

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

## **Masterarbeit**

Name: Ramandeep Singh

Matr.-Nr.: 344846

Thema: Entwicklung eines Tools für die anwendungs-spezifische Zellauswahl für Elektrofahrzeuge nach dem Bottom-Up-Prinzip

Betreuer Assistent: Hendrik Löbberding, M.Sc. RWTH

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker

2. Prüfer: Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Heiner Hans Heimes

Aachen, den 17.02.2021

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.....	vii
IV	Tabellenverzeichnis.....	xi
1	<b>Einleitung .....</b>	1
1.1	Motivation .....	1
1.2	Ziel und Aufbau der Arbeit .....	2
2	<b>Stand der Technik &amp; Theoretische Grundlagen .....</b>	3
2.1	Funktionsweise und Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle .....	3
2.2	Zellmaterialien.....	5
2.2.1	Aktive Zellmaterialien .....	5
2.2.2	Passive Zellmaterialien .....	11
2.3	Zellformate und deren Herstellungsprozess .....	14
2.4	Batteriesysteme .....	21
2.4.1	Aufbau eines Batterie-Moduls.....	21
2.4.2	Aufbau eines Batteriepacks.....	25
2.4.3	Thermisches Verhalten .....	26
2.5	Entwicklungsprozess in der Fahrzeugtechnik.....	30
2.6	Entscheidungstheorien.....	31
3	<b>Entwicklung des Zellauswahltools in MATLAB .....</b>	36
3.1	Einordnung der Zellauswahl im Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs .....	36
3.2	Methodik der Zellauswahl .....	38
3.3	Implementierung der Methodik.....	39
3.3.1	Elektroden-Ebene.....	39
3.3.2	Zell-Ebene.....	41
3.3.3	Modul-Ebene.....	55
3.3.4	Pack-Ebene.....	61
3.3.5	Auswahl-Ebene .....	64
4	<b>Validierung und Analyse der Ergebnisse.....</b>	66
4.1	Vergleich der Ergebnisse des Tools mit Realdaten .....	66

---

4.2	Anwendung der Methodik .....	73
4.3	Analyse der Ergebnisse des Tools.....	78
4.3.1	Elektroden-Stack-Dicke bei unterschiedlichen Kathodenmaterialien .....	78
4.3.2	Vergleich unterschiedlicher Zellformate bei identischer Zellchemie .....	79
4.3.3	Vergleich eines Zellformats bei unterschiedlicher Zellchemie .....	80
4.3.4	Kombination von Variation von Zellchemie und Zellformat .....	81
4.3.5	Analyse berechneter Batteriepack-Konfigurationen .....	82
4.4	Sensibilitätsanalyse .....	84
4.4.1	Variation in der Elektroden-Ebene .....	84
4.4.2	Variation konstruktiver Parameter im Modell .....	85
4.4.3	Variation der Gewichtung in der Auswahl-Ebene.....	87
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>91</b>
<b>V</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>93</b>
<b>VI</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>100</b>
<b>VII</b>	<b>Eidesstattliche Versicherung.....</b>	<b>137</b>

## II Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	$\text{m}^2$	Fläche
$A_j^+$	[ $-$ ]	Positive ideale Lösung
$A_j^-$	[ $-$ ]	Negative ideale Lösung
$c_p$	$\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	Spezifische Wärmekapazität
C	Ah	Kapazität
$\text{Capa}_{\text{areal}}$	$\frac{\text{mAh}}{\text{cm}^2}$	Flächenbeladung
$\text{Capa}_{\text{mass}}$	$\frac{\text{mAh}}{\text{g}}$	Spezifische Kapazität
$d_{18650/21700}$	mm	Durchmesser
$d_{\text{Pin}}$	mm	Pin-Durchmesser
$d_{\text{außenSch}}$	$\mu\text{m}$	Dicke der äußeren Schicht (PA)
$d_{\text{innenSch}}$	$\mu\text{m}$	Dicke der inneren Schicht (PP)
$d_{\text{AlSch}}$	$\mu\text{m}$	Dicke der Barriereforschicht
$d_{\text{Klebe}}$	mm	Dicke der Klebschicht
$d_{\text{Isoplatte}}$	mm	Dicke der Isolationsplatte (Kunststoff)
$d_{\text{Kühl}}$	mm	Dicke der Kühlplatte (Aluminium)
$d_{\text{Kont}}$	mm	Dicke der Kontaktierung (Nickel)
$d_{\text{Vers}}$	mm	Dicke der Versiegelung
$d_{\text{Folie}}$	mm	Dicke der Folie einer Pouchzelle
$e_{\text{grav}}$	$\frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$	Gravimetrische Energiedichte
$e_{\text{vol}}$	$\frac{\text{Wh}}{\text{L}}$	Volumetrische Energiedichte
$f_{\text{nutz}}$	%	Nutzfenster der Energiemenge
g	[ $-$ ]	Gewichtung
$h_0$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	Wärmeübergangskoeffizient
h	mm	Höhe
$h_{\text{leer,prism}}$	mm	Passive Höhe in dem Gehäuse
$h_{\text{leer,circuit}}$	mm	Passive Höhe für Verkabelung etc.
H	mm	Höhe

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
I	A	Strom
k	[·]	Kostenkennzahl
l	[·]	Lebensdauerkennzahl
L	mm	Länge
m	kg	Masse
$m_{\text{spez}, \text{Sep}}$	$\frac{\text{g}}{\text{cm}^2}$	Flächenbezogene Dichte des Separators
$m_{\text{Geh}, \text{spez}}$	$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$	Spezifische Masse des Gehäuses
$n_{\text{Seriell}}$	[·]	Anzahl seriell verschalteter Zellen
$n_{\text{Parallel}}$	[·]	Anzahl parallel verschalteter Zellen
$n_{\text{Zellen/Modul}}$	[·]	Anzahl an Zellen pro Modul
$n_{\text{Stacks}}$	[·]	Anzahl der Elektroden-Stacks
$N_{\text{Windung}}$	[·]	Windungszahl
O	$\text{mm}^2$	Oberfläche
P	W	Leistung
q	$\frac{\text{W}}{\text{m}^3}$	Wärmestromdichte
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
r	m	Radius
$r_0$	mm	Radien-Offset der Archimedes Spirale
$R_{\text{Int}}$	$\Omega$	Innenwiderstand
s	[·]	Sicherheitskennzahl
$S_i^+$	[·]	Abstand zum Best Case
$S_i^-$	[·]	Abstand zum Worst Case
$S_i$	[·]	Relative Nähe zu Best Case Alternative / Effizienzwert
$t_{\text{Wand}}$	mm	Wandstärke
T	K	Temperatur
t	mm	Wandstärke
$U_{\text{Modul}}$	V	Spannung des Moduls
$U_{\text{Zelle}}$	V	Nominale Zellspannung
$\frac{\partial U_{\text{OCV}}}{\partial T}$	$\frac{\text{V}}{\text{K}}$	Spannungs-/Temperaturgradient

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
V	L	Volumen der Zelle
$\delta_i$	$\mu\text{m}$	Dicke
$\Theta$	[ $-$ ]	Polarwinkel der Archimedes Spirale
$\varepsilon$	%	Porosität
$\varepsilon_{\text{em}}$	[ $-$ ]	Emissionsgrad
$\varepsilon_{\text{Pack}, \text{Zelle,grav}}$	[ $-$ ]	Effizienzwert (gravimetrische Energiedichte von Zelle zu Pack)
$\varepsilon_{\text{Pack}, \text{Zelle,vol}}$	[ $-$ ]	Effizienzwert (volumetrische Energiedichte von Zelle zu Pack)
$\xi$	m	Tangentielle Bogenlänge
$\sigma$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$	Stefan-Boltzman-Konstante
$\sigma_{\text{Anode}}$	%	Überlappung Anode zu Kathode
$\rho_i$	$\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	Dichte
$\omega_{\text{AM, pos}}$	%	Massenanteil Aktivmaterial Kathode
$\omega_{\text{B, pos}}$	%	Massenanteil Binder
$\omega_{\text{CA,neg}}$	%	Massenanteil Additiv
$\omega_{\text{CA, pos}}$	%	Massenanteil Binder

Abkürzung	Beschreibung
SEI	Solid Electrolyte Interface
A	Alternative
AM	Aktivmaterial
Alu	Aluminium
B	Binder
BMS	Batteriemanagementsystem
BEV	Battery Electric Vehicle
CA	Additive
Cu	Kupfer
HUMO	highest occupied molecular
K	Kriterium

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Li		Lithium
LFP		$\text{LiFePO}_4$
LUMO		lowest unoccupied molecular
LMO		$\text{LiMn}_2\text{O}_4$
LCO		$\text{LiCoO}_2$
NMC111		$\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$
NMC622		$\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$
NMC811		$\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$
NCA		$\text{LiNiCoAlO}_2$
NWA		Nutzwertanalyse
TOPSIS		Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

### **III Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle .....	3
Abbildung 2.2: Auswirkung des Nickel-, Kobalt-, Mangananteils einer NMC-Zelle .....	7
Abbildung 2.3 Potential und spezifische Kapazität verschiedener Aktivmaterialien.....	8
Abbildung 2.4: Vergleich verschiedener Kathodenmaterialien bzgl. spez. Energie, spez. Leistung, Sicherheit, Performance, Lebensdauer, Kosten.....	10
Abbildung 2.5: Entwicklung der Zelltechnologie von 2015 bis 2030 .....	11
Abbildung 2.6: Stabilitätsfenster des Elektrolyten .....	12
Abbildung 2.7: Zellformate von Lithium-Ionen-Zellen .....	14
Abbildung 2.8: Prozess der Elektrodenherstellung .....	15
Abbildung 2.9: Methoden der Zellstapelung einer Pouchzelle – Einzelne Sheets (links) und Z-Stapelung (rechts) .....	16
Abbildung 2.10: Stapelvorgang der Elektroden-Sheets für eine Pouch-Zelle mittels Z-Stapelung .....	16
Abbildung 2.11: Verarbeitung der Tochter-Coils zu einer Jelly-Roll für Rundzellen.....	17
Abbildung 2.12: Verarbeitung der Tochter-Coils zu einer Jelly-Roll (Flachwickel) für Prismatische Zellen .....	18
Abbildung 2.13: Archimedes Spirale - Geometrische Zusammenhänge .....	19
Abbildung 2.14: Von der Batteriezelle, über das Batteriemodul, zum Batteriepack .....	21
Abbildung 2.15: Aufbau eines Batteriemoduls .....	22
Abbildung 2.16: Modulfertigung - Prismatische Zelle .....	23
Abbildung 2.17: Vormontage - Pouchmodul (links) und Rundzellenmodul (rechts) .....	24
Abbildung 2.18: Aufbau eines Batteriepacks .....	26
Abbildung 2.19: Einfluss der Betriebstemperatur auf Leistung, Lebensdauer und Thermomanagement .....	27

Abbildung 2.20: Methoden zur Zelltemperierung .....	28
Abbildung 2.21: V-Modell der Fahrzeugentwicklung .....	31
Abbildung 2.22: Aufbau einer Nutzwertanalyse .....	32
Abbildung 3.1: Einordnung der Zellauswahl im Entwicklungsprozess eines Elektrofahrzeugs .....	37
Abbildung 3.2: Ablauf und Methodik der Zellauswahl .....	38
Abbildung 3.3: Ablauf und Methodik der Zellauswahl (Fortsetzung).....	39
Abbildung 3.4: Parametrisierung für die 18650-Rundzelle .....	43
Abbildung 3.5: Schematischer 8-Schichten-Aufbau einer Jelly-Roll.....	44
Abbildung 3.6: Überlappung der Elektroden in einer Jelly-Roll .....	45
Abbildung 3.7: Abmaße der Pouchzelle für die Implementierung.....	48
Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Pouchzellen-Folie .....	49
Abbildung 3.9: Modellierung des Flachwickels (kleine Jelly-Roll + Sheets).....	51
Abbildung 3.10: Vergleich der genutzten Fläche bei einem- und zwei Flachwickel in einem prismatischen Zellgehäuse (bei gleicher Höhe des Flachwickels).....	52
Abbildung 3.11: Modellierung der Prismatischen Zelle mit zwei Flachwickel .....	53
Abbildung 3.12: Modellierung der prismatischen Zelle mit Zellstapel.....	53
Abbildung 3.13: Konstruktion des prismatischen Zellgehäuses in CATIA V5 .....	55
Abbildung 3.14: Zelle zu Modul - Samsung SDI Modul.....	56
Abbildung 3.15: Modellierung des Batteriemoduls mit prismatischen Zellen (bzw. Pouchzellen).....	58
Abbildung 3.16: Modellierung des Batteriemoduls mit Rundzellen.....	60
Abbildung 3.17: Modellierung der Anordnung des Moduls (links) im Bauraum (rechts) unter Angabe von lokalen Koordinatensystemen .....	61
Abbildung 3.18: Schematische Darstellungen der Anordnungen der Module im Bauraum....	62

Abbildung 4.1: Vergleich der spezifischen Energiedichte zwischen Zelle und Modul (gravimetrisch) .....	69
Abbildung 4.2: Vergleich der spezifischen Energiedichte zwischen Zelle und Modul (volumetrisch) .....	70
Abbildung 4.3: Vergleich der spezifischen Energiedichte zwischen Zelle und Pack (gravimetrisch) .....	72
Abbildung 4.4: Vergleich der spezifischen Energiedichte zwischen Zelle und Pack (volumetrisch) .....	73
Abbildung 4.5: Anwendung des Auswahltools - Elektroden-Ebene .....	74
Abbildung 4.6: Anwendung des Auswahltools - Zell-Ebene .....	75
Abbildung 4.7: Anwendung des Auswahltools - Modul-Ebene .....	76
Abbildung 4.8: Anwendung des Auswahltools - Pack-Ebene .....	77
Abbildung 4.9: Anwendung des Auswahltools - Auswahl-Ebene .....	78
Abbildung 4.10: Elektroden-Stack-Dicke von verschiedenen Kathodenmaterialien (mit Graphit-Anode) bei identischer Zusammensetzung der Elektroden .....	79
Abbildung 4.11: Vergleich der spezifischen Energiedichte verschiedener Zellformate mit identischer Zellchemie .....	80
Abbildung 4.12: Vergleich der spezifischen Energiedichte einer Pouchzelle mit unterschiedlichen Zellchemie.....	81
Abbildung 4.13: Spezifische Energiedichte bei Variation des Zellformates und der Zellchemie .....	82
Abbildung 4.14: Einfluss der Flächenbeladung der Kathode auf die Kapazität von Rundzelle, Pouchzelle und prismatischer Zelle .....	85
Abbildung 4.15: Einfluss der Variation von Durchmesser (bei konstanter Höhe) und Höhe (bei konstantem Durchmesser) auf die Zellkapazität einer Rundzelle .....	86
Abbildung 4.16: Kapazitätszuwachs der modellierten Rundzelle bei Reduktion der passiven Höhe über der Jelly-Roll im Zellgehäuse .....	87

Abbildung 4.17: Ergebnisse der Auswahl-Ebene bei Variation der Gewichtung verschiedener Kriterien .....	90
Abbildung 0.1: Einfluss der Variation der Länge, Höhe und Tiefe auf die Kapazität der Pouchzelle .....	103
Abbildung 0.2: Einfluss der Variation der Länge, Höhe und Tiefe auf die Kapazität der prismatischen Zelle .....	103
Abbildung 0.3: Einfluss der Gewichtung (Sicherheit) der Konfigurationen aus Tabelle 0.9 nach TOPSIS .....	104

## IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Elektrochemische Daten verschiedener Kathodenmaterialien .....	9
Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile der drei Zellformate: Pouchzelle, Rundzelle, Prismatische Zelle .....	20
Tabelle 2.3: Vergleich struktureller Eigenschaften der drei Zellformate .....	20
Tabelle 2.4: Energiemenge, Gesamtgewicht und Packgewicht einiger auf dem Markt befindlicher Elektrofahrzeuge .....	26
Tabelle 2.5: Entscheidungsmatrix nach TOPSIS .....	34
Tabelle 2.6: Normierte Entscheidungsmatrix nach TOPSIS.....	34
Tabelle 2.7: Gewichtete Entscheidungsmatrix nach TOPSIS.....	35
Tabelle 3.1: Normierte Maße von Rundzellen.....	41
Tabelle 3.2: VDA Maße von Prismatische Zellen.....	41
Tabelle 3.3: VDA Maße von Pouchzellen .....	42
Tabelle 3.4: Aufbau der Entscheidungsmatrix im Auswahltool.....	65
Tabelle 4.1: Vergleich der Ergebnisse mit Realdaten einer 18650-Rundzelle.....	66
Tabelle 4.2: Vergleich der Ergebnisse mit Realdaten einer Pouchzelle .....	67
Tabelle 4.3: Vergleich der Ergebnisse mit Realdaten einer prismatischen Zelle .....	68
Tabelle 4.4: Vergleich des berechneten Effizienzindexes mit Realdaten - Zelle zu Modul ....	70
Tabelle 4.5: Vergleich des Effizienzindexes aus dem Tool mit Realdaten - Zelle zu Pack ....	72
Tabelle 4.6: Vergleich berechneter Batteriepacks mit unterschiedlichem Zellgehäuse und gleicher Zellchemie.....	83
Tabelle 4.7: Bewertung berechneter Batteriepacks nach TOPSIS in der Auswahl-Ebene nach unterschiedlichen Präferenzen .....	83
Tabelle 4.8: Relevante Kennzahlen berechneter Batteriepack-Konfigurationen für die Auswahl-Ebene .....	88

---

Tabelle 0.1: Dichte verschiedener Materialien .....	100
Tabelle 0.2: Parameter der Elektroden-Ebene .....	100
Tabelle 0.3: Parameter Zell-Ebene - Rundzelle .....	101
Tabelle 0.4: Parameter Zell-Ebene - Pouchzelle.....	101
Tabelle 0.5: Parameter Zell-Ebene - Prismatische Zelle .....	101
Tabelle 0.6: Parameter Modul-Ebene .....	102
Tabelle 0.7: Parameter Pack-Ebene.....	102
Tabelle 0.8: Parameter der Auswahl-Ebene .....	102
Tabelle 0.9: Berechnete Batteriepack-Konfigurationen mit gleichem Zellformat und einer Ausnahme .....	104
Tabelle 0.10: Berechnete Batteriepack-Konfigurationen für die Auswahl-Ebene.....	104
Tabelle 0.11: Auswertung der Konfigurationen aus Tabelle 0.10 bei Betrachtung der Kriterien K1 bis K4 (jeweils zu 100 % gewichtet).....	105

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

In den letzten Jahren wurde der Fokus von Gesetzmäßigkeiten stark auf den Wandel in Richtung eines nachhaltigen Wirtschaftssystems gelegt. Der Individualverkehr steht dabei besonders im Vordergrund, da dieser in der EU etwa 25 % der gesamten Treibhausgasemissionen verursacht und Ursache für die kontinuierlich steigende Luftverschmutzung darstellt. Dies ist der Grund für immer strenger werdende Emissionsgrenzwerte, welche von den Automobilherstellern einzuhalten sind. Ab dem Jahre 2021 soll der Grenzwert für die Neuwagenflotte 95 g CO<sub>2</sub> pro Kilometer betragen und in den nächsten Jahren weiter steigen. Aufgrund der zuvor beschriebenen Umstände hat die Elektromobilität in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Langfristig besteht das Ziel darin, konventionelle Kraftfahrzeuge durch Elektrofahrzeuge zu ersetzen, um den Anforderungen des Gesetzgebers gerecht zu werden.<sup>1</sup>

Elektromobilität stellt den Schlüssel für die Einhaltung aktueller und zukünftiger Regularien dar und steht daher zunehmend im Zentrum der Forschung der Automobilindustrie. Das Batteriesystem gehört zur wesentlichen Komponente eines Elektrofahrzeugs, welches aus Kosten- und Effizienzgründen optimal ausgelegt werden muss. Batteriesysteme auf Basis von Lithium-Ionen-Zellen stellen den aktuellen Stand der Technik dar und werden in naher Zukunft immer relevanter.<sup>2</sup>

Es wird daher angestrebt Forschungen mit dem Ziel der Optimierung von Lithium-Ionen-Zellen zu betreiben. Lithium-Ionen-Zellen unterscheiden sich hinsichtlich des Zellformats und der Zellchemie. Dies ist der Grund für die Variationsvielzahl von Lithium-Ionen-Batterietechnologien auf dem Markt, welche in Abhängigkeit von Zellformat und Zellchemie unterschiedliche technische Eigenschaften aufweisen. Jedoch entsteht im Entwicklungsprozess von Elektrofahrzeugen - durch eine fehlende Standardisierung des Auswahlprozesses der Komponenten - eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Auslegung des Batteriesystems. Dadurch kommt es zu Entscheidungsproblemen, welche schließlich zu zeitlichen Verzögerungen im Entwicklungsprozess führen. Als Resultat erhöhen sich Aufwand und Produktionskosten für die Entwicklung eines Elektrofahrzeugs, was jedoch durch eine systematische Auslegung des Batteriesystems vermeidbar ist.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Vgl. Ajanovic et al. (Wirtschaftliche und ökologische Aspekte der Elektromobilität) 2020, S. 1.

<sup>2</sup> Vgl. Prof. Dr.-Ing. Andreas Nevoigt (Studie zu den möglichen Auswirkungen der Elektromobilität auf die Automobilzulieferindustrie in Südwestfalen) 2020, S. 18.

<sup>3</sup> Vgl. Tornow et al. (Design Automation for Battery System Variants of Electric Vehicles with Integrated Product and Process Evaluation) 2016, S. 424.

Der Prozess der Auslegung eines Batteriesystems ist somit unzureichend standardisiert und erfordert Methoden zur systematischen Auswahl von Batteriezellen, um sowohl die Produktionskosten zu senken als auch den Zeitaufwand in der Entwicklung zu reduzieren.

## 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Tools für die anwendungsspezifische Zellauswahl von Batteriesystemen nach dem Bottom-Up-Prinzip. Dazu wird ein Zellauswahltool in MATLAB entwickelt, welches nach dem Bottom-Up-Prinzip zum einen die technischen Eigenschaften der üblichen drei Zellformate (Rundzelle, Pouchzelle, prismatische Zelle) — unter Angabe einer gewünschten Zellchemie — modelliert und zum anderen die technischen Spezifikationen des Batteriemoduls und des dazugehörigen Batteriepacks — unter Angabe der Systemanforderungen vom Anwender — berechnet. Aufgabe des Tools ist es somit, technische Eigenschaften individuell gestalteter, anwendungsspezifischer Batteriepacks, ausgehend von der Zelle, zu berechnen und diese hinsichtlich einstellbarer Präferenzen zu bewerten.

Für die Zielerreichung gliedert sich der strukturelle Aufbau der vorliegenden Arbeit in drei Teile. Im ersten Teil werden der Stand der Technik sowie die theoretischen Grundlagen vermittelt. Dabei wird der Aufbau und die Funktionsweise von Lithium-Ionen-Zellen erläutert und anschließend die Eigenschaften verschiedener Zellchemien und Zellformate beschrieben. Des Weiteren wird der Aufbau von Batteriesystemen sowie der Entwicklungsprozess von Kraftfahrzeugen näher betrachtet. Anschließend werden Entscheidungstheorien vorgestellt, um Alternativen für die Zellauswahl evaluieren zu können.

Der zweite Teil der Arbeit behandelt die Beschreibung der Methodik des Tools und die Implementierung in MATLAB. Zunächst wird die Einordnung der Zellauswahl in dem Entwicklungsprozess eines Elektrofahrzeugs erläutert. Daraufhin wird die Implementierung nach dem Bottom-Up-Prinzip in verschiedene Ebenen unterteilt. Angefangen bei der Elektroden-Ebene wird die Modellierung der Zell-Ebene, bei der die üblichen drei Zellformate modelliert werden, der Modul-Ebene und der Pack-Ebene erläutert. Anschließend wird die Implementierung für die Auswahl-Ebene beschrieben.

Im dritten und letzten Teil der Arbeit werden die Ergebnisse aus dem Zellauswahltool validiert und analysiert. Dafür wird das Tool mittels eines Vergleichs der berechneten Ergebnisse mit Realdaten auf seine Genauigkeit überprüft. Anschließend wird die Anwendung der Methodik des Zellauswahltools beispielhaft vorgestellt. Zum Ende dieses Teils werden Berechnungen des Tools analysiert und eine Sensibilitätsanalyse durchgeführt, welche den Einfluss von Variation der Eingabeparameter auf die Ergebnisse aufzeigen soll.

Wie lässt sich eine anwendungsspezifische Zellauswahl nach dem Bottom-Up-Prinzip mittels eines Auswahltools realisieren?

## 2 Stand der Technik & Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden der Stand der Technik und die theoretischen Grundlagen für das Verständnis von Lithium-Ionen-Zelle in mehreren Unterkapiteln erläutert. Zunächst werden dabei die Funktionsweise und der Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle diskutiert. Weiterhin werden die Aktiv- und Passivmaterialien einer Lithium-Ionen-Zelle näher betrachtet und die verschiedenen Zellformate vorgestellt. Daraufhin wird der Aufbau von Batteriesystemen beschrieben und anschließend der Entwicklungsprozess eines Automobils anhand eines V-Modells erklärt. Abschließend werden Methoden zur Bewertung verschiedener Auswahlmöglichkeiten, mittels Entscheidungstheorien, betrachtet.

### 2.1 Funktionsweise und Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle

Grundsätzlich arbeiten Lithium-Ionen-Zellen nach dem Prinzip der Galvanischen Zelle. Diese können in drei Gruppen eingeteilt werden: Primärzellen, Sekundärzellen oder Tertiärzellen (Brennstoffzellen), wobei die Lithium-Ionen-Zelle der Gruppe der Sekundärzellen angehörig ist. Bei Sekundärzellen ist - anders als bei Primärzellen - nicht nur der einmalige-, sondern auch ein mehrfacher Gebrauch möglich. Die ablaufenden chemischen Reaktionen in einer Sekundärzelle sind somit reversibel, wodurch sowohl ein Entlade- als auch Ladevorgang realisierbar ist.<sup>4</sup>

Um die Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle erläutern zu können, wird zunächst der Aufbau einer solchen Zelle in Abbildung 2.1 dargestellt.

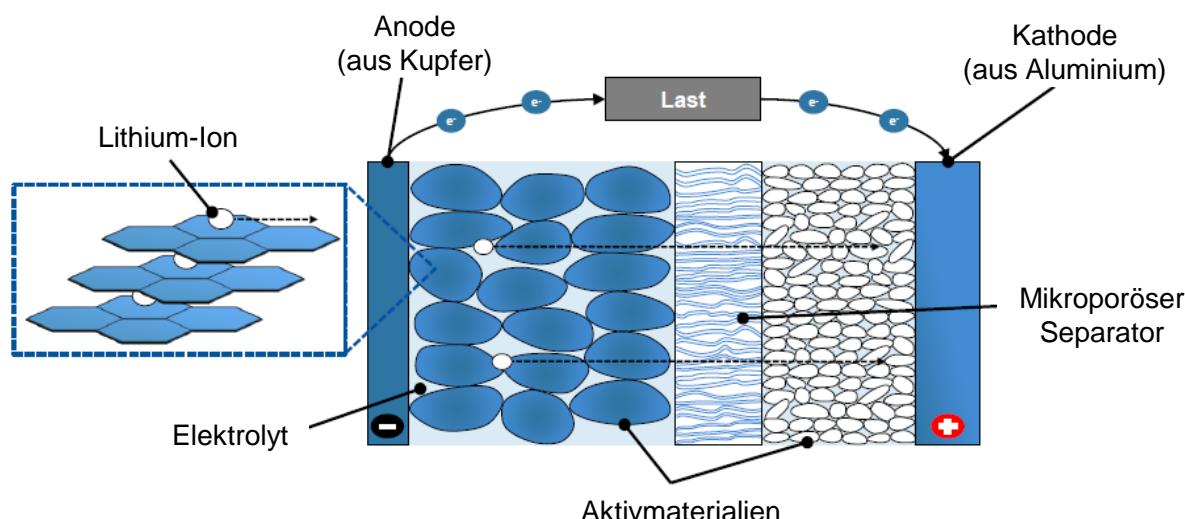


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle<sup>5</sup>

Eine Lithium-Ionen-Zelle setzt sich zum einen aus zwei Elektroden zusammen: die negativ geladene Anode und die positiv geladene Kathode. Zum anderen befindet sich eine poröse Membran, der sog. Separator, zwischen diesen beiden Elektroden sowie ein ionenleitfähiger

<sup>4</sup> Vgl. Schmiermund (Das Chemiewissen für die Feuerwehr) 2019, S. 283.

<sup>5</sup> Vgl. Heimes et al. (Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle) 2018.

Elektrolyt. Der Separator hat die Aufgabe, beide Elektroden voneinander zu trennen, während der Elektrolyt für den Ionentransport sorgt. Die Anode und die Kathode werden mit Aktivmaterialien beschichtet, wobei für die negative Elektrode meist Graphit und für die positive Elektrode ein Mischoxid eingesetzt wird. Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, können Lithium-Ionen in diesen Aktivmaterialien eingelagert werden. Diese Lithium-Ionen wandern, mittels des Elektrolyten, von einem Aktivmaterial zum anderen. Als Stromableiter dienen an der Anode Kupfer und an der Kathode Aluminium. Man unterscheidet hinsichtlich der Richtung des Ionentransportes zwischen Entladevorgang und Ladevorgang. Während des Entladevorgangs wandern zum einen die im negativen Aktivmaterial (Graphit) eingelagerten Lithium-Ionen von der Anode zur Kathode, und zum anderen Elektronen über eine externe elektrische Verbindung von der negativ geladenen Elektrode zur positiv geladenen Elektrode. Der Ladevorgang findet analog jedoch umgekehrt statt.<sup>6</sup>

Die Speicherfunktion einer Lithium-Ionen-Zelle beruht auf dem Prinzip der Interkalation. Dabei werden Lithium-Ionen in die Gitterstrukturen der Elektroden eingelagert. Der Prozess der Interkalation findet mit geringen Nebenreaktionen statt, weshalb die Lithium-Ionen-Technologie einen hohen Wirkungsgrad aufweist und somit im Vergleich zu anderen Batterietechnologien häufiger Anwendung findet.<sup>7</sup>

Nachfolgend ist beispielhaft die chemische Reaktionsgleichung beim Entladevorgang jeweils an der Anode und an der Kathode dargestellt. In diesem Beispiel besteht das Aktivmaterial der Anode aus Graphit und das der Kathode aus Kobaltoxid:<sup>8</sup>

- Anode:  $Li_1C_6 \rightarrow 1e^- + 1Li^+ + C_6$
- Kathode:  $CoO_2 + Li^+ + e^- \rightarrow LiCoO_2$

Graphit bzw. Kobaltoxid ist nur eins von vielen Beispielen für Aktivmaterialien für Anode, bzw. Kathode. Die Auswahl der Aktivmaterialien für Anode und Kathode macht den größten Unterschied zwischen den Eigenschaften der Lithium-Ionen-Batterietechnologien aus. Grundsätzlich wird bei Lithium-Ionen-Zellen zwischen Zellen mit hoher Energiedichte und Zellen mit hoher Leistungsdichte unterschieden. Hochenergiezellen werden in rein elektrischen Fahrzeugen eingesetzt, wobei Hochleistungszellen in Hybridfahrzeugen mehr Verwendung finden. Der innere Aufbau der Zelle entscheidet über die Art der Zelle. So ist die Beschichtungsdicke der Elektrode entscheidend dafür, ob eine Zelle eine hohe Energiedichte oder eine hohe Leistungsdichte aufweist. Je höher die Beschichtungsdicke, desto höher die Energiedichte bei parallel abnehmender Leistungsdichte.<sup>9</sup>

---

<sup>6</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S.14, S. 23.

<sup>7</sup> Vgl. Schledde (Modellbasierte Identifikation von physikalischen Parametern zur Bestimmung der Veränderung charakteristischer Eigenschaften einer C/NMC Lithium-Ionen-Zelle durch Alterungsmechanismen zur Anwendung in Batteriemanagementsystemen) 2018, S. 47.

<sup>8</sup> In Anlehnung an Schmiermund (Das Chemiewissen für die Feuerwehr) 2019, S. 287.

<sup>9</sup> Vgl. Tschöke (Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs) 2015, S. 62.

## 2.2 Zellmaterialien

Im vorigen Kapitel 2.1 wurde der grundsätzliche Aufbau und die Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle erläutert. Die dabei vorgestellten Komponenten der Lithium-Ionen-Zelle können in passive- und aktive Zellmaterialien eingeteilt werden. In diesem Unterkapitel werden zunächst die aktiven Zellmaterialien genauer betrachtet und dabei die Eigenschaften sowie auch der Einfluss auf die technischen Spezifikationen der Zelle erläutert. Anschließend werden die passiven Zellmaterialien beschrieben und deren Funktion erläutert.

### 2.2.1 Aktive Zellmaterialien

Aktive Zellmaterialien können in negative- und positive Aktivmaterialien unterteilt werden. Die Kombination der beiden aktiven Zellmaterialien gibt schließlich die technischen Eigenschaften der gesamten Zelle, wie bspw. die äußere Zellspannung oder die Kapazität wieder.

#### Anodenmaterialien

Es werden zurzeit hauptsächlich zwei Arten von Anodenmaterialien in Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Zum einen sind dies Lithiumtitat-Elektroden und zum anderen Elektroden auf Graphit-Basis. Des Weiteren werden aktuell neuere Arten von negativen Elektroden entwickelt, zu welchen Lithium-Metalle und Lithium-Metalllegierungen mit Fokus auf Elektroden mit Lithium-Silizium-Legierung, gehören.<sup>10</sup>

Zunächst wird das konventionell eingesetzte Anodenmaterial betrachtet. So wird für die Anode in den meisten Anwendungen eine Form von Kohlenstoff genutzt. Dabei kommt Graphit als Aktivmaterial zum Einsatz, da es eine hohe theoretische Speicherkapazität von ca. 370 mAh/g aufweist und ein geringes Potential von ca. 0 V bis 0,25 V gegen Li/Li<sup>+</sup>. Zudem ist Graphit reichlich vorhanden, sodass keine Ressourcenknappheit vorliegt und dadurch geringe Kosten bei einem Einsatz mit sich bringt. Als weiterer Grund für den Einsatz von Graphit als Anodenmaterial ist das ungiftige Verhalten zu nennen. Ein Nachteil von dem Einsatz von Graphit ist die Reaktionsfreudigkeit mit Sauerstoff, sodass es bei Berührung mit diesem zu einem Brand kommen kann. Nichtsdestotrotz findet Graphit aufgrund der zuvor genannten Vorteile nach aktuellem Stand der Technik die meiste Anwendung.<sup>11</sup>

Neben dem Graphit, welches sich durch seine guten Eigenschaften auszeichnet, gibt es weitere Anodenmaterialien, welche potenziell in Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt werden bzw. für den zukünftigen Einsatz in Diskussion stehen. Zu diesen gehört das Lithiumtitat (Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>), welches in Elektrofahrzeugen des japanischen Herstellers Mitsubishi zum Einsatz kommt. Lithiumtitat mit Spinell-Struktur hat den Vorteil, dass es bei der Lithiierung keine Volumenänderung aufweist. Dadurch hat es den Vorteil einer äußerst langen Lebensdauer

---

<sup>10</sup> Vgl. Yu Miao et al. (Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements) 2019, S. 6.

<sup>11</sup> Vgl. Yu Miao et al. (Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements) 2019, S. 6 - 7.

und einer hohen Sicherheit, auch begründet durch das geringe Potential von ca. 1,55 V gegen Li/Li<sup>+</sup>. Des Weiteren weist Lithiumtitanat eine spezifische Kapazität von ca. 175 Ah/kg auf, welche im Vergleich zu der spezifischen Kapazität von Graphit ca. halb so groß ist. Die zweite Art der neueren Anoden, welche zurzeit erforscht wird, ist die Silizium-basierte Elektrode ( $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$ ). Diese erreicht eine theoretische, spezifische Kapazität von bis zu 4200 Ah/kg, welche somit mehr als zehnmal höher ist als die vom konventionell eingesetzten Graphit und zudem höher als die von reinem Lithium-Metall (3860 Ah/kg).  $\text{Li}_{15}\text{Si}_4$  kann im Vergleich zur Graphit-Anode 3,75-mal mehr Lithium einlagern, wodurch hohe Kapazitäten und, durch das niedrige Potential auch hohe Energien realisierbar sind. Dem Vorteil der hohen erreichbaren Kapazität durch diese Elektrode, steht die Volumenänderung während der chemischen Reaktionen gegenüber, welche bis zu 280% beträgt. Das Resultat dieser äußerst extremen Volumenänderungen ist ein signifikanter reversibler Kapazitätsverlust. Zudem sind der geringe Li<sup>+</sup>-Diffusionskoeffizient und ein hoher elektrischer Widerstand weitere Nachteile, welche in Kombination mit dem zuvor genannten Nachteil der hohen Volumenänderung, Grund für den Nichtgebrauch in der aktuellen Automobilindustrie sind. Diese Technologie wird jedoch zunehmend untersucht, um durch Weiterentwicklung zukünftig Anwendung in der Praxis finden zu können.<sup>12 13</sup>

### Kathodenmaterialien

Anders als bei der Anode, bei der als Aktivmaterial zumeist Graphit eingesetzt wird, besteht das Aktivmaterial der Kathode aus Verbindungen unterschiedlicher Übergangsmetalle, Lithium und Sauerstoff.<sup>14</sup> Die Auswahl des Aktivmaterials und vor allem die Auswahl des Kathodenmaterials spielt in der Lithium-Ionen-Technologie eine wesentliche Rolle. Kathodenmaterialien werden bezüglich Ihrer Kristallstruktur in drei Kategorien eingeteilt. So können die Aktivmaterialien der Kathode zwischen Oxiden mit schichtartigem Aufbau ( $\text{LiMO}_2$  mit M=Co, Ni, Mn, Al), Spinelle ( $\text{LiM}_2\text{O}_4$  mit M=Mn, Ni) und Phosphate ( $\text{LiMPO}_4$  mit M=Fe, Mn, Co, Ni) unterschieden werden. Beispiele für Oxide mit schichtartigem Aufbau sind  $\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$  (NMC111),  $\text{LiCoO}_2$  (LCO) oder auch  $\text{LiNiO}_2$  (LNO). Ein Aktivmaterial mit Spinelltyp als Kristallstruktur ist beispielsweise LMO. Lithium-Eisenphosphat (LFP) ist ein Aktivmaterial des Typs Phosphat.<sup>15</sup>

Während der letzten Jahre wurde  $\text{LiCoO}_2$ , u.a. aufgrund der hohen theoretischen Kapazität von 274 mAh/g, als eine weit genutzte Zellchemie in vielen mobilen Anwendungen eingesetzt. Jedoch wurden aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der toxischen Eigenschaften weitere Kathodenmaterialien über die Jahre hinweg untersucht, welche nun Einsatz in vielen

---

<sup>12</sup> Vgl. Yu Miao et al. (Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements) 2019, S. 7 – 8.

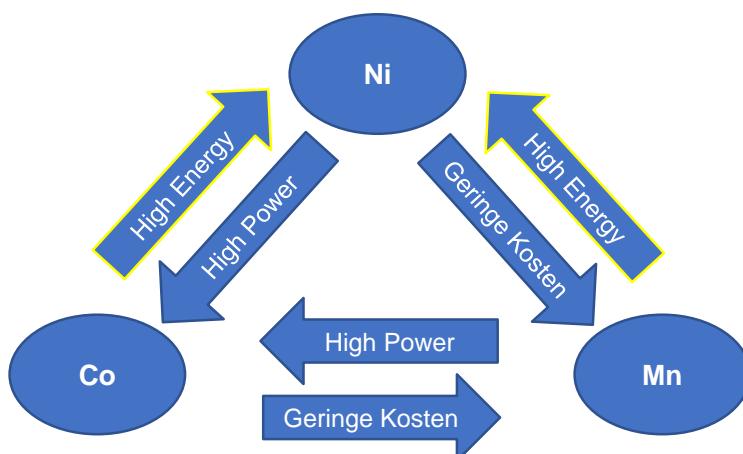
<sup>13</sup> Vgl. Daniel Oberhaus (Welcome to the Era of Supercharged Lithium-Silicon Batteries) 2020.

<sup>14</sup> Vgl. Schledde (Modellbasierte Identifikation von physikalischen Parametern zur Bestimmung der Veränderung charakteristischer Eigenschaften einer C/NMC Lithium-Ionen-Zelle durch Alterungsmechanismen zur Anwendung in Batteriemanagementsystemen) 2018, S. 48, S. 49.

