



**Diese Arbeit wurde vorgelegt am Lehrstuhl für Production Engineering of
E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen.**

Bachelorarbeit

Name: Julian Callard

Matr.-Nr.: 377888

Thema: Innovative Batteriezellkonzepte für eine optimale thermische Anbindung

Betreuender Assistent: Jonas Gorsch, M.Sc.

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Mustermann

2. Prüfer: Dr.-Ing. Thomas Mustermann

Aachen, den 6. Juli 2021

Inhalt und Ergebnis dieser Arbeit sind ausschließlich zum internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen bei der RWTH Aachen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des betreuenden Lehrstuhls ist es nicht gestattet, diese Arbeit oder Teile daraus an Dritte weiterzugeben.

I. Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	i
II	Formelzeichen und Abkürzungen	iii
III	Abbildungsverzeichnis	vi
IV	Tabellenverzeichnis	vii
1	Einleitung	viii
1.1	Abstract	viii
1.2	Aufbau der Arbeit	viii
2	Motivation	1
3	Grundlagen und Stand der Technik	2
3.1	Lithium-Ionen-Batterietechnologie	2
3.2	Das Tesla-Patent	9
3.3	Batteriesimulation	16
3.4	Grundlagen der Wärmeübertragungsmechanismen	21
4	Innovative Batteriezellkonzepte	25
4.1	Lage des Elektrodenwickels	25
4.2	Batteriegeometrie	25
4.3	Ausarbeitung der innovativen Konzepte auf Zellebene	27
4.3.1	Aufstellen des Vorgehens nach VDI 2206	27
4.3.2	Kühlkonzepte auf Batteriepaketebene	30
4.3.3	Innovative Batteriezellkonzepte	30
5	Simulationsvorbereitung	35
6	Auswertung	36
7	Zusammenfassung und Ausblick	37
V	Literatur	38
VI	Anhang	41
VII	Eidesstattliche Versicherung	42

II. Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Lithium-Ionen Batterietechnologie		
\dot{Q}	$\frac{J}{s}$	Wärmeentstehungsrate
I	A	Strom
U_t	$Volt$	Klemmenspannung
U_{OCV}	V	Leerlaufspannung
T	K	Temperatur
S	$\frac{J}{K}$	Entropie
r	$\frac{mol}{s}$	Reaktionsrate
c	$\frac{mol}{m^3}$	Ionenkonzentration
V	m^3	Volumen
X	$[-]$	Konzentration
\dot{Q}_{jou}	$\frac{J}{s}$	Joulewärme
\dot{Q}_{sr}	$\frac{J}{s}$	Nebenreaktionswärme
\dot{Q}_{mix}	$\frac{J}{s}$	Mischprozesswärme
Tesla Patent		
R	Ω	Widerstand
ρ_{sw}	$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$	Spezifischer Widerstand
P	W	Leistung
k	$\frac{W}{mK}$	Wärmeleitkoeffizient
d	m	Abstand
U	V	Spannung
Batteriesimulation		
\vec{i}_{ele}	$\frac{A}{m^2}$	Stromdichte
σ_c	$\frac{A}{Vm}$	Materialkonstante
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
t	s	Zeit
c_p	$\frac{J}{kgK}$	Spezifische Wärmekapazität
\vec{q}	$\frac{W}{m^2}$	Wärmeleitstrom
λ_{ht}	$\frac{W}{mK}$	Wärmeleitkoeffizient
ϕ_{ele}	V	Potential
L	m	Reaktionsschichtdicke
κ	$\frac{S}{m}$	Leitfähigkeit
ε	$[-]$	Permittivität
η_{act}	V	Aktivierungsüberpotential
E_{act}	$\frac{J}{mol}$	Reaktionsenthalpie
r_s	m	Partikelradius
a_s	$\frac{m^2}{m^3}$	Partikeloberfläche pro Volumen
F	$\frac{As}{mol}$	Faraday-Konstante
t^+	$[-]$	Kation-Transferzahl

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
c_e	$\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$	Lithiumsalzkonzentration im Elektrolyten
c_s	$\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$	Lithiumsalzkonzentration im Elektrodenpartikel
i_r	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$	Reaktionsstromdichte
i_0	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$	Austauschstromdichte
$k_{a/c}$	[–]	Anodischer/Kathodischer Transferkoeffizient
D	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Diffusionskoeffizient
\vec{j}_e	$\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}}$	Diffusionsstrom
R	$\frac{\text{J}}{\text{Kmol}}$	Gaskonstante
Θ	mol	Mittlere Stöchiometrie
Q_{Strom}	Ah	Ladung
Wärmeübertragung - Strahlung		
α_a	[–]	Absorptionsverhältnis
ρ_r	[–]	Reflektionsanteil
τ	[–]	Durchlassanteil
λ_{wl}	m	Wellenlänge
Wärmeübertragung - Leitung		
\dot{q}	$[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}]$	Wärmestromdichte
σ	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$	Stefan-Boltzmann-Konstante
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
T	K	Temperatur
\dot{Q}	W	Wärmestrom
α	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	Wärmeübergangszahl
λ_{ht}	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmeleitfähigkeit
c_p	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Spezifische Wärmekapazität
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
a	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Temperaturleitfähigkeit
Bi	[–]	Biot-Zahl
s	m	Charakteristische Länge
H	$\frac{\text{J}}{\text{mol}}$	Enthalpie
h	$\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	Spezifische Enthalpie
m	kg	Masse

Abkürzung	Beschreibung
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
PVFD	Polyvinylidenfluorid
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LNO	Lithium-Nickel-Oxid
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium
LEP	Lithium-Eisenphosphat
LTO	Lithium-Titanat
USA	United States of America
OEM	Original Equipment Manufacturer
IP	Ice-Plate Cooling
CP	Cold-Plate Cooling

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Aufbau der Lithium-Ionen-Batteriezele	2
Abbildung 3.2:	Prismatische und zylindrische Zellbauformen	5
Abbildung 3.3:	Aufbau des Elektrodenwickels im Tesla Patent	11
Abbildung 3.4:	Beispiel Cap, Tesla	12
Abbildung 3.5:	Verbindungsmöglichkeiten des Elektrodenwickels mit dem Batterie- gehäuse, Tesla	13
Abbildung 3.6:	Auslegungsmöglichkeiten des leitenden Elektrodenanteils	14
Abbildung 3.7:	Cap Varianten, Tesla	15
Abbildung 3.8:	Schichtenmodell der ET und EC Modelle nach Fink 2014	18
Abbildung 3.9:	Wärmeleitung nach Böckh und Wenkel	22
Abbildung 4.1:	Orientierung des Elektrodenwickels in der prismatischen Zelle	25
Abbildung 4.2:	Vgl. Maße des Batteriegehäuses nach DIN 91252	26
Abbildung 4.3:	Maße des konventionellen Elektrodenwickels	27
Abbildung 4.4:	Vgl. V-Modell nach VDI 2206	28
Abbildung 4.5:	L-Form des Stromkollektors	32

IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Vergleich der Energiedichten von Energieträgern in Fahrzeugen	1
Tabelle 3.1: Bauformen der Batteriezellen	3
Tabelle 3.2: Variablen aus Gleichung 2	7
Tabelle 3.3: Beschriftung von Abbildung 3.3	11
Tabelle 3.4: Beschriftung von Abbildung 3.4	12
Tabelle 3.5: Beschriftung von Abbildung 3.5	13
Tabelle 3.6: Beschriftung von Abbildung 3.6	14
Tabelle 4.1: Maße des Batteriegehäuses aus Abbildung 4.2	26
Tabelle 4.2: Maße des Elektrodenwickels der konventionellen Zelle aus Abbildung 4.3	27

1. Einleitung

1.1. Abstract

Durch fortlaufende Entwicklung im Bereich der elektro-chemischen Energiespeicher in Form von Lithium-Ionen-Batterien (LIB's) gewinnen diese als Energieträger in der Mobilitätsbranche stetig an Relevanz. Sowohl in Elektrofahrzeugen als auch in Konzepten und Neuentwicklungen in der Light-Aircraft-Branche finden LIB's immer mehr Anwendungen. Da die Energiedichte dieser Batteriezellen aktuell noch einen Bruchteil der Energiedichte von konventionellen Treibstoffen beträgt und die Ladezeiten aufgrund geringer C-Raten ein Vielfaches der zum Tanken von Treibstoff benötigten Zeit betragen, haben Verluste und Leistung, die für die Kühlung/Aufheizung der Energiespeicher aufgewendet werden muss, zusammen mit dem benötigten Gewicht für Kühlkreisläufe bei der Reichweite und Effizienz der Luft- und Kraftfahrzeuge einen signifikant negativen Effekt. Daher ist die optimale thermische Anbindung der Batteriezellen wünschenswert. Durch optimierte Wärmeleitung und geringerem Ohm'schen Widerstand können die Systemeffizienz erhöht und die Ladedauer reduziert werden.

In dieser Arbeit soll ein Konzept für eine thermisch optimierte prismatische Zelle aus bereits existierenden Konzepten für andere Zelltypen erarbeitet und dann anhand einer thermischen Simulation validiert werden.

1.2. Aufbau der Arbeit

2. Motivation

Der Transportsektor trägt in der EU mit einem Anteil von ca. 25% signifikant zu der gesamten Treibhausgasemission (THG) bei. Um die Ziele der EU-Kommission zu erreichen, soll bis 2030 die Anzahl der Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb halbiert werden. Bis 2050 soll auf Fahrzeuge mit Benzin- oder Diesel-Motoren komplett verzichtet werden. Eines der Hindernisse für eine Marktdurchdringung der Fahrzeuge mit elektrochemischen Energiespeicher in Form von Lithium-Ionen-Batterien (LIB's) ist die begrenzte Reichweite dieser Fahrzeugklasse¹.

Die Energiedichte von aktuellen LIB's² liegt nach Tabelle 2.1 weit unter der von konventionellen Treibstoffen³, ist jedoch verglichen mit älteren Batterietechnologien erheblich höher⁴. Da auch die Batterie-Aufladezeiten ein Vielfaches der Dauer einer Tankfüllung mit einem Flüssigtreibstoff beträgt, haben Verluste die durch Widerstand oder Abwärme entstehen, zusammen mit Leistung die für das Kühlen bzw. Aufheizen der Batterie aufgewendet werden muss, einen signifikant negativen Effekt auf die Reichweite und Effizienz der Fahrzeuge.

Tabelle 2.1: Vergleich der Energiedichten von Energieträgern in Fahrzeugen

Typ	Wert	Einheit
Lithium-Ionen-Batterie:	430 - 800	Wh/l
Nickel-Cadmium-Batterie:	130	Wh/l
Benzin:	9700	Wh/l
Diesel:	10700	Wh/l

Besonders deutlich ist dieser Effekt in der Luftfahrtbranche. Die früheren Konzepte des elektrischen Fliegens waren zwar erfolgreich darin, dass sie das Fliegen mit elektrischem Antrieb ermöglichten, scheiterten jedoch an der geringen Energiedichte verfügbarer Energiespeicher wie Nickel-Cadmium-Batterien und der damit verbundenen möglichen Reichweite⁵.

Durch die Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterietechnologie haben die elektrochemischen Energiespeicher erstmals eine ausreichende Energiedichte um relevante Reichweiten von bis zu 250km zu ermöglichen.⁶

Da die Reichweite sich antiproportional zum Gewicht verhält resultiert ein geringeres Gewicht bei gleicher Batteriekapazität in erweiterter Reichweite⁷.

Daher kann die Effizienz, Ladezeit und Reichweite von elektrischen Fahrzeugen mithilfe innovativer Kühlkonzepte gesteigert werden. In dieser Arbeit sollen diese Kühlkonzepte auf Zellebene erarbeitet und validiert werden.

¹ Vgl. Ajanovic und Glatt (Wirtschaftliche und ökologische Aspekte der Elektromobilität: Economic and ecological aspects of electric vehicles) 2020, S.136-146.

² Vgl. Hettesheimer et al. (Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität) 2017, S. 11.

³ Vgl. Beloit EDU (Energy Density Table).

⁴ Vgl. Sollmann (Nickel-Cadmium-Batterien) 2018.

⁵ Vgl. Hepperle (Electric Flight - Potential and Limitations) 2012, S. 4.

⁶ Vgl. Lilium (Lilium Jet).

⁷ Vgl. Traub (Range and Endurance Estimates for Battery-Powered Aircraft) 2011, S. 705.

3. Grundlagen und Stand der Technik

3.1. Lithium-Ionen-Batterietechnologie

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Lithium-Ionen-Batterietechnologie verschafft. Außerdem wird das thermische und elektrische Verhalten der Zellen erläutert. Zuletzt werden noch Alterungsmechanismen und Temperaturabhängigkeiten betrachtet.

Aufbau und Funktionsweise

Der Begriff Lithium-Ionen-Batterie umfasst viele verschiedene Batterietechnologien, welche alle auf dem gleichen Wirkprinzip beruhen. Analog zu anderen Batterietypen besteht eine Lithium-Ionen-Batterie aus einem Elektrolyten, einem Separator und zwei Elektroden.⁸ Konventionsbedingt wird die negativ geladene Elektrode als Anode und die positiv geladene Elektrode als Kathode bezeichnet. Dies entspricht den elektrischen Zuständen beim Entladevorgang.⁹

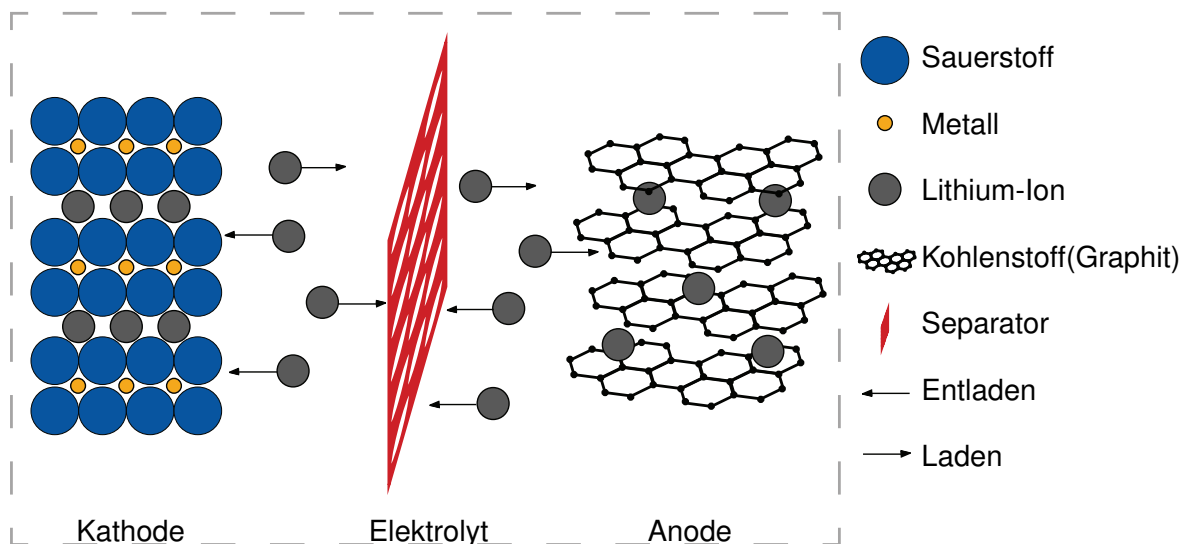


Abbildung 3.1: Aufbau Lithium-Ionen-Batteriezelle in Anlehnung an Ecker u. Sauer 2013

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, können die Lithium-Ionen durch das Elektrolyt von der Kathode zur Anode oder umgekehrt wandern.

Um die Oberfläche für das Einlagern der Ionen möglichst groß zu gestalten, sind die Materialien der beiden Elektroden hochporös. Dies ermöglicht zusätzlich eine hohe Reaktionsrate.¹⁰

Die Kathode einer **LIB** (Lithium-Ionen-Batterie) besteht meist aus einem Metalloxid, die Anode aus einer Kohlenstoffmodifikation, oftmals Graphit. Für die Bindung der Elektrodenmaterialien wird häufig Polyvinylidenfluorid (PVFD) in verschiedenen Formen verwendet.

