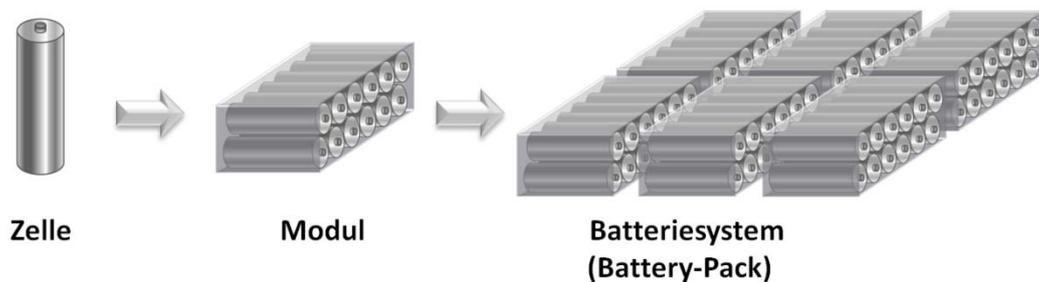
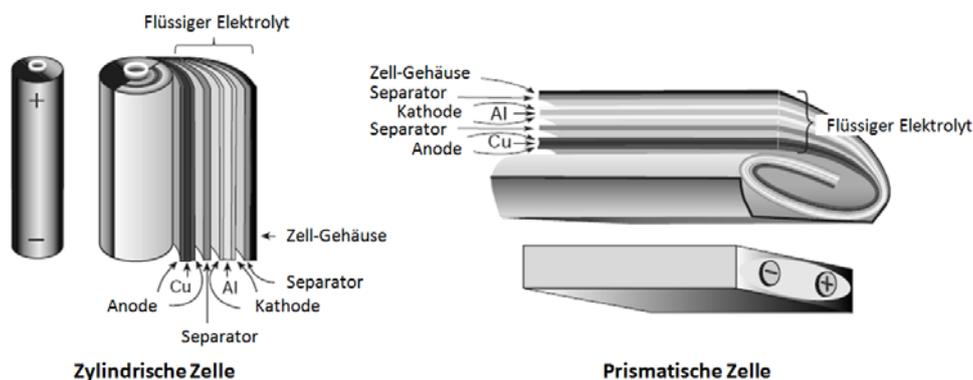


Abbildung 2-13 Von der Zelle über das Modul zum Batteriesystem

2.4.1 Produktion von Lithium-Ionen Zellen

Lithium-Ionen Zellen existieren in verschiedenen Bauformen. Zellen mit flüssigem Elektrolyt werden meist in zylindrischer oder prismatischer Form hergestellt (s. Abbildung 2-14).



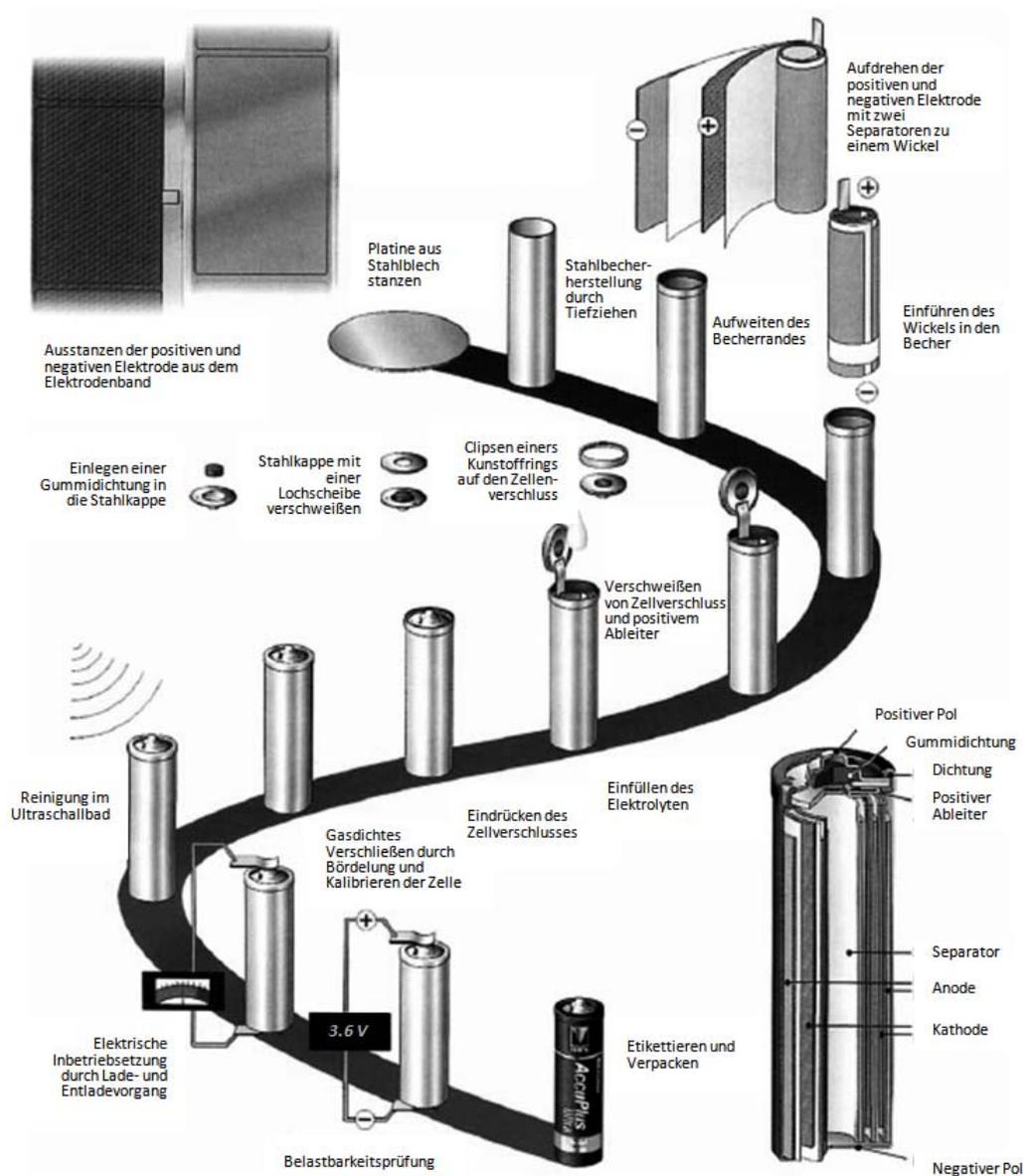
Quelle: [TAR01]

Abbildung 2-14 Schematische Darstellung von Zellen in zylindrischer und prismatischer Bauform

Während zylindrische Zellen sehr gute mechanische Stabilität aufweisen und deshalb hohem innerem Druck standhalten können, sind prismatische Zellen in dünnerer Bauform herzustellen.

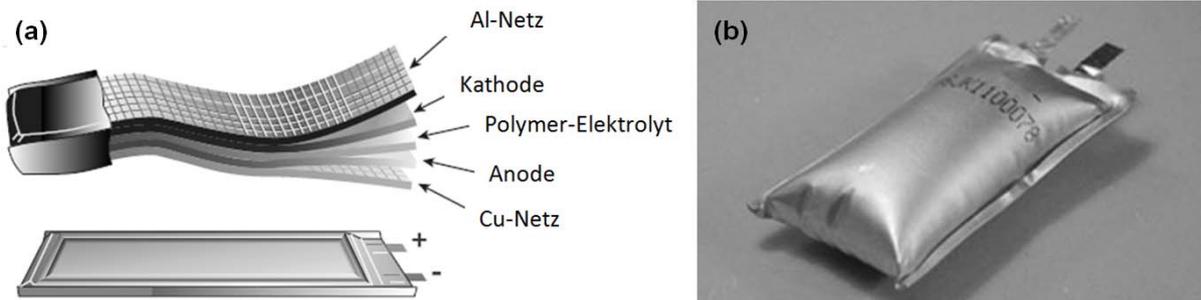
len und in Modulen einfacher zu stapeln. Jedoch ist ihre mechanische Stabilität gegenüber zylindrischen Zellen geringer bei gleichzeitig etwas höheren Produktionskosten [SCH02].

Die Prozesse zur Produktion prismatischer und zylindrischer Zellen sind sehr ähnlich. Die auf Metallfolien beschichteten Elektroden werden zunächst zusammen mit der Separatorfolie aufgewickelt und dann in ein metallisches Gehäuse eingeführt, das nach dem Einfüllen des Elektrolyten dicht verschlossen wird. Nach der Messung der Spannung und Impedanz der Zellen wird die Batterie im so genannten Formationsprozess zum ersten Mal geladen. Da sich beim ersten Laden die SEI der Graphit-Anode ausbildet, ist die korrekte Durchführung dieses Formationsprozesses für die späterer Leistungsfähigkeit der Batterie von größter Bedeutung [SCH02]. Sie einzelnen Schritte zum Aufbau zylindrischer Zellen sind in Abbildung 2-15 schematisch dargestellt.



Quelle: [WIN99]

Abbildung 2-15 Einzelne Produktionsschritte bei der Herstellung zylindrischer Zellen



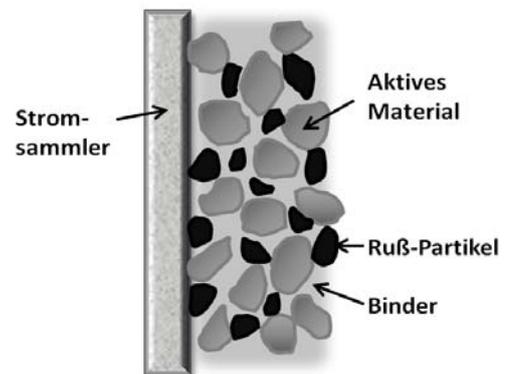
Quelle:[TAR01] und [BAT08]

Abbildung 2-16 Aufbau einer Lithium-Ionen-Polymerzelle (a) und durch Gasentwicklung aufgeblähter Softpack (b)

Während für die notwendige Dichtheit von Zellen mit flüssigem Elektrolyten metallische Gehäuse verwendet werden, die hohen mechanischen Belastungen standhalten, aber starr und schwer sind, können Lithium-Polymerbatterien in leichter und flexibler Bauform bei geringen Kosten produziert werden. Die Komponenten der Polymerbatterie lassen sich preiswert als Schichtfolien mit einer Dicke von weniger als 100 μm herstellen. Den Zellaufbau zeigt Abbildung 2-16 (a). Die Lithium-Polymerbatterie kann auch als „Softpack“ in einfache Aluminium-Verbundfolie eingeschweißt werden. Zwar haben einen deutlichen Gewichtsvorteil, sind räumlich sehr effizient zu stapeln und können durch ein großes Aspektverhältnis Wärme sehr gut nach außen abgeben, als sicherheitskritisch gilt jedoch das Aufblähen der Zelle bei Gasentwicklung (s. Abbildung 2-16 (b)) sowie die geringere mechanische Stabilität [BAT08].

2.4.2 Elektrodenherstellung

Ein sehr sensibler Schritt während der Zellproduktion ist die Herstellung der Elektroden. Die Elektroden werden in einem Beschichtungsprozess auf einen Stromsammler (z.B. Aluminium- oder Kupferfolie) aufgebracht. Neben dem Aktivmaterial besteht diese Schicht aus einem polymeren Binder, der die Elektrodenstruktur zusammenhält und die Haftung am Stromsammler gewährleistet, sowie zum Teil aus Additiven, welche die Leitfähigkeit der Elektrode erhöhen (z.B. Ruß-Partikel) [CED98]. Der typische Aufbau einer Kathode ist in Abbildung 2-17 dargestellt.



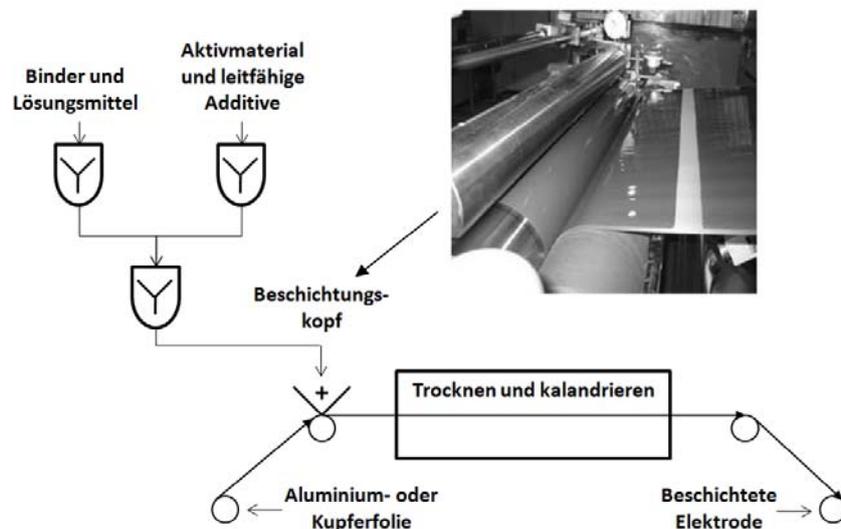
Quelle: eigene Darstellung nach [CED98]

Abbildung 2-17 Schematischer Aufbau einer Kathode

Beim Design der Elektroden entscheidet sich auch, ob eine Zelle für Hochleistungs- oder Hochenergieanwendungen konzipiert ist. Um hohe Ströme in einer Hochleistungszelle zu ermöglichen, werden dünne Elektroden (Größenordnung 30 μm) mit hoher Porosität, großer Gesamtoberfläche und kleiner Partikelgröße verwendet, wodurch die Diffusionspfade für Li^+ -Ionen verkürzt werden. Hochenergiezellen erfordern hingegen größere Mengen aktiver Elektrodenmaterialien mit hoher Kapazität, so dass Dicke Elektroden (Größenordnung 200 μm) Verwendung finden [WOH08]. Der relative Anteil passiver Zellkomponenten wie Stromsamm-

ler, Separator oder Zellgehäuse ist dadurch bei Hochleistungszellen wesentlich höher als bei der Hochenergiezelle [GAI00].

Die prinzipiellen Herstellungsprozesse, wie in Abbildung 2-18 dargestellt, sind jedoch für Hochenergie- und Hochleistungselektroden identisch. Die Komponenten werden in einem ersten Schritt mit einem Lösungsmittel (z.B. Polyvenyldifluorid) zu einer Paste vermischt. Diese wird dann über ein Beschichtungsverfahren (z.B. durch *Reverse Roll Coating*) auf Kupfer- oder Aluminiumfolie aufgebracht. In einem anschließenden Trocknungsvorgang werden Lösungsmittelreste entfernt. Beim darauffolgenden Kalandrieren werden die Schichtdicke und die Dichte der Schicht präzise eingestellt.



Quelle: [SCH02], [PRA08]

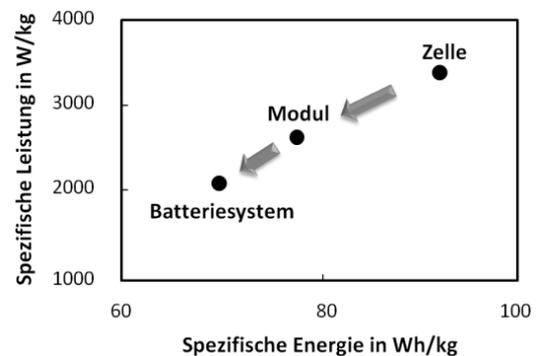
Abbildung 2-18 Beschichtungsprozess zur Anoden- und Kathodenherstellung

Die Eigenschaften und Qualität der Elektroden bestimmt wesentlich das spätere Leistungsverhalten der Batterie. Schlüsselparameter für das Design der Elektroden sind [SCH02]:

- Qualität der Ausgangsmaterialien (z.B. chemische Zusammensetzung, Verunreinigung, Partikelgrößen und deren Verteilung)
- Haftvermögen der Schicht auf dem Stromsammler
- Flexibilität des Binders, um die beim Laden und Entladen auftretenden Volumenänderungen des aktiven Materials zu kompensieren
- Der Aufbau der Elektrode muss eine gleichmäßige Stromdichte über die gesamte Elektrode gewähren
- Guter Kontakt zwischen den Partikeln des aktiven Elektrodenmaterials und den Additiven zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit
- Kapazität der Elektrode (bestimmt durch das Verhältnis von aktivem Material zu elektrochemisch inaktiven Bestandteilen wie Binder, Leitfähigkeitsadditiven und Stromsammler)

2.4.3 Aufbau von Modulen und Batteriesystemen

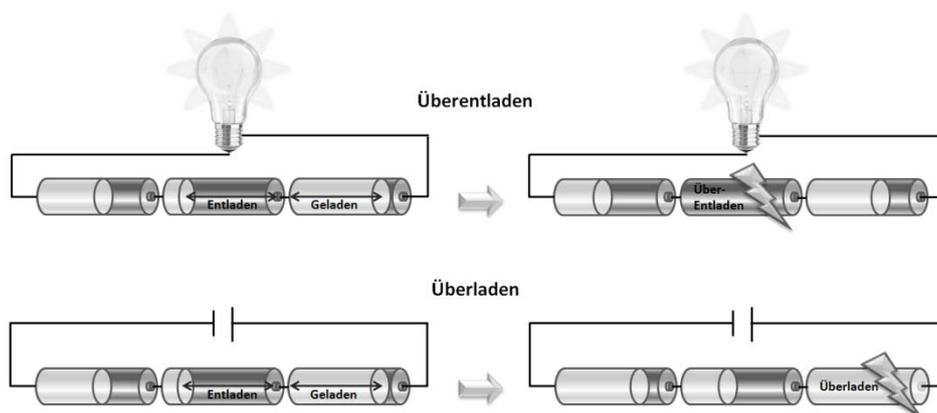
Aus den einzelnen Zellen werden zunächst Module, dann Batteriesysteme aufgebaut. Für Anwendungen mit hohen Energieanforderungen sind mehrere Zellen in Serie geschaltet, wodurch sich die Spannung der einzelnen Zellen addiert, jedoch beim Ausfall einer Zelle der Stromkreislauf komplett unterbrochen wird. Durch Parallelschaltung von Zellen werden hingegen höhere Ströme erzielt. Wegen des zusätzlichen Materialaufwands verringert sich dabei in jedem Schritt der relative Anteil an aktivem Elektrodenmaterial, so dass, wie in Abbildung 2-19 dargestellt, auch die spezifische Energie und spezifische Leistung entsprechend abnimmt.



Quelle: [JOS08]

Abbildung 2-19 Verluste an spezifischer Leistung und Energie beim Aufbau von Modulen und Batteriesystemen

Lithium-Ionen Zellen können nur in bestimmten, von der Zellchemie abhängigen Spannungsbereich sicher betrieben werden (die Zellspannung ist eine Funktion des Ladungszustands der Zelle, s. Abbildung 2-2 (a)). Wird dieser Spannungsbereich über- oder unterschritten, d.h. wird die Zelle überladen bzw. überentladen, so können irreversible Schäden in der Zelle auftreten, welche die Lebensdauer verkürzen und vor allem bei der überladenen Zelle zum Sicherheitsrisiko werden. Werden Zellen miteinander verschaltet, in Serie oder parallel, so steigt die Gefahr, dass eine oder mehrere Zellen überladen bzw. überentladen werden (s. Abbildung 2-20), insbesondere dann, wenn die Impedanzen und Kapazitäten der einzelnen Zellen voneinander Abweichen.

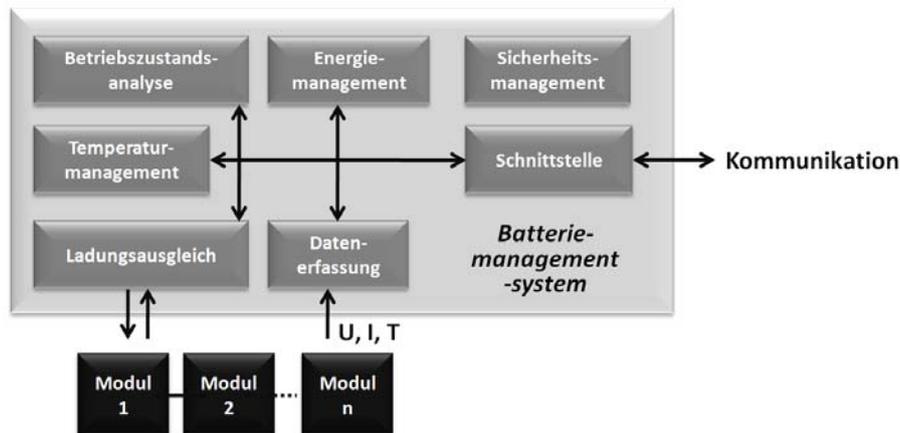


Quelle: eigene Darstellung nach [DAH05]

Abbildung 2-20 Gefahr des Überladens bzw. Überentladens einzelner Zellen eines Moduls

Mit steigender Zahl von Zellen werden deshalb Systeme zur Überwachung und zum Management der Batterie notwendig. In die Module sind dazu Elektronikkomponenten wie z.B. Temperatur-, Spannungs- und Stromsensoren integriert. Auf der Ebene des Batterie-Packs übernehmen Controller die Überwachung von Temperatur- und Ladezustand, Schnittstellen

dienen zur Kommunikation mit externen Systemen. Die elektronische Steuerung ist i.d.R. in einem Batteriemanagementsystem (BMS) zusammengefasst, um durch intelligenten, optimierten Betrieb die Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Batteriesystems zu erhöhen [NAU06].



Quelle: [JOS08]

Abbildung 2-21 Grundfunktionen eines Batteriemanagementsystems

Ein BMS erfüllt die folgenden Funktionen (s. Abbildung 2-21) [NAU06], [JOS08], [PLE04]:

- **Bestimmung des Batteriezustandes:**

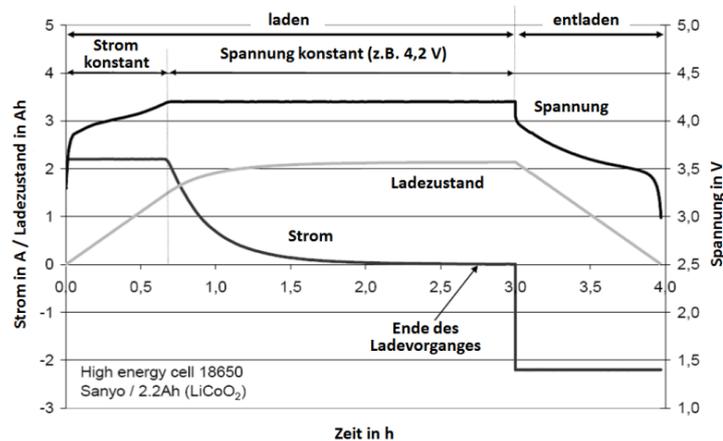
Das BMS muss den inneren Zustand der Batterie kennen, beispielsweise um die verfügbare Energie zur Beschleunigung, die Fähigkeit zur Aufnahme rekuperativer Bremsenergie oder die Restreichweite eines Fahrzeuges zu bestimmen. Dieser innere Zustand kann physikalisch als ein Zustandsvektor aufgefasst werden, der die Größen Temperatur, Alter, Zyklenzahl, Innenwiderstand und Ladezustand der Elemente enthält. Wegen der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen diesen Größen ist die Ermittlung des Batteriezustandes ein komplexes Problem. Beispielsweise kann über die Messung von Spannungscharakteristik und Zellimpedanz in numerischen Modellierungsverfahren, z.B. über Ersatzschaltbilder der Batterie, der Batteriezustand abgeleitet werden. Neue Modellierungsverfahren, basierend auf Fuzzy-Logik, integrieren auch Erfahrungswerte in die Analyse des Batteriezustandes [SCH02].

- **Steuerung und Kontrolle des Lade- und Entladeprozesses:**

Ungleiche Modul- oder Zellspannungen werden vom BMS erkannt und ausgeglichen, da ansonsten Schädigungen auftreten können (vgl. Abbildung 2-20). Beispielsweise wird beim „*Shunting*“ oder „*By-passing*“ durch ein steuerbares Schaltelement der Ladestrom an bereits geladenen Zellen vorbeigeführt, während schwächere Zellen weiterhin den höheren Ladestrom erhalten.

Für eine hohe Lebensdauer sind batterieschonende Ladeverfahren notwendig. Beim Standardalgorithmus, dem so genannter Constant-Current/Constant-Voltage CC/CV-Algorithmus, wird die Lithium-Ionen Batterien zunächst bei konstantem Strom (ca. 1C

bis 2C) geladen. Ist die vorgegebene Maximalspannung beinahe erreicht, so nimmt der Strom bei konstanter Spannung kontinuierlich ab, bis der Ladevorgang bei Strömen $< 0,03C$ beendet ist (s. Abbildung 2-22). Da dieses Verfahren sehr zeitaufwendig ist, wird die Verwendung von komplexeren Schnellladealgorithmen auf Basis gepulster Ströme untersucht [SCH02].



Quelle: [JOS08]

Abbildung 2-22 Laden einer Lithium-Ionen Zelle im Constant-Current/Constant-Voltage-Verfahren

Um die Zellen vor Tiefentladung zu schützen, wird der Strom und somit die Leistung bei niedrigem Ladezustand begrenzt (bei Fahrzeugbatterien kann die Strombegrenzung in Gefahrensituationen über das Fahrpedal aufgehoben werden).

- **Sicherheitsmanagement:**

Durch die Strom- und Spannungsüberwachung können Kurzschlüssen erfasst und defekte Zellen oder Module detektiert werden. Ein Sicherheitsschaltkreis entscheidet anhand von Kriterien wie Überladung oder Überentladung von Zellen, Kurzschlüssen oder erhöhten Temperaturen über den weiteren Betrieb bei Zwischenfällen.

- **Temperaturmanagement:**

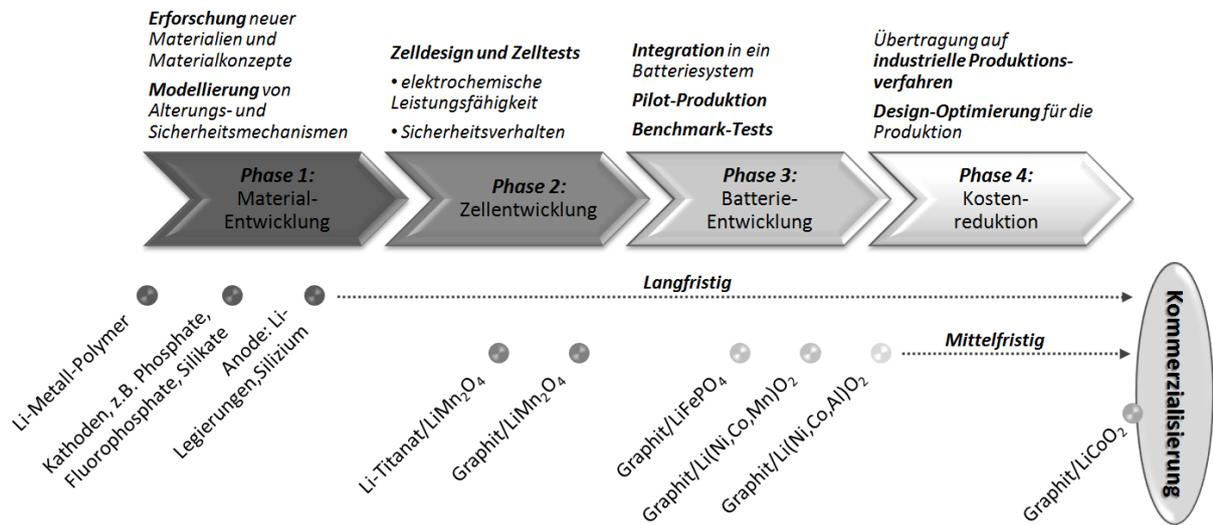
Die Leistungsfähigkeit der Zellen ist sehr stark von der Temperatur abhängig, weshalb sie möglichst in ihrem optimalen Temperaturbereich betrieben werden sollten. Durch die Wärmeentwicklung im Betrieb sind die Temperaturen im Innern des Batteriesystems höher als am Rand. Das BMS steuert ein konvektives Kühlsystem, das entweder mit Luft, Wasser oder anderen Kühlflüssigkeiten betrieben wird. Auch ein Heizen des Batteriesystems vor Betriebsbeginn ist bei sehr tiefer Umgebungstemperatur möglich.

- **Kommunikation mit externen Systemen:**

Über Schnittstellen kommuniziert das BMS mit seiner Umgebung, z.B. mit der Motorsteuerung oder mit Diagnosegeräten.

2.5 Weiterentwicklung der Lithium-Ionen Batterie

Die Zellentwicklung durchläuft verschiedene Phasen bis zur Kommerzialisierung, wobei von der ersten Idee eines neuen Materials bis zum Markterfolg 20 Jahre vergehen können (s. Abbildung 2-23). Ein großer Teil der Forschung konzentriert sich heute noch auf die Entwicklung neuer Materialien und Materialkonzepte.



Quelle: eigene Darstellung nach [DOE07], [AXS08]

Abbildung 2-23 Phasen in der Entwicklung neuer Lithium-Ionen Batterien

2.5.1 Neue Materialkonzepte

Wichtige Batterieeigenschaften wie die Kalender- und Zyklenlebensdauer sowie die Sicherheit der Zelle sind wesentlich durch die Prozesse an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt sowie die Stabilität dieser Grenzfläche bestimmt, weshalb die Entwicklung von Elektrolyten und die Untersuchung von Grenzflächeneigenschaften und Alterungseffekten einen wichtigen Platz in der Grundlagenforschung einnimmt. Zur Optimierung dieser Eigenschaften kommen, wie in Abbildung 2-24 skizziert, neuartige Materialkonzepte zum Einsatz:

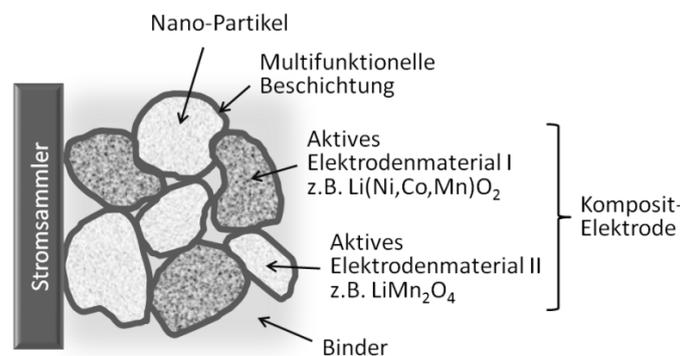


Abbildung 2-24 Neue Materialkonzepte zur Verbesserung der Elektrodeneigenschaften

- **Multifunktionelle Oberflächenbeschichtung (Coatings):**

Durch das Aufbringen von Oberflächenschichten werden Elektrodenmaterialien passiviert und somit chemisch gegenüber dem Elektrolyten stabilisiert [LI06]. Eine Beschichtung des Aktivmaterials mit leitfähigen Substanzen wie z.B. Graphit, so genanntes „*nano-painting*“, kann eine geringe intrinsische elektrische Leitfähigkeit der Aktivmaterialien überwinden [WOH07].

- **Neue Synthesemethoden und Nanomaterialien:**

Ein weiterer vielversprechender Ansatz besteht in der Erforschung neuartiger Synthesemethoden. Der kontrollierte Einfluss auf die Mikrostruktur und Textur der Elektrodenmaterialien kann zu verbessertem Leistungsverhalten der gesamten Batterie führen. Durch die Synthese poröser Kathoden mit hoher Kontaktfläche zum Elektrolyten sind beispielsweise zum Teil erhebliche Kapazitätssteigerungen möglich [TAR01]. Viel diskutiert sind auch die Möglichkeiten, die sich aus dem Einsatz von Nanomaterialien ergeben [JIA06], [LIU06], [STU06]. Deren stark vergrößerte Oberfläche, reduzierte Diffusionslängen für den Li-Transport und erhöhte mechanische Stabilität gegenüber der Expansion/Kontraktion der Gitterparameter beim Laden und Entladen sollen Speicherkapazitäten vergrößern, die Strombelastbarkeit erhöhen und die Lebensdauer der Batterie verlängern. Dabei stehen verschiedenste Nanostrukturen wie z.B. Nanopartikel, Nanotubes oder Nanowires in der Diskussion. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass diesen positiven Effekten auch Sekundärreaktionen aufgrund der höheren Oberfläche, z.B. Zersetzungsreaktionen im Elektrolyten, gegenüberstehen.

- **Komposite:**

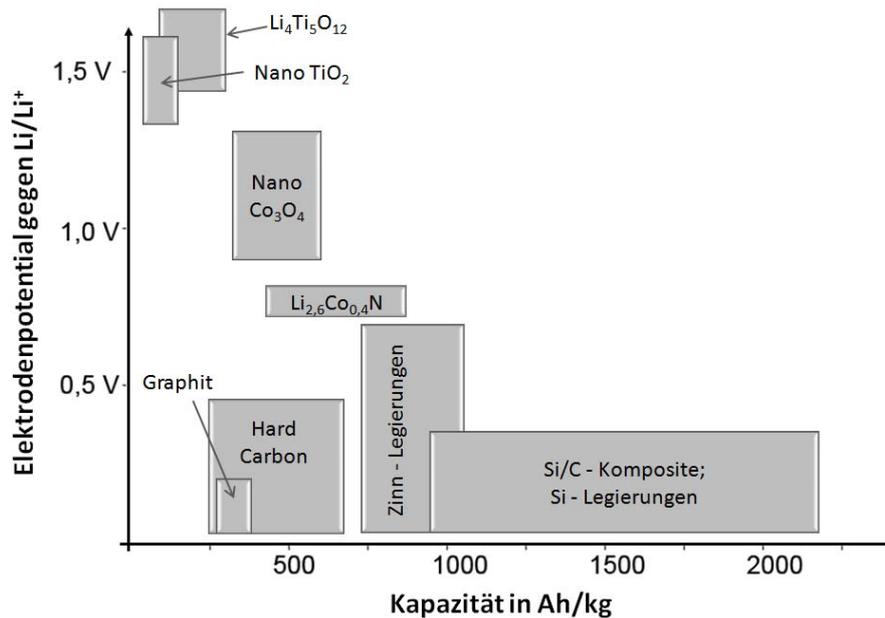
Es besteht die Möglichkeit, Komposite durch die Verwendung verschiedener Aktivmaterialien herzustellen, z.B. eine Kathode bestehend aus $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Mn})\text{O}_2$ und LiMn_2O_4 Partikeln, wobei die Vorteile der einzelnen Materialien kombiniert werden sollen [WIN07]. Ebenso können Aktivmaterialien beispielsweise in eine Matrix aus Kohlenstoffatomen eingebettet werden, wodurch starke Volumenänderungen bei der Ein- und Auslagerung von Li^+ -Ionen besser kompensiert und somit die Elektroden mechanisch stabilisiert werden können.

2.5.2 Neue Materialien

Die Leistungsfähigkeit einer Lithium-Ionen Batterie, die sich in Kenngrößen wie Zellspannung, Kapazität, Energie- oder Leistungsdichte ausdrückt, steht in direktem Bezug zu den intrinsischen Materialeigenschaften der positiven und negativen Elektrode. Ein wesentlicher Teil der Forschung konzentriert sich deshalb auf die Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien mit verbesserten Eigenschaften, insbesondere im Bereich der heute als imitierende Komponente betrachteten Kathodenmaterialien.

Anodenmaterialien:

Zahlreiche neue Anodenmaterialien werden derzeit erforscht. Eine Übersicht zu potentiellen Materialien gibt Abbildung 2-25.



Quelle: [WOH07]

Abbildung 2-25 Neue Anodenmaterialien für Lithium-Ionen Batterien

- **Kohlenstoffbasierte Anoden:**

Auch die etablierten kohlenstoffbasierte Anodenmaterialien werden weiter entwickelt. Beispielsweise wird durch Oberflächenmodifikationen versucht, die Materialien chemisch zu stabilisieren [FU06]

- **Legierungen:**

Einige Metalle und Halbleiter, z.B. Zinn oder Silizium, reagieren mit Lithium unter Bildung einer Legierung und ermöglichen dabei weit höhere spezifische Kapazitäten als konventionelle Graphitanoden (die theoretische Kapazität beispielsweise von Li_{4,4}Si liegt bei 4200 mAhg⁻¹). Da diese Materialien sehr große Volumenänderungen von bis zu 200% beim Laden- und Entladen erfahren, welche die Elektrode durch Rissbildung zerstören, sind zu ihrem Einsatz neue Materialkonzepte erforderlich. Einerseits werden die Elektroden aus Nanopartikeln aufgebaut, welche die auftretenden mechanischen Spannungen besser absorbieren können, zum anderen besteht die Möglichkeit zur Verwendung von Kompositen, z.B. aus Nano-Siliziumpartikeln in einer Kohlenstoffmatrix (Si/C-Komposite). Der Kohlenstoff bildet hierbei einen Puffer, der die Volumenausdehnung kompensiert [PAT08].

- **Oxide und Nitride:**

Andere Verbindungen wie z.B. $\text{Li}_{3-x}\text{Co}_x\text{N}$ besitzen eine hohe und beim Zyklieren stabile Kapazität ($\sim 600 \text{ mAhg}^{-1}$), jedoch ist die Verwendung dieser sehr feuchtigkeitsempfindlichen Materialien durch aufwendige Herstellverfahren eingeschränkt [SHO96]. Auch einfache Metalloxide MO ($M = \text{Fe, Co, Ni, Cu}$ etc.) können bei niedrigem Elektrodenpotential reversibel mit Lithium reagieren und sind somit als potentielle Anodenmaterialien einsetzbar [POI02].

Kathodenmaterialien:

- **Phosphate:**

Neben Verbindungen wie $\text{LiFe}_{0,95}\text{Mg}_{0,05}\text{PO}_4$, die aus LiFePO_4 durch teilweise Substitution von Eisen entstehen, werden heute einige weitere von dieser Verbindung abgeleitete Phosphate untersucht. LiMnPO_4 erlaubt höhere Zellspannungen, leidet aber heute unter einer zu geringen elektrischen Leitfähigkeit, was zukünftig durch die Herstellung in Form von Nano-Partikeln überwunden werden soll [GOO07]. LiCoPO_4 ist mit einem Elektrodenpotential von 4,8 V vs. Li/Li^+ in konventionellen organischen Elektrolyten nicht stabil [BRA04].

Intensiv geforscht wird derzeit an $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$, einer Verbindung mit so genannter NASICON-Struktur, deren reversibel verfügbare Kapazität im Experiment dem theoretischen Wert von 197 mAh/g sehr nahe kommt [BAR07]. Auch andere Phosphate wie LiVOPO_4 [AZM05] oder LiMP_2O_7 ($M = \text{V, Fe}$) werden derzeit als potentielle Kathodenmaterialien diskutiert [WUR02].

