

2 Stand der Technik

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird der Stand der Technik bei Lithium-Ionen Zellen erläutert. Dazu gehören wichtige Begrifflichkeiten, die allgemeine Funktionsweise, die Entwicklung über andere Energiespeicher zu dieser Technologie, das Verhalten über die Lebensdauer und die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet. Im zweiten Abschnitt wird ein Überblick über aktuelle Hybrid- und Elektrofahrzeuge gegeben. Darüber hinaus befasst sich dieser Abschnitt allgemein mit der Fahrzeugdiagnose, bevor im Anschluss die Diagnosefähigkeit von aktuellen Fahrzeugen mit alternativen Antrieben hinsichtlich der verfügbaren batterierelevanten Daten untersucht wird. Abschließend werden Batteriemodelle, nach verschiedenen Kategorien gegliedert, dargestellt.

2.1 Lithium-Ionen Zellen

Zur Erläuterung der allgemeinen Funktionsweise von Lithium-Ionen Zellen werden die wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit Lithium-Ionen Zellen im Folgenden zusammengefasst [8]:

- Nennkapazität (englisch: nominal capacity) C_N in Amperestunden (Ah): Die vom Hersteller angegebene Kapazität wird als Nennkapazität bezeichnet. Diese wird mit einem genormten Messverfahren nach DIN EN 61960 ermittelt [9].
- Anfangskapazität (englisch: initial capacity) C_0 in Ah: Die Anfangskapazität entspricht der Kapazität nach der Zellfertigung. Abhängig von der Qualität der Produktion gibt es Abweichungen von der Nennkapazität von +/- sechs Prozent nach [10].
- Gemessene Kapazität (englisch: measured capacity) C_m in Ah: Die gemessene Kapazität ist die zu einem bestimmten Zeitpunkt nach Inbe-

triebnahme gemessene Kapazität nach dem Messverfahren zur Bestimmung der Nennkapazität.

- Ladungsbilanz (englisch: charge balance) Q_b in Ah: Die Ladungsbilanz entspricht dem effektiven Lade-/Entladestrom seit der letzten Vollladung.

$$Q_b = \int_t I_{HR} \cdot dt, \quad I_{HR} \text{ entspricht Hauptreaktionsstrom} \quad \text{Gl. 2.1}$$

- Entladetiefe (englisch: Depth-of-Discharge) DoD: Die Entladetiefe ist definiert als das Verhältnis von Ladungsbilanz zur Nennkapazität. Im vollgeladenen Zustand beträgt der DoD null. Bei Entnahme der Nennkapazität aus der Zelle beträgt der DoD eins.

$$DoD = \frac{Q_b}{C_N} \quad \text{Gl. 2.2}$$

- Ladezustand (englisch: State-of-Charge) SoC: Der Ladezustand beschreibt die noch verfügbare Kapazität unter Berücksichtigung der Ladungsbilanz im Verhältnis zur Nennkapazität. Der SoC einer vollständig geladenen Zelle beträgt 1 oder 100 %.

$$SoC = 1 - DoD = \frac{C_N - Q_b}{C_N} \quad \text{Gl. 2.3}$$

- Relativer Ladezustand (englisch: relative State-of-Charge) SoC_r: Der relative Ladezustand entspricht dem Ladezustand, mit dem Unterschied, dass er auf die gemessene Kapazität und nicht auf die Nennkapazität bezogen wird. Dadurch wird die Alterung berücksichtigt. Der relative SoC einer vollständig geladenen Zelle beträgt 1 oder 100 %.

$$SoC_r = \frac{C_m - Q_b}{C_m} \quad \text{Gl. 2.4}$$

- Gesundheitszustand (englisch: State-of-Health) SoH: Der SoH wird definiert als Verhältnis von gemessener Kapazität zur Nennkapazität. Zu Beginn liegt der SoH einer Zelle bei 1 oder 100 %. Mit zunehmender Anzahl an Zyklen nimmt dieser Wert ab. Bei automobilen Anwendungen werden die Zellen bis zu einem SoH von ca. 80 % eingesetzt.

$$SoH = \frac{C_m}{C_N} \quad \text{Gl. 2.5}$$

- C-Faktor, normierter Entladestrom: Zur besseren Vergleichbarkeit von Zellen unterschiedlicher Kapazität wird bei der Stromstärke zum Laden und Entladen häufig ein normierter Wert herangezogen, die sogenannte C-Rate. Diese beträgt eins, wenn die Stromstärke so gewählt wird, dass die Nennkapazität nach einer Stunde vollständig aus der Zelle entnommen wird. Bei einer Zelle mit einer Kapazität von 5,4 Ah entspricht die C-Rate von zehn einem Strom von 54 A.
- Lebensende (englisch: End-of-Life) EoL: Die Zellen werden bis zu einer definierten minimalen Kapazität betrieben. Dieser Wert definiert das Lebensende der Zelle und ist abhängig vom Anwendungsbereich.

2.1.1 Funktionsweise und Eigenschaften

Die Funktionsweise von Lithium-Ionen Zellen basiert auf dem wechselseitigen Ein- und Auslagern von Lithium-Ionen in den Elektroden. Die Lithium-Ionen wandern durch den Elektrolyten von einer Elektrode zur anderen. Die Elektronen fließen dabei über den äußeren Stromkreis zur anderen Elektrode. Der allgemeine Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Beim Ladevorgang ist die positive Elektrode die Lithiumquelle. Die Lithium-Ionen werden von der positiven Elektrode durch den Elektrolyten zur negativen Elektrode transportiert. Dort reagieren sie mit den Elektronen, die über den äußeren Strompfad fließen, und lagern sich im Wirtsgitter als Lithium-Atome ein. Dieser Vorgang wird als Interkalation bezeichnet.

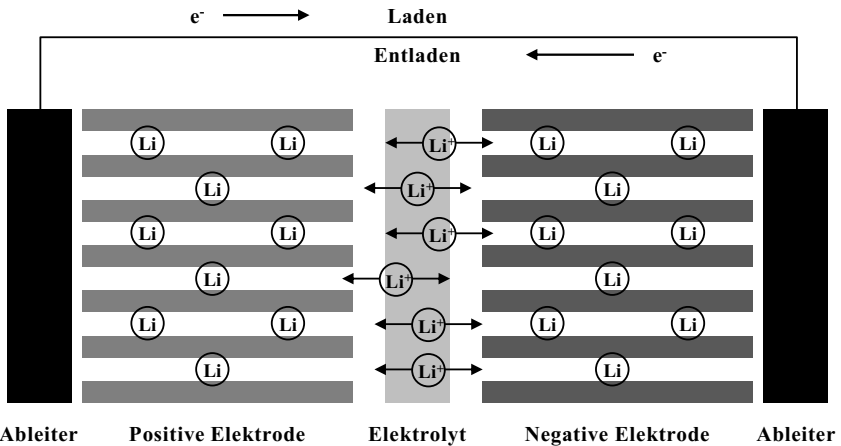


Abbildung 2.1: Allgemeiner Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle [8,11]

Beim Entladevorgang wandern die im Wirtsgitter eingelagerten Lithium-Atome nach Abgabe von Elektronen als Lithium-Ionen durch den Elektrolyten zur positiven Elektrode. Die Elektronen fließen über den äußeren Stromkreis zur positiven Elektrode. Dort neutralisieren sie die Lithium-Ionen und werden im Wirtsgitter des Aktivmaterials eingelagert. Die spezifische Ladung (in $Ah\ kg^{-1}$) bzw. die Ladungsdichte (in $Ah\ l^{-1}$) entspricht der Speicherkapazität des Aktivmaterials und hängt von der Anzahl der freigesetzten oder aufgenommenen Elektronen pro Masse- bzw. Volumeneinheit ab. Die im Idealfall erreichbaren Werte für die spezifische Energie (in $Wh\ kg^{-1}$) und die Energiedichte (in $Wh\ l^{-1}$), die den Energieinhalt einer Zelle wiedergibt, erreichen einen maximalen Wert, wenn bei der Elektrodenmaterialienauswahl zwei Stoffe mit großer spezifischer Ladung bzw. Ladungsdichte kombiniert werden und wenn die Zellspannung groß ist. Letzteres ist der Fall, wenn das Redoxpotential der elektrochemischen Reaktionen an beiden

Elektroden weit auseinander liegt. Für die spezifische Leistung (in W kg^{-1}), bzw. die Leistungsdichte, ist die Geschwindigkeit der Ein- und Auslagerungsprozesse von entscheidender Bedeutung. [12]