<sup>15</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 31, S. 35, S. 38.

Anwendungen finden. In aktuelleren Anwendungen von Elektrofahrzeugen wird der Fokus auf die Einbringung von Kobalt, Mangan und Aluminium für das Kathodenmaterial gelegt, welche sich durch eine hohe Stabilität kennzeichnen. Zu diesen Kathodenmaterialien gehört zum einen das  $\text{LiNi}_{0,80}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$  (NCA) und zum anderen das  $\text{LiNi}_a\text{Mn}_b\text{Co}_c\text{O}_2$  (NMC, mit  $a + b + c = 1$ ), welche eine theoretische Kapazität von bis zu 280 mAh/g aufweisen können. Dabei wurde im Laufe der Zeit die Entwicklung von NMC mit dem Ziel der Erhöhung des Nickelanteils angestrebt. Grund dafür ist die dadurch entstehende Reduzierung der Kosten und der toxischen Eigenschaften, bei gleichzeitiger Erhöhung der Kapazität.<sup>16</sup>

NMC-Zellen kombinieren den Vorteil von LNO-Kathoden, welche hohe Kapazitäten aufweisen, sowie den Vorteil von LMO-Kathoden, welche sich durch ihre geringen Kosten auszeichnen. Abbildung 2.2 zeigt die Auswirkung auf die Eigenschaften einer NMC-Zelle, bei Änderung vom Nickel-, Kobalt-, oder Mangananteil der Zellchemie. Dabei wird deutlich, dass bei Erhöhung des Nickelanteils in der Zellchemie eine Energieerhöhung erzielbar ist, welche für die Anwendung beim Einsatz in rein elektrischen Fahrzeugen von großer Relevanz ist.  $\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$  (NMC111) wurde aus diesem Grund zu nickelreicheren NMC-Kathoden, wie etwa  $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$  (NMC622) oder  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$  (NMC811) weiterentwickelt, da sich somit höhere Kapazitäten realisieren lassen und schließlich die Anwendung batterie-elektrischer Fahrzeuge vorteilhafter wird.<sup>17</sup>



**Abbildung 2.2: Auswirkung des Nickel-, Kobalt-, Mangananteils einer NMC-Zelle<sup>18</sup>**

In Abbildung 2.3 ist das Potential über der spezifischen Kapazität verschiedener Aktivmaterialien dargestellt. Die Aktivmaterialien sind dabei in positive- und negative Materialien, bzw. Kathoden- und Anodenmaterialien aufgeteilt. Das elektrochemische Standardpotential der gesamten Zelle wird durch die Differenz der Potentiale der jeweiligen Halbzellen - in folgender

<sup>16</sup> Vgl. Usubelli et al. (Understanding the Overlithiation Properties of  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$  Using Electrochemistry and Depth-Resolved X-ray Absorption Spectroscopy) 2020.

<sup>17</sup> Vgl. Kwon et al. (Performance and Life Degradation Characteristics Analysis of NCM LIB for BESS) 2018, S.5 - 6.

<sup>18</sup> In Anlehnung an Kwon et al. (Performance and Life Degradation Characteristics Analysis of NCM LIB for BESS) 2018.

Formel mit Kathode und Anode gekennzeichnet - bestimmt. Es lässt sich somit die Spannung der Zelle wie folgt berechnen:<sup>19</sup>

$$U_{\text{Zelle}} = \phi_{\text{Kathode}} - \phi_{\text{Anode}} \quad (1)$$

$\phi_{\text{Kathode}}$  = Potential der positiven Halbzelle

$\phi_{\text{Anode}}$  = Potential der negativen Halbzelle

Dadurch lässt sich beispielsweise die nominelle Leerlaufspannung einer Zelle mit Graphit als Anodenmaterial und NCA als Kathodenmaterial zu ca.  $U_{\text{Zelle}} = 3,8 \text{ V} - 0,1 \text{ V} = 3,7 \text{ V}$  bestimmen.

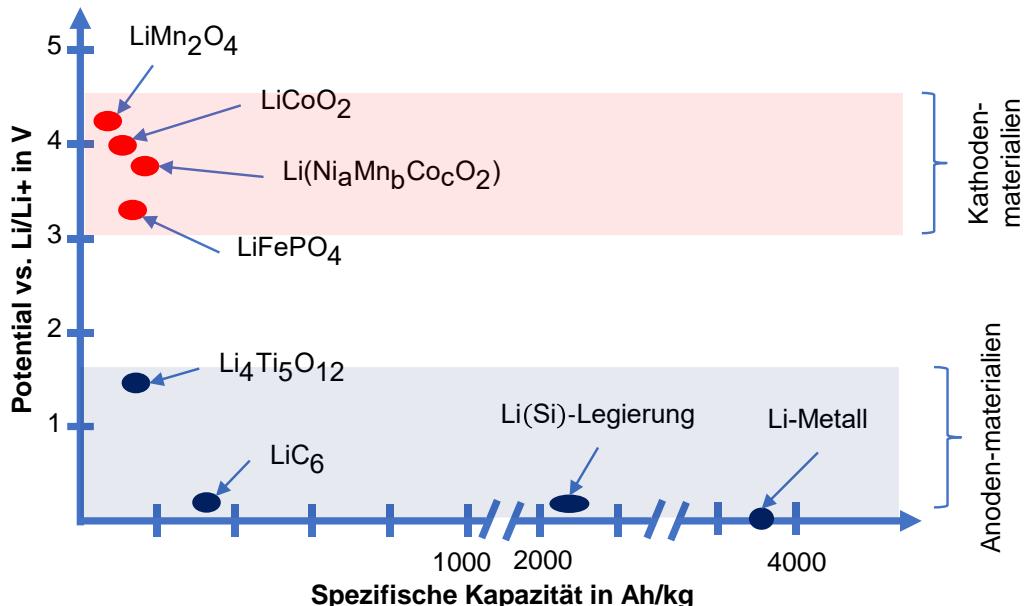


Abbildung 2.3 Potential und spezifische Kapazität verschiedener Aktivmaterialien<sup>20</sup>

In Tabelle 2.1 sind verschiedene Aktivmaterialien und deren elektrochemischen Eigenschaften wie die spezifische Kapazität, das Potential gegenüber Li/Li<sup>+</sup> und die kristallographische Dichte für die Kathode zusammenfassend aufgelistet. Diese werden im weiteren Verlauf der Arbeit für die Entwicklung des Zellauswahltools von hoher Relevanz sein.

<sup>19</sup> Vgl. Fuller et al. (Electrochemical engineering) 2018, S. 18.

<sup>20</sup> In Anlehnung an Yu Miao et al. (Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements) 2019, S. 4.

**Tabelle 2.1: Elektrochemische Daten verschiedener Kathodenmaterialien<sup>21 22</sup>**

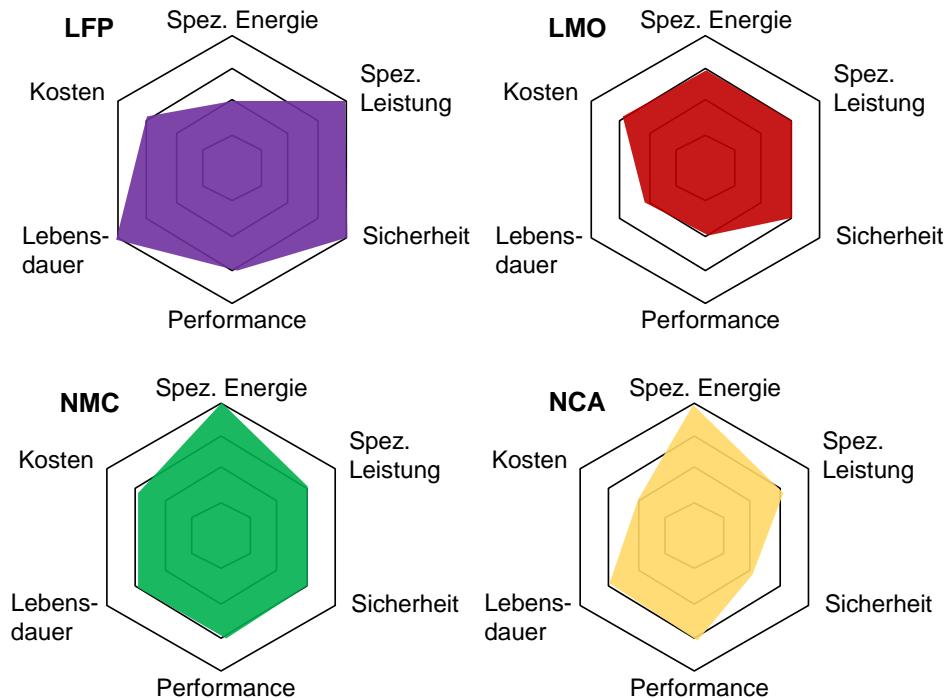
Aktivmaterial der Kathode	Spezifische Kapazität in Ah/kg	Potential gegen Li/Li <sup>+</sup> in V	Kristallographische Dichte in g/cm <sup>3</sup>
LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (LMO)	100	4,0	4,29
LiNi <sub>0,33</sub> Mn <sub>0,33</sub> Co <sub>0,33</sub> O <sub>2</sub> (NMC111)	160	3,7	4,7
LiNi <sub>0,6</sub> Mn <sub>0,2</sub> Co <sub>0,2</sub> O <sub>2</sub> (NMC622)	180	3,7	4,76
LiNi <sub>0,8</sub> Mn <sub>0,1</sub> Co <sub>0,1</sub> O <sub>2</sub> (NMC811)	200	3,7	4,87
LiFePO <sub>4</sub> (LFP)	160	3,4	3,6
LiNiCoAlO <sub>2</sub> (NCA)	200	3,7	4,01
LiCoO <sub>2</sub> (LCO)	160	3,9	4,99

Kathodenmaterialien werden nicht nur bezüglich deren elektrochemischen Eigenschaften ausgewählt, sondern umfassen auch weitere Faktoren, wie Kosten, Lebensdauer oder die Sicherheit, als entscheidende Kriterien. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus jedoch stärker auf den Aspekt der elektrochemischen Eigenschaften gelegt. Schichtartige Oxide zeichnen sich im Vergleich zu den anderen Kristallstrukturen durch ihre hohen Energiedichten aus, welche aufgrund der hohen Arbeitsspannungen zu begründen sind. Ein Nachteil ist, dass die in schichtartigen Oxiden vorkommenden Metalle wie bspw. Nickel oder Kobalt, preislich teuer sind. Im Gegensatz dazu ist Eisen im Vergleich äußerst preiswert, weshalb Kathodenmaterialien wie LFP die Kostenführerschaft bei der Herstellung des Kathodenmaterials besitzt. Nachteilig ist jedoch die geringe Energiedichte, bspw. im Vergleich zu NMC, welche mit LFP als Aktivmaterial zu realisieren ist. Betrachtet man den Aspekt der Sicherheit, so sind bei LFP Brände oder Explosionen aufgrund von intrinsischen Eigenschaften äußerst unwahrscheinlich. Im Gegensatz zu fast allen oxidischen Aktivmaterialien, welche starke exotherme Effekte aufzeigen, zeigt LFP bis 300°C keine thermischen Effekte. Zudem ist LFP, aber auch LMO ungiftig und aus ökologischer Sicht unschädlich. Abbildung 2.4 zeigt zusammenfassend die Eigenschaften von den Kathodenmaterialien LMO, NCA, NMC, LFP (bzw. LFMP). Dabei sind Sicherheit, spezifische Energie, spezifische Leistung, Lebensdauer, Kosten und Schnellladbarkeit dargestellt.<sup>23</sup>

<sup>21</sup> In Anlehnung an Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 42.

<sup>22</sup> Vgl. Chakraborty et al. (Layered Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries: Review of Computational Studies on LiNi 1 – x – y Co x Mn y O 2 and LiNi 1 – x – y Co x Al y O 2) 2020, S. 4.

<sup>23</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 41.



**Abbildung 2.4: Vergleich verschiedener Kathodenmaterialien bzgl. spez. Energie, spez. Leistung, Sicherheit, Performance, Lebensdauer, Kosten<sup>24</sup>**

Lithium-Ionen-Zellen haben sich über Jahre hinweg verändert und verbessert. So sieht man in Abbildung 2.5 die im Jahre 2016 prognostizierte Entwicklung der Zelltechnologien für den Zeitraum von 2015 bis 2030. Aufgeteilt in Generationen, werden die verschiedenen Batterietechnologien hinsichtlich ihres Beginns und Auslaufs graphisch dargestellt. Zudem werden die Generationen in optimierte und neue Zelltechnologien aufgeteilt. Deutlich wird, dass Zelltechnologien der Generation 1, 2a und 2b von 2015 bis heute präsent sind und Anwendung finden. Die Optimierung der Generation 2b soll in den kommenden Jahren auf dem Markt eingeführt werden, wodurch höhere Energiedichten zu realisieren sein werden. Mit der Einführung der neuen Generation vier und fünf, soll eine Verdopplung der Reichweite und gleichzeitig eine Halbierung der Kosten erzielt werden.<sup>25</sup>

<sup>24</sup> In Anlehnung an Yu Miao et al. (Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements) 2019, S. 10.

<sup>25</sup> Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland) 2016.

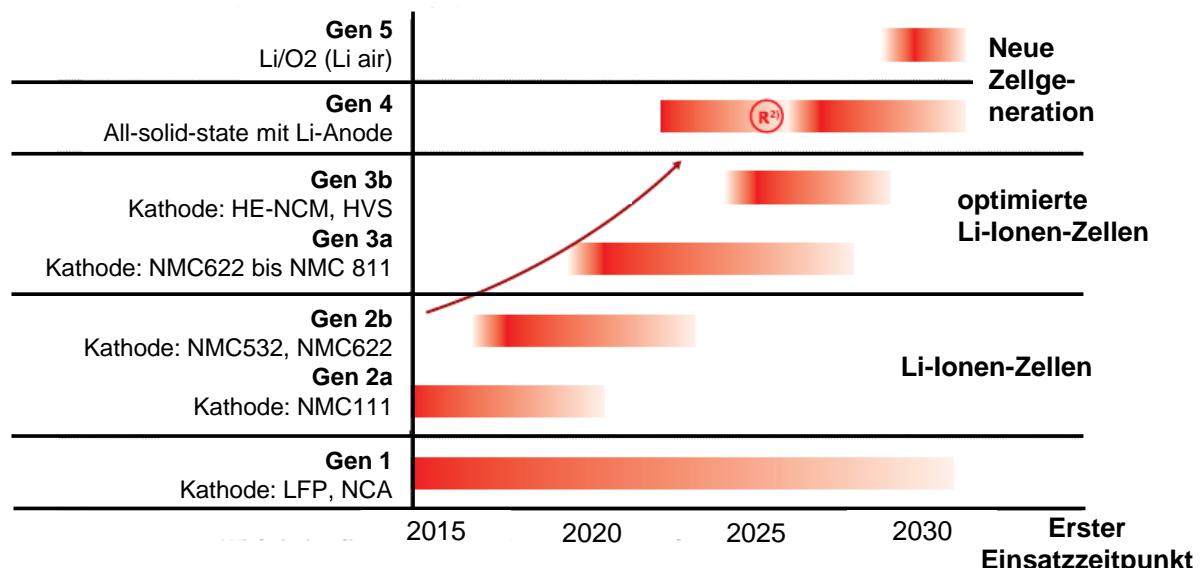


Abbildung 2.5: Entwicklung der Zelltechnologie von 2015 bis 2030<sup>26</sup>

## 2.2.2 Passive Zellmaterialien

Für die Funktionstüchtigkeit einer Zelle bedarf es neben den zuvor vorgestellten aktiven Zellmaterialien auch an passiven Zellmaterialien. Zu diesen gehören bspw. der Elektrolyt, der Separator, Additive, Binder und der Stromableiter.<sup>27</sup>

### Elektrolyt, Additive und Binder

Der Elektrolyt spielt für die Funktion der Lithium-Ionen-Zelle eine wesentliche Rolle, da dieser für die Übertragung der Ionen im elektrochemischen Prozess innerhalb der Zelle verantwortlich ist. Zudem legt der Elektrolyt die technischen Grenzen der Zelle fest, da die Leerlaufspannung  $V_{OC}$ , welche durch die Paarung der Elektroden potentiell realisiert werden kann, durch das elektrochemische Fenster des Elektrolyten begrenzt wird. Dieses elektrochemische Fenster ist als der Abstand zwischen dem sog. „highest occupied molecular orbital“ (HOMO) und dem „lowest unoccupied molecular orbital“ (LUMO), welcher in Abbildung 2.6 visuell dargestellt ist, definiert. Der Elektrolyt muss somit so gewählt werden, dass einerseits das Potential der Anode unterhalb des LUMO und andererseits das Potential der Kathode oberhalb des HOMO liegt, da andernfalls der eingesetzte Elektrolyt an der Anode chemisch reduziert oder an der Kathode oxidiert wird.<sup>28</sup>

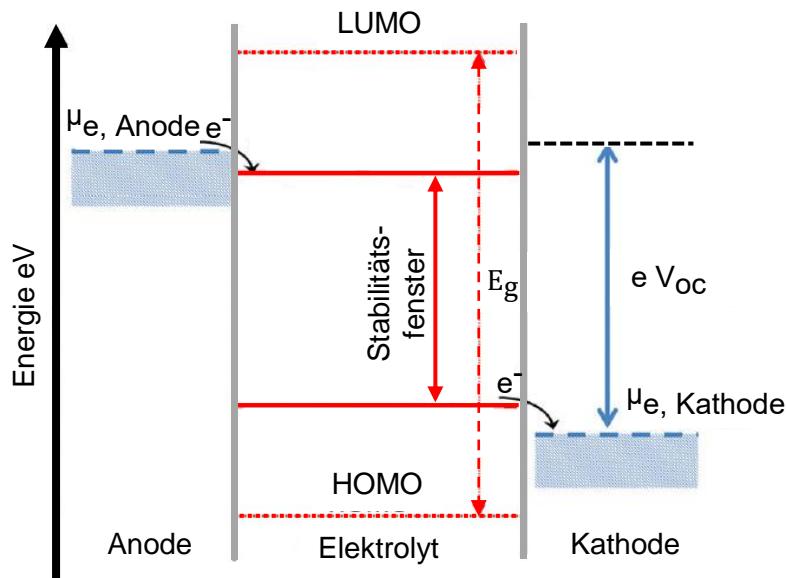
Anzumerken ist, dass nach aktuellen Forschungen der Stabilitätsbereich des Elektrolyten nicht exakt dem Abstand zwischen dem LUMO und dem HOMO entspricht, wie es konventionell in vielen Veröffentlichungen definiert wird, sondern aufgrund von chemischen Redoxreaktionen

<sup>26</sup> In Anlehnung an Nationale Plattform Elektromobilität (Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland) 2016, S. 19.

<sup>27</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 111.

<sup>28</sup> Vgl. Liu et al. (Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries) 2016, S. 111.

der Lösung mit naheliegenden Molekülen innerhalb des Bereichs zwischen dem LUMO und dem HOMO liegt. Dies ist in nachfolgender Abbildung 2.6 visuell dargestellt.<sup>29</sup>



**Abbildung 2.6: Stabilitätsfenster des Elektrolyten<sup>30</sup>**

Insgesamt besteht ein Elektrolyt aus dem Leitsalz, den Additiven und einem organischen aprotischen Lösungsmittel. Das Leitsalz hat verschiedene Anforderungen zu erfüllen, wobei eine hohe Löslichkeit, eine sehr hohe elektrochemische Stabilität und eine gute Verträglichkeit mit den Zellkomponenten zu den wesentlichen Anforderungen gehören. In den meisten Lithium-Ionen-Zellen wird heutzutage aufgrund der großen Übereinstimmung der Eigenschaften mit den Anforderungen eines Leitsalzes, Lithium-Hexafluorophosphat ( $\text{LiPF}_6$ ) eingesetzt. Die Hauptfunktion der Additive ist das Sicherstellen des Aufbaus einer sogenannten „Solid Electrolyte Interphase“ (SEI), einer Filmbildung auf der Anode. Die SEI ist somit die isolierende und zudem durchlässige Grenzfläche zwischen der negativen Elektrode und dem Elektrolyten, welche den Kontakt zwischen Elektrode und Lösungsmittel verhindert. Es kommt dadurch zu einer Reduzierung der Zersetzung des Lösungsmittels. Da bspw. eine Graphit-Anode ein geringes Reduktionspotential aufweist, ist die Anode auf die Bildung einer SEI-Schicht angewiesen. Dies bedeutet, dass die SEI-Schicht den reversiblen Lade- und Entladevorgang erst ermöglicht.<sup>31</sup> Eine weitere Eigenschaft, welche die SEI aufweist, ist ihre desolvatisierende Wirkung auf das Lithium-Ion. Dies bedeutet, dass es beim Durchgang der Schicht zur Abtragung von Lösungsmittel-Molekülen des Lithium-Ions kommt, sodass sich nach Durchgang des Lithium-Ions durch die SEI ein nacktes Kation ergibt, welches schließlich auf die Elektrode trifft. Als

<sup>29</sup> Vgl. Peljo et al. (Electrochemical potential window of battery electrolytes: the HOMO–LUMO misconception) 2018, S. 1.

<sup>30</sup> In Anlehnung an Peljo et al. (Electrochemical potential window of battery electrolytes: the HOMO–LUMO misconception) 2018, S. 4.

<sup>31</sup> Vgl. Heiskanen et al. (Generation and Evolution of the Solid Electrolyte Interphase of Lithium-Ion Batteries) 2019, S. 1.

Lösungsmittel dienen insbesondere zwei organische Lösungsmittelklassen, welche in Lithium-Ionen-Zellen eingesetzt werden. Diese sind Ether und Ester, wobei der Einsatz Ester und organischen Carbonaten dem aktuellen Stand der Technik entspricht. Ether hat aufgrund der eingeschränkten elektrochemischen Stabilität und dem geringen Oxidationspotentialen von ca. 4 V gegen Li/Li<sup>+</sup> an Bedeutung für den Einsatz in Lithium-Ionen-Zellen verloren.<sup>32</sup>

### Separator

Eine wichtige passive Komponente der Lithium-Ionen-Zelle ist der Separator. Während der gesamten Betriebszeit der Zelle sorgt der poröse Separator dafür, dass der direkte Kontakt zwischen Anode und Kathode verhindert wird. Üblicherweise haben Separatoren eine Dicke von 15-30 µm, wobei eine geringere Dicke auch zu einem geringeren Widerstand führt, jedoch eine hohe Dicke mehr Sicherheit bietet. Typische Materialien von Separatoren in Lithium-Ionen-Zellen sind Membrane auf Polyolefinbasis, welche im Herstellungsprozess mit submikrometergroßen Öffnungen versehen werden. Separatoren weisen somit eine bestimmte Porosität auf, die in der Regel bei Lithium-Ionen-Zellen ca. 40 % beträgt. In der Separatortechnologie spielt die Porosität eine wichtige Rolle, da diese die Durchlässigkeit eines Separators maßgeblich bestimmt.<sup>33</sup>

Die mikroporösen Separatoren gehören zu den konventionell eingesetzten Separatoren in der Lithium-Ionen-Batterietechnologie, da diese sich durch ihre geringen Kosten und ihrer einfachen Herstellung auszeichnen. Jedoch sind diese im Vergleich zu anderen untersuchten Separatortechnologien wie z.B. den Separatoren auf Basis von Verbundmaterialien hinsichtlich ihrer thermischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften nachteilig zu betrachten. Nichtsdestotrotz bilden mikroporöse Separatoren mit Keramikbeschichtung nach aktuellem Stand der Technik die optimale Lösung in Lithium-Ionen-Zellen und finden am häufigsten Einsatz.<sup>34</sup>

### Stromableiter

Zusätzlich zu den zuvor genannten Passivmaterialien einer Lithium-Ionen-Batterie, gehören die Stromableiter der Anode und der Kathode, sowie das Gehäuse zu den passiven Materialien. Anders als bei anderen Komponenten, wie dem Separator oder dem Elektrolyten, ist die Entwicklung der Stromableiter von Lithium-Ionen-Batterien seit 1991 nahezu unverändert geblieben. Für die negative Elektrode bildet eine Kupferfolie den konventionell eingesetzten Stromableiter in Lithium-Ionen-Batterien. Für die Kathode bildet eine Aluminium-Folie den üblich eingesetzten Stromableiter. Jedoch ist der geringe Entwicklungsstand der Stromableiter Grund für eine potenzielle Forschungslücke, welche untersucht werden kann. Zurzeit werden Stromableiter mit speziellen Oberflächen untersucht, welche das Ziel einer Performance-Steigerung der Zelle haben. Erforschte Stromableiter-Technologien sind nach dem Stand der

---

<sup>32</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 63, S. 64, S. 70.

<sup>33</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 24, S. 80, S. 82.

<sup>34</sup> Vgl. Costa et al. (Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes) 2019, S. 367.

Technik Einkomponenten- sowie Mehrkomponenten-Oberflächen, welche zur Optimierung der Performance beitragen können.<sup>35</sup>

### 2.3 Zellformate und deren Herstellungsprozess

Lithium-Ionen-Zellen können nach verschiedenen Ausführungsformen realisiert werden. So gibt es drei etablierte Zellformate (s. Abbildung 2.7), welche in der Industrie vorwiegend eingesetzt werden: Pouch-, Rund- und Prismatische Zellen.



Flachzelle (Pouchzelle)

Rundzelle

Prismatische Zelle

Abbildung 2.7: Zellformate von Lithium-Ionen-Zellen<sup>36</sup>

Unterschieden werden diese drei Formate durch die Bauform des Gehäuses und damit der Art der Elektrodenverarbeitung und der anschließenden Integration dieser in das Gehäuse. Aufgrund dessen wird zunächst der Herstellungsprozess der Elektroden beschrieben und anschließend die weiterführende Verarbeitung der hergestellten Elektroden zu den drei genannten Zellformaten. Im Anschluss werden die drei Zellformate miteinander verglichen und Vor- und Nachteile vorgestellt.

#### Elektrodenherstellung

Der Prozess der Elektrodenfertigung ist für alle drei Zellformate identisch und kann zusammengefasst in fünf- bzw. sechs Schritte eingeteilt werden<sup>37</sup>:

<sup>35</sup> Vgl. Yang et al. (A review on structuralized current collectors for high-performance lithium-ion battery anodes) 2020.

<sup>36</sup> In Anlehnung an Vgl. Dr.-Ing. Heiner Heimes (Vorlesungsreihe: Herstellung elektrischer Energiespeicher) 2020.

<sup>37</sup> Vgl. Heimes et al. (Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle) 2018, S. 4 – 9.

- Mischen
- Beschichten
- Trocknen
- Kalandern
- Slitting
- (Vakuumtrocknen)

Im ersten Schritt der Elektrodenherstellung wird ein sog. Slurry hergestellt, wobei dies in zwei Teilschritten geschieht: Mischen (Trockenmischung) und Dispergieren (Nassmischung). Im ersten Teilschritt werden Aktivmaterial, Additive, Leitruß, sowie Binder trocken durchmischt und danach in einem zweiten Teilschritt Lösungsmittel hinzugegeben, dispergiert und homogenisiert. Dabei wird nach einer Anodenrezeptur, bzw. Kathodenrezeptur vorgegangen, in welcher die Massenanteile wt% jeweils für Aktivmaterial, Additive, Binder und Leitruß dokumentiert sind. Im zweiten Schritt wird die Trägerfolie (Aluminium-Folie oder Kupfer-Folie) mit dem zuvor hergestellten Slurry (beidseitig) beschichtet. Diese Trägerfolien haben in der Regel eine Dicke von ca. 10 µm bis 25 µm und die Beschichtungsdicke liegt in einer Größenordnung zwischen ca. 200 µm bis 250 µm. Im dritten Prozessschritt wird die Folie in einem Trockner getrocknet und dabei das Lösungsmittel entzogen oder zurückgewonnen. Nachdem das Trocknen vollendet ist, besteht der nächste Schritt darin, die beidseitig beschichtete Folie mittels Walzenpaaren zu verdichten. Dieser Prozess wird Kalandern genannt. Zudem entsteht in diesem Prozessschritt die Porosität der Elektrode, welche abhängig von dem eigestellten Liniendruck der Walzpaare ist. Der fünfte Schritt der Elektrodenherstellung ist das Slitting. Dabei wird das Mutterband, welches im vorigen Schritt kalandriert wurde, in kleinere Bänder, sog. Tochterbänder, geschnitten und zu Coils verarbeitet. Abschließend besteht der letzte Schritt darin, Feuchtigkeit und Lösungsmittel dieser (Mutter-) Coils mittels Vakuumtrocknen zu entziehen. In Abhängigkeit des gewünschten Zellformates, werden nun die hergestellten Coils ggf. weiterverarbeitet.<sup>38</sup>



**Abbildung 2.8: Prozess der Elektrodenherstellung<sup>39</sup>**

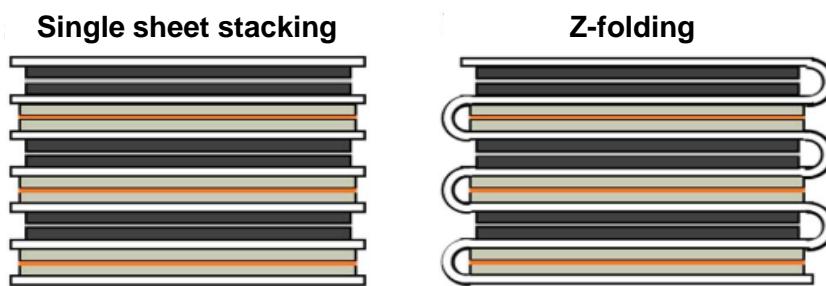
<sup>38</sup> Vgl. Heimes et al. (Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle) 2018, S. 4 - 9.

<sup>39</sup> In Anlehnung an Prof. David Greenwood (Automotive Batteries 101) 2018, Folie 11.

## Herstellung - Pouchzelle

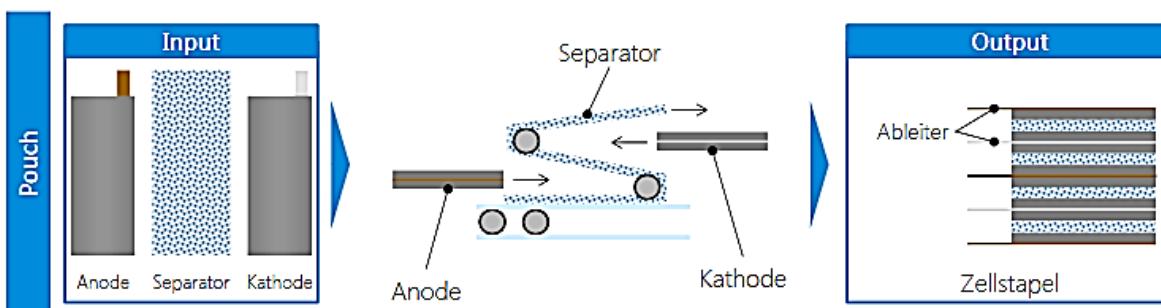
Bei einer Pouchzelle werden in der Weiterverarbeitung aus den Tochter-Coils durch Vereinzeln Sheets herausgetrennt. Mit diesen Kathoden-, Anoden- und Separatorsheets wird dann ein Folienverbund hergestellt. Dieser Folienverbund setzt sich aus einer wiederholten Abfolge-Stapelung von Anode, Separator und Kathode zusammen. Dabei wird die Abfolge: Anode – Separator – Kathode – Separator – Anode als Bi-Zellen-Konfiguration bezeichnet.<sup>40</sup>

Der Zellstapel kann dabei auf zwei verschiedene Arten erzeugt werden, welche in Abbildung 2.9 zu sehen sind. Zum einen besteht die Möglichkeit einzelne Elektroden- und Separator-Sheets zu stapeln und zum anderen können die Elektroden-Sheets mit der Z-Stapelung durch ein Separator-Band zu einem Stapel geformt werden.<sup>41</sup>



**Abbildung 2.9: Methoden der Zellstapelung einer Pouchzelle – Einzelne Sheets (links) und Z-Stapelung (rechts)<sup>42</sup>**

In Abbildung 2.10 ist der Stapelvorgang der Sheets für eine Pouchzelle mit einer Z-Stapelung exemplarisch dargestellt. Zu sehen ist der Input, welcher sich aus dem Anodensheet, dem Separator und dem Kathodensheet zusammensetzt. Diese Sheets werden nach der Bi-Zellen-Konfiguration gestapelt, sodass ein Zellstapel als Output entsteht.



**Abbildung 2.10: Stapelvorgang der Elektroden-Sheets für eine Pouch-Zelle mittels Z-Stapelung<sup>43</sup>**

<sup>40</sup> Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2013, S. 356.

<sup>41</sup> Vgl. Xia et al. (Experimental and Simulation Modal Analysis of a Prismatic Battery Module) 2020.

<sup>42</sup> In Anlehnung an Wu et al. (Good Practices for Rechargeable Lithium Metal Batteries) 2019, S. 4.

<sup>43</sup> In Anlehnung an Heimes et al. (Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle) 2018.

Die Ableiter der einzelnen Sheets im Zellstapel werden jeweils durch Schweißen vereint, so dass ein gemeinsamer Kupferableiter und ein gemeinsamer Aluminiumableiter übrigbleiben. Dieser Zellstapel wird anschließend in die Verpackung eingebracht, auf einer Seite versiegelt und auf der anderen Seite teilversiegelt. Anschließend wird der Elektrolyt befüllt und die entstehende Gastasche auf der teilversiegelten Seite entfernt. Das Verpackungsmaterial der Pouchzelle besteht aus einer Aluminiumverbundfolie, welche sich aus Polyamid, Aluminium und Polypropylen zusammensetzt.<sup>44</sup>

### Herstellung - Rundzelle

Die Tochter-Coils werden für Rundzellen - nicht wie bei einer Pouchzelle - geschnitten und anschließend gestapelt, sondern zu einer sog. Jelly-Roll gewickelt. Dazu werden die Anoden, Kathoden- und Separatorbänder aufeinandergelegt und um einen Pin zu einem Zylinder (Jelly-Roll) verarbeitet. Die entstandene Jelly-Roll wird im nächsten Schritt in das Rundzellen-Gehäuse eingelegt. Davor wird eine kreisförmige Isolatorplatte in das Gehäuse eingelegt, welche den Kontakt zwischen den unbeschichteten Randschichten der Jelly-Roll und dem Gehäuse verhindern soll. Die Ableiterfahne der Anode wird dabei meist in Richtung Gehäuseboden orientiert, während die Ableiterfahne der Kathode zum Gehäusedeckel gerichtet wird.<sup>45</sup> In Abbildung 2.11 ist der Prozess der Verarbeitung der Tochter-Coils zu einer Jelly-Roll für Rundzellen schematisch dargestellt. Hierbei ist die zuvor erläuterte Bi-Zellen-Konfiguration ersichtlich, in der abwechselnd Anode, Separator und Kathode kombiniert werden.

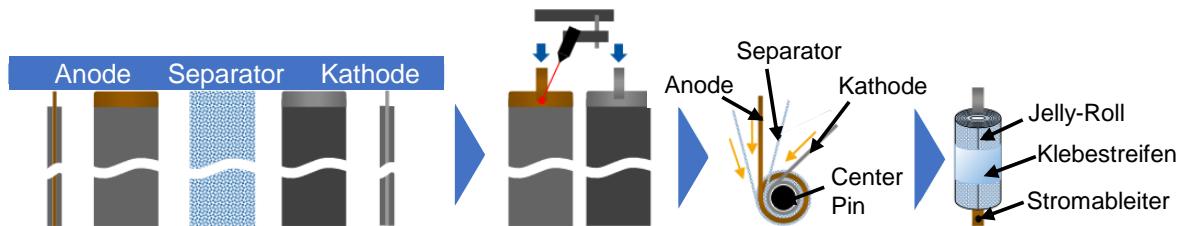


Abbildung 2.11: Verarbeitung der Tochter-Coils zu einer Jelly-Roll für Rundzellen<sup>46</sup>

### Herstellung - Prismatische Zelle

Prismatische Zellen können auf zwei Arten hergestellt werden. Zum einen können die Elektroden in Form einer Jelly-Roll - jedoch als Flachwickel - integriert werden. Die andere Möglichkeit besteht darin, wie bei der Pouchzelle, Elektrodensheets zu einem Zellstapel zu stapeln und anschließend in das prismatische Zellgehäuse einzusetzen.<sup>47</sup>

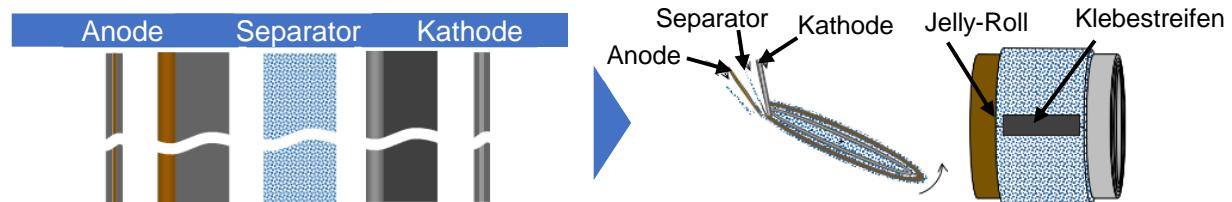
<sup>44</sup> Vgl. Heimes et al. (Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle) 2018.

<sup>45</sup> Vgl. Dr.-Ing. Heiner Heimes (Vorlesungsreihe: Herstellung elektrischer Energiespeicher) 2020.

<sup>46</sup> In Anlehnung an Dr.-Ing. Heiner Heimes (Vorlesungsreihe: Herstellung elektrischer Energiespeicher) 2020.

<sup>47</sup> Vgl. Tschöke (Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs) 2015, S. 62

Abbildung 2.12 zeigt die Verarbeitung der Elektrodenbänder zu einer Jelly-Roll, welche jedoch als Flachwickel ausgeführt wird. Nachdem nun der Flachwickel gefertigt wurde, wird dieser in das Gehäuse eingeführt, welches mit einem Deckel verschweißt wird. Der Deckel verfügt über eine Öffnung, welche für die Elektrolytbefüllung genutzt wird. Dabei wird die Batteriezelle unter Schutzgas durch das Ventil der Öffnung evakuiert und mit dem Elektrolyten befüllt. Die Schritte Evakuieren und Befüllen werden mehrmals wiederholt, sodass die Batteriezelle pulsierend befüllt wird.<sup>48</sup>



**Abbildung 2.12: Verarbeitung der Tochter-Coils zu einer Jelly-Roll (Flachwickel) für Prismatische Zellen<sup>49</sup>**

### Archimedes Spirale

Um die geometrische Auslegung einer Jelly-Roll, wie sie bspw. bei einer Rundzelle vorkommt, näher zu verstehen, wird die sog. Archimedes Spirale herangezogen. Definitionsgemäß sind Spiralen Kurven, welche eine Polargleichung  $r=r(\Theta)$  besitzen, wobei  $f=r(x)$  eine stetige, monoton wachsende Funktion ist. Eine Eigenschaft der Archimedes Spirale ist der konstante Windungsabstand, welcher für den hier vorliegenden Anwendungsfall, eine Jelly-Roll mathematisch darzustellen, geeignet ist.<sup>50</sup>

In Abbildung 2.13 sind die geometrischen Zusammenhänge der Archimedes Spirale schematisch dargestellt. Der Radius  $r$  kann in Abhängigkeit des Winkels  $\Theta$  und des Abstands  $D$  zwischen den Kurven wie folgt beschrieben werden:<sup>51</sup>

$$r = \left( r_0 + \frac{D}{2\pi} \Theta \right) \quad (2)$$

$\xi$  ist die tangentiale Bogenlänge entlang der Spirale, wobei die Änderung der Bogenlänge  $d\xi$  mit folgender Gleichung beschrieben werden kann:<sup>52</sup>

$$d\xi = \sqrt{r^2 + \left( \frac{dr}{d\Theta} \right)^2} d\Theta = \sqrt{\left( r_0 + \frac{D}{2\pi} \Theta \right)^2 + \left( \frac{D}{2\pi} \right)^2} d\Theta \quad (3)$$

<sup>48</sup> Vgl. Dr.-Ing. Heiner Heimes (Vorlesungsreihe: Herstellung elektrischer Energiespeicher) 2020.

<sup>49</sup> In Anlehnung an Dr.-Ing. Heiner Heimes (Vorlesungsreihe: Herstellung elektrischer Energiespeicher) 2020.