- **Silikate:**

Verbindungen wie Li_2MSiO_4 ($M = \text{Fe, Mn}$) werden als kostengünstige Alternativen zu den heutigen Materialien betrachtet. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ zeigt eine Kapazität von ca. 140 mAh/g bei einem Elektrodenpotential von 2,8 V vs. Li/Li^+ , $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ ca. 120 mAh/g bei einem Potential von 3,2 V vs. Li/Li^+ . Doch auch ihr wesentlicher Nachteil, den es zunächst zu überwinden gilt, ist ihre geringe intrinsische elektrische Leitfähigkeit [DOM08].

- **Fluorophosphate:**

Zu dieser relativ neu untersuchten Verbindungsgruppe zählen Materialien wie LiVPO_4F [GOV06], das bei 4,2 V vs. Li/Li^+ eine Kapazität von ca. 150 mAh/g besitzt. Auch über $\text{Li}_5\text{M}(\text{PO}_4)_2\text{F}_2$ -Verbindungen ($M = \text{V, Cr}$) wird berichtet [YIN06].

Elektrolyte und Separatoren

Auch weiterhin wird intensiv im Bereich organischer Flüssigelektrolyten und polymerer Elektrolyten geforscht. Die größten Herausforderungen in der Entwicklung verbesserter Elektrolytlösungen ist die elektrochemische Stabilität des Elektrolyten bei hohen Zellspannungen (z.B.

in 5 V Systemen), die Verbesserung der Tieftemperaturleitfähigkeit und die Leistungsfähigkeit bei hohen Temperaturen mit minimalen Kapazitätsverlusten sowie die Verbesserung der Sicherheitseigenschaften, z.B. der Entflammbarkeit des Elektrolyten. Neue Leitsalze, z.B. die Kombination von LiPF_6 + $\text{LiPF}_3(\text{CF}_2\text{CF}_3)$ oder das neue Salz LiBOB, wurden entwickelt. Die einfachste, günstigste und effektivste Möglichkeit zur Verbesserung der Elektrolytlösung ist die Verwendung oberflächenaktiver Additive [ZHA06]. Außerdem ist eine Entwicklungstendenz in Richtung amorpher und keramischer Festkörperelektrolyte festzustellen. Festkörperelektrolyte leiden zwar unter einer geringeren ionischen Leitfähigkeit, was aber durch deren Herstellung in Form dünner Schichten überwunden werden kann. Da sie ausschließlich Li^+ -Ionen leiten, können unerwünschte Nebenreaktionen oder Zersetzung der Aktivmaterialien der Elektroden im Elektrolyt ausgeschlossen werden. Da außerdem die entflammbare Flüssigelektrolyte ersetzen, kann die Zellsicherheit durch die Verwendung von Festkörperelektrolyten erheblich gesteigert werden. Da sie elektronisch isolierend wirken, kann auf die Verwendung eines Separators verzichtet werden. Ein weiteres spannendes und vielversprechendes Forschungsgebiet im Bereich der Elektrolyte sind die so genannten „ionischen Flüssigkeiten“. Diese zeichnen sich durch ihre Nicht-Entflammbarkeit, hohe thermische und elektrochemische Stabilität und gute ionische Leitfähigkeit aus [SCH02].

Der Schwerpunkt in der Entwicklung von Separatoren liegt heute im Bereich der Kostensenkung durch Optimierung der Herstellungsverfahren [HOW08].

3 Lithium-Ionen Batterietechnologie für Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Noch in der Frühzeit des Automobils waren batteriebetriebene Elektromobile den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor überlegen. So war es im Jahr 1899 ein Elektrofahrzeug, das erstmals die 100 km/h Geschwindigkeitsgrenze für Straßenfahrzeuge überschritt [WIK08]. Nach 1900 wurde das Elektroauto, angewiesen auf schwere Blei-Batterien mit langer Ladedauer und begrenzter Reichweite, jedoch vom kraftstoffbetriebenen Automobil verdrängt. Heute, gut ein Jahrhundert später, erfahren batterieelektrische Fahrzeuge vor dem Hintergrund drohender Klimaveränderungen und drastisch steigender Rohölpreise eine Renaissance. Vor allem Fahrzeugkonzepte mit Hybridantrieben, welche die Stärken von Elektromotoren mit anderen Energiewandlern vereinen, werden heute für eine größere Marktverbreitung favorisiert. Ermöglicht wird diese Entwicklung durch neue Akkumulatoren, insbesondere im Bereich der Lithium-Ionen Technologie.

Aufbauend auf einer Einführung in das Gebiet batterieelektrischer Fahrzeuge und Antriebskonzepte (Kapitel 3.1) sollen allgemeine technische Anforderungen an Fahrzeugbatterien formuliert (Kapitel 3.2) und die Vorteile der Lithium-Ionen Batterie gegenüber anderen Batterietechnologien aufgezeigt werden (Kapitel 3.3). Spezifische Anforderungen an die Batteriesysteme von Hybrid-, Elektro- und Plug-In Hybridfahrzeug werden anschließend dem aktuellen Entwicklungsstand der Lithium-Ionen Technologie gegenübergestellt (Kapitel 3.4). Die Vorstellung einer Roadmap zur zukünftigen Forschung und Entwicklung im Bereich der Fahrzeugbatterien schließt diesen Teil der Arbeit ab (Kapitel 3.5).

3.1 Batterieelektrische Fahrzeuge und Antriebskonzepte

3.1.1 Hybridfahrzeuge (*Hybrid Electric Vehicle HEV*)

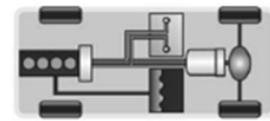
Hybridfahrzeuge nutzen mindestens zwei verschiedene Energiewandler und/oder Energiespeicher mit dem Ziel, die Vorteile der einzelnen Systeme miteinander zu verbinden. Obwohl der Begriff Hybridantrieb prinzipiell eine Vielzahl von Varianten umfasst, werden in der Regel jedoch Kombinationen von kraftstoffbetriebenem Verbrennungsmotor und Elektromotor mit Batteriespeicher betrachtet. Der Elektroantrieb kann in einem weiten Drehzahlintervall mit hohem Wirkungsgrad eingesetzt werden. Er ist sehr leise und emittiert keine Schadstoffe. Im Generatorbetrieb ist zudem die Umwandlung kinetischer in elektrische Energie während des Bremsvorganges möglich. Ein Verbrennungsmotor erzielt hingegen nur in einem eingeschränkten Drehzahlbereich einen hohen Wirkungsgrad. Sein großer Vorteil liegt jedoch in der hohen Energiedichte seines Kraftstoffes, die um ein Vielfaches über der einer Batterie liegt, was eine kompakte und leichte Bauweise sowie ein schnelles Betanken erlaubt. Als nachteilige Aspekte des Hybridkonzeptes sind vor allem die steigende Komplexität mit grö-

ßerer Anzahl an Komponenten und die sich daraus ergebenden Kosten, das zusätzliche Gewicht sowie das durch die Batterie höhere Sicherheitsrisiko zu nennen [GER02].

Hybridfahrzeuge können, wie in Abbildung 3-1 dargestellt, nach dem Aufbau des Antriebsstranges in serielle, parallele und leistungsverzweigte Hybride untergliedert werden.

Serieller Hybrid: „Reihenschaltung“ der Energiewandler ohne mechanische Anbindung des Verbrennungsmotors an die Antriebsräder. Allein der Elektromotor treibt das Fahrzeug an. Die Energie des Verbrennungsmotors wird von einem Generator in elektrische Energie zum Betrieb des Elektromotors und zum Laden der Batterie umgewandelt.

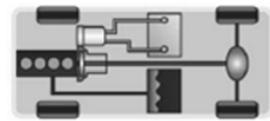
- + Betrieb des Verbrennungsmotors durchgängig im verbrauchs- und emissionsoptimalen Bereich
- + Kein großdimensioniertes Getriebe notwendig
- Wirkungsgradverluste durch die doppelte Energieumwandlung



Seriell

Paralleler Hybrid: Verbrennungs- und Elektromotor sind mechanisch mit dem Antriebsstrang verbunden. Sie können einzeln oder gemeinsam zum Vortrieb genutzt werden.

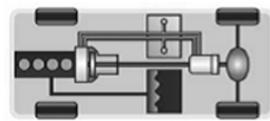
- + aufgrund der Leistungsaddition können beide Motoren kleiner dimensioniert werden (spart Kosten, Gewicht und Bauraum)
- + vergleichsweise geringer Bauaufwand
- + begrenzter elektrischer, emissionsfreier Antrieb (Stadtverkehr)
- geringe elektrische Fahrleistungen und Reichweiten



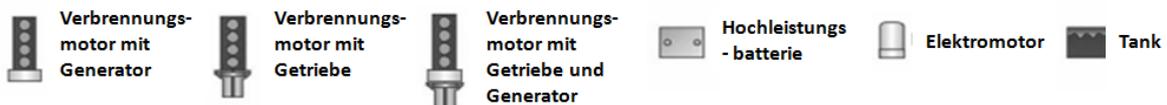
Parallel

Leistungsverzweigter Hybrid: Kombiniert die beiden zuvor genannten Strukturen. Sowohl der Verbrennungs- als auch der Elektromotor treiben das Fahrzeug an. Über den Verbrennungsmotor stellt ein Generator zusätzlich elektrische Leistung zur Verfügung.

- + mechanische und elektrische Leistungsübertragung optimal kombinierbar
- + Laden der Batterie im Betrieb über den Generator möglich, dadurch höhere Treibstoffeinsparung
- komplexer Aufbau



Powersplit

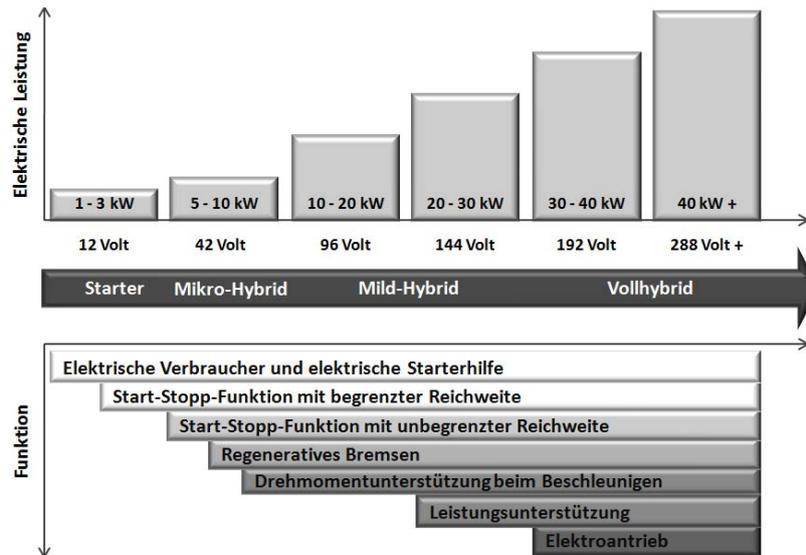


Quelle: eigene Darstellung nach [PFU08]

Abbildung 3-1 Mögliche Aufbauten des Antriebsstranges eines Hybridfahrzeugs

Eine weitere Möglichkeit der Differenzierung besteht nach dem Grad der Hybridisierung eines Fahrzeuges, gemessen an der elektrischen Leistung des Elektromotors, in die Kategorien Mikro-, Mild und Vollhybrid. Den in der folgenden Abbildung 3-2 dargestellten verschiedenen Hybridisierungsstufen sind unterschiedliche Funktionalitäten zur Brennstoffeinsparung, Emissionsreduktion und Erhöhung des Fahrkomforts zuzuordnen, welche die jeweilige Hybrid-Technologie gegenüber der konventionellen Antriebstechnik ermöglicht [KAR07]:

Auf der niedrigsten Hybridisierungsstufe mit einer Leistung von ca. 2 kW lässt sich beim **Mikro-Hybrid** beispielsweise eine Start-Stopp-Funktion des Motors darstellen. Kommt das Fahrzeug zum stehen, kann automatisch der Verbrennungsmotor abgeschaltet werden, um Leerlaufverluste zu minimieren. Das Batteriesystem versorgt zwischenzeitlich die Fahrzeugelektronik mit Energie. Auch eine limitierte Rückgewinnung der Bremsenergie zum Aufladen der Batterie ist möglich. Im Generatorbetrieb wandelt der Elektromotor hierbei die kinetische Energie beim Bremsen in elektrische Energie um.

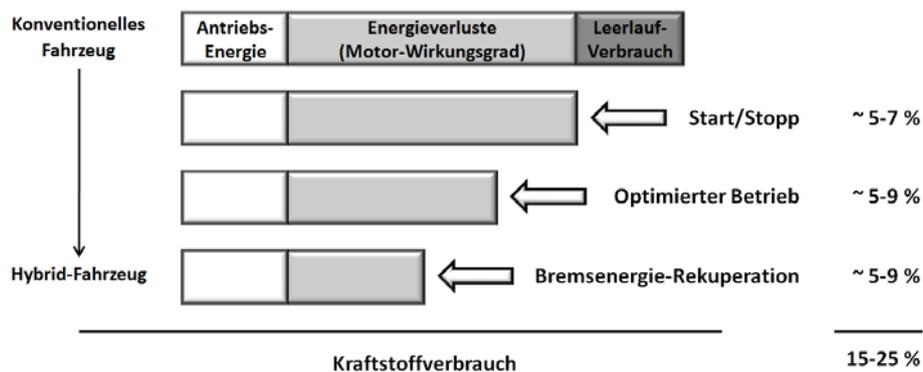


Quelle: [NAU06]

Abbildung 3-2 Hybridvarianten und Funktionalitäten entsprechend der installierten Elektroleistung

Leistungen von über 10 kW erlauben dem **Mild-Hybrid** weitere Funktionen wie z.B. die Leistungsunterstützung des Motors zur Erhöhung der Effizienz. Die Rückgewinnung von Bremsenergie ist auch hier ein wesentlicher Faktor zur Reduzierung des Treibstoffverbrauchs. Der Mild-Hybrid ist in der Regel in paralleler Antriebsstruktur ausgeführt.

Der Elektromotor eines **Vollhybridfahrzeuges** („Power Assist Hybrid“) ist in der Lage, das Fahrzeug über kurze Strecken mit voller Fahrleistung selbständig und somit emissionsfrei anzutreiben (z.B. im innerstädtischen Bereich). Insbesondere beim Anfahren und Beschleunigen werden Leistungsspitzen vom Elektroantrieb abgefangen, so dass der Verbrennungsmotor dauerhaft im optimalen Drehzahlbereich mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden kann. Wie Abbildung 3-3 zeigt, sind durch Kombination einer Start-Stopp-Funktion, der Rückgewinnung von Bremsenergie und dem optimierten Betrieb des Verbrennungsmotors Kraftstoffeinsparungen von ca. 15 % bis 25 % möglich.



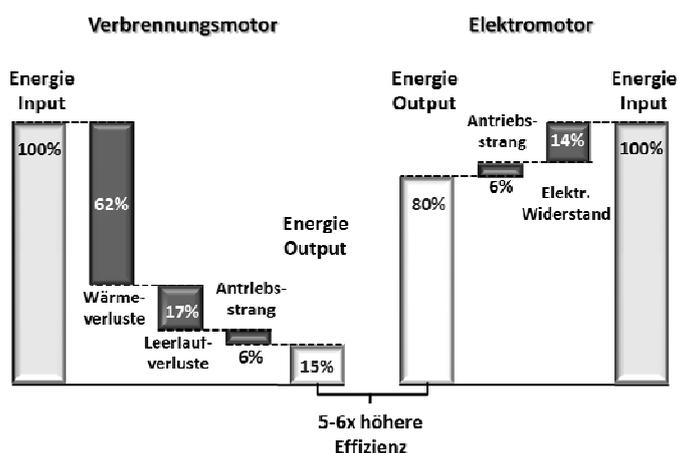
Quelle: [NAU06]

Abbildung 3-3 Einsparpotentiale bei Hybridfahrzeugen

Durch die Leistungsaddition von Elektro- und Verbrennungsmotor ist eine kleinere Auslegung beider Antriebe möglich. Dieses „Downsizing“ des Verbrennungsmotors trägt ebenfalls zur Effizienzsteigerung bei [WIK08]. Da der Elektromotor das volle Drehmoment auch bei niedrigen Drehzahlen entfaltet, kann die Fahrdynamik gegenüber konventionellen Fahrzeugen verbessert werden. Vollhybride basieren in der Regel auf einem parallelen oder leistungsverzweigtem Antriebsstrangkonzept.

3.1.2 Elektrofahrzeuge (*Electric Vehicle EV*)

Beim Elektrofahrzeug wird allein ein Elektromotor für den Fahrzeugantrieb genutzt, als Speicher für die elektrische Energie dient eine Batterie, welche über das Stromnetz aufgeladen wird. Der Elektroantrieb ist dem Verbrennungsmotor in vielen Eigenschaften überlegen. Neben dem bedeutend höheren Wirkungsgrad (s. Abbildung 3-4), dem einfacheren Aufbau des Antriebsstranges und der geringeren Geräuschentwicklung zählt hierzu auch die Abgasfreiheit vor Ort, insbesondere in städtischen Ballungsräumen ein großer Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen.



Quelle: [RAS06]

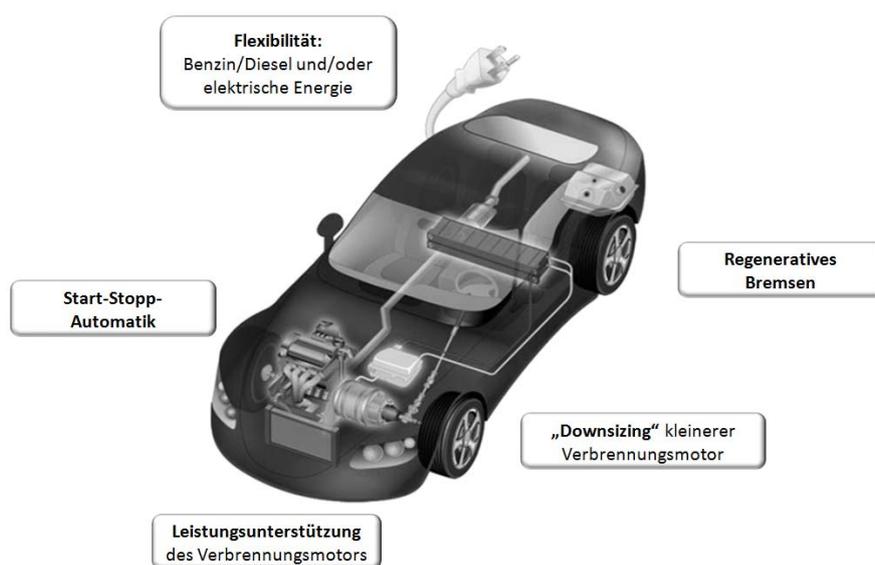
Abbildung 3-4 Gegenüberstellung der Effizienz des Elektromotors und des Verbrennungsmotors

Trotz ausgereifter Antriebstechnik konnten sich Elektromobile aufgrund zu schwerer und teurer Batterien mit geringer Reichweite nur in bestimmten Nischen durchsetzen. Die Entwicklung kostengünstiger Batteriesysteme mit höherer Energiedichte und spezifischer Energie sind somit Voraussetzung für den zukünftigen Erfolg der Elektrofahrzeuge.

Der Begriff „Elektrofahrzeug“ deckt ein breites Spektrum verschiedenster Fahrzeugaufbauten ab, die nach Fahrzeugklassen differenziert werden können. Diese reichen von Leichtfahrzeugen (z.B. Twike) und City-Cars (z.B. Smart Fortwo) über Kleinst- (z.B. VW Fox), Klein- (z.B. Opel Corsa) und Kompaktwagen (z.B. VW Golf) bis hin zu Mittel- und Oberklassefahrzeugen sowie weiteren Segmenten wie Großraumlimousinen, Gelände- oder Sportwagen [WIK08]. Da insbesondere die Reichweite des Elektrofahrzeuges sehr stark von Fahrzeuggewicht, Aerodynamik und Rollwiderstand abhängig sind, ist eine Angabe der Fahrzeugklasse zum Begriff Elektrofahrzeug unerlässlich.

3.1.3 Plug-In Hybridfahrzeuge (*Plug-In Hybrid Electric Vehicle PHEV*)

Zwar können Vollhybride kurze Strecken im reinen Elektrobetrieb zurücklegen, die Grenzen dieser Funktion werden aber z.B. durch den Toyota Prius mit 2 km Reichweite bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h klar aufgezeigt [TOY08]. Plug-In Hybridfahrzeuge („Steckdosenhybride“) erweitern dieses Konzept, indem die Batterie auch aus einer externen Stromquelle aufgeladen werden kann. Ziel ist es, durch eine größere Kapazität der Batterie die Reichweite im Elektrobetrieb zu erhöhen, um so den Treibstoffverbrauch gegenüber konventionellen Fahrzeugen und Vollhybriden deutlich zu senken. Durch den flexiblen Einsatz von Kraftstoff und elektrischer Energie und Funktionalitäten wie regeneratives Bremsen, Start/Stop-Automatik oder Leistungsunterstützung des Verbrennungsmotors ist der Plug-In Hybrid somit zwischen heutigen Vollhybrid- und Elektrofahrzeugen einzuordnen (s. Abbildung 3-5).



Quelle: [PES07]

Abbildung 3-5 Grundfunktionalitäten eines Plug-In Hybridfahrzeuges

Die Reichweite im Elektrobetrieb wird in der Regel bei der Bezeichnung des Plug-In Hybrides „PHEV-X“ (Plug-In Hybrid Electric Vehicle, X = Reichweite in Meilen) angegeben. Dabei ist während des Elektrobetriebs zu unterscheiden, ob das Fahrzeug tatsächlich vollelektrisch, d.h. im so genannten „*all electric*“-Modus, oder im „*blended*“-Modus, bei dem der Elektromotor durch den Verbrennungsmotor unterstützt wird, angetrieben wird.

Das Plug-In Hybridfahrzeug kann wie der Vollhybrid mit parallelem oder leistungsverzweigtem Antriebsstrang ausgelegt sein. Eine andere Alternative ist eine serielle Anordnung von Verbrennungs- und Elektromotor, wobei der Verbrennungsmotor keine mechanische Verbindung mit den Rädern besitzt. Ein leistungsfähiger Elektroantrieb mit einem Speicher hoher Kapazität ist dann erforderlich. Letzteres Konzept kann auch als Elektrofahrzeug mit „*range extender*“ bezeichnet werden. Kritiker des Plug-In Hybrids wie der Honda Chef Fukai betrachte diese Fahrzeuge als „batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, die überflüssigerweise einen Verbrennungsmotor und Benzintank mit sich herumschleppen“ [HEI07].

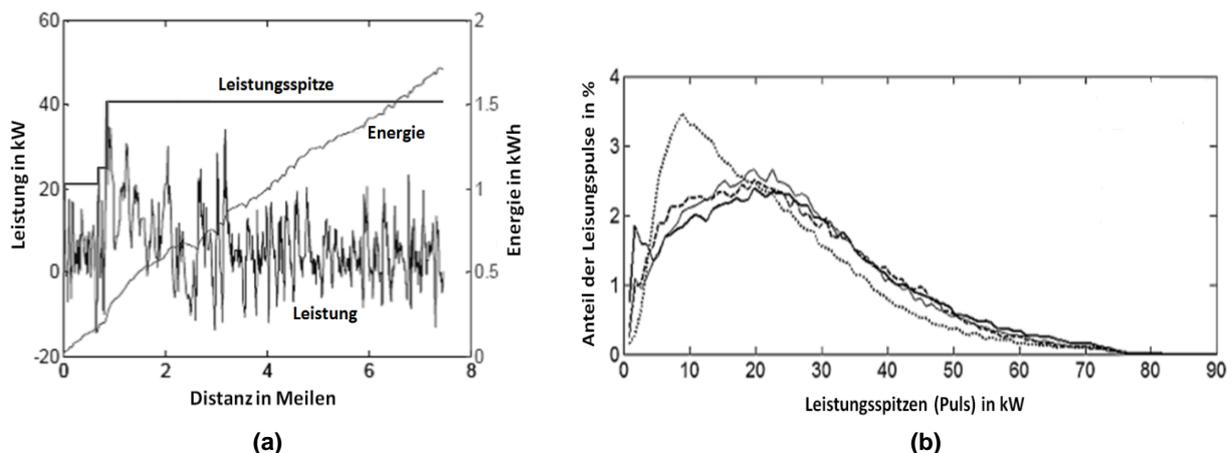
3.2 Allgemeine technische Anforderungen an Fahrzeugbatterien

Aus den unterschiedlichen Betriebsbedingungen von Elektro- Hybrid- bzw. Plug-In-Hybridfahrzeugen leiten sich spezifische Anforderungsprofile für die jeweiligen Batteriesysteme ab. Zudem sind auch innerhalb dieser Fahrzeuggruppen verschiedenste Fahrzeugtypen, vom Kleinwagen bis zum SUV, zu unterscheiden. Genaue Anforderungen können deshalb immer nur für ein konkretes Fahrzeug formuliert werden, für das die folgenden Parameter für das Design des Batteriesystems festgelegt sind:

- Wie viel Bauraum ist für die Batterie vorhanden, und wie viel darf diese wiegen?
- Welche Reichweite ist im Elektrobetrieb zu erzielen?
- Genaue Fahrzeugdaten, z.B. Gewicht, Aerodynamik, Aufbau des Antriebsstranges
- Was sind die Kostenziele für das Fahrzeug?

Dennoch sollen zunächst einige für alle batterieelektrischen Fahrzeuge gemeinsame Aspekte betrachtet werden, welche die Leistungsfähigkeit des Batteriesystems beeinflussen:

Die **Batterieleistung** bestimmt im Wesentlichen die Fahrdynamik eines Elektromobils. Die höchsten Anforderungen an die Entladeleistung der Batterie werden dabei beim Anfahren und Beschleunigen gestellt. Die gespeicherte Energie muss sehr schnell, meist in Form von kurzen Pulsen einer Dauer von ca. 2 bis 10 Sekunden, abgegeben werden. Auch die dabei auftretenden Leistungsspitzen (s. Abbildung 3-6 (a)) müssen abgedeckt werden, so dass in Extremsituationen, z.B. bei einem Ausweichmanöver, ausreichende Leistungsreserven zur Verfügung stehen [NAU06]. Im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen sind Batterieleistungen einer Größenordnung von 30 kW pro Tonne Fahrzeuggewicht erforderlich (75 kW entsprechen einer Fahrzeugleistung von 100 PS). Typische Verteilungen der bei Fahrten mit unterschiedlichen Stadt- und Überlandanteilen auftretenden Leistungsspitzen sind in Abbildung 3-6 (b) dargestellt. In Extremsituationen sind Leistungen von über 70 kW gefordert.

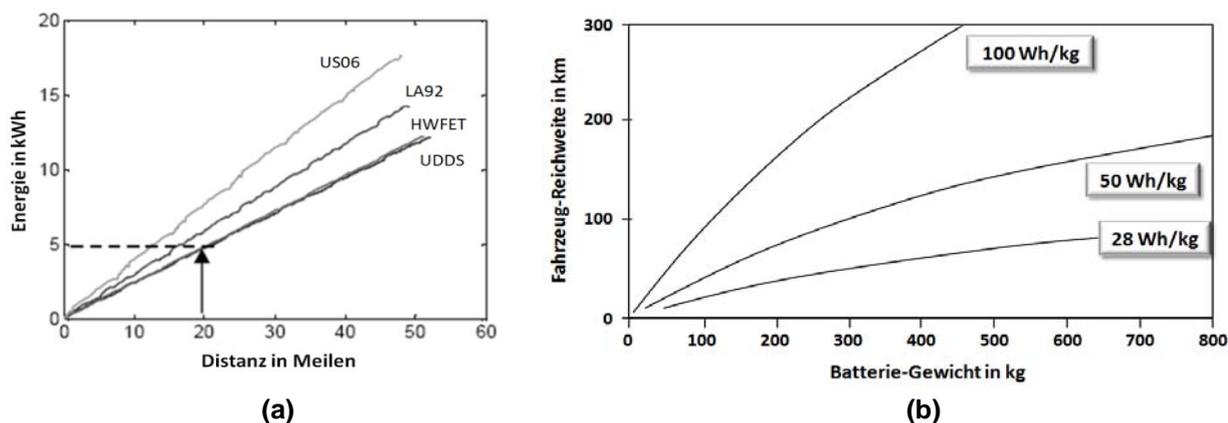


Quelle : [MAR06] und [DUB07]

Abbildung 3-6 Darstellung von Leistung, Leistungsspitzen und Energie (a) und typische Verteilungen der auftretenden Leistungsspitzen für Fahrten mit unterschiedlichen Stadt- und Überlandanteilen (b)

Für die Rückspeicherung von Bremsenergie ist zudem eine extreme Schnellladefähigkeit, d.h. eine hohe Ladeleistung, notwendig. Kurzfristig sind Leistungsimpulse von bis zu 30 kW pro Tonne Fahrzeuggewicht aufzunehmen [NAU06].

Die in der Batterie **gespeicherte Energie** berechnet sich aus der spezifische Energie (in Wh/kg) bzw. Energiedichte (in Wh/l) und dem Gewicht (in kg) bzw. Volumen (in l) des Batteriesystems. Ist der Energiebedarf für eine bestimmte Anwendung festgelegt, so erlaubt eine hohe spezifische Energie und Energiedichte eine leichte und kompakte Bauweise des Batteriespeichers. Der Energieinhalt bestimmt im Wesentlichen die Reichweite eines Fahrzeuges im Elektrobetrieb. Der Energieverbrauch und somit die Reichweite ist aber auch von anderen Faktoren wie beispielsweise vom Fahrstil, in Abbildung 3-7 (a) für einen typischen Mittelklassewagen durch verschiedene Fahrzyklen mit unterschiedlichen Stadt- und Highway-Anteilen repräsentiert, abhängig. Sind in diesem Beispiel bei moderater Fahrweise im HWFET- und UDDS-Fahrzyklus mit hohen Stadt-Anteilen 20 Meilen im Elektrobetrieb möglich, so reduziert sich die Reichweite bei aggressiverem Fahrverhalten auf dem Highway in den US06- bzw. LA92-Fahrzyklen auf 10 bzw. 15 Meilen.



Quelle: IMAR061 und IBRO071

Abbildung 3-7 Energie-Anforderungen an die Batterie eines Mittelklassewagens im Elektrobetrieb für typische Fahrprofile mit Stadt- und Highway-Anteilen (a) und Fahrzeugreichweite als Funktion des Batteriegewichts für verschiedene spezifische Energien des Batteriesystems (b)

Durch das Eigengewicht der Batterie, die mit dem Fahrzeug bewegt werden muss und damit auch zum Energieverbrauch beiträgt, ist die Reichweite nicht proportional zur gespeicherten Energie. Abbildung 3-7 (b) zeigt diese Abhängigkeit der Reichweite vom Batteriegewicht für Batteriesysteme verschiedener spezifischer Energie (Beispielfahrzeug: 800 kg Fahrzeuggewicht ohne Batterie, Verbrauch von 135 Wh/Tonne/km). Das Zurücklegen einer Strecke von 200 km im reinen Elektrobetrieb erfordert für das Beispielfahrzeug eine spezifische Energie der Größenordnung 100 Wh/kg.

Die **Lebensdauer und Sicherheit** des Batteriesystems sind Grundvoraussetzungen für den kommerziellen Erfolg batterieelektrischer Fahrzeuge. Von den Kunden wird eine hohe Verlässlichkeit der im Fahrzeug verarbeiteten Bauteile eingefordert. Als Qualitätsziel der Automobilindustrie dient in der Regel ein *Six-Sigma-Level*, d.h. weniger als 3,4 DPMO (*Defects Per Million Opportunities*) über die gesamte Gebrauchsdauer des Fahrzeuges von typi-

scherweise 10 Jahren oder 240000 km [KAR07]. Aufgrund der hohen Kosten ist während dieser Gebrauchsdauer ein Auswechseln des Batteriesystems ausgeschlossen.

Während den für Automobile typischen hohen Standzeiten altert die Batterie aufgrund sehr komplexer Vorgänge in den Zellen. Außerdem wird sie durch das Laden und Entladen während des Betriebs dynamisch belastet. Deswegen ist die Zyklenlebensdauer, d.h. die maximale Anzahl an Lade- und Entladezyklen, für welche die Batterie ihre Leistungs- und Kapazitätsanforderungen erfüllt, eine für die Fahrzeugbatterie entscheidende Größe. Generell ist die Entladungstiefe, d.h. die beim Entladen entnommene Kapazität, entscheidend für die erreichbare Zyklenanzahl. Der Zusammenhang zwischen Zyklenlebensdauer und der Entladungstiefe ist aber nichtlinear (s. Abbildung 3-8). Während so genannte flache Zyklen, bei denen relativ wenig Kapazität entnommen wird, in der Regel in großer Zahl möglich sind, nimmt die Zyklenlebensdauer mit zunehmender Entladungstiefe stark ab. Das Ende der Lebensdauer einer Batterie ist nach Angaben von Automobilherstellern erreicht, wenn die Kapazität oder Leistung auf 80% des Ausgangswerts abgefallen ist [NAZ04]. Eine Prognose der Kalender- und Zyklenlebensdauer auf der Grundlage von Laborversuchen ist aber schwierig, da die Zellalterung sehr stark durch die realen Betriebsbedingungen wie z.B. Stromstärke und Entladungstiefe sowie durch äußere Parameter wie z.B. der Umgebungstemperatur beeinflusst wird.

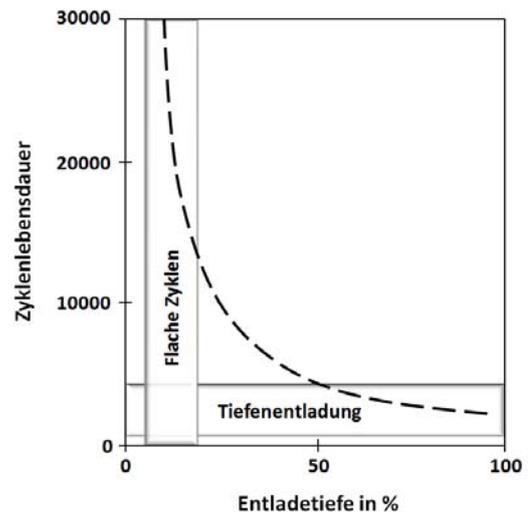
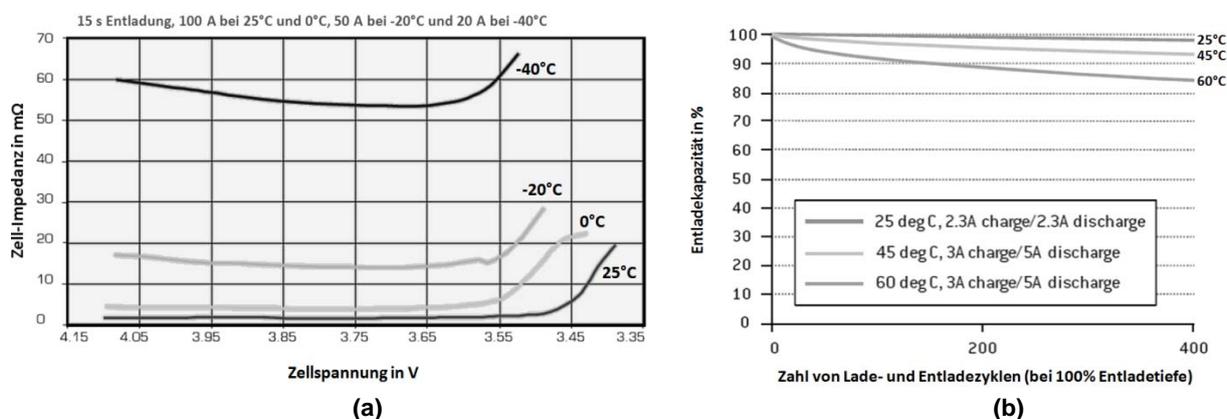


Abbildung 3-8 Schematische Darstellung der Abnahme der Zyklenlebensdauer mit zunehmender Entladungstiefe

Wie jedes System, das sehr viel Energie auf kleinem Raum speichert, stellt auch die Fahrzeugbatterie ein Risiko dar, wenn diese Energie unkontrolliert freigesetzt wird. Das Batteriemangement-System, das sowohl Spannung und Ladezustand jeder einzelnen Zelle sowie Ströme und Temperatur im Batteriesystem überwacht, minimiert jedoch das Risiko einer Fehlfunktion während des Normalbetriebs. Sicherheitsgefährdend sind deswegen vor allem Einflüsse, welche von außen auf die Batterie einwirken. Dazu zählen elektrische und elektrochemische Belastungen (z.B. externer Kurzschluss), thermische Einflüsse (Erhöhung der Umgebungstemperatur über den Stabilitätsbereich der Zellkomponenten) und mechanische Einwirkungen (z.B. Deformation bei einem Unfall). Zudem kann mangelnde Qualität in der Verarbeitung zur raschen Freisetzung der gespeicherten Energie durch innere Kurzschlüsse führen. In aufwendigen Tests, die mechanische Crashes, externe Kurzschlüsse sowie Versuche zur Überladung und Überhitzung beinhalten, wird die Toleranz der Zellen und des gesamten Batteriesystems gegenüber äußeren Einwirkungen untersucht. Nach einem Standardcrash muss beispielsweise ein ausreichender Isolationswiderstand gewährleistet sein, um die Fahrzeuginsaßen vor Stromschlägen zu bewahren. Das Batteriegehäuse muss vor umherfliegenden Teilen schützen und toxische Substanzen auffangen. Der genaue Ablauf der Sicherheitstests und Einstufungen der Ergebnisse sind in entsprechenden USCAR- und

EUCAR-Sicherheitsvorschriften festgelegt [USC08], [JOS05]. Als wichtiger Aspekt bleibt zu berücksichtigen, dass die Sicherheit des Batteriesystems zu großen Teilen auf die Funktionsicherheit der Zellen zurückzuführen ist. Unter Annahme einer konstanten Zellverlässlichkeit ist die Ausfallverlässlichkeit des Systems potentiell von der Anzahl verwendeter Zellen abhängig. Deswegen ist eine hohe Verarbeitungsqualität bereits auf der Ebene der Zellherstellung von höchster Bedeutung.

Die Akkumulatoren zeigen in der Regel ein sehr kritisches **Temperaturverhalten**. Mit abnehmender Temperatur wird die Leistungsfähigkeit der Batterie zum Teil stark eingeschränkt. Durch die gehemmte Kinetik der Zellreaktionen bei tiefen Temperaturen steigt die Impedanz der Zelle (s. Abbildung 3-9 (a)), so dass große Ströme und somit die erforderliche Leistung nicht weiter erzielbar sind. Vom Fahrzeug wird jedoch die Betriebsbereitschaft auch bei tiefer Umgebungstemperatur erwartet.