Beim Elektrodenmaterial kommen zurzeit viele verschiedene Materialien zum Einsatz. Als negative Elektrode wird üblicherweise Graphit als Aktivmaterial eingesetzt. Bei der Einlagerung von Lithium-Ionen tritt nur eine geringe Struktur- und Volumenänderung von ca. 10 % auf. Dies führt zu einer außerordentlichen Form- und Zyklenstabilität. Die theoretische Kapazität liegt bei 372 Ah/kg. Der Einsatz von Lithiumlegierungen wäre aufgrund ihrer sehr hohen Kapazität, die annähernd an metallisches Lithium (3860 Ah/kg) reicht, nicht zielführend, da sie unter erheblichen Volumenänderungen von 100 bis 300 % leiden, was zu einer geringen Zyklenbeständigkeit führt. Alternativen dazu sind beispielsweise amorpher Kohlenstoff, Titanat, Lithiumoxide und -legierungen. [12,13]

In Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 sind für gängige Anoden- und Kathodenmaterialien die spezifische Ladung und deren wichtigste Eigenschaften hinsichtlich Sicherheit, Stabilität und Preis zusammengefasst. So treten beim Anodenmaterial spezifische Ladungen zwischen 200 und 3990 Ah/kg auf. Die Materialien mit hohen spezifischen Ladungen haben Nachteile bezüglich Sicherheit, Stabilität oder den Kosten. Es gibt derzeit kein Anodenmaterial, das alle Anforderungen einer Zelle für den automobilen Einsatz umfassend erfüllt.

Tabelle 2.1: Charakterisierung von Anodenmaterialien [14]

Anodenmaterial	Kapazität in Ah/kg	Sicherheit	Stabilität	Preis
Lithium-Metall	3860	-	-	+
Amorpher Kohlenstoff	ca. 200	+	+	0
Graphit	372	+	+	+
Lithium-Legierungen	3990 (Si), 1000 (Sn)	0	-	++
Lithium-Oxide	1500	+	-	-
Lithium-Titanat	150	++	++	--

Beim Kathodenmaterial liegen die theoretischen Kapazitäten zwischen 120 und 170 Ah/kg. Wie bei den Anodenmaterialien gibt es kein Material, welches alle Anforderungen für einen Einsatz bezüglich der Sicherheit, der Zyklenstabilität, der Kaltstartfähigkeit, der Temperaturbeständigkeit, dem Preis und der Kapazität erfüllt. Die Materialauswahl für die Komponenten Anode und Kathode benötigt daher einen Kompromiss der Anforderungen unter Berücksichtigung der verschiedenen Redoxpotentiale der elektrochemischen Reaktionen an den beiden Elektroden.

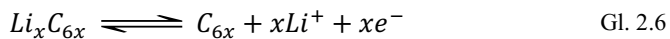
Tabelle 2.2: Charakterisierung von Kathodenmaterialien [14]

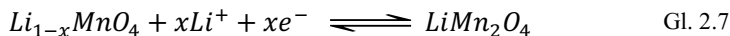
Kathodenmaterial	Kapazität in Ah/kg	Sicherheit	Zyklenstabilität	Kaltstart	Temperaturstabilität	Preis
LiCoO ₂	150	-	0	+	+	+
LiNiCoAlO ₂	170	+	+	0	+	++
LiMn ₂ O ₄	120	+	++	0	+	-
Li[Ni _x Co _x Mn _x]O ₂	130–160	+	++	-	+	0
LiFePO ₄	170	--	0	++	0	++

Das am häufigsten eingesetzte Material für die positive Elektrode ist Lithium-Kobaltdioxid (LCO). Alternative Materialien sind u. a. Manganoxid (LMO), Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC), Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA) und Eisenphosphat (LFP). Die Auswahl des Aktivmaterials der positiven Elektrode beeinflusst maßgeblich die Eigenschaften der Zelle. Detaillierte Beschreibungen der Vor- und Nachteile der dargestellten Materialien mit ihren Eigenschaften sind beispielsweise in [8,11] zu finden.

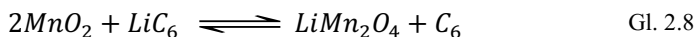
Die an den beiden Elektroden stattfindenden Reaktionen sind in den folgenden Gleichungen beispielhaft zusammengefasst.

Negative Elektrode aus Graphit



Positive Elektrode aus LiMn_2O_4 

Vereinfachte Gesamtgleichung (anschaulich für $x = 1$)



Neben den beiden Elektroden sind weitere Bestandteile der Zelle die Stromableiter, die Separatoren und der Elektrolyt. An der negativen Elektrode wird in der Regel Kupfer als Ableiter (auch Kollektor genannt) eingesetzt. An der positiven Elektrode besteht die dünne Metallfolie häufig aus Aluminium. Die beiden Elektroden werden durch den Separator elektrisch voneinander getrennt, sodass kein Kurzschluss entsteht. Der Separator, üblicherweise aus Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP), ist lediglich für Ionen durchlässig. Der Elektrolyt benetzt sowohl das Aktivmaterial als auch den Separator. Der Elektrolyt besteht aus einer Flüssigkomponente, einem Leitsalz und Zusätzen oder Additiven. Erstere ist eine Mischung aus Lösungsmitteln oder Solvens. Dabei wird häufig Ethylenkarbonat (EC), Dimethylkarbonat (DMC) und Diethylkarbonat (DEV) eingesetzt. Das Leitsalz ist für die ionische Leitfähigkeit des Elektrolyten verantwortlich und besteht vorwiegend aus Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6). Die Grenzflächen der beiden Elektroden zum Elektrolyten, vor allem die Grenzfläche an der negativen Elektrode, die sogenannte SEI-Schicht (englisch: solid electrolyte interface, deutsch: feste Elektrolyt-Grenzschicht), haben entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften einer Lithium-Ionen Zelle. Die SEI-Schicht bildet sich bei der ersten Inbetriebnahme der Zelle aus. Dieser Prozess kann nicht unterbunden werden. Die Eigenschaften der SEI-Schicht können über die Wahl des Solvens und die Zugabe von Additiven beeinflusst werden. Häufig wird beispielsweise Vinyliden Karbonat (VC) als flüssiges Additiv eingesetzt. Die SEI-Schicht spielt eine entscheidende Rolle für das Alterungsverhalten einer

Zelle. Sie sollte möglichst dünn sein und einen geringen Durchtrittswiderstand aufweisen, um eine gute Durchlässigkeit für die Lithium-Ionen zu gewährleisten. Weitere gewünschte Eigenschaften sind die Stabilität hinsichtlich Temperatur und Stromrate. [8]

Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die Größenverhältnisse der vorgestellten einzelnen Zelllagen und der Partikelgrößen der Aktivmaterialien.

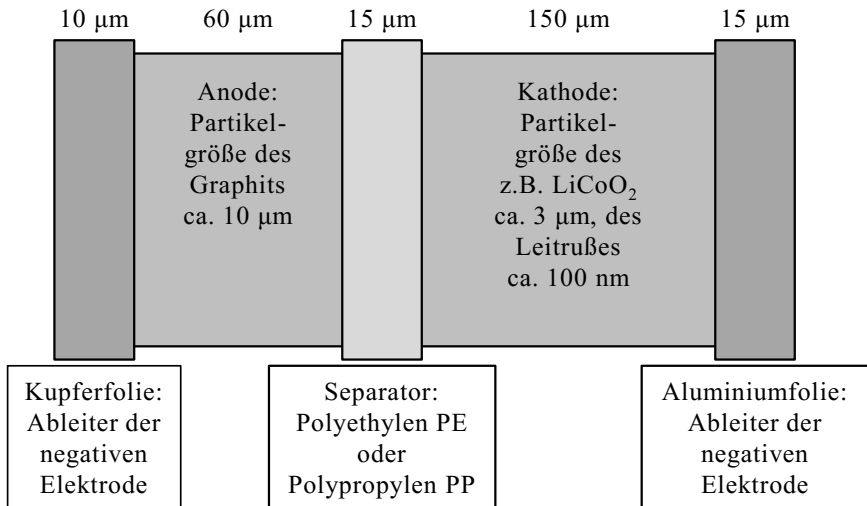


Abbildung 2.2: Größenverhältnisse in einer Zelle in Anlehnung an [8]

Für den Einsatz von Lithium-Ionen Zellen für automobiler Anwendungen müssen bestimmte Anforderungen erfüllt sein. Abhängig vom Einsatzgebiet werden in [11] Batteriegrößen zwischen 1 und 60 kWh und Leistung-zu-Energie-Verhältnisse von 2 bis zu 15 genannt. Die Batteriesysteme finden verschiedene Anwendungsfelder im Fahrzeug: von Start-Stopp-Systemen über Hybridfahrzeuge bis zu reinen Elektrofahrzeugen. In reinen Elektrofahrzeugen werden mindestens 50 kWh bei einem Verhältnis von Leistung zu Energie von 3 kW/kWh angestrebt [15]. Unterschieden wird bei aktuellen Lithium-Ionen Batterien zwischen Hochenergie- und Hochleistungszellen. Erstere erreichen Energiedichten von 150 bis 180 Wh/kg, letztere Werte von etwa 80 bis 100 Wh/kg [16]. Dabei weisen Hochenergiezellen in der Regel

hohe Speicherkapazitäten und durchschnittliche Entladeströme auf, während Hochleistungszellen bei geringeren Kapazitäten kurzzeitig sehr hohe Entladeströme zulassen [17]. Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich Hochenergiezellen vor allem für Hybridfahrzeuge und Hochleistungszellen für reine Elektrofahrzeuge [18].

