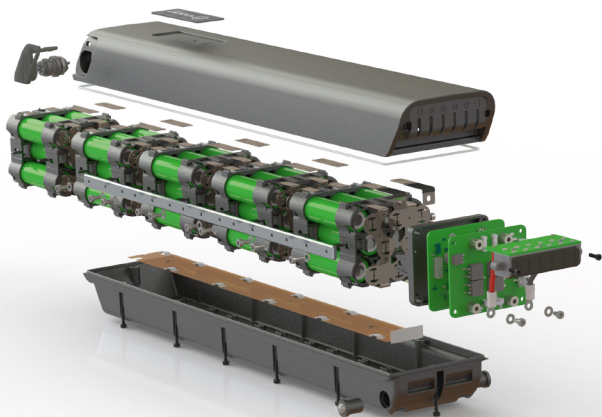


Sven Bauer

AkkuWelt



Sven Bauer

AkkuWelt

Sven Bauer

AkkuWelt

Vogel Business Media

SVEN BAUER

ist Geschäftsführer und Gründer der Unternehmensgruppe BMZ Group mit Sitz in Deutschland, Polen, China, USA sowie einer Dependence in Frankreich. Er gilt als einer der bedeutendsten europäischen Batterieexperten und ist ein gefragter Redner auf nationalen und internationalen Konferenzen der Batterie-Industrie.

Um die Entwicklung der Batterie-Technologie zu fördern und zu intensivieren, wurde auf seine Initiative im Jahr 2008 die Battery-university GmbH in Karlstein a.M. gegründet. Ziele sind die wissenschaftliche Analyse neuer Verfahren, die Produktentwicklung, die Erstellung von Gutachten ebenso wie die Bereitstellung unterschiedlichster Testgeräte und -verfahren für Batteriehersteller und -anwender.

Aufgabe der Batteryuniversity ist es zudem, Entwickler und Anwender von Batterien mit umfangreichen Fachinformationen sowie individuellen Dienstleistungen in ihrer täglichen Arbeit zu unterstützen. Weitere Schwerpunkte sind sowohl die Durchführung von genormten Akkumulatorprüfverfahren, die speziellen Zulassungen von Lithiumbatteriegeräten im eigenen Labor als auch die Durchführung von Schulungen.

Die BMZ Group hat sich unter der Leitung von SVEN BAUER seit dem Gründungsjahr 1994 weltweit zu einem der führenden Systemlieferanten der Akkumulatorbranche entwickelt. Das Unternehmen vertreibt Batteriesysteme mit Gehäuse, Ladetechnik, Kommunikation im «Just-in-time»-Betrieb sowie mit Garantie und den gewünschten Zulassungen.

SVEN BAUER hat die in der Branche bereits seit zehn Jahren etablierte Veranstaltungsreihe «Battery Experts Forum» ins Leben gerufen. Jährlich kommen nationale und internationale Top-Referenten der Branche zusammen und diskutieren über die neuesten Entwicklungen der Batterie-Technologie, Zellenchemie und Zellenproduktion. SVEN BAUER ist Mitglied des KLIB – dem Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterie sowie Wirtschaftssenator des Bundesverbandes der Mittelständischen Wirtschaft (BVMW).

Das vollständige Quellenverzeichnis finden Sie unter:

www.vbm-fachbuch.de/akkuwelt

ISBN 978-3-8343-3409-1

E-Book ISBN 978-3-8343-6223-0

1. Auflage. 2017

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2017 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Die Welt der Batterien, Akkumulatoren und Energiespeicher ist von einer hohen Innovationsdynamik geprägt. Was heute stimmt und als Maß aller Dinge wahrgenommen wird, kann bereits morgen überholt sein. Während eine Handybatterie vor 20 Jahren noch die Größe eines Koffers hatte, lässt sich diese heute bequem in einer Streichholzschachtel unterbringen – bei gleichzeitig höherer Leistungsbereitstellung und niedrigerem Pflegeaufwand. Aufgrund des stetigen technologischen Wandels wird das Wissen über Batterien oft nur rudimentär vermittelt, da die Lehrinhalte in ein bis zwei Jahren schon wieder überholt oder ergänzungsbedürftig sein können.

Dieses Buch liefert Basiswissen zur Batterie-Technologie: Es gibt Ihnen einen Überblick über die Entwicklung, den Bau und die Anwendung von Batterien. Dies gilt insbesondere für die Lithium-Ionen-Technologie.

Das Fachbuch ist ein Nachschlagewerk für Themenbereiche wie Chemie, Konstruktion, Elektronik, Ladetechnik oder Entsorgung. Es gibt einen Einblick in potenzielle und zukünftige Entwicklungstendenzen.

Allen Leserinnen und Lesern wünsche ich viel Spaß.

Karlstein, März 2017

SVEN BAUER

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	11
1.1 Zum Inhalt	12
1.2 Die Zielgruppe für dieses Buch	12
2 Auswahlkriterien für die optimale Batterie-Technologie	13
2.1 Elektrische Eigenschaften	14
2.2 Konstruktive Vorgaben	16
2.3 Umweltbezogene Anforderungen	17
2.4 Wirtschaftlichkeit	18
2.5 Übersicht über die Auswahlkriterien	20
3 Weltmarkt für Energiespeicher-Technologien	23
3.1 Marktanteile der Batterie-Technologien	23
3.2 Rohmaterial: Verfügbarkeit und Lieferanten	28
3.3 Preisbestandteile und Preisentwicklung der Lithium-Akkumulatoren	31
3.4 Hauptanwendungen	33
4 Entwicklungsschritte in der Batterie-Technologie	41
4.1 Bleibatterie-Technologie	41
4.2 Nickel-Cadmium-Batterien	42
4.3 Nickel-Metallhydrid-Batterien	42
4.4 Lithium-Ionen-Akkumulator	43
4.5 Gegenüberstellung der einzelnen Batterie-Technologien	44
5 Aktuelle Herausforderungen in der Batterie-Technologie	47
5.1 Kapazität	48
5.2 Strombelastung	49
5.3 Lebenszeit, Alterungsprozess	49
5.4 Temperaturbereiche	52
5.5 Ausreichende Verfügbarkeit von Rohstoffen bei der Batterieherstellung	53
6 Funktionsprinzip und wichtige Parameter von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	55
6.1 Bauweisen und Komponenten einer Lithium-Zelle	55
6.1.1 Bauformen	55
6.1.1.1 Zylindrische Zellen	55
6.1.1.2 Prismatische Zellen	56
6.1.1.3 Pouch-Zellen	57
6.1.2 Arten der Bauform	57
6.1.3 Sicherheitsmechanismen	59
6.1.4 Aufbau von Anode, Kathode und Separator	60
6.2 Funktionsprinzip Laden / Entladen	68
6.3 Sicherheitskomponenten	72