Quelle: [A1208] und [SAF08]

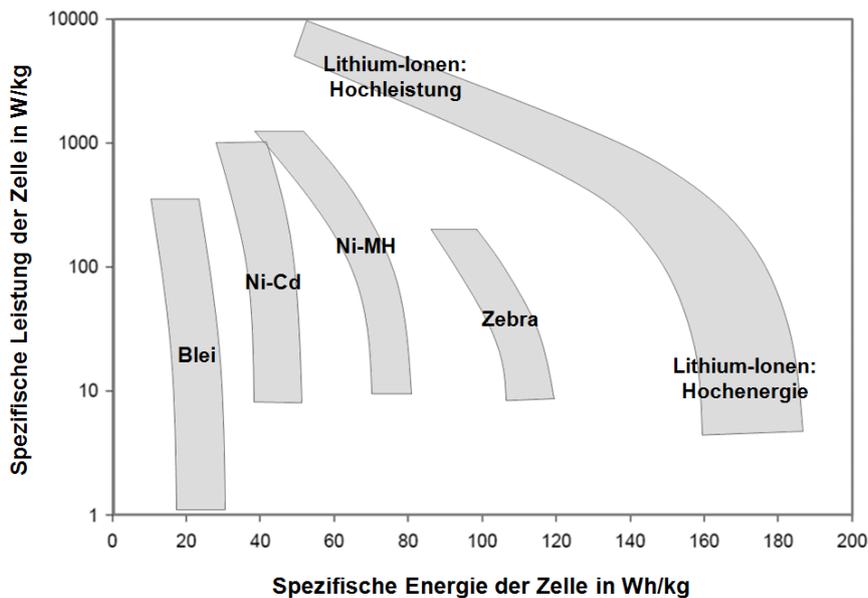
Abbildung 3-9 Anstieg der Zellimpedanz einer Lithium-Ionen Hochleistungszelle bei tiefen Temperaturen (a) und Abnahme der Entladekapazität durch das Zyklieren bei erhöhter Temperatur (b)

Hohe Temperaturen verstärken die Alterung der Batterie sowohl während der Stillstandzeiten als auch im Zyklenbetrieb (s. Abbildung 3-9 (b)), und die Gefahr der thermischen Instabilität der Zelle nimmt zu. Im Betrieb ist deshalb eine aktive Kühlung notwendig, wobei, unabhängig vom betrachteten Batteriesystem, eine Temperatur von 30 °C möglichst nicht überschritten werden sollte. Besonders in heißen Klimazonen altert die Batterie speziell während der für Fahrzeuge typischen langen Standzeiten, in denen nicht aktiv gekühlt werden kann. Allgemein werden deshalb zwei Temperaturbereiche, nämlich die Arbeitstemperatur, d.h. der Temperaturbereich, in dem die Zelle ihre Betriebsanforderungen erfüllt, und die zulässige Ruhetemperatur, in dem die Zelle sicher gelagert werden kann, unterschieden [WAL06].

Die elektrisch eingebrachte Energie soll ohne größere Verluste, bedingt durch ohmsche Widerstände oder die elektrochemische Reaktionskinetik, wieder für die Entladung zur Verfügung stehen. Ein **Wirkungsgrad** von mehr als 90% wird im typischen Lade- und Entladebetrieb angestrebt [NAU06]. Die für den kommerziellen Erfolg ausschlaggebend Größen **Umweltverträglichkeit** und **Kosten** des Batteriesystems werden in Kapitel 4 eingehend betrachtet.

3.3 Alternative Batterietechnologien

Verschiedene Batterietechnologien werden heute im Fahrzeugbereich eingesetzt bzw. für den Einsatz diskutiert. Wirtschaftliche Bedeutung haben bisher nur die Blei-, die Nickel-Cadmium und die Nickel-Metallhydrid-Batterien erlangt. Abgesehen von ihrer Funktion als Starterbatterie fanden Bleibatterien in der Vergangenheit als Energiespeicher für Elektromobile Verwendung, jedoch aufgrund ihrer geringen spezifischen Energie und der daraus resultierenden geringen Reichweite nur in wirtschaftlichen Nischen. Ein gewisses Potential wird der Bleibatterie jedoch im Bereich der Mikrohybride (42V Systeme) zugesprochen. Ni-Cd-Batterien haben in Vollelektrofahrzeugen einen Markt gefunden, eine weitere Verbreitung ist jedoch aufgrund ihrer hohen Toxizität ausgeschlossen. Die Natrium-Nickelchlorid-Batterie muss als Hochtemperaturbatterie ihre Betriebstemperatur bei ca. 300°C halten, weshalb sie bisher vor allem in Elektrofahrzeug-Flotten, z.B. in einigen Taxis in London, eingesetzt werden konnte. Lithium-Ionen Batterien sind für Elektrofahrzeuge besonders durch ihre höhere spezifische Energie und Energiedichte bzw. spezifische Leistung und Leistungsdichte interessant (s. Abbildung 3-10). Höhere Energie- und Leistungsdichte bieten direkte Kundenvorteile wie beispielsweise eine höhere Nutzlast, d.h. größere Zuladungsmöglichkeiten aufgrund des verringerten Batteriegewichts, oder eine verbesserte Fahrdynamik [NAU06].

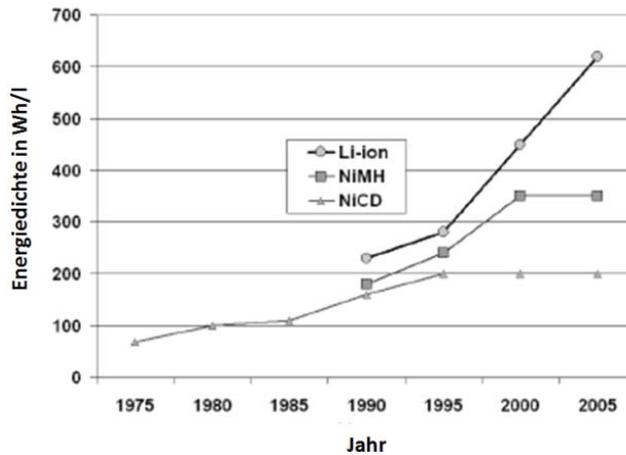


Quelle: [SAF08]

Abbildung 3-10 Vergleich von spezifischer Leistung und spezifischer Energie verschiedener Batterietechnologien

Im Bereich der Hochleistungsbatterien für Vollhybridfahrzeuge konkurriert die Lithium-Ionen-Technologie mit der bereits etablierten Nickel-Metall-Hydrid Batterie. Vorteile der Lithium-Ionen Batterie sind auch hier ihre hohe spezifische Leistung und Leistungsdichte bzw. ihr größerer Energieinhalt. Vor allem in der rasanten Entwicklung der Energiedichte blieb die Ni-MH-Batterie in den letzten Jahren hinter der Lithium-Ionen Technologie zurück (s. Abbil-

dung 3-11), so dass die Ni-MH Batterie von Experten nur noch als „Platzhalter“ bis zum endgültigen Durchbruch der Lithium-Ionen Technologie eingestuft wird [DOL07].



Quelle: [PAS07]

Abbildung 3-11 Steigerung der Energiedichten von Lithium-Ionen, Ni-MH- und Ni-Cd-Batterien

Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Batterietechnologien und die jeweiligen Anwendungsmöglichkeiten im Fahrzeug sind in Tabelle 1 nochmals detailliert aufgeführt.

Technologie	Vorteile	Nachteile	Anwendung im Fahrzeug
Blei-Säure	kostengünstig zuverlässige Technologie kurzzeitig hohe Ströme möglich bei gasdichtem Aufbau wartungsarm	sehr schwer durch geringe Energiedichte nur beschränkte Anzahl an Tiefentladungen keine Schnellladung Sulfatierung im entladenen Zustand	Starterbatterie Elektrofahrzeuge Mikro-Hybride (42V-Systeme)
Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	hohe Zahl von Lade-/Entladezyklen hohe Entladeraten schnelles Wiederaufladen hervorragendes Tieftemperaturverhalten stabile Zellchemie wirtschaftlich (bzgl. Kosten pro Zyklus)	Memory-Effekt verhältnismäßig geringe Energiedichte geringe Zellspannung (~ 1,2 V) umweltschädlich, Verwendung in vielen Ländern eingeschränkt	Elektrofahrzeuge
Natrium-Nickelchlorid-Hochtemperaturbatterie ("ZEBRA"-Batterie)	hohe spezifische Energie lange Kalender- und Zyklenlebensdauer wartungsfrei keine Selbstentladung sehr sicher	geringe spezifische Leistung tägliche Fahrleistung > 40 km, um Betriebstemperatur (250-300°C) zu halten	Elektrofahrzeuge im Flottenbetrieb
Nickel-Metallhydrid (NiMH)	hohe Energie- und Leistungsdichte höhere Kapazität als Ni-Cd umweltverträglich lange Kalender- und Zyklenlebensdauer schnelles Wiederaufladen	Kosten Selbstentladung geringe Zellspannung (~ 1,2 V) schlechtes Tieftemperaturverhalten geringere Effizienz	Hybridfahrzeuge (insb. Vollhybride) Plug-In Hybride Elektrofahrzeuge
Lithium-Ionen	höchste Energie und Leistungsdichte lange Zyklenlebensdauer hohe Effizienz hohe Zellspannung geringe Selbstentladung wartungsfrei	Kosten Überladung / Überentladung problematisch aufwendiges Batteriemangement nicht vollständig ausgereift	Hybridfahrzeuge (insb. Vollhybrid) Plug-In Hybride Elektrofahrzeuge

Quelle:[BAT08], [WIK08]

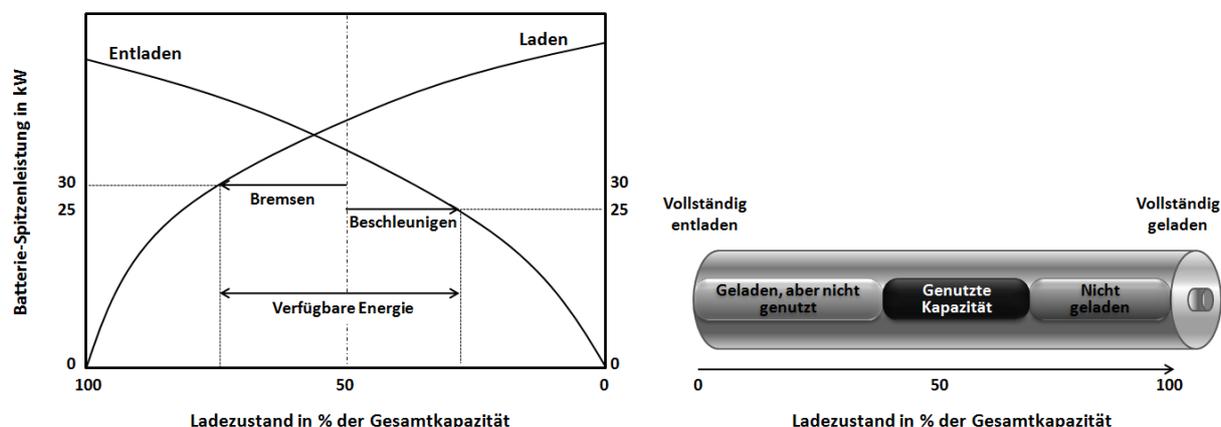
Tabelle 1 Vor- und Nachteile verschiedener Batterietechnologien des Fahrzeugbereich

3.4 Spezifische Anforderungen und aktueller Status von Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien

3.4.1 Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge

Anforderungen

Da sie in der Gruppe der Hybridfahrzeuge (excl. Plug-In Hybride) eine obere Grenze für die Anforderungen an das Batteriesystem markieren, sollen im Folgenden zunächst Vollhybridfahrzeuge betrachtet werden. Weil diese nur sehr kurze Strecken im reinen Elektrobetrieb zurücklegen können, sind die Anforderungen an den Energieinhalt der Batterie gering, vor allem beim Anfahren und Beschleunigen werden jedoch hohe Leistungsanforderungen an das Batteriesystem gestellt (vgl. Abbildung 3-6 (b)). Außerdem ist einerseits die rückgewonnene Bremsenergie, von einem Generator in elektrische Energie umgewandelt, innerhalb weniger Sekunden zu speichern, andererseits ist bei abfallendem Ladezustand beim Beschleunigungsvorgang ein schnelles Nachladen erforderlich, d.h. eine kontinuierlichen Ladeleistung von bis zu 10 kW pro Tonne Fahrzeuggewicht, was z.B. bei einer Batterie mit einer Gesamtenergie von 2 kWh C-Raten einer Größenordnung von 5C entspricht. Diese „charge acceptance“, d.h. die Möglichkeit eines schnellen Wiederaufladens mit entsprechend hohen Strömen, wirkt sich direkt auf das CO₂-Einsparpotential des Fahrzeuges aus [KAR07]. Die Fähigkeit zur Leistungsaufnahme oder -abgabe ist aber vom Ladezustand des Akkumulators abhängig (s. Abbildung 3-12). Der Betriebspunkt einer Hochleistungsbatterie, auch „Sweet Spot“ genannt, ist deshalb so zu wählen, dass sowohl ausreichende Entladeleistung als auch genügend Potential zur Leistungsaufnahme beim Bremsen zu Verfügung steht. In der Regel liegt dieser Bereich bei einem Ladezustand (State Of Charge SOC) von ca. 50-60%. In flachen Lade- und Entladezyklen, d.h. bei geringer Kapazitätsaufnahme oder -abgabe, wird die Batterie im Mittel auf diesem Sweet Spot-Niveau gehalten [BRO07].



Quelle: eigene Darstellung nach [NAZ06] und [PES07]

Abbildung 3-12 Betriebsbereich für optimale Leistungsaufnahme bzw. -abgabe und Verhältnis von genutzter Kapazität zur Gesamtkapazität einer Hochleistungszelle für Hybridfahrzeuge

Da während den flachen Zyklen nur ein Teil der Gesamtkapazität der Batterie tatsächlich genutzt wird, ist die bestimmende Energiegröße nicht die Gesamtenergie, sondern die verfügbare Energie (vgl. Abbildung 3-12), die beim Vollhybridfahrzeug zwischen 0,3 und 0,5 kWh liegt. Ein Großteil der gespeicherten Energie bleibt also im Betrieb ungenutzt, ist aber notwendig, um Tiefentladungen der Zellen zu vermeiden und somit eine ausreichend hohe Zyklenlebensdauer von ca. 300000 flachen Zyklen und eine Kalenderlebensdauer von bis zu 15 Jahren zu garantieren (vgl. Abbildung 3-8).

Das *United States Advanced Battery Consortium (USABC)*, eine Kooperation des U.S. Department of Energy und der US-amerikanischen Automobilindustrie hat im FreedomCAR-Programm in Zusammenarbeit mit Batterieherstellern Festlegungen getroffen, die die Spanne sinnvoller unterer und oberer Leistungsgrenzen und Energieanforderungen gut abbildet. Diese sind in Tabelle 2 aufgeführt, wobei die Maximalanforderungen als langfristige Ziele zu betrachten sind. Diese Kriterien orientieren sich daran, dass das Hybridfahrzeug auf Kosten- und Leistungsebene mit einer konventionellen Mittelklasselimousine mit Verbrennungsmotor konkurrieren kann.

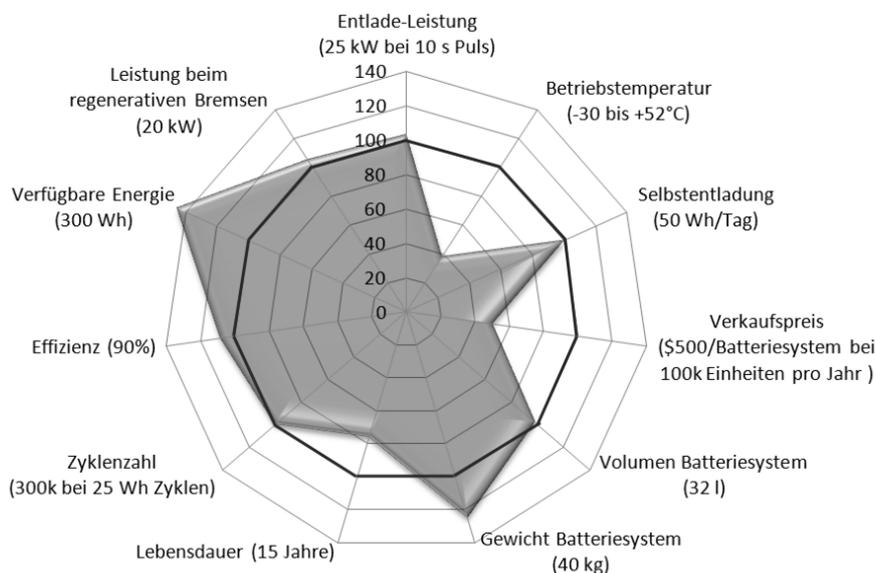
	Einheiten	Minimal-Anforderung	Maximal-Anforderung
Leistung (Entladen, 10 s Puls)	kW	25	40
regeneratives Bremsen (Peak-Leistung, 10 s Puls)	kW	20 (55-Wh Puls)	35 (97-Wh Puls)
verfügbare Energie	kWh	0.3 (C/1 Rate)	0.5 (C/1 Rate)
Effizienz	%	90 (25-Wh Zyklus)	90 (50-Wh Zyklus)
Antriebsleistung bei -30 °C (drei 2 s Pulse)	kW	5	7
Zyklenlebensdauer	Zyklen	300000 (25 Wh Zyklen (7.5 MWh))	300000 (50 Wh Zyklen (15 MWh))
Kalenderlebensdauer	Jahre	15	15
Max. Gewicht	kg	40	60
Max. Volumen	l	32	45
Spannungsbereich	V	max ≤ 400 min ≥ 0.55*Vmax	max ≤ 400 min ≥ 0.55*Vmax
Max. erlaubte Selbstentladung	Wh/Tag	50	50
Temperatur: Arbeitstemperatur zulässige Ruhetemperatur	°C	-30 to +52 -46 to +66	-30 to +52 -46 to +66
Preis @ 100000 Einheiten/Jahr	US\$/Einheit	500	800

Quelle: [USC08]

Tabelle 2 Unter- und Obergrenzen der vom USABC spezifizierten Anforderungen an Vollhybridfahrzeuge

Entwicklungsstand

Abbildung 3-13 zeigt den Entwicklungsstand von Hochleistungs-Lithium-Ionen Batteriesystemen für Hybridfahrzeuge, gemessen an den Minimal-Anforderungen des USABC.



Quelle: [HAB08]

Abbildung 3-13 Entwicklungsstand von Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge verglichen mit den Minimalanforderungen des USABC (100% = USABC-Ziele)

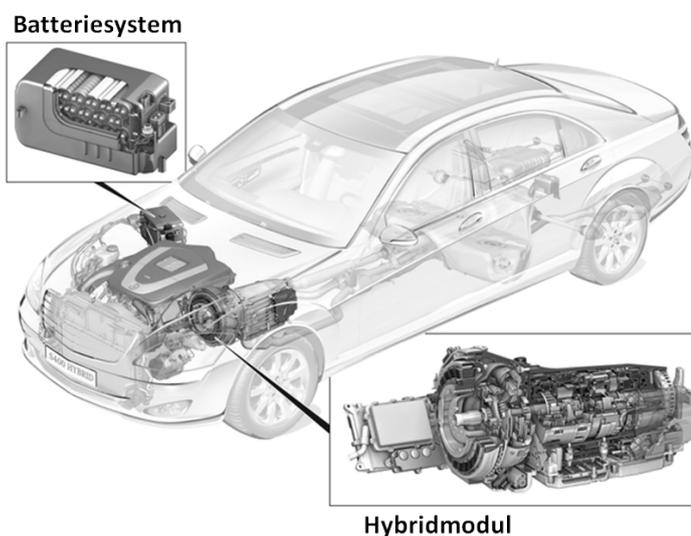
Der größte Teil der kurzfristigen technischen Vorgaben, insbesondere die Leistungsziele, werden von heutigen Lithium-Ionen Hochleistungsbatterien erfüllt. Auch die erforderliche Zyklenlebensdauer von 300000 flachen Zyklen konnte in Laborversuchen bereits nachgewiesen werden. Für die noch sehr junge Lithium-Ionen Technologie gibt es jedoch nur wenige Erfahrungswerte bezüglich der Kalenderlebensdauer der Batterien in Hybridfahrzeugen. Prognosen der Kalenderlebensdauer auf Basis von Labordaten ergaben bereits vielversprechende Ergebnisse [HOR03]. Da die Lebensdauer jedoch sehr stark von der Zellchemie und von den realen Betriebsbedingungen im Fahrzeug abhängt, kann die Frage, ob eine Lebensdauer von 15 Jahren tatsächlich erreichbar ist, heute noch nicht eindeutig beantwortet werden. Sicherlich wird die Kalenderlebensdauer auch in Zukunft zu den größten technischen Herausforderungen zählen [HAB08]. Als ungelöstes Problem besteht weiterhin die Temperaturempfindlichkeit der Lithium-Ionen Technologie, die nur in einem engen Temperaturfenster uneingeschränkt funktioniert. Abweichungen von nur wenigen Grad Celsius führen zu Leistungseinbußen (vgl. Abbildung 3-9 (a)) und zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Das Batteriesystem muss deshalb durch ein externes Klimatisierungssystem auf optimaler Betriebstemperatur gehalten werden. Nach einer Aussage des Toyota-Chefs Watanabe im Januar 2008, anlässlich der Verschiebung der Einführung des Prius mit Lithium-Ionen Speicher, ist auch die zuverlässige Serienfertigung des Akkus noch eines der Hauptprobleme [DIL08].

Der Verkaufspreis eines Hochleistungs-Batteriesystems für Hybridfahrzeuge liegt heute mindestens um das zwei- bis dreifache über den Zielvorgaben der USABC [HAB08]. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.2 eingehend betrachtet.

Umsetzungsbeispiele:

Inzwischen bieten verschiedene Hersteller Hochleistungszellen mit unterschiedlicher Zellchemie an, von denen einige im Anhang (Tabelle 9) aufgeführt sind.

Das für 2009 angekündigte erste Serien-Hybridfahrzeug mit Lithium-Ionen Speicher, der Mercedes-Benz S400 BlueHYBRID, ist ein Mild-Hybrid, dessen Batteriesystem vom Automobilzulieferer Continental mit Zellen des Batterieherstellers Johnson Controls-Saft seit September 2008 in Serie produziert wird. Ein Hybridmodul, bestehend aus einem scheibenförmigen 15 kW Elektromotor, der auch als Generator dient, unterstützt den Verbrennungsmotor in der verbrauchsintensiven Beschleunigungsphase mit einem Drehmoment von maximal 160 New-



Quelle: [DAI08]

Abbildung 3-14 Batteriesystem und Hybridmodul im Mercedes-Benz S400 BlueHYBRID

tonmetern und bietet außerdem eine Start/Stopp-Funktion sowie regeneratives Bremsen. Die Energiedichte des Batteriesystems, das ca. 25 kg schwer ist und ein Bauvolumen von 13 l einnimmt, wird von Daimler mit 1900 W/l angegeben. Zum Vergleich erreichen aktuelle Hochleistungszellen aus der VLP Reihe der Firma Saft Energiedichten von bis zu 3526 W/l [SAF08]. Durch Einbindung des Akkus in das Klimasystem wird dessen Betriebstemperatur zwischen 15 und 35 °C gehalten. Unter normalen Einsatzbedingungen sind nach Aussagen der Entwickler eine Kalenderlebensdauer von 10 Jahren und eine Zyklenlebensdauer von bis zu 600000 Zyklen möglich [DAI08].

3.4.2 Hochenergiebatterien für Elektrofahrzeuge

Anforderungen

Die wichtigsten, für reine Elektrofahrzeuge erfolgsbestimmenden Parameter des Batteriespeichers sind sicherlich dessen Energiedichte und spezifische Energie, da sie für eine vorgegebene Reichweite das Bauvolumen und das Gewicht der Batterie bestimmen. Die verwendeten Lithium-Ionen Zellen sind deshalb im Gegensatz zum Hybridfahrzeug speziell auf hohen Energieinhalt optimiert. Auch das Nutzungsprofil des Akkus eines Elektromobils unterscheidet sich deutlich von dem eines Hybridfahrzeuges. Der Batteriespeicher wird zunächst vollständig über das externe Stromnetz aufgeladen und später während des Betriebs kontinuierlich entladen. Im Gegensatz zu den beim Hybrid vorherrschenden flachen Zyklen erfordert der Betrieb des Elektrofahrzeuges deshalb tiefe Entladungen der Zellen, wodurch,

wie in Abbildung 3-15 dargestellt, ein wesentlich größerer Teil der Gesamtkapazität des Speichers auch tatsächlich genutzt wird.



Quelle: eigene Darstellung nach [PES07]

Abbildung 3-15 Nutzungsprofil der Batterie eines Elektrofahrzeuges

Mit zunehmender Tiefe der Entladung werden jedoch Degradationseffekte verstärkt, was eine verringerte Zyklenlebensdauer zur Folge hat (vgl. Abbildung 3-8). Insgesamt werden jedoch während einer 10 jährigen Kalenderlebensdauer ca. 1000 tiefe Lade- und Entladezyklen verlangt, wie aus den Zielvorgaben des USABC in Tabelle 3 hervorgeht.

	Einheiten	Mindestvorgaben	Langfristige Ziele
Leistungsdichte	W/l	460	600
spezifische Leistung (80% DoD, 30 s Puls)	W/kg	300	400
regeneratives Bremsen (20% DoD, 10 s Puls)	W/kg	150	200
Energiedichte (C/3 Entladerate)	Wh/l	230	300
Spezifische Energie (C/3 Entladerate)	Wh/kg	150	200
Verhältnis spez. Leistung/spez. Energie	1/h	2:1	2:1
verfügbare Energie	kWh	40	40
Kalenderlebensdauer	Jahre	10	10
Zyklenlebensdauer (80% DoD)	Zyklen	1000	1000
Max. Kapazitäts- und Leistungs- verluste bis Lebensdauerende	% des Ausgangswertes	20	20
Verkaufspreis #25000 Einheiten @ 40 kWh	US\$/kWh	< 150	100
Betriebstemperatur	°C	-40 bis 50	-40 bis 85
normale Ladedauer	h	6	3 bis 6
Schnelles Laden		Ladezustand von 20% auf 70% in < 30 Minuten @ 150 W/kg	Ladezustand von 40% auf 80% in 15 Minuten
kontinuierliche Entladung in 1h ohne Fehlfunktion	% der Gesamtkapazität	75	75

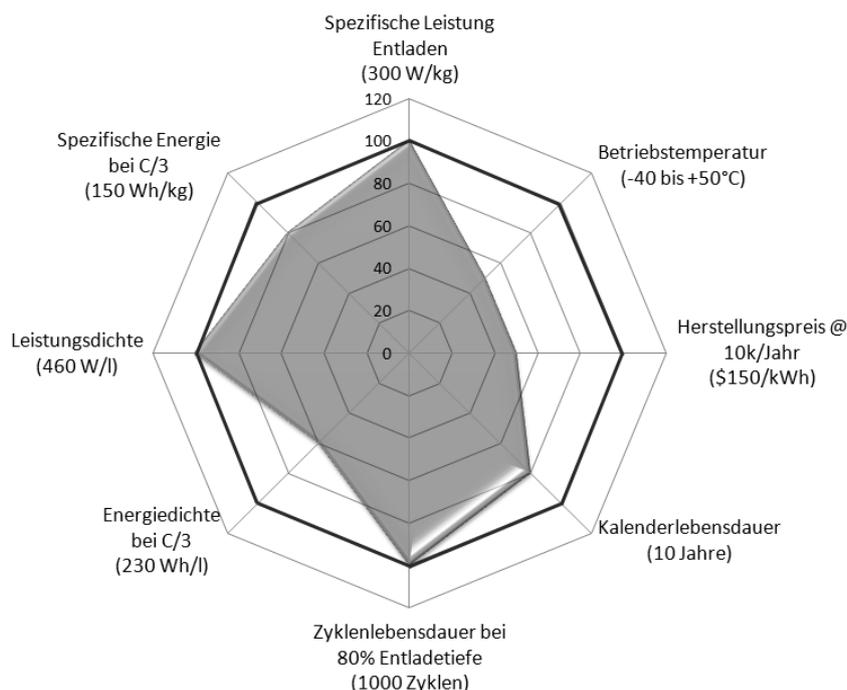
Quelle: [USC08]

Tabelle 3 Mindestvorgaben und langfristige Zielanforderungen des USABC für ein mit konventionellen Mittelklasselimosinen vergleichbares Elektrofahrzeug

Die Mindestvorgaben und die langfristigen Ziele des USABC unterscheiden sich vor allem in den Werten der spezifischen Energie bzw. Energiedichte und spezifischen Leistung bzw. Leistungsdichte, die das Gewicht bzw. das Bauvolumen des Batteriespeichers bestimmen. Auch die Batterieleistung ist eine für das Elektrofahrzeug wichtige Größe, da dieses nicht wie das Hybridfahrzeug über einen leistungsunterstützenden Verbrennungsmotor verfügt, und somit allein das Batteriesystem in extremen Fahrsituationen ausreichend Leistung zur Verfügung stellen muss. Für das Wiederaufladen des großen Speichers ist außerdem eine hohe Ladeleistung erforderlich. Die USABC-Ziele sehen eine normale Ladedauer von 3 bis 6 Stunden vor, heutige Haushaltsanschlüsse beschränken die Ladeleistung aber auf 3 kW, was zu Ladezeiten von mehr als 13 Stunden für ein Batteriesystem mit 40 kWh führt. Außerdem ist ein schnelles Laden während eines Zwischenstopps mit entsprechend hoher Ladeleistung, bei dem der Speicher jedoch nur zum Teil aufgeladen wird, vorgesehen.

Entwicklungsstand

Den Entwicklungsstand von Lithium-Ionen Hochenergiebatteriesystemen für Elektrofahrzeuge gibt Abbildung 3-16 wieder.



Quelle: [CHA06]

Abbildung 3-16 Entwicklungsstand von Hochenergiebatteriesystemen für Elektrofahrzeuge verglichen mit den Minimalanforderungen des USABC (100% = USABC-Ziele)

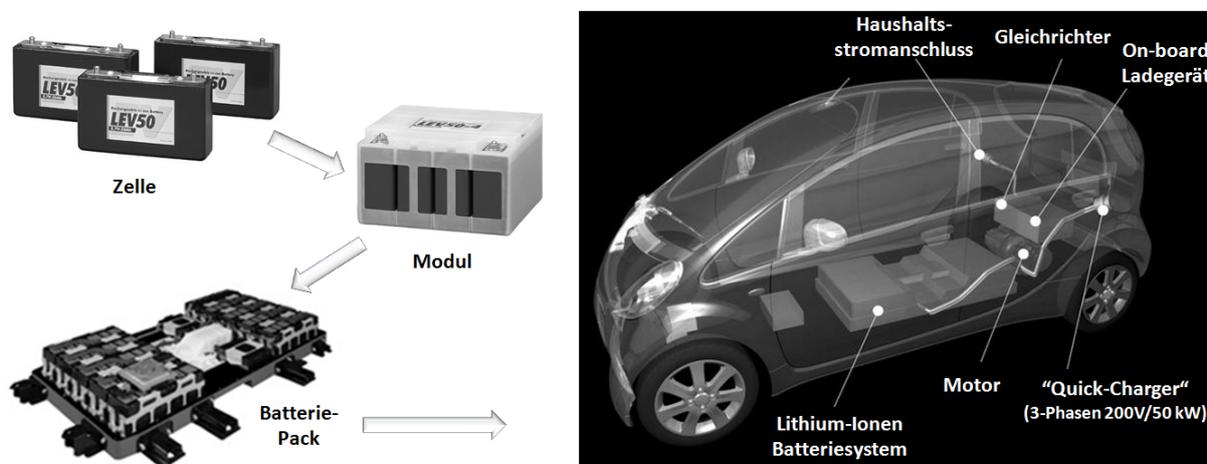
Die Zielvorgaben für die Energiedichte und spezifische Energie eines mit einer konventionellen Mittelklasselimousine vergleichbaren Elektrofahrzeugs sind mit der heutigen Lithium-Ionen Technologie nicht zu erreichen, was zu Einschränkungen bei Fahrzeuggewicht, Reichweite und Stauraum der heute technisch realisierbaren Elektromobile führt. Wie bereits

im Falle der Hochleistungszellen diskutiert, ist auch die Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen Hochenergiezellen bei tiefen und hohen Temperaturen stark eingeschränkt. Bezüglich der Kalenderlebensdauer der Batterie konnte zwar in den vergangenen Jahren deutliche Fortschritte erzielt werden, so dass heute prinzipiell die Anwendung im Elektrofahrzeug möglich ist, ob aber tatsächlich eine Lebensdauer von 10 Jahren erreicht werden kann, ist schwierig vorherzusagen und muss unter realen Betriebsbedingungen nachgewiesen werden. Die Zyklenlebensdauer wird von den meisten Herstellern jedoch bereits mit mehr als 1000 Zyklen angegeben (vgl. Anhang, Tabelle 10).

Umsetzungsbeispiele

Wegen der noch bestehenden Einschränkungen der Lithium-Ionen Technologie kommen die ersten Elektromobile mit Lithium-Ionen Speicher zunächst als leichte Klein- oder Sportwagen auf den Markt. Potentielle Hochenergiebatterien verschiedener Hersteller für die Verwendung in Elektrofahrzeugen sind im Anhang (Tabelle 10) aufgeführt.

Der 'i MiEV' von Mitsubishi ist ein aktuelles Beispiel eines serienreifen batterieelektrischen City-Cars, der in Japan Ende 2009 auf den Markt kommen soll. Ein 16 kWh Lithium-Ionen Batteriesystem bestehend aus 22 Modulen mit jeweils 8 Zellen ermöglicht dem Fahrzeug eine Reichweite von bis zu 160 km. Die von Mitsubishi und der Firma GS Yuasa entwickelten Zellen haben bei einem Einzelgewicht von 1,7 kg eine spezifische Energie bzw. Energiedichte von 109 Wh/kg bzw. 218 Wh/l sowie eine spezifische Leistung von 550 W/kg. Für das gesamte Batteriesystem wird eine spezifische Energie von 80 Wh/kg angegeben. In Tests wurde außerdem mit mehr als 1000 Lade- und Entladezyklen eine ausreichende Zyklenlebensdauer erreicht [GRE08]. Neben dem kompletten Aufladen am Haushaltsstromanschluss, dass bei den in Japan üblichen 100 V Anschlüssen lange 14 Stunden dauert, soll ein Schnellladesystem 80 Prozent der Batteriekapazität beim Zwischenstopp an einer speziellen Relaisstation in nur 30 Minuten wieder herstellen [MIT08].



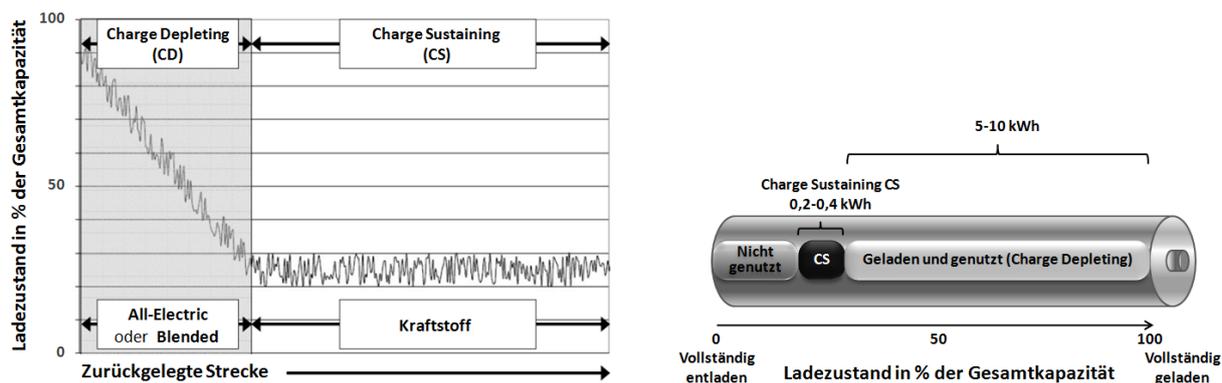
Quelle: [MIT08]

Abbildung 3-17 Aufbau des Batteriesystems eines Mitsubishi 'i MiEV'

3.4.3 Batterien für Plug-In Hybridfahrzeuge

Anforderungen an das Batteriesystem:

Der Plug-In Hybrid kombiniert die Batterie-Nutzungsprofile von Elektro- und Vollhybrid-Fahrzeug (s. Abbildung 3-18). Vergleichbar mit einem Elektromobil wird die über das externe Stromnetz gespeicherte Energie bei Fahrtantritt zunächst im so genannten Entlade- oder „Charge-Depletion“ CD-Modus zum batterieelektrischen Antrieb des Fahrzeuges verwendet, d.h. der Batteriespeicher wird kontinuierlich entladen. Im CD-Modus ist dabei ein vollelektrischer („all electric“) oder ein kombinierter Antrieb durch den Elektro- und Verbrennungsmotor, der so genannte „blended“ CD-Modus mit geringeren Anforderungen an das Batteriesystem, aber niedrigerer Treibstoffeinsparung, möglich. Erst bei Erreichen eines unteren Ladezustands übernimmt der Verbrennungsmotor den primären Fahrzeugantrieb, während der Elektromotor weiterhin zur Leistungsunterstützung eingesetzt wird. In diesem Ladungserhaltenden- oder „Charge-Sustaining“ CS-Modus wird der Batteriespeicher wie beim Hybridfahrzeug auf einem im Mittel konstanten „Sweet Spot“-Niveau in flachen Zyklen beim Bremsen bzw. Beschleunigen geladen bzw. entladen.