<sup>50</sup> Vgl. Haftendorn (Kurven erkunden und verstehen) 2017, S. 221 – 222.

<sup>51</sup> Vgl. Guo et al. (Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell) 2014, S. 221.

<sup>52</sup> Vgl. Guo et al. (Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell) 2014, S. 221.

Durch Integration der Gleichung (3), lässt sich der Zusammenhang zwischen der Bogenlänge  $\xi$  und dem polaren Winkel  $\Theta$  darstellen. Dabei kann das Ergebnis der Integration wie folgt approximiert werden:<sup>53</sup>

$$\xi(\Theta) = \int_0^\Theta \sqrt{\left(r_0 + \frac{D}{2\pi}\Theta\right)^2 + \left(\frac{D}{2\pi}\right)^2} d\theta \approx \int_0^\Theta \sqrt{\left(r_0 + \frac{D}{2\pi}s\right)^2} ds = r_0\Theta + \frac{D}{4\pi}\Theta^2 \quad (4)$$

mit  $\xi(\Theta)$  = Bogenlänge

$r$  = Radius

$r_0$  = Radien-Offset

$D$  = Abstand zwischen zwei Kurven

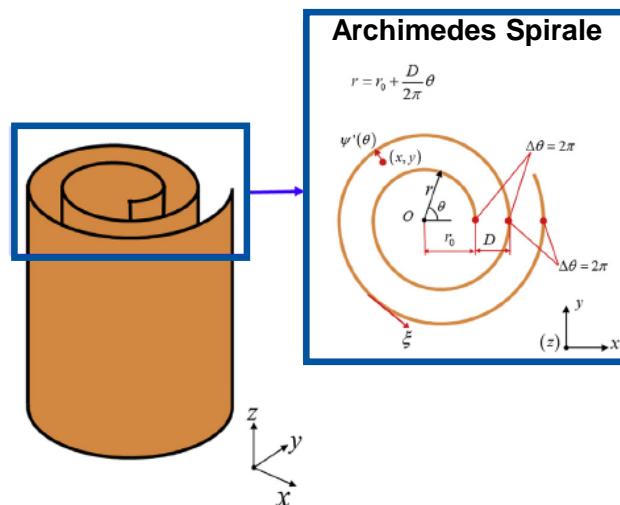


Abbildung 2.13: Archimedes Spirale - Geometrische Zusammenhänge<sup>54</sup>

#### Vergleich der drei Zellformate

Alle drei Zellformate kommen derzeit in der Automobilindustrie zum Einsatz. Sie weisen jeweils Vor- und Nachteile auf, welche den Auswahlprozess beeinflussen.

Rundzellen haben den Vorteil, dass das Gehäuse robust bei vorhandenem Innendruck ist und dadurch resistent gegen Verformungen. Zudem haben Rundzellen eine hohe Lebensdauererwartung und hohe spezifische Energiedichten. Nachteilig jedoch ist die geringe Packungsdichte auf Modulebene und die schlechte Wärmeabfuhr bei höheren Kapazitäten.<sup>55</sup>

Betrachtet man die Pouchzelle, so hat sie ihren Vorteil in der guten Wärmeabfuhr durch das Oberflächen-Volumen-Verhältnis. Es werden dadurch effizientere Kühlkonzepte realisierbar. Ein weiterer Vorteil der Pouchzelle ist die hohe Energiedichte aufgrund des leichten Verpackungsmaterials und die damit einhergehenden geringen Produktionskosten. Gegenläufig

<sup>53</sup> Vgl. Guo et al. (Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell) 2014, S. 221.

<sup>54</sup> In Anlehnung an Guo et al. (Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell) 2014, S. 221.

<sup>55</sup> Vgl. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 55.

zum Vorteil des leichten Verpackungsmaterials ist der geringe mechanische Schutz, sodass auf Modulebene ein stabiles Gehäuse notwendig wird.<sup>56</sup>

Prismatische Zellen kombinieren die Vorteile der beiden anderen Zellformate und zeichnen sich durch hohe Packungsdichten mit hoher Biegesteifigkeit aus. Nachteilig ist der hohe Gewichtsanteil allein durch das Gehäuse.<sup>57</sup> In Tabelle 2.2 sind die Vor- und Nachteile der drei Zelltypen zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile der drei Zellformate: Pouchzelle, Rundzelle, Prismatische Zelle<sup>58</sup>**

<sup>59</sup>

	Pouchzelle	Rundzelle	Prismatische Zelle
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr gute Kühlleigenschaften</li> <li>• Hohe Energiedichte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mechanische Belastbarkeit hoch</li> <li>• Hohe Lebensdauererwartung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Packungsdichte</li> <li>• Mechanische Belastbarkeit gut</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dichtigkeit</li> <li>• Stapelbarkeit der Elektroden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kühlung aufwendig</li> <li>• Komplizierte Kontaktierung im Pack</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohes Gewicht allein durch Gehäuse</li> </ul>

In nachfolgender Tabelle 2.3 sind zudem die strukturellen Eigenschaften der drei Zellformate im Vergleich zueinander dargestellt.

**Tabelle 2.3: Vergleich struktureller Eigenschaften der drei Zellformate<sup>60</sup>**

	Rundzelle	Prismatische Zelle	Pouchzelle
Gehäuse	Metall	Semihartes Plastik oder Metall	Aluminium Soft-Bag
Elek. Verbindung	Kupfer oder Nickel Streifen	Gewindeloch für Bolzen	Geschweißte Fahnen

<sup>56</sup> Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2013, S. 350.

<sup>57</sup> Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2013, S. 350.

<sup>58</sup> In Anlehnung an Dr.-Ing. Heiner Heimes (Vorlesungsreihe: Herstellung elektrischer Energiespeicher) 2020.

<sup>59</sup> Vgl. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 55.

<sup>60</sup> Vgl. Arora et al. (Application of Robust Design Methodology to Battery Packs for Electric Vehicles: Identification of Critical Technical Requirements for Modular Architecture) 2018, S. 14.

Sicherheit	Hoch durch PTC	Hoch durch PTC	Schlecht, da keine Sicherheitskomponenten
Entflambarkeit	Nicht möglich	Möglich	Gut möglich
Widerstand Druckkraft	Sehr gut	Sehr gut	Sehr schlecht

## 2.4 Batteriesysteme

Lithium-Ionen-Zellen werden für die Anwendung in Elektrofahrzeugen als Basiskomponente zu einem sog. Batteriesystem verbaut. Dabei können die Zellen zuvor in Module verbaut und verschaltet werden, wie in Abbildung 2.14 zu sehen ist. Das Batteriesystem, welches mehrere Module beinhalten kann, soll so konstruiert werden, dass dieses effizient, zuverlässig und sicher über einen langen Zeitraum betrieben werden kann. Für die Gestaltung und Auslegung des Batteriesystems werden die technischen Eigenschaften der eingesetzten Lithium-Ionen-Zellen berücksichtigt und dafür ein elektrisches und thermisches Management benötigt.<sup>61</sup>

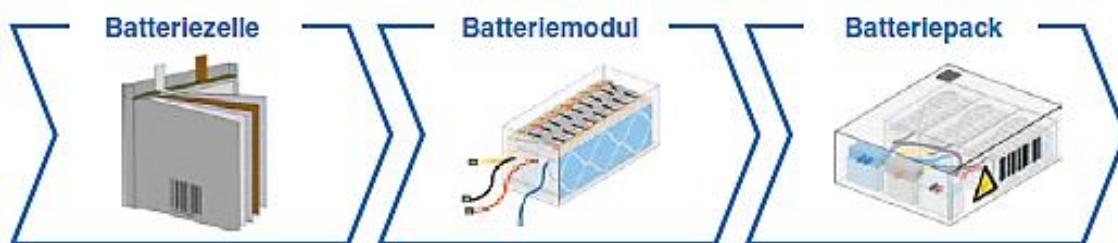


Abbildung 2.14: Von der Batteriezelle, über das Batteriemodul, zum Batteriepack<sup>62</sup>

### 2.4.1 Aufbau eines Batterie-Moduls

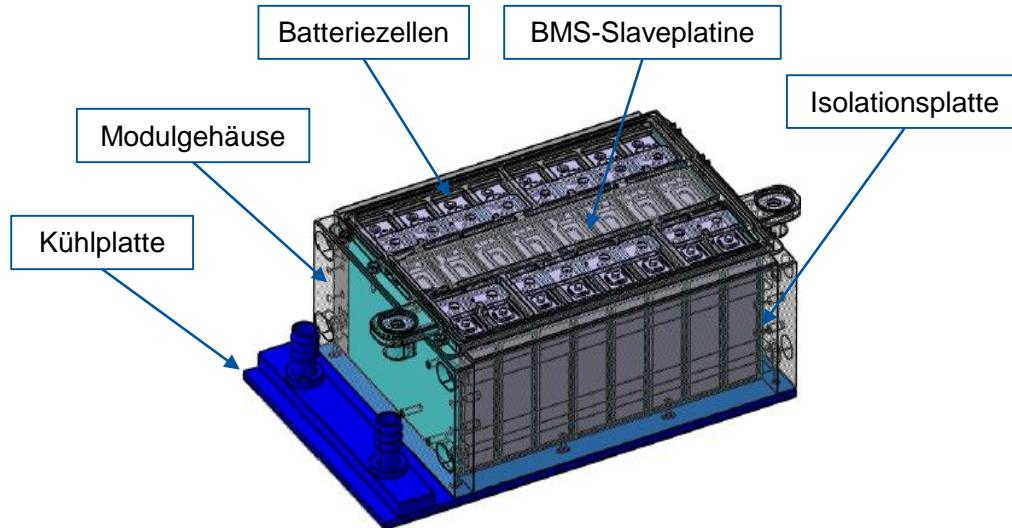
Der Aufbau eines Batteriesystems kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen durch einen Blockaufbau, bei welchem man alle einzelnen Energiespeicher zu einem einzigen Block verbaut und weitere notwendige Komponenten, wie Sensoren integriert. Zum anderen besteht jedoch die Möglichkeit ein Batteriesystem nach dem Prinzip des modularen Aufbaus zu konstruieren. Bei dieser Bauweise werden die einzelnen Energiespeicher zu sog. Batteriemodulen verbaut, welche als Untereinheit des gesamten Batteriepacks zu verstehen sind. Die Lithium-Ionen-Zellen innerhalb eines Moduls werden dabei mit einer bestimmten Verschaltung versehen. Anschließend wird durch eine passende Verschaltung der Module untereinander das Batteriepack konstruiert. Die Blockbauweise wird meist nur für kleine Batteriesysteme angewendet, während große Batteriesysteme heutzutage mit der Modulbauweise versehen werden. Begründet auf dem Vorteil einer leichten Handhabung und Wartung, welche durch die Aufteilung in einzelne Module resultiert.<sup>63</sup>

<sup>61</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 95.

<sup>62</sup> In Anlehnung an Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 238

<sup>63</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 96.

In Abbildung 2.15 ist der Aufbau eines Batteriemoduls schematisch dargestellt. Ein Batteriemodul besteht neben den Batteriezellen auch aus Sicherheits- und Kontrollkomponenten wie bspw. Sensoren, der Batteriemanagementsystem-/(BMS)-Slaveplatine, Isolationselementen und dem Modulgehäuse.



**Abbildung 2.15: Aufbau eines Batteriemoduls<sup>64</sup>**

Für jedes der drei in Kapitel 2.3 vorgestellten Zellformate verläuft die Integration der Zellen jedoch unterschiedlich. In Anbetracht dessen wird im Folgenden die Modulfertigung für alle drei Zellformate erläutert, welche für die Modellierung in der Modul-Ebene relevant sein wird.

#### Modulfertigung – Prismatische Zelle

Bei der Modulfertigung mit prismatischen Zellen werden diese miteinander verklebt, sodass die Zellen ohne Zwischenräume zusammengefügt werden können. Zumeist werden dafür Klebstoffe auf Polyurethanbasis mit elastomerischen Eigenschaften nach dem Härten eingesetzt. Dabei hat der eingesetzte Klebstoff den Vorteil, dass dieser eine elektrisch-, thermisch-isolierende Wirkung zwischen den einzelnen Zellen erzeugt. Dadurch wird ein interner Kurzschluss verhindert und im Falle einer Störung (z.B. Brand) der Schaden reduziert. In Abbildung 2.16 ist der Prozess der Modulfertigung nach dem Verkleben der Zellen chronologisch dargestellt. Die verklebten Zellen werden verpresst, um das sog. Swelling (Ausdehnen und Zusammenziehen) beim Lade- und Entladevorgang zu reduzieren. Diese Verspannung kann mittels einer Spannvorrichtung, einer Bandagierung, oder dem Modulkörper selbst realisiert werden. Nach dem Verspannen werden Isolationsplatten für den Wärmetransport und die elektrische Isolation eingesetzt. Schlussendlich wird der Zellstapel in das Modulgehäuse verbaut, verschaltet und nach Hinzufügen zuvor genannter Komponenten, wie bspw. der Slave-Platine und des Kabelbaums mit einer Schlussplatte versiegelt.<sup>65</sup>

<sup>64</sup> In Anlehnung an Smith et al. (Simulative method for determining the optimal operating conditions for a cooling plate for lithium-ion battery cell modules) 2014, S. 25.

<sup>65</sup> Vgl. Heimes et al. (Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs) 2018.

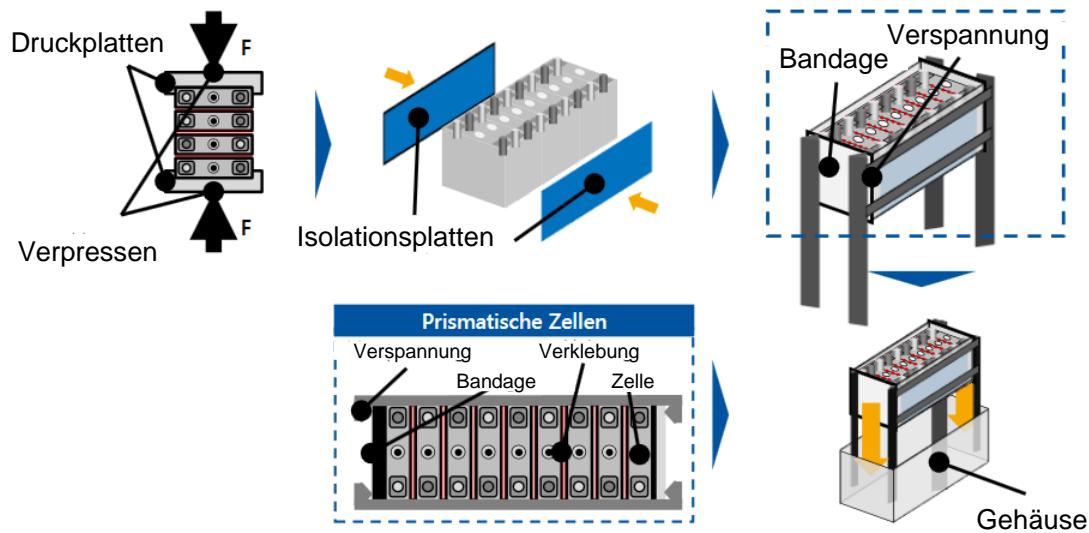


Abbildung 2.16: Modulfertigung - Prismatische Zelle<sup>66</sup>

#### Modulfertigung – Pouchzelle

Die Modulfertigung läuft, abgesehen von der Vormontage, für Pouchzellen analog zur Modulfertigung für prismatischer Zellen ab. Jedoch werden Pouchzellen nicht wie prismatische Zellen miteinander verklebt, sondern in einen Rahmen eingelegt, welcher mittels Federn beweglich ausgeführt wird (s. Abbildung 2.17). Die Notwendigkeit der Beweglichkeit des Rahmens liegt in der Atmungsfähigkeit der Pouchzellen begründet, sodass sich bei Atmung der Pouchzellen der Rahmen mitbewegen kann.<sup>67</sup>

#### Modulfertigung – Rundzelle

Wie bei den Pouchzellen, unterscheidet sich die Modulfertigung von Rundzellenmodulen hauptsächlich in der Vormontage. Während der Prozess nach der Vormontage analog zu dem der prismatischen Zellen abläuft, werden Rundzellen durch Zellhalter (s. Abbildung 2.17) positioniert. Die Zellhalter müssen jedoch nicht zwischen den einzelnen Zellen integriert werden, sondern können auch unter den Zellen als Hohlraum für eine Steckverbindung vorkommen. Dabei werden die Zellen in Zellhalter fixiert, sodass sich dadurch mehr Zellen im gleichen Bauraum anordnen lassen. Die Atmung der Rundzellen kann durch das Modulgehäuse selbst verhindert werden.<sup>68</sup>

<sup>66</sup> In Anlehnung an Heimes et al. (Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs) 2018.

<sup>67</sup> Vgl. Heimes et al. (Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs) 2018.

<sup>68</sup> Vgl. Heimes et al. (Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs) 2018.

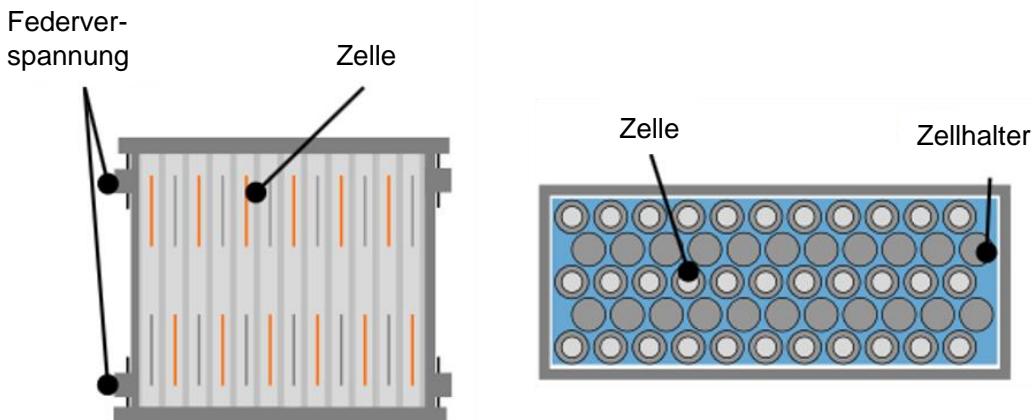


Abbildung 2.17: Vormontage - Pouchmodul (links) und Rundzellenmodul (rechts)<sup>69</sup>

Wie zuvor erwähnt, werden die Zellen nach der Vormontage elektrisch verschaltet. Die Verschaltung der Zellen innerhalb des Moduls spielt eine bedeutende Rolle für die Erfüllung der technischen Anforderungen angesetzter Zielvorgaben. Zellen können auf zwei Arten verschaltet werden: seriell oder parallel. Bei einer Serienschaltung ergibt sich die Spannung des Moduls aus der Summe der Einzelspannungen der verschalteten Zellen:<sup>70</sup>

$$U_{Modul} = n_{Seriell} \cdot U_{Zelle} \quad (5)$$

mit  $U_{Modul}$  = Spannung des Moduls

$n_{Seriell}$  = Anzahl serieller Zellen

$U_{Zelle}$  = Spannung der Zelle

Bei der zweiten Art der Verschaltung, der Parallelschaltung, können zwei oder mehr Stränge von seriell verschalteten Zellen parallelgeschaltet werden. Dabei erhöht sich die Kapazität der Batterie in Abhängigkeit der Anzahl der parallel geschalteten Zellen, wie folgende Gleichung darstellt:<sup>71</sup>

$$C_{Modul} = n_{Parallel} \cdot C_{Zelle} \quad (6)$$

mit  $C_{Modul}$  = Kapazität des Moduls

$n_{Parallel}$  = Anzahl paralleler Zellen

$C_{Zelle}$  = Kapazität der Zelle

Die resultierende Energie des Batteriemoduls kann anschließend mithilfe der Kapazität des Moduls und dessen Spannung berechnet werden:<sup>72</sup>

$$E_{Modul} = U_{Modul} \cdot C_{Modul} \quad (7)$$

<sup>69</sup> In Anlehnung an Heimes et al. (Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs) 2018.

<sup>70</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 96.

<sup>71</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 96.

<sup>72</sup> Vgl. Warner (Battery Pack Design Criteria and Selection) 2015, S. 40.

mit  $E_{Modul}$  = Energie des Moduls

$U_{Modul}$  = Spannung des Moduls

$C_{Modul}$  = Kapazität des Moduls

Die Leistung pro Zelle wird durch Multiplikation des Zellstroms mit dem Innenwiderstand der einzelnen Zelle bestimmt:<sup>73</sup>

$$P_{Zelle} = (I_{Zelle})^2 \cdot R_{int} \quad (8)$$

$P_{Zelle}$  = Leistung des Moduls

$I_{Zelle}$  = Zellstrom

$R_{int}$  = Innerer Widerstand

Die Leistung des gesamten Moduls kann mittels der Anzahl der Zellen pro Modul und der Zellleistung ermittelt werden:<sup>74</sup>

$$P_{Modul} = P_{Zelle} \cdot n_{Zellen/Modul} \quad (9)$$

$P_{Modul}$  = Leistung des Moduls

$n_{Zellen/Modul}$  = Anzahl der Zellen pro Modul

Mindestens zwei oder mehr fertige Module werden im nächsten Schritt final zu einem Batteriepack verbaut, welches auch einen bestimmten Aufbau aufweist und auf die Anforderungen abgestimmt werden muss.

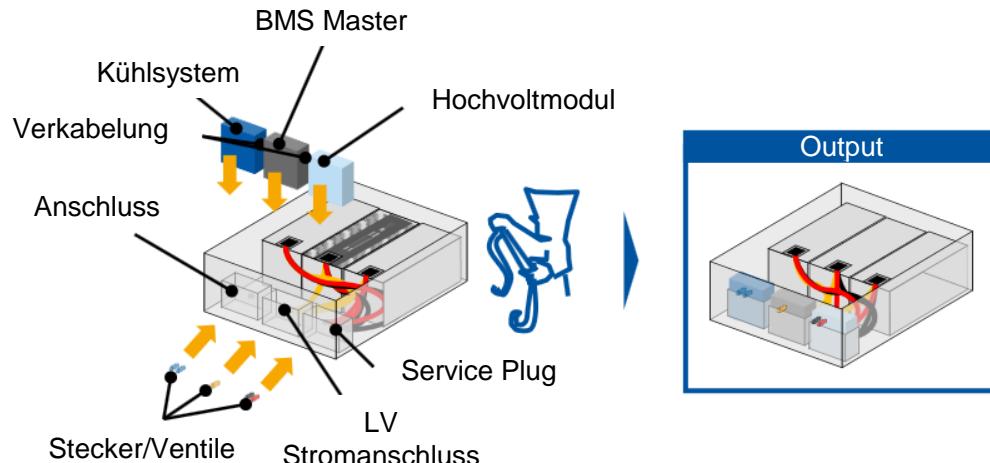
#### 2.4.2 Aufbau eines Batteriepacks

Neben den Lithium-Ionen-Zellen bei einem Blockaufbau oder den Modulen bei einem Modulaufbau, besteht das Batteriepack auch aus weiteren mechanischen, elektrischen und elektro-nischen Komponenten, welche eine Abstimmung untereinander benötigen. Abbildung 2.18 zeigt den schematischen Aufbau eines Batteriepacks, bei dem vier Hauptkomponenten zu sehen sind: Die Batteriemodule, das Kühlsystem, der BMS-Master und das Hochvoltmodul. Weiterhin besteht ein Batteriepack aus Komponenten wie bspw. den Anschlüssen und der Verkabelung. Das Batteriemanagementsystem (BMS) sorgt für die Überwachung und Steuerung des Batteriesystems, aber auch für die Kommunikation zur Fahrzeugseite. Liegt ein Modulaufbau vor, so werden die Module untereinander entweder seriell oder parallel verschaltet. Die technischen Größen des Batteriepacks wie Spannung, die Kapazität, die Energie und die Leistung können analog mit den Formeln aus Kapitel 2.4.1 bestimmt werden.

---

<sup>73</sup> Vgl. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S. 43.

<sup>74</sup> Vgl. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S. 44.



**Abbildung 2.18: Aufbau eines Batteriepacks<sup>75</sup>**

Die Energiemenge von derzeit eingesetzten Batteriepacks variiert von ca. 20 kWh bis ca. 100 kWh, bei Gewichten von ca. 200 kg bis 550 kg. In nachfolgender Tabelle sind die technischen Eigenschaften auf dem Markt befindlicher batterieelektrischer Fahrzeuge beispielhaft dargestellt.

**Tabelle 2.4: Energiemenge, Gesamtgewicht und Packgewicht einiger auf dem Markt befindlicher Elektrofahrzeuge<sup>76</sup>**

	Energiemenge in kWh	Gesamtgewicht in kg	Batteriepack-Gewicht in kg
Tesla Model S	85	2188	544
Nissan Leaf	30	1447	270
BMW i3	33	1245	230
Renault Zoe	41	1480	305

### 2.4.3 Thermisches Verhalten

Das Thermomanagement einer Lithium-Ionen-Batterie spielt eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer des Batteriesystems. Dabei umfasst der Begriff Thermomanagement sowohl Kühl-, als auch Heizaufgaben, welche für jede Zellchemie und jedes Zellformat individuell bewältigt werden müssen. In Abbildung 2.19 ist der Einfluss der Betriebstemperatur auf die Leistung, der Lebensdauer und dem dafür anzuwendenden Thermoma-

<sup>75</sup> In Anlehnung an Heimes et al. (Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs) 2018.

<sup>76</sup> Vgl. Berjoza et al. (Influence of batteries weight on electric automobile performance) 2017, S. 4.

nagement dargestellt. Deutlich wird, dass der optimale Betriebsbereich der Lithium-Ionen-Batterie bei ca. 20 °C bis 40 °C liegt. In diesem Temperaturbereich weist die Batterie ihre höchste Leistungsfähigkeit und gleichzeitig ein akzeptables Alterungsverhalten auf.<sup>77</sup>

Abweichungen von dem optimalen Temperaturbereich der Lithium-Ionen-Batterie führen zu negativen Einflüssen bezüglich Lebensdauer und Leistungsfähigkeit sowie zu Kapazitätsreduktion der Lithium-Ionen-Zelle.<sup>78</sup>

Bei Betriebstemperaturen unter 20 °C steigt der Innenwiderstand der Zelle überproportional mit sinkender Temperatur. Dadurch kann es bspw. bei Unterschreiten von 0 °C zu Leistungsdefiziten von bis zu 30 % kommen. Des Weiteren kann es dadurch zu irreversiblen Schädigungen der Zellen aufgrund von Alterungsmechanismen kommen. Zu diesen gehört das Lithium-Plating, welches den Grund für die aufkommende Kapazitätsreduktion darstellt. Betrachtet man die Effekte von Betriebstemperaturen über 40 °C, so kommt es in der Zelle zu überproportional schneller Alterung. Nach einer Faustregel halbiert sich die Lebensdauer bei einer Erhöhung der Temperatur um 10 K.<sup>79</sup>

Betriebstemperatur	-20°C	0°C	20°C	40°C	60°C
Leistung und Verfügbarkeit	<70% $R_z$ sehr hoch	90% $R_z$ hoch	100%	100% → 0% Abriegelung	
Lebensdauer	Zellarterung beim Laden		Ideale Temperatur	Zellarterung → Thermal Runaway	
Thermomanagement	Heizen				Kühlen

**Abbildung 2.19: Einfluss der Betriebstemperatur auf Leistung, Lebensdauer und Thermomanagement<sup>80</sup>**

Vergleicht man die drei in Kapitel 2.3 vorgestellten Zellformate bezüglich des Kühlauflandes, so weist die Rundzelle im Vergleich zur prismatischen Zelle und zur Pouchzelle geometrisch bedingt Nachteile auf. Grund dafür ist das geringe Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, welches den Wärmetransport vom Zellinneren zur Oberfläche negativ beeinflusst. Weiterhin ist die geometrische Form einer Rundzelle, mit gewölbter Außenfläche, der Grund für die schwere thermische Kontaktierung von Wärmeleitelementen, sodass dadurch die Abfuhr der Wärme erschwert wird.<sup>81</sup>

<sup>77</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 166.

<sup>78</sup> Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 370.

<sup>79</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 166 – 167.

<sup>80</sup> In Anlehnung an Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 166.

<sup>81</sup> Vgl. Korthauer (Handbuch Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 167.

## Kühlkonzepte

Auf Zell-Ebene gibt es verschiedene Kühlkonzepte, welche in Abhängigkeit des Zelltyps und des abzuführenden Wärmestromes gestaltet werden können. In Abbildung 2.20 sind verschiedene Kühlkonzepte für Lithium-Ionen-Batterien dargestellt, welche je nach Anwendungsfall auszuwählen und anzuwenden sind. Eines der etablierten Kühlkonzepte ist die Temperierung mittels Luftkühlung. Bei dieser Methode wird die Zelle mit einem Luftstrom umströmt und dabei die freien Oberflächen gekühlt. Da bei dieser Kühlung keine thermische Kontaktierung der Zelle erforderlich ist, ist die Luftkühlung einfach zu realisieren. Der erhöhte Raumbedarf für Komponenten wie die Kühlluftkanäle und die Inhomogenität beim Kühlprozess sind jedoch als Nachteile zu beachten. Dem Nachteil des Raumbedarfs stehen Kühlkonzepte, welche die Zelle thermisch kontaktieren, entgegen. Dazu gehört das Kühlen mittels einer Bodenplatte, welche an dem Zellboden kontaktiert wird. Dieses Kühlkonzept wird häufig bei Zellen mit geringer Höhe und dicker Wandstärke eingesetzt. Ein weiteres kontaktierendes Kühlkonzept bietet die Zwischenzellkühlung, welche mit dem Kühlkonzept mit Bodenplatte kombiniert werden kann, falls höhere Kühlleistungen erforderlich sind. Diese Art von Kühlung ist aus thermodynamischer Sicht die optimale Lösung, da der Pfad vom Zellinneren zum Kühlkreislauf am geringsten ist. Sie ist jedoch auch die am schwierigsten umsetzbare und teuerste Variante. Die vierte Möglichkeit der Zelltemperierung stellt die Ableiterkühlung dar. Bei diesem Kühlkonzept erfolgt die Kühlung direkt an den Ableitern, weshalb bspw. Pouchzellen mit ihren flachen Ableitern dieser Methode entgegenkommen. Ein gemeinsamer Nachteil von Kühlkonzepten, welche auf Kontaktierung basieren, ist zum einen die erhöhte Komplexität im Konstruktionsprozess und zum anderen das erhöhte Gewicht sowie die erhöhten Kosten, die durch die Kühlplatte und das Kühlmedium zustande kommen.

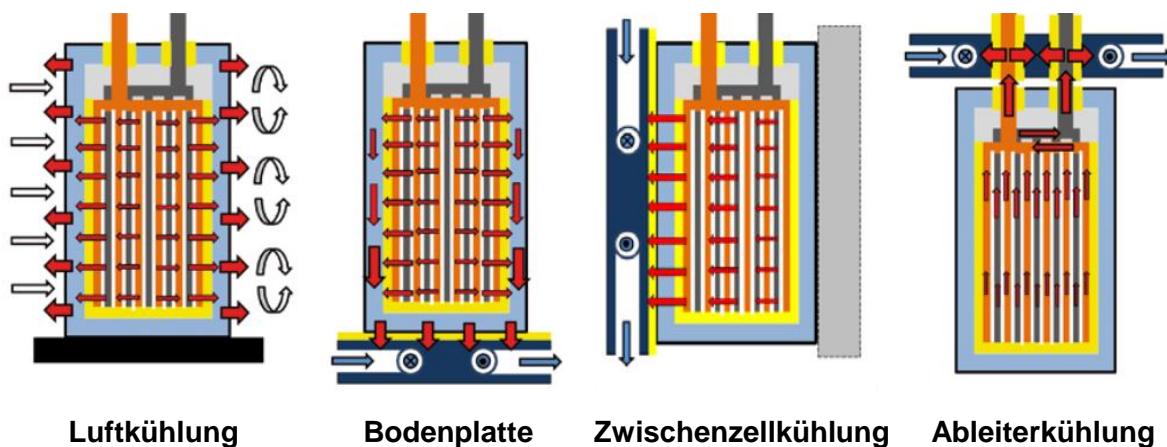


Abbildung 2.20: Methoden zur Zelltemperierung<sup>82</sup>

<sup>82</sup> In Anlehnung an Dr. Achim Wiebelt, Tobias Isermeyer, Thomas Siebrecht, Dr. Thomas Heckenberger (ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift) 2009, S. 502.

### Thermisch-mathematische Beschreibung der Wärmeentwicklung einer Zelle

Die Wärmeentwicklung einer Zelle kann mit dem Energiegleichgewicht nach Bernadi et al. wie folgt formuliert werden, wobei die Polarisationswärme und die chemische Reaktionswärme aufgrund geringer Relevanz nicht berücksichtigt werden:<sup>83</sup>

$$\dot{Q} = I \cdot (U_{OCV} - U_{Bat}) - I \cdot T_N \cdot \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} \quad (10)$$

$\dot{Q}$  = Wärmestrom der Zelle in W

$U_{OCV}$  = Leerlaufspannung in V

$U_{Bat}$  = Batteriespannung in V

$T_N$  = Betriebstemperatur in K

$\frac{\partial U_{OCV}}{\partial T}$  = Spannungs-/Temperaturgradient

Der Temperaturgradient ist von geringer Größenordnung, sodass dieser im weiteren Verlauf vernachlässigt werden kann. Zudem kann durch Dividieren des Wärmestroms  $\dot{Q}$  mit dem Zellvolumen  $V$ , die Wärmestromdichte gebildet werden. Der Ausdruck  $I \cdot (U_{OCV} - U_{Bat})$  wird außerdem durch Einbringen des inneren Widerstandes  $R$  umschrieben und kann vereinfacht wie folgt dargestellt werden:<sup>84</sup>

$$q = \frac{I}{V} \cdot (U_{OCV} - U_{Bat}) = \frac{I^2 \cdot R}{V} \quad (11)$$

$q$  = Wärmestromdichte der Zelle in  $\frac{W}{m^3}$

$V$  = Volumen des Zellgehäuses in  $m^3$

$R$  = Innerer Widerstand der Zelle in  $\Omega$

Mit Annahme einer homogenen Temperaturverteilung und eines vernachlässigbaren Wärmeleitwiderstands innerhalb der Zelle, lässt sich die Temperaturentwicklung der Zelle wie folgt formulieren:<sup>85</sup>

$$m \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = I \cdot (U_{OCV} - U_{Bat}) - h_u \cdot A \cdot \Delta T - \epsilon_{em} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_z^4 - T_u^4) \quad (12)$$

mit  $m$  = Masse der Zelle in kg

$c_p$  = Spezifische Wärmekapazität in  $\frac{J}{kg \cdot K}$

<sup>83</sup> Vgl. Ye et al. (Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle) 2019a, S. 3.

<sup>84</sup> Vgl. Ye et al. (Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle) 2019a, S. 3.

<sup>85</sup> Vgl. Alhanouti et al. (New Electro-Thermal Battery Pack Model of an Electric Vehicle) 2016, S. 6.

$A$  = Fläche der Zelle in  $\text{m}^2$

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz zwischen Zelle und Umgebung in K

$T_z$  = Zelltemperatur

$h_u$  = Wärmeübergangskoeffizient in  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

$\varepsilon_{em}$  = Emissionsgrad

$T_u$  = Umgebungstemperatur in K

$\sigma$  = Stefan-Boltzman-Konstante in  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$

## 2.5 Entwicklungsprozess in der Fahrzeugtechnik

Die Entwicklung eines Fahrzeugs unterliegt vielen komplexen Prozessen und muss daher systematisch angegangen werden. Ein methodisches und standardisiertes Vorgehen stellt dabei das V-Modell dar. Das V-Modell dient in vielen Entwicklungsprozessen als Richtlinie für die Planung und Durchführung von Projekten, unter Berücksichtigung des gesamten Systemlebenszyklus. Die Zielsetzung dabei ist die Minimierung von Projektrisiken, die Verbesserung und Gewährleistung von Qualität, die Reduzierung der Gesamtkosten über den gesamten Projekt- und Systemlebenszyklus sowie die Verbesserung der Kommunikation zwischen allen Beteiligten.<sup>86</sup>

In Abbildung 2.21 ist ein solches V-Modell abgebildet, welches die Fahrzeugentwicklung aus technischer Sicht erläutert. Der Prozess der Fahrzeugentwicklung gliedert sich in drei Phasen: Die Strategiephase, Konzeptionierung und Vorleistung sowie die Serienentwicklung. Dabei werden nach dem Prinzip des V-Modells die Schritte der Entwicklung zunächst von der obersten Ebene, dem Gesamtkonzept, betrachtet, und über die Systemebene hinweg, bis hin zur Komponenten-Ebene verfeinert. Die vertikale Richtung entlang des V-Modells entspricht somit dem Detaillierungsgrad, während entlang der horizontalen Richtung die Entwicklungsdauer aufgetragen werden kann. Auf der Ebene des Gesamtkonzeptes werden die für die Entwicklung des Fahrzeugs benötigten Spezifikationen bestimmt. Dabei werden die gewünschten Anforderungen definiert und somit die Zielvorgaben und Randbedingungen festgelegt. Ausgehend vom Beginn des ersten Zweiges, bei dem das Gesamtfahrzeuglastenheft zugrunde gelegt wird, werden die Spezifikationen der Teilsysteme, sowie deren simulative Überprüfung herangeführt. Weiter entlang des Zweiges folgen anhand des Einzelkomponentenlastenheftes die konstruktive Planung und die Bewertung der Teile.<sup>87</sup>

Der zweite Pfad des V-Models (rechts) besitzt dieselben Ebenen, jedoch wird hier von der Ebene der Komponenten bis hin zur Gesamtfahrzeugebene hoch entwickelt. Es wird also ent-

---

<sup>86</sup> (V-Modell XT - Teil 1: Grundlagen des V-Modells) 2021, S. 3 – 4.

<sup>87</sup> Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 187 - 188.

lang des „V's“ zurück zur Gesamtfahrzeugebene weiterentwickelt. Dabei kommt es zur Validierung der Einhaltung der anfangs definierten Lasten, Systemtests und der finalen Integration in das Gesamtfahrzeug. Hierbei gilt, dass jeder Reifegrad in dem V-Modell in ein kleines V-Modell umgesetzt werden kann. Das V-Modell der Fahrzeugentwicklung besteht also aus mehreren untergeordneten V-Modellen innerhalb der Ebenen.<sup>88</sup>

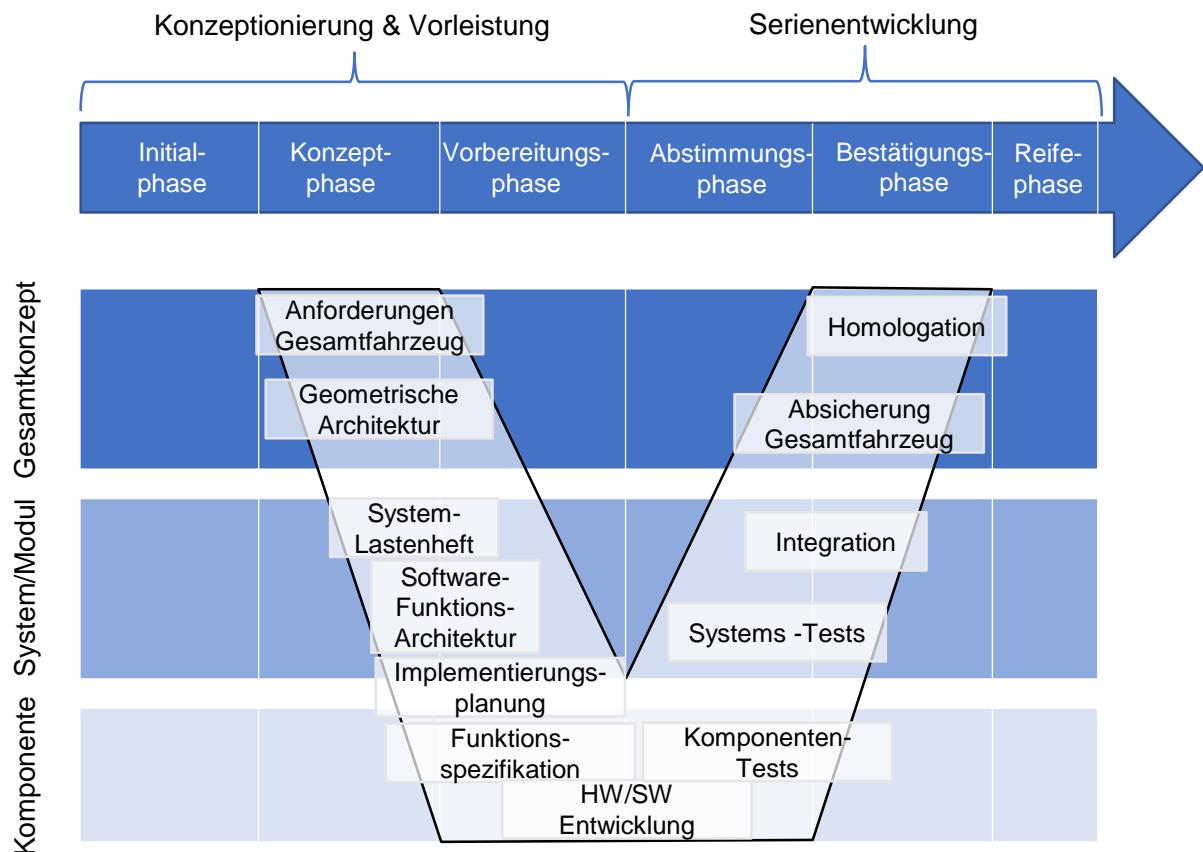


Abbildung 2.21: V-Modell der Fahrzeugentwicklung<sup>89</sup>

## 2.6 Entscheidungstheorien

Bei der Zellauswahl für einen bestimmten Anwendungsfall kann mehr als eine Zell-Variante zur Auswahl stehen. Für die Bestimmung der optimalen Zellkonfiguration auf Zell-, Modul-, oder Packebene wird daher die Entscheidung der auszuwählenden Lösung durch Anwendung von Entscheidungstheorien bestimmt. Unter anderem stellt die sog. Nutzwertanalyse ein mögliches Verfahren für den Entscheidungsprozess dar. So wird im Folgenden die Nutzwertanalyse als Entscheidungsmodell für den Zellauswahlprozess beschrieben und dabei die Vorgehensweise erläutert. Zudem wird die Technik TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) als weitere Möglichkeit zur Lösungsfindung bei Entscheidungsproblemen vorgestellt.