Diese Materialien werden dann auf einer dünnen Metallfolie aufgetragen. An der Kathode kommt hierfür Aluminium zum Einsatz, an der Anode wird Kupfer verwendet. Die Metallfolien dienen zudem als Stromableiter.¹¹

Der Separator besteht normalerweise aus einem porösen Polymer. Die Bauteile der Batterie, Elektroden und Separator sind in einem Elektrolyt getränkt. Dieses besteht aus Lithiumsalz das in einem organischem Solvat gelöst ist. Das Solvat wird so gewählt, dass es bei den im Betrieb

⁸ Vgl. Wöhrle (Lithium-Ionen-Zelle) 2013, S.107-117.

⁹ Vgl. Fußnote 8, Wöhrle 2013

¹⁰ Vgl. Fußnote 8, Wöhrle 2013

¹¹ Vgl. Fußnote 8, Wöhrle 2013

auftretenden Spannungszuständen weitgehend stabil ist.¹²

Die Bauform der Batteriezellen, wie in Tabelle 3.1 dargestellt ist, meist einer von drei etablierten Typen. Bei allen Typen bestehen die Zellen aus einer oder mehreren Lagen von Elektroden-Separator-Elektroden-Stapeln, die je nach Typ geschichtet oder gewickelt werden. Das Gehäuse oder das Verpackungsmaterial der Batteriezellen ist ausschließlich aus Metall. Diese Maßnahme dient der Abdichtung der Zelle, da Wassereintritt die Hydrolyse des Leitsalzes $LiPF_6$ zu Fluorwasserstoff anstoßen kann. Zudem verhindert das Metall das Diffundieren des Elektrolyten vom inneren der Zelle nach außen.¹³

Tabelle 3.1: Bauformen der Batteriezellen

Bauform	Geschichtet	Gewickelt
Zylindrisch		Ja
Prismatisch	Ja	Ja
Pouch-Bag	Ja	

Je nachdem ob eine höhere Energiedichte oder Leistungsdichte bei den Batteriezellen gewünscht ist, können die Aktivschichten den Anforderungen entsprechend ausgelegt werden. Bei dünneren Schichten ist die Leistungsdichte, bei gleichzeitig geringerer Energiedichte, höher. Außerdem treten durch die geringere Aktivschichtdicke weniger Verluste bei, relativ zu der Aktivschichtdicke, mehr wärmeleitendem inaktiven Material auf, wodurch sich die Wärmeentwicklung der Batterie verringert.¹⁴

Batterietechnologien

Der größte Unterschied zwischen den LIB-Technologien liegt in der Materialzusammensetzung der Elektroden.

Beginnend mit der Lithium-Kobalt-Oxid-Batterie (LCO) von Sony in den 1990er-Jahren, wurden seitdem noch Lithium-Nickel-Oxid- (LNO) oder Lithium-Mangan-Oxid-Batteriezellen (LMO) entwickelt. LNO und LCO weisen beide eine hohe Kapazität auf, LNO besitzt jedoch eine geringe thermische Stabilität und LCO ist aufgrund des Kobaltgehalts bei Kosten, Sicherheit und Umweltverträglichkeit nicht ideal für den Massenmarkt. LMO ist zwar stabil, löst sich jedoch bei Raumtemperatur teilweise im Elektrolyten. Um diese Nachteile auszugleichen wurden beispielsweise die Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Batteriezelle (NMC) oder die Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Batteriezelle (NCA) entwickelt. Eine weitere Variation ist die Batteriezelle mit einer Kathode auf Eisenphosphatbasis (LEP). Diese besitzt verglichen mit den anderen Varianten eine geringere Spannungslage und gravimetrische Energiedichte. Da aber kein Kobalt verbaut wird, besitzt diese Technologie relevante Umweltvorteile.¹⁵

Auch eine alternative Anoden-Technologie, die sogenannte LTO-Zelle (Lithiumtitanat), kommt aktuell auf den Markt. Sie besitzt eine geringere Energiedichte im Vergleich zu anderen Technologien, weist sich jedoch durch eine hohe Leistungsdichte und Lebensdauer aus.¹⁶

In der Industrie setzt sich jedoch die NMC-Kathoden-Technologie durch. Zwar sind aktuell in der Transportbranche alle Technologien vertreten, jedoch stellen Produzenten wie Panasonic ihre NCA-Technologie auf die NMC-basierten Zellen um. In der Gigafactory die Panasonic

¹² Vgl. Fußnote 8, Wöhrle 2013

¹³ Vgl. Fußnote 8, Wöhrle 2013

¹⁴ Vgl. Ecker und Sauer, Prof. Dr. rer. nat. D. U. (Batterietechnik - Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S.66-67.

¹⁵ Vgl. Fußnote 14, Ecker und Sauer 2013

¹⁶ Vgl. Fußnote 14, Ecker und Sauer 2013

in Zusammenarbeit mit Tesla in Nevada (USA) seit 2017 in Betrieb hat sollen ab 2025 nur noch NMC-Zellen produziert werden. Die Anoden-Technologie wendet weitgehend Graphit-basierte Lösungen an. Diese Entwicklung ist auf die Batterie-Roadmaps der OEM-Hersteller zurückzuführen. In diesen Roadmaps stellen Hochenergie-LIB's mit NMC-Basierten Kathoden die aussichtsreichste Wahl in Sachen Kosten und Energiedichte dar.¹⁷ Daher wird in dieser Arbeit die NMC-Kathoden-Technologie betrachtet.

Elektrische Funktionsweise und Kenngrößen der Lithium-Ionen-Batterietechnologie

Während des Entladevorgangs, was dem Auslagern von Lithium aus der negativen Elektrode entspricht, werden Elektronen ausgegeben. Die Lithium-Ionen wandern durch das Elektrolyt und den Separator zur positiven Elektrode und lagern sich dort ein. Gleichzeitig fließen die Elektronen durch die externe Verbindung über einen Verbraucher zur positiven Elektrode wo Aluminium als Stromableiter dient. Beim Laden wird dieser Prozess umgekehrt.¹⁸

Der Interkalationsprozess der Lithium-Ionen ist nahezu reversibel. Daher tritt unter normalem Gebrauch meist kein Lithium-Plating auf.¹⁹

Beim Lithium-Plating setzt sich Lithium an der Anode ab und verringert so die Kapazität der Batterie. Das Plating setzt sich von anderen Alterungsmechanismen ab, da es stark temperaturabhängig ist. Die primäre Ursache ist das Starkstrom-Laden bei niedrigen Temperaturen und hohem State-Of-Charge. Die Lithium-Ablagerung auf der Graphit-Partikeloberfläche nimmt zu. Sinkt dann das Graphitpotential unter 0 V setzt sich Lithium permanent auf dem Graphit ab und fängt an dendritisch zu wachsen, was zu Kapazitätsverlusten und unter Umständen zu einem Kurzschluss innerhalb der Batterie führt.²⁰

Die gebräuchlichen Kenngrößen der Batteriezelle sind meist die nominale Kapazität, elektrische Energie und Leistung.

Die Kapazität ist die Menge an elektrischer Ladung, welche von einer Leistungsquelle während der Entladung geliefert werden kann. Sie wird primär von dem Entladestrom, der Temperatur, der Entladeschlussspannung und der Art und Menge der Aktivmaterialien auf den Elektroden beeinflusst. Die Einheit ist [Ah].

Die Energie einer Batteriezelle berechnet sich aus der Kapazität und der mittleren Entladespannung und wird in der Einheit [Wh] angegeben. Die Energiedichte bezieht sich auf das Volumen der Batterie und wird in [Wh/l] gerechnet. Die spezifische Energiedichte referenziert die Masse der Batterie und wird dementsprechend in [Wh/kg] angegeben.

Um die Leistung zu berechnen wird der Strom mit der Spannung multipliziert, was die Einheit Watt [W] ergibt. Durch den nahezu reversiblen Prozess ist der Wirkungsgrad von Lithium-Ionen-Batterien sehr hoch. Dieser ist nach Gleichung 1 definiert als die Energie die bei der Entladung frei wird geteilt durch die Energie, die beim Laden aufgewendet wird.²¹

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Entladeenergie}}{\text{Ladeenergie}} \quad (1)$$

¹⁷ Vgl. Fußnote 2, Hettenheimer et al. 2017

¹⁸ Vgl. Leuthner (Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 13-19.

¹⁹ Vgl. DAHN et al. (Thermal stability of Li_xCoO_2 , Li_xNiO_2 and 2- MnO_2 and consequences for the safety of Li-ion cells) 1994, S. 265-270.

²⁰ Vgl. Petzl et al. (Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study) 2015, S. 799-807.

²¹ Vgl. Fußnote 18, Leuthner 2013

Bauformen der Lithium-Ionen-Batterien

Wie in Tabelle 3.1 dargestellt, gibt es drei Bauformen von Lithium-Ionen-Batterien. In dieser Arbeit sind jedoch nur die zylindrischen und prismatischen Bauformen relevant.

Die zylindrische Zelle besitzt gewickelte Elektroden-Separator-Elektroden-Paare. Analog zu einer klassischen AA-Batterie können die positiven und negativen Anschlüsse auf jeweils einer der beiden Stirnseiten angebracht sein, in manchen Bauformen sind sie jedoch auf derselben Seite. In der konventionellen Batteriezelle wird der Strom durch ein sogenanntes "Tab" aus den Kathoden-Anoden-Paaren entnommen. Der Tab der Kathode oder Anode ist demnach an einer Stelle der Elektrode angebracht. Dadurch muss der Strom zum Teil große Distanzen zurücklegen um über die Tab-Verbindung zum elektrischen Leitstück am Ende der Batteriehülle, oder *Can*, zu gelangen.

Die Bauform der zylindrischen Zelle wird häufig durch ein Zahlenkürzel angegeben, bei dem die ersten beiden Ziffern den Durchmesser in [mm] vorgeben. Die nächsten beiden Ziffern stehen für die Zellhöhe, wieder in [mm]. Die letzte Ziffer ist eine 0 und schließt die Zahl ab. Zum Beispiel ist eine häufige Bauform die 18650er Zelle mit einem Durchmesser von 18 mm und einer Höhe von 65 mm. Auch viel verwendet werden die 26650er- und die 21700er-Zellgrößen.²²

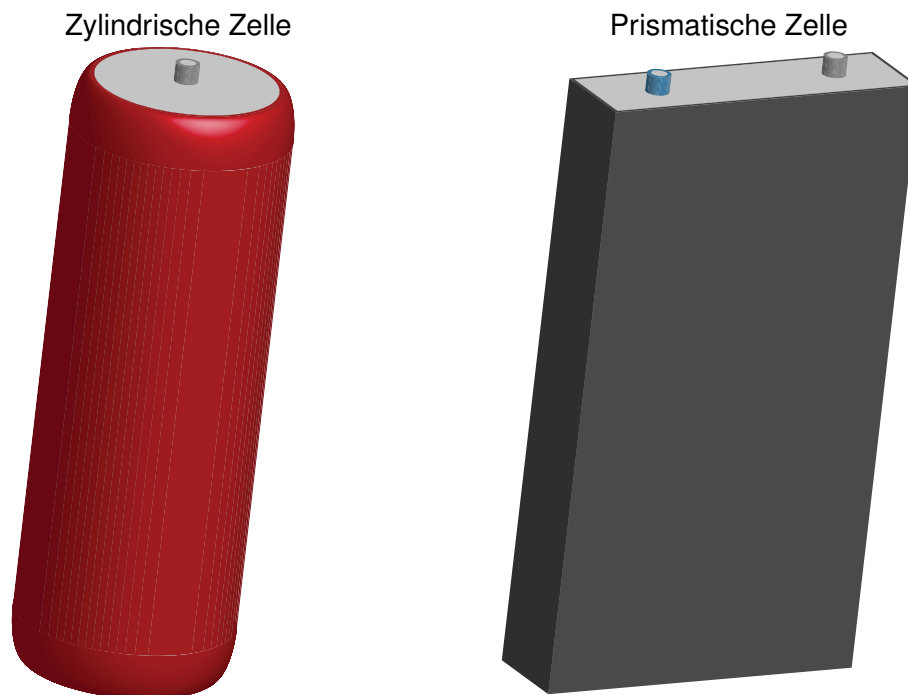


Abbildung 3.2: Prismatische und zylindrische Batteriezelle in Anlehnung an Ecker u. Sauer 2013

Der Aufbau der prismatischen Zelle ist in Abbildung 3.2 zu sehen. In diesem Bauformat werden gewickelte oder geschichtete Elektrodenpaare verwendet. Die Spannungs-, bzw. Stromentnahme erfolgt analog zu der konventionellen zylindrischen Batteriezelle über "Tabs" und wird über an der Kopfseite der Batteriezelle angebrachte Anschlüsse entnommen.

Die Größe der prismatischen Zellen variiert stark und wird je nach Anwendungsfall bestimmt.²³

²² Vgl. (Lithium-Ionen-Batterietechnik: Zylindrische Zellen) 2021.

²³ Vgl. (Lithium-Ionen-Batterietechnik: Prismatische Zellen) 2021.

Alterungsmechanismen

Die Temperaturgradienten die sich beim Benutzen der Batterie in der Zelle ausbilden, können auch Alterungsgradienten hervorrufen. Hinzu kommt, dass starke Temperaturgradienten, die z.B. während hoher C-Raten auftreten, Verformungen der Elektrodenwickel induzieren können.²⁴ Es liegt daher nahe, dass eine homogene Temperaturverteilung innerhalb der Zelle von Vorteil ist.

Im weiteren werden drei häufig auftretende Alterungsmechanismen erläutert.

Beim Lithium-Plating setzen sich Lithium-Ionen auf der Trennschicht, oder "Solid Electrolyte Interface"(SEI), zwischen Elektrode und Elektrolyt durch irreversible chemische Reaktionen ab. Diese Ablagerungen verdicken die Trennschicht, was zu einem Anstieg des Stofftransportwiderstands und dadurch zu einem Anstieg des ohm'schen Widerstands führt. Da die Konzentration der Lithium-Ionen im Elektrolyt abnimmt, kommt es außerdem zu einem Kapazitätsverlust.

Alterung kann auch durch mechanische Spannungen ausgelöst werden. Diese entstehen, wenn Lithium-Ionen sich in die Aktivmaterialien einlagern. Die Spannung innerhalb der Partikel kann hierbei zur Rissbildung führen. Durch die Risse sind die Teile des Aktivmaterials nicht mehr elektrisch angebunden und werden als "Dead-Lithium" bezeichnet.

Der letzte hier behandelte Alterungsvorgang entsteht aus Dehnvorgängen bei der Lithium-Einlagerung. Diese Belastung kann den Leitruß, einen speziellen Kohlenstoffleiter der Leitpfade zwischen Stromableitern und Partikeln bereitstellt, auftrennen. Dadurch sind die Aktivmaterialpartikel nicht mehr mit dem Stromableiter verbunden. Dieser Alterungsvorgang kann sowohl an Kathode, als auch an der Anode auftreten.²⁵

Wärmeentwicklung und Temperatureinfluss auf die Batteriezelle

Die Leistung von LIB's hängt stark von der Zelltemperatur ab.