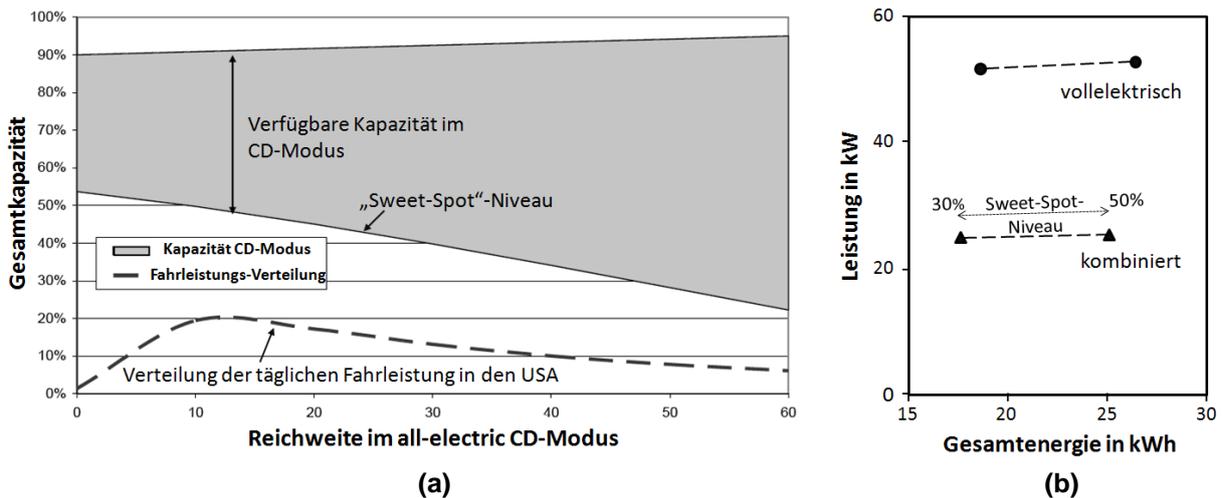
Quelle: [KRO07] und eigene Darstellung nach [PES07]

Abbildung 3-18 Nutzungsprofil der Batterie eines Plug-In Hybridfahrzeuges

Die entscheidenden Variablen zur Auslegung des Batteriesystems sind die im CD-Modus entnommene Kapazität bzw. verfügbare Energie sowie die Leistung der Batterie. Die Wahl dieser beiden Größen wirkt sich dann direkt auf alle weiteren Faktoren wie Kosten, Masse, Volumen oder Lebensdauer aus. Deshalb werden Batteriesysteme für Plug-In Hybride meist anhand des Verhältnisses P/E von spezifischer Leistung P zu spezifischer Energie E unterschieden. Bei geringer Reichweite des Fahrzeuges im CD-Modus sind vor allem die Leistungsziele von Bedeutung, während die verfügbare Energie bei Plug-In Hybriden höherer Reichweite herausfordernd ist. Bei einem für eine Mittelklasselimousine typischen Energieverbrauch von ca. 300 Wh/Meile ist beispielsweise eine verfügbare Energie von ~ 6 kWh für einen PHEV20 bzw. ~ 12 kWh für einen PHEV40 erforderlich [MAR06].

Die Wahl des unteren Ladezustands, des Sweet-Spot-Niveaus, auf das die Batterie im CD-Modus vor dem Wechsel in den CS-Modus entladen wird, bestimmt das Verhältnis der Ge-

samtenergie einer Zelle zu der im CD-Modus verfügbaren Energie. Beim Vollhybrid-Fahrzeug liegt dieses Sweet-Spot-Niveau in der Regel bei einem Ladezustand von ca. 50 bis 60%. Ein Absenken des Niveaus erhöht die im CD-Modus entnommene Kapazität und somit die verfügbare Energie bzw. die Reichweite im Elektrobetrieb (s. Abbildung 3-19 (a)). Dieses geht jedoch deutlich zu Lasten der Zyklenlebensdauer, die mit zunehmender Entladungstiefe abnimmt (vgl. Abbildung 3-8). Außerdem ist auch die Leistungsaufnahme und -abgabe auf niedrigem Ladeniveau im CS-Modus eingeschränkt (vgl. Abbildung 3-12).



Quelle: [MAR06]

Abbildung 3-19 Möglichkeit zur Erhöhung der Reichweite durch das Absenken des Sweet-Spot-Niveaus (a) und reduzierte Leistungsanforderungen im kombinierten („blended“) CD-Modus (b)

Für die Leistungsanforderungen ist neben dem Gesamtgewicht sowie dem Roll- und Luftwiderstand des Fahrzeuges vor allem entscheidend, ob der Plug-In Hybrid für den vollelektrischen oder kombinierten CD-Modus konzipiert ist. Die unterschiedlichen Leistungsanforderungen im all-electric- bzw. im blended-CD-Modus verdeutlicht Abbildung 3-19 (b).

Während der Betrieb eines Plug-In Hybrides in der Regel eine tiefe Entladung pro Tag im CD-Modus, d.h. ca. 5000 tiefe Entladungen während der Kalenderlebensdauer erfordert, sind im CS-Modus, vergleichbar mit einem Vollhybrid-Fahrzeug, täglich mehrere hundert flache Lade- und Entladezyklen möglich, d.h. mehr als 300000 flache Zyklen über die gesamte Gebrauchsdauer.

Vom USABC wurden als kurzfristiges Ziele (bis 2012) Anforderungen an den Batteriespeicher eines Sports Utility Vehicles mit 10 Meilen definiert sowie langfristige Vorgaben (bis 2016) für eine Mittelklasselimousine mit 40 Meilen Reichweite erarbeitet. Beide Fahrzeuge sind für den vollelektrischen CD-Modus konzipiert. Die folgende Tabelle 4 führt außerdem die für einen Mittelklassewagen im vollelektrischen CD-Modus etwas schwächer formulierten Zielsetzungen von Experten des *Electric Power Research Institute (EPRI)* sowie die Spezifikation eines Plug-In Hybridfahrzeuges im blended-CD-Modus des *MIT* auf. Die zum Teil abweichenden Anforderungen machen deutlich, dass die angegebenen Größen jeweils nur als Richtwerte zu betrachten sind, welche später an spezifische Fahrzeuge anzupassen sind.

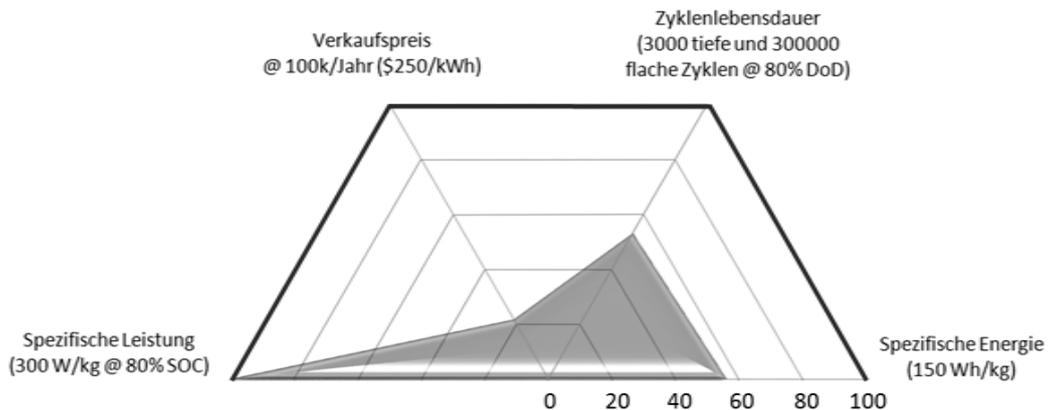
	Einheiten	USABC		EPRI		MIT
		PHEV-10 (Leistung/Energie- Verhältnis hoch)	PHEV-40 (Leistung/Energie- Verhältnis niedrig)	Mittelklasse	Mittelklasse	Mittelklasse
Fahrzeugtyp		Crossover SUV	Mittelklasse	Mittelklasse	Mittelklasse	Mittelklasse
Fahrzeuggewicht	kg	1950	1600	1664	1762	1350
CD-Modus		Vollelektrisch	Vollelektrisch	Vollelektrisch	Vollelektrisch	Blended
1) Batteriesystem-Ebene						
Zielerreichung	Jahr	2012	2016			
CD - Reichweite	Meilen	10	40	20	60	30
Max. Preis bei 100k Batteriesystemen/Jahr	US\$	1700	3400			
Kalenderlebensdauer, 35°C	Jahre	15	15	10	10	15
Max. Gewicht	kg	60	120	159	302	60
Max. Volumen	l	40	80			
2) Charge-Depleting Modus						
Entladeleistung (Peak), 2 s / 10 s Puls	kW	50 / 45	46 / 38	54	99	44
Ladeleistung regen. Bremsen (Peak), 10 s Puls	kW	30	25			
Verfügbare Energie im CD-Modus, 10 kW Rate	kWh	3,4	11,6			
CD-Lebensdauer / Entladeenergie insgesamt	Zyklen / MWh	5000 / 17	5000 / 58	2400	1400	2500
Ladeleistung, Wiederaufladen bei 30°C	kW	1,4 (120 V, 15 A)	1,4 (120 V, 15 A)			
3) Charge-Sustaining Modus						
Verfügbare Energie im CS-Modus	kWh	0,5	0,3			
Min. Effizienz (USABC HEV Fahrzyklus)	%	90	90			
Leistung bei -30°C, 3 Pulse à 2 s	kW	7	7			
CS-Lebensdauer, 50Wh Profil	Zyklen	300000	300000	< 200000	< 200000	175000
4) Betriebsbedingungen						
Betriebsspannung Max. / Min.	V	400 / > 0,55·V _{max}	400 / > 0,55·V _{max}			
Selbstentladung	Wh/Tag	50	50			
Temperatur:						
- Arbeitstemperatur	°C	-30 bis +52	-30 bis +52			
- zulässige Ruhetemperatur		-46 bis +66	-46 bis +66			

Quelle: [AXS08]

Tabelle 4 Anforderungen des USABC, EPRI und MIT an unterschiedlich konzipierte Plug-In Hybride

Entwicklungsstand

Abbildung 3-20 misst den technischen Stand von Lithium-Ionen Batteriesystemen für Plug-In Hybride an den USABC-Zielvorgaben für eine PHEV40 Mittelklasselimousine.



Quelle: [DOE07]

Abbildung 3-20 Entwicklungsstand von Lithium-Ionen Batteriespeichern für Plug-In Hybride verglichen mit den Zielvorgaben des USABC für eine PHEV40 Mittelklasselimousine (100% = USABC-Ziele)

Die Verkürzung der Kalender- und Zyklenlebensdauer durch Kapazitäts- und Leistungsverluste während des Gebrauchs eines Plug-In Hybridfahrzeuges zählen aufgrund des anspruchsvollen Nutzungsprofils der Batterie mit zahlreichen flachen Zyklen im CS-Modus sowie in der Regel täglichen Tiefentladungen im CD-Modus zu den größten technischen Herausforderungen der Batterieentwicklung. Zwar ermöglicht die Lithium-Ionen Technologie eine ausreichende Lebensdauer im Falle flacher Zyklen, beispielsweise bei Vollhybrid-Fahrzeugen, jedoch wird die Kombination mit den zusätzlich geforderten tiefen Entladungen des Batteriespeichers heute von vielen Autoren noch sehr kritisch betrachtet [HIL08]. Das Problem stellt die Batteriedesigner vor den Zielkonflikt zwischen einer hohen verfügbaren Kapazität im CD-Modus und somit großen Fahrzeugreichweite einerseits und einer langen Zyklenlebensdauer andererseits. Um eine ausreichende Zyklenlebensdauer zu garantieren, muss deshalb heute das Sweet-Spot-Niveau bei einem relativ hohen Ladezustand im Bereich von 50% bis minimal 30% der Gesamtkapazität festgelegt werden. Dies hat zur Folge, dass bis zu 50% der Gesamtkapazität ungenutzt zum Batteriegewicht und -volumen beitragen. Wird beispielsweise für den PHEV40 eine verfügbare Energie im CD-Modus von 11,6 kWh verlangt, so muss die Batterie mit einer Gesamtenergie der Größenordnung von 20 kWh ausgelegt werden. Dies ergibt bei einem heute typischen Wert für die spezifische Energie des Batteriesystems von 75 Wh/kg ein reines Batteriegewicht von ungefähr 267 kg, was unter dem Gesichtspunkt der Effizienz und Fahrdynamik des Fahrzeuges nicht akzeptabel ist. Unter Annahme einer Energiedichte von 150 Wh/l berechnet sich zudem ein Batterie-volumen von 133 Liter, was beinahe dem Kofferraumvolumen eines Mittelklassefahrzeuges entspricht. Wie das Elektrofahrzeug erfordert die Weiterentwicklung des Plug-In Hybrids deshalb Batterien höherer spezifischer Energie und Energiedichte sowie eine höhere elektrochemische Stabilität der Zellen gegenüber Degradationseffekten, so dass sie dem anspruchsvollen Nutzungsprofil des Plug-In Hybrids besser entsprechen [AND07].

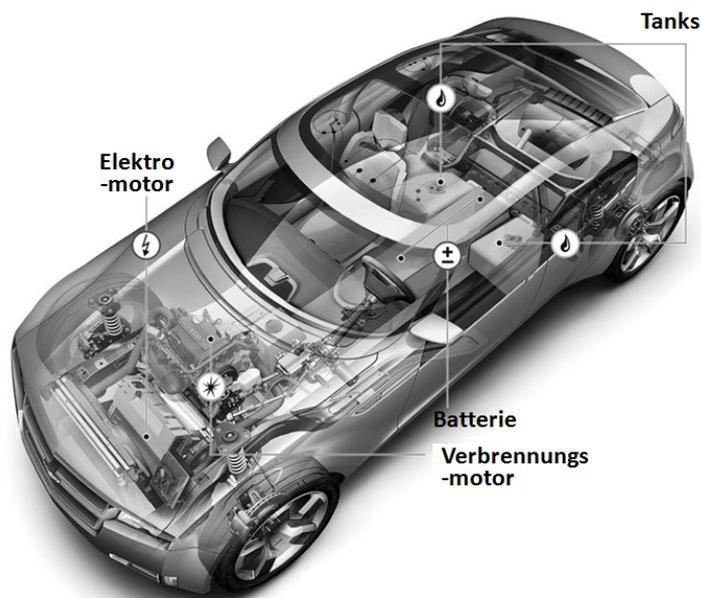
Da die Batterie des Plug-In Hybrids in der Regel täglich über Nacht in der Garage vollständig aufgeladen wird, ist außerdem zu beachten, dass die Gefahr eines sicherheitsrelevanten Zwischenfalles gegenüber der kleineren Batterie eines Vollhybridfahrzeuges, die nur auf einem mittlerem Ladeniveau betrieben wird, ansteigt. Auch die Kosten der sich heute noch in der Entwicklungsphase befindenden Batteriesysteme liegen noch zwischen dem Vier- bis Zehnfachen über den Zielvorgaben der USABC [HIL08].

Umsetzungsbeispiele:

Plug-In Hybride existieren derzeit bereits als Umbauten von Vollhybridfahrzeugen mit einem größeren Batterien und angepasster Ladeelektrik wie z.B. der Plug-In Prius der Firma EnergyCS [DGS08].

Der Chevrolet Volt, ein viertüriger Kompaktwagen, ist nach Angaben von General Motors ein ab dem Jahr 2010 für die Serienproduktion bestimmtes Plug-In Hybridfahrzeug. Aufgrund der seriellen Anordnung von Verbrennungs- und Elektromotor wird der Volt von General Motors als "*extended-range electric vehicle*" bezeichnet. Ein T-förmig im Mitteltunnel und vor der Hinterachse untergebrachtes Lithium-Ionen-Batteriesystem mit einer Kapazität von 16 kWh,

das aus 220 Lithium-Ionen-Zellen aufgebaut ist und 180 Kilogramm wiegt, soll eine Reichweite von 60 km im Elektrobetrieb ermöglichen. Der Lithium-Ionen-Akku wird dabei auf einem Ladungszustand zwischen 30% und 80% gehalten, wobei der vom Verbrennungsmotor betriebene On-Board-Generator bei einem Ladungsniveau von 30% mit dem Nachladen beginnt. Noch immer ist nicht klar, welcher Hersteller die Batterien für den Volt in ausreichender Stückzahl und Qualität produzieren kann [WIK08]. Die Integration des Batteriespeichers und des Elektromotors ins Fahrzeug ist in Abbildung 3-21 dargestellt.



Quelle: [SPI08]

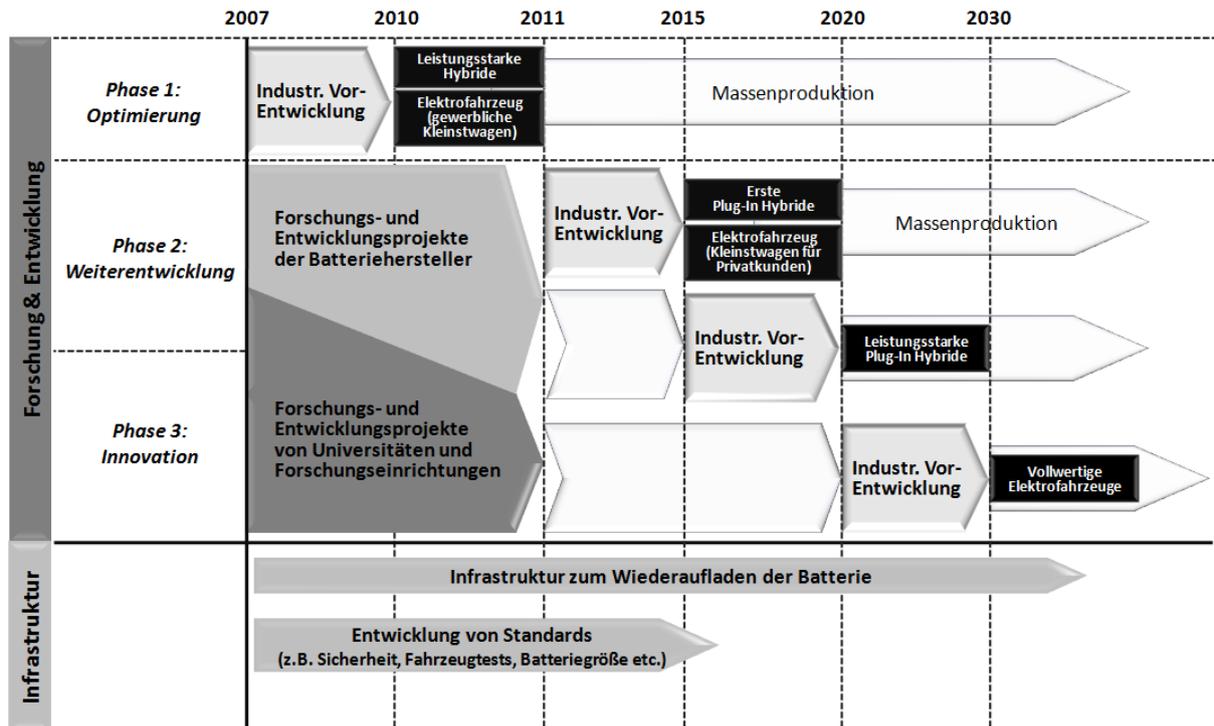
Abbildung 3-21 Möglichkeit zur Integration des Elektroantriebs in ein Plug-In Hybridfahrzeug am Beispiel des Chevrolet Volt

3.5 Entwicklungsperspektiven der Lithium-Ionen Technologie in batterieelektrischen Fahrzeugen

Lithium-Ionen Akkumulatoren als elektrochemische Speicher für Fahrzeugantriebe stehen derzeit erst an der Schwelle zur Kommerzialisierung, und obwohl in den letzten Jahren beachtliche Fortschritte erzielt wurden, besteht für die Zukunft noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

3.5.1 Roadmap zur Entwicklung der nächsten Generation Fahrzeugbatterien

Ein Aktionsplan des japanischen Ministeriums für Wirtschaft, Handel und Industrie METI, welche die Aktivitäten von Industrie, Politik und Wissenschaft im Bereich der Batteriespeicher für umweltfreundliche Fahrzeuge in Japan koordiniert, sieht eine Unterteilung der zukünftigen Entwicklungsschritte in die beiden Bereiche „Forschung und Entwicklung der nächsten Generation von Fahrzeugbatterien“ sowie „Strategie zur Infrastrukturentwicklung“. Die Roadmap dieses Aktionsplanes zeigt die folgende Abbildung 3-22.



Quelle: [MET06]

Abbildung 3-22 Roadmap zur F&E der nächsten Generation von Fahrzeugbatterien und zum Aufbau einer Infrastruktur des japanischen NEDO

Während der zuletzt genannte Bereich beispielsweise den Aufbau einer Infrastruktur zum Wiederaufladen der Batterien sowie die Erarbeitung von Sicherheitsrichtlinien und Standards beinhaltet, wird die weitere Entwicklung der Lithium-Ionen Technologie in drei Phasen untergliedert [MET06]:

- Phase 1: Optimierung**

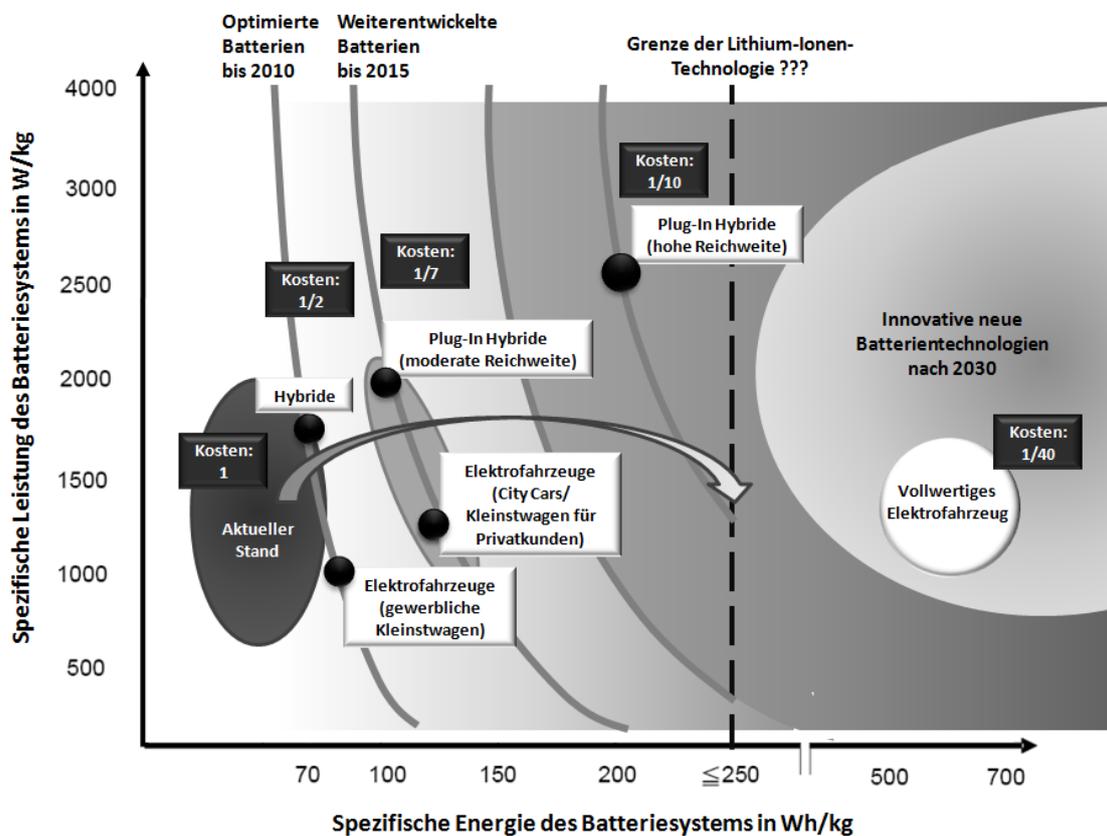
Hauptsächlich durch industrielle Entwicklungsanstrengungen werden Lithium-Ionen Batterien auf Basis der heute bekannten Technologie für den Einsatz zunächst in Vollhybridfahrzeugen und Elektrofahrzeugen der Kleinwagenklasse für den gewerblichen Bereich optimiert. Diese Phase soll bis 2010 abgeschlossen sein. Die Kosten der Batterie sollen dabei verglichen mit dem aktuellen Stand (Ende 2006) um die Hälfte reduziert werden.
- Phase 2: Weiterentwicklung der Lithium-Ionen Technologie**

Durch gemeinsame Entwicklungsanstrengungen von Batteriehersteller und Hochschulen sollen bis 2015 Lithium-Ionen Batterien für erste Plug-In Hybride sowie für rein elektrisch betriebene City-Cars und Kleinstfahrzeuge für den Privatkundenmarkt entwickelt werden. Die Leistungsmerkmale der Batterie sind bis dahin um das 1,5 fache des aktuellen Standes zu steigern, während eine Reduzierung der Kosten auf etwa 1/7 der ursprünglichen Niveaus erwartet wird.

- **Phase 3: Erforschung neuer innovativer Batterietechnologien**

In dieser letzten Phase sollen bis 2030 auf universitärer Ebene neue Speichertechnologien erforscht werden, die über die Grenzen der Lithium-Ionen Technologie hinaus die Marktverbreitung vollwertiger Elektrofahrzeuge erlauben. Dazu sei eine Steigerung der aktuellen Batterie-Leistungsmerkmale um den Faktor 7 sowie eine Kostensenkung auf 1/40 des heutigen Wertes vorgesehen.

Der beschriebene Entwicklungsprozess ist nochmals anschaulich in Abbildung 3-23 dargestellt. Aufgezeigt werden in dieser Darstellung auch die Grenzen der Lithium-Ionen Technologie. Für die Realisierung vollwertiger, mit heutigen konventionellen Automobilen vergleichbarer Elektrofahrzeuge ist die Erforschung neuer Batterietechnologien erforderlich, deren Eigenschaften weit über die Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen Speicher hinausgehen.



Quelle: [MET06]

Abbildung 3-23 Szenario zur Entwicklung zukünftiger Fahrzeugbatterien

3.5.2 Internationale Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen

Die USA, Europa, Japan, Südkorea und China und einige weitere Staaten stehen heute bei der Erforschung neuer innovativer Lithium-Ionen Speicher in einem globalen Wettbewerb. In staatlichen und von der Industrie finanzierten Programmen wird die Entwicklung vorangetrieben. Einige der finanziell am besten ausgestatteten Entwicklungsprogramme zeigt die folgende Abbildung 3-24.

	FreedomCAR & Vehicle Technology Program Project: Forschung und Entwicklung von Energiespeichern (Budget 2008: ca. \$42 Mio.)
	U.S. Department of Energy: Unterstützt Firmen bei der Entwicklung von Plug-In Hybriden (\$30 Mio.)
	USABC: finanzielle Unterstützung von Batterieherstellern (A123, Compact Power, Johnson Controls/Saft, EnerDel, 3M) bei der Entwicklung von LIB für HEV und PHEV (\$20 Mio.)
	METI/NEDO: „Next Generation Batteries for the Commercialization of Plug-in HVs, FCVs, and EVs“ (ca. \$45 Mio. im Jahr 2007, Dauer: 2006-2011)
	Nationales Projekt: „Development of super high-capacity Li-Ion Batteries“ (ca. \$84,7 Mio. insgesamt, Dauer: 2004-2009)
	863 Programm: Nationales Projekt zur Entwicklung von Lithium-Ionen-Hochenergiebatterien für Elektrofahrzeuge sowie Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge
	ALISTORE: europäisches Forschungs- und Entwicklungsprojekt für neue Li-Ionen Batterien (\$7 Mio., Dauer: 2004-2008)
	Deutschland: „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ (€360 Mio. Industriekonsortium + €60 Mio. BMBF)

Quelle: eigene Darstellung nach [ISH07], [HIL08]

Abbildung 3-24 Nationale Forschungs- und Entwicklungsprogramme

Insgesamt sind die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von staatlichen Forschungseinrichtungen und Industrie gut miteinander verknüpft. Die Entwicklung in den USA wird koordiniert durch das „FreedomCAR and Vehicle Technologies Program“ des U.S. Department of Energy, das eng mit dem U.S. Advanced Battery Consortium (USABC) des U.S. Council for Automotive Research (USCAR) zusammenarbeitet, welches die amerikanische Automobilindustrie vertritt. In Japan ist es die New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) des Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), welches die Aktivitäten von Wirtschaft und Universitäten verbindet. Zur Unterstützung der Forschung und Entwicklung wurde in Südkorea ein sogenanntes Zentrum für die Industrialisierung von Batterien der nächsten Generation eingerichtet. Es befindet sich im Korea Electronics Technology Institute (KETI). Auch von der chinesischen Regierung wird die Entwicklung von Lithium-Ionen Batterien als strategisch wichtige Technologie vorangetrieben. Das Alistore-Netzwerk, dem zahlreiche europäische Forschungsgruppen angehören, soll die Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen in Europa koordinieren. Speziell in Deutschland wurde im letzten Jahr eine mit insgesamt 420 Millionen Euro ausgestattete Innovationsallianz „Lithium Ionen Batterie LIB 2015“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gestartet.

Nicht nur Universitäten und Forschungseinrichtungen, sondern auch Batteriehersteller werden in den Entwicklungsprozess mit einbezogen. In den USA wird beispielsweise die industrielle Forschung bei den Batterieproduzenten durch Cost-Share-Verträge, bei denen jeweils zur Hälfte der Staat und der Hersteller die Finanzierung trägt, unterstützt [HOW08].

Allgemein sind für die nächsten Jahre folgende Forschungsschwerpunkte zu identifizieren [HOW08], [PAT08b], [DEO07], [CHA06]:

- Verlängerung der Batterie-Lebensdauer durch die gezielte Untersuchung von Mechanismen, welche die Lebensdauer beschränken.
- Verständnis und Verbesserung der Tieftemperatur-Performance durch die Verwendung spezieller Elektrolyte, optimierter Elektrodenmaterialien und ein verbessertes Zell-Design
- Verständnis und Verbesserung von Sicherheitsaspekten, insbesondere der Toleranz gegenüber äußeren Einwirkungen (z.B. Umgebungstemperatur, Unfall)
- Kostenreduktion durch kostengünstigere Materialien, Komponenten und Produktionstechnologien

Das Ziel ist die Optimierung der Zellchemie durch die Entwicklung neuer Materialien, die strukturell, elektrochemisch und thermisch in der Zellumgebung stabil sind und die zu attraktiven Kosten herzustellen sind.

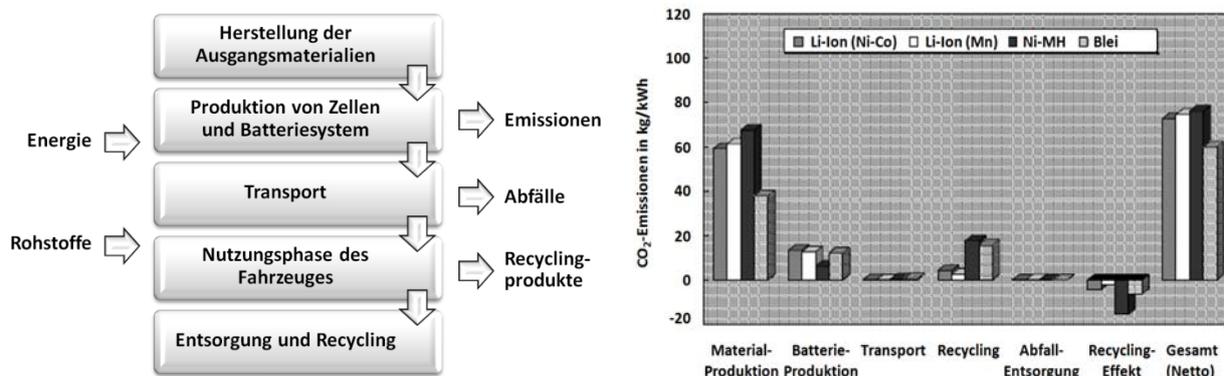
4 Ökologische und ökonomische Betrachtungen

Im vorherigen Kapitel wurde das technische Potential von Lithium-Ionen Batterien in Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb erörtert. Während insbesondere die Entwicklung von Hochleistungszellen für den Einsatz in Vollhybriden schon weit fortgeschritten ist, sind bis zur Marktreife eines vollwertigen, mit konventionellen Automobilen vergleichbaren Elektrofahrzeuges noch große technische Hürden bei der Energiespeicherung zu überwinden. Doch selbst wenn diese Anforderungen in absehbarer Zeit erfüllt werden, so ist für die Marktakzeptanz eines Fahrzeuges mit Lithium-Ionen Speicher eine erhebliche Senkung der derzeitigen Kosten des Batteriesystems erforderlich. Außerdem bleibt die Frage zu klären, ob eine breite Markteinführung batterieelektrischer Fahrzeuge unter ökologischen Gesichtspunkten überhaupt sinnvoll ist, oder ob sie auch zukünftig nur als Nischenprodukte eine Rolle spielen können und sollten.

Neben einer Darstellung der Umweltwirkungen batterieelektrischer Fahrzeuge (Kapitel 4.1) sollen mit Hilfe der Erfahrungskurven-Analyse Kostenentwicklungen von Lithium-Ionen Batterien abgeschätzt und in einer Bottom-Up-Betrachtung reale Kostensenkungsmöglichkeiten identifiziert werden (Kapitel 4.2). Eine Übersicht der Hauptakteure am Markt und der Marktpotentiale batterieelektrische Fahrzeuge schließt dieses Kapitel ab (Kapitel 4.3).

4.1 Nutzen und Belastungen für Umwelt und Gesellschaft

In eine Gesamtbilanz der Umweltwirkung batterieelektrischer Fahrzeuge sind alle Lebensabschnitte des Batteriesystems mit einzubeziehen. Beginnend bei der Produktion der Ausgangsmaterialien über die Herstellung der Batterie, den Transport, die Nutzungsphase im Fahrzeug bis hin zu Entsorgung bzw. Recycling. In jeden dieser Lebensabschnitte gehen Rohstoffe und/oder Energie als Eingangsgrößen ein, denen Recycling- und Abfallprodukte sowie Emissionen als Ausgangsgrößen gegenüberstehen (s. Abbildung 4-1).



Quelle: eigene Darstellung nach [PIS05] und [ISH02]

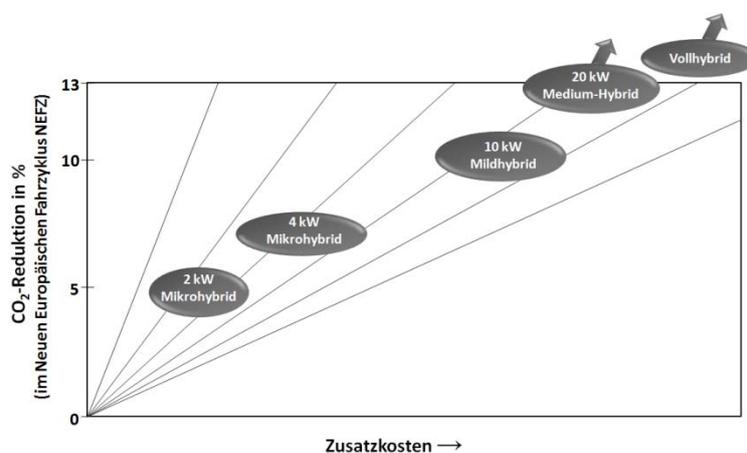
Abbildung 4-1 Lebensphasen eines Batteriesystems mit Angabe von Material- und Energieflüssen und CO₂-Emissionen während einzelner Lebensabschnitte für verschiedene Batterietechnologien

Die negativen Umweltwirkungen, die vor allem von der Herstellung der Ausgangsmaterialien sowie der Batterieproduktion herrühren, müssen durch positive Effekte der Emissionsreduktion und Kraftstoffeinsparung während der Fahrzeugnutzung übertroffen werden. Der Energieeinsatz und die CO₂-Emissionen bei der Produktion eines Lithium-Ionen Batteriesystems mit Ni/Co- bzw. Mn-basierter Kathode unterscheiden sich nur geringfügig und werden mit ungefähr 360 Mcal/kWh und 75 kg-CO₂/kWh angegeben (vgl. Abbildung 4-1) [ISH02]. Gleichzeitig ist aber auch der Rohstoffeinsatz bei der Herstellung zu betrachten, da ein Teil der eingesetzten Materialien weltweit nur begrenzt verfügbar ist, und eine weite Verbreitung batterieelektrischer Fahrzeuge zur Verknappung wichtiger Rohstoffe führen könnte. Auch unter diesem Gesichtspunkt ist das Batterierecycling von großer Bedeutung.

4.1.1 Beitrag zur Emissionsreduzierung und Kraftstoffeinsparung

Batterieelektrische Fahrzeuge besitzen das Potential, die Energieeffizienz gegenüber konventionellen Fahrzeugen zu steigern, was sich bei Hybrid- und Plug-In Hybridfahrzeugen in einer Minderung des Kraftstoffverbrauchs äußert, sowie Schadstoffemissionen insgesamt zu reduzieren bzw. lokal vollständig zu vermeiden. Da die Umweltwirkungen batterieelektrischer Fahrzeuge stark von der jeweiligen Fahrzeugspezifikation sowie der Nutzungsweise abhängen, ist eine exakte Bilanzierung sehr komplex, weshalb an dieser Stelle nur die wichtigen Aspekte angesprochen werden sollen.

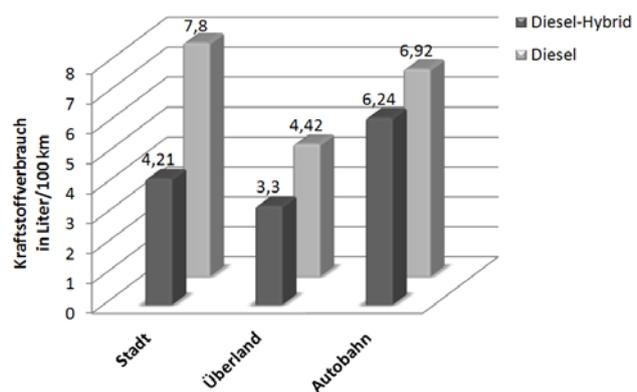
Die höhere Kraftstoffeffizienz des Hybridfahrzeuges und die Verringerung der CO₂-Emissionen wird im Wesentlichen erreicht durch den besonders im unteren Drehzahlbereich hohen Wirkungsgrad des Elektromotors, den Down-Sizing-Effekt bei kleinerer Auslegung des Verbrennungsmotors sowie durch die teilweise Rückgewinnung von Bremsenergie [GRÜ06]. Dabei ist für die Höhe der CO₂-Reduktion beim Hybridfahrzeug vor allem das Gesamtdesign, d.h. der Hybridisierungsgrad (s. Abbildung 4-2) und die Auslegung des Antriebsstranges in paralleler, serieller oder leistungsverzweigter Form (vgl. Abbildung 3-1) entscheidend. Mit dem CO₂-Einsparpotential steigen dann aber auch die Zusatzkosten beim Fahrzeugkauf.