Den Zusammenhang zwischen der Leistungs- und Energiedichte derzeitiger Energiespeicher-Technologien fasst das Ragone-Diagramm zusammen. Dieses ist in Abbildung 2.3 dargestellt und zeigt die Entwicklung hin zur Lithium-Ionen Technologie, da diese derzeit mit Abstand die höchsten Leistungs- und Energiedichten zuverlässig und sicher bereitstellen kann. Auf diesem zeitlichen Entwicklungsweg sind verschiedenste Technologien für den automobilen Einsatz in Erwägung gezogen worden bzw. kommen teilweise immer noch zum Einsatz. Diese werden im Anschluss mit ihren Eigenschaften kurz vorgestellt.

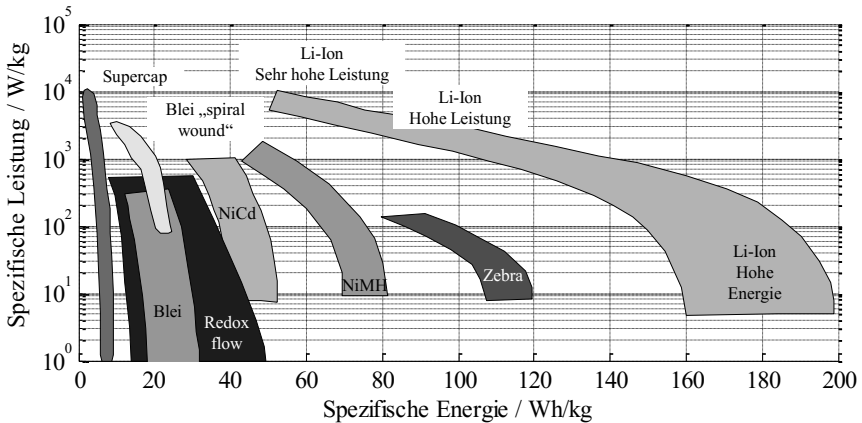


Abbildung 2.3: Ragone-Diagramm in Anlehnung [19]

Blei-Säure Batterien kommen im Automobil seit über 100 Jahren zum Einsatz. Die aus Bleioxid bestehende positive Elektrode, die negative Elektrode aus porösen Blei und der aus verdünnter Schwefelsäure bestehende Elektrolyt bilden ein Gesamtsystem, welches aufgrund der geringen Kosten und der hohen Eigensicherheit in beinahe allen Fahrzeugen als Starterbatterie einge-

setzt wird. Gegen einen Einsatz als Traktionsbatterie sprechen die geringe Leistungs- und Energiedichte, die kurze Lebensdauer und die begrenzte Ladeakzeptanz, obwohl die spiralförmig gewickelten Blei-Säure Batterien etwas höhere Leistungsdichten erreichen. Bereits bei den Olympischen Sommerspielen 1972 zeigten sich bei einem von BMW vorgestellten Elektrofahrzeug mit einer Blei-Säure Batterie die genannten Nachteile [20]. Die Nickel-Metallhydrid Batterien (NiMH) sind eine Weiterentwicklung der Nickel-Cadmium Batterien (NiCd), da das giftige Cadmium ersetzt werden sollte, und wurden beispielsweise im Toyota Prius der ersten Generation als Traktionsbatterie verbaut. Die Erfahrung mit dieser relativ sicheren und zuverlässigen Technologie zeigt, dass eine Lebensdauer von deutlich über acht Jahren erreicht werden kann. Jedoch verhindern die geringe Energiedichte, die hohe Temperaturabhängigkeit und der hohe Preis, im Vergleich zur Lithium-Ionen Technologie, eine flächendeckende Marktdurchdringung für Elektrofahrzeuge. Eine weitere Batterietechnologie mit guten Eigenschaften bezüglich der Energiedichte und der Lebensdauer ist die Natrium-Nickel-Chlorid Hochtemperaturbatterie (NaNiCl), genannt ZEBRA-Batterie. Im Gegensatz zu anderen Batterien ist diese bei etwa 300 °C zu betreiben und weist somit zusätzliche thermische Verluste auf. Aufgrund dieser Eigenschaften und bei weiter abnehmendem Preis der Lithium-Ionen Batterien wird erwartet, dass diese Technologie nicht zielführend ist. Die Redox-flow Batterie ist grundlegend anders aufgebaut. Sie besteht aus zwei Behältern mit Elektrolytflüssigkeiten und gelösten Ionen verschiedener Oxidationsstufen. Die Lade- und Entladevorgänge finden in einer zentralen Wandlereinheit statt. Die Möglichkeit, die Leistung und Energie unabhängig voneinander zu skalieren, sind die Vorteile dieser Batterie. Infolge der geringen Energiedichte ist diese Technologie, deren wichtigster Vertreter die Vanadium-Redox-flow Batterie ist, derzeit nicht für den automobilen Einsatz geeignet. Eine weitere Speichertechnologie sind die auf Kondensatoren basierenden elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren, die auch Supercaps genannt werden. Da keine elektrochemischen und nur wenige chemische Reaktionen stattfinden und das Elektrodenmaterial keinen strukturellen Änderungen der Gitterstruktur ausgesetzt wird, sind die Elektroden sehr stabil. Die hohe spezifische Leistung spiegelt die Fähigkeit der Supercaps wider, sehr schnell

sehr hohe Ströme liefern zu können. Nachteilig stehen dem die begrenzte Energiedichte und die hohen Kosten gegenüber. [19,21]

Aus obiger Übersicht über die verschiedenen Speichertechnologien wird deutlich, dass aufgrund der stetig gestiegenen und weiter ansteigenden Anforderungen an den Energiespeicher in Fahrzeugen bezüglich der spezifischen Dichten, aktuell die Lithium-Ionen Technologie diese Ansprüche bestmöglich erfüllen kann.

Die Eigenschaften der Zellen werden dabei nicht nur von den einzelnen Bestandteilen der Zelle beeinflusst, sondern auch vom Gehäuse. Die Bauform hat einen großen Einfluss auf die Leistungs- und Energiedichte, die maximalen Ströme und auf das Alterungsverhalten. Auf dem Markt sind derzeit drei verschiedene Gehäuseformen zu finden: zylindrisch, prismatisch und pouch. Die meistverbreitete Zelle ist die zylindrische Zelle 18650 (18 mm Durchmesser, 650 mm Länge). Das Gehäuse aus Edelstahlblech gewährleistet die mechanische Stabilität. Nachteile dieser Zellenform sind die schwierige Umsetzung einer Kühlung und das geringe Verhältnis des Volumens zur Oberfläche. Die prismatischen Zellen dagegen sind prädestiniert für eine effektive Kühlung über Kühlplatten. Das Gehäuse aus Aluminium führt zu einer höheren mechanischen Stabilität, und auch die Fertigung der Zellen ist schneller, und somit kostengünstiger zu realisieren. Bei den Pouch-Zellen besteht das Gehäuse in der Regel aus einem mit Aluminiumfolie beschichteten Kunststoff. Hohe Energiedichten und flache Bauformen können umgesetzt werden. Nachteile der Pouch-Zelle sind die geringere mechanische Stabilität und die Schwachstelle des Zellenanschlusses, da diese nur an das Gehäuse geklebt werden und so leicht Undichtigkeiten entstehen können. [22]