Mit sinkender Temperatur steigt der innere Widerstand der Zelle und die verfügbare Kapazität nimmt ab. Dies führt zu verminderter abnehmbarer Energie und geringerer maximaler Leistung. Bei hoher Zelltemperatur kann jedoch die Sicherheit der Batteriezelle nicht mehr gewährleistet werden und es finden Alterungsprozesse statt. Die Zelltemperatur ist hierbei von der Außentemperatur und der Wärmeentstehung beim Laden bzw. Entladen der Batterie abhängig.²⁶

Liu et al. stellen Gleichung 2 für die Berechnung der Wärmegeneration in der Batteriezelle während der Ladezyklen auf.

$$\dot{Q} = I \cdot (U_{OCV} - U_t) - I \cdot T \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} - \sum_i \Delta S_i^{avg} r_i - \int \sum_j (\bar{S}_j - \bar{S}_j^{avg}) \cdot \frac{\partial c_j}{\partial t} dv \quad (2)$$

Der erste Term von Gleichung 2 auf der rechte Seite entspricht der ohm'schen Wärmeentstehung, kurz \dot{Q}_{jou} . Der zweite Term ist die reversible Entropiewärme oder Reaktionswärme, \dot{Q}_{re} . Der dritte Term ist die Wärme aus Nebenreaktionen, \dot{Q}_{sr} . Dieser beschreibt die Alterung der Batteriezelle und kann für wenige Testzyklen vernachlässigt werden²⁷. Der letzte Term, \dot{Q}_{mix} , entspricht der Wärme im Mischprozess der Batterie. Die Mischprozesswärme entsteht durch die Bildung und Entspannung von Zellkonzentrationsgradienten. Für dynamische Belastungsprofile ist sie daher signifikant und kann nicht vernachlässigt werden.²⁸

²⁴ Vgl. Waldmann et al. (Influence of Cell Design on Temperatures and Temperature Gradients in Lithium-Ion Cells: An In Operando Study) 2015, S.921-927.

²⁵ Vgl. Fußnote 18, Leuthner 2013

²⁶ Vgl. Liu et al. (Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors) 2014, S.1001-1010.

²⁷ Vgl. Forgez et al. (Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery) 2010.

²⁸ Vgl. Thomas und Newman (Thermal Modeling of Porous Insertion Electrodes) 2003.

Tabelle 3.2: Variablen aus Gleichung 2

Nummer	Beschreibung
\dot{Q}	Wärmeentstehungsrate
I	Batteriestrom
U_t	Klemmenspannung der Batterie
U_{OCV}	Leerlaufspannung der Batterie
T	Batterietemperatur
ΔS_i	Entropieänderung der i -ten Reaktion
r_i	Reaktionsrate der i -ten Reaktion
\bar{S}_j	Molare Entropie des j -ten Teils der Batterie
c_j	Ionenkonzentration im j -ten Teil
v	Volumen
\bar{X}^{avg}	Entspricht der Durchschnittskonzentration in einem Teilvolumen

Zusammengefasst verkürzt sich Gleichung 2 demnach zu Gleichung 3, bzw. Gleichung 4.

$$\dot{Q} = I \cdot (U_{OCV} - U_t) - I \cdot T \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} - \int \sum_i (\bar{S}_j - \bar{S}_j^{avg}) \cdot \frac{\partial c_j}{\partial t} dv \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{jou} + \dot{Q}_{sr} + \dot{Q}_{mix} \quad (4)$$

Nach Gleichung 2 ist die ohm'sche Wärme von dem Stromfluss und dem Überpotential abhängig. Das Überpotential entsteht aufgrund des Potentialverlusts durch einen erhöhten inneren Widerstand der Batteriezelle.

Folglich kann der innere Zellwiderstand R_{in} nach Gleichung 5 definiert werden.²⁹

$$R_{in} = \frac{U_{OCV} - U_t}{I} \quad (5)$$

Der innere Widerstand einer Lithium-Ionen-Batterie wird durch das State-Of-Charge (SOC), die Zellalterung und die Zelltemperatur beeinflusst. Im Allgemeinen sind die Kausalitäten bereits bekannt. Der Widerstand nimmt mit fallender Zelltemperatur zu. Außerdem variiert er mit dem SOC und steigt über die Lebensdauer mit dem Auftreten von Alterungsmechanismen.^{30 31}

Interessant ist auch, dass der Ladewiderstand kleiner als der Entladewiderstand ist. Daher wird während dem Ladeprozess weniger ohm'sche Wärme produziert als beim Entladeprozess. Andererseits beeinflusst die Zelldegradation den Ladewiderstand mehr als den Entladewiderstand, wodurch Alterungseffekte beim Berechnen der Wärmeentstehung während Ladezyklen signifikant sind.

Bei der Reaktionswärme ist der dominierende Einfluss nach Liu et al. das SOC. In manchen SOC-Bereichen sollten Alterungseffekte berücksichtigt werden und der Temperatureinfluss ist nie vernachlässigbar, jedoch sind für diese Arbeit nur die Temperatur- und SOC-Einflüsse

²⁹ Vgl. Fußnote 26, Lui et al. 2014

³⁰ Vgl. Andre et al. (Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation) 2011.

³¹ Vgl. Ecker, Gerschler et al. (Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data) 2012.

relevant.³²

³² Vgl. Fußnote 26, Liu et al. 2014

3.2. Das Tesla-Patent

Im Folgenden wird das Patent von Tesla für eine innovative thermische und elektrische Anbindung des Elektrodenwickels an das Batteriegehäuse für die Leistungsabnahme behandelt.

Das Patent wurde von Tesla Inc. mit den Erfindern Tsuruta et al. am 4. November 2019 eingereicht und am 7. Mai 2020 unter der *Publishing No.* **US 2020/0144676 A1** veröffentlicht.³³

Der Abstract der Veröffentlichung fasst die Erfindung, bei der es sich um eine innovative zylindrische Zelle handelt, wie folgt zusammen:

“Eine Zelle eines Energiespeichergeräts mit mindestens einer Elektrode die ohne *Tab* konstruiert wird und Herstellungsmethoden dieser.”

In der konventionellen Batteriezelle, ob zylindrisch oder prismatisch, werden die Kathode und Anode mit den positiven und negativen Anschlüssen mithilfe von *Tabs* verbunden (Beispiel *Tab* siehe Abbildung 3.3 mit Tabelle 3.3).

Diese *Tabs* dienen als sogenannte “Current collectors”, d.h. durch sie fließt der gesamte Strom den die Batteriezelle abgibt oder aufnimmt.

Da der Widerstand nach Gleichung 6 von dem spezifischen Widerstand des Materials (ρ_{sw}), der Länge die der Strom zurücklegt (l) und der Fläche (A) durch den er fließt abhängt, haben Tsuruta et al in ihrem Patent die zurückgelegte Distanz reduziert und die Fläche vergrößert um den Widerstand zu verringern.³⁴

$$R = \rho_{sw} \cdot \frac{l}{A} \quad (6)$$

Im konventionellen Design sind die *Tabs* entweder in der Mitte oder an einem Ende der Elektrode angebracht. Daher muss der Strom mindestens die Hälfte, beim *Tab* am Ende der Elektrode sogar die gesamte Länge der Elektrode zurücklegen.

Bei dem innovativen Entwurf ist die maximale Distanz die der Strom zurücklegen muss die Höhe der Elektrode. Abhängend vom Batteriezellenformfaktor entspricht die Höhe der Elektrode typischerweise 5% – 20% der Länge. Es folgt, dass der ohm'sche Widerstand der Elektrodenableiter des innovativen Konzepts 5- bis 20-Mal kleiner ist als der Widerstand des konventionellen Konzepts.³⁵

Ein weiterer Effekt der durch das innovative Konzept hervorgerufen wird ist, dass signifikant weniger Stromabweichungen auftreten. Stromabweichung ist das Phänomen bei dem manche Elektrodenregionen mehr oder weniger Strom als andere Regionen auf der selben Elektrode während der Zyklendauer leiten.

Nach Ohm fließt Strom bevorzugt entlang der Strecke mit dem geringsten Widerstand (siehe Gleichung 7). In dem konventionellen Design entspricht dies dem Bereich auf der Elektrode nahe des *Tabs*. Die auftretenden Stromabweichungen sind unerwünscht, da sie zur Entstehung von lokalen “Elektroden-Hotspots” führen. Hier treten Spannungsüberhöhungen auf, welche chemische Reaktionen hervorrufen die die Lebensdauer der Zelle reduzieren. Ein Beispiel einer solchen Reaktion ist Lithium-Plating.³⁶

$$I = \frac{U}{R} \quad (7)$$

Die innovativen Konzepte bieten laut Patentschrift auch verbesserte Wärmeentstehungs- und Wärmeübertragungseigenschaften.

Nach Gleichung 8 ist die ohm'sche Erhitzung in $[W]$ abhängig von dem Strom und dem Wider-

³³ Vgl. Tsuruta et al. (Cell with a tabless electrode) 2020.

³⁴ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020

³⁵ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020

³⁶ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020

stand.

$$P \approx I^2 \cdot R \quad (8)$$

Da der Widerstand des Elektrodenableiters **R** zwischen 5 und 20 mal kleiner ist als beim konventionellen Entwurf ist zu erwarten, dass beim innovativen Design die ohm'sche Wärmeproduktion signifikant reduziert ist.

Die trotz der Maßnahmen entstehende Wärme kann effizienter abgeführt werden.

$$\dot{Q} = \frac{k \cdot A \cdot (T_2 - T_1)}{d} \quad (9)$$

Gleichung 9 beschreibt den Wärmetransport durch ein wärmeleitendes Medium. \dot{Q} ist der Wärmestrom in $[\frac{\text{Joule}}{\text{Sekunde}}]$. k ist der Wärmeleitkoeffizient des Materials in $[\frac{\text{W}}{\text{mK}}]$. Die Fläche A in $[\text{m}^2]$ und die Distanz d in $[\text{m}]$ sind die geometrischen Dimensionen über die der Transfer stattfindet. Der Term $(T_2 - T_1)$ entspricht der Temperaturdifferenz über d .

In konventionellen Batteriezellen wird die Kontaktfläche zwischen Elektrode und Batteriegehäuse vom *Tab* realisiert. Beim innovativen Entwurf entspricht der Kontakt zwischen Elektrode und Gehäuse der gesamten Elektrodenlänge. Der Bereich (1) der Elektrode in Abbildung 3.3 befindet sich im Kontakt mit dem Gehäuse und nimmt effektiv 100% des Durchmessers des Batteriezylinders ein. Die signifikant größere Kontaktfläche ermöglicht erhöhte Wärmeleitung und dadurch eine optimierte Temperaturkontrolle der Batteriezelle.³⁷

Inhalte des Patents

In der Patentschrift wird auch auf mögliche Herstellungsvorgänge für die Elektrodenbeschichtung eingegangen. Da diese Arbeit sich mit den physikalischen Vorgängen in der Batteriezelle auseinandersetzt wird die Produktion an dieser Stelle nicht weiter behandelt. Bei Interesse an der Produktion wird die Patentschrift als weiterführende Literatur empfohlen. Es werden verschiedene Konfigurationen der Elektrodenwickel beschrieben. In Abbildung 3.3 ist ein Beispiel für eine "Jelly-Roll" zu sehen.

Die Kathode oder Anode (3) wird mit dem Aktivmaterial beschichtet. Dabei kann der leitende Teil an dem unteren Ende der Elektrode (1) durch eine isolierende Schicht (2) von dem Aktivmaterial getrennt werden. Diese Schicht ist in manchen Konfigurationen des Patents jedoch nicht vorhanden.

Zwischen die beiden Elektroden wird eine Trennschicht eingebracht (4). Da die Elektroden gewickelt werden, wird nach der Anode oder Kathode (5) eine weitere, äußere Trennschicht (6) eingebracht. Diese 4 Schichten werden dann um eine zentrale Achse **AA'** gewickelt. (7) zeigt das *Tab* der Anode oder Kathode, welches mit der oberen Seite des Gehäuses verbunden wird.

³⁷ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020

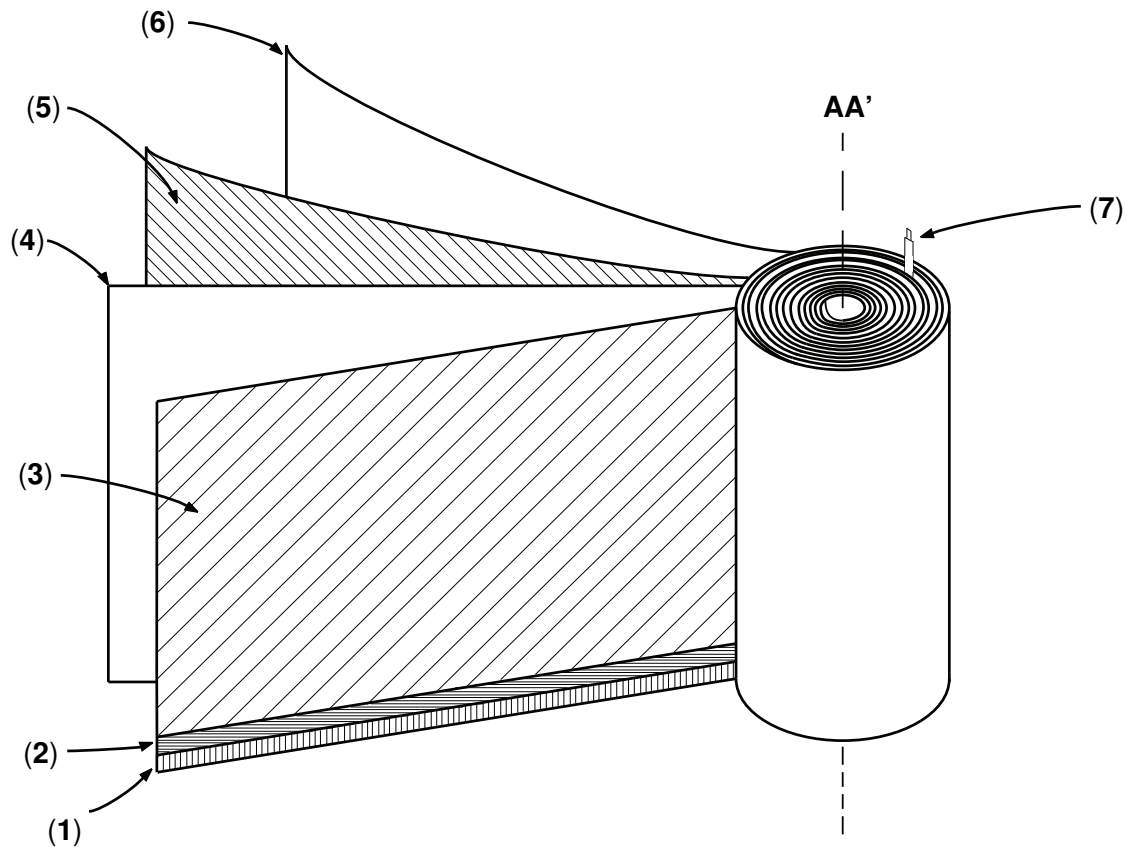


Abbildung 3.3: Aufbau des Elektrodenwickels in der zylindrischen Zelle in Anlehnung an Tesla Patent, Tsuruta et al. 2020

Tabelle 3.3: Beschriftung von Abbildung 3.3

Nummer	Beschreibung
(1)	Leitfähiges Material
(2)	Isolierendes Material
(3)	Kathoden-/Anodenmaterial
(4)	Innere Separator
(5)	Anoden-/Kathodenmaterial
(6)	Äußerer Separator
(7)	Tab

Der Kontakt zwischen Elektrodenwickel und Cap

Damit der leitende Teil der Elektrode Kontakt zum entsprechenden Pol des Batteriegehäuses hat, wird ein Ende des Batteriezylinders mit einer *Cap* versehen. Das *Cap* besteht aus einem leitenden Material, zum Beispiel einer Nickel-Legierung³⁸.

Dieser Deckel kann für eine optimierte Anbindung des Elektrodenwickels in verschiedenen Konfigurationen vorhanden sein. Diese Modifikationen der *Cap* können unter anderem Nuten, Erhebungen und Aussparungen, sowie andere nicht beschriebene Merkmale sein.

Der Kontakt zwischen Elektrodenwickel und *Cap* kann mit mehreren Konzepten verwirklicht

³⁸ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020, S. 1

werden. Einer davon ist eine Pressverbindung, bei der das *Cap* und die Kathode oder Anode durch Druck miteinander in Berührung kommen.

Damit für die Verbindung zwischen *Cap* und Kathode, bzw. Anode mehr Oberfläche verfügbar ist, kann das *Cap* so ausgelegt sein, dass es mit dem leitenden Teil der Elektrode (Abbildung 3.3 (1)) einen möglichst schlüssigen Kontakt hat. Um die benötigte Presskraft aufzubringen kann oberhalb des Elektrodenwickels ein isolierendes Material eingebracht werden, welches die Elektrode gegen die *Cap* presst. Die Verbindung kann auch durch Anschwellen der Anode durch den Elektrolyten oder durch Laser- oder Ultraschallschweißen realisiert werden.