Quelle: [KAR07]

Abbildung 4-2 CO₂-Reduktionspotential und damit verbundenen Zusatzkosten in Abhängigkeit des Hybridisierungsgrades eines Fahrzeuges

Des Weiteren wird die Effizienz hybrider Antriebe vom jeweiligen Fahrprofil und der Nutzungsweise des Fahrzeuges beeinflusst. Wie aus Abbildung 4-3 hervorgeht, kann das Hybridfahrzeug seine Einsparpotentiale vor allem bei moderater Fahrweise im städtischen Verkehr mit vielen Start-Stopp Phasen ausspielen. Die Effekte außerhalb sind deutlich geringer. Durch das zusätzliche Gewicht des elektrischen Antriebsstranges ist bei hohen Geschwindigkeiten, insbesondere bei Fahrten auf der Autobahn, gegenüber konventionellen Fahrzeugen sogar ein Mehrverbrauch möglich [GRÜ06].

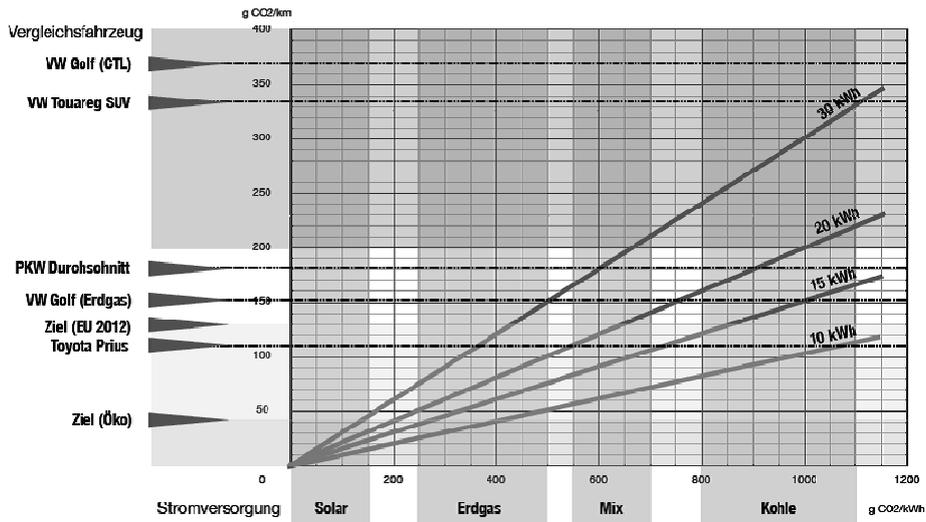


Quelle: [SAN08]

Abbildung 4-3 Kraftstoffeinsparung eines Diesel-Hybrid gegenüber dem konventionellen Dieselantrieb im europäischen Artemis-Fahrzyklus für Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten

Der Toyota Prius Hybrid erreicht durch Kombination von Benzin- und Elektromotor einen für ein Mittelklassefahrzeug respektablen Normverbrauch von 4,3 l/100 km. Dabei ist der Prius aber ein speziell konzipiertes Hybridfahrzeug, bei dem beispielsweise eine gute Aerodynamik ebenfalls zur Effizienzsteigerung beiträgt [TOY08]. Doch viele andere Hersteller planen, das Hybridkonzept auf adaptierte Modellreihen anzuwenden, so dass mit geringeren Einspareffekten zu rechnen ist. Abbildung 4-3 zeigt deutlich, dass das Hybridfahrzeug vor allem im städtischen Bereich sinnvoll einzusetzen ist. Für Kunden mit hohen Autobahnanteilen im Fahrprofil ist ein treibstoffeffizientes Fahrzeug der neuen Dieselergeneration heute sicherlich eine Alternative. Die die Stickoxid- und Rußemissionen des Diesels in den dynamischen Betriebszuständen, also zum Beispiel unter Last, am höchsten sind, könnte zukünftig der Diesel-Hybrid, bei dem ein Elektromotor den Verbrennungsmotor aus den kritischen Betriebsbereichen zieht, eine europäische Antwort auf das japanische Hybridkonzept sein [DIE08].

Bei Elektrofahrzeugen sind Benzin bzw. Diesel vollständig, beim Plug-In Hybrid in gewissem Umfang durch elektrische Energie substituiert. Der Elektroantrieb ist äußerst energieeffizient und lokal emissionsfrei. Um wie viel die Schadstoffemissionen dadurch gesenkt werden können, ist jedoch maßgeblich von der Art der vorgelagerten Nutzenergieerzeugung und dem Verbrauch, d.h. vor allem von der Größe und dem Gewicht des Fahrzeuges, abhängig. So wird für den Kleinstwagen „i-MiEV“ des Automobilherstellers Mitsubishi bei einem Verbrauch von rund 12 kWh/100 km in einer Emissionsbilanz eine CO₂-Einsparung von 72% gegenüber der Fahrzeugvariante mit Benzinmotor angegeben, wobei allerdings hierbei der Energie-Mix des japanischen Stromnetzes mit vergleichsweise hohem Anteil der Kernenergie zugrundegelegt wurde [HAN07]. Die folgende Abbildung 4-4 zeigt die Abhängigkeit der CO₂-Emissionen eines Elektrofahrzeuges von dem zur Nutzenergieerzeugung verwendeten Energieträger sowie den Einfluss des Energieverbrauchs eines Elektromobils, im Beispiel zwischen 10 und 30 kWh/100 km, auf dessen CO₂-Emissionen.

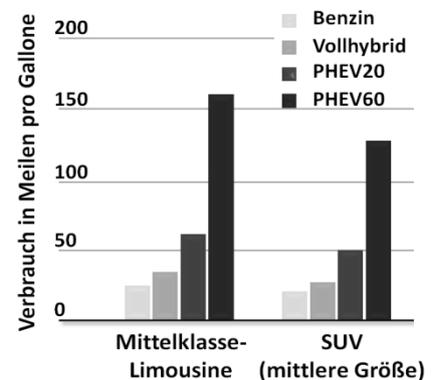


Quelle: [DGS08]

Abbildung 4-4 Abhängigkeit des CO₂-Ausstosses von Elektrofahrzeugen von der gewählten Stromversorgung und vom Verbrauch

Bei regenerativer Nutzenergiegewinnung ist das Elektrofahrzeug höchst effizient, im Rahmen eines Energieversorgungssystems, das hauptsächlich den Primärenergieträger Kohle nutzt, ist der Einsatz von Elektroantrieben vom Standpunkt der Primärenergieeinsparung und CO₂-Emission mit keinen eindeutigen Vorteilen für die Umwelt verbunden [CAR00].

Durch das „Tanken“ an der Steckdose kann der Treibstoffverbrauch der Plug-In Hybridfahrzeuge mit zunehmender Reichweite im Elektrobetrieb erheblich reduziert und somit die Abhängigkeit von Ölimporten deutlich verringern werden (s. Abbildung 4-5). Die Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen der USA wurden in einer umfassenden Studie des *Electric Power Research Institute (EPRI)* untersucht, welche verschiedene Szenarien von hohem bis zu niedrigem CO₂-Ausstoss bei der Nutzenergieerzeugung und von geringer bis zu breiter Marktdurchdringung der Plug-In Hybride bis zum Jahr 2050 berücksichtigte. In allen betrachteten Fällen, selbst unter Annahme eines weiteren Anstieges der CO₂-Emissionen bei der Nutzenergieerzeugung, ergaben die Berechnungen einen positiven Einsparereffekt auf die jährlichen Treibhausgasemissionen [EPR07].



Quelle: [RAS06]

Abbildung 4-5 Reduzierter Treibstoffverbrauch bei Plug-In Hybriden

Einen indirekten Effekt könnten Elektro- und auch Plug-In Hybridfahrzeuge auch dadurch erzeugen, dass sie während des Ladens als stationäre Speicher in das Stromnetz integriert werden, und damit der Betrieb von Kraftwerken bei gleichmäßiger Last effizienter gestaltet werden kann [GRÜ08]. Über die Anbindung ans Stromnetz ist langfristig auch eine Diversifikation der eingesetzten Energieträger möglich, wodurch der Straßenverkehr in Zukunft von einer schrittweisen Ausdehnung der erneuerbaren Energien profitieren kann. Anzumerken

bleibt, dass bei Analysen zur Umweltwirkung batterieelektrischer Fahrzeuge oft nur der Betrieb, nicht aber die Herstellung des Batteriespeichers berücksichtigt wird. So werden bei der Produktion eines 40 kWh-Lithium-Ionen Batteriespeichers ca. 3000 kg CO₂ emittiert (vgl. Abbildung 4-1). Dieser wichtige Aspekt wäre in eine Gesamtbilanz mit einzubeziehen.

Als weitere positive Aspekte sind die günstigen Lärmemissionswerte durch den geräuscharmen Betrieb des Elektromotors und die Möglichkeit des lokal emissionsfreien Betriebes zu nennen, die batterieelektrischen Fahrzeuge gegenüber konventionellen Fahrzeugen vor allem im Innenstadtbereich interessant machen, wo Belastungen durch Lärm-, Schadstoff- und Partikelemissionen besonders hoch sind.

4.1.2 Verfügbarkeit von Rohstoffen

Wenn batterieelektrische Fahrzeuge in Zukunft höhere Marktanteile erzielen sollen, stellt sich die Frage nach der Verfügbarkeit der zur Batterieherstellung erforderlichen Rohstoffe. Als limitierende Komponenten sind hierbei vor allem die zur Herstellung der Elektroden, insbesondere der Kathoden, verwendeten Metalle zu betrachten [AND01].

Material	Haupt- Abbauregionen	Produktion 2007 in Tonnen	Weltweite Reserven in 10 ⁶ Tonnen	Materialverbrauch in kg/Elektrofahrzeug	Max. Anzahl an Elektrofahrzeugen (*10 ³)	Materialverbrauch in kg/Vollhybrid	Max. Anzahl an Vollhybriden (*10 ³)	Recycling- Rate in %
Li ₂ CO ₃	Chile, Argentinien, Rußland, China	25000	11	9,6 (Li)	2604	0,46 (Li)	54348	sehr gering
Co	Kongo, Zambia, Australien, Kanada	62300	13	81,4	765	3,90	15974	~22
Ni	Russland, Kanada, Australien	1660000	150	81,3	20418	3,89	426735	~52
Mn	Südafrika, China, Australien, Gabon	11600000	5200	81,2	142857	3,93	2951654	sehr gering

Quelle: [USGS08] und [GA100]

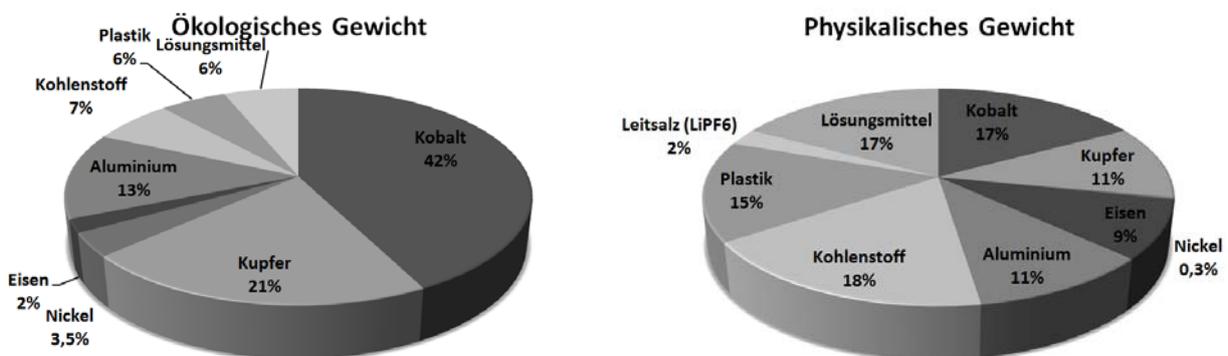
Tabelle 5 Darstellung der Verfügbarkeit wichtiger Rohstoffe zur Produktion von Kathoden für Lithium-Ionen Batterien

In Tabelle 5 wurde auf Basis der Weltproduktion des Jahres 2007 und unter Annahme einer alleinigen Verwendung der verfügbaren Rohstoffe zur Herstellung von Lithium-Ionen Batterien die maximal mögliche jährliche Produktionsmenge von Hybrid- und Elektrofahrzeugen abgeschätzt. Vor allem die Kobaltproduktion ist für eine flächendeckende Einführung dieser Fahrzeuge unzureichend. Da Kobalt außerdem als strategisch wichtiges Metall für zahlreiche industrielle und militärische Anwendungen gilt, und die Hauptabbaugebiete in politisch instabilen Regionen liegen, sind in Zukunft Kathodenmaterialien mit geringen oder ohne Kobaltanteil erforderlich. Unter dem Gesichtspunkt der Verfügbarkeit sind vor allem manganbasierte Kathoden vielversprechend. Nach Berechnungen von Andersson und Råde sind die Manganreserven für die Produktion von mindestens 200 Millionen, bei optimistischer Kalkulation sogar von bis zu 12 Milliarden Elektrofahrzeugen mit manganbasierten Lithium-Ionen Batterien ausreichend [AND01]. Für Hybridfahrzeuge liegt diese Zahl typischerweise um den Faktor 10 höher. Die Verfügbarkeit von Lithium wurde von Will untersucht [WIL96]. Die heute bekannten Lithiumreserven von ca. 11 Millionen Tonnen erlauben nach dieser Studie eine Produktion von 2 Milliarden Elektrofahrzeugen. Um jedoch alle neu produzierten Fahrzeuge

als Elektrofahrzeuge zu betreiben, müsste die heutige Lithium-Produktion um das 13fache gesteigert werden, wobei die Lithium-Vorräte ohne zusätzliche Lithium-Rückgewinnung bereits innerhalb der nächsten 50 Jahre aufgebraucht wären. Die Lithium-Verfügbarkeit wird deshalb besonders dann zu einem kritischen Faktor, wenn zukünftig die jährliche Produktion nicht gleichermaßen mit der Nachfrage der Automobilindustrie ausgeweitet werden kann. Problematisch ist auch, dass die Produktion sich auf nur wenige Abbauorte in der Welt konzentriert. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass auch andere potentielle Energietechnologien auf Lithium als Rohstoff angewiesen sind, z.B. in der Kernfusions- oder Brennstoffzellentechnologie.

4.1.3 Entsorgung und Recycling des Batteriesystems

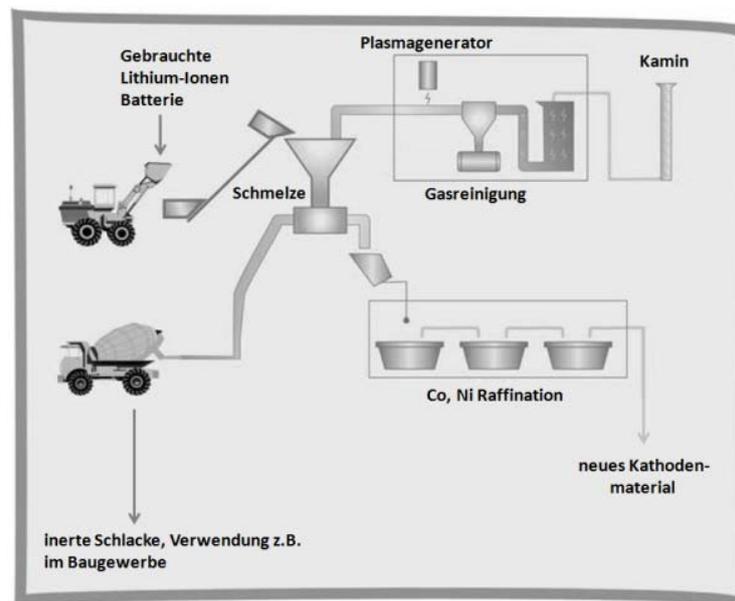
Durch die eingeschränkte Verfügbarkeit mancher Rohstoffe wird die Bedeutung eines geschlossenen Recycling-Kreislaufs bei einer weiten Verbreitung batterieelektrischer Fahrzeuge offensichtlich. Für ein ökologisch effizientes Recycling sind unterschiedliche Aspekte wie der Nutzenergieverbrauch beim Recycling, die dabei emittierten Schadstoffe und die Wiederverwendbarkeit der Recyclingprodukte zu berücksichtigen. Von Huisman wurde dies in einer Öko-Effizienz-Analyse für die Verwertung von Mobiltelefonen untersucht [HUI04]. Hierbei wurden verschiedene Umwelteigenschaften der in Mobiltelefonen verarbeiteten Materialien analysiert und zu einer Maßzahl, dem „ökologischen Gewicht“ („*environmental weight*“), zusammengefasst, das sich in der Regel vom physikalischen Gewicht unterscheidet. Ein höheres ökologisches Gewicht zeigt hierbei einen größeren Umweltnutzen bei der Wiederverwertung des entsprechenden Materials an. Nach der Ermittlung des ökologischen Gewichts können die umweltbezogenen Vor- und Nachteile verschiedener Entsorgungsszenarien mit dem ökonomischen Nutzen dieser Szenarien verglichen und somit eine Gesamtbewertung vorgenommen werden. Abbildung 4-6 vergleicht die ökologischen Gewichtsanteile der Zellkomponenten eines kleinen Lithium-Ionen Akkumulators für Mobiltelefone mit Lithium-Kobaltoxid LiCoO_2 -Kathode und Graphit-Anode mit deren physikalischen Gewichtsanteilen. Der größte Umweltnutzen entsteht offensichtlich bei der Rückgewinnung der verarbeiteten Metalle, vor allem von Kobalt und Kupfer.



Quelle: [HUI03]

Abbildung 4-6 Anteile verschiedener Zellkomponenten am ökonomischen und physikalischen Gewicht einer Lithium-Ionen-Batterie mit LiCoO_2 -Kathode und Graphit-Anode für Mobiltelefone

Die Recycling-Quoten beispielsweise von Lithium sind heute noch vernachlässigbar gering (vgl. Tabelle 5). Entsprechend wenig Erfahrung besteht im Recycling von Lithium-Ionen Batterien aus dem Bereich der Gebrauchselektronik. So wurden z.B. im Jahr 2004 von den Mitgliedern der *European Battery Recycling Association (EBRA)* insgesamt nur ca. 200 Tonnen Lithium-Ionen Akkumulatoren zurückgenommen und recycelt [EBR08]. Ein Recycling im industriellen Maßstab wird heute nur von wenigen Firmen ausgeführt, die zur Rückgewinnung der Metalle im Wesentlichen zwei Verfahren, einen Schmelz- bzw. einen hydrometallurgische Prozess, einsetzen [BAS06].



Quelle: [UMI08]

Abbildung 4-7 Val'Eas® Schmelz- und Raffinations-Prozess der Firma Umicore zum Recycling von Lithium-Ionen Batterien

Ein Recyclingkonzept über ein Schmelz- und Raffinationsverfahren, genannt Val'EAS®, wurde von der Firma Umicore (einem der Hauptproduzenten von Kathodenmaterialien) in den Jahren 2002-2003 erarbeitet und bietet eine geschlossene Lösung zur Entsorgung von kleinen Lithium-Ionen Batterien bis hin zu großen Batteriesystemen. Die Batterien werden hierbei, wie in Abbildung 4-7 dargestellt, komplett in einem Ofen eingeschmolzen, wobei Bestandteile wie Nickel, Kobalt und Stahl in eine Metallphase übergehen. Aus dieser Schmelze werden in einem Raffinationsschritt die reinen Metalle rückgewonnen und wieder zur Herstellung von Kathodenmaterialien eingesetzt. Die übrigen Materialien, unter anderem auch Lithium, bilden eine inerte Schlacke, die z.B. im Baugewerbe verwendet werden kann. Die Elektrolyte und Kunststoffe tragen als Brennstoff zur Prozessenergiegewinnung bei. Über ein Gasreinigungssystem werden schädlichen Gase gefiltert [UMI08]. Die im Val'Eas®-Prozess erzielten Recycling-Raten für kleine Lithium-Ionen Akkumulatoren mit LiCoO_2 -Kathode und Graphit-Anode sind in der nachfolgenden Tabelle 6 dargestellt. Während 80% des Kobalts recycelt werden können, bleibt bei diesem Verfahren das Lithium vollständig in der Schlacke gebunden und wird somit nicht rückgewonnen.

Bestandteil	Gewicht in %	Prozessendprodukt in/als	Recycled in %	Energierück- gewinnung in %
Stahl-Gehäuse	20	Legierung	100	
LiCoO ₂	20	Co: Legierung	80	
		Li: Schlacke	5	
Plastik	15	Reduktand	50	0
		Prozessenergie		50
Elektrolyt	10	Verdampft	0	0
Graphit	10	Reduktand	100	0
Aluminium	15	Schlacke	100	0
Kupfer - Folie	10	Legierung	100	0
Gesamt	100		81	8

Quelle: [BRO07]

Tabelle 6 Recycling-Raten der Zellkomponenten einer Lithium-Ionen Batterie mit LiCoO₂-Kathode und Graphit-Anode im Val'Eas-Prozess

Neben dem Schmelzprozess können auch hydrometallurgische Verfahren zur Rückgewinnung der Metalle eingesetzt werden. Das Unternehmen ToxCo hat dazu einen Prozess entwickelt, bei dem zunächst die Reaktivität der Zellen durch Abkühlen in flüssigem Stickstoff herabgesetzt und die Batterie dann im gefrorenen Zustand geschreddert wird. Nach Abtrennung von Plastikteilen können über nasschemische Verfahren bestimmte Verbindungen, z.B. Li₂CO₃ als Ausgangsmaterial zur Herstellung neuer Kathodenmaterialien gewonnen werden. Problematisch bei diesem Verfahren ist, dass nur spezielle Metalle recycelt werden, während die übrigen Komponenten anderweitig entsorgt oder deponiert werden müssen [BAS06], [BRO07]. Außerdem ist dieses Verfahren aufwendiger und wirtschaftlich weniger effizient. Im Rahmen der genannten Öko-Effizienz-Studie wird deshalb der Einsatz des Schmelzverfahrens empfohlen [HUI04].

Im Falle einer tieferen Marktdurchdringung der Lithium-Ionen Technologie im Fahrzeugbereich sind die genannten Recycling-Verfahren nicht ausreichend, da sie entweder zu aufwendig und wirtschaftlich ineffizient oder aber zur Rückgewinnung von Lithium nicht geeignet sind. Insgesamt besteht beim Recycling großer Batteriesysteme gegenüber den kleinen Zellen aus der Gebrauchselektronik jedoch der Vorteil, dass ein Rücknahmesystem mit sortenreiner Trennung von Batterien verschiedener Zellchemie wesentlich einfacher eingerichtet werden kann.

4.2 Kosten des Batteriesystems: eine Erfahrungskurven- und Bottom-up-Analyse

Die Erforschung vielversprechender neuer Technologien und Produkte wirft immer auch die Frage nach dem wirtschaftlichen Potential und den langfristigen Marktchancen auf. In der Regel wird dies von weiteren Produktentwicklungen und der Realisierung von Kostensenkungspotentialen durch Innovation und Erfahrung abhängig sein. Mit Hilfe des Erfahrungskurven-Konzeptes sollen im Folgenden Möglichkeiten und Grenzen zur Kostenreduktion bei der Herstellung von Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien aufgedeckt und in einer Bottom-up-Betrachtung konkrete Ansätze zur Kostensenkung identifiziert werden.

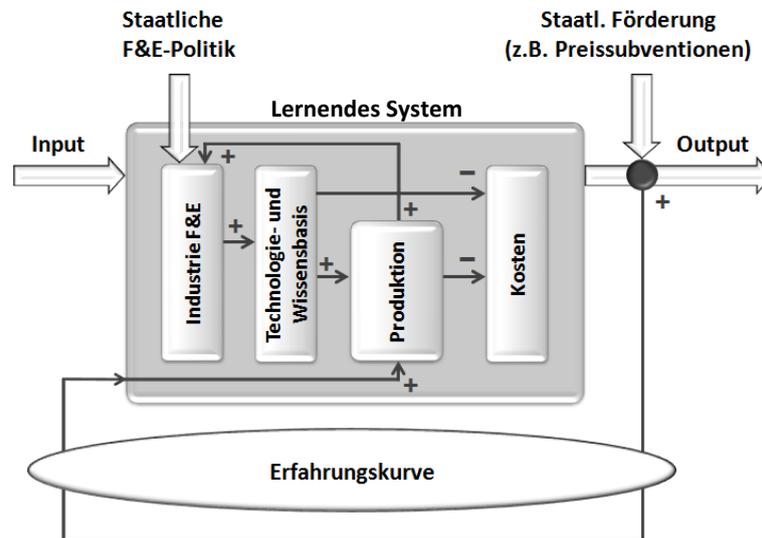
4.2.1 Grundlagen des Erfahrungskurven-Konzeptes

Als Erfahrungskurve wird ein von Henderson in den 1960er Jahren aus empirischen Untersuchungen abgeleiteter funktionaler Zusammenhang zwischen Stückkosten und kumulierter Fertigungsmenge bezeichnet, der vor allem im strategischen Management von Bedeutung ist. Die Erfahrungskurve stellt das bereits in den 1930er Jahren formulierte Lernkurvenkonzept, das nur produktionsseitige Kostenfaktoren (z.B. Arbeits- und Fertigungszeiten) berücksichtigt, auf eine breitere Basis, da sie alle Kosten (wie z.B. Kosten für Arbeit, Kapital, Verwaltung, Forschung und Entwicklung, Marketing etc.) in die Betrachtungen mit einbezieht. In der Formulierung von Henderson lautet das Erfahrungskurvenkonzept wie folgt: „Die in der Wertschöpfung eines Produkts enthaltenen Kosten scheinen um 20-30% abzufallen mit jeder Verdoppelung der kumulierten Produktionserfahrung im Industriezweig als Ganzes wie auch beim einzelnen Anbieter“. Damit wurde der Übergang von der eingeschränkten Betrachtung einzelner Produktionsabläufe zur Untersuchung der Entwicklung ganzer Wirtschaftszweige geschaffen [BRE85].

Die in der Erfahrungskurve abgebildete Kostensenkung ist auf mehrere, schwer voneinander trennbare Einflussfaktoren zurückzuführen. Dazu zählen Lernprozesse in der Fertigung, welche zu kürzeren Fertigungszeiten und geringeren Ausschussquoten führen können, aber auch die für die Massenproduktion bekannte Kostendegression bei Kapazitätserweiterungen. Langfristig tragen auch durchgeführte Rationalisierungsmaßnahmen und der technische Fortschritt zur Senkung der Stückkosten bei [WÖH00].

Das Unternehmen als lernendes System im Wettbewerbsumfeld und unter dem Einfluss staatlicher Forschungs- und Förderungsmaßnahmen zeigt die folgende Abbildung 4-8. Aus der Darstellung wird ersichtlich, wie sich einzelne Maßnahmen und Veränderungen rückkopplend auf das gesamte System auswirken können. Wird beispielsweise durch staatliche Förderung der Output des Unternehmens erhöht, so steigt die Produktion und regt somit industrielle Forschung und Entwicklung an, welche durch staatliche Forschung unterstützt werden kann. Die dadurch wachsende Technologie- und Wissensbasis führt zu Produktionssteigerungen und ermöglicht Kostensenkungen, wodurch sich die Wettbewerbsfähigkeit erhöht und der Absatz wiederum ansteigen kann. Während dieses Prozesses wird der eigene Output ständig mit den Ergebnissen der Wettbewerber im Markt verglichen. Als Maß der Effizienz dieser Rückkopplung über das Wettbewerbsumfeld dient die Erfahrungskurve bzw. die in ihr

abgebildete Kostendegression. In die Erfahrungskurve, die selbst als Black-Box Input-Output-Modell betrachtet werden kann, gehen ebenfalls alle Parameter ein (z.B. Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung, Optimierung des Herstellungsprozesses, Skaleneffekte etc.), welche die Gesamtkosten eines Produkts beeinflussen [IEA00].



Quelle: [IEA00]

Abbildung 4-8 Das Unternehmen als lernendes System unter Einfluss des Wettbewerbsumfeldes und staatlicher Entwicklungs- und Förderungsmaßnahmen

Die Kostensenkung im Sinne des Erfahrungskurven-Konzeptes ist somit kein automatischer, sich selbst erfüllender Vorgang, sondern er zeigt Chancen auf, die nur durch gezielte Anstrengungen unter dem Druck der Wettbewerber realisiert werden können. Diese wichtige Erkenntnis wird auch als „Potentialcharakter“ der Erfahrungskurve bezeichnet [BRE85].

Die **mathematische Beschreibung** der Erfahrungskurve lautet wie folgt:

$$\text{Preis im Jahr } t = P_0 \cdot X^{-E} \quad \text{Gleichung (4-1)}$$

Mit X wird das kumulierte Produktionsvolumen bezeichnet. P_0 ist der Preis der ersten produzierten Einheit, der Parameter E wird üblicherweise als Steigungsparameter der Erfahrungskurve charakterisiert. Er geht in die relative Kostendegressionsrate PR (*Progress Ratio*) ein:

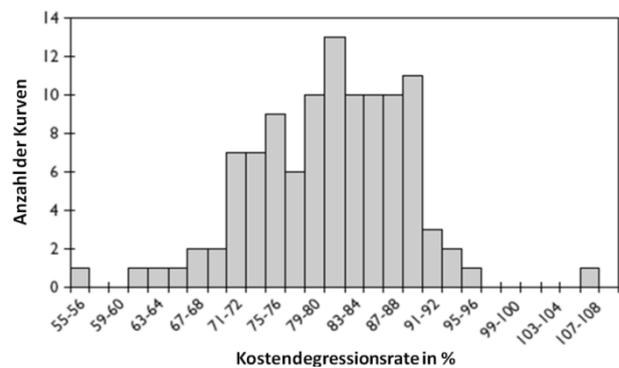
$$PR = \frac{P_0 \cdot (2 \cdot X)^{-E}}{P_0 \cdot X^{-E}} = 2^{-E} \quad \text{Gleichung (4-2)}$$

Die Kostendegressionsrate zeigt an, dass die Kosten mit jeder Verdopplung des Produktionsvolumens auf das 2^{-E} -fache des ursprünglichen Kostenniveaus sinken. Häufig wird in der

Literatur auch die Lernrate $LR = 1 - PR$ verwendet, welche die Kostenreduktion bei einer Verdoppelung der kumulierten Produktion beschreibt [IEA00].

Die Lernrate ist in jedem Abschnitt der Erfahrungskurve konstant, was bedeutet, dass junge Technologien schneller von der Markterfahrung lernen als alte Technologien mit gleicher Lernrate. Dieselbe absolute Erhöhung des kumulierten Produktionsvolumens wirkt sich somit für junge Technologien sehr viel stärker aus, während für etablierte Technologien der Erfahrungseffekt in stabilen Märkten kaum wahrnehmbar ist.

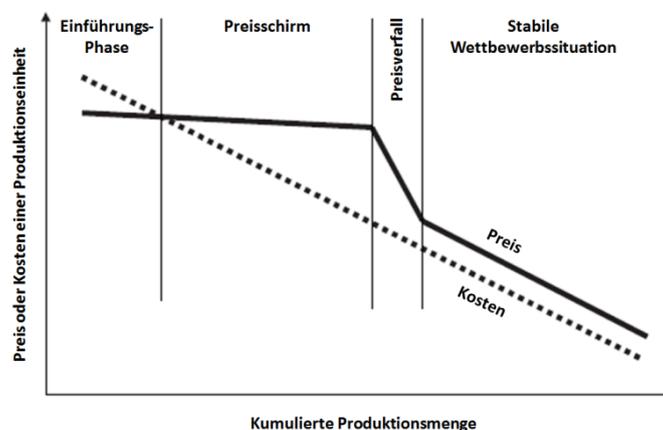
Daten der Erfahrungskurven bekannter Technologien können als Benchmark für neue Technologien dienen. Abbildung 4-9 zeigt die Verteilung der Kostendegressionsraten von 108 Beispielen im Produktionssektor. Im Mittel wird eine Kostendegressionsrate von 82% beobachtet. Windturbinen mit einer Rate von 96% markieren beispielsweise das obere Ende der Verteilung, während in der Halbleiterindustrie, z.B. bei der Herstellung integrierter Schaltkreise Raten von 72% möglich sind [DUT84].



Quelle: [DUT84]

Abbildung 4-9 Häufigkeitsverteilung der Ausprägung verschiedener Erfahrungskurven

Die Ableitung der Erfahrungskurve aus historischen Daten umfasst die Schritte der Datenrecherche und -verifizierung, die Erstellung der Erfahrungskurve durch Anpassung einer Potenzfunktion an die Daten sowie eine Interpretation der Ergebnisse. Bei der Datenrecherche können insbesondere dann Schwierigkeiten auftreten, wenn konkrete Produktionsdaten privater Firmen nicht zugänglich sind. Dann muss auf andere Quellen zurückgegriffen werden. Beispielsweise kann anstatt der kumulierten Produktionsmenge die kumulierte Verkaufsmenge betrachtet werden. Anstelle von Kosten können Marktpreise als Basis dienen. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass in gewissen Produktionsphasen Differenzen zwischen der Kosten- und Preisentwicklung auftreten können (s. Abbildung 4-10), weshalb Kostenerfahrungskurven von Preiserfahrungskurven zu unterscheiden sind [WÖH00].



Quelle: [BCG72]

Abbildung 4-10 Verhältnis von Preisen zu Kosten bei der Markteinführung neuer Produkte

Treten solche Asymmetrien zwischen Preisen und Kosten auf, besteht die Gefahr, dass unterschiedliche Lernraten abgeleitet werden. Bei der Markteinführung eines neuen Produkts sind deshalb nach Abbildung 4-10 die folgenden vier Phasen zu unterscheiden [WÖH00]:

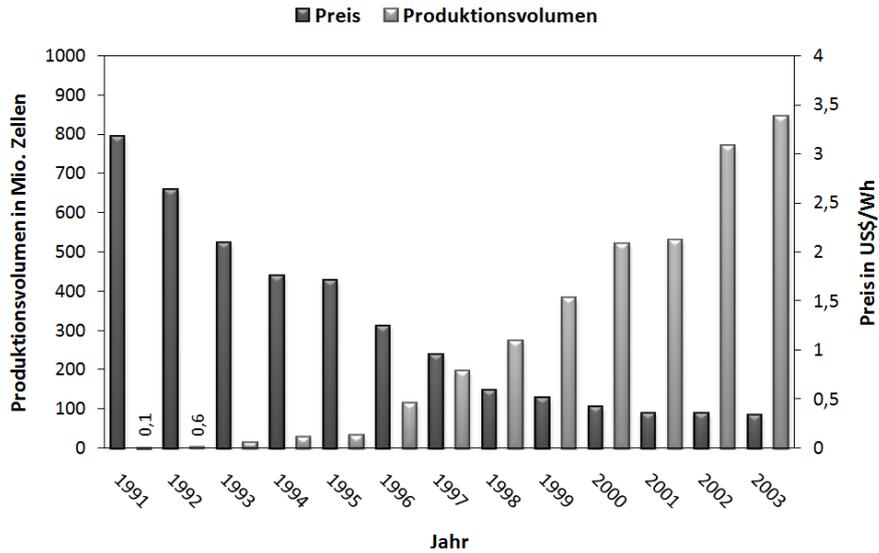
- 1) **Einführungsphase:** die Stückkosten liegen über den Preisen, da Einführungs- und Entwicklungskosten nicht in einen realisierbaren Marktpreis einzubeziehen sind
- 2) **Preisschirm („Price Umbrella“):** der Marktführer kann das Preisniveau hoch halten, solange neuen Marktteilnehmer zu höheren Kosten produzieren. Unter dem „Preisschirm“ können selbst Anbieter mit höheren Stückkosten in den Markt eintreten
- 3) **Preisverfall („Shakeout“):** der zunehmende Wettbewerb löst einen Preisverfall aus
- 4) **Stabile Wettbewerbssituation:** die Preise stabilisieren sich, Preis- und Kostendegressionsraten gleichen sich an.

In einer Vielzahl von konkreten Beispielen hat sich das Konzept der Erfahrungskurve als systematische und rationale Methode zur Beschreibung historischer Kostenentwicklungen erwiesen. Deshalb bietet es sich auch als Prognoseinstrument an. Die Vorteile der Erfahrungskurvenanalyse zur Vorhersage von Kostenverläufen sind vor allem in ihrer einfachen und vielfältigen Anwendung zu finden, da die benötigten empirischen Datensätze zur Kosten- bzw. Preisentwicklung und zu den produzierten Mengen der Regel verfügbar sind. Die Reduzierung des komplexen Innovationsprozesses auf eine einzelne Kennziffer, der Lernrate, macht dieses Prognoseinstrument außerdem leicht handhabbar. Zudem ist die Prognose auf Basis kumulierter Produktionsmengen verlässlicher als zeitabhängige Vorhersagen [NEM06].

Dennoch sind die Prognosen auch immer kritisch zu betrachten. Die Erfahrungskurve ist sehr empfindlich gegenüber geringen Änderungen der Lernrate. Unsicherheiten in den Basisdaten oder in der Festlegung des Startpunktes der Erfahrungskurvenanalyse (z.B. aktuelle Kosten bzw. Preise) übertragen direkt auf das Ergebnis der Vorhersage. Auch Diskontinuitäten in den Lernraten sind mit dem Erfahrungskurvenkonzept nicht bestimmbar

4.2.2 Ex-post-Analyse

Information zur Abschätzung der in der Kommerzialisierungsphase einer neuen Technologie zu erwartenden Kostendegressionsraten können aus einer Ex-post-Analyse ähnlicher Produkte gewonnen werden. Daten zu den bereits seit dem Jahr 1991 kommerziell vertriebenen Lithium-Ionen Batterien für portable Elektronikgeräte wie Mobiltelefone und tragbaren Computer sollen deshalb als Maßstab für die zu erwartende Kostendegression bei der Herstellung großer Lithium-Ionen Batteriesysteme dienen. Eine Analyse mit der Methode der Erfahrungskurven erfordert als Datensätze die Kosten sowie das gesamte Produktionsvolumen über einen bestimmten Zeitraum. Da im hart umkämpften Markt keine veröffentlichten Kostendaten zur Verfügung standen, wurde auf die Preisentwicklung und die produzierten Mengen der Jahre 1991 bis 2003 zurückgegriffen, welche in der folgenden Abbildung 4-11 dargestellt sind.



Quelle: [BAT08], [BRO95], [BRO06]

Abbildung 4-11 Produktionsvolumen und Preisentwicklung von Lithium-Ionen Zellen in den Jahren 1991-2003

Aus den Daten der Abbildung 4-11 ist die Erfahrungskurve in Abbildung 4-12 in doppelt logarithmischer Darstellung des Preises über der kumulierten Produktionsmenge abgeleitet.