Für den automobilen Einsatz werden die Einzelzellen zu Modulen zusammengefasst und mit Sensoren zur Aufzeichnung von Strömen, Spannungen und Temperaturen ausgestattet. Die Überwachung der Module und Einzelzellen übernimmt das Batteriemanagementsystem (BMS). Das BMS ermittelt unter Berücksichtigung der Zelltemperaturen, des Ladezustands und des Gesundheitszustands die aktuell verfügbare Stromstärke, die vom Batteriesystem bereitgestellt werden kann. Dies ist aus mehreren Gründen erforder-

lich. Zum einen entspricht die verfügbare Kapazität nicht immer der Nennkapazität. Dies ist auf die Abhängigkeit des Innenwiderstands von der Temperatur zurückzuführen und hat zur Folge, dass bei niedrigen und hohen Temperaturen der Innenwiderstand ansteigt. Der Ladezustand einer Zelle hat ebenfalls Einfluss auf die Stromstärke, da die von einem Batteriehersteller spezifizierte untere Grenzspannung nicht unterschritten werden sollte. Der Gesundheitszustand einer Zelle muss bei der Berechnung der aktuell zulässigen Stromstärke berücksichtigt werden, da er direkten Einfluss auf den Innenwiderstand hat. Das BMS kann daher bei niedrigem Ladezustand oder ansteigendem Innenwiderstand den Strom begrenzen und hat somit direkten Einfluss auf die Fahrleistungen des Fahrzeugs. Der begrenzende Eingriff des BMS muss in der Betriebsstrategie des Fahrzeugs möglichst vermieden werden. Für Hybridfahrzeuge ist dies über den zweiten Antrieb abzufangen. Bei Elektrofahrzeugen kann dieser Zustand unter bestimmten Umständen systembedingt nicht vermieden werden. Eine weitere Aufgabe des BMS ist die Überwachung der Einzelzellspannungen. Wird eine Differenz zwischen den Einzelzellen detektiert, kann das BMS einen Zellausgleich (englisch: cell balancing) veranlassen. Dies ist erforderlich, da eine höhere bzw. niedrigere Spannung einer Einzelzelle das komplette Modul einschränken kann, wenn obere bzw. untere Grenzspannungen von einer Zelle früher erreicht werden. Bei den Balancing-Systemen wird grundsätzlich zwischen aktiven und passiven Systemen unterschieden. Die aktiven Balancing-Systeme werden prinzipiell in zwei Methoden unterteilt: der shuttling-Methode und der Einsatz von Energiewandlern. Bei der shuttling-Methode wird die Spannungsdifferenz zweier Zellen ausgeglichen, indem einer Zelle Energie entnommen und einer anderen Zelle zur Verfügung gestellt wird. Dabei werden Kondensatoren zum Zwischenspeichern der Energie eingesetzt. Bei der Methode mit Energiewandlern kommen Transformatoren und Spulen zum Einsatz. Bei beiden Methoden kann von einer Zelle bzw. einem Zellmodul einer anderen Zelle bzw. einem anderen Zellmodul Energie zugeführt werden. Zu den passiven Balancing-Methoden gehört die shunting-Methode. Dabei wird von Zellen mit höheren Spannungen Energie entnommen bis sie das gleiche Spannungsniveau der anderen Zellen erreichen. In der Regel werden dazu Widerstände eingesetzt. Beim Vergleich der aktiven und passiven Methode haben die passiven Systeme Vorteile bei den Kosten, jedoch

wird die überschüssige Energie lediglich in Wärme umgewandelt. Bei den aktiven Systemen werden diese Verluste verringert. Jedoch liegen die Kosten deutlich höher als bei den passiven Systemen. [23,24]

Die Batteriepreise für Pkw liegen laut [25] aktuell zwischen 360 und 440 €/kWh und werden bis 2020 auf einen Bereich zwischen 252 und 308 €/kWh sinken. Diese Werte stimmen mit den Zielen der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) überein. In [26] wird ein Batteriepreis im Jahr 2020 von 240 €/kWh und von 200 €/kWh im Jahr 2025 angestrebt. Die Entwicklung der Preise bis 2020 in den beiden genannten Veröffentlichungen aus den Jahren 2014 und 2015 haben die gleiche Größenordnung wie in einer Studie von Schlick et al. aus dem Jahr 2012, in der für 2020 mit einem Batteriepreis von 220 €/kWh gerechnet wird [27]. General Motors dagegen spricht bereits für das Jahr 2016 von Preisen um 135 €/kWh und für 2020 von Preisen unter 100 €/kWh [28]. Eine Zusammenstellung der aktuellen Batteriekosten ist in der Strukturstudie der e-mobil BW GmbH [29] zu finden.

Bei den dargestellten Kosten wird die Zelle als Ganzes betrachtet. In [30] werden die Kosten für eine Pouch-Zelle mit einer Kapazität von 36 Ah für die einzelnen Komponenten aufgeführt. Bei Kosten von 230 €/kWh für das Jahr 2015 werden etwa 44 % für die Fertigung benötigt. Für die Kathode und die Anode werden 16 bzw. 7 % veranschlagt, während die Kosten des Elektrolyts und des Separators mit jeweils 10 % angegeben werden. Die restlichen Anteile werden für sonstige Materialien benötigt. Für das Jahr 2020 wird mit Gesamtkosten für die Zelle von 180 €/kWh gerechnet. Die Kostenanteile der einzelnen dargestellten Komponenten bleiben nahezu identisch. Die genannten Batteriepreise werden für eine Produktionsgröße von über 100 000 Zellmodulen pro Jahr erreicht. Zu den Kosten der Einzelzelle müssen die Kosten für die Fertigung der Zellmodule berücksichtigt werden. Pillot nennt für diese zusätzlichen Kosten aktuell einen Preis von 125 €/kWh und geht von einer Reduzierung bis 2020 auf 54 €/kWh aus [30].

2.1.2 Kapazität über Lebensdauer

Die zu Beginn gemessene Anfangskapazität einer Zelle steht nicht über die gesamte Lebensdauer der Zelle zur Verfügung. Die Kapazität ist, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, abhängig von der Temperatur und der Entladerate. Die Peukert-Gleichung aus dem Jahr 1897 beschreibt die abnehmende verfügbare Kapazität mit zunehmender C-Rate.

$$I^n \cdot t = K \quad \text{Gl. 2.9}$$

Dabei ist I der Strom, t die Entladezeit und n eine Variable. Für eine ideale Batterie ist $n = 1$ und damit die Kapazität $K = C_N$. Bei realen Batterien nimmt n Werte zwischen 1,01 und 1,4 ein [31]. Darüber hinaus nimmt die Kapazität mit zunehmender Anzahl an Alterungszyklen ab. In der Praxis wird vor allem beim Einsatz im automobilen Bereich angestrebt, die Lebensdauer der Batterien an die Fahrzeuglebensdauer anzulehnen. Im Idealfall stimmen die beiden überein, da ein Austausch der Batterie aufgrund der aktuellen Batteriepreise nicht wirtschaftlich darzustellen ist.

Die Alterung der Zellen spielt in der aktuellen Forschung eine zentrale Rolle. Die Abnahme der Kapazität mit zunehmender Anzahl an Zyklen ist auf die Alterungs- und Verschleißmechanismen zurückzuführen. Diese werden im nächsten Abschnitt dieses Kapitels vorgestellt.

Generell ist zwischen kalendarischer und zyklischer Alterung zu unterscheiden. In dieser Arbeit wird vor allem auf die dominierende zyklische Alterung eingegangen. Die kalendarische Alterung beschreibt das Alterungsverhalten einer Zelle, wenn sie keiner Belastung ausgesetzt ist. In diesem Zustand finden dennoch Wechselwirkungen zwischen Elektrolyt und Aktivmaterialien sowie Korrosionsvorgänge statt, die das Alterungsverhalten der Zelle beeinflussen [32]. Untersuchungen zeigen, dass die kalendarische Alterung von der Umgebungstemperatur und dem Ladezustand abhängt. Bei einer Lagerung der Zellen sind extreme Temperaturen und ein hoher Ladezustand

zu vermeiden, da diese Randbedingungen zu einer stärkeren Alterung führen [33]. Detaillierte Beschreibungen zur kalendarischen Alterung sind in [33,34,35] zu finden.