Für einen möglichst guten Kontakt können wie in Abbildung 3.4 Nuten in das *Cap* gefräst werden. Die Nuten sollten in der Größenordnung des leitenden Elektrodenteils sein. In der Patentschrift sind hier zwischen 0.01 mm und 0.1 mm angegeben.

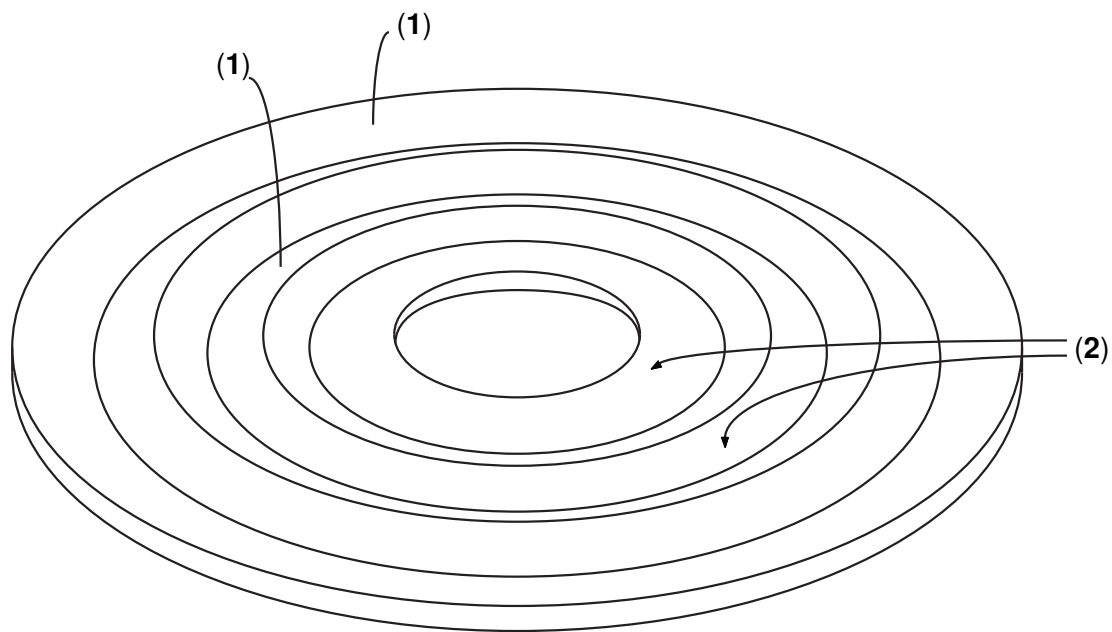


Abbildung 3.4: Beispielhafter Deckel oder Cap des Batteriezellgehäuses in Anlehnung an Tesla Patent, Tsuruta et al. 2020

Tabelle 3.4: Beschriftung von Abbildung 3.4

Nummer	Beschreibung
(1)	Nut
(2)	Kontaktfläche

Wie in Abbildung 3.5 b) gezeigt kann die Verbindung zwischen Elektrode und Batteriegehäuse auch ohne eine spezielle *Cap* hergestellt werden. Hierzu werden die leitenden Teile des Elektrodenwickels zum Teil miteinander oder direkt mit dem Gehäuse verbunden.

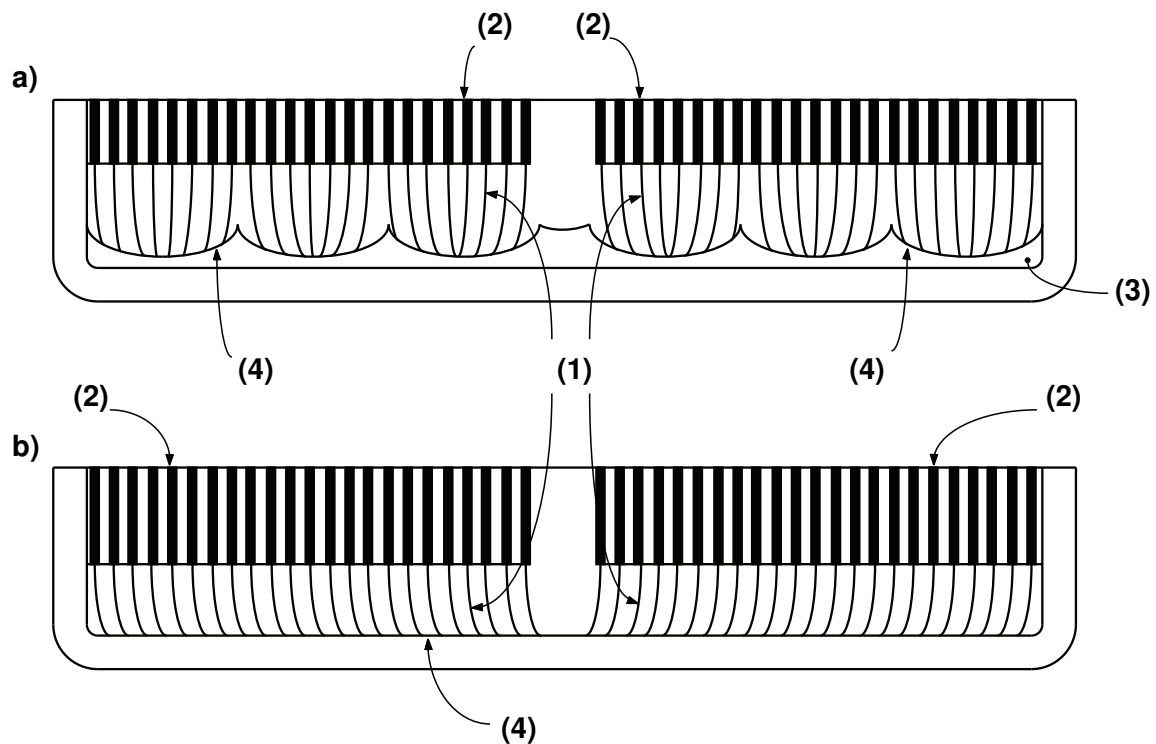


Abbildung 3.5: Verbindungsmöglichkeiten des Elektrodenwickels mit dem Batteriegehäuse nach Tesla Patent, Tsuruta et al. 2020

a) Verbindung mit Cap
b) Verbindung ohne Cap

Tabelle 3.5: Beschriftung von Abbildung 3.5

Nummer	Beschreibung
(1)	Leitender Elektrodenteil
(2)	Elektrodenwickel
(3)	Cap
(4)	Kontaktfläche

Imperfektionen können durch Fehler im Herstellungsprozess entstehen. Leitendes Material kann über sich selbst gefaltet sein und dadurch den Kontakt zwischen Elektrodenwickel und Cap, bzw. Gehäuse negativ beeinflussen. Um diesen Effekten entgegen zu wirken können wie in Abbildung 3.7 gezeigt ist Abschnitte des leitenden Teils der Elektrode entfernt werden. Mögliche Vorgehensweisen sind die Entfernung von Material in festen Abständen (Abbildung 3.6 a)) oder in größer werdenden Abständen (Abbildung 3.6 b)). Bei b) kann die Anordnung so gewählt werden, dass nach der Wicklung der Elektrode die leitenden Teile ein rotationssymmetrisches Muster bilden.³⁹

³⁹ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020, S. 5

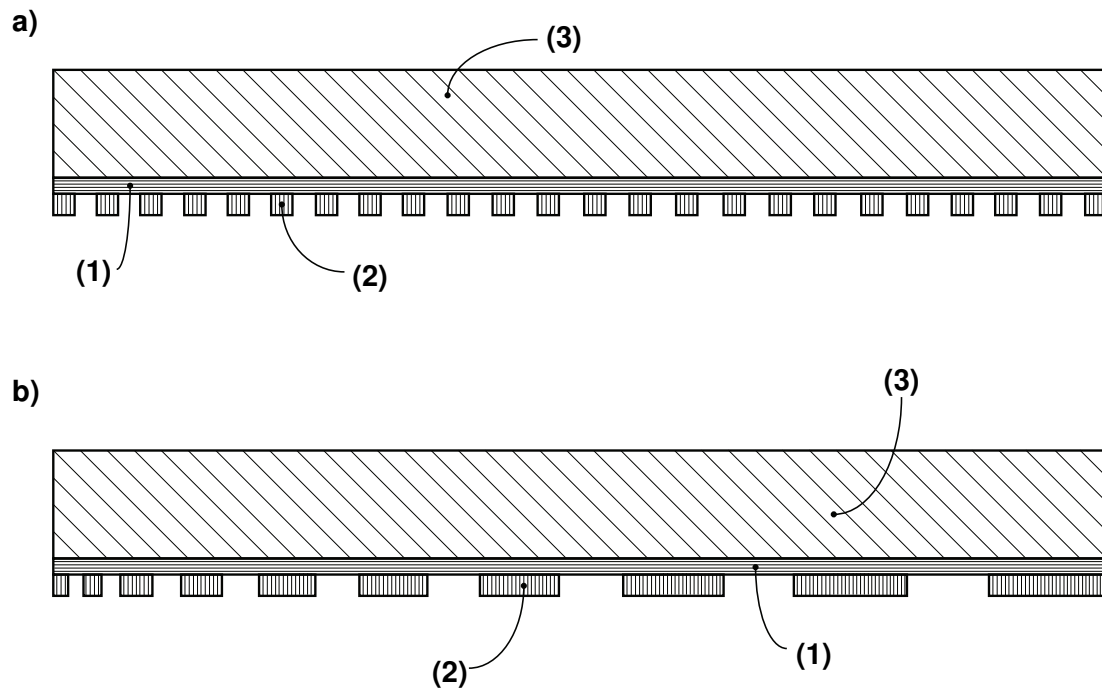


Abbildung 3.6: Verschiedene Varianten der Auslegung des leitenden Teils der Elektrode nach Tesla Patent, Tsuruta et al. 2020

Tabelle 3.6: Beschriftung von Abbildung 3.6

Nummer	Beschreibung
(1)	Isolierende Schicht
(2)	Leitender Teil
(3)	Elektrode

Ist zwischen Elektrode und Batteriegewölbe ein *Cap* eingebracht kann diese so ausgelegt werden, dass der leitende Teil der Elektrode mit der *Cap* in Verbindung gebracht wird. Abbildung 3.7 a), b) und c) zeigen verschiedene Ansätze für die Verbindung mit dem leitenden Teil.

Bei a) kann der leitende Teil wie in Abbildung 3.6 b) dargestellt ist angebracht werden. Das *Cap* ist mit konzentrischen Nuten versehen, die wie in dem Querschnitt zu erkennen ist, mit einer 90°-Kante versehen ist.

C) verfolgt das gleiche Konzept wie a), jedoch ist hier die Auslegung der Nut spiralförmig gewählt. So kann die spiralförmige Wicklung der zu verbindenden Elektrode passgenau an der *Cap* angebracht werden.

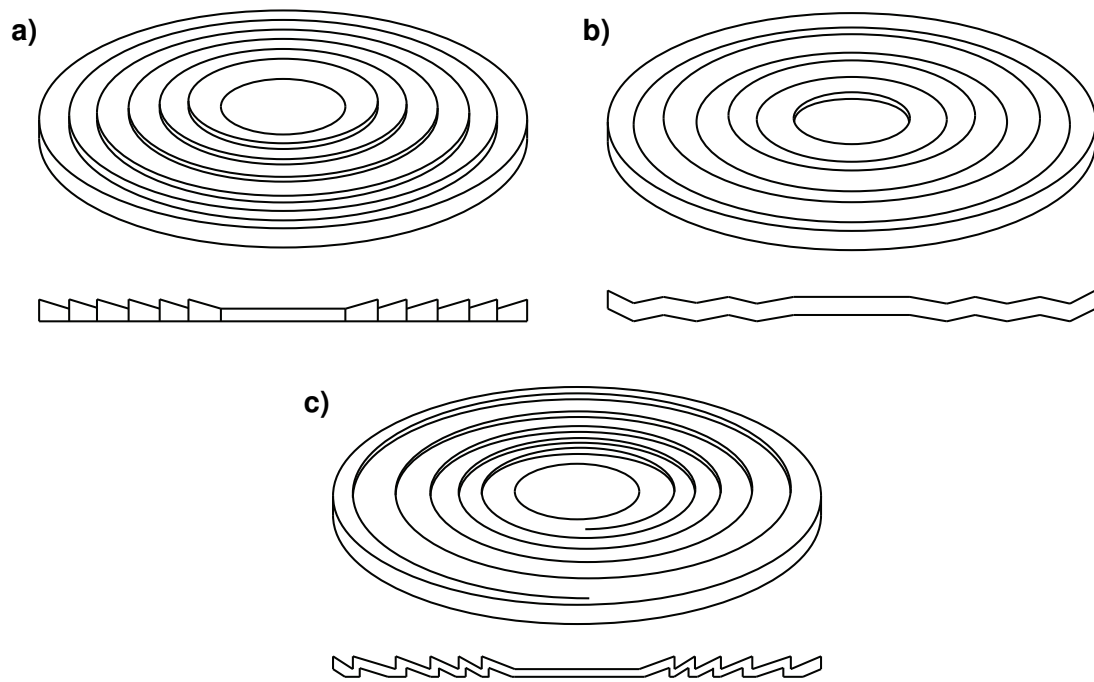


Abbildung 3.7: Verschiedene Cap-Varianten mit Schnittansicht nach Tesla Patent, Tsuruta et al. 2020

3.3. Batteriesimulation

Das Simulationsprogramm

Um die prismatische Batterie zu modellieren und simulieren sind die Programme ANSYS® und COMSOL Multiphysics® geeignet.

COMSOL Multiphysics® (auch bekannt als FEMLAB vor 2005) ist ein kommerzielles Simulationsprogramm auf Basis der Finite-Elemente-Methode⁴⁰. Das Programm wird vermehrt in analytischer Elektrochemie eingesetzt⁴¹. Da COMSOL® dem Benutzer erlaubt über “physics interfaces” direkt auf die partiellen Differentialgleichungen des Simulationsmodells Einfluss zu nehmen, ist es für Benutzer kontrollierte Physik-Konfigurationen gut geeignet. Nach Klymenko et al. sind die Resultate aus COMSOL® mit entsprechender Benutzerexpertise von hohem Gütegrad⁴².

ANSYS® stellt eine gute Alternative für die Simulation dar. Aufgrund seiner effizienten Solver ist es vor allem für industrielle Anwendungen geeignet, während COMSOL® sich im Forschungsbe-
reich als anwendungsfreundlicher erweist. Beide Programme eignen sich gut für die Simulation von Lithium-Ionen Batterien. Jedoch ermöglicht COMSOL Multiphysics® im Vergleich zu Ansys® einen flexibleren Modellaufbau, weshalb es für die Simulation in dieser Arbeit ausgewählt wurde.⁴³

COMSOL Multiphysics®

Der Term “Multiphysics” beschreibt die Zusammenführung und Kopplung verschiedener physikalischer Phänomene. In Praxis ist es die Zusammenstellung diverser partieller Differentialgleichungen in einem Modell.

Beispielsweise kombiniert die Analyse von Brennstoffzellen Strömungsmechanik, Massentransport, Wärmeübertragung und Ladungsübertragung. In COMSOL® werden die benötigten Differentialgleichungen in “physics interfaces” implementiert. Diese bestehen aus verfügbaren Paketen von physikalischen Gleichungen. Die Randbedingungen können auch in den Interfaces gewählt werden.

Klassisch werden in der Modellierung von elektrochemischen Energiespeichern die folgenden Interfaces eingebunden:⁴⁴

- Primary/Secondary/Tertiary Current Distribution
- Electroanalysis

In COMSOL® existiert bereits ein mathematisches Modell einer Lithium-Ionen-Batterie. Dieses ist ausreichend für die Simulation, muss jedoch noch um den thermischen Aspekt erweitert werden.