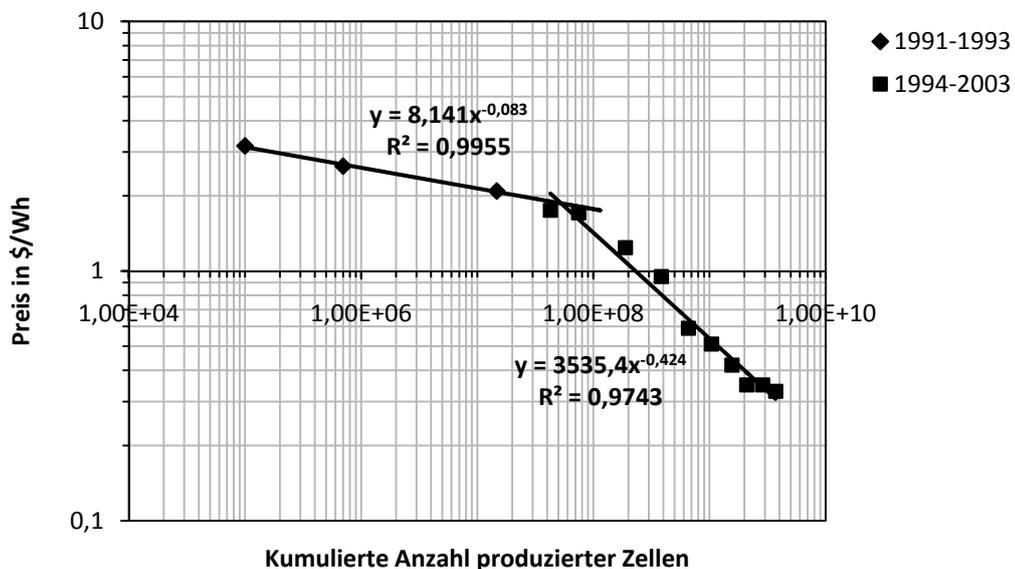


Abbildung 4-12 Erfahrungskurve für die Produktion von Lithium-Ionen Zellen im Zeitraum 1991- 2003

Auffällig ist ein Knick in der Preisentwicklung zwischen den Jahren 1993 und 1994. Deshalb wurde jeweils eine Potenzfunktion (vgl. Gleichung 4-1) an die Daten der Jahre 1991 bis 1993 sowie 1994 bis 2003 angepasst. Im ersten Zeitraum ergibt sich ein Steigungsparameter E von 0,083 bzw. eine Kostendegressionsrate von 94,4%, einem typisch hohen Wert während der in Abbildung 4-10 dargestellten „Preisschirm“-Phase bei der Einführung eines neuen Produkts [IEA00]. Tatsächlich wurde die Lithium-Ionen Batterie im Jahr 1991 zunächst von SONY eingeführt. Erst in der Folgezeit traten auch weitere Konkurrenzunternehmen am

Markt auf. In der zweiten Phase von 1994 bis 2003 weist der Steigungsparameter den Wert 0,424, entsprechend einer Kostendegressionsrate von 74,5%, auf, liegt also verglichen mit der in Abbildung 4-9 dargestellten Häufigkeitsverteilung im unteren Drittel. Eine Phase des Preisverfalls ist anhand der Daten nicht zu identifizieren.

4.2.3 Abschätzung der zukünftigen Kostenentwicklung auf Basis des Erfahrungskurven-Konzeptes

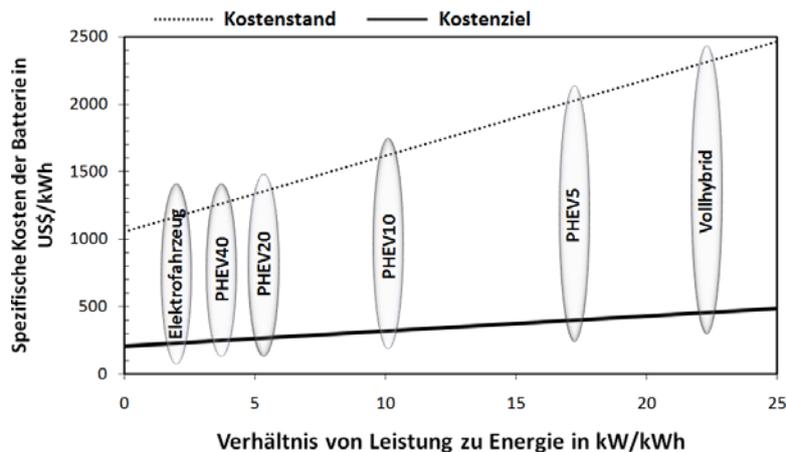
Da von Seiten der Hersteller bei der Einführung neuer Technologien aufgrund der Konkurrenzsituation am Markt meist keine gesicherten Daten über die Ausgangslage, d.h. über die Kostensituation und den aktuellen Produktionsstand als Startpunkt der Erfahrungskurvenanalyse, offengelegt werden, müssen zunächst Abschätzungen dieser Werte getroffen werden. Ebenso müssen die zu erreichenden Kostenziele sowie die zu erwartenden Kostendegressionsraten spezifiziert werden.

Für eine Kostenprognose werden deshalb folgende Annahmen getroffen:

- **Aktueller Kostenstand und Kostenziele:**

Lithium-Ionen Batteriesysteme für batterieelektrische Fahrzeuge befinden sich heute noch in einer vorkommerziellen Entwicklungsphase, in der zahlreiche alternative Zellaufbauten mit unterschiedlicher Zellchemie und uneinheitlichem Entwicklungsstand zur Diskussion stehen (vgl. Abbildung 2-9), so dass selbst die Expertenmeinungen bei Kostenaussagen zum Teil sehr stark divergieren. Beispielsweise werden die Kosten des Batteriesystems eines Plug-In Hybridfahrzeuges mit 40 Meilen Reichweite im Elektrobetrieb (PHEV40) mit Werten von 800 bis 2000 US\$/kWh beziffert [HIL08]. Da der vom Markt akzeptierte Aufpreis für batterieelektrische Fahrzeuge von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (z.B. Kraftstoffpreisen oder Steuervergünstigungen) wie auch von kundenspezifischen Faktoren (z.B. Nutzungseigenschaften oder Image des Fahrzeuges) abhängig sein wird, sind die zur Marktfähigkeit der Batteriesysteme anzustrebenden Kostenziele ebenso schwer einzuschätzen. Vom USABC werden z.B. Werte von 250 bis 300 US\$/kWh für ein Plug-In Hybridfahrzeug und 150 US\$/kWh für ein Elektrofahrzeug als Zielgrößen für die Verkaufspreise des Batterieproduzenten an die Automobilindustrie angegeben.

Als Ausgangspunkt dieser Analyse wird deshalb auf aktuelle Daten aus Veröffentlichungen des *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* des U.S. Department of Energy zurückgegriffen, die aufgrund intensiver Kooperationen des Institutes mit zahlreichen Batterieherstellern als verlässlich betrachtet werden. Die spezifischen Kosten in US\$/kWh der Lithium-Ionen Batteriesysteme werden hierbei, wie in nachfolgender Abbildung 4-13 dargestellt, als lineare Funktion des Verhältnisses von spezifischer Leistung P zu spezifischer Energie E des Batteriesystems angegeben. Mit zunehmendem P/E -Verhältnis steigen auch die Kosten. Die Grenzen werden dabei durch Hochleistungsbatterien für Hybridfahrzeuge und Hochenergiebatterien für Elektromobile markiert.



Quelle: [MAR06]

Abbildung 4-13 Kostenstand und Kostenziel von Lithium-Ionen Batteriesystemen

- **Produktionsstand:**

Hochleistungszellen werden derzeit in größerer Zahl z.B. für akkubetriebene Elektrowerkzeuge hergestellt, und auch Hochenergiezellen werden bereits für Nischenanwendungen, z.B. im Militärbereich, angeboten. Außerdem sind heute schon mehrere Fahrzeuge mit Lithium-Ionen Speicher als Prototypen auf der Straße. Deshalb wird der Startpunkt der Analyse bei 1000 produzierten Batteriesystemen festgelegt.

- **Kostendegressionsraten:**

Verglichen mit den Kostendegressionsraten anderer Technologien (vgl. Abbildung 4-9) werden im Sinne eines positiven bzw. negativen Extremszenarios Kostendegressionsraten von 70% bzw. 90% festgelegt. Als Trendszenario wird der aus der ex-post Erfahrungskurvenanalyse abgeleitete Wert von 74,5% angesetzt.

- **Skalierung der Kosten von der Zellebene auf das Niveau des Batteriesystems:**

Bei der Auswertung der historischen Daten wurde die Preise einzelner Zellen betrachtet. In der Erfahrungskurvenanalyse soll nun jedoch die Kostenentwicklung für das gesamte Batteriesystem untersucht werden, wobei weitere Kosten für Überwachungselektronik etc. auf Modul- und Batteriesystemebene anfallen. Wie anhand von Herstellerdaten gezeigt wurde, können die Kosten des Batteriesystems näherungsweise durch Multiplikation der gesamten Zellkosten mit einem konstanten Faktor berechnet werden [WAL07]. Dies impliziert, dass von gleichen Kostendegressionsraten für einzelne Zellen wie für komplette Batteriesysteme ausgegangen werden kann.

Unter diesen Annahmen wurden beispielhaft die in der nachfolgenden Abbildung 4-14 dargestellte Erfahrungskurve für ein Batteriesystem mit Ausgangskosten von 2000 US\$/kWh erstellt. Bei 100000 produzierten Einheiten sinken die Kosten in diesem Beispiel auf 197 bzw. 993 US\$/kWh im positiven bzw. negativen Extremszenario. Bei Kostendegression wie im Falle der historischen Entwicklung kleiner Lithium-Ionen Zellen würde sich im Trendszenario ein Wert von 284 US\$/kWh ergeben.

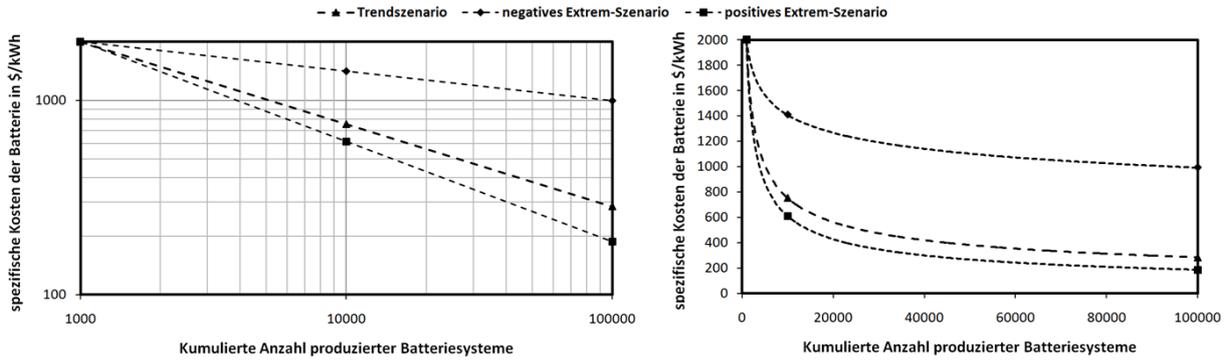


Abbildung 4-14 Erfahrungskurven für ein Batteriesystem mit Ausgangskosten von 2000 US\$/kWh

Wird dieses Vorgehen für alle in Abbildung 4-13 aufgeführten Batteriesysteme wiederholt, so ergeben sich, sozusagen als Querschnitt bei einem Stand von jeweils 100000 produzierten Einheiten, die in Abbildung 4-15 dargestellten Kostenprognosen in Abhängigkeit des Verhältnisses von Leistung zu Energie des Batteriesystems.

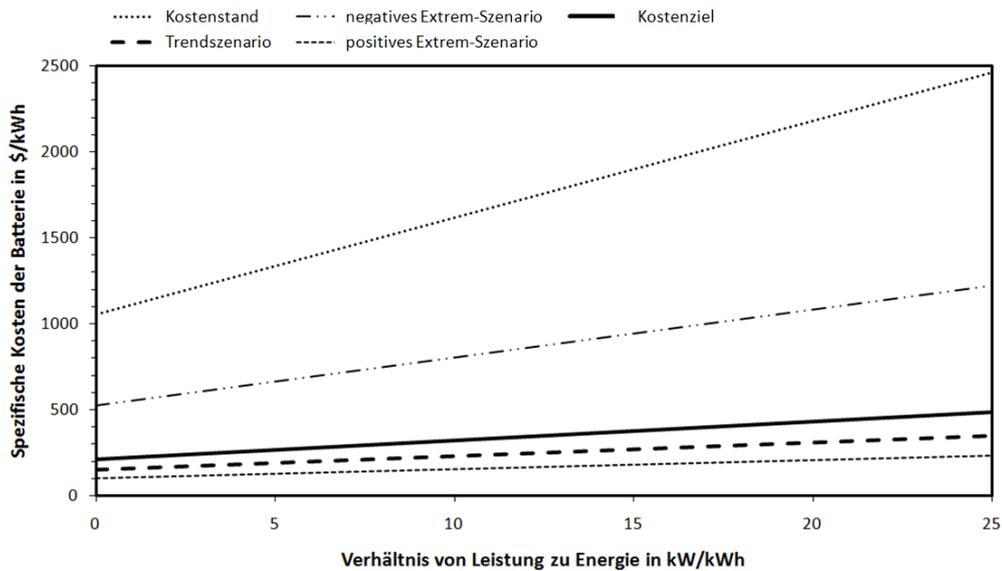


Abbildung 4-15 Abschätzung des Kostenstandes nach 100000 produzierten Batteriesystemen

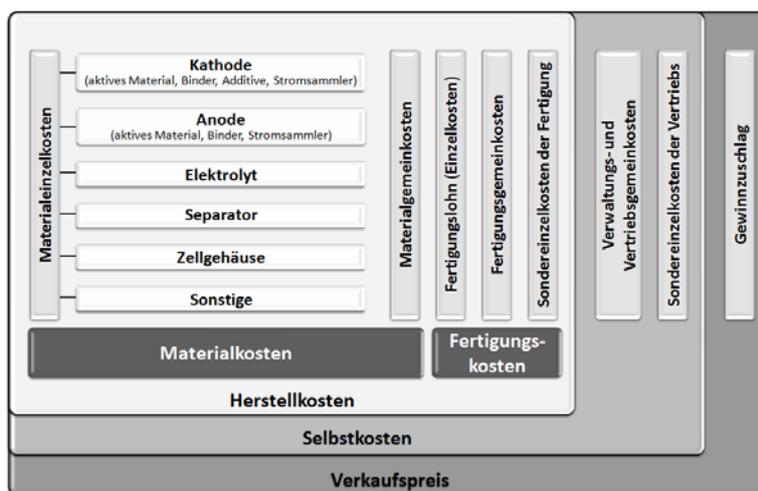
Die Analyse zeigt zwar, dass grundsätzlich ein erhebliches Kostensenkungspotential besteht, auch im Falle des negativen Extrem-Szenarios ist mehr als eine Halbierung der Kosten zu erwarten, doch sind die hochgesteckten Kostenziele selbst bei der äußerst niedrigen Kostendegressionsrate, die bei kleinen Lithium-Ionen Batterien in der Vergangenheit erzielt werden konnte, nur sehr knapp zu erreichen. Natürlich können aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten in den Datengrundlagen die ermittelten Kostenreduktionspotentiale nur als Abschätzungen betrachtet werden. Die Analyse ist dennoch wertvoll, da sie einen tieferen Einblick und ein Gespür dafür gibt, welche großen Anstrengungen in Zukunft noch unternommen werden müssen, um die Lithium-Ionen Technologie im Fahrzeug zur Marktfähigkeit zu führen. Auch kann sie als Anhaltspunkt für politische Maßnahmen zur Unterstützung der Diffusion und Adaption dieser neuen Technologien dienen. Beispielsweise können durch gezielt

eingesetzte steuerliche Vergünstigungen zusätzlich Kaufanreize geschaffen werden, so dass auch ein höherer Preis für das Batteriesystem vom Kunden akzeptiert wird. Abschließend bleibt zu berücksichtigen, dass die Erfahrungskurvenanalyse nur allgemeine Chancen zur Kostenreduktion aufzeigen kann, selbst aber keine Aussagen über konkrete Umsetzungsmaßnahmen macht. Neben den durch Standardisierung, Prozessoptimierung, Skaleneffekte, Arbeitsrationalisierung etc. erzielten Einsparungen müssen weitere Wege zur Kostenreduktion, z.B. durch Änderungen der Zellchemie oder ein verbessertes Design des Batteriesystems, untersucht und umgesetzt werden. Deshalb sollen im nächsten Abschnitt reale Kostensenkungsmöglichkeiten analysiert werden.

4.2.4 Identifizierung von Kostensenkungspotentialen: Bottom-up-Analyse

Im Folgenden soll untersucht werden, ob und inwieweit die Kostensenkungspotentiale, welche die Erfahrungskurvenanalyse aufzeigt, durch konkrete Maßnahmen zu realisieren sind.

Abbildung 4-16 zeigt die bei der Zellproduktion entstehenden Kosten auf Basis einer Zuschlagskalkulation. Neben Material- und Fertigungskosten sind Verwaltungs- und Vertriebskosten sowie zur Verkaufspreisermittlung der Gewinnzuschlag des Herstellers zu beachten.



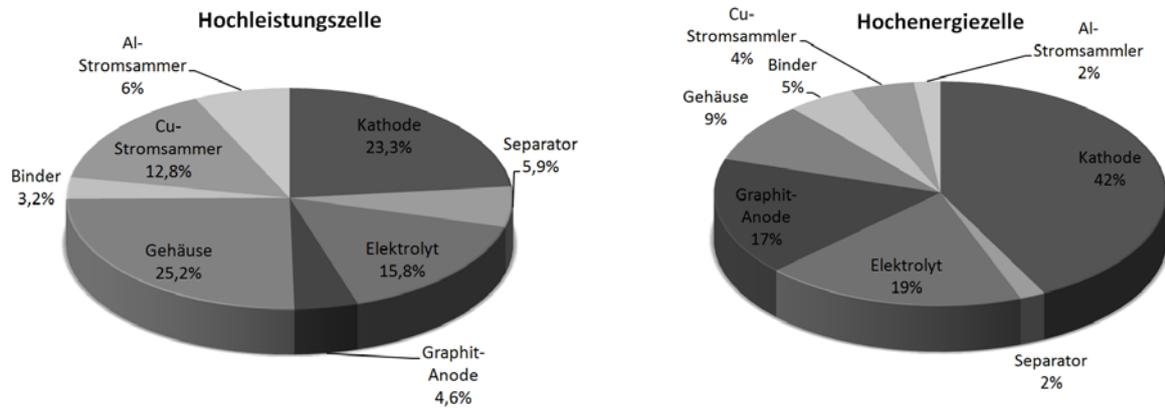
Quelle: eigene Darstellung nach [WÖH00]

Abbildung 4-16 Verkaufspreisermittlung von Lithium-Ionen Zellen auf Basis der Zuschlagskalkulation

Auf der Datengrundlage bestehender Fabrikationsanlagen zur Produktion kleiner Lithium-Ionen Zellen wurden in einer Studie im Auftrag des U.S. Department of Energy die Produktionskosten großer Zellen untersucht, mit dem Ergebnis, dass bis zu 96% der Selbstkosten einer Hochenergiezelle auf Materialkosten zurückzuführen sind. Bei Hochleistungszellen ist der Beitrag der Materialkosten etwas geringer, liegt aber dennoch ungefähr bei 83% [GAI00].

Die auf hohen Energieinhalt optimierten Zellen (z.B. für Elektrofahrzeuge) unterscheiden sich von den Zellen, die für hohe Batterieleistung entwickelt wurden (z.B. für Vollhybride), in den relativen Gewichtanteilen ihrer Materialkomponenten (s. nachfolgende Abbildung 4-17). Während bei Hochenergiezellen im wesentlichen das Aktivmaterial der Anode und insbesondere das der Kathode für das Gewicht und die Kosten der Zelle entscheidend ist, werden bei

den Hochleistungszellen die nicht aktiven Komponenten wie Stromsammel, Separator oder Zellgehäuse zu kostenbestimmenden Faktoren.



Quelle: [GAI00]

Abbildung 4-17 Gewichtsanteile einzelner Zellkomponenten am Gesamtgewicht einer typischen 10-Ah Hochleistungs- bzw. 100-Ah Hochenergie-Lithium-Ionen-Zelle

Ansatzpunkte zur Kostenreduktion sind somit vor allem im Bereich der Zellmaterialien zu finden. Tabelle 7 vergleicht die Preise der gegenwärtig für Lithium-Ionen Batterien im Fahrzeugbereich verwendeten **Kathodenmaterialien**.

Kathodenmaterial	Kapazität in mAh/g	Nominal- spannung in Volt	Materialkosten	
			in \$/kg	in \$/kWh
LiCoO ₂	145	3,6	30 - 40	57 - 75
Li(Ni _{0,85} Co _{0,1} Al _{0,05})O ₂	160	3,6	28 - 30	~50
Li(Ni _{1/3} Co _{1/3} Mn _{1/3})O ₂	120 (200)	3,6 (3,9)	22 - 25	~55 (~30)
LiMn ₂ O ₄	100	3,9	8 - 10	~25
LiFePO ₄	150	3,3	16 - 20	~35

Quelle: [WAL07]

Tabelle 7 Preise verschiedener im Fahrzeugbereich etablierter Kathodenmaterialien

Mit 30 bis 40 US\$/kg ist das vor allem in kleinen Lithium-Ionen Zellen eingesetzte Lithium-Kobaltoxid LiCoO₂ für den Gebrauch in Fahrzeugbatterien ungeeignet. Die Substitution des teuren Kobalts durch günstigere Übergangsmetalle in Verbindungen wie Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂ oder Li(Ni_{0,85}Co_{0,1}Al_{0,05})O₂ erlaubt zwar grundsätzlich eine Senkung der Rohstoffkosten, jedoch ist die Synthese dieser Materialien mit der gewünschten Kristallstruktur aufwendiger, so dass deren Preis mit 22 bis 30 US\$/kg trotzdem relativ hoch bleibt. Die Rohstoffkosten zur Herstellung von Lithium-Manganoxid LiMn₂O₄ sind sehr gering, was einen niedrigen Preis von ca. 10 US\$/kg ermöglicht. Ebenfalls kostengünstig ist Lithium-Eisen-Phosphat mit Preisen von weniger als 20 US\$/kg. Neben Einsparungen durch die Verwendung kostengünstiger Rohstoffe wird die Erhöhung der verfügbaren Kapazität der Kathodenmaterialien als wichtige Strategie zur Kostenreduktion verfolgt. Gelingt es beispielsweise durch verbesserte Materialkonzepte die Kristallstruktur von Li(Ni_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3})O₂ bei der Ein- und Auslagerung

von Li^+ -Ionen zu stabilisieren und somit Degradationsverluste zu reduzieren, so kann die Zelle auf höhere Spannungswerte geladen und dadurch die verfügbare Kapazität gesteigert werden, was eine Kostensenkung auf Basis der in der Zelle verfügbaren Energie (in US\$/kWh) ermöglicht (vgl. Tabelle 7). Die Herstellung neuer Kathodenmaterialien erfordert zum Teil aufwendige Syntheseverfahren, z.B. zur Präparation von Nanopartikeln. In der Verbesserung und Vereinfachung der Materialsynthese, beispielsweise durch die Verwendung von kostengünstigeren Precursor-Materialien, und dem Einsatz großtechnischer Produktionsmethoden sind weitere Kostensenkungspotentiale zu finden (vgl. Abbildung 2-23). Die nichtaktiven Bestandteile der Kathode, z.B. der Aluminium-Stromsammeler oder beigemischte leitfähige Rußpartikel, stellen nur relativ geringe Kostenfaktoren dar [SPO07].

Unter den **Anodenmaterialien** sind heute synthetische Graphitanoden bei der Produktion von Lithium-Ionen Batterien der Standard. Mit Preisen von 15 bis 30 US\$/kg sind diese synthetisch hergestellten Graphite aber sehr teuer. Als Alternative stehen natürliche Graphite zur Diskussion, welche als Rohstoff für weniger als 1 US\$/kg verfügbar sind. Um die Lebensdauer, Sicherheit und Leistungsfähigkeit der Zelle garantieren, sind die Anforderungen an die Struktur dieser natürlichen Graphite jedoch sehr hoch, was eine aufwendige Bearbeitung, z.B. durch Oberflächenmodifikationen wie „*Carbon-Coating*“, erforderlich macht [YOS04], und die Preise auf 5 bis 10 US\$/kg erhöht. Daneben werden auch Anstrengungen unternommen, die Kosten der Lithium-Titanat-Anoden von heute ca. 28 \$/kg auf einen Zielwert von 13 \$/kg zu senken [HOW08]. Es bleibt aber zunächst noch abzuwarten, ob diese tatsächlich preislich mit den günstigeren Graphitanoden konkurrieren können. Unter den passiven Anodenbestandteilen stellt die als Stromsammeler verwendete Kupferfolie vor allem bei Hochleistungszellen einen wesentlichen Kostenfaktor dar [SPO07].

Bestimmend für die Kosten flüssiger **Elektrolyte** ist das üblicherweise verwendete Leitsalz LiPF_6 . Derzeit wird die Möglichkeit erforscht, günstigere Salze wie z.B. LiBOB einzusetzen [ZHA06]. Da die Zelle sensibel auf Variationen des Elektrolyten reagiert, ist eine Veränderung des Elektrolyten wahrscheinlich nur in Kombination mit einer Stabilisierung der Zellchemie mittels neuer Materialkonzepte, z.B. durch passivierende Oberflächenbeschichtung der Elektroden oder durch Verwendung von Elektrolyt-Additiven möglich. Polymere Elektrolyte bieten den Vorteil, dass die Zelle in günstige Verbundfolie eingeschweißt und so auf teure Edelstahlgehäuse verzichtet werden kann. Außerdem wird ein zusätzlicher Separator überflüssig. Die Produktion des Polymerelektrolyten, der in Form dünnen Schichten aufgebracht werden muss, ist zwar aufwendig, insgesamt wird die Verwendung polymerer Elektrolyte aber als eine Möglichkeit zur deutlichen Kostenreduktion betrachtet [SCH02].

Vor allem bei Hochleistungszellen zählen **Separatoren** zu den Kostentreibern. Da die Separatormembran aus relativ günstigen Rohstoffen gefertigt ist, entstehen dessen hohe Kosten als Folge der verlangten Fertigungsgenauigkeit im aufwendigen Produktionsprozess. Die heute meist verwendeten Separatoren sind Polyolefin-Membrane mit Preisen von ca. 2-3 US\$/m² [SPO07]. Als Ziel wird von der FreedomCAR-Organisation 1 US\$/m² angegeben. Der Preis des neu auf den Markt gebrachten Separators SEPARION® von Evonik Degussa wird zukünftig mit 1 – 1,5 US\$/m² veranschlagt [HOW08].

Bisher wurden nur Kosten der Zellproduktion betrachtet. Weitere Kosten entstehen jedoch beim Aufbau von Modulen und Batteriesystemen. Anhand von Herstellerdaten konnten in Abhängigkeit der Batteriegröße Skalenfaktoren ermittelt werden, mit denen die Sollkosten von der Zellebene auf Modul- und Batteriesystemkosten umgerechnet werden können (s. Tabelle 8).

Batteriegröße in kWh	Zelle → Modul	Modul → Batteriesystem	Zelle → Batteriesystem
40 - 45	1,03	1,20	1,24
20 - 25	1,04	1,25	1,30
12 - 15	1,05	1,33	1,40
7	1,07	1,42	1,52
2	1,10	1,50	1,65

Quelle:[WAL07]

Tabelle 8 Faktoren zur Skalierung der Kosten von Zellen auf die von Modulen und Batteriesystemen

Die Zusatzkosten für den Aufbau des Batteriesystems steigen mit abnehmender Batteriegröße, da der relative Anteil der Kosten für Elektronik (z.B. Batterie-Management und Hardware) und Batteriegehäuse mit abnehmender Batteriegröße zunimmt. Die zukünftigen Kosten für die Hardware von Modulen und Batteriesystemen sind schwer abzuschätzen, da sie sehr stark von der weiteren Entwicklungen des Zell-, Modul und Batteriesystemdesigns abhängig sein werden. Durch die Massenproduktion sind aber auch hier weitere Kostensenkungen zu erwarten.

Möglichkeiten zur Kosteneinsparung bei Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien durch die Verwendung günstigerer Elektrodenmaterialien wurden von Henriksen et al. untersucht [HEN02]. Betrachtet wurden verschiedene, den Minimalanforderungen des USABC (vgl. Tabelle 2) entsprechende, 25 kW Vollhybrid-Batteriesysteme, jeweils aufgebaut aus 48 Einzelzellen. Allein die Kosten für die Zellmaterialien belaufen sich demnach bei einer Zelle mit $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ -Kathode, einer synthetischen Graphitanode sowie einem Standardelektrolyt und handelsüblichen Separator auf 399 US\$ (s. nachfolgende Abbildung 4-18). Wird die Kathode durch Lithium-Manganoxid LiMn_2O_4 und die Anode durch karbonbeschichteten natürlichen Graphit ersetzt, so ist eine Reduktion dieser Zellmaterialkosten auf 222 US\$ möglich (s. Abbildung 4-18). Nicht berücksichtigt wurde hierbei der Materialausschuss, der durch die hohen Qualitätsanforderungen vor allem in den ersten Jahren der Produktion wesentlich zu den Kosten beitragen wird und auf bis zu 35% geschätzt wird [SPO07].

Wie Abbildung 4-18 auch zeigt, nehmen die relativen Kosten nichtaktiver Materialien der Hochleistungszelle einen großen Anteil an den Materialkosten ein. Kostentreiber bei der LiMn_2O_4 -Zelle sind in abnehmender Reihenfolge (1) Separator, (2) Elektrolyt, (3) LiMn_2O_4 -Kathode, (4) Graphit-Anode und (5) Kupferfolie, die zusammen 75% der Materialkosten umfassen [HEN02]. Weitere Möglichkeiten zur Kostenreduktion sind längerfristig deshalb vor allem im Bereich passiver Zellmaterialien wie dem Separator und dem Elektrolyt zu suchen.

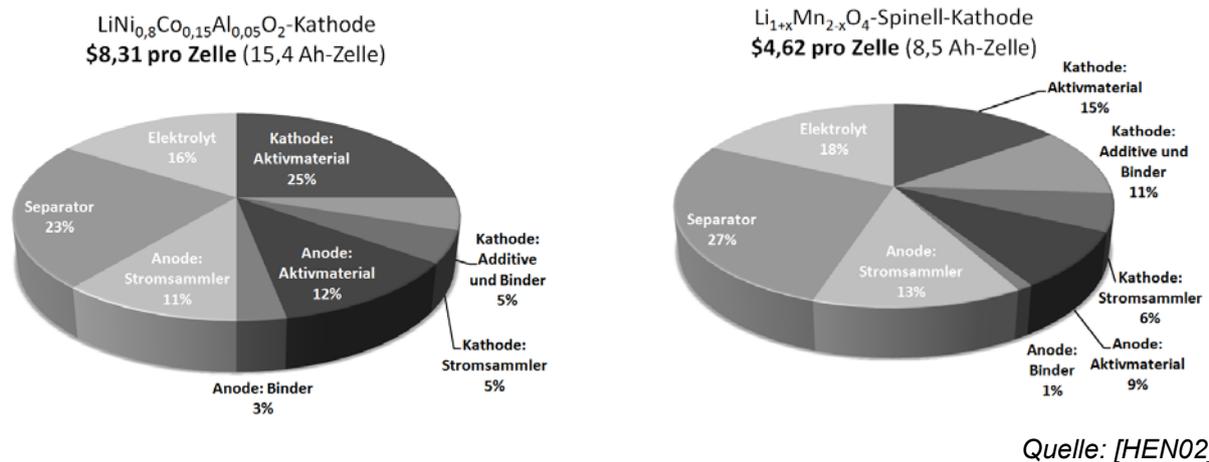


Abbildung 4-18 Aufschlüsselung der Kosten einer Hochleistungszelle mit $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ -Kathode bzw. einer Zelle mit günstigerer Lithium-Manganoxid-Kathode

Wie bereits erläutert sind die Zellmaterialkosten nur für rund 80% der Selbstkosten einer Hochleistungszelle verantwortlich [GAI00]. Wird zusätzlich noch ein Faktor von ca. 1,65 für die Aufskalierung der Kosten von der Zell- auf die Batteriesystemebene (vgl. Tabelle 8) sowie die für innovative Batteriesysteme sicherlich relativ hohe Gewinnmarge des Batterieherstellers von 30 % berücksichtigt [PAT08b], so ergibt sich insgesamt selbst für das als kostengünstig betrachtete LiMn_2O_4 -Batteriesystem ein Verkaufspreis von rund 600 US\$. Im Vergleich dazu wird vom USABC ein Einkaufspreis für den Automobilhersteller von 500 US\$ (bei 100000 produzierten Einheiten) als Ziel vorgegeben. Diese Beispielrechnung zeigt, dass selbst im Falle des „Best-Case“ Szenarios einer LiMn_2O_4 -basierten Zelle das Erreichen der Kostenziele die Hersteller noch vor große Herausforderungen stellt.

Mit zunehmendem Energieinhalt bei Batterien für Plug-In Hybride und Elektrofahrzeuge steigt der Anteil der Material- an den Selbstkosten. Dabei sind bis zu 50% allein durch das Kathodenmaterial festgelegt. Für die Kommerzialisierung leistungsfähiger Plug-In Hybride wird eine Kostensenkung auf 1/10 der gegenwärtigen Kosten verlangt (vgl. Abbildung 3-23 und [HIL08]). Eine Realisierung dieser Kostenziele auf Basis heutiger Materialien erscheint fragwürdig, da die den Materialkosten zugrundeliegenden Rohstoffpreise die Möglichkeiten zur Kostenreduktion begrenzen, zumal ein breiter Durchbruch batterieelektrischer Fahrzeuge auf dem Markt zu einer Verknappung der Rohstoffe und damit zu deren Verteuerung führen kann. Vor allem aber die für vollwertige Elektrofahrzeuge verlangte Kostenreduktion auf 1/40 des gegenwärtigen Standes (vgl. Abbildung 3-23) scheint nur bei einem Durchbruch in der Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien mit wesentlich höheren Kapazitäten und deutlich geringeren Kosten möglich.

Langfristig können die Kosten bei der Produktion großer Lithium-Ionen Zellen durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen wie der Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien mit geringeren Kosten und/oder höheren Kapazitäten, Kostenreduktion bei den inaktiven Zellmaterialien, besonders beim Separator und den Elektrolytsalzen, oder optimierte großtechnische Produktionsprozesse gesenkt werden. Die Entwicklung von kostengünstigen

Elektroden und Separatoren sowie flexibler und günstiger Lithium-Polymer Zellen sind vielversprechende Ansätze. Bei diesen hypothetischen Betrachtungen der Kostensenkungsmöglichkeiten bleibt aber immer der Zielkonflikt zwischen niedrigen Kosten einerseits und der Qualität, Sicherheit und Lebensdauer der Zellen andererseits zu beachten, der den Handlungsspielraum für Kostensenkungsmaßnahmen doch sehr stark einschränkt.

4.3 Wirtschaftliche Potentiale und Märkte

Neben der Frage der zukünftigen Kostenentwicklung der Batteriesysteme sind für eine erfolgreiche Markteinführung von Hybrid-, Plug-In Hybrid und Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen Batterien weitere Aspekte entscheidend. Neben politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wie der Umweltgesetzgebung und dem Wettbewerbsdruck zwischen den Akteuren am Markt sind hierbei auch kundenspezifische Faktoren von großer Bedeutung.

4.3.1 Akteure und Aktivitäten

Die Aktivitäten von Automobilindustrie und Batterieherstellern im Bereich der Lithium-Ionen Batterien für den Antrieb von Straßenfahrzeugen haben in den vergangenen Monaten eine ungemeine Dynamik entwickelt. Getrieben durch den Wettbewerb planen fast alle großen internationalen Autohersteller die Serienfertigung von Hybridmodellen und Elektrofahrzeugen.

Die japanischen Automobilhersteller Toyota und Honda dominieren heute den Hybridfahrzeugmarkt. Toyota verkaufte den Vollhybrid Prius bereits mehr als eine Million Mal, Honda ist mit dem als Mild-Hybrid konzipierten Civic erfolgreich, wobei beide Fahrzeuge noch auf der NiMH-Technologie basieren. Toyota plante bereits ab 2008 den Einsatz der Lithium-Ionen Technologie, aufgrund von Sicherheits- und Qualitätsproblemen bei der Zellproduktion wurde dieses Vorhaben aber auf das Jahr 2011 verschoben [SHI07]. In den USA sind es vor allem die *BIG3*, d.h. General Motors, Ford und Chrysler, die in Konsortien wie dem *U.S. Council for Automotive Research (USCAR)* versuchen, ihre Voll- und Mild-Hybridkonzepte serienreif zu machen. Die amerikanischen Unternehmen stehen unter dem besonderen Druck die Zero-Emission-Vehicle-Gesetzgebung des wichtigen kalifornischen Marktes (10 % Emissionsfreie Fahrzeuge ab 2003) erfüllen zu müssen. Der Fokus liegt hier auf der Ausstattung von Sports-Utility-Vehicles (SUVs) mit dem Elektromotor als Zusatzaggregat zur weiteren Leistungssteigerung [DOL07]. Auf dem europäischen Markt, auf dem die hybride Antriebstechnik durch die weite Verbreitung von Dieselfahrzeugen lange keinen großen Stellenwert eingenommen hat, könnten Micro- oder Mild-Hybridvarianten mit geringeren Aufpreisen greifen. In einer Entwicklungsgemeinschaft arbeiten Daimler und BMW an Mild-Hybridantrieben für Oberklasselimosinen wie dem BMW 7er oder dem S400 BlueHybrid (vgl. Abbildung 3-14), der als erstes Serienfahrzeug mit Lithium-Ionen-Hybridtechnologie 2009 auf den Markt kommen soll. Volkswagen, mit den Marken VW und Audi, und Porsche arbeiten an einem Vollhybrid-Konzept mit Otto- und Elektromotor für den Einsatz in Ober-, Mittelklasse- und Sportwagen, z.B. für die Modelle VW Touareg, Golf und Polo, Audi Q7 und Porsche Cayenne. Markteinführung soll Ende des Jahrzehnts sein. Die Konzentration liegt derzeit in

Deutschland aber hauptsächlich auf den Premium-Limousinen, deren Kraftstoffverbrauch durch die Hybridtechnologie von einem hohen Grundniveau aus reduziert werden kann. Auch die deutschen Automobilzulieferer sind bemüht, ihre Rückstände aufzuholen. So arbeiten ZF und Continental mit Siemens VDO zusammen. Bosch entwickelt für VW, Audi und Porsche. Auch der Dieselantrieb mit Hybridtechnologie wird hier vorangebracht, um gerade den europäischen Markt zu befriedigen [DOL07], [KAI08]. In Frankreich hat Peugeot bereits vor einigen Jahren mit der Entwicklung hybrider Systeme mit Schwerpunkt auf den Diesel-Hybrid begonnen. Der PSA-Konzern (*Peugeot Société Anonyme*) testet derzeit den Peugeot 308 und Citroën C4 mit Hybrid HDi Dieselsechnologie, die ab 2010 auf den Markt kommen sollen [PSA08].