Neben der kalendarischen Alterung finden Alterungsprozesse in der Zelle während des Betriebs statt – die sogenannte zyklische Alterung durch wiederkehrende elektrische Belastung. Diese wird von vielen Faktoren beeinflusst und ist wesentlich komplexer als die kalendarische Alterung. Als Einflussgrößen gelten neben der Temperatur und dem Ladezustand die Zyklenzahl, die Zyklientiefe und die Stromstärke. Neben den genannten Größen, die dem Nutzungsprofil zugeordnet werden können, hängt der Verlauf der Alterung darüber hinaus vom Zelltyp, den verwendeten Elektrodenmaterialien und deren Strukturen ab. Als kritischste Stelle wird bei der zyklischen Alterung die Schnittstelle zwischen Elektrode und Elektrolyt angesehen. Vor allem der Übergang von negativer Elektrode zu Elektrolyt ist ein Ausgangspunkt der Alterung [36]. Als Auslöser der Alterung werden auf makroskopischer Ebene drei Hauptursachen benannt [37,38]:

- Reaktion der Aktivmaterialien der Elektrode mit dem Elektrolyt und die Bildung einer Grenzschicht (SEI-Schicht) an der negativen Elektrode,
- Abbau des Aktivmaterials durch Zyklisierung und
- Veränderungen an nicht-aktiven Materialien (wie Ableiter) und an Kontaktflächen zwischen aktiven und nicht-aktiven Materialien.

Abbildung 2.4 zeigt die Alterungsfehler und die dazugehörigen Mechanismen an der negativen Elektrode.

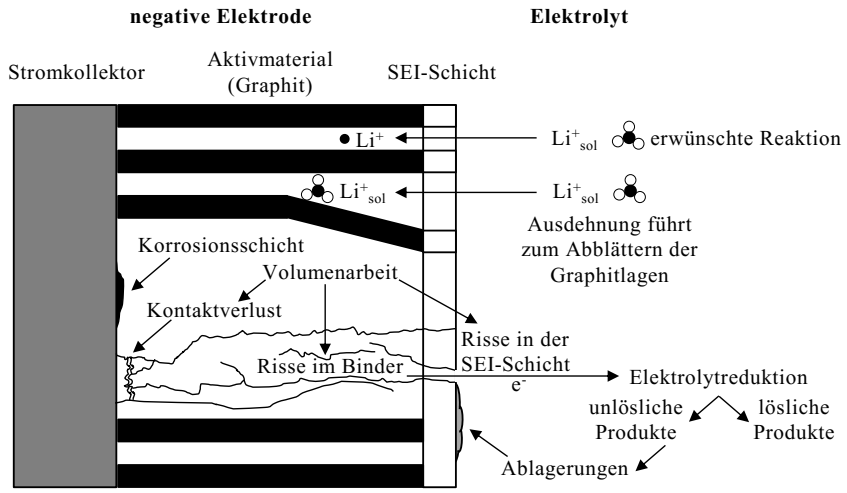


Abbildung 2.4: Alterungsfehler und -mechanismen nach [39]

In Tabelle 2.3 ist eine Zusammenfassung der Alterungsfehler nach Herb für alle Komponenten einer Zelle dargestellt [39].

Tabelle 2.3: Zusammenfassung der Alterungsfehler nach [39]

Komponente	Alterungsfehler
Negative Elektrode	Änderung der Morphologie
	Reduzierung aktiver Elektrodenoberfläche
	Bindemittelabbau
	Irreversible Interkalation (Li-Ablagerung im Graphit)
Positive Elektrode	Änderung der Morphologie
	Reduzierung aktiver Elektrodenoberfläche
	Bindemittelabbau
Elektrolyt	Leitsalzabbau
	Elektrolytverunreinigung
SEI-Schicht	Elektrolyt-Schichtwachstum (SEI)
Stromkollektor	Anoden Metall-Korrosion + Kupferdendritenbildung
Separator	Separatorabrieb
	Verminderung der Porosität

Mit zunehmender Alterung steigt der Innenwiderstand der Zelle, und die verfügbare Kapazität nimmt ab. Dies hat in der Praxis zwei direkte Folgen. Die Leistungsfähigkeit der Zelle sinkt, da der erhöhte Innenwiderstand zu einer geringeren maximalen Stromstärke sowohl beim Laden als auch beim Entladen führt. Bei einer sehr starken Erhöhung des Innenwiderstands können die begrenzten Stromstärken zu einer Leistungseinschränkung führen. Die zweite direkte Folge aus der Erhöhung des Innenwiderstands ist der schlechtere Wirkungsgrad der Batterie über alle Betriebspunkte. Die genannten Folgen können im automobilen Einsatzbereich zu einem Kraftstoffmehrverbrauch bzw. zu einer Erhöhung der erforderlichen Energie führen, wenn beispielsweise bei einem Hybridfahrzeug der Verbrennungsmotor einen erhöhten Anteil am Antriebsmoment aufzubringen hat. Darüber hinaus führt ein schlechterer Wirkungsgrad zu einer Erhöhung der Verluste, was gegebenenfalls über eine Klimatisierung der Zellen abgefangen werden muss und zu einer weiteren Erhöhung des Energiebedarfs und somit zu einer geringeren Reichweite führt. [13]

Untersuchungen zu den Einflussgrößen hinsichtlich der Alterung sind in [39] zu finden. Die Ergebnisse weisen auf einen großen Einfluss von der Stromstärke und der Entladetiefe (DoD) hin. Je höher die Stromstärke und je tiefer die Entladung sind, umso schneller schreitet die Alterung mit einer Kapazitätsabnahme voran. Bei automobilen Anwendungen werden die Zellen in der Regel bis zu einem SoH von 80 % eingesetzt [37,38,10].

2.1.3 Zukünftige Technologien

Die Entwicklung der Batterietechnologien schreitet stetig voran. Schwerpunkte der aktuellen Grundlagenforschung sind u. a. Metall-Luft-Systeme. Dabei kommt der Sauerstoff in der Luft als aktives Material zum Einsatz. Eine poröse Platte aus Kohlenstoff bildet die positive Elektrode. Zu diesen Systemen werden beispielsweise Zink-Luft oder Lithium-Luft Batterien zugeordnet. Nachteil dieser Technologie ist die zurzeit noch geringe Zyklenanzahl. Eine Marktverfügbarkeit ist noch nicht vorhersehbar [40,41]. Jedoch sieht beispielsweise auch Toyota das langfristige Ziel und den derzeitigen Forschungsschwerpunkt in der Lithium-Luft Technologie [42].

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt bilden die Metall-Schwefel-Systeme. So weist die Lithium-Schwefel Batterie mit 3 350 Wh/kg eine der höchsten theoretischen Energiedichten auf. In der Praxis wurden Werte von 350 Wh/kg erreicht. Bei der Entladung wird Lithium an der Anode abgebaut und reagiert mit Schwefel. Diese Technologie weist gravierende Gewichts- und Kostenvorteile auf, hat jedoch noch nicht den Reifegrad für den automobilen Einsatz erreicht. [40,43]

Eine jüngere bereits eingesetzte Technologie ist die Lithium-Eisen-Phosphat Batterie (LFP). Vorteile dieser Technologie sind der Kostenvorteil gegenüber dem Kobaltdioxid und Sicherheitsaspekte. Sie weist aber eine geringere Energiedichte gegenüber Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA) auf. Diese haben jedoch Nachteile bezüglich der Sicherheit. Die Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid Batterie (NMC) weist, ähnlich wie die NCA, eine hohe Energiedichte auf. Sie hat jedoch Nachteile im Bereich der Lebensdauer und der Leistungsdichte. [44,45] Lithium-Titanat Batterien (LTO) weisen vor allem Vorteile in den Bereichen Lebensdauer und Sicherheit auf. Sie besitzen zudem eine geringe thermische Anfälligkeit. Nachteilig ist, dass diese Technologie im Vergleich zu NCA-Batterien eine um etwa ein Drittel geringere Energiedichte aufweist, was in einem hohen Gesamtgewicht der Batterie resultiert. [46] Pillot sieht die Entwicklung der Materialien an der positiven Elektrode von 2014 bis 2025 folgendermaßen: Der Anteil an Lithium-Kobaltdioxid (LCO) sinkt von 36 auf 26 %. Der Anteil an positiven Elektroden aus LMO sinkt von 20 auf 9 %. Der Anteil an NMC bleibt konstant bei 25 % während LFP von 10 auf 26 % und NCA von 9 auf 14 % ansteigen. In Summe wird von einer Produktionssteigerung von 100 000 auf 300 000 t ausgegangen. [30] Eine gute Übersicht über die verschiedenen Materialvarianten mit den Vor- und Nachteilen ist in [47] zu finden.