6.3.1	Elektrische Sicherheit	77
6.3.2	Funktionale Sicherheit	80
7	Übersicht über wichtige Batterieformen und Batterie-Technologien	83
7.1	Batterien auf Lithium-Ionen-Basis	83
7.1.1	Lithium-Ionen-Cobalt-Akkumulatoren	84
7.1.2	Lithium-Ionen-Nickel-Mangan-Cobalt-Akkumulatoren	84
7.1.3	Lithium-Ionen-Nickel-Cobalt-Aluminium-Akkumulatoren	84
7.1.4	Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulatoren	85
7.1.5	Lithium-Titanat-Akkumulatoren	85
7.1.6	Lithium-Polymer-Akkumulatoren	85
7.1.7	Lithium-Schwefel-Akkumulatoren	86
7.1.8	Lithium-Luft-Akkumulatoren	86
7.2	Batteriepacks – von der Zelle zum Batteriesystem	86
7.2.1	Serielle und parallele Verschaltung	86
7.2.2	Integration des Batterie-Management-Systems	86
7.2.3	Konstruktive Maßnahmen	87
7.2.4	Normen und Gesetze bei der Auslegung der Konstruktion	93
8	Batterie-Management von Lithium-Ionen-Batterien	95
8.1	Aufgaben des Batterie-Management-Systems	95
8.1.1	Schutzfunktion eines Batterie-Management-Systems	97
8.1.2	Balancing-Funktion eines Batterie-Management-Systems	99
8.1.3	Gas Gauging eines Batterie-Management-Systems	102
8.1.4	Kommunikation eines Batterie-Management-Systems	103
8.2	Analyse des Batteriezustandes (State of Health)	104
8.2.1	Verfügbare Batteriekapazität (State of Charge)	104
8.2.2	Feststellung des aktuellen Ladezustandes und der Temperatur ...	105
8.2.3	Festlegung des Batteriezustandes	105
8.3	Lade- und Entladeregelungen	106
8.3.1	Ladeprinzipien	107
8.3.2	Beeinflussung der Lebenszeit durch End of Charge und Depth of Discharge	108
8.4	Temperaturmanagement beim Laden	110
8.5	Maßnahmen zur elektromagnetischen Abschirmung	110
8.6	Kommunikationsschnittstelle zum Ladegerät und zur Applikation	111
9	Anwendungsgebiete von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	113
9.1	Akkumulatoren für die Elektromobilität (Light Electrical Vehicle, Electrical Vehicle, Heavy Electrical Vehicle)	113
9.1.1	Elektrorad, E-Bike	113
9.1.2	Automotive-Technik	116
9.1.3	Sonstige Anwendungen	116
9.2	Akkumulatoren für die Consumer Electronic	117
9.3	Großbatterien zur stationären Speicherung mit Netzstabilisierung	117
9.3.1	Das Zukunftspotenzial von Energy-Storage-Systemen (ESS) im Hausnetz	117

9.3.2	Wesentliche Aspekte eines ESS am Beispiel von Photovoltaikanlagen	118
9.3.3	Auswahlaspekte des Energiespeichers	119
9.3.4	Wesentliche Sicherheitselemente eines ESS	120
9.3.5	Gesetzliche und normative Anforderungen für Lithium-basierte Energiespeicher	122
9.3.6	Charakteristische Unterscheidungsmerkmale von ESS im Vergleich zu anderen Akkumulatoren	124
9.3.7	Servicekonzepte bei ESS	124
9.3.8	Kostenanalyse eines ESS	124
9.3.9	Betrachtung der Lebensdauer eines ESS	125
9.3.10	Förderprogramm KfW-Programm «Erneuerbare Energien Speicher 275»	125
9.3.11	Energiespeicher-Systeme	126
9.4	Industrielle Anwendungen wie Power Tool, Garden Tool	130
10	Gefahrenumgang mit Lithium-Ionen-Akkumulatoren	133
10.1	Lagerung	133
10.2	Handhabung	136
10.3	Brandschutzmaßnahmen	137
10.4	Gefahrgutrecht, Schulungen der Mitarbeiter, Sicherheitsbeauftragter	139
10.5	Transportrichtlinien	141
10.5.1	Straßenverkehr	142
10.5.2	Luftverkehr	150
10.5.3	Eisenbahn- und Seeverkehr	154
10.5.4	Binnenschiffsverkehr	159
10.6	Gefahrgutbeauftragter	160
11	Prüfung und Wartung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren	161
11.1	Prüfmethoden	161
11.2	Prüfgeräte, Anforderungen an ein Akkumulatorlabor	163
12	Normen und Gesetze	167
12.1	UN 38.3	167
12.2	Weltweite Zulassungsnormen für Akkumulatoren	172
12.2.1	Europa: Europäische Normen und Vorgaben	174
12.2.2	Vereinigte Staaten von Amerika: Underwriters Laboratories 1642 und 2054	176
12.2.3	Japan: Product Safety Electrical Appliance and Material Safety Law	177
12.3	Normen für Ladegeräte und Gehäuseschutzklassen	177
12.4	Entsorgungssysteme und -vorschriften	178
12.5	Beschriftung, Kennzeichnung	180
13	Forschung für die Akkumulatoren der Zukunft	183
13.1	Materialforschung für Kathode / Anode	183
13.2	Materialforschung Elektrolyte	187

13.3 Bestrebungen zur Automatisierung von Fertigungs-Technologien	187
13.3.1 Automatisierungsvorzüge beim Anwendungsfeld Lithium-Ionen- Akkumulator	189
13.3.2 Modulare teil- bzw. vollautomatisierte Fertigungslinie	191
13.4 Forschung für neue Anwendungsgebiete	191
13.5 Forschung für mehr Recycling	193
13.6 Forschung für die Realisierung von Kostensenkungspotenzialen und eine längere Lebensdauer	195
13.7 Second Life	196
Anhang: Betriebsanweisung gemäß § 14 GefStoffV	199
Verwendete Formelzeichen und Einheiten	205
Literaturverzeichnis	207
Abkürzungen	215
Glossar	217
Stichwortverzeichnis	221

1 Einleitung

«Lithium-Ionen-Akkumulatoren:
ein Herzstück der Elektromobilität und der Speicher-Technologien,
aber auch Energiespeicher der Zukunft?»

(Sven Bauer, Geschäftsführer BMZ)



Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind gegenwärtig das «A und O» in der Speicher-Technologie. Mehr als fünf Milliarden elektrische Energiespeicherzellen werden gegenwärtig pro Jahr weltweit verkauft. Ohne diese Speicher, die in Laptops, Handys oder Elektroautos Verwendung finden, ist unsere moderne mobile Welt nicht mehr denkbar. Dabei hält der Entwicklungstrend ungebrochen an. Obwohl diese Batterie-Technologie bereits als herausragende Innovation auf dem Gebiet gilt, sind noch weitreichendere Entwicklungen denkbar und möglich.