<sup>88</sup> Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S.188.

<sup>89</sup> In Anlehnung an Kampker et al. (Elektromobilität) 2013, S. 189.

## Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein nicht-monetäres, systematisch ausgeprägtes Entscheidungsmodell, welches eine große Flexibilität durch freie Gestaltung der Kriterien und der eingesetzten Skalen bietet. Der prinzipielle, zusammengefasste Aufbau einer Nutzwertanalyse ist in folgender Abbildung 2.22 dargestellt.<sup>90</sup>

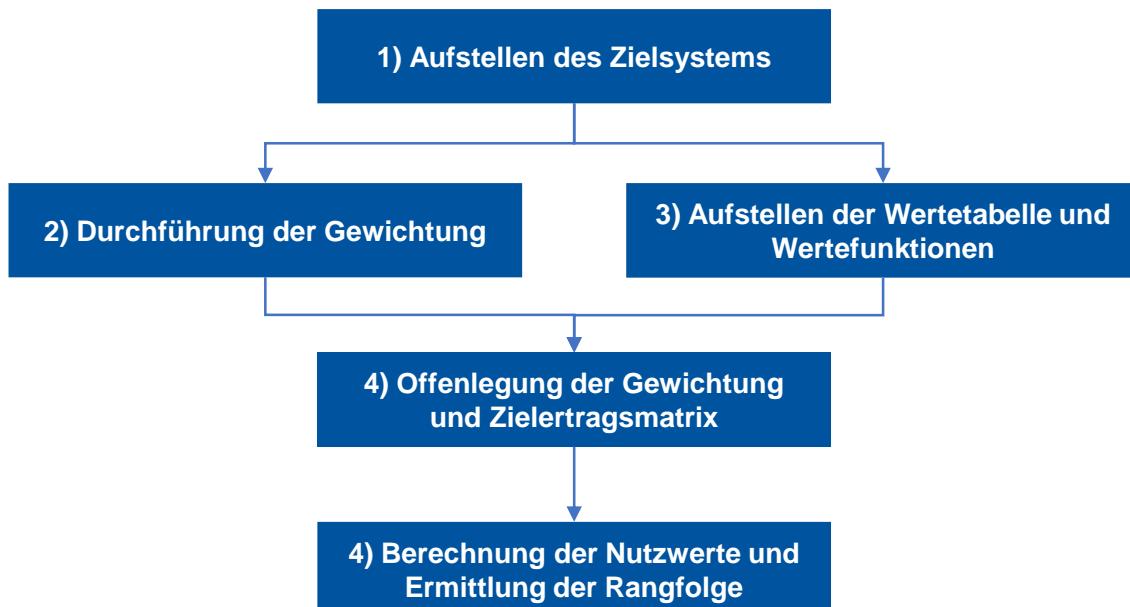


Abbildung 2.22: Aufbau einer Nutzwertanalyse<sup>91</sup>

Dieser Aufbau verdeutlicht den Kern der Nutzwertanalyse und kann bei Berücksichtigung der Vor- und Nacharbeit in neun Schritten beschrieben werden. Diese Schritte sollten chronologisch ausgearbeitet werden und werden im Folgenden beschrieben:<sup>92</sup>

Der erste Schritt besteht darin, ein konstruktives Arbeitsumfeld zu schaffen, bei dem Moderator, Teilnehmerkreis, Zeitbudget und die Kontinuität der Arbeit zu organisieren sind. Dieser Schritt ist in dieser Arbeit von geringer Relevanz, jedoch wird er vollständigkeitshalber kurz erläutert. Der Moderator muss die Methodik und die Varianten kennen, welche in dem Prozess eingesetzt werden. Der Teilnehmerkreis muss ebenfalls organisiert werden, sodass verschiedene Expertisen am Entscheidungsprozess teilhaben können. Jedoch muss der Teilnehmerkreis keine Kenntnisse über die Funktionsweise der Nutzwertanalyse aufweisen. Die Organisation des Zeitbudgets besteht darin genügend Zeit zu reservieren. Die Kontinuität der Arbeit besagt, dass die Analyse ein fortlaufender Prozess ist, und daher ständiger Kontakt zu Fachexperten erforderlich ist. Im zweiten Schritt wird das Entscheidungsproblem benannt. Das Verfahren der Nutzwertanalyse kann für zwei Arten von Entscheidungsproblemen angewandt werden. Zum einen kann die Entscheidung eines Auswahlproblems herbeigeführt werden, indem eine bestimmte Anzahl an Alternativen gegenübergestellt und anschließend bewertet wird.

<sup>90</sup> Vgl. TUM School of Management (Umweltbezogene Entscheidungen) 2020.

<sup>91</sup> In Anlehnung an TUM School of Management (Umweltbezogene Entscheidungen) 2020.

<sup>92</sup> Vgl. Kühnapfel (Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb) 2014, S. 6 -20.

Zum anderen kann die Nutzwertanalyse eingesetzt werden, um eine Anzahl an vorliegenden Alternativen zu sortieren und priorisieren. Den Alternativen wird ein Nutzwert zugeordnet, mit denen die Alternativen in eine Intervallskala eingeordnet werden können. In einem nächsten Schritt wird die Auswahl der Entscheidungskriterien getroffen. Wie zuvor in Schritt 2 erläutert, werden Alternativen in der Nutzwertanalyse entweder verglichen oder in eine Rangordnung sortiert. Wichtig dabei ist es, dass die ausgewählten Alternativen tatsächlich relevant sind. Werden Alternativen vergessen, so muss die Nutzwertanalyse wiederholt werden. Im vierten Schritt werden die Entscheidungskriterien gesammelt. Kriterien für die Nutzwertanalyse müssen sinnvoll gewählt werden. Zehn bis zwanzig Kriterien sind in der Regel ausreichend, um ein Problem ausreichend bewerten zu können. Den Kriterien können folgende Anforderungen gestellt werden: Vollständigkeit, Bewertbarkeit, Relevanz, oder Reproduzierbarkeit. Nachdem alle Kriterien in Schritt 4 festgelegt wurden, muss im fünften Schritt die Bedeutung der Kriterien mittels einer Verhältniszahl definiert werden. Diese Zahl wird auch als „Gewichtung“ bezeichnet und stellt die relative Bedeutung der einzelnen Kriterien dar. Es werden also in diesem Schritt den Kriterien zunächst Wertnoten zugeteilt, welche bspw. von null bis zehn oder auch null bis hundert reichen können. Dabei ist zu beachten, dass bei Kriterien mit ähnlicher Gewichtung eine kleine Skalenspreizung genutzt werden sollte. Die Gewichtung der Kriterien kann auch mittels Einteilung von Kriteriengruppen erfolgen. Dies sollte bei einer großen Anzahl an Kriterien angestrebt werden, da es sonst zu einer Ergebnisverzerrung durch Überbewertung kommen kann. Eine weitere Methode stellt die Gewichtung durch die Paarvergleichsmethode dar. Nun müssen die Entscheidungskriterien bewertet werden. Für die Bewertung der Kriterien wird in diesem Schritt eine Skala herangezogen. Diese Skala hat die Aufgabe die Ergebnisse eindeutig und praktikabel zu visualisieren. Mögliche Arten der Skalierung sind zum einen die 10er-Skala. Beispieldhaft kann eine 10er-Skala für die Bewertung der Entscheidungskriterien genutzt werden. Dabei wird die Skala von null bis zehn in drei Bereiche unterteilt, welche von null bis 3,5 (unnütz), 3,6 bis 7,5 (bedingt nützlich) und 7,6 bis 10 (hilfreich) gespalten werden können. Im letzten Schritt wird der Nutzwert aller vorliegenden Alternativen bestimmt. Dabei wird die Gewichtung des Kriteriums mit der Bewertung der Alternative multipliziert und so ein Punktwert ermittelt. Dies wird für jedes Kriterium und jede Alternative wiederholt, sodass je Alternative mehrere Punktwerte in Abhängigkeit der Anzahl der Kriterien vorliegen. Anschließend wird die Summe der Punktwerte je Kriterium gebildet, sodass sich als Resultat der Nutzwert der jeweiligen Alternative ergibt. Abschließend bestehen die Schritte 8 und 9 zum einen aus einer Sensibilitätsanalyse, bei der mehrere Nutzwertanalysen durchgeführt und verglichen werden, und zum anderen aus der Dokumentation der Ergebnisse.<sup>93</sup>

### TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

Eine weitere Möglichkeit der Entscheidungsfindung bietet die TOPSIS-Methode. Bei dieser Methode werden verschiedene Alternativen einer Lösung untereinander verglichen, wobei die

---

<sup>93</sup> Vgl. Kühnapfel (Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb) 2014, S. 6 - 20.

Grundidee dieser Methode lautet, dass die optimale Alternative den größten Abstand zur negativ idealen Alternative und den geringsten Abstand zur positiv idealen Lösung aufweist. Ziel dieser Methode ist es somit, die Vorteilhaftigkeit einer Alternative innerhalb einer Menge an Alternativen, zu bestimmen. Im Folgenden wird die Vorgehensweise der TOPSIS-Methode erläutert. Der erste Schritt besteht darin, die Entscheidungsmatrix aufzustellen. Dabei bilden die Zeilen die Alternativen  $i$  und die Spalten enthalten die verschiedenen Kriterien  $j$ . Diese Matrix sieht folgendermaßen aus:<sup>94</sup>

**Tabelle 2.5: Entscheidungsmatrix nach TOPSIS**

	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Kriterium $j$
Alternative 1	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{1j}$
Alternative 2	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{2j}$
...	...	...	...	...
Alternative $i$	$X_{i1}$	$X_{i2}$	$X_{i3}$	$X_{ij}$

Als nächstes wird die normierte Entscheidungsmatrix gebildet, indem jeder Eintrag der Matrix mit einem Normierungsfaktor dividiert wird, welcher aus der Wurzel der Summe der Werte der betrachteten Spalte  $j \sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}$ , dividiert wird. Die normierte Entscheidungsmatrix sieht dementsprechend wie folgt aus:<sup>95</sup>

**Tabelle 2.6: Normierte Entscheidungsmatrix nach TOPSIS**

	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Kriterium $j$
Alternative 1	$\frac{X_{11}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{12}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{13}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{1j}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$
Alternative 2	$\frac{X_{21}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{22}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{23}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{2j}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$
...	...	...	...	...
Alternative $i$	$\frac{X_{i1}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{i2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{i3}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$	$\frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=i} X_{nj}^2}}$

<sup>94</sup> Vgl. BAlioti et al. (Multi-Criteria Decision Making Using TOPSIS Method Under Fuzzy Environment. Application in Spillway Selection) 2018, S. 2 – 3.

<sup>95</sup> Vgl. BAlioti et al. (Multi-Criteria Decision Making Using TOPSIS Method Under Fuzzy Environment. Application in Spillway Selection) 2018, S. 2 – 3.

Als nächstes wird die normierte Matrix mit einer Gewichtung versehen, und somit eine gewichtete Entscheidungsmatrix erzeugt. Die Gewichtung  $g_j$  wird je Kriterium ausgewählt und folgendermaßen verrechnet:<sup>96</sup>

**Tabelle 2.7: Gewichtete Entscheidungsmatrix nach TOPSIS**

Alternative	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Kriterium j
Alternative 1	$\frac{X_{11}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n1}^2}} \cdot g_1$	$\frac{X_{12}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n2}^2}} \cdot g_2$	$\frac{X_{13}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n3}^2}} \cdot g_3$	$\frac{X_{1j}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{nj}^2}} \cdot g_j$
Alternative 2	$\frac{X_{21}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n1}^2}} \cdot g_1$	$\frac{X_{22}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n2}^2}} \cdot g_2$	$\frac{X_{23}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n3}^2}} \cdot g_3$	$\frac{X_{2j}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{nj}^2}} \cdot g_j$
...	...	...	...	...
Alternative i	$\frac{X_{i1}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n1}^2}} \cdot g_1$	$\frac{X_{i2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n2}^2}} \cdot g_2$	$\frac{X_{i3}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{n3}^2}} \cdot g_3$	$\frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N X_{nj}^2}} \cdot g_j$

Nun wird die positive ideale Lösung  $A_j^+$  und die negative ideale Lösung  $A_j^-$  aus der gewichteten Entscheidungsmatrix abgelesen. Diese Werte sind die Spaltenmaxima ( $A_j^+ = \max \{X_{1j,g,n}, \dots, X_{ij,g,n}\}$ ) und Spaltenminima ( $A_j^- = \min \{X_{1j,g,n}, \dots, X_{ij,g,n}\}$ ), des jeweiligen Kriteriums. Der letzte Schritt der Methode besteht darin, den Abstand  $S_i^+$  einer Alternative zum Best Case und den Abstand  $S_i^-$  zum Worst Case zu bestimmen. Schließlich wird die relative Nähe zur Best Case Alternative berechnet, wodurch sich ein Ranking erstellen lässt. Die Abstände werden wie folgt berechnet:<sup>97</sup>

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{1j,g,n} - A_j^+)^2} \quad (15)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_{1j,g,n} - A_j^-)^2} \quad (16)$$

$$S_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (17)$$

$S_i^+$  = Abstand zum Best Case

$S_i^-$  = Abstand zum Worst Case

$S_i$  = Relative Nähe zur Best Case Alternative

<sup>96</sup> Vgl. BAlioti et al. (Multi-Criteria Decision Making Using TOPSIS Method Under Fuzzy Environment. Application in Spillway Selection) 2018, S. 2 – 3.

<sup>97</sup> Vgl. BAlioti et al. (Multi-Criteria Decision Making Using TOPSIS Method Under Fuzzy Environment. Application in Spillway Selection) 2018, S. 2 – 3.

### 3 Entwicklung des Zellauswahltools in MATLAB

In diesem Kapitel wird die Entwicklung und Modellierung des Zellauswahltools in MATLAB erläutert. Dabei wird zunächst die Einordnung der Zellauswahl im Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs näher beschrieben und die Bedeutung eines Tools für die Auswahl von Lithium-Ionen-Zellen verdeutlicht. Daraufhin wird auf die Methodik der Zellauswahl eingegangen, in welcher der Ablauf und die Struktur der Modellierung beschrieben wird. In dem letzten Unterkapitel wird schließlich die Modellierung in MATLAB von der Zelle zum Batteriepack chronologisch erläutert.

#### 3.1 Einordnung der Zellauswahl im Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs

Die Entwicklung eines Zellauswahltools für die Auswahl des elektrischen Energiespeichers von Elektrofahrzeugen hat eine bedeutende Rolle für den gesamten Entwicklungsprozess des Fahrzeugs. So wird durch die systematische Zellauswahl ein Werkzeug im Entwicklungsprozess bereitgestellt, wodurch prospektiv eine Technologiebewertung sowie resultativ eine Auswahlmöglichkeit optimaler Optionen zur Verfügung gestellt wird.

In Abbildung 3.1 ist das in Kapitel 2.5 erwähnte V-Modell in abgewandelter Art und Weise zu sehen. Dabei wird die Zellauswahl in dem Prozess der Fahrzeugentwicklung hervorgehoben, welche in der betrachteten Abbildung farblich gekennzeichnet ist. Nachdem die Kundenanforderungen und dadurch die Anforderungen an das Fahrzeug auf der Fahrzeug-Ebene definiert sind, können diese Anforderungen auf der System-Ebene übernommen werden. Auf dieser Ebene wird das Gesamtfahrzeug in einzelne Systeme unterteilt, welche den geforderten Spezifikationen gerecht werden müssen. Es werden somit Systemanforderungen aus den Kundenanforderungen abgeleitet, welche die verschiedenen Systeme im Fahrzeug zu erfüllen haben. Zu diesen Systemen gehören bspw. die Karosserie, das Fahrwerk, aber auch der elektrische Antrieb. Der elektrische Antrieb wird im tiefergehenden Schritt in seine Subsysteme eingeteilt, welche für die Anforderungserfüllung ausgelegt werden müssen. Zu den Subsystemen des elektrischen Antriebs gehören bspw. der Elektromotor und der elektrische Energiespeicher. Der elektrische Energiespeicher ist somit ein Subsystem im Entwicklungsprozess des Fahrzeugs und muss somit den Anforderungen entsprechend ausgelegt werden. An dieser Stelle wird ein Tool benötigt, welches die Vorauswahl der Zellen des Batteriesystems, bzw. die Vorauswahl des gesamten Batteriesystems ermöglicht. Durch die Einbringung der modellierten Zellauswahl in diesem Entwicklungsschritt, wird der Zeitaufwand und die Kosten für die weiteren Schritte im Entwicklungsprozess reduziert. Zellen können unterschiedliche Zellformate und Zellchemien aufweisen, welche sich in ihren technischen Eigenschaften unterscheiden. Die integrierte Zelle hat somit maßgeblich Auswirkung auf die spezifischen Spezifikationen des finalen Batteriesystems, weshalb die Untersuchung nach dem Bottom-Up-Prinzip eine sinnvolle Herangehensweise darstellt. Durch das in dieser Arbeit entwickelte Zellauswahltool wird folglich eine Möglichkeit der Auswahl optimaler Batteriekonfigurationen nach dem Bottom-Up-Prinzip ermöglicht, sodass der Teilprozess im V-Modell zu optimierten Ergebnissen führen kann, welche sich auf die restliche Entwicklung positiv auswirken. Nach der Vorauswahl der

Zellen, kann weiter entlang des V-Modells entwickelt werden, sodass die Simulation zur praktischen Umsetzung übergeht.

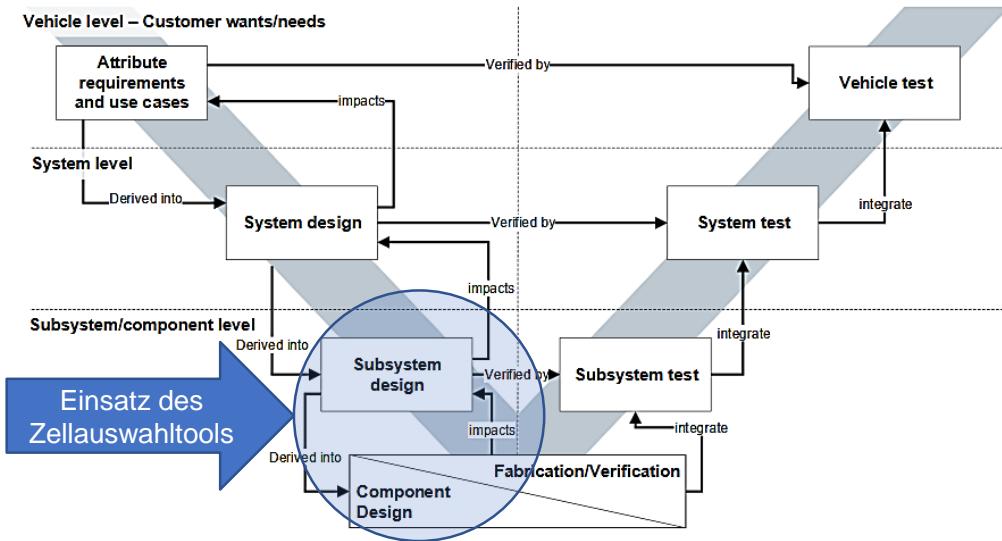


Abbildung 3.1: Einordnung der Zellauswahl im Entwicklungsprozess eines Elektrofahrzeugs<sup>98</sup>

<sup>98</sup> In Anlehnung an Dr. A. Schamel (Der industrielle Entwicklungsprozess von PKW-Antriebssystemen) 2020.

### 3.2 Methodik der Zellauswahl

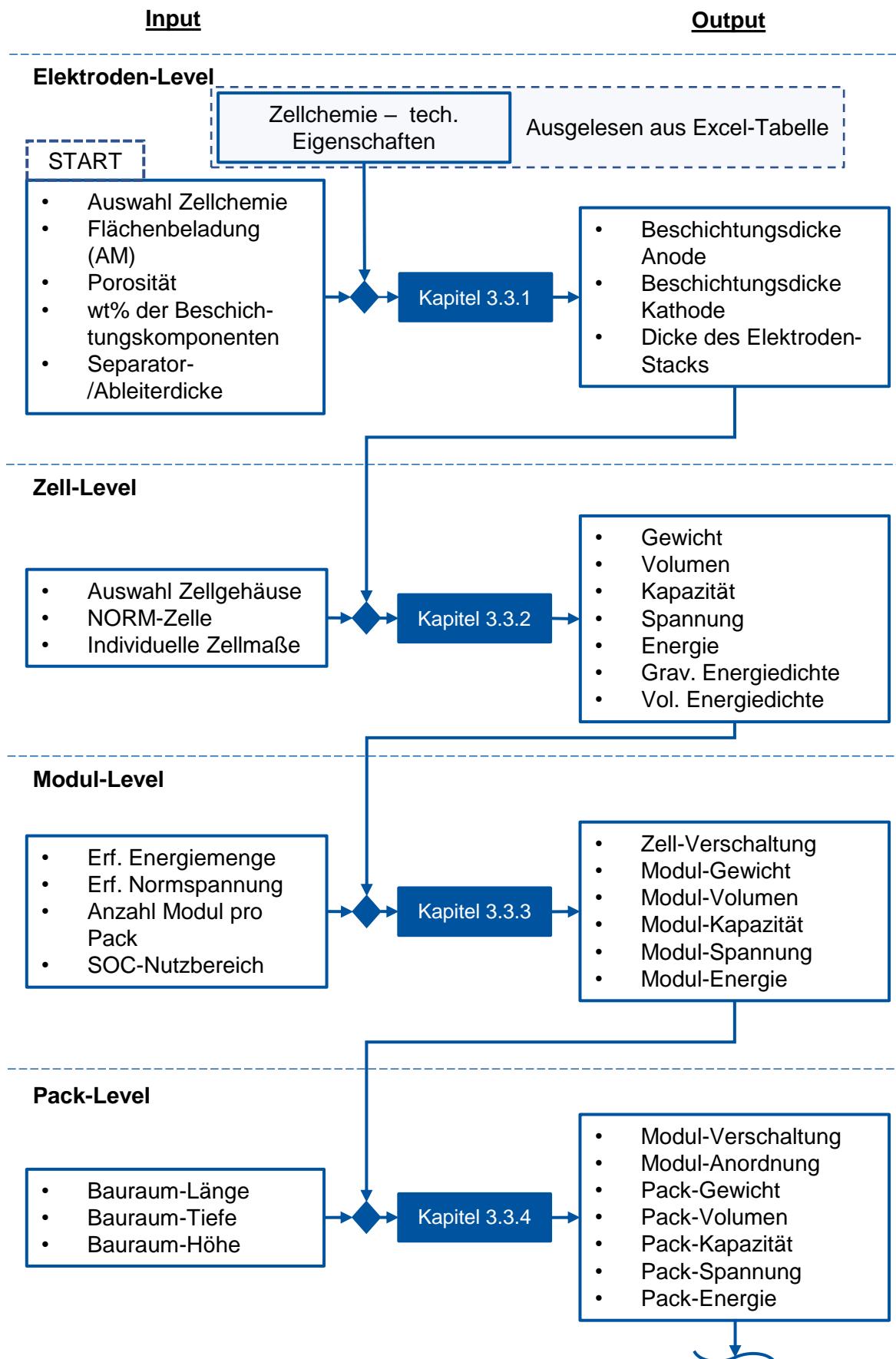
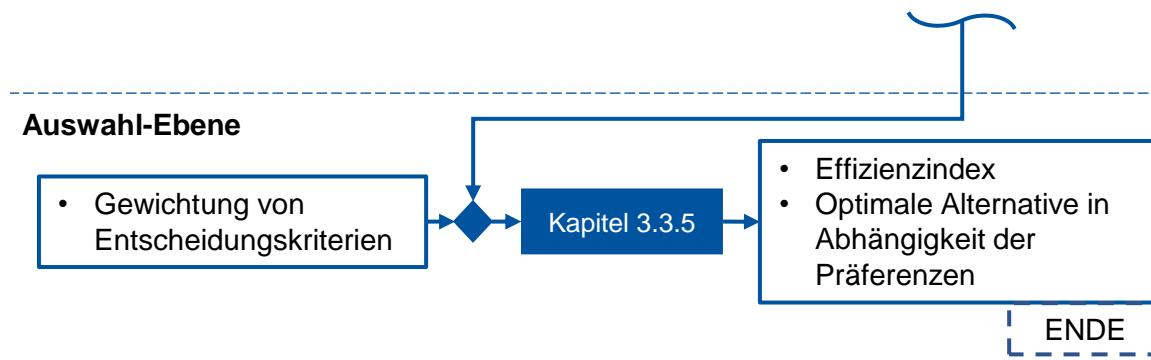


Abbildung 3.2: Ablauf und Methodik der Zellauswahl



**Abbildung 3.3: Ablauf und Methodik der Zellauswahl (Fortsetzung)**

In Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 ist die Methodik und der Ablauf des Zellauswahltools in Form eines Ablaufdiagramms schematisch dargestellt. Zu sehen ist, dass der Zellauswahlprozess in verschiedenen Ebenen, der Elektroden-, Zell-, Modul-, Pack-, und der Auswahl-Ebene aufgeteilt ist. Zudem wurden der Input und der Output der jeweiligen Ebene dargestellt sowie die Interaktion dieser untereinander. Der Output jeder Ebene stellt einen Input der nächsten Ebene dar, sodass dadurch eine Abhängigkeit untereinander besteht. Zwischen jedem Input und Output befindet sich der Schritt der Berechnung, welcher in dem Ablaufdiagramm mit der Angabe des jeweiligen Kapitels dargestellt wird. In dem jeweils zugewiesenen Kapitel werden die Berechnungsgrundlagen und das Vorgehen zum Erreichen des gewünschten Outputs beschrieben. Folglich wird somit die Modellierung aller Ebenen detailliert betrachtet.

### 3.3 Implementierung der Methodik

Im Folgenden wird die Implementierung der vorgestellten Methodik mithilfe der Software MATLAB in verschiedenen Unterkapiteln beschrieben. Dabei wird die Modellierung der Methodik nach dem Bottom-Up-Prinzip von der Elektroden-Ebene über verschiedene Ebenen hinweg, bis zur Auswahl-Ebene erläutert.

#### 3.3.1 Elektroden-Ebene

Die erste Ebene in dem Bottom-Up-Prinzip stellt die Elektroden-Ebene dar. Ziel dieser Ebene ist es die Beschichtungsdicke der Anode und der Kathode zu modellieren sowie die daraus resultierende Elektroden-Stack-Dicke zu berechnen. Diese Größen sind zugleich der Output dieser Ebene. Zum Input dieser Ebene gehört einerseits die vom Anwender gewünschte Zellchemie für Anode und Kathode. Andererseits gehört eine Excel-Tabelle mit relevanten Daten bezüglich der auswählbaren Anoden- und Kathodenmaterialien dazu. In Abhängigkeit der ausgewählten Zellchemie werden daraufhin jeweils verschiedene Zelleigenschaften aus einer externen Excel-Tabelle ausgelesen, welche für die Berechnung der Elektrodendicke notwendig sind. Diese externe, ausgelesene Excel-Tabelle stellt die Informationen nach der in Kapitel 2.2.1 dargestellten Tabelle 2.1. zur Verfügung, welche für die Berechnung des Outputs verwendet werden. Zum anderen werden als Input dieser Ebene individuell einstellbare Parameter definiert. Zu diesen gehört die Flächenbeladung des Aktivmaterials für Kathode, sowie die Eingabe der Rezeptur der Elektroden-Beschichtung in Form von Massenanteilen (für Aktivmaterial, Binder und Additive). Außerdem ist die Dicke der Aluminiumfolie und der Kupferfolie

sowie die Dicke des Separators vorzugeben. Des Weiteren wird die Porosität der Elektroden und das N/P-Ratio als Eingabe vom Anwender gefordert.

Mit dem gesamten Input dieser Ebene wird zunächst mittels folgender Formel die Beschichtungsdicke der Elektroden berechnet. Dabei ist die Beschichtungsdicke der Kathode und der Anode aufgrund der unterschiedlichen Massenbeladung separat zu berechnen:<sup>99</sup>

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_{\text{areal,ges}, pos/neg}}{\delta_{\text{Besch, pos/neg}}} \cdot \left( \frac{\omega_{AM}}{\rho_{AM}} + \frac{\omega_B}{\rho_B} + \frac{\omega_{CA}}{\rho_{CA}} \right) \quad (18)$$

$$m_{\text{areal,ges}, pos/neg} = \frac{\text{Capa}_{\text{areal}}}{\text{Capa}_{\text{mass, neg/pos}} \cdot \omega_{AM}} \quad (19)$$

mit  $\varepsilon$  = Porosität

$m_{\text{areal,ges}, pos/neg}$  = Massenbeladung der Anode, bzw. Kathode

$\text{Capa}_{\text{areal}}$  = Flächenbeladung

$\text{Capa}_{\text{mass, pos/neg}}$  = spez. Kapazität (massebezogen) der Anode, bzw. Kathode

$\delta_{\text{Besch, pos/neg}}$  = Beschichtungsdicke der Anode, bzw. Kathode

$\omega_i$  = Massenanteil

$\rho_i$  = Dichte

Durch Umformen der Gleichung (18) lässt sich die Beschichtungsdicke der Anode, bzw. der Kathode wie folgt bestimmen:

$$\delta_{\text{Besch, neg/pos}} = \frac{m_{\text{areal,ges}}}{(1 - \varepsilon)} \cdot \left( \frac{\omega_{AM}}{\rho_{AM}} + \frac{\omega_B}{\rho_B} + \frac{\omega_{CA}}{\rho_{CA}} \right) \quad (20)$$

Mit der berechneten Beschichtungsdicke der Anode und der Kathode kann mithilfe der eingegebenen Dicke des Separators und der Ableiterfolien (Aluminium und Kupfer) die Elektroden-Stack-Dicke bestimmt werden. Dabei wird nach der in Kapitel 2.3 beschriebenen Bi-Zellen-Konfiguration implementiert. Die Materialwerte können dem Anhang A.1 entnommen werden. Die resultierende Elektroden-Stack-Dicke ergibt sich demnach wie folgt:

$$\delta_{\text{Stack}} = 2 \cdot (\delta_{\text{Besch, Kathode}} + \delta_{\text{Besch, Anode}} + \delta_{\text{Sep}}) + \delta_{\text{Alu}} + \delta_{\text{Cu}} \quad (21)$$

mit  $\delta_{\text{Stack}}$  = Dicke des Elektroden-Stacks

$\delta_{\text{Besch, Kathode}}$  = Beschichtungsdicke der Kathode

$\delta_{\text{Besch, Anode}}$  = Beschichtungsdicke der Anode

---

<sup>99</sup> Vgl. Heubner et al. (Understanding thickness and porosity effects on the electrochemical performance of LiNi0.6Co0.2Mn0.2O2-based cathodes for high energy Li-ion batteries) 2019.

$\delta_{Sep}$  = Dicke des Separators

$\delta_{Alu}$  = Dicke der Aluminium Folie

$\delta_{Cu}$  = Dicke der Kupferfolie

Das Auswahltool präsentiert den Output der Elektroden-Ebene gesondert in einer Tabelle, so dass bei mehreren Elektroden-Konfigurationen eine Übersicht tabellarisch zur Verfügung steht.

Die berechnete Dicke  $\delta_{Stack}$  ist für die fortlaufenden Berechnungen in den nächsten Implementierungsebenen von großer Relevanz. Sie ist somit der Input der Zell-Ebene, wobei der Zusammenhang im folgenden Unterkapitel erläutert wird.

### 3.3.2 Zell-Ebene

Die Zell-Ebene ist die nächste Ebene, welche in dem Zellauswahlprozess behandelt wird. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, gibt es drei Zellformate, welche auf dem Markt eingesetzt werden. Da zuvor die Elektroden-Ebene erläutert wurde und somit der Input der nächsten Ebene (Zell-Ebene) berechnet werden kann, wird in diesem Unterkapitel die Modellierung des Aufbaus einer Rundzelle, Pouchzelle, und einer prismatischen Zelle erläutert. Die eingesetzten Parameter und Materialien können dem Anhang A.1 entnommen werden.

Das entwickelte Zellauswahltool lässt eine individuelle Eingabe der Parameter für die geometrischen Abmaße alle drei Zellformate zu. Jedoch wurde die Grundimplementierung der Zellformate anhand normierter Zellformate durchgeführt, um die Modellierung mit realistischen Dimensionen aller drei Zellformate zu durchzuführen. Dies bedeutet, dass die Implementierung der Zellformate zunächst mithilfe geometrischer Abmaße nach VDA-Norm für batterie-elektrische Fahrzeuge (BEV) erfolgt ist.<sup>100</sup>

**Tabelle 3.1: Normierte Maße von Rundzellen**

	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Volumen (Liter)
18650	18	65	0,0165
21700	21	70	0,0242

**Tabelle 3.2: VDA Maße von Prismatische Zellen**

	Länge (mm)	Tiefe (mm)	Höhe (mm)	Volumen (Liter)
EV 1	173	32	115	0,636
EV 2	173	45	115	0,895

<sup>100</sup> Vgl. Landini et al. (A Review of Phase Change Materials for the Thermal Management and Isothermalisation of Lithium-Ion Cells) 2019, S. 9 – 12.

**Tabelle 3.3: VDA Maße von Pouchzellen**

	Länge (mm)	Tiefe (mm)	Höhe (mm)	Volumen (Liter)
BEV	330	4 – 12	162	0,21 – 0,64

## Rundzelle

Wie in Kapitel 2.3 erläutert, besteht eine Rundzelle aus einer zylindrischen Jelly-Roll, welche in das zylindrische Gehäuse eingeführt wird. Diese Jelly-Roll gilt es sowohl konstruktiv als auch aus elektrochemischer Sicht zu modellieren. Zu Beginn der Implementierung werden die Parameter des Models definiert. Da Rundzellen genormte Geometrien aufweisen, konnten die Gehäuseparameter anhand der Norm festgelegt werden. Zu diesen gehören die in Abbildung 3.4 abgebildeten Größen (Durchmesser, Höhe) und zudem die Wandstärke, welche mit 0,2 mm abgeschätzt wurde. Des Weiteren wird der Pin-Durchmesser der Jelly-Roll mit 1 mm als Parameter vorgegeben und die leere Höhe über der Jelly-Roll zunächst mit 5 mm definiert.<sup>101</sup>

<sup>102</sup>

Die Parametrisierung der 18650-Rundzelle ist in Abbildung 3.4 dargestellt und ist für die 21700-Rundzelle analog, jedoch mit angepassten Maßen.

---

<sup>101</sup> Vgl. Quinn et al. (Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells: A Comparison of Commercial 18650 to the 21700 Cells) 2018.

<sup>102</sup> Vgl. Lewerenz et al. (Systematic aging of commercial LiFePO<sub>4</sub> |Graphite cylindrical cells including a theory explaining rise of capacity during aging) 2017.

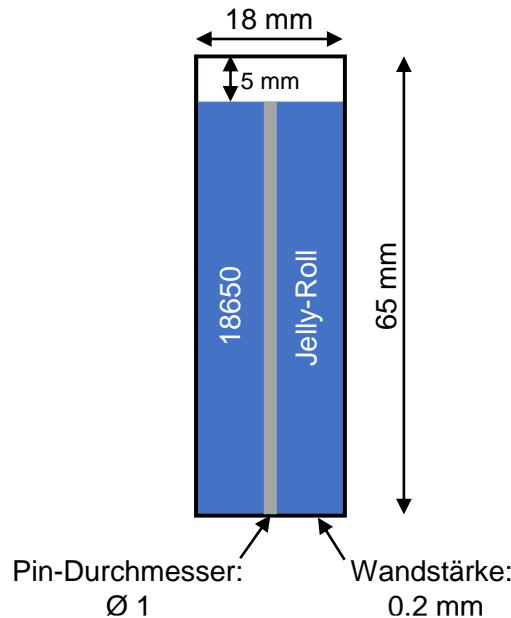


Abbildung 3.4: Parametrisierung für die 18650-Rundzelle<sup>103</sup>

Nach der Festlegung der Parameter der Rundzellen, kann die Jelly-Roll nun berechnet werden. Für die konstruktive Auslegung der Jelly-Roll wird die in Kapitel 2.3 erläuterte Archimedes Spirale, die geometrischen Randbedingungen aufgrund des Gehäuses sowie die Elektroden-Stack-Dicke in Betracht gezogen. Mithilfe des Durchmessers und der Wandstärke des Rundzellen-Gehäuses kann der maximale Jelly-Roll-Durchmesser bestimmt werden. Durch die Höhe des Gehäuses und dem Freiraum über der Jelly-Roll in dem Gehäuse kann zudem die Jelly-Roll-Höhe berechnet werden. Die geometrischen Eigenschaften der Jelly-Roll lassen sich somit für die 18650-Rundzelle wie folgt darstellen:

$$d_{Jelly,18650} = d_{18650} - 2 \cdot t_{Wand,18650} \quad (22)$$

$$h_{Jelly,18650} = h_{18650} - h_{leer,18650} - 2 \cdot t_{Wand,18650} \quad (23)$$

mit  $d_{Jelly,18650}$  = Durchmesser der Jelly-Roll

$d_{18650}$  = Durchmesser des Gehäuses

$t_{Wand,18650}$  = Wandstärke des Gehäuses

$h_{Jelly,18650}$  = Höhe der Jelly-Roll

$h_{leer,18650}$  = Leere Höhe im Gehäuse

Nachdem die Jelly-Roll konstruktiv abgebildet wurde, können die daraus resultierenden elektrochemischen- bzw. technischen Eigenschaften bestimmt werden. Ein eingerollter Elektroden-Stack ist im Grunde eine Spirale, welche eine Windungszahl und eine Wickellänge aufweist. Zur Bestimmung der Kenngrößen der Spirale wird das Prinzip der Archimedes-Spirale herangezogen. Mithilfe der Berechnungsgrundlagen nach Archimedes lassen sich unter Beachtung

<sup>103</sup> Parametrisierung nach Quinn et al. (Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells: A Comparison of Commercial 18650 to the 21700 Cells) 2018.

der vorliegenden konstruktiven Randbedingungen (wie bspw. dem Gehäusedurchmesser), die Windungszahl und die Länge der Jelly-Roll bestimmen. Abbildung 3.5 zeigt den schematischen Aufbau des gewickelten Elektroden-Stacks, welcher sich aus acht wiederholenden Schichten bildet.