Aus den Darstellungen ist zu erkennen, dass aktuell neue Materialkonzepte für zukünftige Lithium-Ionen Batterien gesucht werden. In [48] wird ein Auszug aus einer Roadmap zur Entwicklung neuer Batterietechnologien vorgestellt, der den zu erwartenden Technologie-Fahrplan zukünftiger Energiespeicher zusammenfasst. Mit der nächsten Generation von Zellen werden demnach über die Legierung der Anode Energiedichten von 200 Wh/kg erwartet, bevor in der nächsten Generation II eine Steigerung auf 300 Wh/kg

durch den Einsatz einer Hochvolt-Kathode realisierbar wird. Als Zukunftsoptionen werden Energiedichten zwischen 500 bis etwa 1500 Wh/kg durch den Einsatz von Lithium-Schwefel und Lithium-Luft Batterien erreichbar. Dadurch sollen Reichweiten von bis zu 500 km realisiert werden.

2.2 Lithium-Ionen Zellen in Hybrid- und Elektrofahrzeugen

In diesem Unterkapitel werden die zurzeit auf dem Markt verfügbaren Hybrid- und Elektrofahrzeuge vorgestellt. Dazu wird im ersten Teil eine Übersicht über die Fahrzeugmodelle und die eingesetzten Lithium-Ionen Zellen gegeben. Anschließend werden die allgemeinen Diagnosemöglichkeiten an Fahrzeugen erläutert, bevor im Anschluss die über die Diagnosefunktion verfügbaren Messwerte in diversen Hybrid- und Elektrofahrzeugen vorgestellt werden.

2.2.1 Übersicht über aktuelle Hybrid- und Elektrofahrzeuge

In diesem Unterkapitel soll eine Übersicht über den Einsatz von Lithium-Ionen Zellen in Hybrid- und Elektrofahrzeugen gegeben werden. Einleitend werden Hybrid- und Elektrofahrzeuge kurz vorgestellt:

- **Hybridfahrzeuge:** Hybridfahrzeuge sind Fahrzeuge, die zum Antrieb des Fahrzeugs über mindestens zwei Energiewandler nebst im Fahrzeug verbauten Energiespeichersystemen verfügen. Energiewandler sind z. B. Otto-, Diesel-, Erdgas- oder Elektromotoren mit den dazugehörigen Energiespeichersystemen Kraftstofftank und Batterien. Durch eine optimierte Betriebsstrategie und Kombination der verfügbaren Antriebe kann der Kraftstoffverbrauch reduziert werden. Basis für die Betriebsstrategie sind der bessere Wirkungsgrad und der geeignetere Drehmomentverlauf des Elektromotors bei niedrigen Drehzahlen bzw. Geschwindigkeiten. In diesem Bereich ist der spezifische Kraftstoffverbrauch des Verbrennungsmotors nicht optimal. Bei höheren Geschwindigkeiten kehrt sich die Situation um. Bei Hybridfahrzeugen

wird zwischen Mikro-Hybrid, Mild Hybrid, Vollhybriden und Plug-in Hybriden unterschieden. Die Vollhybride lassen sich darüber hinaus in parallele, leistungsverzweigte und serielle Hybride unterteilen. Die Hauptunterschiede liegen darin, dass bei den ersten beiden Systemen sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor für den Antrieb verantwortlich sind, indem sie eine direkte Verbindung zur angetriebenen Achse haben. Dabei können beide einzeln oder gemeinsam für den Antrieb sorgen. Details zu den verschiedenen Hybridtypen sind in [49] zu finden.

- **Elektrofahrzeuge:** Elektrofahrzeuge sind Fahrzeuge, die von Elektromotoren angetrieben werden. Dabei kann zwischen batteriebetriebenen und brennstoffzellenbetriebenen Elektrofahrzeugen unterschieden werden. Bei ersteren kommen in der Regel Lithium-Ionen Zellen zum Einsatz. Bei der Brennstoffzelle muss reiner Wasserstoff im Fahrzeug mitgeführt werden. Der Vorteil der bei beiden Systemen eingesetzten Elektromotoren ist der lokal emissionsfreie Betrieb. Für die batterieelektrischen Fahrzeuge spricht die flächendeckende Möglichkeit zum Laden des Fahrzeugs. Als Nachteil kann die zurzeit noch geringere Reichweite im Vergleich zum konventionellen Verbrennungsmotor genannt werden. Diesen Nachteil weist die Brennstoffzelle nicht auf. Sie kann eine vergleichbare Strecke zurücklegen. Ein weiterer Vorteil dieser Speichertechnologie ist die nahezu grenzenlose Verfügbarkeit des Wassers als Ausgangsstoff bei der Wasserstoffherstellung. Als Nachteil der Brennstoffzelle werden die hohen Kosten, die geringe Lebensdauer, die zurzeit nicht flächendeckend vorhandene Infrastruktur der Wasserstoffversorgung und der hohe Energieaufwand bei der Wasserstoffherstellung genannt. In der Praxis ist der Schritt von konventionell angetriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu Elektrofahrzeugen nicht ohne Weiteres zu realisieren, da bisher vom Verbrennungsmotor angetriebene Aggregate für den neuen Einsatzzweck überarbeitet werden müssen. Dazu gehören beispielsweise die Klimatisierung, die Heizung, die Servolenkung und die unterdruckverstärkte Bremse. [49]

In Tabelle 5.2 werden auf dem Markt verfügbare Hybrid- und Elektrofahrzeuge mit der Batteriekapazität und der vom Hersteller angegebenen rein

elektrischen Reichweite aufgeführt. Die verbaute Batteriekapazität ist abhängig vom Fahrzeugtyp (Hybrid- oder Elektrofahrzeug) und liegt bei den aufgeführten Fahrzeugen zwischen 6,1 und 90 kWh. In der Regel ist in Elektrofahrzeugen eine größere Batteriekapazität verbaut, im Vergleich zu Hybridfahrzeugen. Die von den Herstellern angegebene rein elektrische Reichweite deckt einen Bereich von 31 bis 528 km ab. Untersuchungen haben ergeben, dass die durchschnittliche Tagesfahrleistung als Pkw-Fahrer bei etwas über 20 km liegt [50]. Rein theoretisch ist die vom Hersteller angegebene Reichweite ausreichend. In der Praxis werden die elektrischen Reichweiten größtenteils nicht erreicht. Dies liegt u. a. an den Einflussparametern wie Außentemperatur, Fahrereinfluss, eingeschaltete Verbraucher, Verkehrsfluss, Streckenprofil und Zusatzlasten, wie beispielsweise die Personenanzahl [51].

Tabelle 2.4: Übersicht aktueller Hybrid- und Elektrofahrzeuge [52-77]

Marke/Modellreihe	Kapazität in kWh	Reichweite in km
BMW i3	18,8	190
BMW i8	7,0	37
Citroën Berlingo First Electric	22,5	170
Citroën cZero	16	150
Ford Focus Electric	23	162
MB B-Klasse ED	28	200
MB C-Klasse Hybrid	6,38	31
MB eVito	36	130
MB SLS AMG Coupé ED	60	250
Mitsubishi iMiev	16	160
Nissan Leaf	24	199
Opel Ampera	16	83
Peugeot iOn	14,5	150
Porsche Panamera S E-Hybrid	9,4	36
Renault Kangoo Rapid Z. E.	22	170
Renault Twizy Z. E.	6,1	100
Renault Zoe Z. E.	22	240
Smart Electric Drive	17,6	145
Tesla Model S	70–90	421–528
Tesla Model X	90	450
Tesla Roadster	56	340
VW e-Golf	24,2	190
VW e-Up	18,7	160
VW Golf GTE	8,8	45

Basierend auf den Werten der Batteriekapazität und der Reichweite kann der theoretische Verbrauch berechnet werden. Dabei ergeben sich Werte zwischen 6,1 und 27,7 kWh/100 km.

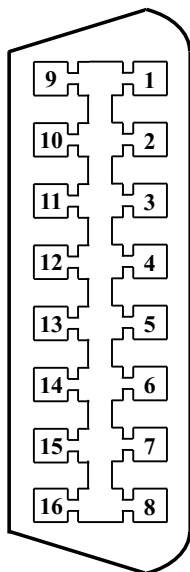
Mit der Erhöhung der verfügbaren Kapazität in einem Fahrzeug geht eine Gewichtszunahme einher. So sind in derzeitigen Fahrzeugen, je nach Batterietyp und Zielsetzung des Herstellers, einige Dutzend, aber auch bis zu einigen tausend Zellen zu einem Gesamtmodul verbaut. So ergeben die 6831

Batteriezellen im Tesla Roadster in Summe ein Gewicht von 408 kg [74]. Die 88 Zellen im Citroën cZero ergeben ein Gesamtgewicht von 236 kg [55].