Die Vormachtstellung des Lithium-Akkumulators ist zum einen dadurch bedingt, dass dieser heute pro Gewichtseinheit dreimal mehr Energie speichert als vor 25 Jahren und gleichzeitig zehnmal weniger kostet. Dadurch drängt sich die Fragestellung auf: Wohin geht der Trend und was ist technisch machbar?

Innerhalb der Lithium-Akkumulatoren-Technologie gibt es fast alle sechs Monate einen Kapazitäts- und etwa einmal im Jahr einen spürbaren Technologiesprung. Allerdings ist zu erwarten, dass die Energiedichte in Zukunft nicht mehr so stark ansteigen wird wie bisher. Ein Elektroauto wird folglich im Hinblick auf die Reichweite und im direkten Vergleich mit einem adäquaten Fahrzeug mit konventionellem Benzinmotor noch einige Zeit kaum konkurrieren können.

Bei der Umsetzung des technischen Fortschrittes in der Lithium-Akkumulatoren-Technologie ist daher ein Umdenken hinsichtlich des realen Bedarfs notwendig. Die durchschnittliche Strecke, die eine Person pro Fahrt mit einem Kraftfahrzeug zurücklegt, beläuft sich auf 34 km. Eine maximale Reichweite von 500 km für Elektrofahrzeuge ist zwar möglich und erstrebenswert, erscheint aber für Elektroautomobile aufgrund der durchschnittlich zurückgelegten Fahrstrecke in den meisten Fällen nicht zwingend erforderlich zu sein. Bei der technischen Umsetzung kommt es nicht primär auf die Reichweite, sondern auch auf die Anzahl der Ladezyklen, auf die energieeffiziente Ladetechnik und eine möglichst wartungsfreie Anwendung an. Lithium-Akkumulatoren sind daher prädestiniert für die Elektromobilität, auch wenn nicht alle denkbaren Anwendungen beim derzeitigen Technologiestand und unter wirtschaftlichen sowie technischen Gesichtspunkten abgedeckt werden können.

Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass sich in den nächsten Jahren zahlreiche neue Märkte entwickeln werden, auf denen die Lithium-Akkumulatoren-Technologie erfolgreich sein kann. Das Potenzial ist daher erheblich.

Neben der Elektromobilität gilt die energieeffiziente Nutzung multikompatibler Speicher als weitere innovative Zukunfts-Technologie. Diese Energiespeicher erlauben es, durch die Erschließung regenerativer Energiequellen wie Photovoltaik oder Windkraft einen energieautarken Lebensstil bei gleichem Lebensstandard zu führen.

Die Lithium-Akkumulatoren-Technologie ist der Schlüssel zu all dem und somit das Herzstück der Speicher-Technologien. Betrachtet man rückblickend die letzten zehn Jahre, so kann ein grundlegender Wandel festgestellt werden, den viele Unternehmen bis heute nicht vollständig zur Realisierung ihres wirtschaftlichen Erfolgs nutzen.

1.1 Zum Inhalt

Dieses Buch stellt für den Leser das Basiswissen über Lithium-Akkumulatoren bereitstellen. Die Lithium-Akkumulatoren-Technologie wird im Vergleich zu anderen Batterie-Technologien vorgestellt.

Woran muss bei der Konstruktion oder bei der Auswahl einer Zellen-Technologie gedacht werden? Welche Vor- und Nachteile hat das für den Nutzer? Welche Technologie ist für welche Anwendungsform die beste? Dies sind Fragen, die im vorliegenden Buch beantwortet werden.

Das Buch zeigt auf, warum ein richtiger und sorgsamer Umgang mit einer Energiespeicher-Technologie einen entscheidenden Einfluss auf die Sicherheit und die Lebensdauer der Akkumulatoren hat.

1.2 Die Zielgruppe für dieses Buch

Das Buch vermittelt sowohl Neueinsteigern als auch langjährigen Praktikern einen Überblick über die derzeit vorhandenen Möglichkeiten der Lithium-Akkumulatoren-Technologie.

Das Buch richtet sich an Einsteiger in die Speicher-Technologie, d.h. Firmen und im Speziellen Entwickler, Projektleiter, genauso wie an Einkäufer und Anwender, die sich mit dem Thema auseinandersetzen.

2 Auswahlkriterien für die optimale Batterie-Technologie

«Eine Batterie lässt sich mit dem Lebewesen Mensch in vielen Bereichen vergleichen. Die Kapazität einer Batterie sinkt stetig ab der Herstellung, wie auch der Mensch auf natürlichem Wege altert. Arbeitet man immer zu viel, reduziert sich die prognostizierte Lebenserwartung des Menschen, ebenso wie eine häufig in Gebrauch befindliche Batterie schneller ausgetauscht werden muss. Zu hohe Temperaturen verträgt der Mensch nicht, wie auch Wärme die Anzahl der Ladezyklen von Batterien reduziert. Isst der Mensch nicht, verhungert er; in der Batteriewelt lautet der Fachbegriff zu diesem Vorgang «Deep of discharge». Der Mensch und die Elektrochemie sind sich ähnlicher, als man folglich glauben mag.»
SVEN BAUER, 1994

Unter dem Begriff Lithium-Ionen-Akkumulatoren verbirgt sich eine vielschichtige Produktpalette, die je nach Hersteller, Bauart, Größe und Zusammensetzung unterschiedliche Ausprägungen in den primären Bedarfseigenschaften besitzt. Eine individuelle Auswahl der optimalen Batterie-Technologie ist folglich von den jeweiligen Erfordernissen abhängig. In der Regel sind die in Tabelle 2.1 genannten Auswahlkriterien von Bedeutung.

Tabelle 2.1 Wichtige Auswahlkriterien für die optimale Batterie-Technologie

Temperaturempfindlichkeit	Sicherheit	Energiedichte	Leistungsdichte
Beschaffungskosten	Zyklenzahl	Lebensdauer	Aufladezeit

Hinsichtlich der Auswahl ergibt sich ein Spannungsfeld zwischen wirtschaftlichen Interessen und technischen Anforderungen. Bild 2.1 zeigt die wichtigsten Auswahlkriterien hinsichtlich der gängigsten Lithium-Akkumulatoren wie Lithium-Eisenphosphat-Batterie (LFP), Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Batterie (NMC), Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminiumdioxid-Batterie (NCA) und Lithium-Mangan-Oxid-Spinell-Batterie (LMS) auf:

Die Abbildung verdeutlicht, dass beispielsweise bei einer hohen Priorisierung des Faktors Sicherheit die Lithium-Eisenphosphat-Zellen den Vorzug erhalten müssten, wobei dafür im Bereich Energiedichte Abstriche hinzunehmen wären. Jede Technologie besitzt je nach Anwendung ihre Daseinsberechtigung.