Modellierung einer Lithium-Ionen-Batterie in COMSOL® mit thermischen Effekten

Um Lithium-Ionen-Batterien zu simulieren, müssen thermische und elektrochemische Vorgänge simultan berechnet werden. Aufbauend von den Modellen von Shepherd⁴⁵ und Nasar und

⁴⁰ Vgl. COMSOL (Comsol Website) 2021.

⁴¹ Vgl. Dickinson et al. (COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review) 2014, S.74.

⁴² Vgl. Klymenko et al. (A new approach for the simulation of electrochemiluminescence (ECL)) 2013.

⁴³ Vgl. Salvi et al. (Numerical modeling of continuous flow microwave heating: a critical comparison of COMSOL and ANSYS) 2010, S.196.

⁴⁴ Vgl. Fußnote 41, Dickinson et al. 2014, S. 72

⁴⁵ Vgl. Shepherd (Design of Primary and Secondary Cells) 1965.

Unnewehr⁴⁶, welche nur Ladezyklen mit konstantem Stromfluss abbilden können, beschreiben Fink und Kaltenegger ein elektrothermisches Modell (ET) das die dynamische Entspannung und das zeitabhängige Verhalten der Batterie aufgrund von Stromimpulsen beschreiben kann.⁴⁷ Das elektrochemische Modell der Batterie bauen Fink und Kaltenegger auf dem ein-dimensionalen Modell von Doyle⁴⁸ auf. Das Modell kann die zeitliche Ausbildung und räumliche Verteilung von elektronischen und ionischen Potentialen, Lithiumkonzentrationen in Feststoffen und dem Elektrolyten, sowie die Temperatur für arbiträre Lastprofile abbilden.⁴⁹ Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über die mathematischen Modelle gegeben. Die Simulationsumgebung, Randbedingung, Materialien und Parameter werden in Kapitel [RE-FERENZ SIMULATIONSKAPITEL] ausgeführt.

Stromabnehmer

Das elektrische Potential Φ_{ele} wird mit Hilfe der Erhaltungsgleichung elektrischer Ladung, Gleichung 10, in beiden Modellen (ET und EC) berechnet. Dabei ist \vec{i}_{ele} die Stromdichte, σ_c , ρ_c und $c_{p,c}$ entsprechen Leitfähigkeit, Dichte und spezifischen Wärmekapazität des Stromableiters. T ist immer die absolute Temperatur in Kelvin.

$$\nabla \cdot \vec{i}_{ele} = 0 \quad (10)$$

$$\vec{i}_{ele} = -\sigma_c \nabla \Phi_{ele} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho_c c_{p,c} T)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = -\vec{i}_{ele} \cdot \nabla \Phi_{ele} \quad (12)$$

Gleichung 11 beschreibt hier die Stromdichte, Gleichung 12 die Energiegleichung.

$$\vec{q} = \lambda_{ht,c} T \quad (13)$$

Der Wärmeleitstrom \vec{q} wird in Gleichung 13 mit der Wärmeleitfähigkeit des Stromableiters, $\lambda_{ht,c}$ aufgestellt.

⁴⁶ Vgl. Nasar und Unnewehr (Electric Vehicle Technology) 1982.

⁴⁷ Vgl. Fink und Kaltenegger (Electrothermal and Electrochemical Modeling of Lithium-ion Batteries: 3D Simulation with Experimental Validation) 2014, S. 105-124.

⁴⁸ Vgl. Doyle und Newman (Comparison of Modeling Predictions with Experimental Data from Plastic Lithium Ion Cells) 1996, S. 1890-1903.

⁴⁹ Vgl. Fußnote 47, Fink und Kaltenegger 2014, S. 106

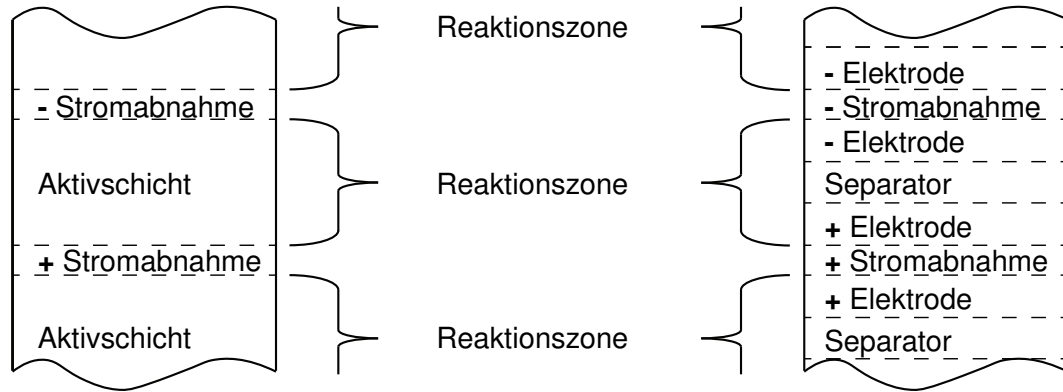


Abbildung 3.8: Vgl. Schichtenmodell der EC- und ET-Modelle nach Fink 2014

Reaktionszone - ET-Modell

Die Reaktionszone besteht wie in Abbildung 3.8 gezeigt aus positiver und negativer Elektrode und einem Separator.

Im elektrothermischen Modell (ET) sind die drei Teile zu einer Aktivschicht vereint. Hier befindet sich im Modell eine Wärmequelle. Die Reaktionsstromdichte wird in dem Interface Aktivschicht/Stromabnehmer aus einer empirischen Gleichung berechnet. Die Energiegleichung in der Aktivschicht ist in Gleichung 14 beschrieben. Hier steht *al* für "active layer". $U_{OC,emp}$ entspricht der lokalen Leerlaufspannung. $\Delta\Phi_{ele}$ ist die lokale Potentialdifferenz zwischen positiver und negativer Elektrode und L_{al} ist die Dicke der Aktivschicht.

$$\frac{\partial(\rho_{al}c_{p,al}T)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = \frac{i_{emp}(U_{oc,emp} - \Delta\Phi_{ele})}{L_{al}} \quad (14)$$

Der Wärmeleitstrom folgt nach Gleichung 13 mit Gleichung 15.

$$\vec{q} = - \begin{pmatrix} \lambda_{ht,al,x} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{ht,al,y} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{ht,al,z} \end{pmatrix} \nabla T \quad (15)$$

i_{emp} und $U_{oc,emp}$ werden aus den Interfaceverbindungs-gleichungen nach Fink und Kaltenegger berechnet.⁵⁰

Reaktionszone - EC-Modell

Mit Hilfe der Ladungserhaltungsgleichungen 16 werden die elektrischen (*e/e*) und ionischen (*ion*) Potentiale im Elektrolyt aus der Reaktionsstromdichte i_r und der Partikeloberfläche a_s berechnet.

$$\nabla \cdot \vec{i}_{ele} = -i_r a_s, \quad \nabla \cdot \vec{i}_{ion} = i_r a_s \quad (16)$$

⁵⁰ Vgl. Fußnote 47, Fink und Kaltenegger 2014, S. 110

Die elektrischen und ionischen Stromdichten werden nach Gleichung 17 mit der Leitfähigkeit κ und der Permittivität ε bestimmt. R ist die Gaskonstante, t^+ die Kation-Transferenzzahl und F die Faraday-Konstante.

$$\vec{j}_{ele} = -\sigma_s \varepsilon_s \nabla \Phi_{ele}, \quad \vec{j}_{ion} = -\kappa \varepsilon_e^q \left(\nabla \Phi_{ion} - \frac{2 \cdot RT(1 - t^+) \nabla c_e}{F c_e} \right) \quad (17)$$

Die ionische Leitfähigkeit κ ist von der Lithium-Salz-Konzentration und der Temperatur abhängig und wird mit Hilfe der Aktivierungsenthalpie $E_{act,\kappa}$, nach Gleichung 18 berechnet.

$$\kappa = \kappa_{ref}(c_e) \cdot \exp \left[\frac{E_{act,\kappa}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (18)$$

Die Reaktionsstromdichte i_r aus Gleichung 16 erhält man aus der Butler-Volmer-Gleichung mit den anionischen und kationischen Transferkoeffizienten k_c und k_a (Gleichung 19).

$$i_r = r_0 \left[\exp \left(\frac{k_a F}{RT} \eta_{act} \right) - \exp \left(-\frac{k_c F}{RT} \eta_{act} \right) \right] \quad (19)$$

mit dem Aktivierungsüberpotential η_{act} aus Gleichung 20 und der Austauschstromdichte i_0 aus Gleichung 21, das aus dem Verhältnis der Lithiumsalz-Konzentration im Elektrolyten c_e und der Lithium-Konzentration im Elektrodenpartikel c_s berechnet wird.

$$\eta_{act} = \Phi_{ele} - \Phi_{ion} - \Phi_{oc} \quad (20)$$

$$i_0 = i_{0,ini} \left(\frac{c_e}{c_{e,ini}} \right)^{k_a} \left(\frac{c_{s,max} - c_{se}}{c_{s,max} - c_{s,ini}} \right)^{k_a} \left(\frac{c_{se}}{c_{s,ini}} \right)^{k_c} \exp \left[\frac{E_{act,i_0}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (21)$$

Mit der Annahme, dass die Elektrodenpartikel sphärisch mit einem durchschnittlichen Radius r_s sind, folgt die Partikeloberfläche pro Volumen a_s mit den Volumenanteilen ε_s und ε_e nach Gleichung 22.

$$a_s = \frac{3 \cdot \varepsilon_s}{r_s} = \frac{3 \cdot (1 - \varepsilon_e - \varepsilon_f)}{r_s} \quad (22)$$

Um die Lithiumkonzentration in den Feststoffpartikeln c_s und die Lithium-Salz-Konzentration c_e im Elektrolyten zu berechnen werden die Transportgleichungen 23 und 24 verwendet.

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(D_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) - \frac{2}{r} \cdot D_s \cdot \frac{\partial c_s}{\partial r} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_e c_e)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j}_e = \frac{(1 - t^+) i_r a_s}{F} \quad (24)$$

Die Diffusionskoeffizienten D_s und D_e und der Lithium-Salz-Diffusionsstrom \vec{j}_e folgen aus

Gleichungen 25 bis 27.

$$\vec{j}_e = -D_e \varepsilon_e^q \nabla c_e \quad (25)$$

$$D_s = D_{s,ref} \cdot \exp \left[\frac{E_{act,D_s}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (26)$$

$$D_e = D_{e,ref} + \delta_1(T - T_{ref}) + \delta_2(T - T_{ref})^2 + \delta_3(T - T_{ref})^3 \quad (27)$$

Die δ aus Gleichung 27 sind Anpassparameter für die Temperaturabhängigkeit von D_e . Weiter werden für das EC-Modell das State-Of-Charge (SOC) und die mittlere Stöchiometrie Θ benötigt. Es wird nach Gleichung 28 definiert.

$$\text{SoC} = \frac{\Theta - \Theta_0}{\Theta_1 - \Theta_0} \quad (28)$$

Die mittlere Stöchiometrie folgt mit der durchschnittlichen Lithiumkonzentration im Partikel \bar{c}_s aus Gleichung 30 nach Gleichung 29.

$$\Theta = \frac{\bar{c}_s}{c_{s,max}} \quad (29)$$

$$\bar{c}_s = \frac{1}{r_s} \int_0^{r_s} c_s(r, t) dr \quad (30)$$

Die maximale Kapazität jeder Elektrode wird aus elektrochemischen und geometrischen Parametern nach Gleichung 31 bestimmt.

$$Q_{max}^+ = \varepsilon_s^+ \cdot V^+ \cdot c_{s,max}^+ \cdot (\Theta_0^+ - \Theta_1^+) \cdot F, \quad Q_{max}^- = \varepsilon_s^- \cdot V^- \cdot c_{s,max}^- \cdot (\Theta_0^- - \Theta_1^-) \cdot F \quad (31)$$

Es wird angenommen, dass die Elektrodenpartikel und der Elektrolyt in thermischem Gleichgewicht stehen. Die Energiegleichung für dieses Gleichgewicht folgt nach Gleichung 32 mit dem phasengemittelten Wärmestrom $\vec{q} = -\bar{\lambda} \nabla T$.⁵¹

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{q} = -\vec{i}_{ele} \cdot \nabla \phi_{ele} - \vec{i}_{ion} \cdot \nabla \phi_{ion} + i_r a_s \eta_{act} \quad (32)$$

ES FEHLEN NOCH BOUNDARY UND COUPLING CONDITIONS, EINFÜGEN INSOFERN ES BENOETIGT WIRD 909090909()()()()

⁵¹ Vgl. Fußnote 47, Fink und Kaltenegger 2014, S. 108-110

3.4. Grundlagen der Wärmeübertragungsmechanismen

Im folgenden Abschnitt werden die für die Simulation und den Entwurf der Batteriezelle benötigten Grundlagen der Wärmeübertragung erläutert.

Nach Böckh und Wetzel wird die Wärmeübertragung in zwei primäre Klassen unterteilt: Wärmeleitung und Strahlung.⁵²

Strahlung

Strahlung ist die Energieabstrahlung durch elektromagnetische Wellen von der Oberfläche fester und flüssiger Körper. Die Strahlung erfolgt primär im sogenannten Infrarotbereich, der zwischen Wellenlängen von 0,8 bis 400 μm liegt.

Elektromagnetische Strahlen die auf einen Körper oder eine Flüssigkeit treffen werden absorbiert, reflektiert oder durchgelassen. Daher gilt immer, dass die zuvor genannten Phänomene in Summe Eins ergeben. D.h., wenn α das Absorptionsverhältnis, ρ den Reflektionsanteil und τ den durchgelassenen Anteil darstellt, folgt Gleichung 33.⁵³

$$\alpha_a + \rho_r + \tau = 1 \quad (33)$$

Strahlung - Wärmestromdichte

Anhand eines schwarzen Körpers, der den Emissionsgrad $\varepsilon = 1$ besitzt, kann man den durch Strahlung abgegebenen Wärmestrom \dot{q} bestimmen. Mit der Wellenlänge λ_{wl} und der Intensität kann man über den gesamten Strahlungsbereich integrieren und erhält Gleichung 34.

$$\dot{q}_s = \int_{\lambda_{wl}=0}^{\lambda_{wl}=\infty} i_{\lambda_{wl},s} \cdot d\lambda_{wl} = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot h^4 \cdot c^2} = \sigma \cdot T^4 \quad (34)$$

σ ist die Stefan-Boltzmann Konstante und wird in der Praxis mit dem Wert $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ genutzt.

Für Körper die nicht schwarz sind, wird Gleichung 34 noch mit dem Emissionsgrad des Körpers multipliziert.⁵⁴

Strahlung - Sichtfaktoren

Die Sichtfaktoren sind dimensionslose Faktoren, die Angeben wie viel Strahlung zwei Objekte miteinander austauschen. Sie sind dein Anteil der gesamten vom Körper abgegebenen Strahlung und hängen von der Geometrie und Position der Objekte ab.⁵⁵

Wärmeleitung in Stoffen

In Stoffen die einen Temperaturgradienten aufweisen entsteht Wärmeleitung. Es wird weiter zwischen ruhenden und fließenden Stoffen unterschieden, jedoch sind für diese Arbeit nur die ruhenden Feststoffe relevant. Daher hängt die Wärmeleitung nur von den Stoffeigenschaften und dem Temperaturgradienten ab.

Je größer der Temperaturgradient, desto mehr Wärme fließt in Richtung der niedrigeren

⁵² Vgl. Böckh und Wetzel (Wärmeübertragung) 2017, S. 4.

⁵³ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 225-226

⁵⁴ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 229

⁵⁵ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017

Temperatur.

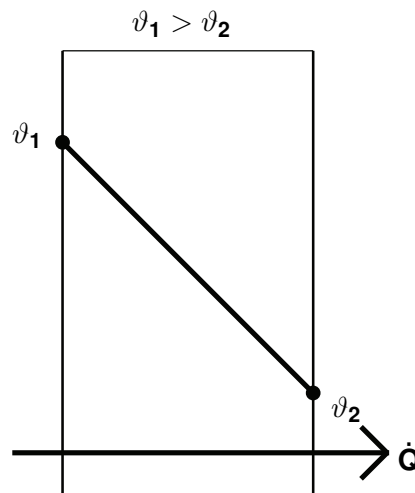


Abbildung 3.9: Vgl. Wärmeleitung nach Böckh und Wenkel 2017

Um die Nomenklatur zu vereinfachen, wird hier analog zu Böckh und Wetzel⁵⁶ ϑ für die Temperatur in Grad Celsius und für die absolute Temperatur T verwendet.

