

## 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*

<b>Temperaturrempfindlichkeit</b>	<b>Sicherheit</b>	<b>Energiedichte</b>	<b>Leistungsdichte</b>
<b>Beschaffungskosten</b>	<b>Zyklenzahl</b>	<b>Lebensdauer</b>	<b>Aufladezeit</b>

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.

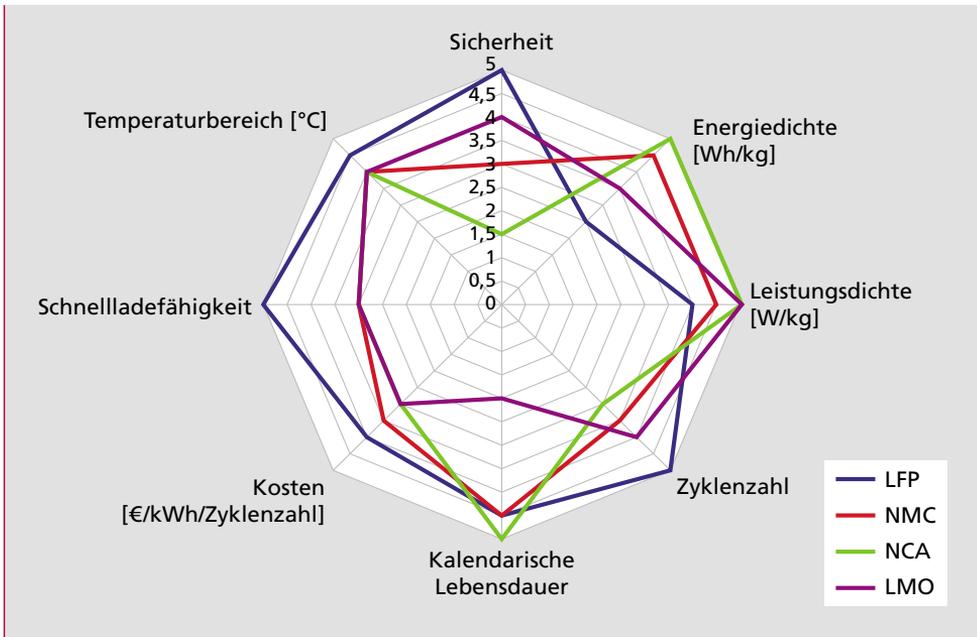


Bild 2.1 Wichtige Auswahlkriterien für die optimale Batterie-Technologie

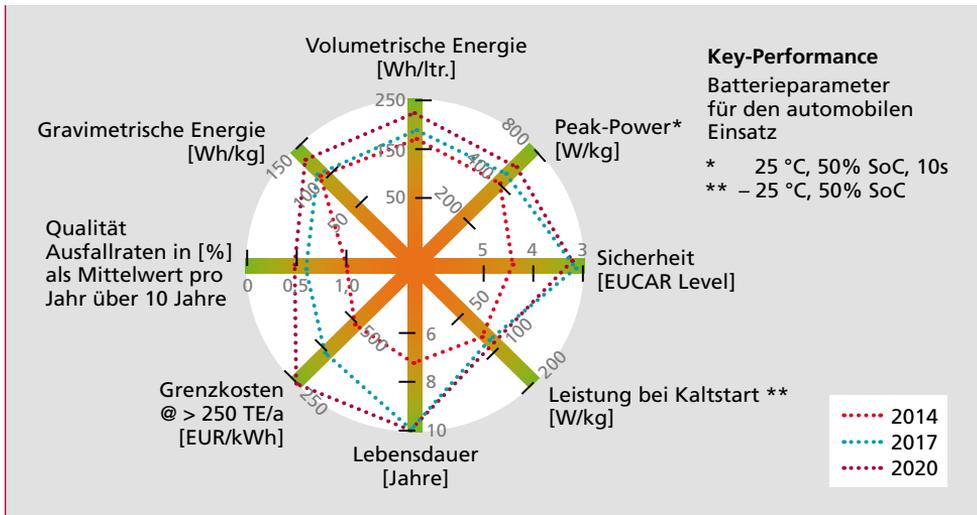


Bild 2.2 Prognostizierte Parameterentwicklung für Lithium-Ionen-Batterien bezüglich der Elektromobilität