Die angestrebten Parameter sind vom Endprodukt und dessen Bedarf abhängig. Betrachtet man allgemein den derzeitigen Markt für Elektromobilität und im Speziellen für Elektroautos sowie die prognostizierte Parameterentwicklung für Batterien, so lässt sich bis zum Jahr 2020 die in Bild 2.2 gezeigte Entwicklung absehen.

Bild 2.2 vermittelt einen Einblick in die zeitlichen Aspekte der Parameter. Mit dem technischen Fortschritt geht auch ein sich wandelnder und gesteigerter Anspruch an die Lithium-Akkumulatoren-Technologie einher.

Aufgrund dessen erscheint es sinnvoll, die verschiedenen Auswahlkriterien genauer zu betrachten, um den Selektionsprozess darzulegen. Dafür werden zunächst die elektrischen Eigenschaften betrachtet.

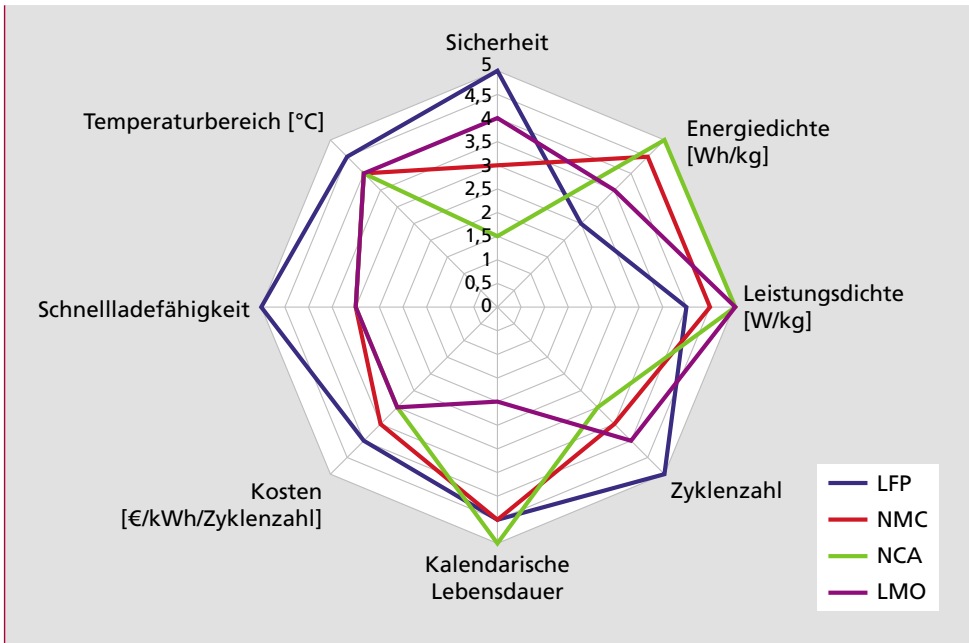


Bild 2.1 Wichtige Auswahlkriterien für die optimale Batterie-Technologie

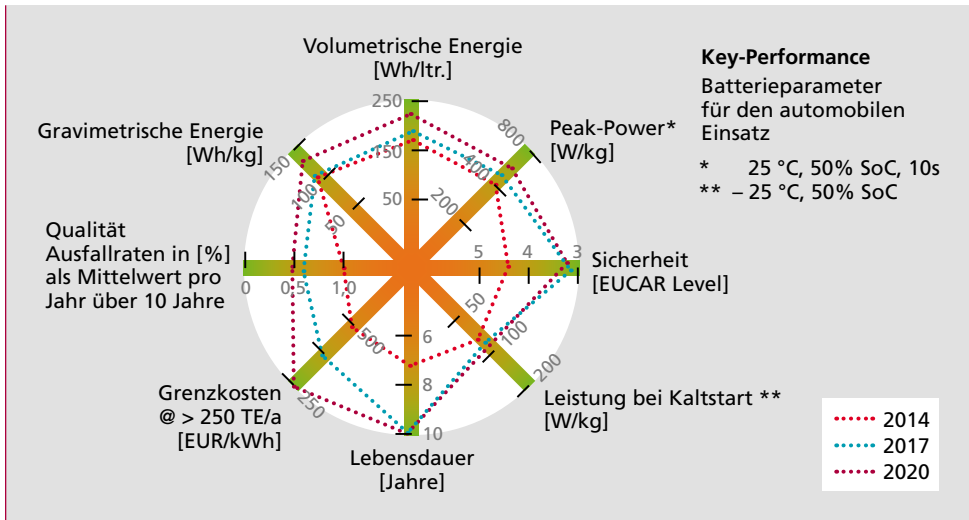


Bild 2.2 Prognostizierte Parameterentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien bezüglich der Elektromobilität

2.1 Elektrische Eigenschaften

Eine Lithium-Ionen-Batterie stellt einen auf elektrochemischer Basis arbeitenden Stromspeicher dar. Eine detaillierte Analyse der elektrischen Eigenschaften verdeutlicht die wesentlichen Aspekte:

Tabelle 2.2 Elektrische Eigenschaften der Lithium-Ionen-Technologie

Elektrische Eigenschaft	Erläuterung	
Energiedichte	Die Energiedichte wird definiert als Energiegehalt pro Gewichtseinheit.	Eine hohe Energiedichte bezüglich Volumen und Gewicht bedeutet eine hohe bzw. ggf. lange Leistungsbereitstellung des Lithium-Akkumulators.
Zyklusfestigkeit	Ein Zyklus stellt in diesem Zusammenhang eine regelmäßige, in sich geschlossene Folge von Entlade- und Ladevorgängen dar. Der Begriff Zyklusfestigkeit umschreibt die Stabilität der entnehmbaren Kapazität bei Zyklisierung.	Lithium-Akkumulatoren mit einer hohen Zyklusfestigkeit, besonders auch im Teilladezustand, zeichnen sich durch eine hohe Lebensdauer aus.
Hochstromfähigkeit	Unter Hochstromfähigkeit versteht man eine hohe Stromtragfähigkeit bei außergewöhnlich hoher Energieleitfähigkeit.	Eine große Hochstromfähigkeit, besonders bei sehr niedrigen bzw. hohen Temperaturen, ist ein Kriterium für eine leistungsfähige Verfügbarekeit.
Entladespannung	Unter Entladespannung versteht man die Spannung während des Entladevorganges. Ihre Höhe hängt vom Belastungs- und Ladezustand ab.	Je höher die Entladespannung ist, desto leistungsfähiger bzw. einsatzvariabler ist der Akkumulator. Eine konstante Entladespannung gilt als wirtschaftlich vorteilhaft.
Wiederaufladezeit	Die Wiederaufladezeit umschreibt die Zeitspanne zur Herstellung der vollständigen Leistungsfähigkeit des Akkumulators.	Kurze Wiederaufladezeiten bedeuten eine hohe Verfügbarkeit der Lithium-Akkumulatoren und folglich eine höhere Wirtschaftlichkeit. Die Effektivität der Wiederaufladezeit ist in Kombination mit der einsetzbaren Ladetechnik zu sehen.
Selbstentladung	Selbstentladung ist ein chemischer Prozess, bei dem sich Batterien, ohne dass ein Verbrauchsstrom fließt, langsam entladen. Der Prozess der Selbstentladung ist temperaturabhängig. Je höher die Temperatur, desto stärker die Selbstentladung.	Eine geringe Selbstentladung bedeutet eine längere Verfügbarkeit der Lithium-Akkumulatoren, eine höhere Energieeffizienz, eine geringere Anzahl an Ladezyklen und somit eine bessere Wirtschaftlichkeit.

Grundsätze

Es ist zu beachten, dass bei nickelbasierenden Batterien Teilzyklen als kompletter Zyklus gezählt werden, da hier der Ladevorgang für die Alterung dominierend ist.

Einfache, nicht hochkomplexe, Ladetechniken gelten in der Regel als kostengünstig. So sind Lithium-Ionen-Akkumulatoren im Vergleich zu Nickel-Cadmium- bzw. Nickel-Metallhydrid-Batterien leichter wiederaufladbar.

Die Lithium-Technologie besitzt in der Regel eine geringe Selbstentladung bei weniger als 2 Prozent Selbstentladungen pro Jahr sowie eine geringere Wartung als Bleibatterien.

Betrachtet man die wesentlichen elektrischen Eigenschaften von Lithium-Akkumulatoren, so besitzt diese Technologie im Vergleich zu anderen Batterietypen mit ca. 250 Wh/kg die höchste Energiedichte, die höchste Leistungsdichte, die längste Zykluslebensdauer, den weitesten Temperatureinsatzbereich und die geringsten Selbstentladeraten mit 1 bis 2 Prozent pro Jahr. Sie gelten somit als leistungsfähigster Energieträger. Je nach Lithium-Ionen-Akkumulatortyp existieren verschiedene Ausprägungen der einzelnen Eigenschaften, die sich gegenseitig beeinflussen können, wie beispielsweise Hochstromfähigkeit und Kapazität.

Hinsichtlich der Selektion ist folglich eine Priorisierung der relevanten Aspekte vorzunehmen, da je nach Anforderung der Applikation die Anwendung der einen oder anderen Technologie innerhalb der Lithium-Ionen-Familie vorteilhafter erscheint.

2.2 Konstruktive Vorgaben

Neben den elektrischen Eigenschaften spielen auch konstruktive Vorgaben eine wesentliche Rolle bei der Auswahl des jeweils optimalen Lithium-Ionen-Akkumulatortyps. Die häufigsten konstruktiven Vorgaben werden in Tabelle 2.3 dargestellt.

Tabelle 2.3 Wichtige konstruktive Vorgaben hinsichtlich der Lithium-Ionen-Technologie

Konstruktive Vorgaben	Erläuterung
Wartungsaufwand	Um sowohl während der Lagerung als auch bei der Verwendung kostenoptimiert wirtschaften zu können, strebt man in der Regel einen minimalen Wartungsaufwand an. Besonders Lithium-Ionen-Akkumulatoren zeichnen sich durch ihren geringen Wartungsaufwand im Vergleich zu Blei- oder Nickel-Cadmium- bzw. Nickel-Metallhydrid-Batterien aus.
Verfügbarkeitskontrolle	Bauteile sollen immer einsatzbereit sein. Mithilfe der Messung der Selbstentladungsrate bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren wird es im Gegensatz zu anderen Batterietypen möglich, die Lebensdauer und somit die Verfügbarkeit einschätzen zu können.
Langlebigkeit	Die Lebensdauer eines Lithium-Ionen-Akkumulators ist mit der Wirtschaftlichkeit des Bauteils verknüpft. Hochwertige, robuste und langlebige Konstruktionen unterstützen somit die ökonomischen Ziele von Unternehmen, Organisationen und Institutionen. Dabei ist die Baukonstruktion als Ganzes zu betrachten, um beispielsweise die verwendeten Akkumulatoren von potenziellen Wärmequellen, wenn möglich, räumlich zu trennen. Auch die Planung von vibrations- und schockfesten Konstruktionen ist dabei einzubeziehen.
Kurzschluss-sicherheit	Die Unfall- oder Beschädigungsprävention stellt eine wesentliche Forderung bei der konstruktiven Planung dar. Kurzschluss-sicherheit gegen interne oder externe Umfeldfaktoren dient der Absicherung gegen Thermal Runaways und vermindert eine höhere Ausfallrate. Lithium-Ionen-Akkumulatoren benötigen hierzu eine Schutzbeschaltung. Aufgrund ihrer Niederohmigkeit (hoher Kurzschlussstrom) können Kurzschlüsse fatale Folgen haben. Des Weiteren schützen verschlossene Gehäuse gegen Schmutz und Nässe.
Konstruktion, Montage, Inbetriebnahme, Austausch	Einfache Montage, leichter Austausch und problemlose Inbetriebnahme vermindern die Unfall- und Beschädigungsgefahr der Lithium-Akkumulatoren. Aufgrund sich verändernder Anforderungen und somit einer erneuten Priorisierung der Batterieanforderungen sollte ein variables und flexibles Gehäusedesign zur Verwendung verschiedener Zellen angestrebt werden. Darüber hinaus ist die Verwendung von flammfesten Gehäusen anzustreben, um die Brand- und Unfallgefahr zu vermindern. Hinsichtlich der Entwicklung bzw. Konstruktion sind präventive Unfallvermeidungskonzepte wie eine Elektrolytfestlegung, die einen problemloseren Umgang mit Lithium-Ionen-Akkumulatoren ermöglichen, von Vorteil.
Zulassungskriterien	Die konstruktive Beachtung von spezifischen Zulassungskriterien kann sich auch auf die Wahl der optimalen Lithium-Ionen-Technologie auswirken. Unter gewissen Umständen muss aufgrund von gesetzlichen Vorgaben und Vorschriften auch eine andere Energiespeicher-Technologie verwendet werden. Die Zulassungskriterien umfassen in diesem Zusammenhang entsprechende Schulungen, Lagerungsvoraussetzungen oder Reparatur- und Handhabungsvorschriften. Die umweltbezogenen Auswahlkriterien werden im nachfolgenden Abschnitt detaillierter behandelt.