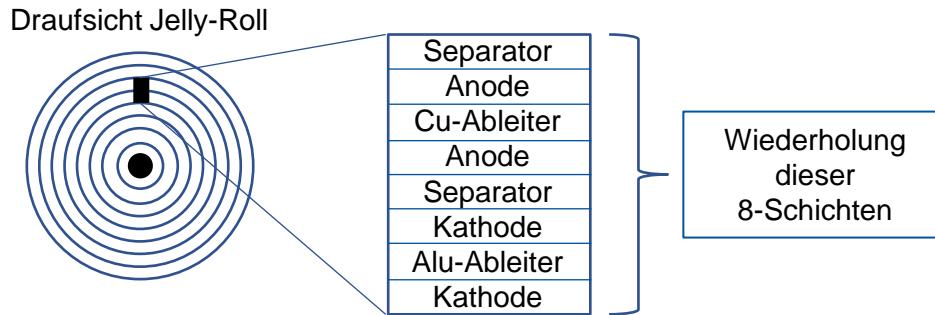


Abbildung 3.5: Schematischer 8-Schichten-Aufbau einer Jelly-Roll<sup>104</sup>

Die berechneten Kenngrößen werden für die Berechnung der technischen Eigenschaften, wie der Kapazität oder der Masse der Rundzelle benötigt. Nachfolgend ist Bestimmung dieser Kenngrößen, die Windungszahl und die Länge der Spirale für eine 18650-Rundzelle dargestellt. Die Windungszahl wird mithilfe der Differenz zwischen dem maximalen Jelly-Roll-Durchmesser  $d_{Jelly, 18650}$  und dem Pin-Durchmesser  $d_{Pin, 18650}$ , welche durch die zuvor bestimmte Elektroden-Stack-Dicke dividiert wird:

$$N_{Windung, 18650} = \frac{d_{Jelly, 18650} - d_{Pin, 18650}}{\delta_{Stack}} \quad (24)$$

mit  $N_{Windung, 18650}$  = Windungszahl

$d_{Pin, 18650}$  = Pin - Durchmesser

Die Länge der Jelly-Roll der 18650-Rundzelle wird wie folgt nach Gleichung (4) abgeleitet und berechnet:

$$\xi_{18650} = \int_0^{\Theta} \sqrt{\left(0,5 \cdot d_{Pin, 18650} + \frac{D}{2\pi} \cdot \Theta\right)^2 + \left(\frac{D}{2\pi}\right)^2} d\Theta \quad (25)$$

$$\leftrightarrow \xi_{18650} = \int_0^{2\pi \cdot N_{Windung, 18650}} \sqrt{\left(0,5 \cdot d_{Pin, 18650} + \frac{2\pi \cdot N_{Windung, 18650}}{2\pi} \cdot s\right)^2} ds \quad (26)$$

$$\leftrightarrow \xi_{18650} \approx d_{Pin, 18650} \cdot 2\pi \cdot N_{Windung, 18650} + \frac{\delta_{Stack}}{4\pi} \cdot (2\pi \cdot N_{Windung, 18650})^2 \quad (27)$$

mit  $\xi_{18650}$  = Länge der Jelly-Roll (der 18650-Rundzelle)

$$\Theta = 2\pi \cdot N_{Windung, 18650}$$

$$D = \delta_{Stack}$$

<sup>104</sup> In Anlehnung an Nadimpalli et al. (Stress Evolution in Lithium-Ion Composite Electrodes during Electrochemical Cycling and Resulting Internal Pressures on the Cell Casing) 2015.

$$r_0 = 0,5 \cdot d_{Pin, 18650}$$

Zu beachten ist zudem, dass die Kathode und die Anode aufgrund der einzuhaltenden Positionstoleranz, unterschiedliche Längenmaße bzw. Höhenmaße aufweisen. In Abbildung 3.6 ist dies schematisch dargestellt. Dadurch kommt es - bezogen auf die Kathode - zu einer Überlappung der Anode. Diese Überlappung bezieht sich auf die Länge und die Breite der Elektrode, und wird prozentual durch ein Überlappungsmaß beschrieben. Nach den Verhältnissen der Referenzzelle wird dieses Maß zu  $\sigma_{Anode} = 5,6\%$  abgeschätzt.

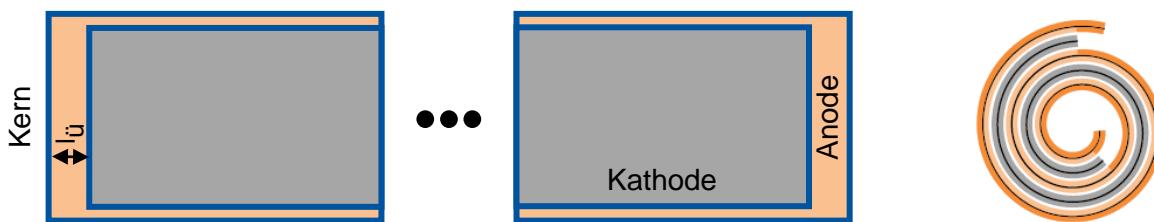


Abbildung 3.6: Überlappung der Elektroden in einer Jelly-Roll<sup>105</sup>

Nachdem die geometrischen Eigenschaften der Jelly-Roll berechnet wurden, können die daraus resultierenden elektrochemischen Eigenschaften (Kapazität, Spannung, etc.) sowie die technischen Eigenschaften (Masse, Volumen, etc.) bestimmt werden.

Die Kapazität der Rundzelle wird über die vorgegebene Flächenbeladung des Aktivmaterials von Anode und Kathode bestimmt. Dabei ist die maximal mögliche Kapazität der Rundzelle durch die kleinere Kapazität zwischen der Anode oder Kathode begrenzt. Dies bedeutet, dass bspw. die Kapazitätsberechnung auf Basis der Kathodeneigenschaften geschieht, falls diese eine kleine spezifische Kapazität aufweist. Die Kapazität der Rundzelle wird somit wie folgt berechnet, wobei eine Doppelbeschichtung mit einem Faktor und die Überlappung berücksichtigt wird:

$$Capa_{18650} = 2 \cdot (Capa_{areal} \cdot \frac{\xi_{18650}}{1+\sigma_{Anode}} \cdot h_{Jelly, 18650}) \quad (28)$$

mit  $\sigma_{Anode}$  = Prozentuale Überlappung Anode zu Kathode

Nach der Kapazitätsberechnung wird die Masse der Rundzelle bestimmt. Dabei wurden die wesentlichen gewichtsbestimmenden Komponenten berücksichtigt, welche im Folgenden aufgelistet sind:

- Gehäuse
- Jelly-Roll (Anode, Kathode, Separator)
- Elektrolyt

<sup>105</sup> In Anlehnung an Lewerenz et al. (Systematic aging of commercial LiFePO<sub>4</sub> |Graphite cylindrical cells including a theory explaining rise of capacity during aging) 2017.

Das Gehäusegewicht wurde mithilfe von realen, auf dem Markt erhältlichen Rundzellen-Gehäusen abgeschätzt. Demnach wurde das Gewicht des Gehäuses einer 18650-Rundzelle, welches aus nickellegiertem Stahl besteht, auf 9,5 Gramm angesetzt.<sup>106</sup>

Das Gewicht der Jelly-Roll wird mittels Berechnung des Gewichtes der einzelnen Komponenten der Jelly-Roll bestimmt. So wird das Gewicht der Anode und der Kathode sowie das Gewicht des Separators einzeln in Betracht genommen und zum Gesamtgewicht der Jelly-Roll aufsummiert.

Zur Bestimmung des Gewichtes der Elektroden wurde jeweils das Gewicht der Ableiterfolien bestimmt sowie das Gewicht der Beschichtung auf den Ableiterfolien. Dabei wurde anhand der Dichte von Kupfer bzw. Aluminium und den Maßen des Elektroden-Stack-Bandes das Gewicht der beiden Ableiter berechnet. Mithilfe der Massenbeladung wurde zudem das Gewicht der Doppelbeschichtung errechnet. Für die 18650-Rundzelle wurde somit das Jelly-Roll-Gewicht wie folgt berechnet:

$$m_{Jelly, 18650} = m_{Cu, 18650} + m_{Al, 18650} + m_{Besch, 18650} + m_{Sep, 18650} \quad (29)$$

$$m_{Cu, 18650} = \rho_{Cu} \cdot \delta_{Cu} \cdot h_{Jelly, 18650} \cdot \xi_{18650} \quad (30)$$

$$m_{Al, 18650} = \rho_{Al} \cdot \delta_{Al} \cdot h_{Jelly, 18650} \cdot \xi_{18650} \cdot \frac{1}{\sigma_{Anode}} \quad (31)$$

$$m_{Besch, 18650} = 2 \cdot \xi_{18650} \cdot (m_{areal, neg} \cdot h_{Jelly, 18650} + m_{areal, pos} \cdot h_{Jelly, 18650} \cdot \frac{1}{\sigma_{Anode}}) \quad (32)$$

mit  $m_{Jelly, 18650}$  = Masse der Jelly-Roll

$m_{Cu, 18650}$  = Masse des Kupferableiters

$m_{Al, 18650}$  = Masse des Aluminiumableiters

$m_{Besch, 18650}$  = Masse der Beschichtung

$m_{Sep, 18650}$  = Masse des Separators

Auf Basis der üblichen Zelldaten von 18650-Rundzellen wird das Gewicht des Separators zu zwei Gramm gesetzt.<sup>107</sup> Die Masse des Elektrolyten wird mithilfe der Dichte des Elektrolyten und der Menge des Elektrolyten in Abhängigkeit der Kapazität bestimmt.<sup>108</sup>

Das Gesamtgewicht der 18650-Rundzelle wird somit aus der Summe der davor bestimmten Teilgewichte berechnet:

$$m_{ges, 18650} = m_{Jelly, 18650} + m_{Elek} + m_{Geh} \quad (33)$$

<sup>106</sup> Vgl. MTI Corp - Leading provider of lab equipments and advanced crystal substrates (18650 Cylinder Cell Case and Anti-Explosive Cap with Insulation O-ring - 100 Pcs/package - EQ-Lib-18650) 2020.

<sup>107</sup> Vgl. Gerhardt (Vernachlässigt, vergessen oder unwichtig? - Inaktivmaterialien für Lithium-Ionen Batterien) 2016.

<sup>108</sup> Vgl. Günter et al. (Influence of the Electrolyte Quantity on Lithium-Ion Cells) 2019.

mit  $m_{ges,18650}$  = Gesamtmasse der 18650-Rundzelle

$m_{Elek}$  = Masse des Elektrolyten

$m_{Geh}$  = Masse des Gehäuses

Nachdem das Gewicht der 18650-Rundzelle bestimmt wurde, wird mithilfe der Normspannung der Energiegehalt der Zelle bestimmt. Die Spannung der Zelle wird nach Gleichung (1) bestimmt und mit der berechneten Kapazität multipliziert. Das Ergebnis ist die Energie der Zelle:

$$E_{18650} = U_{Zelle} \cdot Capa_{18650} \quad (34)$$

$E_{18650}$  = Energie der 18650-Rundzelle

Durch Division der Masse bzw. des Volumens der Zelle mit der Energie, lassen sich normierte Energiegehalte bestimmen. Diese sind zum einen die gravimetrische Energiedichte und zum anderen die volumetrische Energiedichte. Durch diese beiden Werte lassen sich die verschiedenen Zelltechnologien gleichwertig vergleichen. Folgende Gleichungen beschreiben die Ermittlung der beiden Energiedichten:

$$e_{grav,18650} = \frac{E_{18650}}{m_{18650}} \quad (35)$$

$$e_{vol,18650} = \frac{E_{18650}}{V_{18650}} \quad (36)$$

mit  $e_{grav,18650}$  = Gravimetrische Energiedichte

$e_{vol,18650}$  = Volumetrische Energiedichte

## Pouchzelle

Die Modellierung der Pouchzelle erfolgt mit derselben Methodik, jedoch mit dem Unterschied, dass der Elektroden-Stack nicht als zylindrische Rolle integriert wird, sondern in Form von Sheets, welche aus den Tochter-Coils ausgeschnitten werden. Diese Sheets gilt es abzubilden, um die technischen Eigenschaften der Pouchzelle zu bestimmen. Dabei wurden die Elektroden-Sheets in Abhängigkeit der Geometrie der Pouchzelle abgebildet. Die Implementierung des Aufbaus weist aufgrund dessen eine geringere Komplexität auf als die der Rundzelle. Abbildung 3.7 zeigt die Anordnung der Elektroden-Sheets in einer Pouchzelle und die geometrischen Abmaße. Es ist zu beachten, dass die Pouchzelle eine Folie als Gehäuse aufweist und die Zelle versiegelt wird. Zum einen weist diese Folie eine Dicke auf, welche bei der Berechnung der Abmaße der Elektroden-Sheet berücksichtigt wird, während zum anderen die Dicke der Versiegelung bei der Berechnung der Elektroden-Maße eine Rolle spielt. Die Abmaße der Elektroden werden somit aus den gegebenen Normgrößen der Pouchzelle bestimmt. Da der Separator schlussendlich bei der Z-Stapelung der Sheets die Elektroden umhüllt, wird mithilfe der Pouchzellen-Abmaße zunächst die Länge  $L_{Sep,Pouch}$  und die Höhe  $H_{Sep,Pouch}$  des Separators berechnet. Anschließend werden durch eine Skalierung die Maße der Elektroden-Sheets berechnet wird:

$$L_{Sep,Pouch} = L_{Pouch} - 2 \cdot d_{Vers} \quad (37)$$

$$H_{Sep,Pouch} = H_{Pouch} - H_{Pol} - 2 \cdot d_{Vers} \quad (38)$$

mit  $d_{Vers}$  = Dicke der Versiegelung

$d_{Folie}$  = Dicke der Folie der Pouchzelle

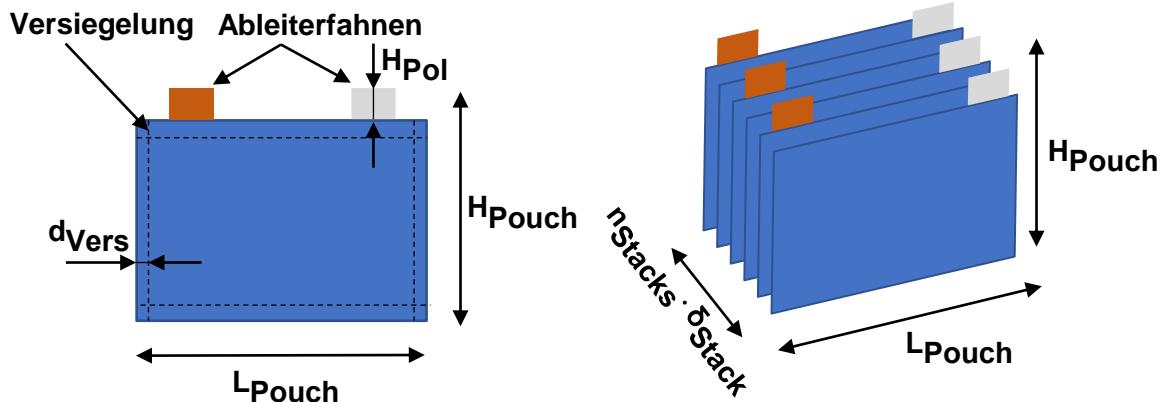


Abbildung 3.7: Abmaße der Pouchzelle für die Implementierung<sup>109</sup>

Die Maße der Elektroden werden mithilfe eines Skalierungsfaktors bestimmt, welcher aus den Maßen einer Referenzzelle abgeleitet wird. Dabei wurde der Skalierungsfaktor nach den Separator-Elektroden-Verhältnissen der Referenzzelle zu  $\frac{1}{1,13455}$  für die Anode und zu  $\frac{1}{1,2296}$  für die Kathode gesetzt.<sup>110</sup>

Des Weiteren wird die Anzahl der Elektrodensheets bestimmt, welche mit den geometrisch vorgegebenen Randbedingungen integrierbar sind. Dabei wird die Tiefe der Pouchzelle unter Berücksichtigung der Foliendicke durch die Elektroden-Dicke dividiert. Dadurch ergibt sich die maximale Anzahl an Sheets, welche mithilfe der Elektroden-Fläche für die Berechnung der Kapazität sowie der Masse benötigt wird. Zudem wird die Umhüllung des Separator-Bandes um die Elektroden-Sheets, welche nach dem Produktionsprozess vorliegt, berücksichtigt:

$$n_{Stacks} = \frac{T_{Pouch} - [2 \cdot (d_{Folie} + \delta_{Sep})]}{\delta_{Stack}} \quad (39)$$

mit  $n_{Stacks}$  = Anzahl der Elektroden-Stacks

Für die spätere Kapazitätsberechnung wird die Anzahl an aktiven Flächen innerhalb der Stacks benötigt. Pro Stack gibt es jeweils zwei aktive Flächenpaare, wobei an der Grenzfläche kein Flächenpaar entsteht und somit die Anzahl um eine Einheit reduziert wird:

$$n_{Aktiv, Pouch} = 2 \cdot n_{Stacks} - 1 \quad (40)$$

mit  $n_{Aktiv, Pouch}$  = Anzahl aktiver Flächen in dem Stack

Für die Dicke der Pouchzellen-Folie wurde der Aufbau der Folie genauer betrachtet. Abbildung 3.8 zeigt den schematischen Aufbau der schichtweisen Bauweise der Pouchzellen-Folie. Zu

<sup>109</sup> In Anlehnung an Worwood et al. (Experimental Analysis of a Novel Cooling Material for Large Format Automotive Lithium-Ion Cells) 2019.

<sup>110</sup> Vgl. Wentker et al. (A Bottom-Up Approach to Lithium-Ion Battery Cost Modeling with a Focus on Cathode Active Materials) 2019.

sehen ist, dass sich diese aus drei Schichten zusammenstellt, welche jeweils unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Die äußere Schicht, welche die mechanische Stabilität sicherstellt, besteht aus einer Polyamid-Schicht (PA) mit einer Dicke von ca. 25 µm. Für die innere Schicht wird Polypropylen verwendet, welche üblicherweise eine Dicke von ca. 30 µm bis 80 µm aufweisen kann. Diese Schicht dient der Versiegelung, da es dort zum Kontakt mit dem Elektrolyten kommt. Zwischen der äußeren und der inneren Schicht befindet sich eine Barrièreschicht aus Aluminium, welche mit einer Dicke von ca. 40 µm eingesetzt wird.<sup>111</sup>

Die Dicke der Pouchzellen-Folie wird somit folgendermaßen berechnet:

$$d_{Folie} = d_{außenSch} + d_{innenSch} + d_{AlSch} \quad (41)$$

mit  $d_{außenSch}$  = Dicke der äußeren Schicht

$d_{innenSch}$  = Dicke der inneren Schicht

$d_{AlSch}$  = Dicke der Barrièreschicht

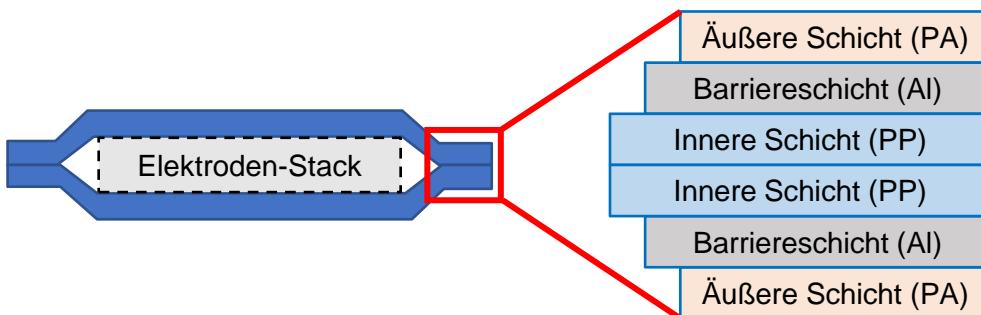


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Pouchzellen-Folie<sup>112</sup>

Die Kapazität der Pouchzelle lässt sich durch die zuvor berechneten Größen bestimmen. Dabei wird die Flächenbeladung der Elektroden, die Fläche der Elektroden und die Anzahl der Elektroden-Sheets zur Berechnung herangezogen. Die Kapazitätsberechnung der Pouchzelle wurde folgendermaßen implementiert:

$$Capa_{Pouch} = Capa_{areal} \cdot A_{K, Pouch} \cdot n_{Aktiv, Pouch} \quad (42)$$

mit  $Capa_{Pouch}$  = Kapazität der Pouchzelle

Die Masse der Pouchzelle wird - wie bei der Rundzelle - in drei Hauptanteile aufgeteilt und bestimmt: Die Masse des Elektroden-Stacks, die Masse des Elektrolyten sowie die Masse des Gehäuses.

Zunächst wurde dabei die Masse des Elektroden-Stacks bestimmt, welche analog zu der Berechnung der Elektrodenmasse einer Rundzelle durchgeführt wird. Die Fläche der Anode und der Kathode wird jeweils mit der Massenbeladung multipliziert, sodass sich die Masse der Beschichtung bestimmen lässt. Analog dazu wird mit der Dichte von Kupfer und Aluminium das Gewicht der Ableiter berechnet.

<sup>111</sup> Vgl. Herrmann (Packaging - Materials review) 2014.

<sup>112</sup> In Anlehnung an Herrmann (Packaging - Materials review) 2014.

Des Weiteren wird die Masse des Separators mit der Fläche des Separators und dessen spezifischen Masse bestimmt. Die spezifische Masse wird aus gegebenen Massedaten von typischerweise eingesetzten Separatoren ermittelt und wurde in dieser Arbeit zu  $m_{spez,Sep}=20 \frac{g}{cm^2}$  gesetzt.<sup>113</sup> Die Summe der Masse der Elektroden und des Separators ergibt das Gewicht des gesamten Elektroden-Stacks der Pouchzelle.

Als nächstes wird die Masse des Elektrolyten bestimmt. Als Elektrolyt dient eine Lithiumhexafluorophosphat-Lösung, welche sich aus LiPF<sub>6</sub>, gelöst in Ethylencarbonat und Diethylcarbonat zusammensetzt. Die Masse wird durch die Dichte der Elektrolyt-Lösung bestimmt, welche mit der volumetrischen Menge an Elektrolyten multipliziert wird. Die Dichte der Elektrolyt-Lösung wird in dieser Arbeit zu 1,26 g/mL festgelegt.<sup>114</sup> Für die Bestimmung der volumetrischen Menge wird der volumetrische Faktor v betrachtet. Dieser ist als das Verhältnis von Elektrolytvolumen zu Porenvolumen definiert. Unter Annahme eines volumetrischen Faktors von v = 1, sodass also das Porenvolume dem Elektrolytvolumen übereinstimmt, wurde in dem Modell eine spezifische Elektrolytquantität von 1,81 mL/Ah definiert.<sup>115</sup> Mithilfe der Kapazität wird nun das Volumen des Elektrolyten bestimmt, womit schließlich mittels der Dichte, die Masse des Elektrolyten berechnet wird.

Zuletzt wird die Masse durch die Verpackung der Pouchzelle berücksichtigt. Da die Dicken und das Material der einzelnen Schichten bekannt sind, kann mithilfe der Dichten der vorkommenden Materialien der Schichten das Gewicht der Verpackung der Pouchzelle berechnet werden.

Die Gesamtmasse der Pouchzelle lässt sich somit wie folgt berechnen:

$$m_{Pouch} = m_{A/K,Pouch} + m_{Sep,Pouch} + m_{Elek,Pouch} + m_{Folie} \quad (43)$$

$$m_{A/K,Pouch} = A_{A/K, Pouch} \cdot 2 \cdot n_{Stacks} \cdot m_{areal,pos/neg} \quad (44)$$

$$m_{Sep,Pouch} = A_{A/K, Pouch} \cdot 2 \cdot n_{Stacks} \cdot m_{areal,pos/neg} \quad (45)$$

$$m_{Sep,Pouch} = m_{spez,Sep} \cdot A_{Sep,Pouch} \quad (46)$$

$$m_{Folie} = O_{pouch} \cdot (d_{AußenSch} \rho_{PA} + d_{InnenSch} \rho_{PP} + d_{AlSch} \rho_{Al}) \quad (47)$$

mit  $m_{Pouch}$  = Masse der Pouchzelle

$m_{A/K,Pouch}$  = Masse der Anoden- und Kathodensheets der Pouchzelle

$m_{Sep,Pouch}$  = Masse des Separators der Pouchzelle

$m_{Folie}$  = Masse der Verpackung der Pouchzelle

$m_{Elek,Pouch}$  = Masse des Elektrolyten

---

<sup>113</sup> Vgl. Weber et al. (Material review of Li ion battery separators) 2014.

<sup>114</sup> Vgl. Sigma-Aldrich (Lithiumhexafluorophosphat -Lösung 746746) 2021.

<sup>115</sup> Vgl. Günter et al. (Influence of the Electrolyte Quantity on Lithium-Ion Cells) 2019, S. 3.

$$O_{pouch} = \text{Oberfläche der Pouchzelle}$$

Die Energie der Pouchzelle wird analog zu den Berechnungen aus dem Abschnitt über die Rundzelle durch Multiplikation der Kapazität mit der Zellspannung bestimmt und wird daher an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt. Dies gilt auch für die gravimetrische und volumetrische Energiedichte. Die Berechnung dieser Größen erfolgt analog mit den Gleichungen (34) bis (36) mit den oben erläuterten Parametern der Pouchzelle.

### Prismatische Zelle

In Kapitel 2.3 wurden beide Arten der Integration des Elektroden-Stacks in einer prismatischen Zelle erläutert. In dieser Arbeit wird die Modellierung der prismatischen Zelle zum einen mit einer Auslegung durch Flachwickel, und zum anderen mit Elektroden-Sheets durchgeführt.

Zunächst wird die Modellierung der prismatischen Zelle mittels Flachwickel näher betrachtet.

Es wird die Modellierung eines Flachwickels näher betrachtet. Für die Berechnung der technischen Eigenschaften eines Flachwickels, wurde dieser als Kombination aus einer Jelly-Roll und einem Zellstapel betrachtet. Abbildung 3.9 zeigt die Konstruktion des Flachwickels, welcher sich aus zwei halben Jelly-Roll (grün) und (zwischen diesen) einem Zellstapel (rot) zusammensetzt. Für die Berechnung der technischen Eigenschaften wird zunächst der Durchmesser der Jelly-Roll bestimmt, welcher sich aus der Hälfte der Tiefe des prismatischen Zellgehäuses zusammensetzt - abzüglich der Wandstärke des Gehäuses. Aus dieser Größe lässt sich mithilfe der Formel der Archimedes Spirale die Anzahl an Wickelungen bestimmen. Diese Windungszahl wird für die Auslegung des mittleren Teils des Flachwickels, den Elektroden-Sheets, von Nöten sein. Die Windungszahl wird mit der Anzahl an gestapelten Elektroden-Stacks gleichgesetzt, sodass sich die elektrochemischen Eigenschaften des mittleren Teils (rot) des Flachwickels bestimmen lässt. Dabei gilt folgende Randbedingung, welche die Abhängigkeit zwischen der Jelly-Roll und den Sheets darstellt:

$$N_{Wind,Jelly,Prism} = n_{Stacks,Flach,Prism} \quad (48)$$

Die Berechnung der Kapazität einer Jelly-Roll (hier:  $\text{Capa}_{\text{Jelly},\text{Flach}}$ ) sowie eines Zellstapels (hier:  $\text{Capa}_{\text{Sheet},\text{Flach}}$ ) wird mithilfe der zuvor genannten Randbedingungen durchgeführt und erfolgt analog mit den Gleichungen (24) - (28), bzw. (39) - (42), jedoch mit angepassten Parametern.

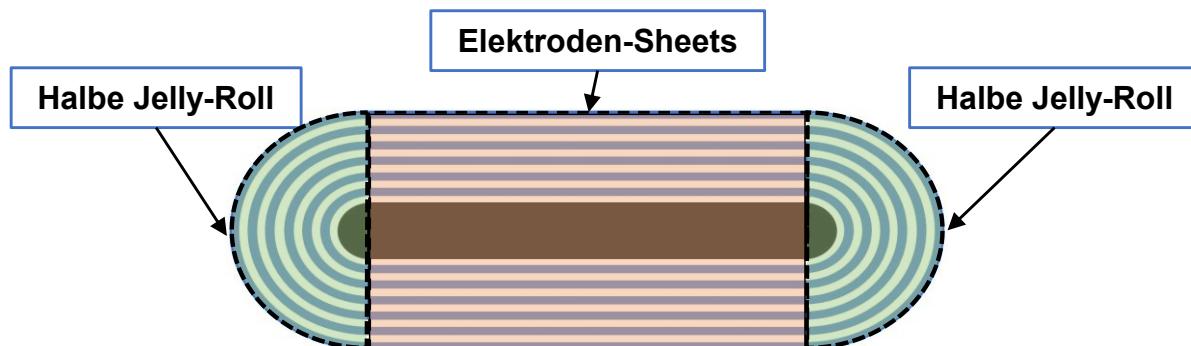
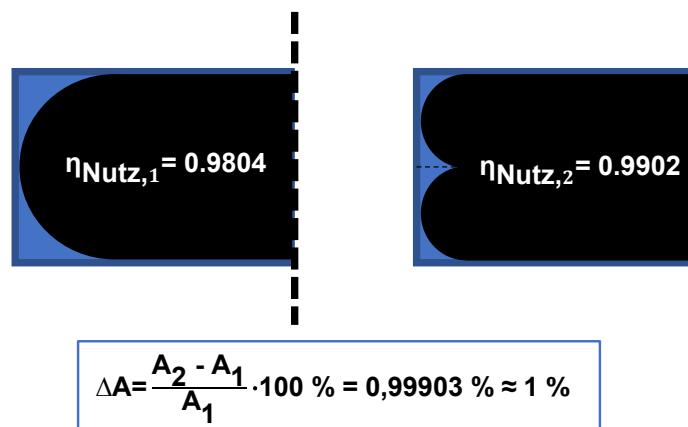


Abbildung 3.9: Modellierung des Flachwickels (kleine Jelly-Roll + Sheets)

Eine prismatische Zelle kann mit zwei Flachwickel ausgeführt werden. Durch die Integration von zwei Flachwickel - anstelle von lediglich einem - wird das Volumen des prismatischen Zellgehäuses mit mehr Zellmaterial gefüllt, sodass sich verbesserte technische Eigenschaften wie bspw. die Kapazitäts- und damit Energiewerte bei gleichem Volumen des Zellgehäuses realisieren lassen.<sup>116</sup>

Unter Annahme einer gleichen Flachwickel-Höhe wird in Abbildung 3.10 der Vergleich der eingenommenen Fläche für beide Arten der Realisierung der prismatischen Zelle mit Flachwickel dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Nutzfläche, bezogen auf die nutzbare Fläche des Zellgehäuses, bei einem einzigen Flachwickel ca. 98,04 % beträgt. Für die Auslegung mit zwei Flachwickel beträgt dieser Wert ca. 99,02 %. Bei der Auslegung mit zwei Flachwickeln, lässt sich somit mehr Zellmaterial bei gleichen Randbedingungen durch das Gehäuse einbringen. Es lässt sich als Resultat ca. 1 % mehr Zellmaterial einbringen, was sich in den technischen Eigenschaften der fertigen Zelle wiedererkennen lässt.



**Abbildung 3.10: Vergleich der genutzten Fläche bei einem- und zwei Flachwickel in einem prismatischen Zellgehäuse (bei gleicher Höhe des Flachwickels)**

Die Modellierung der prismatischen Zelle mit zwei Flachwickel ist demnach in Abbildung 3.11 dargestellt. Die Abmaße des Zellgehäuses sind durch die VDA-Norm bestimmt, jedoch können diese im Modell auch individuell angegeben werden. Mithilfe der vorgegebenen Maße lassen sich die Flachwickel-Eigenschaften bestimmen, sodass anhand dieser die Kenngrößen der Zelle bestimmt werden können.

<sup>116</sup> (US20150093617A1 - Lithium ion prismatic cell comprising multiple jelly rolls with additional material between jelly rolls - Google Patents) 2021.

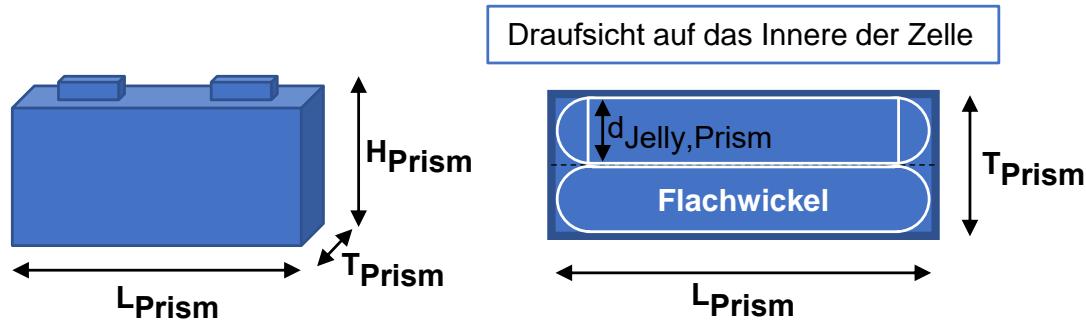


Abbildung 3.11: Modellierung der Prismatischen Zelle mit zwei Flachwickel

Die Kapazität einer prismatischen Zelle mit Flachwickel wird somit durch Addition der Kapazität der Jelly-Roll und der Sheets bestimmt.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit ist bei Nennung einer prismatischen Zelle mit Flachwickel, eine prismatische Zelle mit zwei Flachwickel gemeint.

Die zweite Möglichkeit eine prismatische Zelle zu konstruieren, besteht darin - an Stelle eines Flachwickels - einen Zellstapel zu integrieren. Dabei wird wie bei der Pouchzelle vorgegangen und Elektroden-Sheets und der Separator zu einem Zellstapel verarbeitet und in das prismatische Zellgehäuse eingeführt. Analog zu der Berechnung bei der Pouchzelle, bestimmt das Gehäuse der prismatischen Zelle die Randbedingungen für die Abmaße und somit die elektrochemischen Eigenschaften der Sheets und der gesamten Zelle. Abbildung 3.12 zeigt schematisch die Modellierung der prismatischen Zelle mit Zellstapel-Ausführung. Deutlich wird, dass im Gegensatz zur Ausführung mit einem oder zwei Flachwickel, das Volumen des Zellgehäuses effizienter ausgenutzt wird. Durch den Einsatz passender Elektroden-Sheets anstelle eines aufgewickelten Flachwickels, lässt sich die nutzbare effektive Fläche des prismatischen Zellgehäuses idealisiert bis zu 100% ausnutzen. Dies liegt dem Wegfall der ungenutzten Fläche der (durch den Flachwickel entstehenden) Rundungen zu Grunde. Die genutzte effektive Fläche des prismatischen Zellgehäuses wird somit bei dieser Auslegung, unter Berücksichtigung der Randbedingung einer gleichen Höhe des Flachwickels und der Sheets, zusätzlich um ca. 1 % erhöht. Die Berechnung der Kapazität wird analog zur Kapazitätsberechnung der Pouchzelle durchgeführt und erfolgt analog nach den Gleichungen (39) – (42) mit angepassten Parametern.

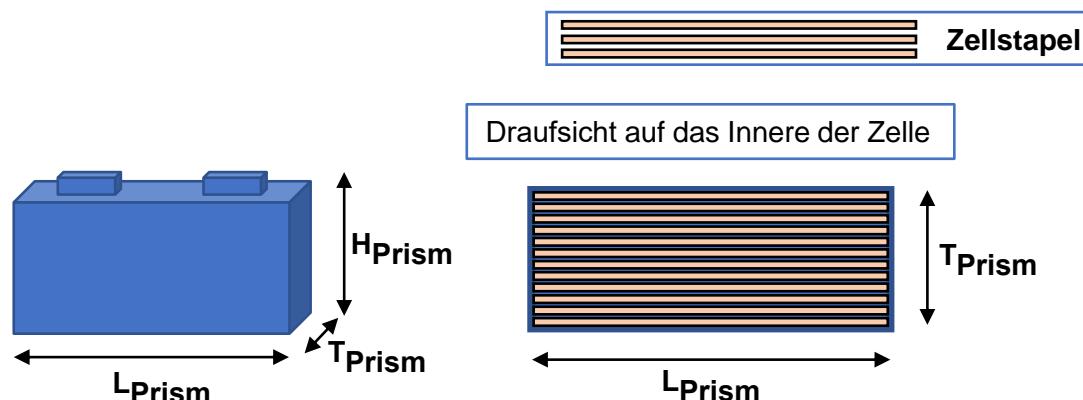


Abbildung 3.12: Modellierung der prismatischen Zelle mit Zellstapel

Das Gesamtgewicht der prismatischen Zelle setzt sich hauptsächlich aus drei Komponenten zusammen: Die Masse des Elektroden-Stacks, des Elektrolyten und des Gehäuses.

Dabei lässt sich das Gewicht des Elektroden-Stacks für beide Bauformen der prismatischen Zelle nach den zuvor erläuterten Gleichungen bestimmen. Bei der Bauform mit Flachwickel, wird dabei das Gewicht einer Jelly-Roll mit dem Durchmesser  $d_{Jelly,Prism}$  bestimmt und zu dem Gewicht des zwischen den halben Jelly-Roll liegenden Elektroden-Stacks hinzugaddiert. Die Gewichtsberechnung einer Jelly-Roll sowie eines Zellstapels erfolgt analog mit den Gleichungen (29) bis (33) und (43) bis (47), jedoch mit angepassten Parametern, und wird an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

Für die Masse des Elektrolyten wurde die Menge an Elektrolyten anhand der vorgestellten Methodik aus dem Abschnitt der Pouchzelle bestimmt. Dabei wurde, wie bei der Pouchzelle, das auf die Kapazität bezogene Volumen des Elektrolyten definiert, welches dann mittels Multiplikation der vorliegenden Kapazität der prismatischen Zelle zu dem Elektrolyt-Volumen berechnet wird. Anschließend wird mittels der Dichte der Elektrolyt-Lösung das Gewicht des Elektrolyten ermittelt.

Das Gewicht des Gehäuses ist für beide Ausführungsformen identisch und wurde im Rahmen dieser Arbeit, aufgrund mangelnder Quellen bezüglich der Höhe des alleinigen Gewichtes des Gehäuses, mittels einer CAD-Konstruktion abgeschätzt. Dabei wurde das prismatische Zellgehäuse mit seinen einzelnen Komponenten in CATIA V5 konstruiert und mittels der den Komponenten zugewiesenen Materialeigenschaften das Gewicht des prismatischen Zellgehäuses bestimmt. Für die CAD-Konstruktion wurden die Hauptkomponenten eines Gehäuses für prismatische Zellen berücksichtigt, zu welchen das prismatische Aluminiumgehäuse, Deckelplatte, Klemmen, Ableiter-Kollektoren und das Sicherheitsventil gehören. Ziel der CAD-Konstruktion ist es, eine spezifische Masse eines prismatischen Zellgehäuses zu bestimmen, welche auf verschiedene Abmaße einer vorgegebenen prismatischen Zelle skalierbar ist. In Abbildung 3.13 ist das Ergebnis der CAD-Konstruktion in CATIA V5 dargestellt. Dabei wurde das Zellgehäuse nach einer modernen prismatischen Zelle von Samsung abgebildet, welche aktuell auf dem Markt erhältlich ist.<sup>117</sup> Die Auswertung des konstruierten Zellgehäuses ergab eine spezifische mittlere Dichte des Gehäuses von  $m_{spez,Geh,Prism} = 0,00040368 \text{ g/mm}^3$ , welche die einzelnen Komponenten, wie bspw. die Ableiter oder die inneren Halter durch die Skalierbarkeit miteinbeziehen. Das Gewicht des Gehäuses wird in diesem Modell mithilfe des ermittelten Skalierungsfaktors und den abgegebenen Gehäusemaßen abgeschätzt.

---

<sup>117</sup> Vgl. Samsung - SDI94 - 3,7 Volt 94Ah Li-Ion - Prismatic Lithium-ion Batter (Samsung - SDI94 - 3,7 Volt 94Ah Li-Ion - Prismatic Lithium-ion Batter) 2021.