2.2.2 *Diagnose im Fahrzeug*

Für die Kommunikation mit einem Fahrzeugsteuergerät zu Diagnosezwecken wird die sogenannte Off-Board-Kommunikation eingesetzt. Dabei wird zwischen einem Fahrzeugsteuergerät und einem externen Gerät eine Verbindung aufgebaut. Bei der Schnittstelle existieren, neben den vom Gesetzgeber standardisierten Teilen, Abschnitte, die herstellerspezifisch ausgelegt und eingesetzt werden können (Abbildung 2.5).

Das zurzeit am häufigsten in Fahrzeugen eingesetzte Diagnoseprotokoll in europäischen Fahrzeugen ist das mit CAN-Bussystemen realisierte Keyword 2000 Protokoll (KWP 2000) nach ISO 14230. Die Kommunikation ist so ausgelegt, dass die gesamte Kommunikation vom Tester ausgeht. Dieser sendet eine Botschaft mit einer Diagnose-Anfrage (Request) über das Netz an das Steuergerät. Dieses wiederum muss innerhalb einer bestimmten Zeit über das Netz mit einer Antwort-Botschaft (Response) reagieren. Bei der Anfrage hat der Tester die Möglichkeit, eine funktionale oder physikalische Adressierung einzusetzen. Mit der funktionalen Adressierung stellt der Tester eine Anfrage in das Netz, ohne genau zu wissen, wie viele Steuergeräte antworten. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn mehrere abgasrelevante Steuergeräte antworten. Die Steuergeräte antworten dann mit ihren physikalischen Adressen. Bei der physikalischen Adressierung wird ein bestimmtes Steuergerät vom Tester angesprochen. Einige Dienste sind nach dem KWP 2000 Protokoll in sogenannten Service-IDs (Service-Identifizier, SID) definiert. Dazu gehören beispielsweise Dienste zum Lesen und Löschen des Fehlerspeichers, zum Auslesen von Steuergerätedaten und das Ansteuern von Steuergeräte-Ein- und Ausgängen. So kann beispielsweise mit dem SID 22 h „Read Data By Common Identifier“ das Auslesen von bestimmten Steuergerätwerten angestoßen werden. [78]



PIN	Belegung
1	Herstellerspezifisch
2	J1850 plus
3	Herstellerspezifisch
4	Masse
5	Signal-Masse
6	CAN High Speed High
7	K-Line
8	Herstellerspezifisch
9	Herstellerspezifisch
10	J1850 minus
11	Herstellerspezifisch
12	Herstellerspezifisch
13	Herstellerspezifisch
14	CAN High Speed Low
15	L-Line
16	Versorgungsspannung

Abbildung 2.5: OBD-Diagnosebuchse nach ISO 15031 [79]

Bei dem Diagnoseprotokoll Unified Diagnostic Services (UDS) nach ISO 14229/15765-3 wurden einige KWP 2000-Dienste in einer gemeinsamen SID zusammengefasst. Unterfunktionen werden über den neuen Parameter Subfunction Level (LEV) ausgewählt. Eine weitere Neuerung ist der „Response on Event Dienst“. Dieser sendet bei Auftreten eines zuvor definierten Ereignisses automatisch eine Antwortbotschaft ohne erneute Anfrage des Testers. [78]

Die On-Board-Diagnose (OBD, EOBD) ist die gesetzliche Vorschrift zur Überwachung der abgasrelevanten Systeme in den USA und Europa. Die dazu geltenden Normen sind ISO 15031 und SAE J1979. Die Botschaften bestehen aus der SID und maximal sechs Datenbytes. In der Regel beschreibt das erste Byte nach der SID bei den meisten Anfragen bestimmte Parameter (Parameter Identifier, PID), beispielsweise einen Datenwert im Steuergerät. [78]

Die weitere Entwicklung im Bereich der Diagnose deutet auf eine Umstellung der Fahrzeugschnittstelle auf Ethernet/IP hin. Diesem kostengünstigen System mit seiner sehr hohen Bandbreite stehen Herausforderungen bei der Echtzeitfähigkeit und der Robustheit bei EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) und sonstigen Umwelteinflüssen für den Einsatz in der On-Board-Kommunikation gegenüber. Gegen einen Einsatz in der Off-Board-Kommunikation sprechen die Kosten. Für die On-Board-Diagnose wird mit der Einführung der World-Wide-Harmonized-OBD (WWH-OBD) nach ISO 27145 der Versuch unternommen, alle OBD-spezifischen Dienste durch UDS-Dienste abzulösen. Einige Umbenennungen gehen mit dieser Norm einher. So wird die Auswahl der Unterfunktion LEV als Subfunction Identifier (SFID) bezeichnet. Das Auslesen von Steuergerätedaten erfolgt nicht mehr über den Parameter Identifier (PID), sondern über den Data Identifier (DID) mit einer Länge von 16 Bit. [78]

2.2.3 *Diagnose in Hybrid- und Elektrofahrzeugen*

In den derzeitigen auf dem Markt verfügbaren Hybrid- und Elektrofahrzeugen werden batterierelevante Daten über die Diagnoseschnittstelle bereitgestellt. Damit bedienen die Fahrzeughersteller ihre eigenen Interessen, beispielsweise für die Instandsetzung. Der Umfang dieser Daten ist hersteller- und modellabhängig und weist signifikante Unterschiede auf. Darüber hinaus ist der Diagnoseumfang abhängig vom eingesetzten Tester. Neben den Diagnosetestern der Fahrzeughersteller gibt es herstellerunabhängige Tester, die zum Teil nicht über den identischen Diagnoseumfang verfügen. Tabelle 2.5 zeigt einen Ausschnitt der für einige Hybrid- und Elektrofahrzeuge verfügbaren batterierelevanten Daten, die über den Diagnosetester des Herstellers verfügbar sind und die im Folgenden detailliert erläutert werden.

- **Spannung HV-Batterie (Hochvolt-Batterie):** die Spannung der HV-Batterie wird bei den verschiedenen Fahrzeugmodellen mehrfach bereitgestellt. Es gibt unter anderen die Spannung der Hochvoltbatterie, die Spannung des Hochvolt-Bordnetzes an der HV-Batterie, die Spannung des Hochvolt-Bordnetzes am DC/DC-Wandler und die Spannung der einzelnen Zellmodule. Die verschiedenen Messstellen der HV-Spannung

ermöglichen die Detektion möglicher Fehler im HV-System durch das Batteriemanagementsystem.

- **Strom HV-Batterie:** Bei diesem Messwert handelt es sich um den aus der HV-Batterie entnommenen oder zugeführten Strom.
- **Ladezustand HV-Batterie:** der Ladezustand der HV-Batterie wird in Prozent angegeben. Es gibt ein Fahrzeugmodell (Citroën cZero), bei dem zwei Ladezustände vorhanden sind: Ladezustand roh und der im Kombiinstrument angezeigte Wert des Ladezustands. Die Ermittlungsweise der beiden Werte kann nur vom Hersteller der Funktionalität nachvollzogen werden.

Tabelle 2.5: Übersicht der Verfügbarkeit von batterierelevanten Daten

Fahrzeugmodell	Spannung HV-Batterie	Strom HV-Batterie	Verfügbare Kapazität	Ladezustand HV-Batterie	Spannung der Einzelzellen	Temperaturen	Min./max. Spannungen	Zellnummer min./max. Spannung	Kapazität / Energieinhalt	Min./max. Widerstand	Lieferbare / zulässige Höchstleistung	Abweichung Zellspannung	Prüfung Isolationswiderstand	Schütze Schaltzyklen
Citroën cZero	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
MB B-Klasse ED	x	x		x		x			x				x	
MB C-Klasse Hybrid	x	x		x	x	x	x							
MB eVito	x	x		x		x	x		x				x	x
Smart Electric Drive	x	x	x	x	x	x			x					x
VW e-Golf	x	x		x	x	x	x	x					x	
VW Golf GTE	x	x		x	x	x	x	x					x	

- **Spannung der Einzelzellen:** Jede Einzelzellspannung kann einzeln abgerufen werden. Dadurch kann ein zeitlicher Verlauf aller Spannungen erstellt werden und die schlechteste Zelle identifiziert werden.