Definition

Unter **niederohmigen Bauteilen** versteht man solche mit geringem elektrischen Widerstand.

Mithilfe der Einhaltung von konstruktiven Vorgaben können einerseits die Wirtschaftlichkeitsfaktoren eines Lithium-Akkumulators optimiert und andererseits die Entscheidungsfindungsprozesse hinsichtlich der passenden Akkumulatorauswahl vereinfacht werden. In diese Selektion fließen wichtige umweltbezogene Anforderungen ein.

2.3 Umweltbezogene Anforderungen

Die Einhaltung umweltbezogener Anforderungen dient einerseits dem Umweltschutz, andererseits der Kostenprävention. Anhand verbindlicher Festlegungen zum Umweltschutz lassen sich unmittelbar die jeweiligen Kriterien für die Auswahl der passenden Lithium-Akkumulatoren-Technologie ableiten. Folgende Aspekte bedürfen daher einer spezifischen Betrachtung (Tabelle 2.4):

Tabelle 2.4 Umweltbezogene Anforderungen hinsichtlich der Lithium-Ionen-Technologie

Umweltbezogene Anforderung	Erläuterung
Emissionsschutz / Immissionsschutz	Hinsichtlich der Herstellung, Lagerung und Verwendung von Lithium-Akkumulatoren sind die Vorschriften und Gesetze des Emissions-/Immissionsschutzes nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) einzuhalten. Ziel dieses Gesetzes ist es, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen. Die Einhaltung der Rechtsvorschriften ist oft mit erheblichen Aufwendungen und Vorkehrungen verbunden.
Ressourcenverbrauch	Natürliche Ressourcen sind in der Regel endlicher Natur und bedürfen einer nachhaltigen Strategie hinsichtlich der Nutzung. So ist u.a. im Gesetz über die Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden vermerkt, dass eine direkt oder indirekt eintretende feststellbare und nachteilige Veränderung einer natürlichen Ressource wie Arten und natürliche Lebensräume, Gewässer und Boden oder die Beeinträchtigung der Funktion einer natürlichen Ressource zu vermeiden ist. Hinsichtlich der Herstellung und dem Recycling von Lithium-Ionen-Batterien sind die jeweiligen Rechtsvorschriften einzuhalten, wobei der Fokus auf umweltverträglichen Rohstoffen liegen sollte. Schwermetalle sollten nicht verwendet werden.
Energieverbrauch	Politische Bestrebungen in Deutschland sind immer mehr darauf ausgerichtet, die Energieeinsparung (siehe dazu das Energieeinsparungsgesetz – EnEG) bzw. die Nutzung von erneuerbaren Energien (Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien) zu unterstützen. Ziel dieser Gesetze ist es, insbesondere im Interesse des Klima- und Umweltschutzes, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen. Dabei sollen sowohl die volkswirtschaftlichen als auch die betriebswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung – auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte – vermindert werden sowie fossile Energieressourcen geschont werden. Der ökonomische Vorteil ergibt sich bei den Lithium-Akkumulatoren dadurch, dass ein geringer Energieverbrauch bei der Herstellung oder Wiederverwendung eintritt. Auch ein hoher energetischer Wirkungsgrad wie beim Laden oder bei der Entladung verbessert die Wirtschaftlichkeit. Zum direkten Vergleich: Nickel-Cadmium-Batterien verbrauchen 140 Prozent Ladeenergie, um 100 Prozent Speicherenergie zu erhalten. Die benötigte Ladeenergie für Lithium-Ionen-Akkumulatoren liegt bei nur 103 Prozent.

Die Berücksichtigung umweltbezogener Anforderungen zielt darauf ab, gesetzeskonform zu wirtschaften und die möglichst kurzfristige Erreichung ökonomischer Ziele durch die Nutzung von Einsparungspotenzialen anzustreben. Aus diesen Zielvorgaben leiten sich unterschiedliche operative Zielsetzungen ab:

- Elektrolytfestlegung – problemloses Handling (Betrieb / Unfall),
- flammfestes Gehäuse – unkritisch bei Feuer / Schwelbrand,
- hoher energetischer Wirkungsgrad – Ladung / Entladung,
- keine Emissionen schädlicher Stoffe bei Herstellung und Betrieb,
- Verwendung umweltverträglicher Rohstoffe,
- geringer Energieverbrauch bei Herstellung und Wiederverwendung.

Dabei gibt es korrelierende und konkurrierende Bereiche zwischen ökonomischen und ökologischen Zielsetzungen. Aufgrund dessen ist eine separate und umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung notwendig.

2.4 Wirtschaftlichkeit

Das Wirtschaftlichkeitsprinzip besagt, dass entweder ein bestimmter Erfolg mit dem geringstmöglichen Mitteleinsatz (Minimalprinzip) erreicht werden kann oder mit einem bestimmten Mitteleinsatz der größtmögliche Erfolg (Maximalprinzip) möglich ist. Basis für den ökonomischen Erfolg eines Unternehmens, einer Institution oder Organisation ist dabei die Wirtschaftlichkeitsberechnung. Für eine umfassende Aussage hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit eines Produktes müssen Investitionen, Produktionskosten sowie Preis und Nachfrage betrachtet und analysiert werden.

Hinsichtlich der Lithium-Akkumulatoren sind nicht nur die Anschaffungskosten, sondern auch Wartungskosten, Lagerkosten und Entsorgungskosten ein wesentliches Wirtschaftlichkeitskriterium:

■ Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten für Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind seit Jahren einem Abwärtstrend unterworfen. Experten prognostizieren Anschaffungskosten von unter 200 Euro pro Kilowattstunde (kWh) bis zum Jahr 2020. Noch im Jahr 2010 lag der Preis pro kWh bei 500 Euro, während dieser bis zum Jahr 2017 bei 200 Euro pro kWh gesunken ist. Gründe für diese positive Entwicklung liegen in der steigenden Nachfrage und in der derzeit bestehenden Überkapazität der Hersteller. Eine detaillierte Aufschlüsselung ist in Abschnitt 3.3 ersichtlich.

■ Wartungskosten

Die Lithium-Ionen-Technologie gilt in der Regel als wartungsfrei bzw. wartungsarm im Vergleich zu anderen Energiespeicher-Technologien wie z.B. offene Bleibatterien. Die Lebensdauer eines Akkumulators hängt dabei primär von der Verarbeitung, dem Gebrauch und der Betriebstemperatur ab. Wartungen dürfen aufgrund der hohen Energiedichte und eventuell hoher Spannungen, nur von speziell geschultem Fachpersonal durchgeführt werden.