## 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	
<b>Energiedichte</b>	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.
<b>Zyklusfestigkeit</b>	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.
<b>Hochstromfähigkeit</b>	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.
<b>Entladespannung</b>	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.
<b>Wiederaufladezeit</b>	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.
<b>Selbstentladung</b>	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
<b>Wartungsaufwand</b>	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.
<b>Verfügbarkeitskontrolle</b>	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.
<b>Langlebigkeit</b>	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.
<b>Kurzschluss-sicherheit</b>	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.
<b>Konstruktion, Montage, Inbetriebnahme, Austausch</b>	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.
<b>Zulassungskriterien</b>	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
<b>Emissionsschutz / Immissionsschutz</b>	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.
<b>Ressourcenverbrauch</b>	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.
<b>Energieverbrauch</b>	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
<b>Wirkungsgrad</b>	82 Prozent	98 Prozent	Je besser der Wirkungsgrad, desto wirtschaftlicher die Baugruppe.
<b>Maximale Entladetiefe</b>	60 Prozent	100 Prozent	Je geringer die Entladetiefe, desto größer ist die Lebensdauer der Batterie.
<b>Zykluslebensdauer</b>	150...800	500...5000	Eine höhere Zykluslebensdauer bedeutet eine längere Leistungsbereitstellung.
<b>Selbstentladung</b>	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.

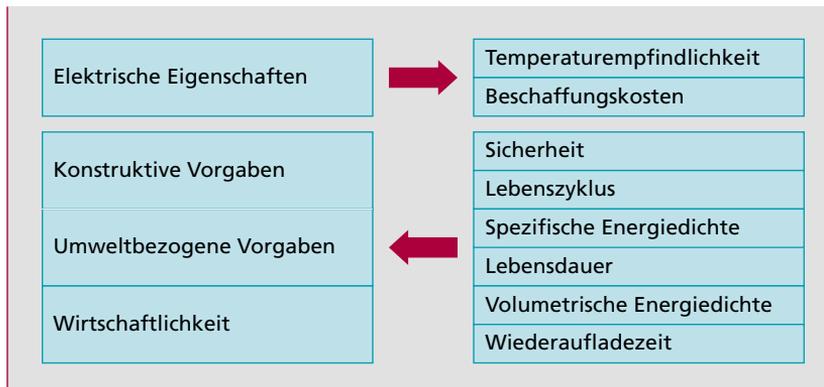


Bild 2.3 Vernetzung der Lithium-Ionen-Akku-Parameter mit den Auswahlkriterien

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.

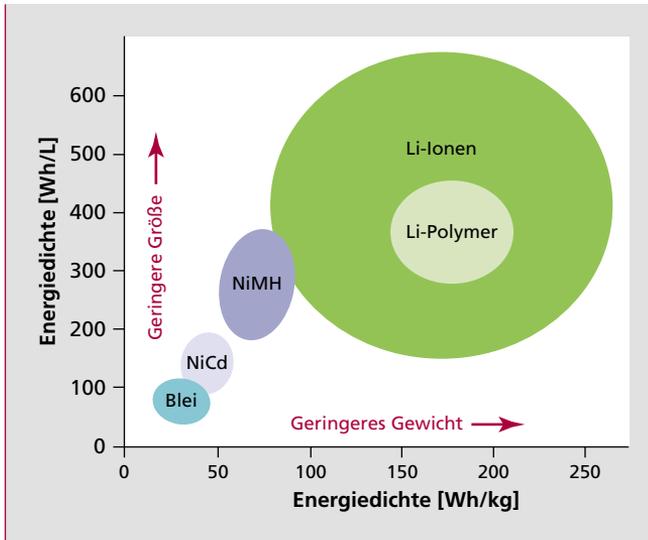


Bild 2.4 Vergleich typischer volumetrischer und gravimetrischer Energiedichten von verschiedenen Akkumulatoren-Technologien

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