Wärmeleitung - Wärmestrom und Wärmestromdichte

Wärmeströme \dot{Q} werden in Watt [W] angegeben. Sie sind ein Maß dafür, wie viel Wärme pro Zeiteinheit übertragen wird. Bezieht man den Wärmestrom auf die Fläche durch den er fließt wird daraus die Wärmestromdichte \dot{q} in [W/m²].⁵⁷

Wärmeleitung - Wärmeübergangszahl α

Die Wärmeübergangszahl wird in der Einheit [W/m²K] angegeben und beschreibt den Wärmestrom der pro Flächeneinheit und Grad Temperaturdifferenz übertragen wird.⁵⁸

Wärmeleitung - Wärmeleitfähigkeit λ

Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt den Wärmestrom, der pro Längeneinheit entlang des Wärmegradienten und pro Grad Temperaturdifferenz in einem Material übertragen werden kann. Sie wird in der Dimension [W/mK] angegeben. In Feststoffen kann die Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit meist vernachlässigt werden.

Für diese Arbeit ist auch relevant, dass gute elektrische Leiter meist auch gute Wärmeleiter sind.⁵⁹

Instationäre Wärmeleitung

Böckh und Wetzel⁶⁰ leiten am Beispiel der unendlich großen, ebenen Platte die partielle

⁵⁶ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 5

⁵⁷ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 5

⁵⁸ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 6

⁵⁹ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 10

⁶⁰ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 50

Differentialgleichung der instationären, dreidimensionalen Wärmeleitung in Gleichung 35 her.⁶¹

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} = a \cdot \nabla^2 \vartheta \quad (35)$$

Dabei ist a die *Temperaturleitfähigkeit* des Materials mit der Dimension $[\mathbf{m}^2/\mathbf{s}]$. Sie hängt nach Gleichung 36 von der Wärmeleitfähigkeit λ , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c_p des Materials ab.⁶²

$$a = \frac{\lambda_{ht}}{\rho c_p} \quad (36)$$

Eine wichtige Kennzahl für Wärmeübertragungsprobleme ist die Biot-Zahl (**Bi**). Sie gibt nach Gleichung 37 das Verhältnis der inneren zu der äußeren Wärmeübergangszahl eines Körpers an.

$$Bi = \frac{\alpha \cdot s}{\lambda_{ht}} \quad (37)$$

Mit Hilfe der mittleren Temperatur kann auch die über einen Zeitraum zugeführte oder entfernte Wärme bestimmt werden. Die Enthalpie wird mit der mittleren und der Anfangstemperatur berechnet.⁶³

$$Q = H_a - \bar{H} = m \cdot (h_a - \bar{h}) = m \cdot c_p \cdot (\vartheta_A - \bar{\vartheta}) \quad (38)$$

Wärmeübertragung zwischen zwei Festkörpern (Gekoppelte Systeme)

Miteinander im Kontakt stehende Festkörper unterschiedlicher Temperaturen weisen nach beliebig kurzer Zeit an den sich berührenden Oberflächen die Kontakttemperatur ϑ_K auf.⁶⁴ Stellt man den Wärmestrom in beiden Körpern nach den Gesetzen der Energieerhaltung gleich, folgt mit den Gleichungen für den Wärmestrom an der Oberfläche eines Festkörpers nach Böckh und Wetzel 2017, S. 66 (Gleichung 2.77), Gleichung 39.

$$\sqrt{\lambda_{ht,1} \cdot \rho_1 \cdot c_{p,1}} \cdot (\vartheta_{A1} - \vartheta_K) = \sqrt{\lambda_{ht,2} \cdot \rho_2 \cdot c_{p,2}} \cdot (\vartheta_K - \vartheta_{A2}) \quad (39)$$

Gleichung 39 kann man nach ϑ_K umstellen und erhält Gleichung 40.

$$\vartheta_K = \left(\vartheta_{A1} + \sqrt{\frac{\lambda_{ht,2} \cdot \rho_2 \cdot c_{p,2}}{\lambda_{ht,1} \cdot \rho_1 \cdot c_{p,1}}} \cdot \vartheta_{A2} \right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{\lambda_{ht,2} \cdot \rho_2 \cdot c_{p,2}}{\lambda_{ht,1} \cdot \rho_1 \cdot c_{p,1}}} \right)^{-1} \quad (40)$$

Lösung der instationären, dreidimensionalen Wärmeleitungsgleichung

Momentan ist Gleichung 35 nur numerisch lösbar. Daher muss Gleichung 35 zuerst diskretisiert werden. Diskretisierung ist der Vorgang, bei dem ein kontinuierliches, reales System in

⁶¹ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 52

⁶² Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 51

⁶³ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 56

⁶⁴ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 66

viele individuelle Punkte unterteilt wird. Zwischen diesen Punkten können dann die Differenzen der gesuchten physikalischen Größen mit vergleichsweise weniger Rechenaufwand ermittelt werden.

Mit Hilfe der Taylor-Reihe aus Gleichung 41 kann man die Differentialgleichung zu einer Differenzengleichung annähern.⁶⁵

$$f(\xi + \Delta\xi) = \sum_{n=0}^{\infty} \left. \frac{\partial^n f}{\partial \xi^n} \right|_{\xi} \frac{(\Delta\xi)^n}{n!} \quad (41)$$

Wenn man für die benachbarten Punkte eines beliebigen Punktes $P(i, j, k)$ im Raum zum Zeitpunkt t die Taylor-Reihen aufschreibt und dann die entstehenden Gleichungen ineinander einsetzt, erhält man eine diskretisierte Differenzengleichung.

Dieses Verfahren bildet jeweils zentrale Differenzen, weshalb es auch als FTCS-Verfahren (Forward Time Center Space) bezeichnet wird.⁶⁶

Die Differenzengleichung kann dann in einem diskretisierten Volumen mit Hilfe der Finite-Elemente Methode gelöst werden.

⁶⁵ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 77

⁶⁶ Vgl. Fußnote 52, Böckh und Wetzel 2017, S. 80

4. Innovative Batteriezellkonzepte

In diesem Kapitel werden zuerst die Inhalte des Tesla Patents nach Tsuruta et al. auf eine prismatische Zelle mit querliegenden Elektrodenwickel erweitert. Dann wird Anhand von Wärmeübertragungsmechanismen die effektivste Variation der innovativen Batteriegestaltungsmöglichkeiten für die Simulation ausgewählt.

4.1. Lage des Elektrodenwickels

In der prismatischen Zelle kann der Elektrodenwickel waagrecht oder senkrecht installiert werden. Da die Stromabnahme an der Oberseite des Batteriegehäuses stattfindet, ist es von Vorteil die Flachwickelelektrode oder die Stapelelektrode waagrecht, wie in Abbildung 4.1 dargestellt ist, in dem Batteriegehäuse einzubringen um die Distanz von Elektroden-Tab zum Anschluss zu minimieren.⁶⁷

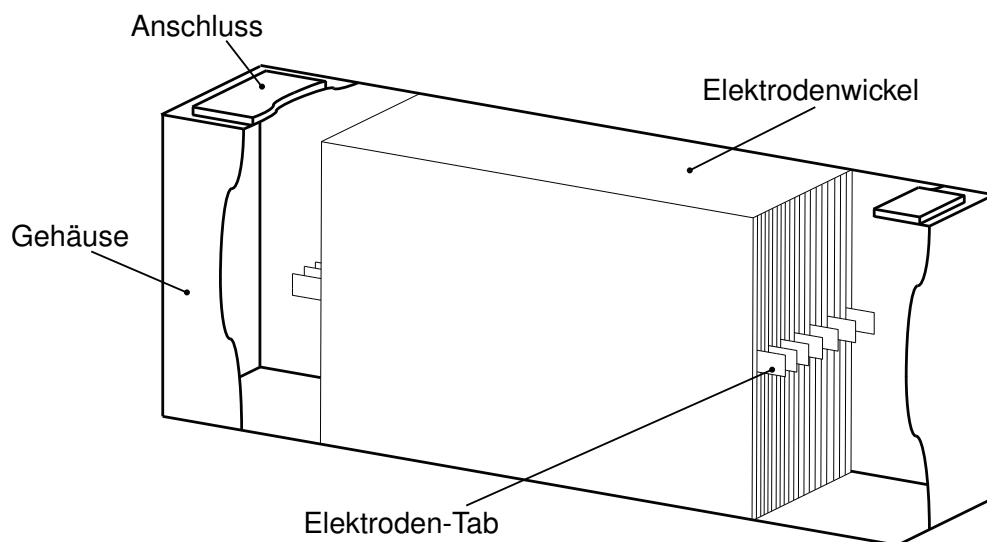


Abbildung 4.1: Orientierung des Elektrodenwickels in der prismatischen Zelle

4.2. Batteriegeometrie

Die Batteriegeometrie wird nach DIN 91252 dimensioniert.⁶⁸

Für die Maße des Batteriegehäuses werden die Maße für die **BEV-1**-Batteriezelle gewählt, da die Batteriezellen aus dem Tesla Patent nach Tsuruta et al. für batterieelektrische Fahrzeuge ausgelegt ist.⁶⁹

In Abbildung 4.2 ist das Gehäuse der Batteriezelle abgebildet. Die Maße sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

⁶⁷ Vgl. Fußnote 8, Wöhrle 2013

⁶⁸ Vgl. (Elektrische Straßenfahrzeuge - Batteriesysteme: Anforderungen an die Gestaltung von Lithium-Ionen Batteriezellen) November 2016.

⁶⁹ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020

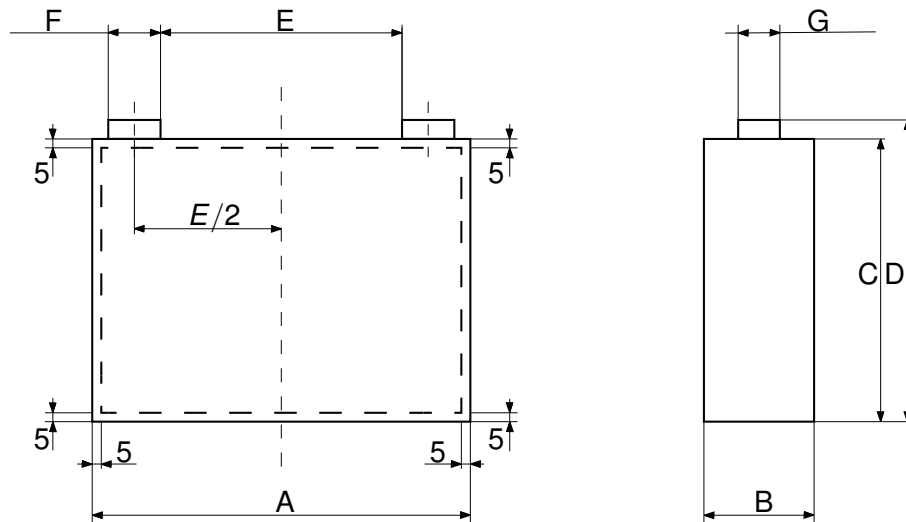


Abbildung 4.2: Vgl. Maße des Batteriegehäuses nach DIN 91252

Tabelle 4.1: Maße des Batteriegehäuses aus Abbildung 4.2

Bezeichnung	Maß in [mm]	Umschreibung
A	173	Zelllänge
B	32	Zellbreite
C	115	Zellhöhe ohne Anschlüsse
D	≤ 123	Zellhöhe mit Anschlüssen
E	133 (sym)	Entfernung zwischen Anschlüssen
F	≤ 24	Anschlusslänge
G	$\leq 18,4$	Anschlussbreite

Das Gehäuse wird aus Aluminium oder Edelstahl hergestellt. Zusammen mit den Separatoren, Stromableitern und dem Elektrolyt stellt das Gehäuse die passive Anteile der Batterie dar.⁷⁰ Für diese Arbeit wird für das Gehäuse Aluminium verwendet, da es aufgrund seiner geringeren Dichte einen Gewichtsvorteil gegenüber Edelstahl darstellt.⁷¹

Der Elektrodenwickel wird so dimensioniert, dass bei der konventionellen und innovativen Batteriezelle die äußere Separatorschicht das Batteriegehäuse an den Seiten und der Unterseite berührt um eine maximale Kontaktkühlfläche zu gewährleisten. Die genauen Maße des konventionellen Elektrodenwickels sind in Abbildung 4.3 mit Tabelle 4.2 dargestellt.

⁷⁰ Vgl. Fußnote 8, Wöhrle 2013, S. 111

⁷¹ Vgl. (Edelstahl Dichte) 2021.

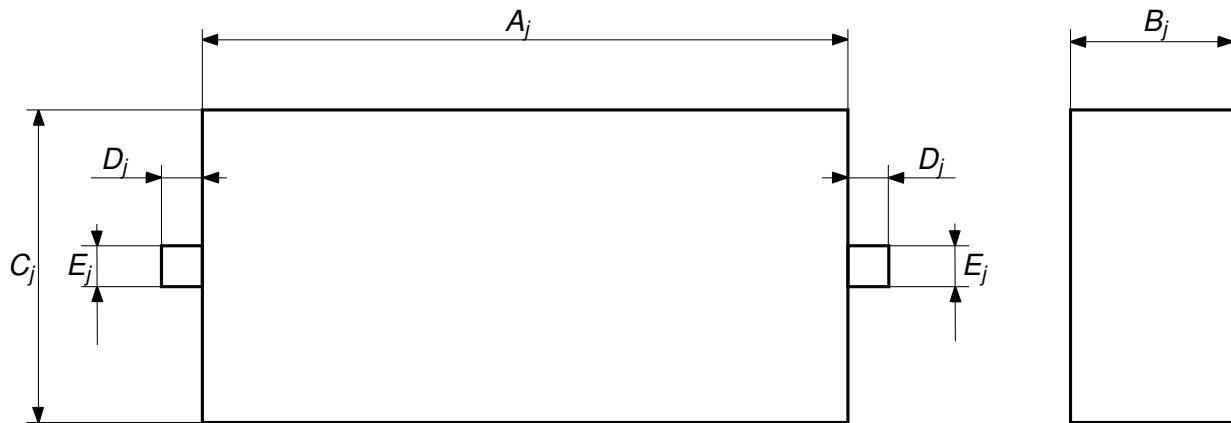


Abbildung 4.3: Maße des konventionellen Elektrodenwickels

Tabelle 4.2: Maße des Elektrodenwickels der konventionellen Zelle aus Abbildung 4.3

Bezeichnung	Maß in [mm]	Umschreibung
A_j	140	Elektrodenwickellänge
B_j	22	Elektrodenwickelbreite
C_j	100	Elektrodenwickelhöhe
D_j	8	Stromableitertabbreite
E_j	8	Stromableitertabhöhe

Um den Strom zu den Anschlüssen zu leiten wird eine Aluminiumkonstruktion benutzt. Zwar hat Kupfer gegenüber Aluminium eine bessere Wärme- und Stromleitfähigkeit, besitzt jedoch eine größere Dichte und ist teurer in der Anschaffung.⁷²

4.3. Ausarbeitung der innovativen Konzepte auf Zellebene

Im Folgenden wird zuerst das Entwicklungsvorgehen beschrieben, anschließend werden innovative Konzepte anhand des Vorgehens ausgearbeitet. Zuletzt wird ein Konzept anhand definierter Kriterien und der Anforderungen an das System ausgewählt und dann als Simulationsmodell aufgebaut.

4.3.1. Aufstellen des Vorgehens nach VDI 2206

Um effizientes Vorgehen bei dem Entwurf der innovativen Batteriezellkonzepte zu ermöglichen, wird die VDI Richtlinie 2206 herangezogen. Die Richtlinie hat den Namen **Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme** und wurde 2004 vom VDI-Ausschuss A127 erarbeitet.⁷³

Die Motivation der VDI 2206 ist das Entwickeln von produktionsreifen Systemen, jedoch handelt diese Arbeit von einer Konzeptentwicklung und -bewertung. Daher werden nur bestimmte Aspekte der Richtlinie in betracht gezogen.