■ Lagerkosten

Lithium-Akkumulatoren gehören zu einer Produktgruppe, deren Lagerkosten sowohl vom Batterietyp als auch von den Umweltbedingungen wie Lagertemperatur und Lagermenge abhängen. Hierbei sind unter anderem die gelagerte Menge, die Brandab-

schnitte und Meldeanlagen Kriterien, die mit der Feuerwehr, der Versicherung und dem Bauamt abzustimmen sind.

■ **Unterhaltskosten / Total Cost of Ownership (TCO)**

Der Begriff Unterhaltskosten umfasst alle Parameter, die den Lithium-Ionen-Akkumulator als Ganzes umschreiben. Ein Vergleich mit Blei-Säure-Batterien zeigt die Unterschiede zwischen beiden Batterietypen auf (Tabelle 2.5).

i Definition

Unter dem Begriff **Total Costs of Ownership (TCO)** versteht man die Summe aller anfallenden Kosten, beginnend mit den Anschaffungskosten über die Nutzungskosten wie Strombedarf, Wartungen bis hin zu den Aufwendungen für eine gesetzeskonforme bzw. fachgerechte Entsorgung. TCO stellen dabei einen wesentlichen Gestaltungsaspekt während der Phase der Produktentwicklung dar, der sich auf die Kaufentscheidung des Kunden auswirkt.

Tabelle 2.5 Parametervergleich zwischen Lithium-Ionen-Akkumulatoren und Blei-Säure-Batterien

Parameter	Blei-Säure-Batterie	Lithium-Ionen-Akkumulatoren	Erläuterung
Wirkungsgrad	82 Prozent	98 Prozent	Je besser der Wirkungsgrad, desto wirtschaftlicher die Baugruppe.
Maximale Entladetiefe	60 Prozent	100 Prozent	Je geringer die Entladetiefe, desto größer ist die Lebensdauer der Batterie.
Zykluslebensdauer	150...800	500...5000	Eine höhere Zykluslebensdauer bedeutet eine längere Leistungsbereitstellung.
Selbstentladung	hoch	gering	Eine geringe Selbstentladung vermindert die Kosten für den Wiederaufladeprozess

i Definitionen

Der Begriff «**Wirkungsgrad**» beschreibt das Verhältnis von aufgewandter zu nutzbarer Energie. Der Begriff «**Entladetiefe**», englisch: «depth of discharge» (DoD), stellt ein Maß für die Ladungsentnahme einer Batterie dar. Die Entladetiefe errechnet sich aus der entnommenen Ladung im Verhältnis zur Nennkapazität der Batterie, ausgedrückt in Prozent.

Mit dem Begriff «**Zykluslebensdauer**» wird die Zahl an Zyklen definiert, bis zu der die Batterie in der Lage ist, 80 Prozent ihrer Nennkapazität abzugeben.

Die Unterhaltskosten variieren je nach Verwendung, Lagerung oder benötigtem Wiederaufladeprozess inklusive anfallender Stromkosten. Unabhängig von der Kapazität gilt: Je hochstromfähiger eine Zelle ist, desto teurer ist sie.

Wenn man also nicht nur die Anschaffungskosten betrachtet, sondern auch weitere Aspekte in das Auswahlverfahren mit integriert, so ergibt sich eine nachhaltigere Selektion. Im direkten Vergleich erscheint dabei die Lithium-Akkumulatoren-Technologie als eine kostengünstigere Batterievariante.

■ **Entsorgungskosten**

Wegen der Materialien, die in Batterien enthalten sind, ist es wichtig, diese getrennt zu sammeln. So bestehen sie – je nach Batteriesystem – zu großen Teilen aus Wertstoffen wie Blei, Zink, Nickel, Eisen/Stahl, Aluminium, Lithium, Cadmium, Kupfer, Cobalt oder

Quecksilber. Die Demontage und Verwertung der Lithium-Ionen-Akkumulatoren stellt wegen des hochreaktiven Lithiums eine Herausforderung dar.

Aufgrund dessen müssen Altbatterien entsprechend der Vorgaben des Batteriegesetzes (BattG) und der Verordnung zur Durchführung des Batteriegesetzes (BattGDV) behandelt und einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Nach den gesetzlichen Vorgaben des BattG sind die Vertrieber aus Handel und Verkaufsstellen verpflichtet, Geräte-, Fahrzeug- und Industrie-Altbatterien an oder in unmittelbarer Nähe der Verkaufsstellen zurückzunehmen. Dabei ist die vorgeschriebene Rücknahmepflicht beschränkt auf eine übliche Menge Batterien, wie sie im Sortiment des Vertriebers geführt werden. Teilweise existieren auch kommunale Sammelstellen der Landkreise, der kreisfreien Städte und der Abfallzweckverbände, die Gerätebatterien in der Regel kostenfrei annehmen. Auch Fahrzeugbatterien sind den Vertriebern zur Entsorgung wieder zu übergeben. Ähnlich verhält es sich bei Industrie-Altbatterien aus Gewerbe, wirtschaftlichen Unternehmen oder öffentlichen Einrichtungen. Nach § 11 Abs. 4 BattG ist es dabei zulässig, abweichende Vereinbarungen zu treffen und beispielsweise eine Entsorgung über den Hersteller vorzunehmen. In der Regel sind damit die Entsorgungskosten für den Käufer gering. Hinsichtlich des Vertriebers ergeben sich jedoch oft kostenaufwendige Verpflichtungen.

2.5 Übersicht über die Auswahlkriterien

Lithium-Akkumulatoren stellen eine Produktgruppe dar, die je nach Hersteller und Zusammensetzung eine Vielzahl von Anwendungsoptionen ermöglicht. Bild 2.3 verdeutlicht die Relation zwischen den jeweiligen Auswahlkriterien, Wirtschaftlichkeitsmerkmalen und den elektrischen/konstruktiven Eigenschaften.