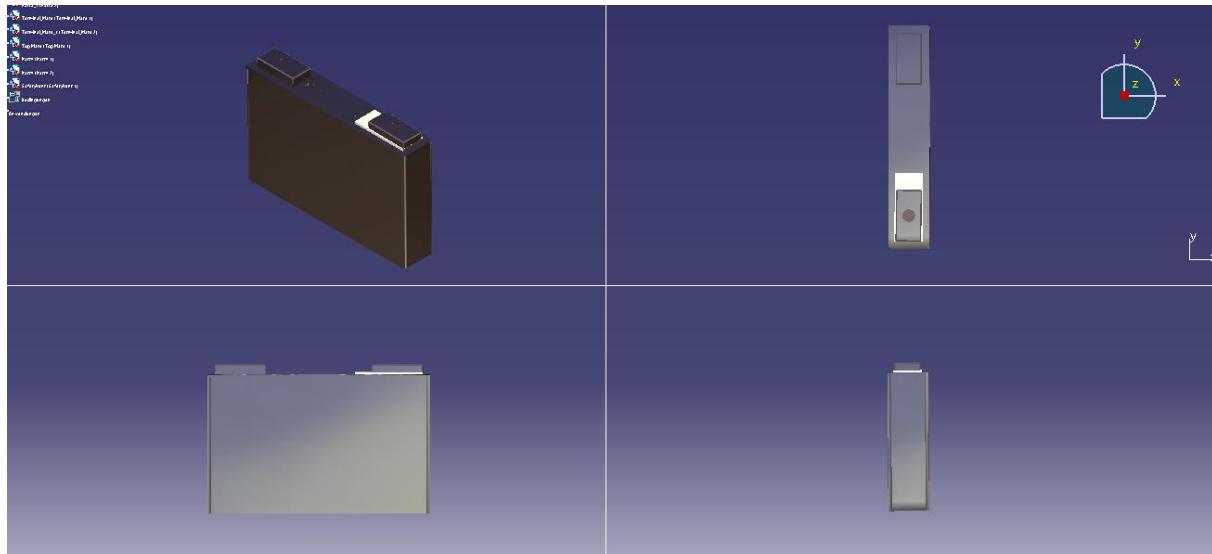


Abbildung 3.13: Konstruktion des prismatischen Zellgehäuses in CATIA V5<sup>118</sup>

Die Energie der prismatischen Zelle lässt sich durch die Multiplikation der Kapazität mit der Zellspannung bestimmen. Zur Berechnung der gravimetrischen Energiedichte wird die Energie auf das zuvor bestimme Zellgewicht normiert sowie für die Bestimmung der volumetrischen Energiedichte die Energie durch das Gesamtvolumen der prismatischen Zelle normiert.

### 3.3.3 Modul-Ebene

In diesem Unterkapitel wird die Methodik der Modellierung eines Moduls, welches sich aus einem der drei Zellformate zusammensetzt, beschrieben (s. Abbildung 3.14). Bei dieser Ebene der Modellierung wird somit das Modul in dem Tool abgebildet und dessen technischen Eigenschaften bestimmt. Dabei werden wie auch in den Ebenen zuvor Inputs definiert, um definierte Outputs zu berechnen (s. Abbildung 3.2). Eine der Eingangsgrößen dieser Ebene bilden die Outputs der Zell-Ebene, welche sich aus dem ausgewählten Zellformat und dessen technischen und geometrischen Eigenschaften zusammensetzt. Der zweite Input dieser Ebene sind individuell eingegebene Parameter. Zu diesen gehört die für die Anwendung erforderliche Energiemenge, das Nutzfenster dieser Energiemenge, die aufzubringende Systemspannung und die Anzahl an gewünschten Modulen pro Pack.

<sup>118</sup> CATIA V5 Konstruktion in Anlehnung an (Prismatic Lithium Ion Battery\_Greenway battery | E-BIKE Battery-Custom Lithium Battery Pack) 2021.

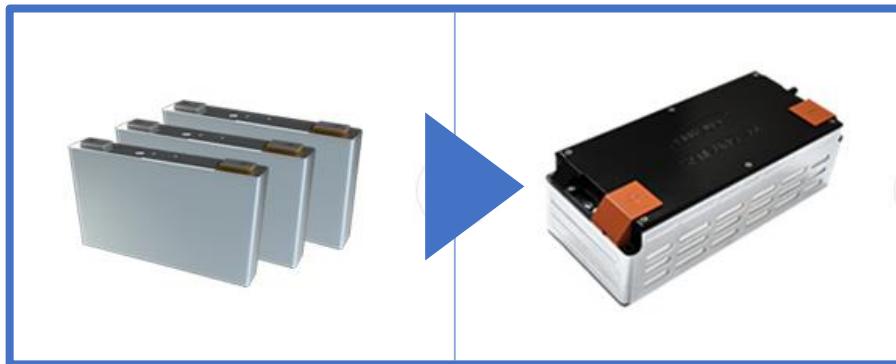


Abbildung 3.14: Zelle zu Modul - Samsung SDI Modul<sup>119</sup>

Der erste Schritt in dieser Ebene besteht darin, die technischen Anforderungen der Anwendung zu erfüllen. Dieser Schritt ist außerdem unabhängig vom Zellformat, sodass dieser für alle drei Zellformate analog durchgeführt wird. Es wird somit die gesamte Anzahl an Zellen, welche in einem Modul verbaut werden, und die Verschaltung dieser für die Erfüllung der Anforderungen des Systems bestimmt. Dazu wird zunächst die Anzahl der seriell verschalteten Zellen für das Gesamtsystem mithilfe der in Kapitel 2.4.1 vorgestellten Gleichungen berechnet. Durch die Eingabe der geforderten Energiemenge, des Nutzensters und der Zellspannung aus der Zell-Ebene wird die Anzahl der im Gesamtsystem benötigter seriell verschalteter Zellen berechnet. Zu beachten ist, dass diese Anzahl zur sicheren Seite abgeschätzt und somit aufgerundet wird. Die Anzahl der Zellen, welche parallel zu verschalten sind, wird mittels der geforderten Fahrzeugkapazität und der Zellkapazität berechnet. Auch hier gilt es zur sicheren Seite abzuschätzen und die berechnete Anzahl aufzurunden. Im Folgenden ist die Berechnung im Einzelnen dargestellt:

$$n_{\text{Seriell,ges}} = \frac{U_{Fzg}}{U_{\text{Zelle}}} \quad (49)$$

$$n_{\text{Parallel,ges}} = \frac{\text{Capa}_{Fzg}}{\text{Capa}_{\text{Zelle}}} \quad (50)$$

$$n_{\text{Zellen,ges}} = n_{\text{seriell,ges}} \cdot n_{\text{parallel, ges}} \quad (51)$$

$$\text{Capa}_{Fzg} = \frac{E_{Fzg}}{f_{\text{nutz}} \cdot U_{fzg}} \quad (52)$$

mit  $n_{\text{Seriell,ges}}$  = gesamte Anzahl serieller Zellen im System

$n_{\text{Parallel, ges}}$  = gesamte Anzahl paralleler Zellen im System

$n_{\text{Zellen,ges}}$  = Gesamte Anzahl an Zellen im System

$U_{Fzg}$  = gewünschte Normspannung

$C_{Fzg}$  = Systemkapazität

$E_{Fzg}$  = gewünschte Systemenergie

<sup>119</sup> (Automotive Battery - Battery Module | Samsung SDI) 2021.

$$f_{nutz} = \text{Nutzfenster der Energiemenge}$$

Nachdem die benötigte Anzahl an Zellen für das System sowie die Verschaltung dieser bestimmt wurde, kann mittels der eingegeben gewünschten Anzahl an Modulen pro Pack die Anzahl an Zellen und deren Verschaltung innerhalb eines Moduls berechnet werden. Da nun die Gesamtanzahl an Zellen bekannt ist, kann durch Division mit der geforderten Anzahl der Module pro Pack, die Anzahl an Zellen in einem Modul berechnet werden. Nachdem die Gesamtanzahl an Zellen im Modul bekannt ist, wird ein Modul so modelliert, dass die Kapazitätsanforderung des Systems durch die Zellen im Modul und die Spannungsanforderung durch die Module innerhalb eines Batteriepacks erfüllt wird. So wird die Anzahl an insgesamt seriell zu verschaltenden Zellen durch die Anzahl an Modulen pro Pack dividiert, sodass sich dadurch die Anzahl an seriellen Zellen in einem Modul  $n_{\text{Seriell,Modul}}$  bestimmen lässt. Die Anzahl der parallelen Zellen im Modul  $n_{\text{Parallel,Modul}}$  entspricht der insgesamt benötigten Anzahl an parallelen Zellen im System. Aus der Anzahl der seriellen und parallelen Zellen innerhalb eines Moduls wird nun die Kapazität, die Spannung und die Energie des Moduls berechnet. Dabei lassen sich die zuvor genannten Größen mit den in Kapitel 2.4.1 vorgestellten Gleichungen (5) bis (6) bestimmen.

Nachdem die technischen Spezifikationen berechnet wurden, können die geometrischen Abmaße des Moduls bestimmt werden, um das Modulgewicht bestimmen zu können. Dafür wird das Mindestmaß des Gehäuses bestimmt, indem je nach ausgewählter Zelle und deren Abmaße aus der Zell-Ebene, die Länge, Tiefe, und Höhe des Moduls berechnet wird. Dabei ist zu beachten, dass die Methodik für die Bestimmung der Anzahl an Zellen im Modul und deren Verschaltung für alle drei Zellformate analog durchgeführt wird.

Zunächst wird die Berechnung für ein Modul mit prismatischen Zellen erläutert. In Abbildung 3.15 ist die Modellierung des Moduls mit prismatischen Zellen schematisch dargestellt. Die Abmaße des Modulgehäuses für prismatische Zellen können mit der Anzahl und den Maßen der Zelle (aus der Zell-Ebene) bestimmt werden. Des Weiteren sind die Wandstärke und die Verklebung der Zellen miteinander zu berücksichtigen. Die Tiefe des Modulgehäuses setzt sich demnach - im Falle von prismatischen Zellen - mit zuvor definierten Abmaße aus der Tiefe einer prismatischen Zelle, multipliziert mit der Anzahl an Zellen pro Modul zusammen. Zwischen diesen Zellen wird die Klebeschicht mit einer Klebschichtdicke von  $d_{\text{Klebe}} = 0,2 \text{ mm}$  berücksichtigt, welche zwar einen geringen Einfluss auf die Gesamttiefe des Moduls hat, jedoch dennoch berücksichtigt wird. Die Wandstärke eines Moduls wurde mit 2 mm festgelegt. Für die Länge des Moduls, wurde die Länge der Zelle und die Wandstärke addiert. Die Höhe des Moduls setzt sich aus der Höhe der Zelle und eine definierte freie Höhe für Verkabelungen und Verbindungen zusammen. Die Materialwerte und Parameter sind im Anhang A.1 hinterlegt. Die Maße des Moduls für prismatische Zellen wurde demnach wie folgt berechnet:

$$T_{\text{Modul,Prism}} = n_{\frac{\text{Zellen}}{\text{Modul}}} \cdot T_{\text{Prism}} + \left( n_{\frac{\text{Zellen}}{\text{Modul}}} - 1 \right) \cdot \delta_{\text{Kleb}} + 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}} \quad (53)$$

$$L_{\text{Modul,Prism}} = L_{\text{Prism}} + 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}} \quad (54)$$

$$H_{\text{Modul,Prism}} = H_{\text{Prism}} + h_{\text{circuit}} + 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}} \quad (55)$$

mit  $n_{\frac{\text{Zellen}}{\text{Modul}}}$  = Anzahl an Zellen im Modul

$\delta_{\text{Kleb}}$  = Klebschichtdicke

$t_{\text{Wand,Modul}}$  = Wandstärke des Gehäuses

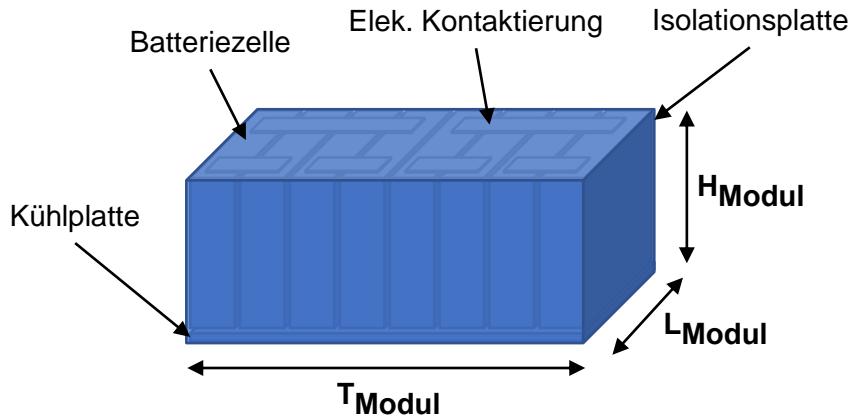


Abbildung 3.15: Modellierung des Batteriemoduls mit prismatischen Zellen (bzw. Pouchzellen)

Nachdem die Abmaße des Batteriemoduls bestimmt ist, kann das Gesamtgewicht berechnet werden. Die Hauptanteile am Gesamtgewicht bilden das Gewicht der Batteriezellen, das Gehäusegewicht sowie das Gewicht der Kühlplatte in dem Modul. Des Weiteren tragen Komponenten wie die Isolationsplatten und die elektrische Kontaktierung geringfügig zum Gewicht bei. Da weitere Komponenten keinen signifikanten Einfluss auf das Gesamtgewicht ausüben und die Batteriezellen mit dem Gehäuse den Hauptteil des Gewichtes ausmachen, wurden weitere Gewichte von konstruktiven Komponenten des Moduls als vernachlässigbar gering eingestuft und nicht weiter berücksichtigt. Die Masse der Batteriezellen lässt sich mithilfe der ermittelten Anzahl an eingesetzten Zellen multipliziert mit der Masse dieser bestimmen. Die Masse der Zelle wird aus der Zell-Ebene entnommen. Das Gehäusegewicht wird durch die zuvor bestimmte Mindestlänge, Tiefe und Höhe des Moduls ermittelt, indem das Gewicht eines hohlen Aluminium-Quaders mit einer definierten Wandstärke berechnet wird. Dabei wird der Platzbedarf der Kühlplatte sowie der freien Höhe über den Zellen für Komponenten wie Verkabelungen berücksichtigt. Die eingesetzte Kühlplatte besteht aus Aluminium mit einer Dichte von  $2,7 \text{ g/cm}^3$  und einer abgeschätzten Dicke von  $d_{\text{Kühl}} = 50 \text{ mm}$ .<sup>120</sup> Die Isolationsplatten in dem Modul bestehen aus Kunststoff mit einer Dichte von  $1,2 \text{ g/cm}^3$  und einer Dicke von  $2 \text{ mm}$ , welche an den Seiten des Moduls befestigt werden. Zudem wird schließlich die elektrische Kontaktierung in der Berechnung der Gesamtmasse in Betracht gezogen, deren Abmaße abhängig von der Geometrie der Zelle berechnet wird. Die Gesamtmasse des Moduls lässt sich mit den zuvor genannten Daten wie folgt bestimmen:

$$m_{\text{Modul,Prism}} = m_{\text{Zellen}} + m_{\text{Gehäuse}} + m_{\text{Komponenten}} \quad (56)$$

<sup>120</sup> Vgl. Ye et al. (Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle) 2019b.

$$m_{\text{Zellen}} = n_{\frac{\text{Zellen}}{\text{Modul}}} \cdot m_{\text{Zelle}} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} m_{\text{Gehäuse}} &= \{L_{\text{Modul}} \cdot T_{\text{Modul}} \cdot H_{\text{Modul}} - [(L_{\text{Modul}} - 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}}) \dots \\ &\dots \cdot (T_{\text{Modul}} - 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}})]\} \cdot \rho_{\text{Alu}} \end{aligned} \quad (58)$$

$$m_{\text{Komponenten}} = m_{\text{Kühl}} + m_{\text{Isoplatte}} + m_{\text{ElekKont}} \quad (59)$$

$$m_{\text{Kühl}} = (L_{\text{Modul}} - 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}}) \cdot (T_{\text{Modul}} - 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}}) \cdot d_{\text{Kühl}} \cdot \rho_{\text{Alu}} \quad (60)$$

$$m_{\text{Isoplatte}} = (H_{\text{Modul}} - 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}}) \cdot (T_{\text{Modul}} - 2 \cdot t_{\text{Wand,Modul}}) \cdot d_{\text{Iso}} \cdot \rho_{\text{Kst}} \quad (61)$$

$$m_{\text{ElekKont}} = L_{\text{Kont}} \cdot B_{\text{Kont}} \cdot d_{\text{Kont}} \cdot \rho_{\text{Alu}} \cdot (n_{\text{Seriell,Modul}} - 1) \cdot (n_{\text{Parallel,Modul}} - 1) \quad (62)$$

mit  $m_{\text{Modul,Prism}}$  = Masse des Moduls

$m_{\text{Zellen}}$  = Masse der Zellen

$m_{\text{Komponenten}}$  = Masse bestimmter Komponenten

$m_{\text{Kühl}}$  = Masse der Kühlplatte

$m_{\text{Isoplatte}}$  = Masse der Isolationsplatte

$m_{\text{ElekKont}}$  = Masse der elektrischen Kontaktierung

Nachdem die Abmaße und die Masse des Moduls bestimmt sind, können mithilfe dieser die spezifischen Energiedichten berechnet werden. Die gravimetrische- und volumetrische Energiedichte werden demnach wie folgt bestimmt:

$$E_{\text{Grav,Modul,Prism}} = \frac{E_{\text{Modul}}}{m_{\text{Modul,Prism}}} \quad (63)$$

$$E_{\text{Vol,Modul,Prism}} = \frac{E_{\text{Modul}}}{V_{\text{Modul,Prism}}} \quad (64)$$

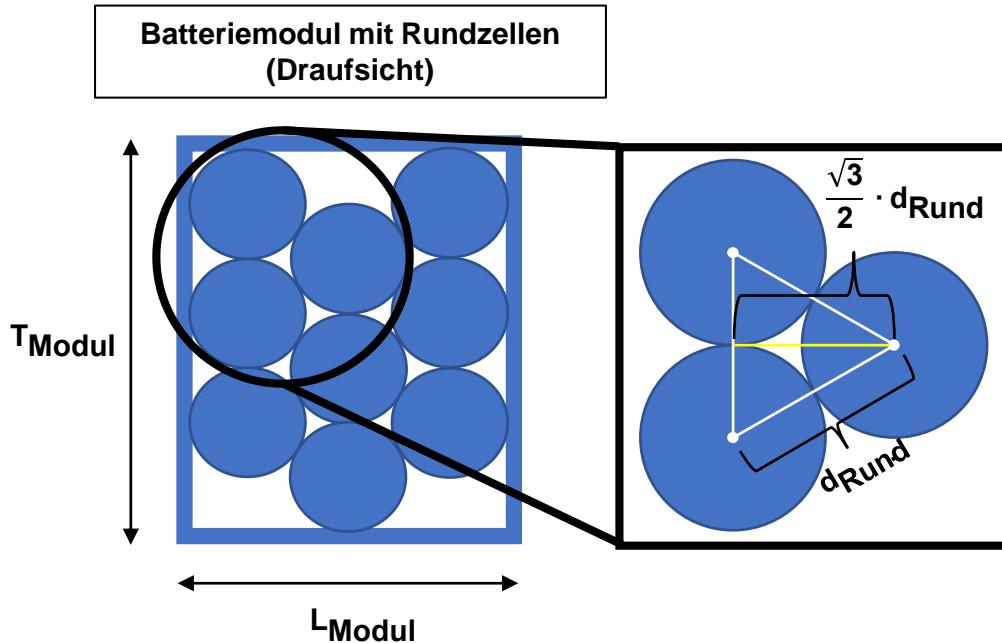
mit  $E_{\text{Grav,Modul,Prism}}$  = gravimetrische Energiedichte des Moduls

$E_{\text{Vol,Modul,Prism}}$  = volumetrische Energiedichte des Moduls

$V_{\text{Modul,Prism}}$  = Volumen des Moduls

Für ein Modul mit Pouchzellen wird (unter Betrachtung geänderter Parameter) die Berechnung der Masse und der spezifischen Energiedichten analog durchgeführt. Nach Bestimmung der Anzahl und Verschaltung der (Pouch-)Zellen werden die Maße und daraufhin die Masse des Pouchzellen-Moduls bestimmt. Für die Abmaße können die Gleichungen (53) bis (55) in Betracht genutzt werden, jedoch ohne die Längenänderungen durch die Klebschicht, da die Pouchzellen im Modul verspannt werden. Die Masse des Batteriemoduls mit Pouchzellen kann daraufhin mittels der Gleichungen (56) bis (62) berechnet werden, jedoch unter zur prismatischen Zelle geänderten Abmaßen, welche aus der Zell-Ebene übernommen werden. Daraufhin kann die Berechnung der spezifischen Energiedichten durchgeführt werden, welche mit den Gleichungen (63) bis (64) mittels der zuvor ermittelten Energie, der Masse und dem Volumen, durchgeführt wird.

Das Batteriemodul mit Rundzellen unterscheidet sich in der Herleitung der Abmaße von dem Batteriemodul mit prismatischen Zellen bzw. Pouchzellen. Abbildung 3.16 zeigt die schematische Darstellung der Modellierung eines Moduls mit Rundzellen. Dabei wird deutlich, dass die Rundzellen aufgrund der hohen benötigten Anzahl nicht einfach einzeln aneinandergereiht werden können. Diese werden somit in diesem Modell mittels geometrischer Beziehungen verbaut, indem die Anzahl an seriellen und parallelen Rundzellen die Tiefe bzw. Höhe beeinflussen und bestimmen.



**Abbildung 3.16: Modellierung des Batteriemoduls mit Rundzellen**

Die Maße des Moduls werden somit mit folgenden Zusammenhängen bestimmt:

$$L_{Modul,Rund} = \frac{d_{Rund}}{2} + n_{Seriell,Modul} \cdot d_{Rund} + 2 \cdot d_{Wand,Modul} \quad (65)$$

$$T_{Modul,Rund} = \frac{d_{Rund}}{2} + \sqrt{3} \cdot \frac{d_{Rund}}{2} \cdot (n_{Parallel,Modul} - 1) + \frac{d_{Rund}}{2} + 2 \cdot d_{Wand,Modul} \quad (66)$$

$$H_{Modul,Rund} = h_{Rund} + h_{circuit} + 2 \cdot d_{Wand,Modul} \quad (67)$$

mit  $L_{Modul,Rund}$  = Länge des Moduls (mit Rundzellen)

$T_{Modul,Rund}$  = Tiefe des Moduls (mit Rundzellen)

$H_{Modul,Rund}$  = Höhe des Moduls (mit Rundzellen)

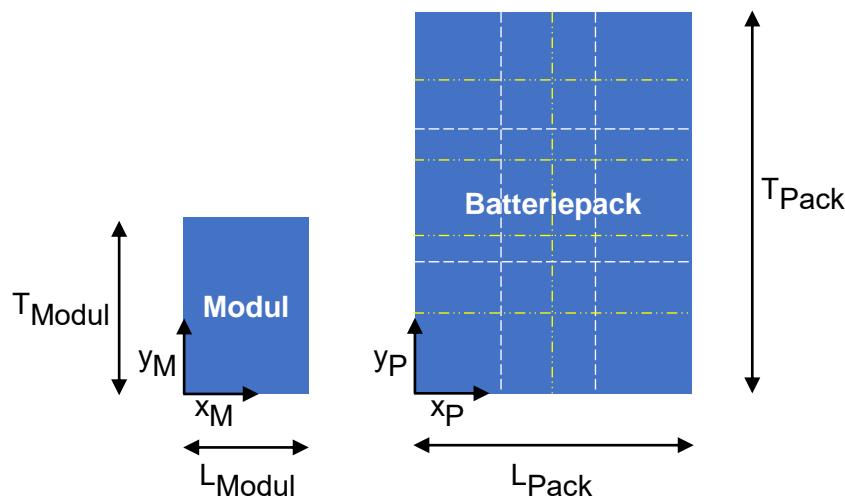
$d_{Rund}$  = Durchmesser der Rundzelle

Die Gesamtmasse des Moduls mit Rundzellen setzt sich aus der Masse der Zellen, der Masse des Gehäuses und der Masse weiterer Komponenten zusammen, welche zuvor erwähnt wurden. Das Gewicht der Zellen wird mithilfe der Zellmasse aus der Zell-Ebene und der Anzahl der Zellen pro Modul bestimmt. Die Gewichtsberechnung des Gehäuses und der weiteren Komponenten erfolgt analog zur Berechnung für die prismatische Zelle-, bzw. Pouchzelle, jedoch mit angepassten Parametern. Die spezifischen Energiedichten auf die Masse und auf

das Volumen bezogen können mittels der Gesamtenergie des Moduls, dividiert durch die Modulmasse, bzw. das Modulvolumen bestimmt werden.

### 3.3.4 Pack-Ebene

Nach der Methodik aus Abbildung 3.2 wird nach der Modul-Ebene die Pack-Ebene der Zellauswahl betrachtet. Diese Ebene der Zellauswahl hat als Input zum einen die technischen Daten der Module aus der Modul-Ebene und zum anderen die individuelle Eingabe der geometrischen Randbedingungen bezüglich des Bauraums. Der zweite Input ist somit die Bauraumlänge, Tiefe und Höhe, welche durch den Anwender festgelegt werden kann. Ziel dieser Ebene ist es, die technischen Spezifikationen des Batteriepacks zu modellieren, aber auch den tatsächlich benötigten Bauraum unter Berücksichtigung des verfügbaren Bauraums.



**Abbildung 3.17: Modellierung der Anordnung des Moduls (links) im Bauraum (rechts) unter Angabe von lokalen Koordinatensystemen**

Die Anzahl der Module pro Batteriepack wird in der Modul-Ebene vorgegeben und dient in der Pack-Ebene der Bestimmung des Platzbedarfs des Batteriepacks in dem Bauraum. Es werden somit zunächst Anordnungsmöglichkeiten der einzelnen Batteriemodule in dem vorgegebenen Bauraum untersucht und modelliert. Dazu wird zur Charakterisierung der Anordnung dem Batteriemodul und dem Batteriepack jeweils ein lokales Koordinatensystem zugeordnet, welches in Abbildung 3.17 sichtbar ist. Dabei wird der Anordnungsprozess der Batteriemodule zweidimensional betrachtet und somit lediglich die Länge und die Tiefe des Moduls bzw. des Packs in Betracht gezogen. Die Höhe spielt in der Anordnung somit keine Rolle, jedoch wird sie durch die Eingabe der maximal verfügbaren Höhe des Bauraums der Anwendung begrenzt. Außerdem wird die Höhe des Batteriemoduls bei der späteren Berechnung der volumetrischen Energiedichte von Relevanz sein. Des Weiteren ist in der Abbildung 3.17 ein Raster in dem Batteriepack skizziert, welches die unterschiedlichen Anordnungen des Moduls schematisch kennzeichnet. Die Anordnung der Module und die Überprüfung der Realisierung dieser wird im Folgenden näher erläutert.

In dem ersten Schritt der Pack-Ebene wird eine notwendige Bedingung aufgestellt und überprüft. Durch die notwendige Bedingung des Anordnungsprozesses wird überprüft, ob die Anzahl an Modulen pro Pack rein geometrisch, in diesem Fall die benötigte Fläche, nicht größer

ist als die maximal verfügbare Fläche im Bauraum. Dafür werden die Modul-Maße sowie die Anzahl an Modulen pro Pack der Modul-Ebene entnommen und durch Multiplikation die benötigte Fläche berechnet. Diese Fläche wird mit der verfügbaren Fläche im Bauraum verglichen und muss geringer oder höchstens genauso groß sein wie die Bauraumfläche. Dabei wurde die verfügbare Fläche für die Module mithilfe der Eingabe der Bauraummaße bestimmt, wobei die berechnete Fläche durch einen Faktor skaliert wird, welcher weitere Komponenten wie bspw. das BMS einbezieht. Nachdem die notwendige Überprüfung vollzogen und erfüllt ist, kann der Entschluss getroffen werden, dass die gewünschte Anzahl an Modulen im Batteriepack zumindest flächenmäßig realisiert werden kann. Im nächsten Schritt wird die hinreichende Bedingung überprüft. Diese wird für jede Anordnung separat durchgeführt und prüft, ob die maximal benötigten Abmaße bedingt durch die zu untersuchende Anordnung, die maximal verfügbaren Abmaße des Bauraums nicht überschreiten.

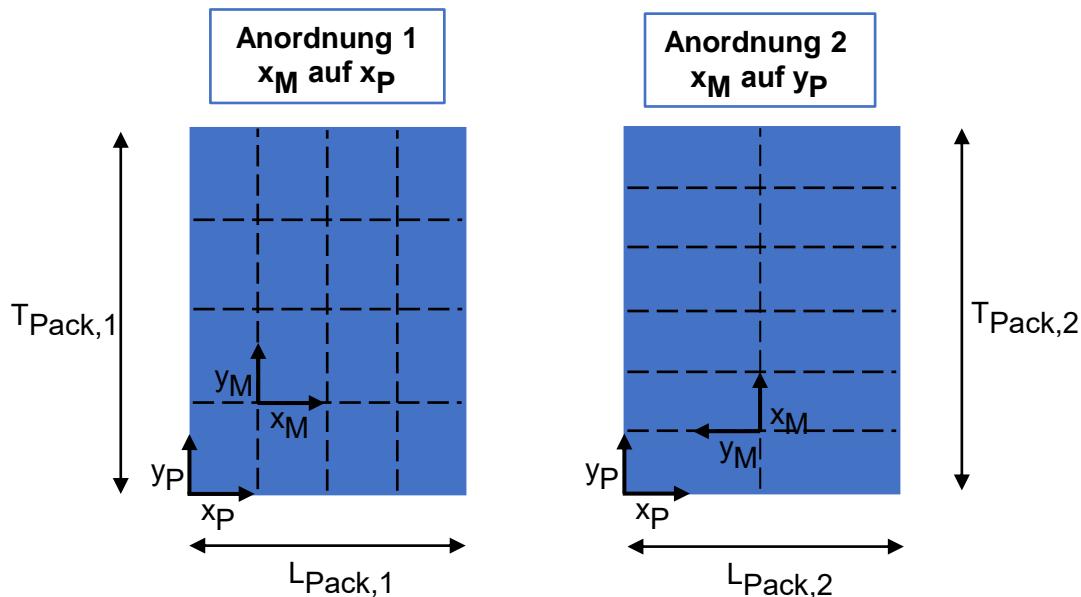


Abbildung 3.18: Schematische Darstellungen der Anordnungen der Module im Bauraum

Die Methodik wird am Beispiel von Anordnung 1 verdeutlicht und kann analog auf Anordnung 2 angewandt werden. Daher wird im weiteren Verlauf lediglich die Modellierung von Anordnung 1 erläutert. Wird nun Anordnung 1 betrachtet, so zeigt die Richtung der x-Koordinate des Moduls in Richtung der x-Koordinate des Bauraums. Dieser Fall wird in Abbildung 3.18 links dargestellt. Es wird berechnet, welche Anzahl an Modulen in der Ausrichtung 1 in der vorgegebenen Länge und Tiefe des Bauraums angeordnet werden kann. Die maximale Anzahl der Module in x- bzw. y-Richtung wird wie folgt bestimmt:

$$n_{xx,max} = \frac{L_B}{L_M} \quad (68)$$

$$n_{yy,max} = \frac{T_B}{T_M} \quad (69)$$

$$n_{xxyy,max} = n_{xx,max} \cdot n_{yy,max} \quad (70)$$

mit  $n_{xx,max}$  = Maximale Anzahl an Modulen in x Richtung

$n_{yy,max}$  = Maximale Anzahl an Modulen in y Richtung

$n_{xxyy,max}$  = maximale Gesamtanzahl an Modulen

$L_{B,M}$  = Länge des Bauraums, bzw. Moduls

$T_{B,M}$  = Tiefe des Bauraums, bzw. Moduls

Nun wird überprüft, ob die Anzahl an Modulen pro Pack kleiner oder gleich der maximalen Gesamtanzahl an Modulen ist. Ist dies der Fall, kann die gewünschte Anzahl an Modulen in dieser Anordnung realisiert werden. Der nächste Schritt besteht darin, die maximale Anzahl an Modulen in x-Richtung und in y-Richtung sinnvoll auf die minimal benötigte Modulanzahl zu begrenzen. Dafür wird im Modell die maximale Anzahl der Module in x- und y-Richtung schrittweise mittels einer Schleife in Abhängigkeit der gewünschten Modulanzahl verringert, sodass die Anzahl an Modulen in x-Richtung und y-Richtung die Bauraummaße einhält, jedoch auch die minimal benötigte Anzahl in jede Richtung darstellt. Als Resultat ergibt sich somit die Anzahl der Module in Ausrichtung 1 in x-Richtung und in y-Richtung, sodass bspw. bei einer gewünschten Modulanzahl im Pack von zehn Modulen, eine Konfiguration von fünf Modulen in x- und zwei Modulen in y-Richtung das Ergebnis darstellen (5x2 Modul-Konfiguration).

Nachdem die Konfiguration der Module in dem Bauraum bestimmt wurden, können die Maße des Batteriepacks und schließlich dessen Gewicht ermittelt werden. Da nun durch die ermittelte Konfiguration die Anzahl der Module und Ausrichtung dieser bekannt sind, kann mittels den Modulmaßen aus der Modul-Ebene die eingenommene Fläche durch die vorliegende Konfiguration in der vorliegenden Ausrichtung berechnet werden. Dazu wird die Länge bzw. die Tiefe des Moduls mit der Anzahl an Modulen in x- bzw. y-Richtung multipliziert, sodass die erforderliche Länge- und Tiefe des Bauraums für das Unterbringen der Module ausfindig gemacht werden. Für den Platzbedarf weiterer Komponenten in dem Pack wird ein Zuschlag von 20 % in der Länge dazugerechnet, welcher den erforderlichen Bauraum erhöht. Zudem wird jeweils eine Wandstärke des Gehäuses auf die Länge und die Tiefe hinzuaddiert, welche in dem Modell mit 5 mm parametrisiert wird. Die Höhe des Batteriepacks ergibt sich aus der Höhe des Moduls aus der Modul-Ebene und einer freien Höhe über den Modulen, welche zu 30 mm festgelegt wird. Hinzu kommt die Wandstärke des Deckels und des Bodens von jeweils 5 mm. Nachdem die vollständigen Maße des Batteriepacks berechnet wurden, wird die Länge und die Tiefe des Batteriepacks jeweils mit dem verfügbaren Bauraum, welcher zu Beginn der Rechnungen vorgegeben wurde, verglichen und somit die Realisierbarkeit ausgewertet. Sind die Maße des Packs außerhalb der geometrischen Rahmenbedingungen, wertet das Modell die vorliegende Anordnung als „nicht realisierbar“ aus. Andernfalls wird diese als „realisierbar“ gekennzeichnet.

Durch die ermittelten Maße des Batteriepacks, lässt sich das Gesamtgewicht und das Volumen des Packs nun vollständig bestimmen. Das Gewicht des Batteriepacks setzt sich maßgeblich aus dem Gewicht der Batteriemodule, dem Gewicht des Gehäuses, dem Gewicht des Batteriemanagementsystems und dem Gewicht des Kühlsystems zusammen. Das Gewicht durch die Batteriemodule wird mithilfe der Anzahl der Module und deren Gewicht, welches aus der Modul-Ebene entnommen wird, ermittelt. Das Gehäusegewicht lässt sich durch die zuvor bestimmten Abmaße des Batteriepacks bestimmen, indem das Gewicht eines hohlen Aluminium Quaders berechnet wird, welche eine Wandstärke von 5 mm aufweist. Das Gewicht des

BMS wird zu 8,5 kg gesetzt und das des Kühlsystems zu 8,9 kg.<sup>121</sup> Das Volumen des Packs lässt sich schließlich durch die Maße des Packs bestimmen.

Die technischen Eigenschaften des Batteriepacks werden durch die Verschaltung der Module bestimmt. Da die Kapazitätsanforderung der Anwendung durch das Batteriemodul erfüllt worden sind, werden die Module im Batteriepack seriell verschaltet. Die Spannung des Batteriepacks ergibt sich somit aus der Anzahl der Module pro Pack, welche mit der Modulspannung multipliziert wird. Die Kapazität des Packs ergibt sich durch die Kapazität eines Moduls, sodass sich die Gesamtenergie des Batteriepacks aus der ermittelten Spannung und der Kapazität bestimmen lässt. Durch das zuvor ermittelte Gewicht- und Volumen des Packs, lassen sich die spezifischen Energiedichten ermitteln.

### 3.3.5 Auswahl-Ebene

In diesem Unterkapitel wird die Modellierung der Auswahl-Ebene beschrieben. Ziel dieser Ebene ist es dem Anwender bei einer Vielzahl an berechneten Alternativen ein Ranking zu erstellen und so einen Vorschlag für die optimale Lösung machen. Dazu wird die in Kapitel 2.6 vorgestellte TOPSIS-Methode verwendet. Die Auswahl-Ebene besitzt zwei Eingangsgrößen (vgl. Abbildung 3.3): Zum einen die individuelle Eingabe der Gewichtung vorgegebener Kriterien und zum anderen die technischen Daten (mithilfe des Tools) berechneter Batteriepacks. Bei den Kriterien in diesem Modell wird der Fokus auf die Zelleigenschaften gelegt. So lauten die Kriterien einerseits Sicherheit, Lebensdauer und Kosten. Andererseits werden Kriterien hinsichtlich der energetischen Eigenschaften der zuvor berechneten Batteriepacks herangezogen. Es gelten somit die gravimetrische- und die volumetrische Energiedichte als Kriterien in der Auswahl-Ebene. Für die zuletzt genannten Kriterien wird der zweite Input der Auswahl-Ebene benötigt. Die gravimetrische- und die volumetrische Energiedichte der zuvor konfigurierten bzw. berechneten Batteriepacks aus der Pack-Ebene, werden somit in die Auswahl-Ebene übernommen. Den Kriterien muss nun jeweils eine Gewichtung zugeordnet werden, welche von dem Anwender vorgegeben wird. In dem Tool lässt sich die Gewichtung jedes Kriteriums mittels Schieber jeweils auf einen Wert zwischen 0 (niedrigste Relevanz) bis 1 (höchste Relevanz) einstellen. Zu Beginn stellt das Tool eine Entscheidungsmatrix auf, welche für jede Alternative aus den Werten der gravimetrischen- und volumetrischen Energiedichte der jeweiligen Alternative besteht. Neben den zuvor vorgestellten Kriterien gilt der sog. Effizienzindex (Pack zu Zelle) als ein weiteres Kriterium in der Auswahl-Ebene. Dieser Index beschreibt das Verhältnis der spezifischen Energie von Pack zur spezifischen Energie der Zelle.<sup>122</sup> Dadurch wird in dem Entscheidungsprozess neben der Zellchemie, der Einfluss des Zellformats auf die Packeigenschaften berücksichtigt. Zur Berechnung dieses Indizes werden

---

<sup>121</sup> Vgl. Yuan et al. (Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles) 2017, S. 54.

<sup>122</sup> Vgl. Löbberding et al. (From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types) 2020, S. 7.

die spezifische Energiedichten aus der Zell-Ebene verwendet und durch die spezifischen Energiedichte des dazugehörigen Batteriepacks aus der Pack-Ebene zu einem Effizienzindex berechnet. Zusätzlich zu den zuvor erwähnten Kriterien, können die Lebensdauer, die Sicherheit und die Kosten jeweils in Form einer (bezüglich des Kathodenmaterials) abgeschätzten Kennzahl als Kriterien in den Auswahlprozess miteinbezogen werden. Die Einbringung der drei zuvor genannten Kriterien (Lebensdauer, Sicherheit, Kosten) in der Auswahl-Ebene ist jedoch optional und kann in dem Tool abgewählt werden. Die Größe der Kennzahlen richtet sich an die in Kapitel 2.2 erläuterten Eigenschaften der vorgestellten Zellmaterialien. So wird bspw. die Kennzahl für die Lebensdauer für eine Zelle mit LFP als Zellchemie zu dem Wert 4 gesetzt, während die Kennzahl für eine LMO-Zellchemie geringer ausfällt und zu dem Wert 2 festgelegt wird. Die abgeschätzten Kennzahlen werden als Parameter definiert und können dem Anhang A.1 entnommen werden.