⁷² Vgl. (Kupfer oder Aluminium?) 2021.

⁷³ Vgl. VDI 2206 (VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme) 2004, S. 3.

Das V-Modell

Das V-Modell beschreibt eine allgemeine Vorgehensweise beim Entwurf von Systemen, welches für jede individuelle Problemstellung entsprechend leicht angepasst werden muss.

Es ist gegliedert in 6 Unterpunkte, die zusammen ein iteratives Entwicklungsvorgehen beschreiben. Den Ausgangspunkt bilden die Systemanforderungen. Die Anforderungen sind auch der spätere Bewertungsmaßstab der Entwicklung.

Im Systementwurf findet die Festlegung eines domänenübergreifenden Lösungskonzeptes statt. Um die logischen und physikalischen Mechanismen des Systems zu beschreiben, wird die Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen zerlegt.

Diese Teilfunktionen werden dann im domänenspezifischen Entwurf ausgelegt. Danach werden die Teilfunktionen in der Systemintegration wieder zu dem Gesamtsystem integriert. Während dem Entwurf und der Systemintegration muss anhand der Eigenschaftsabsicherung fortlaufend der Entwurfsfortschritt mit den Anforderungen abgeglichen werden.

Über die Modellbildung und -analyse ist das Endergebnis des durchlaufenen Makrozyklus das Endprodukt oder -system. Meist sind für das Endprodukt mehrere Durchläufe dieses Zyklus nötig.⁷⁴

In Abbildung 4.4 ist das V-Modell abgebildet. Die benötigten Schritte für den Entwurf der innovativen Konzepte und das angepasste V-Modell werden im Folgenden beschrieben.

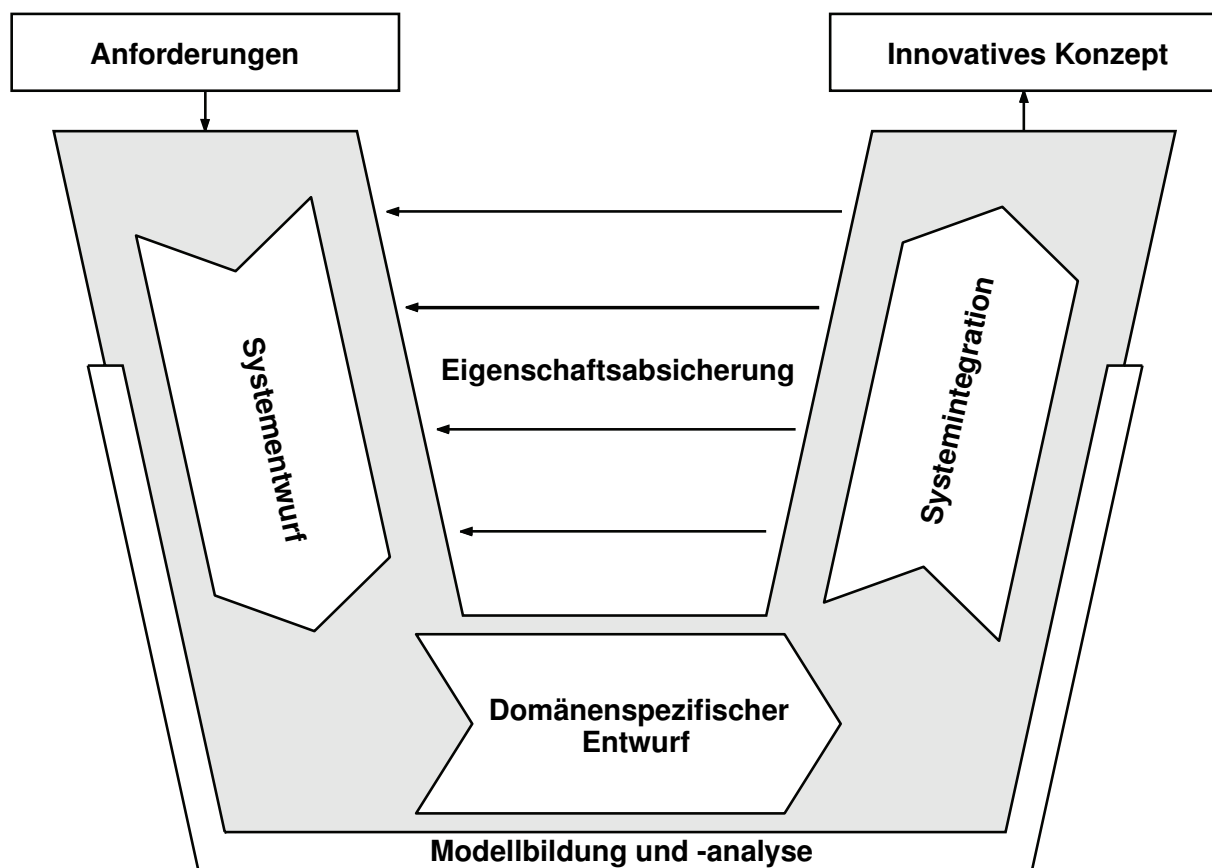


Abbildung 4.4: Vgl. V-Modell nach VDI 2206

⁷⁴ Vgl. Fußnote 73, VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, S. 29-30

Anforderungen an das innovative Konzept

Im Vergleich zur konventionellen Rundzelle beschreiben Tsuruta et al. in ihrem Patent einen geringeren Wärmegradienten in der neuen Zelle und dem Elektrodenwickel, zusammen mit einer verbesserten Kühlung der Lithium-Ionen Batterie.⁷⁵

Die Anforderungen an das innovative Konzept in der prismatischen Zelle gestalten sich ähnlich. Konkret sollte das Konzept größere Wärmeleitung innerhalb der Batteriezelle und dem Elektrodenwickel ermöglichen. Hierdurch soll mit entsprechender Kühlung der Wärmegradient reduziert und somit die Alterungsmechanismen im Wickel vermindert werden.

Zudem soll durch die effizientere Wärmedissipation eine höhere Leistungsabnahme ermöglicht werden.

Zuletzt werden die ökonomischen Aspekte des Konzepts betrachtet. Die Herstellungskosten und Herstellungsprozesskomplexität der innovativen prismatischen Batteriezelle sollten gleich zur konventionellen Batteriezelle bleiben oder verringert werden, jedoch sind geringe Anstiege der beiden Herstellungsparameter auch vertretbar insofern das innovative Konzept diese negativen Effekte durch seine verbesserten thermischen Eigenschaften ausgleicht.

Entwurf der innovativen Konzepte

Das System ist in diesem Fall das innovative Batteriezellkonzept. Da das System in dem Batteriegehäuse ist, unterliegt es geometrischen Einschränkung die bei der Konzeptionierungsphase berücksichtigt werden müssen. Die Rahmenbedingungen werden wie folgt festgelegt:

- Das Konzept soll so leicht wie möglich sein, um eine signifikante Gewichtszunahme des Fahrzeugs, aufgrund des negativen Effekts den diese auf die Reichweite hat, zu vermeiden.
- Das Konzept soll so kostengünstig wie möglich sein.
- Das Konzept soll den geringsten Komplexitätsgrad besitzen, mit dem es die Anforderungen noch erfüllt.

Domänenspezifischer Entwurf

Für den Entwurf müssen folgende Domänen bearbeitet werden:

- Materialspezifische Domäne
Hier wird betrachtet, welche Materialien für die innovativen Konzepte in Frage kommen. Kriterien sind die Anschaffungskosten, Dichte, sowie die Wärmeleitfähigkeit und die Leitfähigkeit.
- Wärmeleittechnische Domäne
Hier wird betrachtet, wie effizient das innovative Konzept die entstehende Wärme aus dem Elektrodenwickel zum Kühlmechanismus transportiert.
- Produktionstechnische Domäne
Hier wird betrachtet, wie das innovative Konzept den Produktionsprozess von Lithium-Ionen Batterien beeinflusst.

⁷⁵ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020

Außerdem werden hier die entwickelten Lösungsansätze vertieft und detaillierter ausgeführt.

Systemintegration

Hier werden die domänenspezifische Lösungsansätze wieder zu einem Gesamtsystem zusammengefügt. Gleichzeitig wird durchgehend die Eigenschaftsabsicherung der Lösungsansätze durchgeführt um die Anforderungen des Gesamtsystems zu erfüllen.

Des weiteren wird hier ein innovatives Konzept anhand des Erfüllungsgrad der Anforderungen ausgewählt und weiterführend als Simulationsmodell aufgebaut. Dieses wird anschließend mit der Simulation der konventionellen Zelle verglichen.

4.3.2. Kühlkonzepte auf Batteriepaketebene

Lithium-Ionen Batterien werden in der Anwendung durch verschiedene Methoden gekühlt. Unter anderem kommen Phasenwechselmaterialien, Luft- und Flüssigkühlung und Wärmerohre zum Einsatz.⁷⁶

Im diesem Kapitel werden die beiden dominanten Kühlkonzepte für prismatische Batteriezellen auf Akkumulatorebene vorgestellt.

Nach Darcovich et al. gibt es das sogenannte "ice-plate" Kühlkonzept, weiterhin das **IP**-Konzept, bei dem die Kühlplatten zwischen die prismatischen Zellen eingefügt werden und so die Seite des Batteriegehäuses kühlen, und das "cold-plate" Kühlkonzept, weiterhin das **CP**-Konzept, bei dem die Platte auf der die Batteriezellen stehen gekühlt wird.⁷⁷

Das IP-Konzept erreicht im Vergleich mit CP-Konzept einen geringeren Temperaturgradienten innerhalb der Zelle. Jedoch ist es in der Herstellung komplizierter und ermöglicht geringere Kühlmittelströme durch die Platte. Um das IP-Konzept zu verwirklichen, muss die Kühlmittelströmung durch die Platte optimiert werden. Jedoch ist das IP-Konzept im Allgemeinen wirksamer als das CP-Konzept.⁷⁸

Da das CP-Konzept einfacher umzusetzen ist, werden die Batteriezellkonzepte vorerst für diese Kühlmethode ausgelegt. Die vorgestellten Zelländerungen können allerdings an das IP-Konzept angepasst werden.

4.3.3. Innovative Batteriezellkonzepte

Da bei der CP-Kühlmethode die Unterseite der Batteriezelle gekühlt wird und die Höhe des Batteriezellgehäuses nach DIN 91252 größer als die Breite ist, findet nach Gleichung 9 weniger Wärmeübertragung aus der Batteriezelle statt⁷⁹. Die Unterseitenfläche des Gehäuses ist kleiner als die Seitenfläche, die Höhe größer als die Breite, wodurch die Übertragungsdistanz d im Nenner und die Fläche A in Gleichung 42 beim CP-Konzept größer, bzw. kleiner sind und die Wärmeleitung \dot{Q} innerhalb der Zelle bei gleichbleibendem Wärmeübergangskoeffizienten k und Temperaturgradient $(T_2 - T_1)$ verringert ist. Nach Böckh ist durch die kleinere Kontaktfläche auch die Wärmeübertragung von dem Batteriezellgehäuse zur Kühlplatte bei dem CP-Konzept verringert.⁸⁰

⁷⁶ Vgl. Mohammed et al. (Design and Comparison of Cooling Plates for a Prismatic Lithium-ion Battery for Electrified Vehicles) 2018, S. 1, 2.

⁷⁷ Vgl. Darcovich et al. (Comparison of cooling plate configurations for automotive battery pack thermal management) 2019, S. 186-187.

⁷⁸ Vgl. Fußnote 77, Darcovich et al. 2019, S. 185

⁷⁹ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020

⁸⁰ Vgl. Fußnote 52, Böckh 2017

$$\dot{Q} = \frac{k * A * (T_2 - T_1)}{d} \quad (42)$$

Da jedoch nach Darcovich et al. das CP-Konzept einfacher und kostengünstiger zu implementieren ist, ist es das Ziel der innovativen Konzepte diesen Nachteil gegenüber des IP-Konzeptes, mit weniger ökonomischem Aufwand als das IP-Konzept darstellt, auszugleichen.

Daher ist das der erste Schritt der Konzeptentwicklung das Sicherstellen von besserer Wärmeleitung innerhalb der Batteriezelle. Für die Alterung und Degradierung der Batteriezelle sind Temperaturgradienten innerhalb des Elektrodenwickels, zusammen mit Hot-Spots im Wickel, die primären Auslöser.⁸¹

Entwurf der innovativen Konzepte

Im Folgenden werden anhand von Wärmeübertragungsmechanismen und den Anforderungen aus Kapitel 4.3.1 die innovativen Konzepte ausgearbeitet.

Da die Batteriezellen über Kontaktkühlung gekühlt sind, kann Wärme über das Gehäuse dissipiert werden. Ein Problem ist, dass der Elektrodenwickel und die Stromanschlüsse vor Kurzschlüssen geschützt werden müssen. Daher ist es notwendig, dass jegliches Anlehnung an das Tesla Patent von Tsuruta et al. von dem Gehäuse durch eine isolierende Schicht getrennt ist.

Nimmt man als Beispiel eine isolierende Schicht von Parker[®] mit einer Durchschlagfestigkeit von $E_{ds} = 200 \text{ VAC}/\text{mil}$ und einer Dicke von $d = 1,016 \text{ mm}$ kann man mit Gleichungen 43 und 44 die Durchschlagfestigkeit dieser Schicht zu $V_b \approx 8000 \text{ V}$ berechnen.⁸²

$$1 \frac{\text{VAC}}{\text{mil}} = 3,94 * 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}} \quad (43)$$

$$V_b = d * E_{ds} \quad (44)$$

Da Lithium-Ionen Batteriezellen mit Spannungen deutlich unter $V = 8000 \text{ V}$ arbeiten, kann daher mit einer solchen Schicht die Isolation zwischen leitenden Teilen und Gehäuse sichergestellt werden. Die isolierende Schicht hat weiterhin eine Wärmeleitfähigkeit von $6,5 \frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$, wodurch das Abführen der Wärme aus der Batteriezelle an das Gehäuse gewährleistet wird.⁸³ Um die Wärme innerhalb des Gehäuses zu leiten bieten sich Aluminium oder Kupfer als Materialien an. Da Aluminium leichter und kostengünstiger ist stellt es die bessere Alternative dar.

Nach Tsuruta et al. wird die entstehende Wärme aus dem Elektrodenwickel durch die Elektroden an das Gehäuse geleitet. Im zylindrischen Design findet dies im Patent nur an einer der beiden Elektroden statt⁸⁴. In der prismatischen Zelle bieten sich nach Abbildung 4.1 jedoch die Kathode und die Anode an um die Wärme aus dem Elektrodenwickel an das Gehäuse und damit zum Kühlmechanismus zu Übertragen. Aufgrund der relativen Symmetrie der Batteriezelle ist es möglich auf beiden Seiten des Elektrodenwickels die gleichen Bauteile anzubringen.

Wärmeleitung innerhalb der Zelle

⁸¹ Vgl. Fußnote 24, Waldmann et al. 2015

⁸² Vgl. (Thermally Conductive Pads) 2021.

⁸³ Vgl. Fußnote 82, Thermally Conductive Pads von Parker

⁸⁴ Vgl. Fußnote 33, Tsuruta et al. 2020

Wie im Tesla Patent sollen auch im Konzept für die prismatische Zelle die Anode und Kathode im Elektrodenwickel verlängert werden um eine Verbindung zu einer *Cap* die als Stromkollektor dient zu ermöglichen. Analog zum Patent gibt es mehrere Möglichkeiten dies zu ermöglichen. Wie in Abbildung 3.4 können in die *Cap* Nuten gefräst werden, in welchen die leitenden Teile der Elektroden wie in Abbildung 3.5 a) durch Anpresskraft oder Ultraschallschweißen eingebracht werden.