Die Plug-In Hybridtechnologie mit Lithium-Ionen Speicher wird vor allem in den USA und auch in Japan vorangebracht. General Motors will beispielsweise den Chevrolet Volt (vgl. Abbildung 3-21) im Jahr 2010 einführen. Ford arbeitet derzeit an einem Escape Plug-In-Hybrid mit 30 Meilen Reichweite im Elektrobetrieb. Wann japanische Hersteller Plug-In Hybride mit Lithium-Ionen Speicher einführen werden, steht bisher noch nicht offiziell fest.

Im Bereich der reinen Elektromobile zeichnet die Einführung erster Fahrzeuge mit Lithium-Ionen Technologie vor allem im Kleinst- und Sportwagenbereich ab. Der Tesla Roadster wird bereits sehr medienwirksam kommerziell vertrieben, zunächst aber noch mit einem Batteriesystem, das aus zahlreichen Notebook-Batterien aufgebaut ist. Andere Elektro-Sportwagen wie auch ein Porsche 911 sollen nach 2009 folgen. Im Klein- und Kleinstwagenbereich hat Subaru den Verkauf des R1e Citycars ab 2009 angekündigt. Der Think *City* des norwegischen Unternehmens Think Global AS soll demnächst mit Lithium-Ionen Speichern angeboten werden. In London fahren bereits 100 Exemplare eines Elektro-Smart mit Lithium-Ionen Akku, deren Verkaufsstart für 2010 geplant ist. Die Markteinführung des i-MiEV von Mitsubishi (vgl. Abbildung 3-17) soll Ende des Jahres 2009 beginnen [GRE08].

Zahlreiche andere kleinere Unternehmen entwickeln Hybridautos, meist Leichtfahrzeuge als seriellen Plug-In-Hybrid, die oft parallel auch in Versionen als reine Elektroautos entstehen. Ein Beispiel ist die amerikanische Aptera Motors mit dem Aptera. Die britische Firma Lightning Car will z.B. den Lightning GT Sportwagen auf den Markt bringen. Daneben gibt es eine Vielzahl von Konzeptfahrzeuge und Prototypen verschiedenster Fahrzeuge mit Lithium-Ionen Speicher, die an dieser Stelle nicht alle aufgezählt werden können.

Bei den zahlreichen Entwicklungsprojekten der Automobilbauer stellt sich natürlich die Frage, welche Batteriehersteller die entsprechenden Lithium-Ionen Batteriespeicher in großer Stückzahl und hoher Qualität relativ kurzfristig produzieren kann. Aufgrund der sehr positiven geschäftlichen Perspektiven arbeiten weltweit zahlreiche Batteriehersteller mit Hochdruck an der Entwicklung der neuen Batterien. Die folgende Abbildung 4-19 gibt deshalb eine Übersicht der weltweit bedeutsamsten Produzenten von Lithium-Ionen Batteriesystemen für Fahrzeuganwendungen sowie deren vielfältige Kooperationen mit der Automobilindustrie.

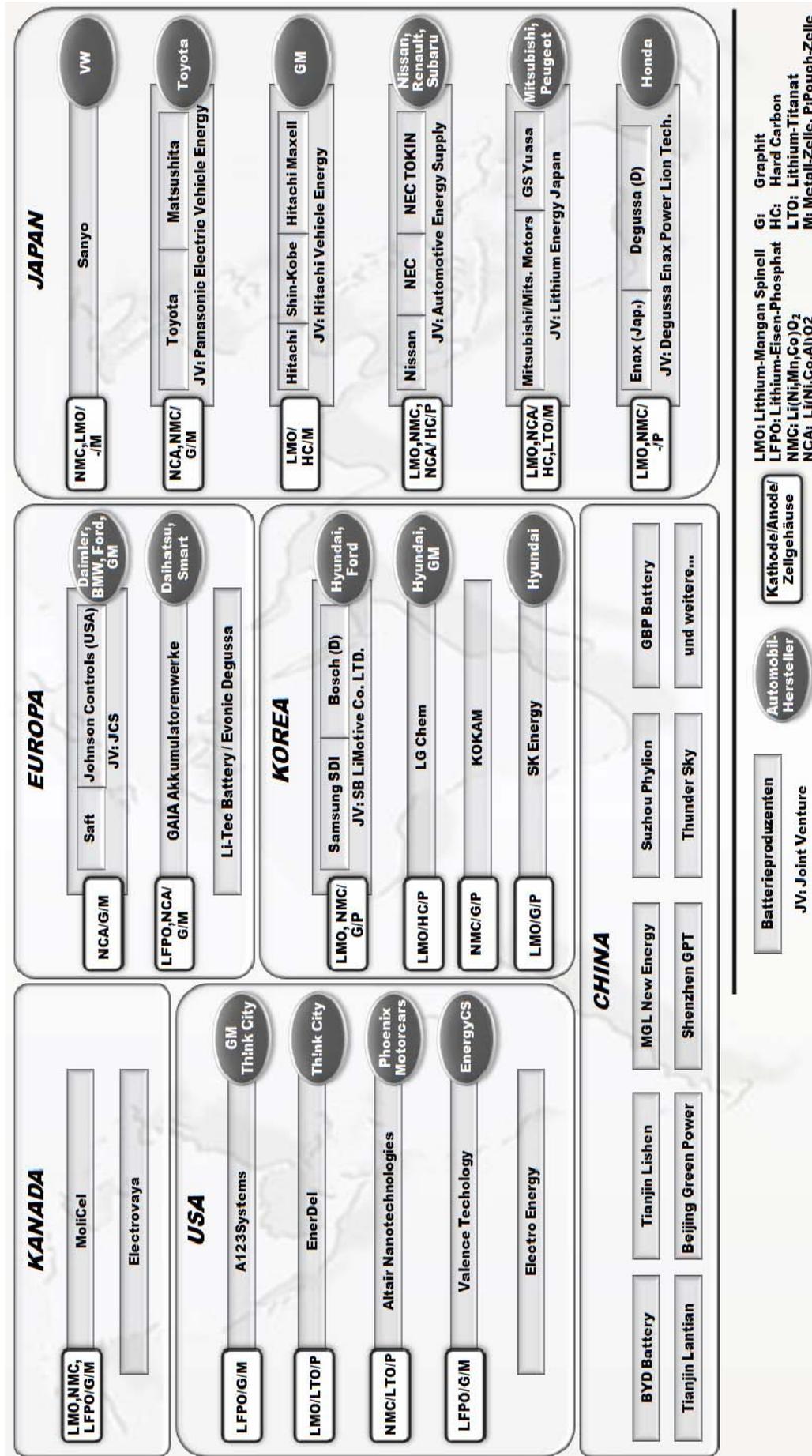


Abbildung 4-19 Übersicht der wichtigsten im Bereich der Lithium-Ionen Technologie für Fahrzeugantriebe tätigen Akteure am Markt, der derzeitigen Verbindungen zwischen Batterieproduzenten und der Automobilindustrie sowie der von den Batterieherstellern hauptsächlich favorisierten Zellchemie

Zwar nehmen die **USA** heute neben Japan eine führende Rolle in Forschung und Entwicklung im Bereich der Lithium-Ionen Technologie ein, jedoch konnte sich in den 1990er Jahren im Land selbst kein Massenhersteller von Lithium-Ionen Batterien für Mobiltelefone, Notebook PCs etc. etablieren. Als Gründe hierfür werden in einer Studie des U.S. Department of Commerce weniger die in den USA hohen Arbeitskosten, als vielmehr der geringe Return on Investment in diesem Geschäftsbereich sowie der hohe Zeit- und Investitionsaufwand zur Kommerzialisierung der Batterien und zum Aufbau einer Vertriebsorganisation genannt [BRO06]. Die heute in den USA in dem Gebiet der Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien tätigen Firmen wie A123Systems, Valence Technology, EnerDel und Altair Nanotechnologies sind allesamt sehr junge Unternehmen, die Zellen auf Basis neuer vielversprechender Nanomaterialien, wie z.B. Nano-Lithium-Eisenphosphat-Kathoden und Lithium-Titanat-Anoden, anbieten. Durch hohe private Investitionen, auch durch die U.S. Automobilindustrie, und durch finanzielle Beteiligungen des Staates an Entwicklungsprojekten konnten die Unternehmen in kürzester Zeit zum Teil beachtlich wachsen. Dies zeigt sich besonders deutlich am Unternehmen A123Systems, das erst im Jahr 2001 als Spin-Off des MIT entstand und mittlerweile über 1100 Mitarbeiter beschäftigt. Die Unternehmen sind sehr stark in Forschung und Entwicklung aktiv, doch sind ihre Produktionskapazitäten in den USA noch sehr wenig ausgebaut. Die Gesamtproduktion bei A123Systems wird für das Jahr 2008 auf 53,8 MWh geschätzt, wobei die Hochleistungszellen, die A123Systems bereits in Großserie für Elektrowerkzeuge vertreibt, größtenteils in Kooperationen von chinesischen und koreanischen Produzenten hergestellt werden [A1208]. Dadurch besteht für die USA die Gefahr, dass mit wachsender Produktionserfahrung in diesen Ländern auch das technologische Wissen und die Entwicklung langfristig in den asiatischen Raum abwandern. Weitere Risiken für die U.S. amerikanischen Hersteller sind vor allem in der geringen Produktionserfahrung und dem signifikanten Zeit- und Kostenaufwand zum Aufbau eigener Produktionsstätten zu finden. Bei der von der U.S. Automobilindustrie angekündigten großen Anzahl von Hybrid-, Plug-In Hybrid und Elektrofahrzeugen ist deswegen mit Produktionsengpässen zu rechnen, so dass die Automobilhersteller auf ausländische Lieferanten angewiesen sein werden.

In **Europa** ist die französische Firma Saft der einzige größere Hersteller hoch entwickelter Batteriesysteme mit langjähriger Erfahrung in der Lithium-Ionen-Technologie. In einem Joint Venture mit Johnson Controls werden Lithium-Ionen Hochleistungs- und Hochenergiebatterien entwickelt und in hoher Qualität produziert. Im Februar 2008 gab Johnson Controls-Saft die offizielle Eröffnung der neuen Fertigung für Lithium-Ionen-Autobatterien bekannt, die im französischen Nersac Batteriesysteme für Hybrid-, Plug-In-Hybrid- und Elektroantriebe produziert, und deren Kapazität in den nächsten drei bis vier Jahren auf 100 000 Batteriesysteme ausgebaut werden soll. Der erste Abnehmer ist die Daimler AG, die von 2009 die S-Klasse von Mercedes optional mit Hybridantrieb ausstatten will. Im Oktober 2008 wurde ebenfalls ein Vertrag mit BMW für die Ausstattung eines Hybridfahrzeuges der 7er Reihe bekanntgegeben. Neben Varta, ebenfalls im Johnson Controls-Verbund, die sich seit mehr als einem Jahrzehnt mit Nickel-Metallhydrid-Batterien im Elektrofahrzeug und in den Anfängen auch mit Lithium-Ionen Zellen befasst haben, sind in Deutschland die Gaia Akkumulatorenwerke in Nordhausen aktiv, deren Mutter in den USA residiert. Gaia ist ein Entwicklungsunternehmen und liefert Kleinserien, wäre also auf die großen Stückzahlen für Serienbauten

von Hybrid nicht vorbereitet. In Deutschland kam im vergangenen Jahr der Essener Evonik-Konzern durch die Entwicklung einer neuen Separatormembran in die Presse. In einem Joint Venture mit dem japanischen Kooperationspartner ENAX wurde als ein erster Prototyp ein konventionelles Hybridauto, der Honda Civic, auf Lithium-Ionen-Technologie umgerüstet. Zukünftig soll Degussa Enax Power Lion Tech. in China Zellen für elektrische Antriebe fertigen. Evonik rechnet damit, dass der Batterie-Markt für von derzeit 1,4 Mrd. € bis 2015 auf 4 Mrd. € anwächst und plant für seine Tochter Litarion GmbH in Kamenz/Sachsen und den Kamenzer Batterieteilehersteller Li-Tec, an dem Evonik beteiligt ist, innerhalb der kommenden zwei Jahre Investitionen in zweistelliger Millionenhöhe. Im September 2008 gründete die Firma Bosch zusammen mit dem südkoreanischen Batteriehersteller Samsung SDI ein Gemeinschaftsunternehmen mit dem Namen SBLiMotive. Es soll ab 2010 in Korea mittelgroße und große Lithium-Batterien für Hybridautos produzieren [GRE08]. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die europäische und insbesondere die deutsche Automobilindustrie längerfristig sehr stark von ausländischen Batterieherstellern abhängig sein wird, ein Faktor, der bei einem zu erwartenden anfänglich knappen Angebot an qualitativ hochwertigen Lithium-Ionen Batteriesystemen ein hohes Risiko für die Automobilhersteller birgt.

Die Produktion von Lithium-Ionen Batterien in **China** hat sich in den letzten drei bis vier Jahren enorm gesteigert. Im Jahr 2007 hat China mit rund 1,35 Milliarden produzierten Zellen Japan als weltgrößten Produzenten abgelöst [RES08]. Von den mehr als 120 produzierenden Unternehmen sind zahlreiche Firmen auch in der Entwicklung von Lithium-Ionen Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge aktiv. Das chinesische Unternehmen BYD plant beispielsweise die Produktion eines Plug-In Hybridfahrzeuges bis 2010. Die chinesische Führung betrachtet die Lithium-Ionen Technologie als strategisch wichtige Technologie, weshalb die Forschung im Land verstärkt und Kooperationen mit ausländischen Unternehmen gesucht wurden. Beispielsweise kooperiert Shenzhen BAK Battery seit 2005 mit A123Systems beim Entwurf und Aufbau von Fertigungsanlagen zur Produktion von A123Systems-Hochleistungszellen. Eine Gesamtdarstellung zur Entwicklung der Lithium-Ionen Technologie in China findet sich in [PAT08].

Japan wurde zwar von China in der Volumenproduktion kleiner Lithium-Ionen Zellen im vergangenen Jahr überrundet, baut aber im Gegensatz zu China auf eine beinahe 20jährige Erfahrung in der Produktion und Entwicklung auf. Große japanische Batteriehersteller sind bereits frühzeitig Joint Ventures mit Unternehmen der Automobilindustrie zur Entwicklung und Produktion von Batteriesystemen für elektrische Antriebe eingegangen. Die japanischen Unternehmen GS Yuasa Corporation, Mitsubishi Corp. und Mitsubishi Motors Corp. gaben z.B. die Bildung eines Joint Venture unter dem Namen Lithium Energy Japan bekannt. Für die Produktion des Mitsubishi 'i MiEV' sollen ab April nächsten Jahres zunächst jährlich eine Million Zellen für 10000 Fahrzeuge hergestellt und die Produktion bis 2012 verdoppelt werden. Automotive Energy Supply, eine Kooperation von Nissan und NEC kündigt den Beginn der Massenproduktion von Lithium-Ionen Zellen für bis zu 120000 Hybridfahrzeuge in einer neuen Produktionsanlage in Kanagawa für das Frühjahr 2009 an, die für Nissan und den französischen Partner Renault produzieren soll. Hitachi Vehicle Energy startet die Produktion von Zellen für Hybridfahrzeuge in einer neuen Fabrikationsanlage in Kyoto ab März 2009.

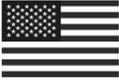
Der Batteriehersteller Sanyo, mit dem VW kooperiert, will durch Investitionen von 100 Milliarden Yen bis 2015 auf eine monatliche Kapazität von 10 Millionen Zellen für Hybridfahrzeuge ausbauen und plant ebenso einen frühen Einstieg in den Plug-In Hybridmarkt ab 2011 [GRE08]. Durch die langjährige Erfahrung in der Produktion und die gute Vernetzung von Automobilindustrie, Batterieherstellern und Politik bringt Japan insgesamt in eine sehr gute Ausgangsposition zur Teilhabe am zukünftigen Markterfolg batterieelektrischer Fahrzeuge.

Von den neun Herstellern von kleinen Lithium-Sekundärbatterien in **Südkorea** wurde 2007 im Export 1,16 Mrd. US\$ erwirtschaftet. Auch die koreanischen Batteriehersteller sind aktiv im Bereich Lithium-Ionen Fahrzeugbatterien. So soll eine im August 2008 gegründete Allianz der Hyundai Kia Automotive Group mit den Batterieproduzenten LG Chem, SK Energy und SB LiMotive die Entwicklung von Batteriesysteme für Plug-In Hybridfahrzeuge durch Investitionen von mehr als 936 Millionen US\$ vorantreiben. Derzeit baut LG Chem in Cheongwon die notwendigen Anlagen für die Produktion mittlerer und großer Lithium-Ionen Batterien auf. Sie sollen bis Anfang 2009 mit einer Jahreskapazität von 6 Mio. Zellen bereit stehen. Auch SK Energy will die reguläre Produktion 2010 starten. Mit Hilfe der verschiedenen Projekte will Südkorea den technologischen Abstand vor allem zu Japan verringern und den lokalen Wertschöpfungsgrad erhöhen. Nach Angaben des Ministry of Knowledge Economy (MKE) lag die koreanische Lithium-Ionen Technologie 2007 bei 78% des besten internationalen Niveaus. Hinzu kommt, dass Korea bei einer Reihe von Schlüsselkomponenten und -technologien, die für Lithium-Batterien der nächsten Generation benötigt werden, stark von Importen vor allem aus Japan abhängig ist [BFA08]. Auch Südkorea kann von jahrelangen Erfahrungen profitieren, die sie bei der Entwicklung und Produktion kleiner Lithium-Ionen Batterien sammeln konnten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass weltweit eine relativ geringe Anzahl an Produzenten, die Lithium-Ionen Batteriesysteme in hoher Qualität und Stückzahl fertigen können, auf eine sehr große Nachfrage von Seiten der Automobilindustrie treffen. Die Massenhersteller kleiner Lithium-Ionen Zellen im Bereich der Gebrauchselektronik, die eine entsprechend hohe Produktionserfahrung besitzen, sind vor allem in Japan und Südkorea, in den letzten Jahren zunehmend auch in China, ansässig. Diese Situation wird, wenn die vielen angekündigten auf den Markt kommen sollten, zu Engpässen führen, insbesondere für die amerikanischen und europäischen Autobauer. General Motors muss beispielsweise die Frage, wer letztendlich die Batteriesysteme für den Chevrolet Volt bauen soll, noch offen lassen. Saft als einziger Zellproduzent in Europa sei bereits jetzt für die nächsten fünf bis sechs Jahre komplett ausgelastet [DIL08].

4.3.2 Politische Rahmenbedingungen und Regulierungen

Verschiedenste politische, ökonomische und ökologische Motive treiben die Entwicklung alternativer Fahrzeugantriebe voran. Die ökologische Notwendigkeit zur Minderung von Schadstoff- und Treibhausgasemissionen ist heute weitestgehend anerkannt. Durch Normen und Verordnungen sollen deshalb die Emissionen und der Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr reduziert werden (s. Abbildung 4-20). Die Entwicklung in den USA und Japan zeigt, dass wirtschaftliche Potentiale batterieelektrischer Fahrzeuge vor allem dort zu sehen sind, wo durch solche Umweltgesetze die Nutzung konventioneller Fahrzeuge eingeschränkt wird. Aber auch die immer weiter steigenden Kraftstoffpreise und der prognostizierte weltweite Rückgang der Verfügbarkeit fossiler Primärenergieträger zwingen zu einem Umdenken. Die Unabhängigkeit von Rohölimporten und der Wunsch nach Diversifizierung der Energieträger ist ein starkes Motiv strategischer Politik, das vor allem in den USA die Entwicklung von Elektrofahrzeugen und Plug-In Hybriden voranbringt.

	<p>Politische Motive: Unabhängigkeit von Ölimporten, Reduzierung von CO₂ Emissionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • California Air Resources Board: Neuzulassung von PKWs nur noch unter strengen Abgasregelungen • “Energy Independence and Security Act“ (2007): Entwicklung der nächsten Generation von Traktions-Batterien und Plug-In Hybridfahrzeugen, Senkung des Kraftstoffverbrauchs in Automobilen auf 35 mpg (14,8 km/l) im Jahr 2020 • Erhöhung der CAFE-Grenzwerte: 35 mpg (6,76 l/100km) im Durchschnitt für PKW und leichte Lastautos im Jahr 2020
	<p>Politische Motive: Reduzierung von CO₂ Emissionen, geringerer Ölverbrauch, Reduzierung des Verkehrslärms</p> <ul style="list-style-type: none"> • Euro-Norm: Grenzwerte für Schadstoffemissionen (z.B. Stickoxide, Kohlenwasserstoffe; Partikelmasse) • Reduktion der CO₂ Emissionen eines durchschnittlichen Neuwagens auf 120 g/km im Jahr 2012 • EU-Initiative: Halbierung des Verkehrslärms bis 2020
	<p>Politische Motive: Reduktion von CO₂ Emissionen, geringerer Ölverbrauch</p> <ul style="list-style-type: none"> • National Motor Vehicle Nox & PM Emissions Act: Grenzwerte für Schadstoffemissionen • JAMA-Selbstverpflichtung: Reduzierung der CO₂ Emissionen auf 140 g/km für PKW im Jahr 2009 • Treibstoffeinsparung: Ziel 2015 16,8 km/l für PKW (Stand 2004: 13,6 km/l) Quelle: JAMA 2008 • Green Taxation: Steuervergünstigungen für emissionsarme und treibstoffsparende Fahrzeuge

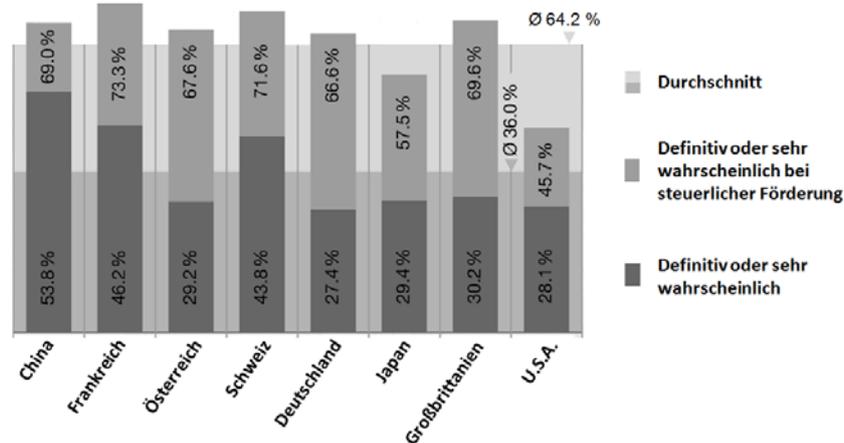
Quelle: eigene Darstellung nach [NAU06], [WIK08]

Abbildung 4-20 Politische Rahmenbedingungen und Motive zur Einführung umweltfreundlicherer Automobile den USA, Europa und Japan

Der Anstieg des Individualverkehrs, besonders in den Städten, stellt nicht nur Länder wie China oder Indien in Zukunft vor gewaltige Herausforderungen. In den „Mega-Städten“ dieser Erde bieten batteriebetriebene Fahrzeugen deshalb eine greifbare Möglichkeit, die zunehmende Luftverschmutzung und Lärmbelastung zu reduzieren. Zur Erfüllung der genannten strategischen und umweltpolitischen Ziele werden der Kauf und die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeugen in mehreren Staaten, beispielsweise in Japan und in den USA, durch steuerliche Vorteile unterstützt.

4.3.3 Marktchancen und Marktentwicklung

Letztlich wird der Erfolg der Lithium-Ionen Technologie im Fahrzeug durch das Kaufverhalten der Konsumenten entschieden. So sind einer vom Automobilzulieferer Continental AG initiierten weltweiten Studie zufolge im Durchschnitt 36% der befragten Autofahrer grundsätzlich dazu bereit, sich für ein Fahrzeug mit Hybridantrieb zu entscheiden (s. Abbildung 4-21).



Quelle: [CON08]

Abbildung 4-21 Umfrage zur Bereitschaft zum Kauf eines Hybridfahrzeugs

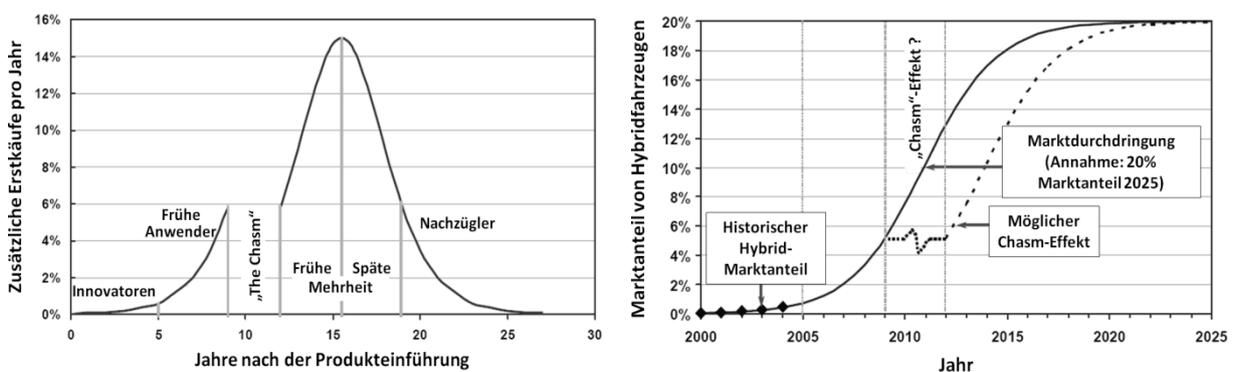
Dennoch muss berücksichtigt werden, dass für die Kaufentscheidung letztlich nicht allein der ökologisch-verbrauchsorientierte Nutzen bestimmend ist. Der von den Kunden akzeptierte Aufpreis für ein batterieelektrisches Automobil ist stark von wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängig. Insbesondere sind die Entwicklung der Kraftstoffpreise und die damit verbundenen persönlichen Einsparmöglichkeiten beim Erwerb eines Fahrzeuges mit geringerem Kraftstoffverbrauch entscheidende Faktoren. Da das Hybridfahrzeug sein Einsparpotential vor allem im städtischen Verkehr ausspielen kann, wird es von den japanischen Fahrern mit einem im Mittel größeren Stop-and Go Anteil im Stadtverkehr sicherlich höher bewertet als vom durchschnittlichen amerikanischen und europäischen Kunden mit größerem Autobahn- bzw. Highway-Anteil im Fahrprofil. Nach den Ergebnissen der Alternative Powertrain Study des Jahres nimmt deshalb auch das Kundeninteresse in den USA durch eine nüchternere Betrachtung der Verbrauchsminderung hybrider Fahrzeuge in jüngster Zeit deutlich ab. So sank das Interesse an hybriden Fahrzeugen bei Pkw-Neukäufen von 75 % im Jahr 2006 auf aktuell unter 50 % [JDP07]. Aber auch kundenspezifischen Faktoren wie beispielsweise das Fahrzeugprestige sind nicht zu unterschätzen [PES06]. Deshalb werden Zusatzfeatures beim Kauf eines Hybridfahrzeuges von den Herstellern betont. Besonders in den USA ist z.B. ein großer Anteil neuer Hybridmodelle dem Luxus- und SUV-Segment zuzuordnen, in denen sich Gewicht und Kosten des Batteriesystems prozentual am wenigsten bemerkbar machen. Neben dem Image als umweltfreundliches Auto werden hier vor allem auch leistungssteigernden Merkmale, z.B. das hohe und vor allem spontan verfügbare Anfahrtdrehmoment, aktiv beworben. Wie eine Studie der ETH Zürich zu den Beweggründen zum Kauf eines Toyota Prius Hybridautos zeigte, steht die neue Fahrzeugtechnik als Entscheidungskri-

terium noch vor dem geringeren Treibstoffverbrauch. Außerdem sind es vor allem Personen mit höherer Bildung und höherem Einkommen, die sich vom innovativen Konzept des Toyota Prius überzeugen lassen [HAA05]. Dieses Kundengefühl des „Modernen“ wird sich für die nächsten Hybridgenerationen aber kaum noch erzeugen lassen.

Die Entwicklung z.B. in Kalifornien macht deutlich, dass die wirtschaftlichen Potenziale hybrider Antriebe vor allem dort zu sehen sind, wo den Verkauf oder den Betrieb schadstoffreicher Fahrzeuge durch politische Rahmenbedingungen und eine strenge Umweltgesetzgebung beschränkt wird. Auch kann der Staat durch entsprechende Förderungsmaßnahmen wesentlich zur Diffusion batterieelektrischer Fahrzeuge beitragen. So steigt nach der Studie der Continental AG die Bereitschaft zum Erwerb eines Hybridfahrzeuges von durchschnittlich 36% auf 64,2% an, wenn der Staat den Kauf steuerlich fördert (vgl. Abbildung 4-21).

Die zahlreichen Faktoren, welche das Kaufverhalten beeinflussen, erschweren eine Prognose des zukünftigen Marktwachstums. Der weltweit größte Markt wird in den USA gesehen. Tendenziell sind die amerikanischen Käufer auf dem auf dem U.S.-Markt weit mehr an Leistungsdaten als an Sparsamkeit interessiert, doch zeigt die stark gestiegenen Kraftstoffpreise in den USA, dass das Kostenargument sehr schnell zu einer erhöhten Nachfrage führen kann. Für das Jahr 2020 wird hier eine Marktdurchdringung der Hybridfahrzeuge von 20% prognostiziert. In Japan, dessen Automobilindustrie eine Vorreiterrolle in der Hybridtechnologie einnimmt, und dessen Bevölkerung eine größere Technikfreundlichkeit zugesprochen wird, werden Marktanteile für Hybridfahrzeuge von bis zu 30% im Jahr 2020 erwartet. Im Gegensatz zu Japan und den USA erfährt die Diesel-Technologie, welche die Kosteneffizienzvorteile eines Hybridfahrzeuges in ähnlicher Weise erfüllt, in Europa eine hohe Akzeptanz, so dass der Marktdurchbruch hier langsamer vonstatten gehen wird, und ein Marktanteil von 10-15% im Jahr 2020 realistisch erscheint. Da die europäischen Automobilhersteller nun auch verstärkt Anstrengungen im Bereich der Hybridtechnologie unternehmen, könnte sich dieser Vorgang jedoch auch beschleunigen. Für China wird ein wesentlich geringerer Wert von 5% prognostiziert [DOL07].

Legt man ein von G. A. Moore entwickeltes Modell zur Marktdurchdringung und Adaption neuer Technologien unter Annahme eines Marktanteils von 20% im Jahre 2025 zugrunde, so gibt Abbildung 4-22 einen qualitativen Eindruck der zu erwartenden Marktentwicklung.



Quelle: [SAN05]

Abbildung 4-22 Marktdurchdringung der Hybridfahrzeuge nach dem Moore'schen Modell

Von vielen neuen Technologien bekannt ist aber auch die Möglichkeit eines „Chasm“, d.h. einer Unterbrechung der Wachstumsdynamik nach den ersten „Pionierkäufen“, so dass die gesamte Entwicklung um Jahre verzögert werden kann [MOO91]. Außerdem bleibt abzuwarten, wie schnell sich die neue Lithium-Ionen Technologie gegenüber den etablierten NiMH-Speichern durchsetzen wird.

Die Frage des „richtigen“ Hybridisierungsgrades wird heute kontrovers diskutiert. Während die Automobilindustrie eher zu geringerem Hybridisierungsgrad aufgrund niedrigerer Zusatzkosten für den Hybridantrieb tendiert, wird von Seiten der Politik, der Batteriehersteller und zum Teil von Umweltschutzorganisationen - meist von den Medien unterstützt - die schnelle Einführung von Plug-In Hybriden und Elektrofahrzeugen mit signifikanter Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, jedoch wesentlich höheren Zusatzkosten für den Batteriespeicher, favorisiert [AND07]. Aufgrund des hohen Aufpreises wird den Plug-In Hybriden deshalb in einer Kosten-Nutzen Untersuchung des U.S. Department of Energy nur dann eine Chance am Markt zugesprochen, wenn die Treibstoffpreise weiterhin stark ansteigen, und gleichzeitig eine deutliche Reduzierung der Kosten für den Batteriespeicher erzielt werden kann [PES06]. Zudem kann selbst dann ein konkreter finanzieller Nutzen durch eventuelle Komforteinbußen sehr leicht aufgewogen werden. So ergab eine Studie zum Kaufverhalten beim Erwerb eines neuen Fahrzeuges, dass signifikante Verluste an Gepäckraum durch den Einbau des Batteriesystem den subjektiven Wert eines Fahrzeuges um mehrere tausend US\$ senken können [SAN05]. Da die ersten reinen Elektrofahrzeuge mit Lithium-Ionen Speicher der Kleinwagenklasse angehören werden mit entsprechenden Komforteinschränkungen, z.B. bei der Reichweite, dem verfügbaren Stauraum oder der erreichbaren Geschwindigkeit, werden deren Marktchancen wahrscheinlich zunächst im Bereich der Zweit- oder Stadtfahrzeuge zu finden sein. Eine Nische könnten zukünftig die Elektro-Sportwagen füllen.

Sicherlich wird der politische Wille eine wesentliche Rolle spielen. Finanzielle Unterstützung, z.B. durch Steuervergünstigungen, oder strengere gesetzliche Emissionsregelungen können zur schnelleren Marktverbreitung von Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeugen führen. Auch der Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur zum Wiederaufladen der Batteriespeicher erfordert den Einsatz der Politik. Zuletzt ist zu berücksichtigen, dass der Erfolg von Plug-In Hybrid und Elektrofahrzeugen maßgeblichen durch den technischen Fortschritt der Lithium-Ionen Speicher bestimmt werden wird.

5 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

Effiziente elektrochemische Energiespeicherung bildet die Grundlage für zukunftsweisende Antriebsoptionen in Fahrzeugen mit Hybridantrieb, vollständig elektrisch angetriebenen Fahrzeugen oder Plug-In Hybriden. Die weltweiten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der vergangenen Jahre haben die noch junge Lithium-Ionen Technologie vom kleinen Akkumulator in Mobiltelefonen zum potentiellen Energiespeichermedium in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen entscheidend vorangebracht. Kostengünstigere und umweltverträglichere neue Elektrodenmaterialien höherer Kapazität, thermischer und elektrochemischer Stabilität, temperaturbeständige keramische Separatoren oder leichte und flexible Zellen mit polymeren Elektrolyten sind Ergebnisse dieser Entwicklungen. Nach Abwägung von Leistung, Energie, Lebensdauer, Sicherheit und Kosten werden diese Zellkomponenten zu Lithium-Ionen Batterien verschiedenster Zellchemie mit spezifischen Vor- und Nachteilen kombiniert, so dass es zukünftig eine wichtige Aufgabe bleiben wird, diese an konkrete Anwendungen anzupassen, zu testen und zu validieren. Es ist aber wahrscheinlich, dass sich die Lithium-Ionen Technologie - hin zu einer anwendungsbezogenen Zellchemie - weiter diversifizieren wird. Ein tieferes Verständnis der Degradationsmechanismen in der Zelle macht heute gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Zellsicherheit und zur Erhöhung der Lebensdauer möglich. Zahlreiche neue Ansätze, die von innovativen Materialkonzepten bis zu Elektrolytadditiven etc. reichen, werden hierzu diskutiert und zum Teil bereits umgesetzt. So konnte die Lebensdauer der Zellen, verglichen mit der rund zweijährigen Gebrauchsdauer einer Lithium-Ionen Batterie in Mobiltelefonen, deutlich gesteigert werden. Durch die intelligente Steuerung des Batteriebetriebs über ein Batteriemanagementsystem und hohe Qualität in der Verarbeitung sind sicherheitsgefährdende Lade- und Entladebedingungen, die z.B. zur Entzündung von Notebook-Batteriespeichern geführt hatten, weitestgehend auszuschließen.

Lithium-Ionen Hochleistungsbatteriesysteme für Hybridfahrzeuge erfüllen heute die wesentlichen technischen (Minimal-) Anforderungen, insbesondere bezüglich der erforderlichen Leistung beim Laden und Entladen sowie hinsichtlich der Zyklenlebensdauer, so dass die für das kommende Jahr geplante Kommerzialisierung vom technischen Standpunkt gesehen möglich erscheint. Dennoch bleiben die Kalenderlebensdauer, der eingeschränkte Betriebstemperaturbereich und die Erfüllung der Qualitätsanforderungen in der Serienproduktion als Herausforderungen bestehen. Sehr optimistisch wird der Plug-In Hybrid von Automobilherstellern und Politikern als die Antriebsoption der Zukunft mit hohem Potential zur Treibstoffeinsparung ohne Einschränkung der Reichweite angepriesen. Als Zwischenstufe vom Hybrid zum Elektrofahrzeug kombiniert der Plug-In Hybrid aber nicht nur Vor- sondern auch Nachteile beider Fahrzeugtypen. Dem Batteriespeicher eines Plug-In Hybriden wird neben einem hohen Energieinhalt auch ein anspruchsvolles Nutzungsprofil, das tiefe Entladungen mit flachen Lade- und Entladezyklen kombiniert, abverlangt. Da bei der Lithium-Ionen Technologie in beiden Punkten noch weiterer Entwicklungsbedarf besteht, ist hinsichtlich der Markteinführung von einem fließenden Übergang zwischen Vollhybrid und Plug-In Hybrid auszugehen. Zunächst kann den Schwächen des Batteriesystems durch Reduzierung der Reichweite im

Elektrobetrieb sowie durch ein „*blended*“-Design, d.h. durch einen den Elektromotor unterstützenden, etwas größer ausgelegten Verbrennungsmotor, begegnet werden.

Entgegen der zum Teil sehr optimistischen Darstellungen durch die Medien und manch blumiger PR-Kampagnen der Automobilhersteller limitiert die Batterie auch weiterhin aufgrund ihrer begrenzten spezifischen Energie und Energiedichte und der damit verbunden eingeschränkten Reichweite die energetische Effizienz und Praxistauglichkeit rein elektrischer Antriebe [GRÜ06]. Der Käufer eines Elektromobils muss noch immer Kompromisse etwa bezüglich des Stauraums eingehen, zumal die ersten Elektrofahrzeuge mit Lithium-Ionen Batterie zunächst als Kleinwagen und City-Cars auf den Markt gebracht werden. Wie Abbildung 5-1 sehr eindrucksvoll veranschaulicht, sind noch erhebliche Anstrengungen zu unternehmen, um langfristig mit konventionellen Mittelklassefahrzeugen vergleichbare vollwertige Elektrofahrzeuge zu realisieren. Hier ist ein Durchbruch in der Batterietechnologie notwendig, der sehr wahrscheinlich über die Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen Speicher hinausgehen wird (vgl. Abbildung 3-23). Aufgrund der beschleunigten Forschung und Entwicklungsaktivitäten vieler Länder in gut finanzierten staatlichen Programmen und durch hohe Investitionen der Industrie sind jedoch deutliche Fortschritte zu erwarten. Untersucht werden neue Material-, Fertigungs- und Systemintegrationskonzepte, um den höheren Anforderungen hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer und Sicherheit gerecht werden zu können.