Das Resultat der Festlegung der Kriterien ist eine Entscheidungsmatrix mit der Anzahl an Alternativen (Zeilen) und den jeweiligen Werten bzw. Faktoren für das jeweilige Kriterium (Spalten). Folgende Tabelle 3.4 zeigt den Aufbau der Entscheidungsmatrix in dem Modell:

**Tabelle 3.4: Aufbau der Entscheidungsmatrix im Auswahltool**

	Grav. Energie- dichte	Vol. Ener- giedichte	Effi- zienzin- dex (grav.)	Effi- zienzin- dex (vol.)	Sicher- heitskenn- zahl	Lebens- dauer- kennzahl	Kosten- kennzahl
Batterie- pack 1	$e_{\text{grav},1}$	$e_{\text{vol},1}$	$\epsilon_{\text{Pack}_\text{Zelle},\text{grav},1}$	$\epsilon_{\text{Pack}_\text{Zelle},\text{vol},1}$	$s_1$	$l_1$	$k_1$
...	...	...	...	...	...	...	...
Batterie- pack n	$e_{\text{grav},n}$	$e_{\text{vol},n}$	$\epsilon_{\text{Pack}_\text{Zelle},\text{grav},n}$	$\epsilon_{\text{Pack}_\text{Zelle},\text{vol},n}$	$s_n$	$l_n$	$k_n$

Nach der TOPSIS-Methode wird diese Entscheidungsmatrix normiert, sodass mithilfe Tabelle 2.6 die normierte Entscheidungsmatrix in dem Tool berechnet wird. Als nächstes werden die eingegebenen Gewichtungen der Kriterien für die Berechnung übernommen, sodass eine gewichtete Entscheidungsmatrix nach Tabelle 2.7 berechnet werden kann. Aus dieser gewichteten Entscheidungsmatrix wird der Abstand zur besten Alternative ermittelt, welcher dem Anwender in dem Tool in Form eines TOPSIS-Effizienzwertes angezeigt wird. Die Alternative mit dem höchsten Index gilt als optimale Alternative unter den angegebenen Präferenzen und stellt somit die auszuwählende Batteriepack-Konfiguration dar.

## 4 Validierung und Analyse der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus dem entwickelten Zellauswahltool validiert und analysiert. Zudem wird die Anwendung des Zellauswahltools erläutert und die ermittelten Ergebnisse diskutiert. Zum Schluss wird mithilfe einer Sensibilitätsanalyse der Einfluss von Variation bestimmter Parameter analysiert. Ziel der Validierung ist es somit, Gültigkeit und Genauigkeit des entwickelten Modells für die Anwendung im Zellauswahlprozess darzulegen und dadurch ein Werkzeug als Alternative für den Realversuch bereitzustellen.

### 4.1 Vergleich der Ergebnisse des Tools mit Realdaten

In diesem Unterkapitel wird die Plausibilität der Modellierung der Zellformate, sowie der Modul- und Packegenschaften, mittels eines Vergleichs mit Referenzdaten, überprüft. Zunächst werden die Ergebnisse der Zell-Ebene und somit die Modellierung der Zellformate, validiert. Anschließend wird die Modellierung der Modul-Ebene und der Pack-Ebene, mit jeweils der drei Zellformate mittels eines Vergleichs überprüft.

#### Rundzelle

Die Referenzzelle für die Modellierung der 18650-Rundzelle stellt eine 18650-Rundzelle von Panasonic des Models NCR18650PD dar. In folgender Tabelle 4.1 sind die technischen Daten der Referenzzelle dargestellt, sowie die Ergebnisse der Berechnungen einer 18650-Rundzelle. Des Weiteren ist die relative Abweichung der Ergebnisse zu den Daten der Referenzzelle prozentual dargestellt. Die Maße der Referenzzelle und der modellierten Zelle sind aufgrund der Normierung von 18650-Rundzellen identisch. Zudem wurde die Zellchemie (Graphit/NCA) und die Flächenbeladung von 3,65 mAh/cm<sup>2</sup> in dem Modell ausgewählt, sodass auch diese Parameter übereinstimmen.

**Tabelle 4.1: Vergleich der Ergebnisse mit Realdaten einer 18650-Rundzelle**

	Panasonic NCR18650PD <sup>123</sup>	Ergebnisse der 18650-Zelle	Relative Abweichung zur Referenzzelle
Normspannung (V)	3,6	3,6	0,00 %
Kapazität (Ah)	2,9	3,0	3,44 %
Energie (Wh)	10,44	10,80	3,44 %
Masse (g)	45,00	45,53	1,18 %
Grav. Energiedichte (Wh/kg)	232	237	2,16 %
Vol. Energiedichte (Wh/L)	603	624	3,48 %

<sup>123</sup> Vgl. Keil (Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles) 2017, S. 16.

Deutlich wird, dass die relative Abweichung in keiner der dargestellten technischen Eigenschaft mehr als 3,5 % beträgt, sodass die Ergebnisse der Abbildung der Referenzzelle (Berechnungen) die Referenzzelle mit hoher Genauigkeit abbilden. Die geringen prozentualen Abweichungen sind durch geringfügige Unterschiede in der mechanischen bzw. elektrochemischen Konstruktion der Referenzzelle begründet, welche aufgrund mangelnder Transparenz der tiefergehenden konstruktiven Eigenschaften der Referenzzelle nicht vermeidbar sind.

### Pouchzelle

Nun wird die Modellierung der Pouchzelle mittels direkten Vergleichs von Ergebnissen aus dem Tool mit Daten einer Referenzzelle validiert. Dabei wird die Zellchemie NMC611 als Kathodenmaterial mit Graphit als Anodenmaterial ausgewählt. Die Abmaße der Referenzzelle betragen 155 x 8,5 x 242 mm, welche für die berechnete Pouchzelle identisch im Zellauswahltool parametrisiert werden. Die Ergebnisse der Modellierung der Referenzzelle sind in nachfolgender Tabelle 4.2 dargestellt. Wie aus der Tabelle 4.2 ersichtlich, liegt die relative Abweichung der berechneten Werte, verglichen zu den Werten der Realzelle, im Bereich zwischen 0,35 % und 5,05 %. Die höchste Abweichung liegt in der Kapazität, welche jedoch durch einen möglichen Unterschied in den konstruktiven Parametern wie bspw. die Breite der Siegelnhaft, begründet sind.

**Tabelle 4.2: Vergleich der Ergebnisse mit Realdaten einer Pouchzelle**

	Bestgo BCPNE37K <sup>124</sup>	Ergebnisse der Pouchzelle	Relative Abweichung zur Referenzzelle
Normspannung (V)	3,7	3,6	2,70 %
Kapazität (Ah)	37	38,87	5,05 %
Energie (Wh)	136,90	139,93	2,21 %
Masse (g)	630	633,80	0,63 %
Grav. Energiedichte (Wh/kg)	220	220,78	0,35 %
Vol. Energiedichte (Wh/L)	430	438,88	2,07 %

### Prismatische Zelle

Auch für die Validierung der prismatischen Zelle wurden die Ergebnisse aus dem Tool mit Realdaten verglichen. In Tabelle 4.3 sind die Spezifikationen einer prismatischen Zelle (institutsinterne Daten) und zudem berechnete Ergebnisse einer prismatischen Zelle mit gleichen Parametern (Zellchemie, Maße, etc.) abgebildet. Dabei wird deutlich, dass die relative Abweichung für keine Eigenschaft über 5 % beträgt. Die größte Abweichung besteht in der Masse der Zellen, welche durch eine mögliche, unterschiedliche Konstruktion des Gehäuses und den

<sup>124</sup> Vgl. Bestgo (Li-ion cells) 2021.

internen Komponenten begründet wird. Grund dafür ist die Intransparenz konstruktiver Eigenschaften des inneren Aufbaus der Referenzzelle.

**Tabelle 4.3: Vergleich der Ergebnisse mit Realdaten einer prismatischen Zelle**

	Prismatische Referenzzelle <sup>125</sup>	Ergebnisse der 18650-Zelle	Relative Abweichung zur Referenzzelle
Normspannung (V)	3,65	3,60	1,37 %
Kapazität (Ah)	77,60	77,98	0,49 %
Energie (Wh)	283,24	280,72	0,89 %
Masse (g)	1180	1226	3,90 %
Grav. Energiedichte (Wh/kg)	240	229	4,58 %
Vol. Energiedichte (Wh/L)	612	607	0,82 %

## Modul und Pack

### Vergleich des Effizienzindexes mit Realdaten – Zelle zu Modul

Nun wird ein Vergleich zwischen der berechneten gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte der Zelle und des Moduls durchgeführt und die Ergebnisse validiert. Dafür wird zunächst Abbildung 4.1 herangezogen, welche die gravimetrische Energiedichte von verschiedenen Zellformaten mit identischer Zellchemie, auf Zell-Ebene und Modul-Ebene gegenüberstellt. Analog dazu, wird in Abbildung 4.2 das Verhältnis der volumetrischen Energiedichten der Zelle und des dazugehörigen Moduls graphisch dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass der Wert der spezifischen Energiedichte bei Erreichen der nächstgrößeren Ebene (z.B. Zell-Ebene zu Modul-Ebene) sinkt. Eine Kenngröße, welche hier berechnet werden kann, ist der Effizienzindex<sup>126</sup>, welcher das Verhältnis der spezifischen Energiedichte der höher liegenden Ebene zur darunter liegenden Ebene beschreibt. Der Effizienzindex gibt somit an, wie sich die spezifischen Energiedichten durch die Weiterverarbeitung der Zelle zu einem Modul, bzw. zu einem Batteriepack ändert. Je höher dieser Wert ist, desto effizienter ist der Verbau von Zelle zu einem Modul, bzw. zu einem System.

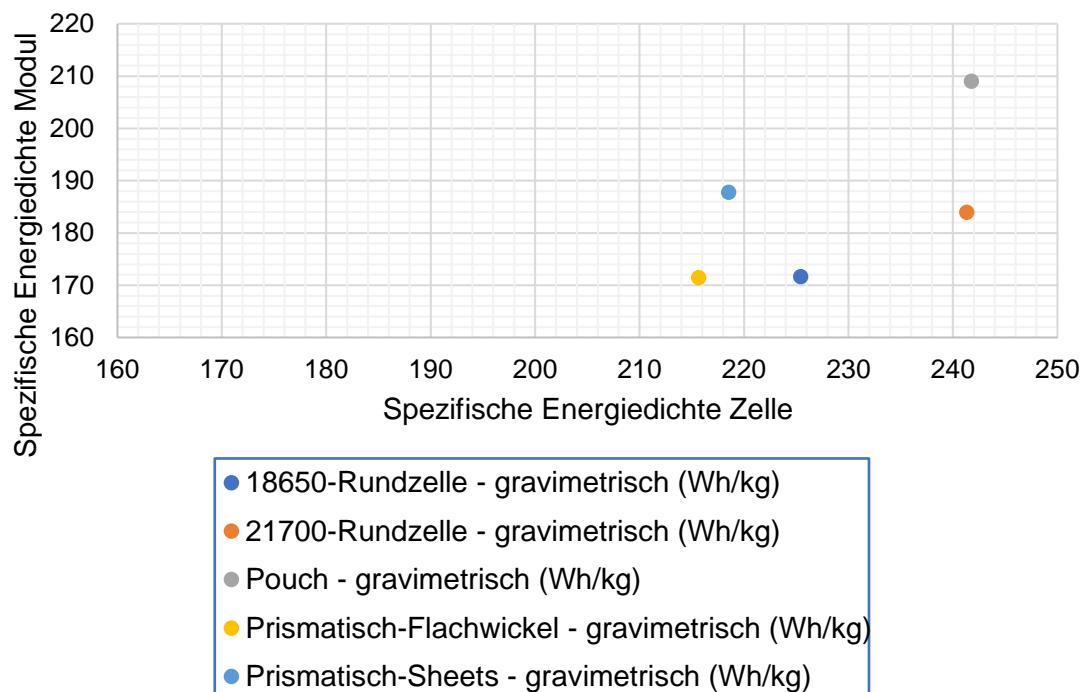
Der Effizienzindex (Zelle zu Modul) für die gravimetrische Energiedichte von Rundzellen liegt typischerweise in einem Bereich zwischen 0,716 und 0,897. Für die prismatische Zelle und die Pouchzelle befindet sich der Index typischerweise in einem Bereich zwischen 0,817 und 0,916. Für die volumetrische Energiedichte nimmt der Effizienzindex (Zelle zu Modul) Werte zwischen

<sup>125</sup> Vgl. PEM RWTH Aachen (Internes Dokument) 2021.

<sup>126</sup> Vgl. Löbberding et al. (From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types) 2020.

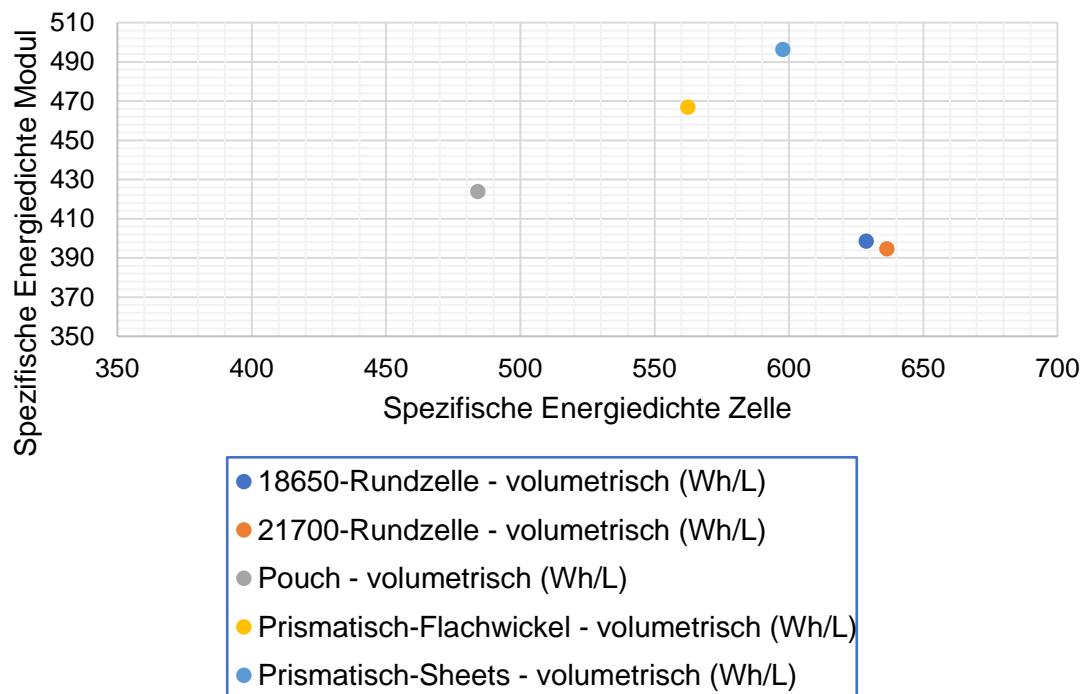
0,362 und 0,578 an. Bei prismatischen Zellen und Pouchzellen liegt der Effizienzindex zwischen 0,732 und 0,892.<sup>127</sup>

In Tabelle 4.4 ist der Effizienzindex für die gravimetrische und volumetrische Energiedichte aller drei Zellformate dargestellt und Referenzdaten gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass die berechneten Werte des Tools innerhalb des Wertebereiches der Realdaten sind. Zudem kann die Kenntnis gezogen werden, dass Rundzellen von allen drei Zellformaten, bzw. Ausführungsformen, den niedrigsten Effizienzindex aufweisen. Dies liegt vorwiegend an der Geometrie der Rundzelle begründet, welche durch Ihre Rundungen nicht vollständig lückenlos zu einem Modul verbaut werden können. Im Gegenteil dazu werden Pouchzellen durch Verspannung zu einem Modul verbaut, sodass der Effizienzindex höhere Werte annimmt. Gleichermaßen gilt auch für prismatische Zellen, welche bspw. verklebt werden und so weniger passive Volumina aufweisen. Zudem ist der Effizienzindex, bezogen auf die volumetrische Energiedichte der beiden Ausführungsformen der prismatischen Zelle, aufgrund gleicher Gehäusemaße identisch.



**Abbildung 4.1: Vergleich der spezifischen Energiedichte zwischen Zelle und Modul (gravimetrisch)**

<sup>127</sup> Vgl. Löbberding et al. (From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types) 2020, S. 9.



**Abbildung 4.2: Vergleich der spezifischen Energiedichte zwischen Zelle und Modul (volumetrisch)**

**Tabelle 4.4: Vergleich des berechneten Effizienzindexes mit Realdaten<sup>128</sup> - Zelle zu Modul**

	Rundzelle (Ø aus 18650 und 21700)	Referenz- werte	Pouchzelle	Prismati- sche Zelle (Flachwi- ckel)	Prismatische Zelle (Sheets)	Referenz- werte
Effizienzin- dex (gravi- metrisch) Zelle zu Mo- dul	0,7617	0,716 – 0,897	0,8643	0,7949	0,8181	0,816 – 0,926
Effizienzin- dex (volu- metrisch) Zelle zu Mo- dul	0,6269	0,362 – 0,578	0,8756	0,8303	0,8303	0,732 – 0,892

<sup>128</sup> Vgl. Löbberding et al. (From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types) 2020, S. 9.

### Vergleich des Effizienzindexes mit Realdaten – Zelle zu Pack

In Abbildung 4.3 ist die gravimetrische Energiedichte berechneter Zellen aus der Zell-Ebene sowie berechneter Batteriepacks aus der Pack-Ebene dargestellt. Analog ist in Abbildung 4.6 die volumetrische Energiedichte von Batteriepacks über der volumetrischen Energiedichte der in dem jeweiligen Batteriepack verbauten Zellen abgebildet. Wie aus den Diagrammen ersichtlich, verliert jede Ebene an spezifischer Energiedichte, aufgrund von zusätzlichen Komponenten, welche die jeweilige Ebene beinhaltet. Das Verhältnis der spezifischen Energiedichte zweier Ebenen wird durch den zuvor eingeführten Effizienzindex beschrieben. Dadurch wird die Reduzierung der gravimetrischen bzw. volumetrischen Energiedichte ersichtlich, wodurch sich ein Zellformat, welches für die Verarbeitung zu einem Batteriepack vorgesehen ist, besser bewerten lässt.

Zur Validierung der berechneten Werte des Tools, wird ein Vergleich mit Realdaten durchgeführt. Der Effizienzindex (Zelle zu Pack) für die gravimetrische Energiedichte liegt für Rundzellen in einem Bereich zwischen 0,552 und 0,672 und für prismatische Zellen bzw. Pouchzellen in einem Bereich zwischen 0,575 und 0,742. Für die volumetrische Energiedichte werden Effizienzindizes einer Rundzelle zu 0,295 bis 0,356 geschätzt sowie für prismatische Zellen und für Pouchzellen zu einem Wertebereich von 0,353 bis 0,528.<sup>129</sup>

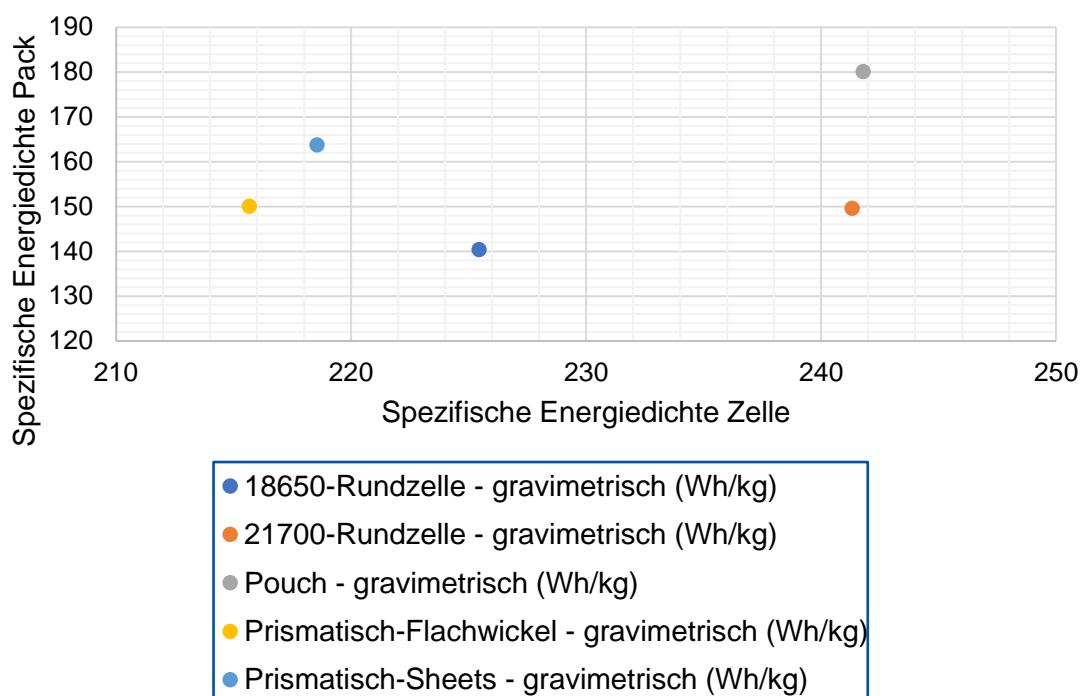
Die Ergebnisse der Berechnung des Effizienzindizes sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass der Effizienzindex für die gravimetrische Energiedichte der Pouchzelle und der prismatischen Zelle beider Ausführungsformen keine signifikanten Unterschiede aufweist. Die Rundzellen weisen einen geringeren Wert (0,6212) als die Pouchzelle und die prismatischen Zellen (Effizienzindex der Pouchzelle und prismatischen Zellen im Durchschnitt ca. 0,7299) auf. Betrachtet man jedoch die volumetrische Energiedichte, so fällt auf, dass Rundzellen, verglichen zu den Werten der restlichen Zellformate, einen geringen Effizienzindex aufzeigen. Somit ist der Vorteil der Rundzellen, hoher gravimetrischer und volumetrischer Energiedichten im Vergleich zu den restlichen Zellformaten aufzuweisen, dadurch ausgeglichen. Es ist somit für eine Bewertung und Auswahl der optimalen Zelle eine Betrachtung des Systems von Vorteil, da positive technische Eigenschaften auf Zell-Ebene bei Weiterentwicklung zum System, technisch weniger vorteilhaft sein können als zu Beginn angenommen.

---

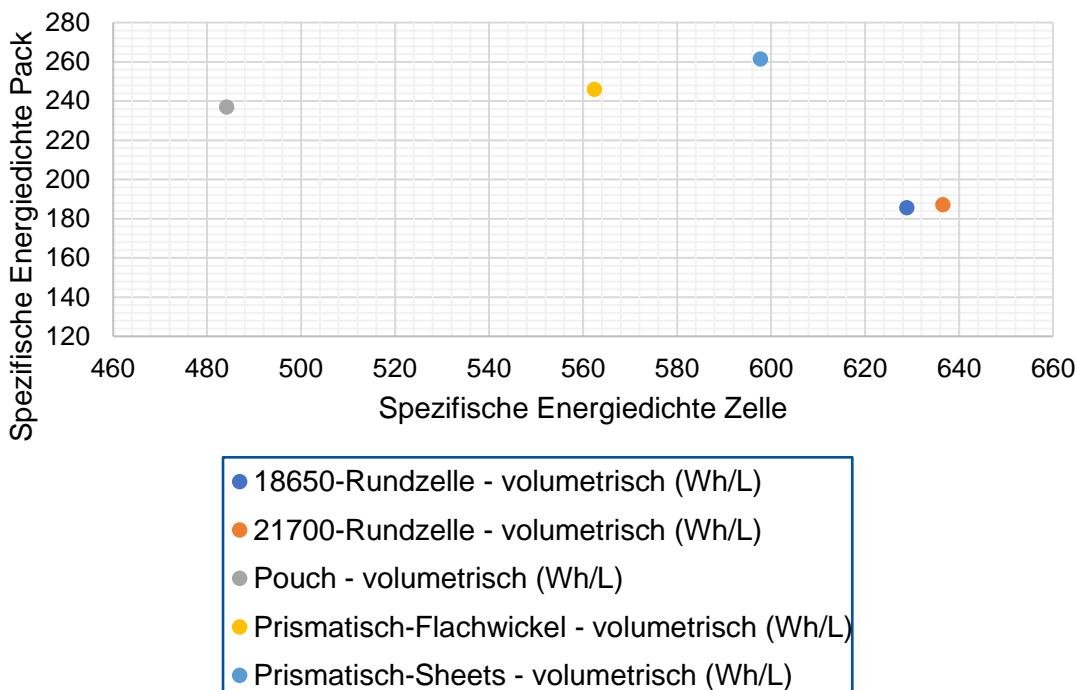
<sup>129</sup> Vgl. Löbberding et al. (From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types) 2020, S. 8.

**Tabelle 4.5: Vergleich des Effizienzindexes aus dem Tool mit Realdaten<sup>130</sup> - Zelle zu Pack**

	Rundzelle (Ø aus 18650 und 21700)	Refer- renz- werte	Pouchzelle	Prismati- sche Zelle (Flachwi- ckel)	Prismatische Zelle (Sheets)	Referenz- werte
Effizienzin- dex (gravi- metrisch) Zelle zu Pack	0,6212	0,552 – 0,672	0,7447	0,6957	0,7492	0,575 – 0,742
Effizienzin- dex (volu- metrisch) Zelle zu Pack	0,2946	0,295 – 0,356	0,4894	0,4375	0,4375	0,353 – 0,528

**Abbildung 4.3: Vergleich der spezifischen Energiedichte zwischen Zelle und Pack (gravimetrisch)**

<sup>130</sup> Vgl. Löbberding et al. (From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types) 2020, S. 8.



**Abbildung 4.4: Vergleich der spezifischen Energiedichte zwischen Zelle und Pack (volumetrisch)**

## 4.2 Anwendung der Methodik

In diesem Unterkapitel wird die Methodik des Zellauswahltools angewendet und demonstriert. Dabei wird für einen beliebigen Anwendungsfall der chronologische Ablauf der Methode beschrieben und die Schritte jeder Ebene erläutert. Die Ebenen in dem Auswahltool sind abhängig voneinander, da jede Ebene (ausgenommen der ersten Ebene) den Output der vorigen Ebene als Input benötigt. Als Anwendungsfall für die Demonstration der Methodik wird die Batteriepackauslegung des Batteriesystems mit Rundzellen ausgewählt, da im vorherigen Kapitel Ergebnisse auf Basis dessen vorgestellt wurden.

Zu Beginn der Methodik wird die Elektroden-Ebene betrachtet (siehe Abbildung 4.5). Die Farbe Blau kennzeichnet Eingabeparameter und die farblich rot markierten Werte zeigen die Ergebnisse der Berechnungen an. Hier wird die Zellchemie für die Anode und für die Kathode durch ein Dropdown-Menü ausgewählt. Des Weiteren werden mehrere Parameter definiert, welche frei wählbar für den Anwender sind. Zu diesem gehört die Flächenbeladung, die Zusammensetzung der Beschichtung und die Dicke der Ableiter sowie des Separators. In diesem Anwendungsfall wird eine Graphit-Anode und eine NCA-Kathode ausgewählt. Zudem wird die Flächenbeladung auf  $5 \text{ mAh/cm}^2$  gesetzt und die Massenanteile der Ableiterbeschichtung mit konventionellen Werten versehen. Das Ergebnis ist die Beschichtungsdicke der Anode, die der Kathode und zudem die Dicke des Elektroden-Stacks.

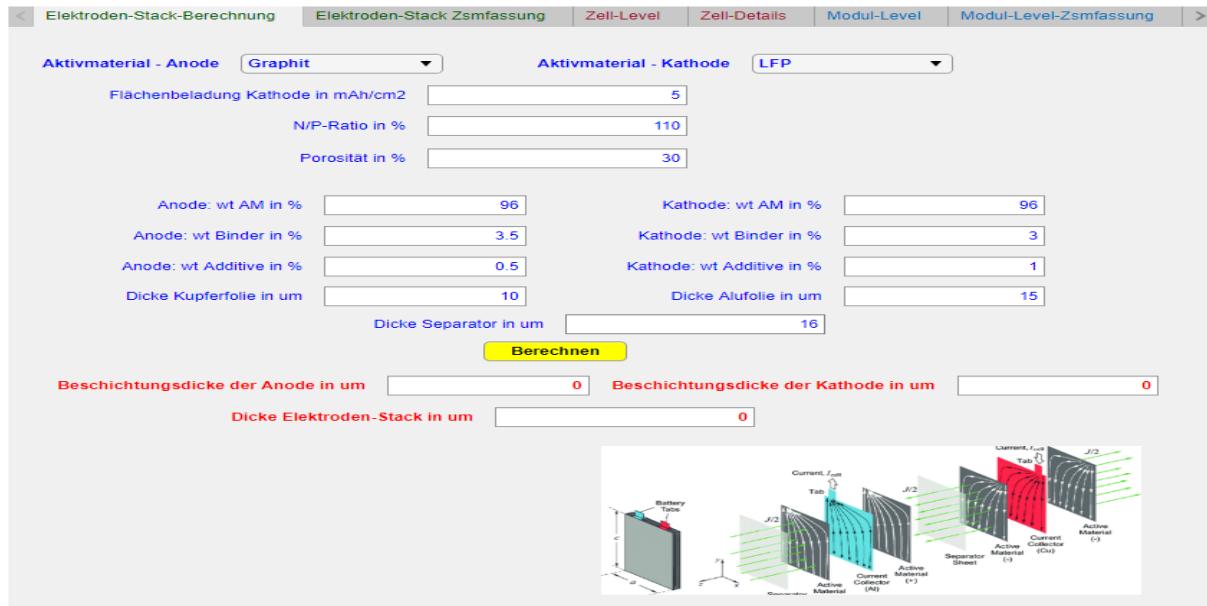


Abbildung 4.5: Anwendung des Auswahltools - Elektroden-Ebene

Die Ergebnisse der Berechnungen werden in dem Tool aus Gründen der Übersicht in separaten Tabellen zusammengefasst. Aus diesen können bei Bedarf die wichtigsten Daten, entnommen werden.

Der nächste Schritt der Methode ist die Berechnung der Eigenschaften der Zelle in Abhängigkeit des ausgewählten Zellformats. Dabei stehen drei Zellformate zur Auswahl, wobei die Rundzelle als 18650-Rundzelle oder als 21700-Rundzelle und die prismatische Zelle mit Flachwickel oder mit Elektroden-Sheets auswählbar ist. Die Abmaße der prismaticen Zelle und der Pouchzelle sind frei wählbar, sodass individuelle Zellen berechnet werden können. Die Ausgabe der Ebene sind die Zelldaten, zu welchen bspw. Kapazität, Normspannung und Masse gehören. Abbildung 4.6 zeigt das Userinterface der Zell-Ebene, in welchem blau markiert die Eingabe-Parameter gekennzeichnet sind und die Ergebnisse der Berechnungen in Rot angezeigt werden. Auch werden die Ergebnisse in gesonderten Tabellen dargestellt, um eine Übersicht bei mehreren Durchläufen zu gewährleisten. Somit können bspw. bei gleicher Zellchemie verschiedene Zellformate hinsichtlich ihrer Eigenschaften direkt miteinander verglichen werden.

Kapazität in Ah	Energie in Wh	Masse in g	Volumen in L
3.1646	11.3924	45.3665	0.017

**Abbildung 4.6: Anwendung des Auswahltools - Zell-Ebene**

Nachdem die Ergebnisse der Zell-Ebene berechnet wurden, kann das Modul ausgelegt und dessen Spezifikationen berechnet werden. In dem Tool wird die gewünschte Energiemenge des gesamten Energiespeichers vorgegeben sowie die Normspannung des Batteriepacks. Zusätzlich wird die gewünschte Anzahl an Modulen pro Pack, sowie das Nutzenfenster der Energiemenge des Batteriepacks vorgegeben. Die Ergebnisse sind die Abmaße des Batteriemoduls und dessen technischer Eigenschaften, welche mit dem zuvor ausgewählten Zellformat, bzw. der ausgewählten Zellchemie konstruiert wurden. In Abbildung 4.7 ist die Benutzeroberfläche für die Modul-Ebene dargestellt. Eine relevante Kenngröße in dieser Ebene ist das Verhältnis von prognostizierter Batteriepackenergie (durch die Vorgaben des Anwenders und der zuvor ausgewählten Zelle) zu gewünschter Energiemenge. Überschreitet diese Kenngröße den individuell einstellbaren Wert von 1,2, so wird ein Hinweis ausgegeben, welcher den Nutzer auf das hohe Verhältnis verweist und um Änderungen bittet. Dieser Wert ist provisorisch eingestellt und kann variabel, abhängig von den Präferenzen des Nutzers, geändert werden. Eine Erhöhung der Kenngröße entsteht bei einer notwendigen zusätzlichen Verschaltung (seriell oder parallel) von Zellen im Modul, um die Vorgaben des Anwenders einzuhalten. Es wird daraufhin ein Hinweis ausgegeben, welcher zwei Ursachen und die Lösungen dazu vorschlägt. Die erste Ursache ist ein geringes Kapazitätsdefizit, sodass eine weitere Zelle zusätzlich parallel verschaltet werden musste. Die Lösung dafür ist die Erhöhung der Zellkapazität durch Änderung der Zellchemie bzw. die durch die Erhöhung der Maße der Zelle (bei Pouchzellen oder prismatischen Zellen). Als Beispiel wird bei einer gewünschten Packenergie von 50 kWh und einer Batteriespannung von 365 Volt eine Kapazität von ca. 137 Ah benötigt, welche durch die eingebauten Zellen aufgebracht werden muss. Werden dann bspw. Zellen mit hohen Kapazitäten (z.B. prismatische Zellen) mit einer Kapazität von 100 Ah eingesetzt, so wird eine Parallelschaltung von zwei Zellen eine Kapazität von 200 Ah bewerkstelligen. Es wird somit trotz geringem Kapazitätsdefizit eine weitere Zelle parallel verschaltet, sodass es zu einem Überschuss an Kapazität kommt und die resultierende Gesamtenergie des Batteriepacks die gewünschte Energiemenge um ein Vielfaches überschreitet. Analog dazu, kann eine Überschreitung der erforderlichen Energiemenge ebenfalls durch den Versuch der Erfüllung der

Spannungsanforderung resultieren. Dabei ist bspw. die Mindestanzahl an seriellen Zellen eine gebrochene Zahl, welche dann, aufgrund von Absicherung zur sicheren Seite, zu einer ganzen Zahl aufgerundet wird. Eine solche voraussichtlich resultierende Erhöhung der Packenergie wird von dem Tool mit dem Hinweis auf Änderung der eingesetzten Zelle, oder Änderungen der Vorgaben des Anwenders an das Batteriesystem behoben. Die zweite Ursache ist der Überschuss an Kapazität durch eine einzige Zelle (bspw. bei geringem Kapazitätsbedarf der Anwendung), sodass es zu einem Überschuss an Energie im Pack kommt. Die Lösung dazu ist die Verringerung der Zellkapazität durch Änderung der Zellchemie oder Verringerung der Zellmaße (Pouchzelle und prismatische Zelle). Zusätzlich wird als Hilfestellung im Hinweis - im Falle einer Überschreitung der Kennzahl - die minimal benötigte Kapazität angezeigt, welche für die Realisierung des Packs notwendig ist. Mit dieser Information können nun Parameter in der Elektroden-, bzw. Zell-Ebene angepasst werden, bis die Kapazität der Zelle der benötigten Kapazität ähnelt.

Berechnungen (Modul-Level)	
Gewünschte Energiemenge in Wh	8.5e+04
Gewünschte Normspannung in V	365
Anzahl Module pro Pack	16
Nutzbereich der Gesamtenergie in %	100
<b>Berechnen</b>	
Zellen im Modul Gesamt	518
Zellen im Modul Parallel	74
Zellen im Modul Seriell	7
Modul-Normspannung in V	25.2
Modul-Kapazität in Ah	234.2
Modul-Volumen in Liter	14.18
Modul-Gewicht in kg	31.37
Modul-Länge in mm	142
Modul-Höhe in mm	84.2
Modul-Tiefe in mm	1186
Modul-Energie in Wh	5901
Modul e_grav in Wh/kg	188.1
Modul e_vol in Wh/L	416.3
E_Pack_ges/E_Erf	1.111
<b>Hinweis:</b> Anzahl mind. seriell zu verschaltender Zellen: 6.375. Aufgerundet zur nächst größeren ganzen Zahl.	

Abbildung 4.7: Anwendung des Auswahltools - Modul-Ebene

In Abbildung 4.8 ist die Pack-Ebene aus dem Auswahltool zu sehen. Nachdem die Ergebnisse der Modul-Ebene feststehen, können die Berechnungen auf der Pack-Ebene gestartet werden. Hierzu werden die geometrischen Rahmenbedingungen für das Batteriepack als Eingabe gefordert, aus welchen die Realisierbarkeit mehrerer Anordnungen der Module in Pack bestimmt und angezeigt wird. Der Hinweis dieser Ebene weist darauf hin, ob die Anzahl an gewünschten Modulen im Batteriepack geometrisch bedingt in den vorgegebenen Bauraum passt. Dies wird als notwendige Bedingung bezeichnet und muss für eine theoretische Realisierbarkeit mindestens erfüllt sein. Ist dies erfüllt, sowie auch die Randbedingung bezüglich des Bauraums, wird die jeweilige Anordnung als „realisierbar“ kategorisiert. Die technischen Daten der resultierenden Anordnungen werden im darauffolgenden Tab zusammenfassend und tabellarisch aufgelistet.

**Abbildung 4.8: Anwendung des Auswahltools - Pack-Ebene**

Im letzten Schritt der Methodik des Zellauswahltools findet eine Bewertung der konfigurierten Batteriepacks mittels der TOPSIS-Methode statt (siehe Abbildung 4.9). Der erste Schritt besteht darin, die zuvor berechneten realisierbaren Packs anzeigen und tabellarisch auflisten zu lassen. Bei mehreren Durchläufen der Methode vor der Auswahl-Ebene kommt es ggf. zu mehreren realisierbaren Batteriepack-Konfigurationen, welche in der Tabelle angezeigt werden. Nachdem die realisierbaren Packs aufgelistet worden sind, können diese nach der TOPSIS-Methode bewertet werden. Dafür müssen zunächst Gewichtungen vom Anwender für die vorliegenden Kriterien angegeben werden. Dies erfolgt im Tool mittels eines Reglers, welcher zwischen einem Wertebereich von 0 (niedrigste Relevanz) bis 1 (höchste Relevanz) bewegt werden kann. Nachdem die Kriterien individuell gewichtet worden sind, kann die Berechnung der Bewertung der Batteriepacks gestartet werden. Als Resultat wird ein Effizienzwert ausgegeben, welcher in Abhängigkeit seiner Höhe, die zuvor aufgelisteten Konfigurationen bewertet. Die Konfiguration mit dem höchsten Effizienzwert stellt in Abhängigkeit der individuellen Präferenzen die optimale Lösung dar. Die Gewichtung kann außerdem mehrmals variiert werden, sodass die optimale Lösung für verschiedene Präferenzen berechnet werden kann.