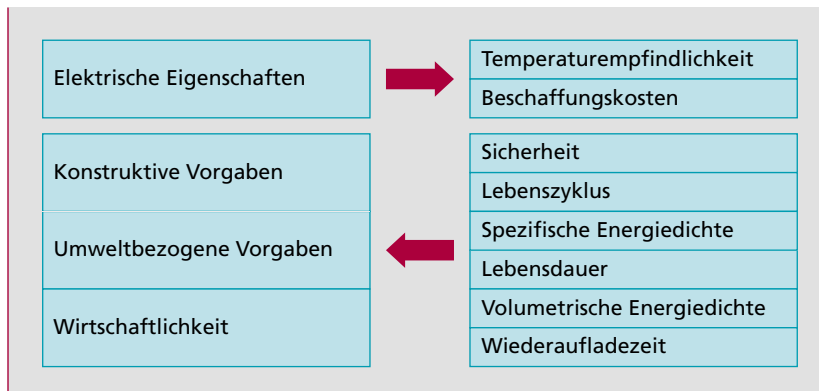


Bild 2.3 Vernetzung der Lithium-Ionen-Akku-Parameter mit den Auswahlkriterien

Die Auswahl der bevorzugten Parameter und die dazu notwendigen Anforderungen und Folgeeffekte sind deshalb von hoher Relevanz für den Einsatz verschiedener Batterietypen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass derzeit die Lithium-Technologie die optimale Leistungsdichte im Verhältnis zur Wirtschaftlichkeit aufweist (Bild 2.4). Darüber hinaus zeigt eine direkte Gegenüberstellung der verschiedenen Batteriearten weitere nennenswerte Unterschiede auf. Die Lithium-Ionen-Technologie besitzt dabei herausragende Eigenschaften in allen aufgeführten Bereichen.

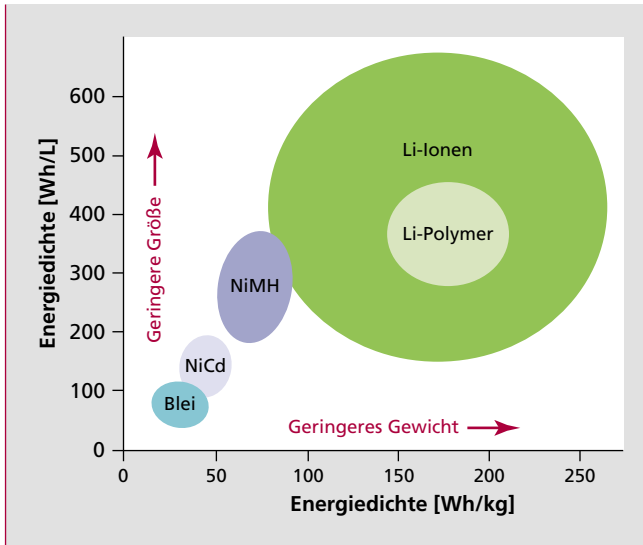


Bild 2.4 Vergleich typischer volumetrischer und gravimetrischer Energiedichten von verschiedenen Akkumulatoren-Technologien

Tabelle 2.6 Gegenüberstellung der verschiedenen Batteriearten

	Blei	NiCd	NiMH	Li-Ionen	LiPo
Nennspannung [V]	2,0	1,2	1,2	3,6/3,7	3,6/3,7
Vol. Energiedichte [Wh/L]	60–110	90–180	200–370	160–670	250–410
Grav. Energiedichte [Wh/kg]	20–40	30–60	60–100	80–250	150–215
Entladeleistung [C]	0,5–2	1–10	1–10	1–30	2–20
Monatl. Selbstentladung [Prozent]	5–10	10	15–25	< 1 Prozent	< 1 Prozent
Lebensdauer [Zyklen]	150–400	300–800	300–800	500–5000	~500

3 Weltmarkt für Energiespeicher-Technologien

Der Transport und die Speicherung von Energie stellen seit jeher ein zentrales Bedürfnis von Menschen dar. Früher waren es Speichermedien wie Holz oder Kohle zum Heizen oder Zubereiten von Lebensmitteln. Heute sind es Heizöl, Strom, Gas und seit einigen Jahren Speicher-Technologien in der Form von Batterien. Während Holz oder Kohle als Energiespeicher noch aus der eigenen Region bezogen werden konnten, müssen Heizöl oder Gas in der Regel aus entfernten Ländern importiert werden. Dies gilt insbesondere für die Komponenten der neuen Speicher-Technologien.

So erfordert die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien ein global umspannendes Netzwerk, um die dafür erforderlichen Rohstoffe zu beziehen und um die einzelnen Batterie-Bestandteile produzieren zu können. Auf die Rohstoffproblematik und die Preisentwicklung von Lithium-Akkumulatoren wird in den Abschnitten 3.2 und 3.3 besonders eingegangen. Zunächst werden die Marktanteile der verschiedenen Batterie-Technologien untersucht.

3.1 Marktanteile der Batterie-Technologien

Betrachtet man die weltweite Entwicklung, so stellt man fest, dass sich der Batteriemarkt seit Jahrzehnten in einem stetigen Wachstum befindet. Dies liegt nicht nur an der zunehmenden Nachfrage der Automobilindustrie, beispielsweise für Elektroautos wie xEV, sondern auch an der Vielzahl an elektrischen Geräten aus dem Konsumgüterbereich wie Handys, Computer, Tablets, *Power Tool/Garden Tool*, Notebooks, NBPC, die vermehrt auf leistungsfähige Energiespeicher-Technologien angewiesen sind. Eine Übersicht über die Marktanteile bei den Batterie-Technologien zeigt Bild 3.1.

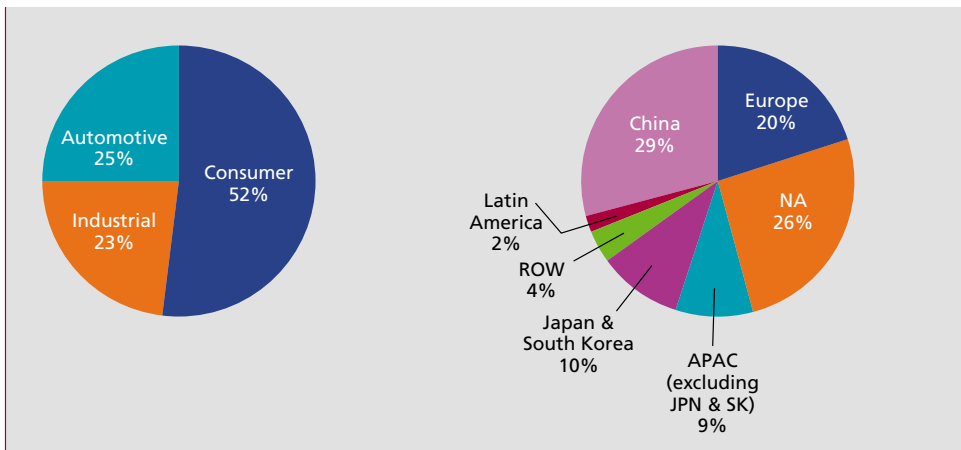


Bild 3.1 Marktanteile Batterie-Technologien [Quelle: Frost & Sullivan]

Eine differenziertere Analyse der Nachfrageentwicklung nach Batteriezellen zeigt, dass der Trend in Richtung Lithium-Akkumulatoren geht (Bilder 3.2 und 3.3).