Von der *Cap* aus soll nun durch Wärmeleitung zur Unterseite des Batteriegehäuses die Wärme zum Kühlmechanismus abgeführt werden. Hierfür kommt ein Verbindungsstück aus Aluminium in Frage. Um die Herstellungskomplexität zu verringern, kann das gesamte Stromabnehmerteil aus einem Stück Metall hergestellt werden. Mit einer L-Form nach Abbildung 4.5 kann dies realisiert werden.

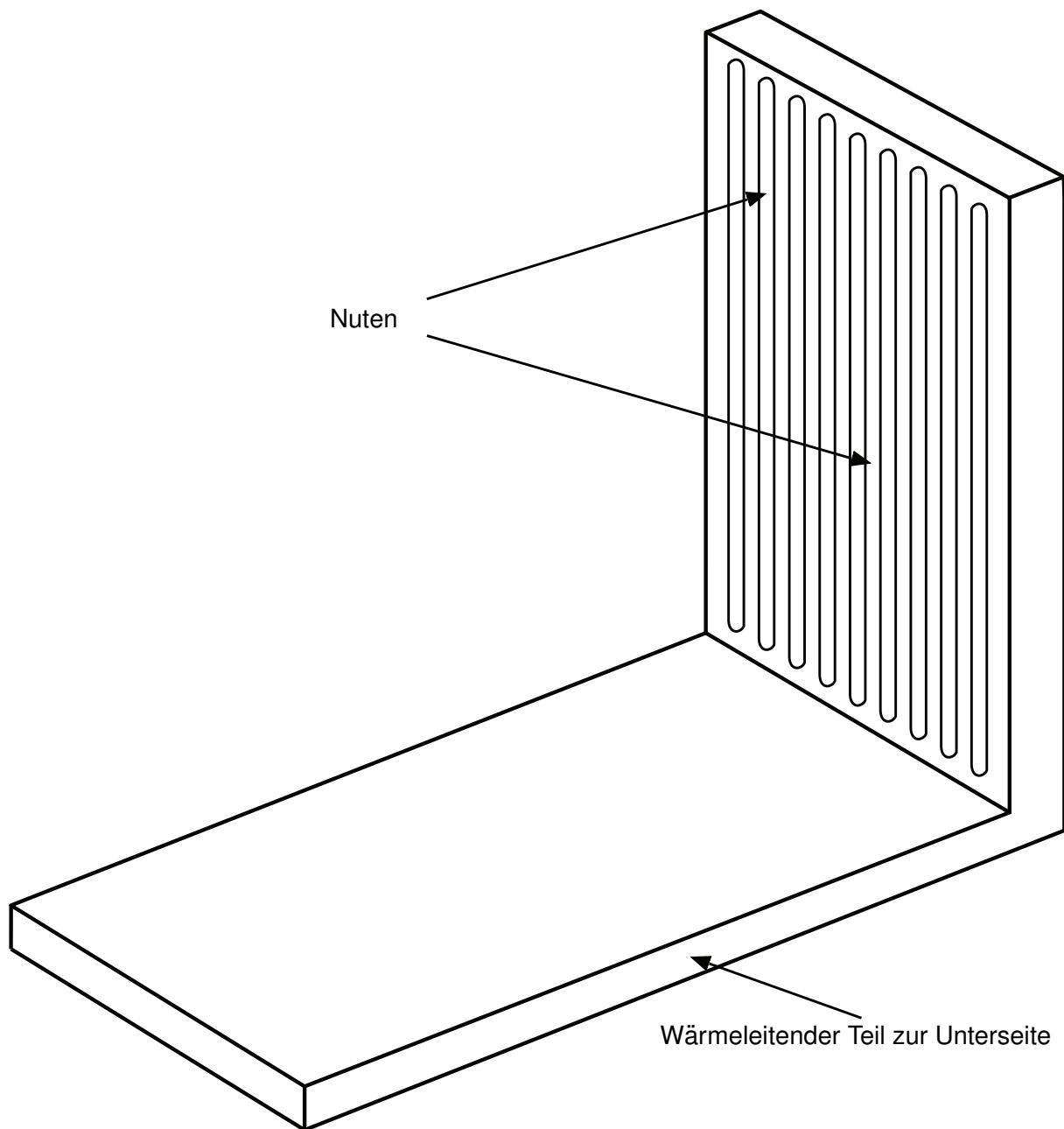


Abbildung 4.5: L-Form des Stromkollektors

Für das IP-Konzept kann der wärmeleitende Teil an den Seiten der *Cap* befestigt sein. Das Prinzip der Wärmeleitung aus der Zelle bleibt hierbei gleich.

Aluminium hat eine mit zunehmender Temperatur abnehmende Wärmeleitfähigkeit⁸⁵. Jedoch ist im relevanten Temperaturbereich von -20 °C bis 60 °C die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{al} \approx 220 \frac{W}{m \cdot K}$ wesentlich höher als die der isolierenden Zwischenschicht. Daher ergibt es Sinn, den Stromkollektor mit so viel Fläche wie möglich an der unteren Seite des Gehäuses mit der Isolierschicht in Verbindung zu bringen. Würde der Stromkollektor aus zwei Teilen bestehen oder an dem Knick der L-Form getrennt, würde eine Engstelle entstehen. In dieser Engstelle kann aufgrund der Isolierschicht weniger Wärme übertragen werden. Daher sind Variationen mit diesen Baueigenschaften nicht wünschenswert.

Der Stromkollektor kann im Prinzip frei dimensioniert werden, allerdings darf er nicht den Platz des Elektrodenwickels einschränken, da dies Kapazitätsverluste verursacht.

Variationen des vorgestellten Konzepts

Mit gleichbleibender Wirkweise können nur wenige Parameter variiert werden.

Um die Herstellungskomplexität eines massiven Aluminiumkollektors zu senken, kann die *Cap* separat von der L-Form produziert werden. Dann kommt die isolierende Schicht zwischen Rückseite der *Cap* und dem Gehäuse. Somit würde das Gehäuse selbst die Wärme aus der Batteriezelle leiten, anstatt eines separaten Bauteils im Inneren der Batterie. Die benötigte Anpresskraft kann durch die Isolierschicht eingebracht werden. Somit wird auch die Komplexität der Bauteile innerhalb des Batteriegehäuses reduziert und der Herstellungsprozess vereinfacht. Eine weitere Variation wäre anstatt des Aluminiums innerhalb der Zelle Kupfer zu verwenden. Die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer liegt für Handelsware zwischen 240 und 380 $\frac{W}{m \cdot K}$ ⁸⁶. Da Aluminium in der Anschaffung um den Faktor 10 günstiger ist als Kupfer, die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer jedoch weniger als doppelt so groß ist, stellt Kupfer keine relevante Alternative dar⁸⁷. Als letztes kann noch die *Cap* selbst verändert werden. Nach dem Patent von Tsuruta et al. können einseitige Nuten mit scharfen Kanten eingesetzt werden um den Kontakt zwischen Elektroden und *Cap* zu vergrößern. Dadurch kann mehr Wärme aus den Elektroden über die *Cap* abgeführt werden.

Auswahl des innovativen Konzeptes für die Simulation

Nach den Anforderungen aus Kapitel 4.3.1 wird nun ein Konzept für die Simulation ausgewählt. Um möglichst viel Wärme aus dem Elektrodenwickel zu leiten, sollte der Kontakt zwischen *Cap* und Elektrode möglichst groß gestaltet werden. Um die Wärme von der *Cap* zum Kühlmechanismus zu leiten wird möglichst viel thermische Masse mit wenig vermindert wärmeleitenden Materialien zwischen den metallischen Elementen benötigt.

Daher wird für die Simulation folgende Variante ausgewählt:

- Eine *Cap* versehen mit Nuten wie in Abbildung 3.7 a)
- Die *Cap* wird durch die Isolierschicht nach Parker⁸⁸ direkt von der Innenseite des Gehäuses getrennt.
- Durch das Batteriegehäuse aus Aluminium wird dann die Wärme aus dem Elektrodenwickel zum Kühlmechanismus, bzw. Kühlpad geleitet.

⁸⁵ Vgl. (Wärmeleitfähigkeit Metalle) 2021.

⁸⁶ Vgl. Myers (Werkstoffkunde) 2009.

⁸⁷ Vgl. (Vergleich zwischen Aluminium und Kupfer) 2021.

⁸⁸ Vgl. Fußnote 82, Parker

xa

In den Batteriepacks mit prismatischen Lithium-Ionen-Batterien bietet sich die Boden-Kontaktkühlung an, da die Batteriezellen aufgrund ihrer Form platzsparend nebeneinander geschachtelt werden können. Zum Einsatz kommen Kühlplatten, auf denen die Batteriezellen stehen. Dadurch wird mit Hilfe der Kontaktkühlung auch das Jelly-Roll gekühlt, jedoch bildet sich aufgrund der einseitigen Kühlung ein Wärmegradient in der Zelle und dem Elektrodenwickel aus.⁸⁹

⁸⁹ Vgl. Inui et al. (Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries) 2007, S. 2107.

5. Simulationsvorbereitung

in diesem Kapitel wird zuerst das Referenzmodell der prismatischen Lithium-Ionen-Batterie erarbeitet. Danach wird das in Kapitel 4 ausgewählte innovative Konzept als Simulationsmodell erstellt. Im Anschluss werden beide Batterietypen anhand eines Lastprofils in COMSOL Multiphysics® simuliert.

Der Elektrodenwickel im Inneren des Batteriegehäuses wird so dimensioniert, dass die äußere Separatorschicht die Innenwände des Gehäuses berührt.

Hier fange ich an über das Referenzmodell zu schreiben

6. Auswertung

7. Zusammenfassung und Ausblick

V. Literatur

Ajanovic, A.; Glatt, A. Wirtschaftliche und ökologische Aspekte der Elektromobilität: Economic and ecological aspects of electric vehicles. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 137, 2020, S. 136–146.

Andre, D.; Meiler, M.; Steiner, K.; Wimmer, C.; Soczka-Guth, T.; Sauer, D. U. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. In: *Journal of Power Sources* 196.12, 2011, S. 5334–5341.

Beloit EDU. Energy Density Table.

Böckh, P.; Wetzel, T. Wärmeübertragung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

COMSOL. Comsol Website. 2021.

DAHN, J.; Fuller, E. W.; OBROVAC, M.; Sacken, U. von. Thermal stability of Li_xCoO_2 , Li_xNiO_2 and 2-MnO_2 and consequences for the safety of Li-ion cells. In: *Solid State Ionics* 69, 1994, S. 265–270.

Darcovich, K.; MacNeil, D. D.; Recoskie, S.; Cadic, Q.; Ilinca, F. Comparison of cooling plate configurations for automotive battery pack thermal management. In: *Applied Thermal Engineering* 155, 2019, S. 185–195.

Dickinson, E. J.; Ekström, H.; Fontes, E. COMSOL Multiphysics®: Finite element software for electrochemical analysis. A mini-review. In: *Electrochemistry Communications* 40, 2014, S. 71–74.

Doyle, M.; Newman, J. Comparison of Modeling Predictions with Experimental Data from Plastic Lithium Ion Cells. In: *Journal of The Electrochemical Society* 143.6, 1996, S. 1890–1903.

Ecker, M.; Sauer, Prof. Dr. rer. nat. D. U. Batterietechnik - Lithium-Ionen-Batterien. In: *MTZ Wissen*, 2013, S. 66–70.

Ecker, M.; Gerschler, J. B.; Vogel, J.; Käbitz, S.; Hust, F.; Dechent, P.; Sauer, D. U. Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data. In: *Journal of Power Sources* 215, 2012, S. 248–257.

Edelstahl Dichte. 2021.

Elektrische Straßenfahrzeuge - Batteriesysteme: Anforderungen an die Gestaltung von Lithium-Ionen Batteriezellen. Berlin, November 2016.

Fink, C.; Kaltenegger, B. Electrothermal and Electrochemical Modeling of Lithium-ion Batteries: 3D Simulation with Experimental Validation. In: *ECS Trans.* 61.27, 2014, S. 105–124.

Forgez, C.; Vinh Do, D.; Friedrich, G.; Morcrette, M.; Delacourt, C. Thermal modeling of a cylindrical $\text{LiFePO}_4/\text{graphite}$ lithium-ion battery. In: *Journal of Power Sources* 195.9, 2010, S. 2961–2968.

Hepperle, M. Electric Flight - Potential and Limitations. Germany, 2012.

Hettesheimer, T.; Thielmann, A.; Neef, C.; Möller, K.-C.; Wolter, M.; Lorentz, V.; Gepp, M.; Wenger, M.; Prill, T.; Zausch, J.; Kitzler, P.; Montnacher, J.; Miller, M.; Hagen, M.; Fanz, P. Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität. Fraunhofer-Allianz-Batterien, 2017.

Inui, Y.; Kobayashi, Y.; Watanabe, Y.; Watase, Y.; Kitamura, Y. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries. In: *Energy Conversion and Management* 48.7, 2007, S. 2103–2109.

Klymenko, O. V.; Svir, I.; Amatore, C. A new approach for the simulation of electrochemiluminescence (ECL). In: *Chemphyschem : a European journal of chemical physics and physical chemistry* 14.10, 2013, S. 2237–2250.

Kupfer oder Aluminium? 2021.

Leuthner, S. Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In: *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Hrsg. von R. Korthauer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 13–19.

Lilium. Lilium Jet.

Lithium-Ionen-Batterietechnik: Zylindrische Zellen. 2021.

Lithium-Ionen-Batterietechnik: Prismatische Zellen. 2021.

Liu, G.; Ouyang, M.; Lu, L.; Li, J.; Han, X. Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different influencing factors. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 116.2, 2014, S. 1001–1010.

Mohammed, A. H.; Alhadri, M.; Zakri, W.; Aliniagerdroudbari, H.; Esmaeeli, R.; Hashemi, S. R.; Nadkarni, G.; Farhad, S. Design and Comparison of Cooling Plates for a Prismatic Lithium-ion Battery for Electrified Vehicles. In: *SAE Technical Paper Series*. SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2018.

Myers, D. G. Werkstoffkunde. [Place of publication not identified]: Springer, 2009.

Nasar, S. A.; Unnewehr, L. E. Electric Vehicle Technology. New York, 1982.

Petzl, M.; Kasper, M.; Danzer, M. A. Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study. In: *Journal of Power Sources* 275, 2015, S. 799–807.

Salvi, D.; Boldor, D.; Ortego, J.; Aita, G. M.; Sabliov, C. M. Numerical modeling of continuous flow microwave heating: a critical comparison of COMSOL and ANSYS. In: *The Journal of microwave power and electromagnetic energy : a publication of the International Microwave Power Institute* 44.4, 2010, S. 187–197.

Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells. In: *Journal of The Electrochemical Society* 112.7, 1965, S. 657.

Sollmann, D. Nickel-Cadmium-Batterien. 2018.

Thermally Conductive Pads. 2021.

Thomas, K. E.; Newman, J. Thermal Modeling of Porous Insertion Electrodes. In: *Journal of The Electrochemical Society* 150.2, 2003, A176.

Traub, L. W. Range and Endurance Estimates for Battery-Powered Aircraft. In: *Journal of Aircraft* 48.2, 2011, S. 703–707.

Tsuruta, K.; Dermer, M. E.; Dhiman, R. Cell with a tabless electrode. US 2020/0144676 A1. 2020.

VDI 2206. VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. 2004.

Vergleich zwischen Aluminium und Kupfer. 2021.

Waldmann, T.; Bisle, G.; Hogg, B.; Stumpp, S.; Danzer, M. A.; Kasper, M.; Axmann, P.; Wohlfahrt-Mehrens, M. Influence of Cell Design on Temperatures and Temperature Gradients in Lithium-Ion Cells: An In Operando Study. In: *Journal of The Electrochemical Society* 162.6, 2015, A921–A927.

Wärmeleitfähigkeit Metalle. 2021.

Wöhrle, T. Lithium-Ionen-Zelle. Springer Verlag, 2013.

VI. Anhang

VII. Eidesstattliche Versicherung

Callard, Julian

Matrikelnummer: 377888

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel HIER DEN TITEL EINFÜGEN selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Form vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

Belehrung:

§156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

§161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt

(1) Wenn eine der in den §§154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

(2) Straflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des §158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Ort, Datum

Unterschrift