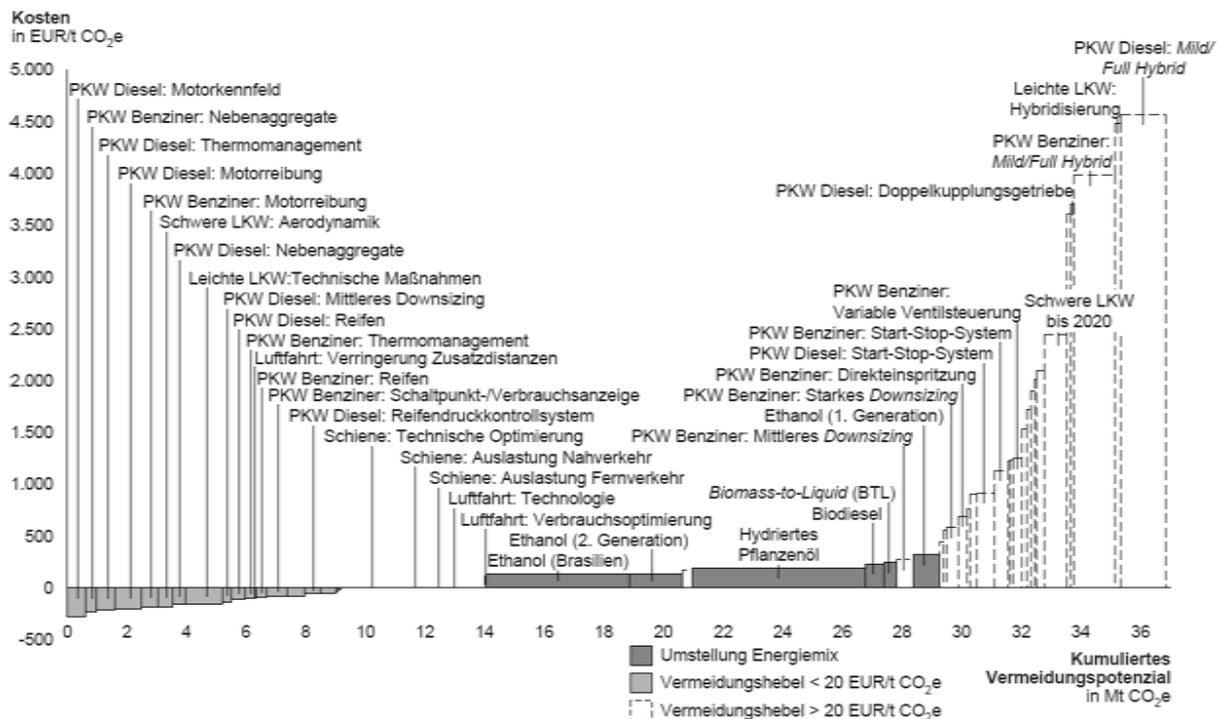
Quelle: [HEL07]

Abbildung 5-1 Gewicht und Volumen des Energiespeichersystems eines Mittelklassewagens für 500 km Reichweite im Falle der Diesel- bzw. Lithium-Ionen-Technologie

Neben den technischen Herausforderungen sind die hohen Kosten der Lithium-Ionen Speicher eine der größten Hürden auf dem Weg zur Kommerzialisierung. Noch befindet sich die Lithium-Ionen Technologie für das Fahrzeug in einer vorkommerziellen Entwicklungs- oder Prototypenphase mit entsprechend hohen Kosten. Die Analyse der historischen Preisentwicklung bei kleinen Zellen der Gebrauchselektronik zeigt jedoch ein Potential zu deutlichen Kostensenkungen in der Serienproduktion auf. Dennoch geht aus einer detaillierteren Betrachtung einzelner Zellkomponenten hervor, dass die von der Automobilindustrie gesteckten Kostenziele, die sich vor allem an der Vergleichbarkeit zum heutigen konventionellen Automobil messen, auch im derzeitigen „*Best Case*“ kaum zu erreichen sind. Zumal die Einsparmöglichkeiten durch die Verwendung günstiger Zellkomponenten immer einer Abwägung zwischen Kosten einerseits und Qualität, Sicherheit und Lebensdauer der Zellen andererseits unterliegen, ist davon auszugehen, dass für Fahrzeuge mit Lithium-Ionen Technologie auch längerfristig ein Aufpreis gegenüber konventionellen Automobilen zu leisten ist.

Auch wenn die Forschung in Zukunft Lithium-Ionen Speicher hervorbringt, die effizient, leicht, sicher und preiswert sind, so steht für eine Umsetzung dieser Technologie im Fahrzeug dennoch deren Nutzen für Umwelt und Gesellschaft im Vordergrund. Vor allem beim Klima-

schutz besteht dringender Handlungsbedarf. Die effiziente elektrochemische Energiespeicherung ist dabei ein wesentlicher Schlüssel für klimaverträgliche Energienutzung. Die breite Einführung verbrauchsarmer Hybridfahrzeuge könnte hier einen wirksamen Beitrag leisten. Jedoch ist dabei folgender Aspekt kritisch zu betrachten. Erreicht die teure Hybridtechnologie auf ihren Hauptmärkten in den reichen Industriestaaten Japan, den USA und in Europa tatsächlich höhere Marktanteile, so können die damit erzielten Kraftstoffeinsparungen zunächst tatsächlich die Preisentwicklung für das knappe Gut Erdöl und die CO₂-Emissionen dämpfen. Gleichzeitig trifft der eingesparte Treibstoff in anderen Ländern wie beispielsweise den aufstrebenden Wirtschaftsmächten China oder Indien auf eine immer weiter steigende Nachfrage, die durch das niedrig gehaltene Preisniveau wahrscheinlich sogar verstärkt wird. Insgesamt wird dadurch natürlich mehr Menschen der Zugang zur „Automobilität“ ermöglicht, ob Einsparmaßnahmen, die sich nur auf einzelne Regionen der Erde konzentrieren, tatsächlich einen positiven globalen Effekt auf die Umwelt und das Klima haben können, sollte unter diesem Gesichtspunkt jedoch weiter untersucht werden. Außerdem sind neben der Hybridtechnologie ebenso andere Lösungen zur Senkung der Umweltbelastung in Betracht zu ziehen. Zwar wird auch nach einer McKinsey-Studie den Hybridantrieben das Potential zur CO₂-Vermeidung nicht abgesprochen, doch steht sie unter Kostengesichtspunkten erst am Ende einer Reihe von Maßnahmen zur Emissionsminderung (s. Abbildung 5-2)



Quelle: [MCK07]

Abbildung 5-2 Vermeidungskostenkurve für den Transportsektor in Deutschland bis zum Jahr 2020

Bei Plug-In Hybrid und Elektrofahrzeugen erfolgt eine Verlagerung von energetischen Verlusten und CO₂-Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb in die Nutzenergieerzeugung. Der Einspareffekt ist abhängig vom Energieverbrauch des Fahrzeuges und kann bei kleinen

Elektromobilen mit geringerem Nutzenergieverbrauch durchaus positiv sein, kurzfristig sind aber für größere Fahrzeuge beim heutigen europäischen oder amerikanischen Energie-Mix keine oder nur geringe Vorteile für die Umwelt zu erwarten, vor allem wenn der Energie- und CO₂-Aufwand zur Batterieherstellung berücksichtigt wird. Mittel- und langfristig eröffnet sich aber die Möglichkeit eines gleitenden Überganges aus der erdölbasierten Treibstoffversorgung in die Verwendung erneuerbarer Energieträger im Straßenverkehr.

Ein weiterer, die Umwelt betreffender Aspekt einer weiten Verbreitung der Lithium-Ionen Technologie in batterieelektrischen Fahrzeugen ist der Einsatz knapper Rohstoffe bei der Herstellung der Batterie. Hier ist eine Rückgewinnung insbesondere der verwendeten Metalle notwendig, was durch die heutigen Recyclingmöglichkeiten noch nicht in vollem Ausmaß möglich ist. Die Klärung der Recyclingfrage bleibt deshalb für die Zukunft bestehen.

Die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen Batterien für Fahrzeugantriebe ist längst nicht mehr allein durch Umwelt- und Technologieaspekte motiviert. Sie wird von der Industrie und in zunehmendem Maß auch von der Politik als Wettbewerbsfaktor verstanden, der über wirtschaftlichen Erfolg, Arbeitsplätze und den Straßenverkehr der Zukunft entscheidet. Die hohen finanziellen Engagements von industrieller und staatlicher Seite sind ein Indiz dafür. Kaum ein Automobilhersteller kann sich heute der Entwicklung von Hybrid-, Plug-In Hybrid- oder Elektrofahrzeugen verschließen. Doch stehen diesen Plänen kurz- und mittelfristig nur wenige Batteriehersteller gegenüber, die in der Lage sind, Lithium-Ionen Batteriesysteme in ausreichender Zahl und der notwendigen hohen Qualität zu produzieren. Engpässe in der Produktion könnten somit einer schneller Kommerzialisierung im Wege stehen. Besonders betroffen wären die europäischen und amerikanischen Automobilhersteller, da die großen Batterieproduzenten vor allem im asiatischen Wirtschaftsraum anzutreffen sind.

Für den Markterfolg müssen die geschilderten technischen und ökonomischen Probleme überwunden und die Konsumenten von den Vorteilen der Technologie überzeugt werden. Fundierte quantitative Angaben sind derzeit aber noch nicht möglich, da die Marktpotentiale sehr stark von äußeren Faktoren wie der Entwicklung der Kraftstoff- und Strompreise abhängig sein werden. Von entscheidender Bedeutung sind jedoch energie- und umweltpolitische Rahmenbedingungen, da viele Potentiale des Elektroantriebs erst im Rahmen einer Neuausrichtung der Energiewirtschaft – hin zu regenerativen und effizienteren Energieversorgung – wirksam werden können, und auch Fragen zur Bereitstellung einer Lade-Infrastruktur für Plug-In-Hybrid- und Elektrofahrzeuge zunächst beantwortet werden müssen.

Die weltweit intensivierten Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen von Automobilherstellern, Batterieproduzenten, Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen im Bereich der Lithium-Ionen Technologie sowie das zunehmende Interesse der Regierungen und auch der Konsumenten zeigen, dass batterieelektrische Fahrzeuge nicht, wie lange vermutet, in der Nische verharren werden. Dabei kommt den Hybridantrieben eine wichtige Schlüssel-funktion als Brückentechnologie in Richtung vollkommen emissionsfreier Fahrzeuge zu, egal ob zukünftig batterie- oder brennstoffzellenbetrieben. Bis das Elektrofahrzeug in Konkurrenz zur jetzigen, ausgereiften konventionellen Fahrzeugtechnik treten kann, werden noch einige Jahre vergehen. Doch die Notwendigkeit zu umweltfreundlicherem Verhalten und die begrenzten Erdölvorräte begründen dieses Ziel.



Anhang:

Hersteller	SAFT	Matsushita	HitachiVE	Kokam	GAIA
Zelle:	VL7P	Gen 2	UHP	HP	MI 26650
Kathode	Li(Ni,Co,Al)O ₂	Li(Ni,Co,Al)O ₂	k.A.	Li(Ni,Co,Mn)O ₂	Li(Ni,Co,Al)O ₂
Spannung in V	3,6	3,6	3,4	3,7	3,6
Kapazität in Ah	7	7	5,5	7,2	7,5
spez. Energie in Wh/kg	67	92	k.A.	114	84
Spez. Leistung (Spitze) in W/kg	1800	3400	k.A.	2600	1500
Leistungsdichte in W/l	3525	k.A.	k.A.	4900	3750
Verhältnis Leistung/Energie in 1/h	27	37	k.A.	23	18
Zykluslebensdauer (flache Zyklen)		k.A.		k.A.	k.A.
Zykluslebensdauer Tiefentladung (% Entladetiefe)	~400k	~1000	~750k	~3000 (80)	1000 (60)
Kalenderlebensdauer in Jahren bei Raumtemperatur	~20	k.A.	k.A.	~10	k.A.
Batteriesystem:					
Energieinhalt in kWh	2	3	3	2,6	2
Leistung (Spitze)	50	90	47	52	25
Spez. Leistung (Spitze) in W/kg	1110	2100	1900	1850	k.A.
Leistungsdichte in W/l	1110	k.A.	2100	k.A.	k.A.
spez. Energie in Wh/kg	44	70	42	93	k.A.
Verhältnis Leistung/Energie in 1/h	25	30	45	20	12,5
Gewicht in kg	45	43	22,5	28	k.A.
Entwicklungsstatus	Prototyp	Entwicklung	Prototyp	Kleinserie	k.A.

Quelle: [PAT08b]

Tabelle 9 Hochleistungszellen verschiedener Hersteller und daraus aufgebaute Batteriesystem

Hersteller	SAFT	GAIA	LitCel	Lamilion	Kokam
Zelle:	VL45E	HE-Serie	EV-Typ	EV-Typ	HE-Serie
Kathode	Li(Ni,Co,Al)O ₂	Li(Ni,Co,Al)O ₂	LiMn ₂ O ₄	Li(Ni,Co,Mn)O ₂ + LiMn ₂ O ₄	Li(Ni,Co,Mn)O ₂
Spannung in V	3,6	3,6	3,85	3,6	3,7
Kapazität in Ah	45	60	50	13	100
spez. Energie in Wh/kg	150	150	136	> 150	163
Energiedichte in Wh/l	314	380	270	270	340
Spez. Leistung (Spitze) in W/kg	664	~ 900	1500	1300	~700
Verhältnis Leistung/Energie in 1/h	4,4	~6	7,7	8,7	~4,3
Zykluslebensdauer (% Entladetiefe)	> 3200 (80)	~ 1000 (70)	~1000	> 1400 (100)	~3000
Kalenderlebensdauer in Jahren bei Raumtemperatur	> 12	k.A.	k.A.	~10	> 10
Batteriesystem:					
Energieinhalt in kWh	~24	22	20	9,2	~30
spez. Energie in Wh/g	90	115	118	~60	~110
Energiedichte in Wh/l	145	165	194	k.A.	k.A.
Spez. Leistung (Spitze) in W/kg	210	~250	912	~400	~490
Verhältnis Leistung/Energie in 1/h	2,3	~2,2	7,7	6,7	4,3
Gewicht in kg	265	200	170	150	265

Quelle: [PAT08b]

Tabelle 10 Hochenergiezellen verschiedener Hersteller und daraus aufgebaute Batteriesysteme

Literaturverzeichnis

- [A1208] Internetpräsenz des Unternehmens A123Systems (www.A123Systems.com), Oktober 2008
- [AND01] B.A. Andersson, I. Råde: "*Metal resource constraints for electric-vehicle batteries*", Transportation Research Part D 6, 2001, S. 297
- [AND07] M. Anderman: "*Status and Prospects of Battery Technology for Hybrid Electric Vehicles, Including Plug-In Hybrid Electric Vehicles*", Briefing to the U.S. Senate Committee on Energy and Natural Resources, 26. Januar, 2007
- [AUR04] D. Aurbach, Y. Talyosef, B. Markovsky, E. Markevich, E. Zinigrad, L. Asraf, J.S. Gnanaraj, H.-J. Kim: "*Design of electrolyte solutions for Li an Li-ion batteries: a review*", Electrochimica Acta 50, 2004, S. 247
- [AXS08] J. Axsen, A. Burke, K. Kurani: "*Batteries for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008*", Institute of Transportation Studies, University of California, Mai 2008
- [AZM05] B. M. Azmi, T. Ishihara, H. Nishiguchi, Y. Takita: "*LiVOPO₄ as a new cathode materials for Li-ion rechargeable battery*", Journal of Power Sources 146, 2005 S. 525
- [BAL06] P.G. Balakrishan, R. Ramesh, T.P. Kumar: "*Safety mechanisms in lithium-ion batteries*", Journal of Power Sources 155, 2006, S. 401
- [BAR07] J. Barker, R.K.B. Gover, P. Burns, A. Bryan: "*The Effect of Al Substitution on the Electrochemical Insertion Properties of the Lithium Vanadium Phosphate, Li₃V₂(PO₄)₃*", Journal of the Electrochemical Society 154, 2007, S. A307
- [BAS06] "*Guideline on Material Recovery and Recycling of End-of-Life Mobile Phones*", Mobile Phone Partnership Initiative Project 3.1, Basel Convention, 2006
- [BAT08] Internetseite: www.batteryuniversity.com, September 2008
- [BCG72] "*Perspectives on Experience*", Boston Consulting Group, Boston, 1972
- [BFA08] "*Korea (Rep.) will bei Lithium-Ionen-Akkus für Hybridautos nach vorn*", Bundesagentur für Außenwirtschaft, Datenbank Länder und Märkte, 2. Juli 2008
- [BOR03] C. Borchard-Tuch: "*Lithium-Ionen-Akkus*", Chemie in unserer Zeit 37, 2003, S. 436
- [BRA04] N.N. Bramnik, K.G. Bramnik, T. Buhrmester, C. Baetz, H. Ehrenberg, H. Fuess: "*Electrochemical and structural study of LiCoPO₄-based electrodes*", Journal of Solid State Electrochemistry 8, 2004, S.558
- [BRE85] C. Breit: "*Lern- und Erfahrungseffekte in der Produktionstheorie*", GBI-Verlag, München, 1985

- [BRO95] R. J. Brodd, A. Kozawa: "Outlook for Sealed Rechargeable Batteries", WES-CON/95, San Francisco, 7.-9. November 1995
- [BRO06] R.J. Brodd: "*Factors Affecting U.S. Production Decisions: Why Are There No Volume Lithium-Ion Battery Manufacturers in the United States?*", U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Advanced Technology Program, Dezember 2006
- [BRO07] M. Broussely, G. Pistoia: "*Industrial Applications of Batteries – From Cars to Aerospace and Energy Storage*", Elsevier, Amsterdam, 2007
- [BRU97] P. G. Bruce: "*Solid-State chemistry of lithium power sources*" Chemical Communications 19, 1997, S. 1817
- [CAR00] C. Carpetis: "*Globale Umweltvorteile bei Nutzung von Elektroantrieb mit Brennstoffzellen und/oder Batterien im Vergleich zu Antrieben mit Verbrennungsmotor*", Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung, April 2000
- [CED98] G. Ceder, A. Van der Ven, M.K. Aydinol: "*Lithium-Intercalation Oxides for Rechargeable Batteries*", JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society 50, 1998, S. 35
- [CHA06] S. G. Chalk, J. F. Miller: "*Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems*", J. Power Sources 159, 2006, S.73
- [CON08] Internetpräsenz der Continental AG (www.conti-online.com), Oktober 2008
- [DAI08] Internetpräsenz des Automobilherstellers Daimler (www.daimler.com), Oktober 2008
- [DAH05] J. Dahn, J. Jiang, L. Moshurchak, C. Buhrmester, R. Liangchen-Wang: "*The Drugstore Li-Ion Cell*", The Electrochemical Society Interface, Winter 2005, S. 27
- [DES90] J. Desilvestro, O. Haas: "*Metal Oxide Cathode Materials for Electrochemical Energy Storage: A Review*", Journal of the Electrochemical Society 137, 1990, S. 5C
- [DGS08] Internetpräsenz der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (www.dgs.de), Oktober 2008
- [DIE08] Internetseite: www.dieselhybrid.de, Oktober 2008
- [DIL08] D. Dilba: "*Die Spannung steigt*", Technology Review, Mai 2008
- [DOE07] "*Plug-in Hybrid Electric Vehicle R&D Plan*", U.S. Department of Energy, Office of FreedomCAR and Vehicle Technologies, Juni 2007
- [DOL07] C. Doll: "*Zukunftsmarkt hybride Antriebstechnik*", Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, Dezember 2007

- [DOM08] R. Dominko: “ Li_2MSiO_4 ($M = Fe$ and/or Mn) cathode materials”, Journal of Power Sources 184, S. 462
- [DUB07] M. Dubarry, V. Svoboda, R. Hwu, B.-Y. Liaw: “A roadmap to understand battery performance in electric and hybrid electric vehicle operation”, Journal of Power Sources 174, 2007, S. 366
- [DUT84] J.M. Dutton, A. Thomas: “Treating Progress Functions as a Managerial Opportunity”, Academy of Management Review 9, 1984, S.235
- [EBR08] Internetpräsenz der European Battery Recycling Association EBRA (www.ebrarecycling.org), November 2008
- [EIC90] G. Eichinger, G. Semrau: “Lithiumbatterien I: Chemische Grundlagen“, Chemie in Unserer Zeit 24, 1990, S. 32
- [EPR07] “Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions”, Electric Power Research Institute (EPRI), Juli 2007
- [EU06] “Energy and Transport in Figures 2006 – Part 3: Transport“. Europäische Kommission, Generaldirektion Energien und Verkehr in Kooperation mit Eurostat, 2006
- [EVO08] Internetpräsenz von Evonik Industries (<http://corporate.evonik.de>), Oktober 2008
- [FU06] J.L. Fu, H. Liu, C. Li, Y.P. Wu, E. Rahm, E. Holze, H.Q. Wu: “Surface modifications of electrode materials for lithium ion batteries”, Solid State Sciences 8, 2006, S. 113
- [GAI00] L. Gaines, R. Cuenca: “Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles”, Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research, Mai 2000
- [GER94] H. Gerischer, F. Decker and B. Scrosati: “The Electronic and the Ionic Contribution to the Free Energy of Alkali Metals in Intercalation Compounds“, Journal of the Electrochemical Society 141, 1994, S. 2297
- [GER02] B. Gerl: “Innovative Automobilantriebe: Konzepte auf der Basis von Brennstoffzellen, Traktionsbatterien oder alternativen Kraftstoffen“, Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 2002
- [GOO07] J.B. Goodenough: “Cathode materials: A personal perspective”. Journal of Power Sources 174, 2007, S 996
- [GOV06] R.K.B. Gover, P. Burns, A. Bryan, M.Y. Saidi, J.L. Swoyer, J. Barker: “ $LiVPO_4F$: A new active material for safe lithium-ion batteries”, Solid State Ionics 177, 2006, S. 2635
- [GRE08] Internetpräsenz des Green Car Congress (www.greencarcongress.com), Oktober 2008

- [GRÜ06] R. Grünwald: *“Perspektiven eines CO₂- und emissionsarmen Verkehrs – Kraftstoffe und Antriebe im Überblick“*, Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin, 2006
- [HAA05] P. de Haan, A. Peters: *“Charakteristika und Beweggründe von Käufern des Toyota Prius 2“*, Forschungsbericht, Department of Environmental Sciences, ETH Zürich, 2005
- [HAB08] A. Habib: *“DOE Merit Review“*, United States Advanced Battery Consortium, Februar 2008
- [HAN07] K. Handa, H. Yoshida: *“Development of Next-Generation Electric Vehicle ‘i-MiEV’“*, Mitsubishi Motors Technical Review No. 19, 2007
- [HEI07] Internetportal Heise Online (www.heise.de): *“Hybrid oder Elektroauto? Hersteller eröffnen eine neue Diskussion“*, 24 Oktober 2007
- [HEL07] R. von Holmolt: *“F&E Aktivitäten im Bereich Wasserstoff und Elektrofahrzeuge bei General Motors“*, A3PS-Konferenz am Tech Gate Vienna, 13 Dezember 2007
- [HEN02] G.L. Henriksen, K. Amine, J. Liu, P.A. Nelson: *„Materials Cost Evaluation Report for High-Power Li-Ion HEV Batteries“*, Argonne National Laboratory, Chemical Technology Division, Dezember 2002
- [HEY07] J.B. Heywood: *“Freie Fahrt für freie Bürger?“* Spektrum der Wissenschaft SPEZIAL 1/07, 2007, S. 68
- [HIL08] D. Hillebrand: *“Overview Hearing – Gas Prices and Vehicle Technology“*, House Appropriations Subcommittee on Energy and Water Development, Argonne National Laboratory, 14. Februar 2008
- [HOR03] T. Horiba, K. Hironaka, T. Matsumura, T. Kai, M. Koseki: *“Manganese-based Lithium batteries for hybrid electric vehicle applications“*, Journal of Power Sources 119-121, 2003, S. 893
- [HOW08] D. Howell: *“Progress Report for Energy Storage Research and Development 2007“*, U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Vehicle Technologies, Januar 2008
- [HUI03] J. Huisman: *“The QWERTY/EE concept, Quantifying recyclability and eco-efficiency for end-of-life treatment of consumer electronic products“*, Ph.D.Thesis, Technische Universität Delft, 2003
- [HUI04] J. Huisman: *“QWERTY and Eco-Efficiency analysis on cellular phone treatment in Sweden“*, Technische Universität Delft, 2004
- [IPC07] *“IPCC Fourth Climate Assessment Report: Climate Change 2007“*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf, 2007
- [IEA00] *“Experience Curves for Energy Technology Policy“*, International Energy Agency IEA, 2000

- [ISH02] K. Ishihara, N. Kihira, N. Terada, T. Iwahori: "*Environmental Burdens of Large Lithium-Ion Batteries Developed in a Japanese National Project*", Electrochemical Society, 202nd Meeting, Salt Lake City, 20-25 Oktober 2002
- [ISH07] H. Ishitani: "*Overview of Japanese Efforts on Plug-In Hybrid Vehicle*", EVS-23 Plug-In Hybrid Electric Vehicle Workshop, Anaheim, 2. Dezember 2007
- [JDP07] "*2007 Alternative Powertrain Study*", J. D. Power Associates, Westlake Village, USA, Juli 2007
- [JIA06] C. Jiang, E. Hosono, H. Zhou: "*Nanomaterials for lithium ion batteries*" Nano Today 1, 2006, S. 28
- [JOS05] W. Josefowitz, H. Kranz, D. Macerata, T. Soczka-Guth, H. Mettlach, D. Porcellato, F. Orsini, J. Hansson: "*Assessment and Testing of Advanced Energy Storage Systems for Propulsion - European Testing report*", Proc. 21st EVS, Monaco, 2-6 April 2005
- [JOS08] A.Jossen: "*From Cells to Battery Modules and Battery Systems*", 11th Ulmer ElectroChemical Talks, Ulm, 10 Juni 2008
- [KAI08] O.S. Kaiser, H. Eickenbusch, V. Grimm, A. Zweck: "*Zukunft des Autos*", Zukünftige Technologien Consulting, VDI Technologiezentrum, Januar 2008
- [KAR07] E. Karden, S. Ploumen, B. Fricke, T. Miller, K. Snyder: "*Energy storage devices for future hybrid electric vehicles*", Journal of Power Sources 168, 2007, S. 2
- [KOS01] N.V. Kosova: "*Mechanochemical Synthesis of Intercalation Lithium Transition-Metal Oxide Compounds: Some Aspects of Mechanism*", Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on New Trends in Intercalation Compounds for Energy Storage, Sozopol, Bulgaria, 22. September – 1. Oktober 2001, S. 507
- [KRO07] M. A. Kromer, J. B. Heywood: "*Electric Powertrains: Opportunities and Challenges in the U.S. Light-Duty Vehicle Fleet*", Publication No. LFEE 2007-03 RP, Sloan Automotive Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Mai 2007
- [LAM03] C. Lampe-Omnerud, S. Dalton, P. Omnerud, D. Dovikov, J. Shi, J. Treger, R. Chemberlain: "*Assessment of Olivines as the Cathode for Lithium-Ion Batteries*", 203rd Meeting of the Electrochemical Society, 27. April – 2. May 2003
- [Li06] C. Li, H.P. Zhang, J. Fu, H. Liu, Y.P. Wu, E. Rahm, R. Holze, H.Q. Wu: "*Cathode Materials modified by surface coating for lithium ion batteries*", Electrochimica Acta 51, 2006, S. 3872
- [LIN02] D. Linden, T. B. Reddy: "*Handbook of Batteries*", McGraw-Hill, New York, 3. Auflage, 2002

- [LIU06] H. K. Liu, G. X. Wang, Z. Guo, J. Wang, K. Konstantinov: "*Nanomaterials for Lithium-ion Rechargeable Batteries*" Journal of Nanoscience and Nanotechnology 6, 2006, S. 1
- [MAR06] T. Markel, A. Brooker, J. Gonder, M. O'Keefe, A. Simpson, M. Thornton: "*Plug-In Hybrid Vehicle Analysis*", Milestone Report, Publ. No. NREL/MP-540-40609, National Renewable Energy Laboratory, November 2006
- [MCK07] "*Kosten und Potentiale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland*", Studie von McKinsey & Company, September 2007
- [MET06] "*Recommendations for the Future of Next-Generation Vehicle Batteries*", Study Group on Next-Generation Vehicle Batteries, Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan, August 2006
- [MIT08] Internetpräsenz des Unternehmens Mitsubishi-Motors (www.mitsubishi-motors.com), Oktober 2008
- [MOO91] G. A. Moore: "*Crossing the Chasm*", Marketing and Selling High-tech Products to Mainstream Customers, 1991
- [NAU06] D. Naunin: "*Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*", Expert-Verlag, Renningen, 2006,
- [NAZ04] G.-A. Nazri, G. Pistoia: "*Lithium Batteries – Science and Technology*", Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004
- [NEM06] G.F. Nemet: "*Beyond the learning curve: factors influencing cost reductions in photovoltaics*", Energy Policy, 2006, S. 3218
- [NOE02] M. Noel, V. Suryanarayanan: "*Role of carbon host lattices in Li-ion intercalation/de-intercalation processes*", Journal of Power Sources 111, 2002, S. 193
- [NON08] T. Nonaka, C. Okuda, Y. Seno, K. Koumoto, Y. Ukyo: "*X-ray absorption study on $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ cathode material for lithium-ion batteries*", Ceramics International 34, 2008, S. 859
- [OHZ07] T. Ohzuku, R. J. Brodd: "*An overview of positive-electrode materials for advanced lithium-ion batteries*", Journal of Power Sources 174, 2007, S. 449
- [OSA01] T. Osaka, T. Momma: "*Lithium metal/polymer battery*", Journal of Power Sources 97-98, 2001, S. 765
- [PAS07] G. Passier, F.V. Conte, S. Mets, F. Badin, A. Brouwer, M. Alaküla, D. Santini: "*Status Overview f Hybrid and Electric Vehicle Technology (2007)*", IEA International Energy Agency, 2007
- [PAT08] A. Patil, V. Patil, D.W. Shin, J.-W. Choi, D.-S. Paik, S.-J.Yoon: "*Issue and challenges facing rechargeable thin film lithium batteries*". Materials Research Bulletin 43, 2008, S. 1913

- [PAT08b] P.G. Patil: "*Developments in Lithium-Ion Battery Technology in The Peoples Republic of China*", Argonne National Laboratory, Energy Systems Division, Januar 2008
- [PES06] A. Pesaran, A. Simpson, T. Markel: "*Cost-Benefit Analysis of Plug-In Hybrid-Electric Vehicle Technology*", 22nd International Electric Vehicle Symposium, Yokohama, 25.-28. Oktober 2006
- [PES07] A. Pesaran: "*Battery Requirements for Plug-In Hybrid Electric Vehicles - Analysis and Rationale*", 23st EVS, Anaheim, 2.-5. Dezember 2007
- [PFU08] G. Pfundtner: "*Lithium-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge aus Sicht eines Automobilherstellers (Daimler AG)*", 9te NanoMat Szene, Forschungszentrum Karlsruhe, 17.-18. April 2008
- [PIS05] G. Pistoia: "*Batteries for Portable Devices*", Elsevier, Amsterdam, 2005
- [PLE04] G.L. Plett: "*Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 1. Background*", Journal of Power Sources 134, 2004, S. 252
- [POI02] P. Poizot, S. Laruelle, S. Grugeon, J.-M. Tarascon : "*Rationalization of the Low-Potential Reactivity of 3d-Metal-Based Inorganic Compounds toward Li*", Journal of the Electrochemical Society, 2002, S. A1212
- [PRA08] H.W. Praas: "*Battery manufacturing and Battery safety*", 11th Ulmer Electro-Chemical Talks, Ulm, 10 Juni 2008
- [PSA08] Internetpräsenz des Unternehmens PSA Peugeot Citroën (www.psa-peugeot-citroen.com), Oktober 2008
- [RAS06] A. Raskin, S. Shah: "*The Emergence of Hybrid Vehicles – Ending Oil's Stranglehold on Transportation and the economy*", AllianceBernstein, 2006
- [RES08] "*China Li-ion Battery and Its Raw Materials Market Report 2007-2008*", Research in China, Juli 2008
- [SAF08] Internetpräsenz des Unternehmens Saft (www.saftbatteries.com)
- [SAN05] D.J. Santini, A.D. Vyas: "*Suggestions for a New Vehicle Choice Model Simulating Advanced Vehicles Introduction Decisions (AVID): Structure and Coefficients*", Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research, Energy Systems Division, 2005
- [SAN08] D. Santini, A. Vyas: "*How to Use Life Cycle Analysis Comparisons of PHEVs to Competing Powertrains*", 8th International Advanced Automotive Battery and Ultracapacitor Conference, Tampa, Florida, 12.-16. Mai 2008
- [SCH02] W.A. Van Schalkwijk, B. Scrosati: "*Advances in Lithium-Ion Batteries*", Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002,
- [SHI07] N. Shirouzu: "*Toyota Delays Next Hybrids on Safety Concerns*", The Wall Street Journal, 7. August 2007

- [SHO96] T. Shodai, S. Okada, S. Tobishima, J. Yamaki: "*Study of $Li_{3-x}M_xN$ (M: Co, Ni or Cu) system for use as anode material in lithium rechargeable cells*", Solid State Ionics 86-88, 1996, S.785
- [SON08] Internetpräsenz des Unternehmens Sony (www.sony.com)
- [SPI08] "*Chevey Volt kommt 2011 nach Europa*", Internetportal Spiegel-online (www.spiegel.de), 7. August 2008
- [SPO07] R. Spotnitz: "*Design Principles for Large Li-Ion Batteries*", Third International Symposium on Large Lithium Ion Battery Technology and Application (LLIB-TA), Long Beach, Mai 2007
- [STU06] E. Stura, C. Nicolini: "*New nanomaterials for light weight lithium batteries*" Analytica Chimica Acta 568, 2006, S. 57
- [TAR01] J.-M.Tarascon, M. Armand: "*Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*", Nature 414, 2001, S. 359
- [TOY08] Internetpräsenz des Unternehmens Toyota (www.toyota.com), Oktober 2008
- [TRI07] A.Trifonova, M. Winter, J.O. Besenhard: "*Structural and electrochemical characterization of tin-containing graphite compounds used as anodes for Li-ion batteries*", Journal of Power Sources 174, 2007, S. 800
- [UMI08] Internetpräsenz der Firma Umicore (www.umicore.com), Oktober 2008
- [USC08] Internetpräsenz des U.S. Council for Automotive Research (www.uscar.org), Oktober 2008
- [USGS08] Internetpräsenz der U.S. Geological Survey (www.usgs.gov), Oktober 2008
- [VET05] J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K. C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrend, C. Vogler, A. Hammouche: "*Aging mechanisms in lithium-ion batteries*" Journal of Power Sources 147, 2005, S. 269
- [WAL06] H. Wallentowitz, K. Reif: "*Handbuch Kraftfahrzeugelektronik*", Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2006
- [WAL07] M.P. Walsh, F.R. Kalhammer, B.M. Kopf, D.H. Swan, V.P. Roan: "*Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology*", Report of the ARB Independent Export Panel, 13. April 2007
- [WEN99] H. Wendt, G. Kreysa: "*Electrochemical Engineering: Science and Technology in Chemical and Other Industries*", Springer, Berlin, 1999
- [WIK08] Freie Enzyklopädie: www.wikipedia.org, Oktober 2008
- [WIL96] F.G. Will: "*Impact of lithium abundance and cost on electric vehicle battery applications*", Journal of Power Sources 63, 1996, S. 23
- [WIN99] M. Winter, J.O. Besenhard: "*Wiederaufladbare Batterien – Teil I: Akkumulatoren mit wässriger Elektrolytlösung*". Chemie in unserer Zeit 33, 1999, S. 252

- [WIN05] M. Winter, K. C. Möller: "*Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien*", Skript zum Praktikum Anorganisch-Chemische Technologie, Institut für Chemische Technologie Anorganischer Stoffe, TU Graz, 2005
- [WIN07] M. Winter: "*Material Selection for Li-Ion Batteries*", 7th International Advanced Automotive Battery & Ultracapacitor Conference and Symposia, Long Beach, 14.-18. Mai 2007
- [WÖH00] G. Wöhe: "*Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*", Verlag Vahlen, 20. Auflage, München, 2000
- [WOH07] M. Wohlfahrt-Mehrens: "*Materiealien für zukünftige Lithium-Ionen Batterien – Entwicklungen und Perspektiven*", IMF Seminar, Forschungszentrum Karlsruhe, Dezember 2007
- [WOH08] M. Wohlfahrt-Mehrens: "*Li-Ion Batteries – Basic Principles and Technologies*", 11th Ulmer ElectroChemical Talks, Ulm, 10. Juni 2008
- [WUR02] C. Wurm, M. Morcrette, G. Rousse, L. Dupont, C. Masquelier: "*Lithium Insertion/Extraction into/from $LiMX_2O_7$ Compositions ($M = Fe, V; X = P, As$) Prepared via a Solution Method*", Chemistry of Materials 14, 2002, S. 2701
- [YIN06] S.-C. Yin, P. Subramanya Herle, A. Higgins, N. J. Taylor, Y. Makimura, L. F. Nazar: "*Dimensional Reduction: Synthesis and Structure of Layered $Li_5M(PO_4)_2F_2$ ($M = V, Cr$)*", Chemistry of Materials 18, 2006, S. 1745
- [YOS04] M. Yoshio, H. Wang, K. Fukuda, T. Umeno, T. Abe, Z. Ogumi: "*Improvement of natural graphite as a lithium-ion battery anode material, from raw flake to carbon-coated sphere*", Journal of Materials Chemistry 14, 2004, S. 1754
- [ZHA06] S.S. Zhang: "*A review on electrolyte additives for lithium-ion batteries*", Journal of Power Sources 162, 2006, S. 1379
- [ZHA07] S.S. Zhang, "*A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries*", Journal of Power Sources 164, 2007, S. 351