Durch die Verfügbarkeit der Einzelzellspannungen kann der Spannungswert für das gesamte HV-System plausibilisiert werden.

- Temperaturen: Es gibt Fahrzeugmodelle (z. B.: MB B-Klasse ED und MB eVito), bei denen lediglich ein Temperaturmesswert bereitgestellt wird. Dieser gibt die Temperatur im HV-Batteriemodul wider. Die genaue Position ist nicht bekannt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Stelle mit den größten Temperaturen innerhalb des Zellmoduls überwacht wird. Bei anderen Fahrzeugen werden zusätzlich die minimale und maximale Temperatur innerhalb der Batterie ausgegeben (z. B.: MB C-Klasse Hybrid). Dies lässt darauf schließen, dass mehrere Sensoren verbaut sind. Die genaue Anzahl der Messstellen ist nicht bekannt. Weitere Temperaturmessstellen befinden sich bei den meisten Fahrzeugmodellen an den Ladegeräten, den DC/AC- und DC/DC-Wandlern. Ein Fahrzeugmodell (Citroën cZero) hat zwischen jeden zwei Einzelzellen eine Temperaturmessstelle. In Summe sind über 50 Temperaturmessstellen in dem Batteriemodul verbaut.
- Min. / max. Spannungen: Durch die Überwachung aller Einzelzellspannungen kann die minimale und maximale Spannung aller Zellen ermittelt und bereitgestellt werden.
- Zellnummer min. / max. Spannungen: Mit diesen Werten werden die Zellnummern der Zellen mit minimaler und maximaler Spannung bereitgestellt.
- Kapazität / Energieinhalt: Die restliche Kapazität bzw. der Energieinhalt werden mit diesem Wert angegeben. Dieser ist nicht bei allen Fahrzeugmodellen permanent verfügbar.
- Min. / max. Widerstand: Bei einem Fahrzeugmodell (Citroën cZero) wird für jede Zelle ein Wert für den ohmschen Widerstand berechnet. Der minimale und maximale Wert wird über den Diagnosetester bereitgestellt.
- Lieferbare / zulässige Höchstleistung: Bei einem Fahrzeugmodell wird ein Wert für die aktuell lieferbare und zulässige Höchstleistung ausgegeben.

- **Abweichung Zellspannung:** Bei einem Fahrzeugmodell (Citroën cZero) werden sowohl die maximale Abweichung von der Sollspannung als auch die gemessene Differenz zwischen der Spannung des Moduls und der Summe der Einzelzellspannungen berechnet.
- **Prüfung Isolationswiderstand:** Dieser Messwert gibt den Zustand (in Ordnung, nicht in Ordnung) des Isolationswiderstands an. Teilweise wird der Widerstand als numerischer Wert bereitgestellt.
- **Schütze Schaltzyklen:** Dieser Messwert gibt die Anzahl der bereits geleisteten Schaltzyklen der Schütze bzw. die restliche Anzahl an Schaltzyklen im Normalbetrieb und im Volllastbetrieb an.

Die dargestellte Übersicht zeigt, dass die Fahrzeughersteller die wichtigsten batterierelevanten Messwerte über den Diagnosetester bereitstellen. Welche weiteren relevanten Werte innerhalb des Batteriemanagementsystems ermittelt werden und von welcher Qualität die Daten allgemein sind, kann nicht beurteilt werden. Eine weitere relevante Frage ist die Frequenz der Datenaktualisierung und -bereitstellung, um diese beispielsweise sinnvoll während der Durchführung von Fahrmanövern aufzuzeichnen und bewerten zu können.

2.3 Batteriemodelle

Batterien weisen ein komplexes, nichtlineares Verhalten auf. Die Modellierung ist daher aufwändig und vielschichtig. Es gibt eine Vielzahl von Ansätzen und Möglichkeiten, mit unterschiedlichem Grad an Komplexität und Genauigkeit, um das Verhalten von Batterien abzubilden. In dieser Arbeit werden die Batteriemodelle in drei Kategorien eingeteilt. Dabei handelt es sich um Ersatzschaltbildmodelle, physikalisch-chemische Modelle und diverse weitere Ansätze zur Modellierung, die der Kategorie weitere Modelle zugeordnet werden [80,81,82,83,84]. In den folgenden Unterkapiteln werden die Modelle kurz beschrieben. Für weitere Ausführungen wird auf die entsprechende Literatur verwiesen.

2.3.1 *Ersatzschaltbildmodelle*

Die im Ingenieurwesen am häufigsten eingesetzten Modelle sind die Ersatzschaltbildmodelle. Das elektrische Verhalten der Zellen wird mithilfe von Widerständen (R), Kapazitäten (C) und Induktivitäten (L) abgebildet. Dabei spielt die Anzahl und die Verschaltung der einzelnen Elemente eine entscheidende Rolle für die Genauigkeit des Ersatzschaltbildmodells, welches durch einen Stromfluss als Eingangsgröße das Spannungsverhalten der Zelle als Ausgangsgröße simuliert. Bei diesen Modellen wird der ohmsche Anteil an der Batteriespannung durch den Widerstand abgebildet, während die Kapazitäten bzw. Induktivitäten die frequenzabhängigen Spannungsanteile darstellen. Mit diesen Modellen kann sowohl das statische als auch das dynamische Zellverhalten abgebildet werden. [80] Ein Vergleich verschiedener Ersatzschaltbildmodelle ist in [85] zu finden. Bei der Modellierung eines Zellmoduls muss berücksichtigt werden, dass die verschalteten Zellen trotz Fortschritte in der Produktion nicht identisch sind [86]. Dies hat Einfluss auf die Parametrierung des Modells.

2.3.2 *Physikalisch-chemische Modelle*

Die physikalisch-chemischen Modelle gehören zu den Bottom-Up-Ansätzen, bei denen das Verhalten der Zellen auf Basis von bekannten physikalischen und chemischen Grundlagen nachgebildet wird. Dabei werden ausgehend von bekannten Prozessen auf mikroskopischer Ebene die dazugehörigen mathematischen Beschreibungen aufgestellt. Voraussetzung für diese Art der Modellbildung ist die genaue Kenntnis über die Eigenschaften der Zellen, wie beispielsweise Geometrie, Diffusionskonstanten und Leitfähigkeiten. Zu den drei bekanntesten Ansätzen gehören der Diffusionsansatz, das Modell der porösen Elektrode und die Zwei-Phasentransformation. Jeder dieser drei Ansätze bildet lediglich einen Teilprozess des Zellverhaltens ab. Daher kommt häufig eine Kombination der Modelle zum Einsatz. Diese Modelle sind sehr komplex und aufwändig, da sie auf Systemen gekoppelter, dreidimensionaler und partieller Differentialgleichungen beruhen. Aufgrund der komplexen numerischen Algorithmen sind sie während der Simulation sehr berechnungsintensiv. [80,87]

2.3.3 *Weitere Modelle*

Zu den weiteren Modellen gehören mathematische Beschreibungen, neuronale Netze, die Fuzzy-Logik und stochastische Modelle. Diese Modelle basieren, im Gegensatz zu der vorherigen Kategorie, nicht auf physikalisch-chemischen Grundlagen, sondern bilden lediglich empirische Beobachtungen durch die geeignete Verknüpfung von Ein- und Ausgangsgrößen ab [81]. Mathematische Modelle sind meist sehr abstrakt, und die ermittelten Parameter haben zumeist keine physikalische Bedeutung und Relevanz. Sie lassen Rückschlüsse auf die Lebensdauer, die Effizienz oder die Kapazität zu. Allerdings ist keine Abbildung von Strömen und Spannungen möglich. Des Weiteren sind mathematische Modelle sehr anwendungsspezifisch und liefern mit Fehlern in der Größenordnung von 5 bis 20 % keine genauen Ergebnisse. [87] Bei den stochastischen Modellen wird der Erholungseffekt nach einem Stromimpuls als exponentielle Funktion von Ladezustand und entnommener Kapazität modelliert. Der Erholungseffekt einer Zelle tritt nach Ende eines Stromimpulses auf, wenn sich ein chemisches Gleichgewicht in der Zelle einstellt. Am Spannungsverlauf ist dieses Verhalten am Anstieg der Spannung nach Ende des Stromimpulses zu erkennen. [81]

Beitrag zur Bewertung des Gesundheitszustands von
Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen

Huynh, P.-L.

2016, XXIV, 145 S. 70 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-658-16561-1