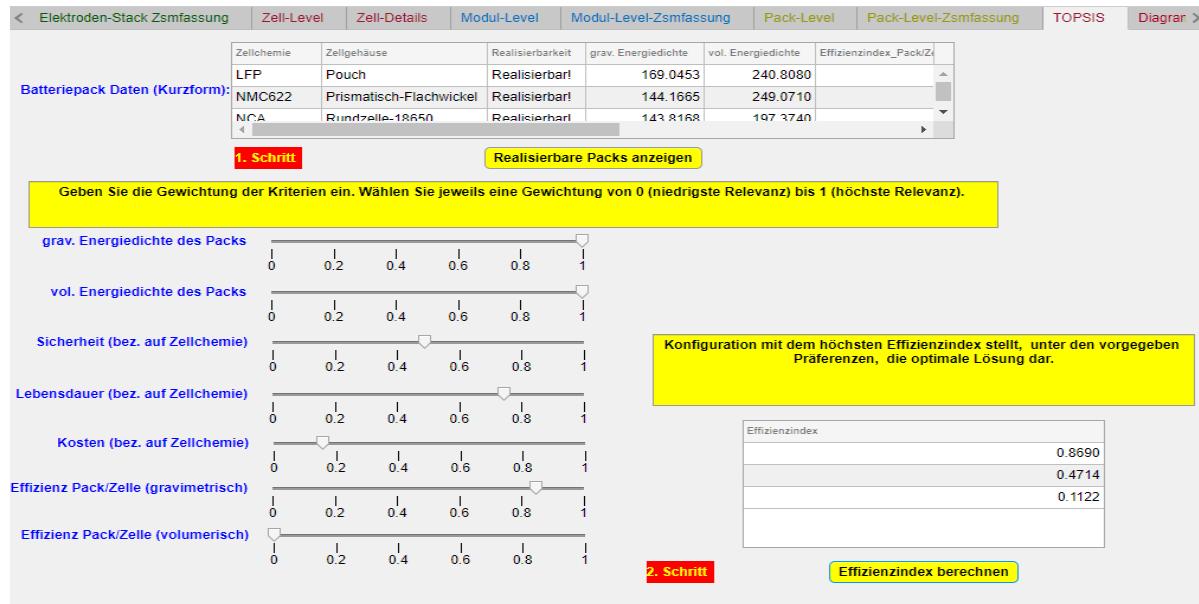


Abbildung 4.9: Anwendung des Auswahltools - Auswahl-Ebene

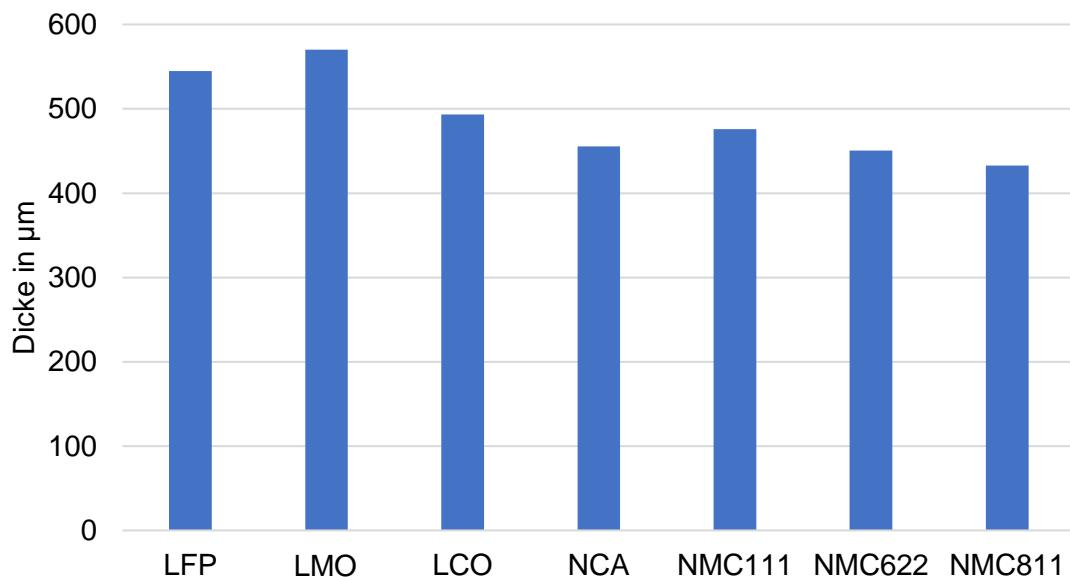
### 4.3 Analyse der Ergebnisse des Tools

In diesem Unterkapitel werden verschiedene Berechnungen mithilfe des Tools durchgeführt und daraufhin die Ergebnisse analysiert. Zu Beginn werden die Ergebnisse auf Elektroden-Ebene betrachtet. Daraufhin werden die Ergebnisse aus der Zell-Ebene analysiert, wobei zunächst eine Variation des Zellformates bei identischer Zellchemie durchgeführt wird. Des Weiteren werden die Ergebnisse für eine Variation der Zellchemie bei gleichbleibendem Zellformat analysiert. Nachdem jeweils die Variation von Zellformat und Zellchemie erfolgt ist, wird das Ergebnis der Kombination der Variation von Zellchemie und Zellformat untersucht. Zum Ende werden mehrere Batteriepacks berechnet und mithilfe der Auswahl-Ebene bewertet.

#### 4.3.1 Elektroden-Stack-Dicke bei unterschiedlichen Kathodenmaterialien

Zu Beginn der Analyse auf der Zell-Ebene werden die Ergebnisse der Berechnung des Elektroden-Stacks für verschiedene Kathodenmaterialien untersucht. Die Elektroden-Stack-Dicke ist für die Variation des Kathodenmaterials bei identischem Anodenmaterial, identischer Zusammensetzung der Beschichtung (Massenanteil des Aktivmaterials, des Binders, der Additive), identischer Ableiter- sowie Separatordicke und Porosität der Elektroden in Abbildung 4.10 abgebildet. Deutlich wird, dass die Elektroden-Stack-Dicke bei einer LNMO-Kathode und LFP-Kathode die höchsten Werte aufweist. Die Dicke des Elektroden-Stacks ist für NMC811 am geringsten mit knapp über 400 µm. Mit den restlichen Zellchemien wird durchschnittlich eine Dicke von 450 µm erzielt. Diese Änderungen der Dicke kommen durch den Unterschied in der kristallografischen Dichte der Zellchemie zustande. Die Dicke des Elektroden-Stacks bestimmt die Menge an Elektrodenmaterial, welche in das Zellgehäuse integriert werden kann. Ergibt sich eine hohe Dicke des Stacks, so führt dies bspw. zu einer geringeren Windungszahl bei der Konstruktion der Jelly-Roll unter gegebenen konstruktiven Randbedingungen. Es kann

somit weniger Aktivmaterial in das Zellgehäuse intergeriert werden, sodass dies neben technischen Eigenschaften wie der spezifischen Kapazität des Aktivmaterials Einfluss auf die Kapazität der Zelle hat.



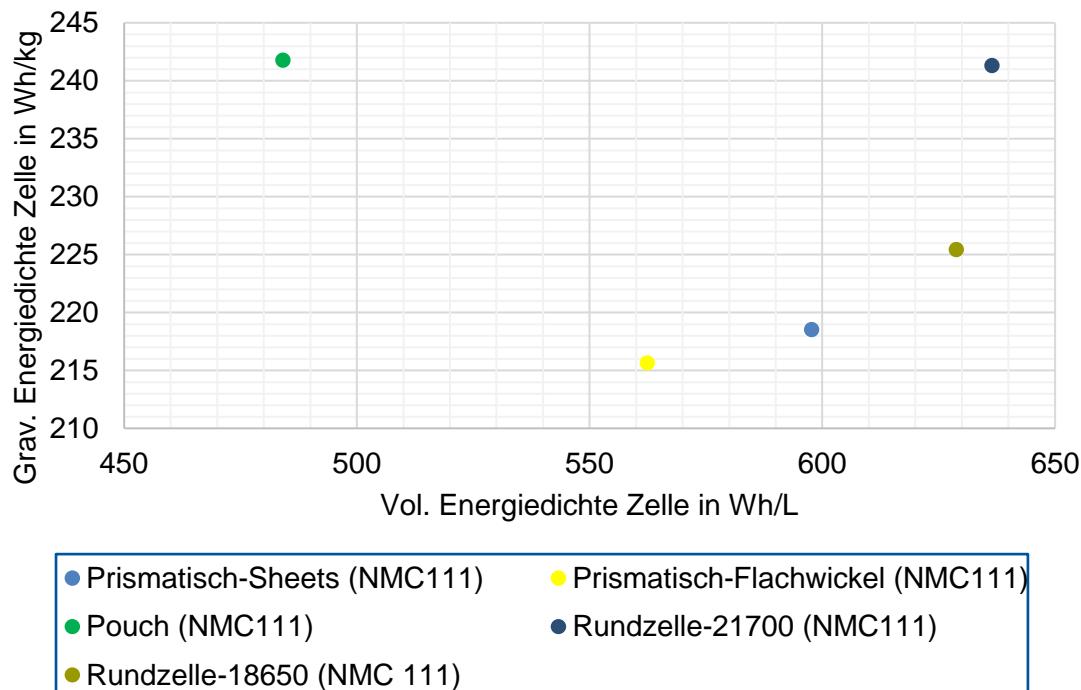
**Abbildung 4.10: Elektroden-Stack-Dicke von verschiedenen Kathodenmaterialien (mit Graphit-Anode) bei identischer Zusammensetzung der Elektroden**

### 4.3.2 Vergleich unterschiedlicher Zellformate bei identischer Zellchemie

In Abbildung 4.11 ist die volumetrische Energiedichte über der gravimetrischen Energiedichte für verschiedene Zellformate graphisch dargestellt. Dabei wurde die Zellchemie für alle Zellformate identisch gehalten, sodass ein direkter Vergleich der Zellformate möglich wird. Betrachtet man die gravimetrische Energiedichte, so wird deutlich, dass Rundzellen gegenüber der Pouchzelle und der prismatischen Zelle, die höchsten Werte (über 600 Wh/kg) aufweisen. Dies liegt an der kompakten Bauweise einer Rundzelle, welche durch die Wickelung der Elektroden zu einer zylindrischen Rolle entsteht. Nach den Rundzellen stellen die prismatischen Zellen die Gruppe der Zellformate mit der zweithöchsten gravimetrischen Energiedichte zwischen 550 Wh/L und 600 Wh/L dar. Dabei hat die Ausführungsform der prismatischen Zelle einen Einfluss auf die volumetrische Energiedichte. Eine prismatische Zelle mit Elektroden-Sheets enthält mehr Elektrodenmaterial bei gleichem Volumen als eine Ausführung mit Flachwickel. Als Resultat lassen sich höhere Energien bei gleichem Zellvolumen realisieren, sodass eine Optimierung der volumetrischen Energiedichte der prismatischen Zelle, bei vorliegenden Randbedingungen von ca. 6,28 % entsteht. Das Zellformat mit der niedrigsten volumetrischen Energiedichte ist die Pouchzelle. Diese weist im vorliegenden Falle eine Energiedichte von unter 500 Wh/L auf. Begründet liegt dies in der Konstruktion der Pouchzelle, da diese eine Siegelnhaft aufweist, welche die volumetrische Energiedichte beeinflusst. Zudem werden die Ableiterfahnen geringfügig in die Berechnung des Zellvolumens berücksichtigt, welche nichtsdestotrotz die volumetrische Energiedichte der Zelle beeinflusst. Die volumetrische Energiedichte der Pouchzelle lässt sich somit abhängig von der Parametrisierung in dem Modell ver-

bessern bzw. verschlechtern. Es steht dem Anwender jedoch frei, den konstruktiven Rahmenbedingungen zu Folge, die Parametrisierung anzupassen und die zu produzierende Pouchzelle in dem Tool abzubilden.

Nun werden die Ergebnisse für die gravimetrische Energiedichte analysiert. Die gravimetrische Energiedichte der Pouchzelle weist den höchsten Wert in dem betrachteten Diagramm auf. Dies liegt in der geringen Masse der Verpackung der Pouchzelle begründet, welche die Gesamtmasse und damit die Energiedichte nicht maßgeblich beeinflusst. Rundzellen weisen aufgrund der Kompaktheit teilweise ähnliche und wenig geringere Werte für die Energiedichte auf. Das Zellformat mit der vergleichbar niedrigsten Energiedichte, ist die prismatische Zelle, welche aufgrund ihres robusten Gehäuses ein höheres Gewicht als bspw. eine Pouchzelle besitzt. Aus rein spezifisch-energetischer Betrachtung bietet es sich somit an Rundzellen, aufgrund ihrer günstigen Energiedichten auszuwählen. Im Falle einer robusten Zelle wird jedoch die Auswahl einer prismatischen Zelle empfohlen, und kostenspezifisch die Auswahl einer Pouchzelle. Die finale Auswahl der Zelle kann jedoch erst nach der Berechnung der Batteriepack-Daten mit einem der dargestellten Zellformate erfolgen, da sich die Eigenschaften des Batteriepacks in Abhängigkeit der eingesetzten Zelle unterscheiden. Dieser Schritt wird mithilfe des Tools in der Auswahl-Ebene vollzogen, womit sich der Vorschlag der tatsächlich optimalen Zelle – in Anbetracht anwendungsspezifischer Randbedingungen – berechnen lässt.

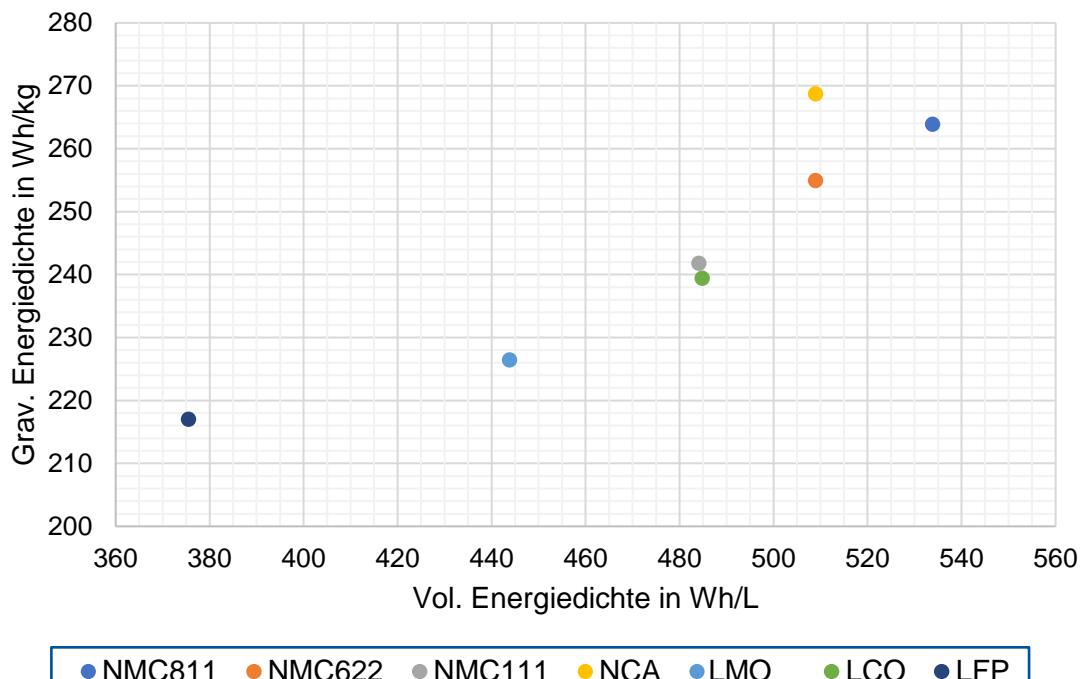


**Abbildung 4.11: Vergleich der spezifischen Energiedichte verschiedener Zellformate mit identischer Zellchemie**

### 4.3.3 Vergleich eines Zellformats bei unterschiedlicher Zellchemie

Nun wird der Einfluss der Variation der Zellchemie bei gleichbleibendem Zellformat betrachtet und analysiert. Dazu werden die Ergebnisse aus dem entwickelten Tool in Abbildung 4.12 grafisch dargestellt. Zu sehen ist die gravimetrische Energiedichte über der volumetrischen

Energiedichte für eine Pouchzelle, welche mit unterschiedlicher Zellchemie konstruiert ist. Dabei wurde lediglich die Zellchemie variiert und die Maße der Pouchzelle für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse konstant gehalten. Wie nach Kapitel 2.2.1 zu erwarten, weisen die Pouchzelle mit NMC811, NMC622 und NCA die höchsten Werte für die gravimetrische und volumetrische Energiedichte auf. Gefolgt von einer Pouchzelle mit NMC111-, oder LCO als Zellchemie, deren spezifische Energiedichte sich ähneln. Die Pouchzelle mit LNMO- und LFP-Zellchemie zeigt im Vergleich zu den restlichen Zellen erwartungsgemäß geringe spezifische Energiedichten auf. Es wird somit empfohlen, ein Kathodenmaterial auf NMC-Basis auszuwählen, da diese Zellchemie die höchsten Energiedichten hervorbringt. Werden jedoch weitere Faktoren wie Kosten miteinbezogen, so bietet sich trotz geringer energetischer Werte eine Zelle mit LFP-Zellchemie an. Zu beachten ist zudem, dass für die finale Auswahl der optimalen Zelle das Zellformat relevant ist. So bieten bspw. prismatische Zellen eine hohe Robustheit und einen hohen Effizienzindex, welcher sich positiv auf die Eigenschaften des Batteriepacks auswirkt. Im nachfolgenden Unterkapitel wird folglich die Variation des Zellformats und der Zellchemie untersucht.



**Abbildung 4.12: Vergleich der spezifischen Energiedichte einer Pouchzelle mit unterschiedlichen Zellchemie**

#### 4.3.4 Kombination von Variation von Zellchemie und Zellformat

Die Kombination der Variation von Zellchemie und Zellformat ist in Abbildung 4.13 dargestellt. In dieser Abbildung ist die gravimetrische und volumetrische Energiedichte der Zellformate für zwei verschiedene Zellchemien dargestellt. Zu sehen ist die Fischhaken-Kurve aus Abbildung 4.11, welche durch die Variation der Zellformate zustande kommen. Zudem ist die Variation der Zellchemie durch eine Verschiebung dieser Kurve ersichtlich. Aus rein energetischer Sicht ist ein Bereich weit rechts und weit oben in dem Diagramm zu erstreben. So ist bspw. die Rundzelle mit der Zellchemie NMC111 bevorzugt auszuwählen, als eine prismatische Zelle

mit Sheets mit LFP als Zellchemie. Jedoch ist dies lediglich eine Betrachtung mit den Präferenzen, eine Zelle mit möglichst hoher gravimetrische- und volumetrischer Energiedichte zu einzusetzen. Werden weitere Kriterien herangezogen, wie etwa die Robustheit des Gehäuses oder die auf die Zellchemie bezogenen Kosten, so kann bspw. die prismatische Zelle mit LFP bevorzugt zur Pouchzelle zum Einsatz ausgewählt werden. Für eine anwendungsspezifische Aussage über eine optimale Lösung muss jedoch eine Betrachtung auf der Batteriepack-Ebene stattfinden, da sich die technischen Eigenschaften eines Batteriepacks durch den modularen Verbau der Zellen ändern. Beispielsweise wird dafür der zuvor eingeführte Effizienzindex betrachtet. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich daher mit der Analyse verschiedener berechneter Batteriepack-Konfigurationen.

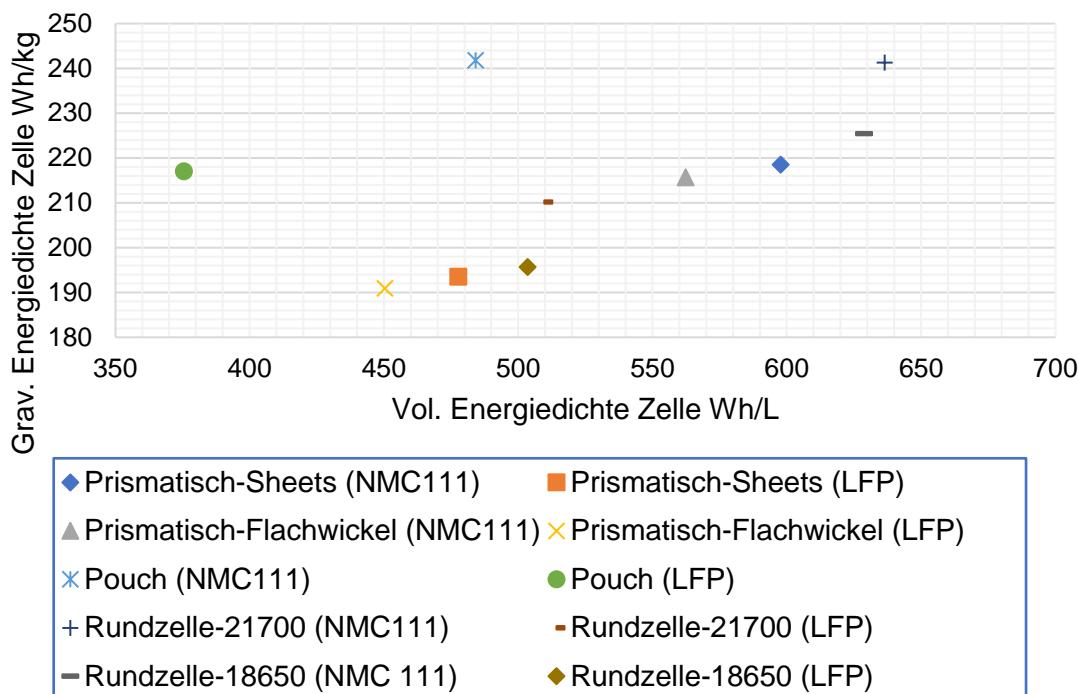


Abbildung 4.13: Spezifische Energiedichte bei Variation des Zellformates und der Zellchemie

### 4.3.5 Analyse berechneter Batteriepack-Konfigurationen

Batteriepacks mit Zellen unterschiedlichen Zellformats bei gleicher Zellchemie

Nachdem zuvor der Vergleich von unterschiedlichen Zellen durchgeführt wurde, wird nun der Vergleich auf der System-Ebene vollzogen. Zunächst werden dafür mittels des Tools verschiedene Batteriepacks konfiguriert und berechnet. Für eine Vergleichbarkeit wird zunächst lediglich das Zellgehäuse bei identischer Zellchemie variiert. Die Anzahl an Modulen pro Batteriepack (zehn Module pro Pack) wurde für alle Konfigurationen konstant gehalten. Außerdem wurden die anwendungsspezifischen Randbedingungen (Spannung von 420 Volt und Packenergie von 32 kWh) für die Batteriepacks nicht verändert. In Tabelle 4.6 ist eine Kurzfassung der relevanten berechneten Daten der Batteriepacks zu sehen. Deutlich wird zunächst, dass bei rein energetischer Betrachtung die Konfiguration mit Rundzellen nicht mehr die optimale Lösung darstellt, wie in Kapitel 4.3.4 bei der Betrachtung auf der Zell-Ebene ausgesagt wurde.

**Tabelle 4.6: Vergleich berechneter Batteriepacks mit unterschiedlichem Zellgehäuse und gleicher Zellchemie**

Zellchemie	Zellgehäuse	Verschal-tung Zellen im Modul	Verschal-tung Mo-dule im Pack	Grav. Ener-giedichte	Vol. Ener-giedichte	Alten-ra-tive
LFP	Prismatisch (Sheets)	13s1p	10	130,88	202,67	A1
LFP	Prismatisch (Flachwi-ckel)	13s1p	10	120,14	190,81	A2
LFP	Pouch	13s1p	10	144,87	185,99	A3
LFP	21700-Rundzelle	13s20p	10	121,35	153,28	A4
LFP	18650-Rundzelle	13s28p	10	114,78	152,83	A5

Die Aufgabe besteht nun darin, die optimale Konfiguration auszuwählen. Dafür wird die Auswahl-Ebene herangezogen, welche ein Ranking in Abhängigkeit vorgegebener Präferenzen ermöglicht. Die Batteriepack-Konfigurationen aus Tabelle 4.6 werden für die Analyse auf der Auswahl-Ebene nun als „Alternative“ bezeichnet, um eine bessere Übersicht zu bewahren. Im Folgenden wird die Rangfolge der Alternativen in der Abhängigkeit ausgewählter Präferenzen erstellt. Dabei wird die Gewichtung einer Präferenz zu eins (höchster Wert) gesetzt und die restlichen Präferenzen zu null (keine Relevanz). Zudem wird das Ergebnis der Auswahl-Ebene bei Kombination aller angezeigten Kriterien (jeweils höchste Gewichtung) dargestellt. Die Kriterien, welche sich auf die Zellchemie beziehen, wurden aufgrund gleicher Zellchemie nicht einbezogen. Die Ergebnisse der Auswahl-Ebene werden im Folgenden in Tabelle 4.7 dargestellt, wobei der erste Rang die optimale Alternative darstellt und der fünfte Rang die schlechteste Alternative:

**Tabelle 4.7: Bewertung berechneter Batteriepacks nach TOPSIS in der Auswahl-Ebene nach unterschiedlichen Präferenzen**

Rang	Grav. Ener-giedichte	Vol. Energie-dichte	Effizienzindex (grav.)	Effizienzindex (vol.)	Kombination
1	A3	A1	A1	A3	A3
2	A1	A2	A3	A2	A1
3	A4	A3	A2	A1	A2
4	A2	A4	A4	A5	A4
5	A5	A5	A5	A4	A5

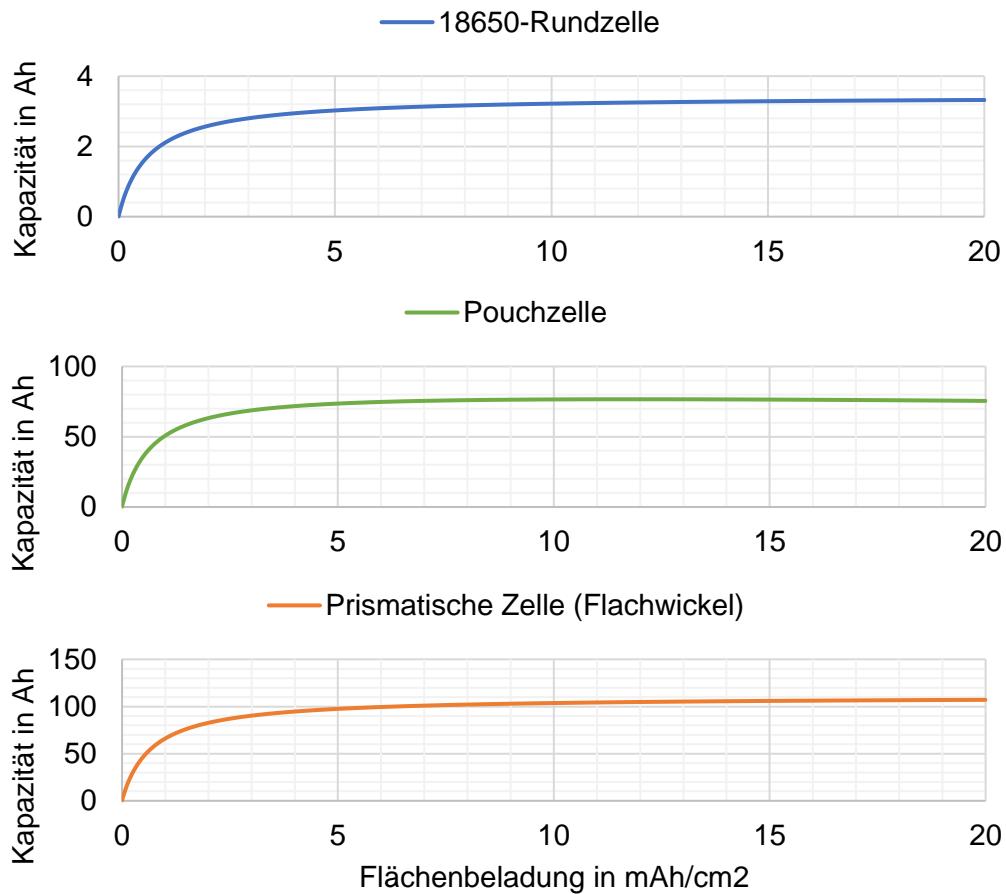
Wie aus vorausgegangener Tabelle ersichtlich, ist das optimale Batteriesystem abhängig von den vorgegebenen Präferenzen des Anwenders. Wird die gravimetrische Energiedichten aus dem Grund ein möglichst geringes Gewicht bei hoher Energie einzusetzen zu wollen, ist unter Vernachlässigung aller anderen Kriterien Alternative 3 auszuwählen. Wird die Präferenz hinsichtlich der Effizienz beim Weiterverarbeiten der Zelle zum Batteriepack gelegt, so ist Alternative 1 (gravimetrische Betrachtung) oder Alternative 3 (volumetrische Betrachtung) das optimale Batteriesystem für den Anwendungsfall. Bei Kombination der betrachteten Kriterien bietet Alternative 3 die optimalen Eigenschaften, in Abhängigkeit der eingestellten Präferenzen. Zu beachten ist, dass die Gewichtungen in diesem Beispiel nur auf Maximalwerte gesetzt wurde (0 oder 1), jedoch aber auch auf Werte zwischen 0 oder 1 gesetzt werden können.

## 4.4 Sensibilitätsanalyse

In diesem Unterkapitel wird eine Sensibilitätsanalyse des entwickelten Tools durchgeführt. Ziel einer solchen Analyse ist es, die Empfindlichkeit der Ergebnisse bei Variation von Eingabeparametern zu bestimmen. Zunächst wird in diesem Unterkapitel der Einfluss der Variation von Parametern auf die resultierenden Ergebnisse der Elektroden-Ebene betrachtet. Des Weiteren wird die Variation von konstruktiven Parametern auf der Zell-Ebene, für drei Zellformate analysiert. Im Anschluss wird der Einfluss der Änderung der Präferenzen in der Auswahl-Ebene betrachtet, die Ergebnisse diskutiert.

### 4.4.1 Variation in der Elektroden-Ebene

Zunächst wird die Variation der Flächenbeladung der Kathode betrachtet. Die Flächenbeladung ist in dem entwickelten Tool ein Eingabeparameter, welcher in der Elektroden-Ebene frei einstellbar ist. Mit diesem Eingabeparameter lässt sich die resultierende Kapazität der Zellen beeinflussen, sodass eine genauere Betrachtung des Einflusses dieses Parameters durchgeführt wird. Dafür wird die Flächenbeladung der Kathode stetig bis zu  $20 \text{ mAh/cm}^2$  erhöht und der Einfluss auf die Ergebnisse der Kapazität von Rundzelle, Pouchzelle und prismatischer Zelle betrachtet. Die Rezeptur, bzw. die Zusammensetzung der Elektroden bleibt dabei konstant. Es ändert sich somit lediglich die Flächenbeladung, sodass der alleinige Einfluss deren untersucht werden kann. In Abbildung 4.14 ist die Kapazität über der Flächenbeladung aller drei Zellformate dargestellt. Deutlich wird, dass die Kapazität bei Erhöhung der Flächenbeladung einen degressiven Verlauf annimmt. Es ist somit nicht sinnvoll, die Flächenbeladung möglichst zu erhöhen, falls höhere Kapazitäten erwünscht sind.



**Abbildung 4.14: Einfluss der Flächenbeladung der Kathode auf die Kapazität von Rundzelle, Pouchzelle und prismatischer Zelle**

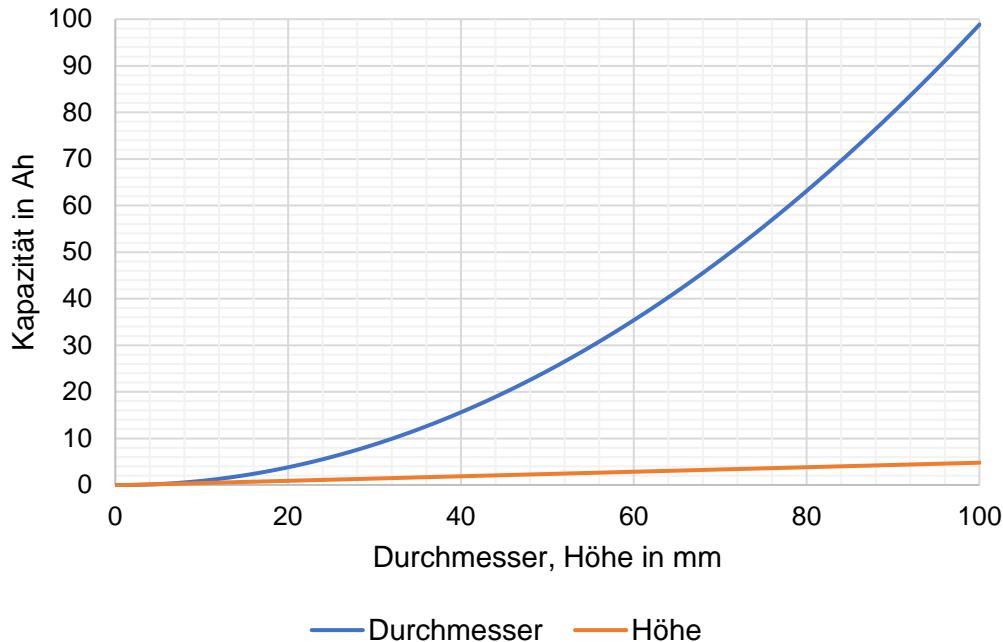
#### 4.4.2 Variation konstruktiver Parameter im Modell

##### Rundzelle

Da die 18650-Rundzelle bzw. die 21700-Rundzelle, Normzellen sind, ist der Durchmesser und die Höhe dieser Zellen festgelegt. Nichtsdestotrotz wird hier eine Untersuchung der Änderung der konstruktiven Parameter einer Rundzelle untersucht, um bei Bedarf individuelle Rundzellen optimal auslegen zu können. Abbildung 4.15 zeigt den Einfluss der Änderung des Durchmessers und der Höhe auf die Kapazität einer Rundzelle. Dabei wird bei Variation des Durchmessers die Höhe konstant gehalten und umgekehrt bei Änderung der Höhe der Durchmesser konstant gehalten. Es wird deutlich, dass eine Erhöhung des Durchmessers eine größere Änderungsrate der Kapazität der Zelle bewirkt als die Änderung der Höhe. Dies liegt in der Konstruktion der Jelly-Roll begründet, da diese bei größerem Durchmesser in der Windungszahl und dem Umfang steigt, sodass mehr Aktivmaterial in die Zelle integriert werden kann als bei linearer Erhöhung der Höhe. Es bietet sich somit an, eine Rundzelle mit großem Durchmesser zu konstruieren, anstatt die Höhe der Zelle zu vergrößern.

Dies ist zudem anhand der im Jahr 2020 neu vorgestellten Rundzelle von Tesla zu sehen. Die präsentierte Rundzelle erfuhr - verglichen zum Vorgänger (21700-Rundzelle) - einen größeren Zuwachs im Durchmesser als in der Höhe. Mit der neuen 4680-Rundzelle von Tesla, wurde

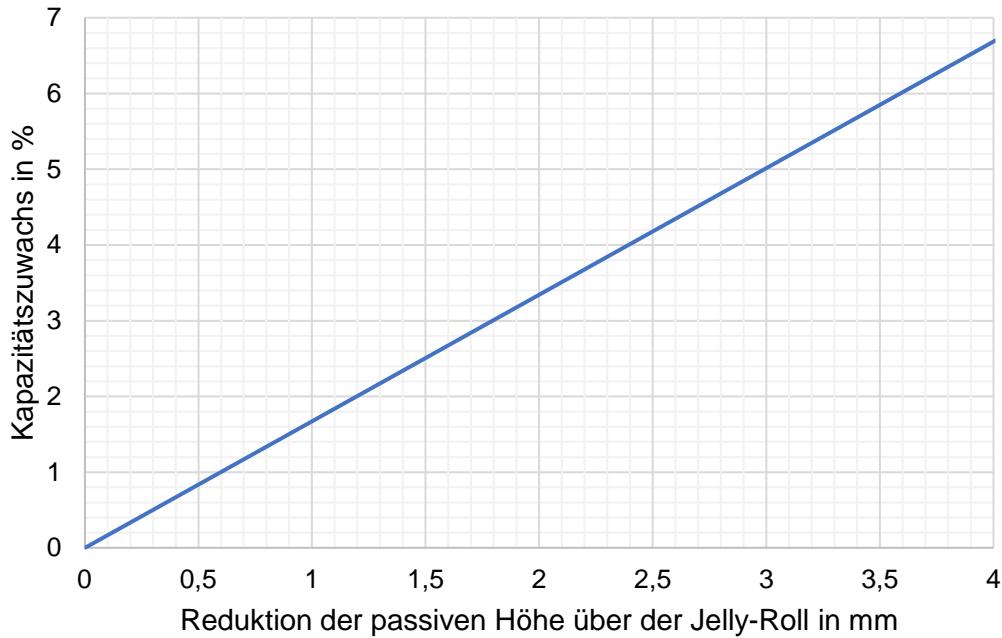
der Durchmesser im Vergleich zum Vorgänger um ca. 119 % erhöht, während die Höhe um ca. 14 % gestiegen ist.<sup>131</sup>



**Abbildung 4.15: Einfluss der Variation von Durchmesser (bei konstanter Höhe) und Höhe (bei konstantem Durchmesser) auf die Zellkapazität einer Rundzelle**

Neben dem Durchmesser und der Höhe wird nun in Abbildung 4.3 der Einfluss der leeren Höhe über der Jelly-Roll in dem Modell der Rundzelle betrachtet. Hierzu wurde der Kapazitätszuwachs der modellierten Rundzelle über der Reduktion der passiven leeren Höhe über der Jelly-Roll innerhalb des Gehäuses aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass die Reduktion, der nicht genutzten Höhe über der Jelly-Roll, einen linearen Zuwachs an Kapazität von bis zu 8 % bei Reduktion der passiven Höhe von 5 mm bewirkt.

<sup>131</sup> Vgl. electrive.net (Battery Day: Tesla zeigt neue 4680-Batteriezelle - electrive.net) 2020.



**Abbildung 4.16: Kapazitätszuwachs der modellierten Rundzelle bei Reduktion der passiven Höhe über der Jelly-Roll im Zellgehäuse**

#### 4.4.3 Variation der Gewichtung in der Auswahl-Ebene

Nun wird eine Sensibilitätsanalyse der Variation der Gewichtung durchgeführt. Diese wird mit verschiedenen mittels des Tools konfigurierten Batteriepacks durchgeführt, welche sich in der Zellchemie und dem Zellgehäuse willkürlich unterscheiden. Bei der Variation der Zellchemien wurde lediglich das Kathodenmaterial bei gleichbleibender Zusammensetzung der Beschichtung (Massenanteil des Aktivmaterials, des Binders und der Additive) bei identischer Flächenbeladung von  $5 \text{ Ah/cm}^2$  variiert. Die anwendungsspezifischen Anforderungen sind während der Berechnungen der Batteriepacks wie folgt festgelegt worden:

- Gewünschte Gesamtenergie: 33 kWh
- Gewünschte Normspannung: 420 V
- Gewünschte Anzahl an Modulen pro Pack: 10
- Nutzbereich der Gesamtenergie: 100%

Die Sensibilitätsanalyse wird beispielhaft für vier Kriterien durchgeführt und graphisch dargestellt: Die gravimetrische Energiedichte, die volumetrische Energiedichte, der Effizienzindex (Zelle zu Pack) bezüglich der gravimetrischen Energiedichte und der Effizienzindex (Zelle zu Pack) bezüglich der volumetrischen Energiedichte. Die relevanten Kennzahlen der berechneten Batteriepack-Konfigurationen sind in folgender Tabelle 4.8 zusammenfassend dargestellt. Zudem werden die Konfigurationen als Alternativen (A) bezeichnet und die Eigenschaften als Kriterien (K) definiert, um die Übersicht zu bewahren.

**Tabelle 4.8: Relevante Kennzahlen berechneter Batteriepack-Konfigurationen für die Auswahl-Ebene**

			K1	K2	K3	K4
Alternative	Zellchemie	Zellge-häuse	Grav. Energiedichte	Vol. Energiedichte	Effizienzindex (grav.)	Effizienzindex (vol.)
A1	NMC111	Prismatisch (Sheets)	149,0592	253,5117	0,6839	0,4273
A2	NMC811	Prismatisch (Flachwickel)	149,2110	255,5726	0,6311	0,4273
A3	NCA	Rundzelle – 21700	152,5966	198,0043	0,5645	0,2977
A4	LCO	Pouch	162,5328	232,0830	0,6765	0,4752

In Abbildung 4.17 sind die Ergebnisse der Auswahl-Ebene bei Variation der Gewichtung der zuvor genannten Kriterien grafisch dargestellt. In dem vorliegenden Diagramm ist der Effizienzwert nach der TOPSIS-Methode über dem Wert der Gewichtung verschiedener Kriterien dargestellt. Dabei wurde für die Analyse zunächst die Gewichtung eines Kriteriums auf den Wert 1 gesetzt, während die restlichen Kriterien mit dem Wert 0 gewichtet wurden. Daraufhin wird ein zusätzliches Kriterium hinzugefügt und der Wert der Gewichtung schrittweise erhöht. Wurde die höchste Gewichtung des jeweiligen Kriteriums erreicht, so wird das nächste Kriterium miteinbezogen und der Wert der Gewichtung erneut schrittweise erhöht. Am Ende dieses Vorgangs liegt der Effizienzwert aller Alternativen bei gleichwertiger Gewichtung aller genutzten Kriterien vor, sodass die optimale Alternative ermittelt werden kann.

Das zuvor erläuterte Vorgehen wird genauer erläutert. Zu Beginn wird die gravimetrische Energiedichte (Kriterium K1) mit der höchsten Gewichtung (restliche Kriterien mit 0 gewichtet) versehen, sodass sich in Abbildung 4.17 zum Startzeitpunkt ein Ranking, lediglich in Abhängigkeit von Kriterium K1, ablesen lässt. Der obigen Tabelle 4.8 gemäß, ist bei Betrachtung der gravimetrischen Energiedichte Alternative A4 die optimale Lösung, gefolgt von Alternative A3, A2 und A1. Dies ist auch in Abbildung 4.17 ersichtlich, da lediglich ein einziges Kriterium (K1) für die Bewertung betrachtet wurde. Somit ist vom Anwender bei einer alleinigen Betrachtung des Kriteriums K1 Alternative A4 für die Anwendung auszuwählen.

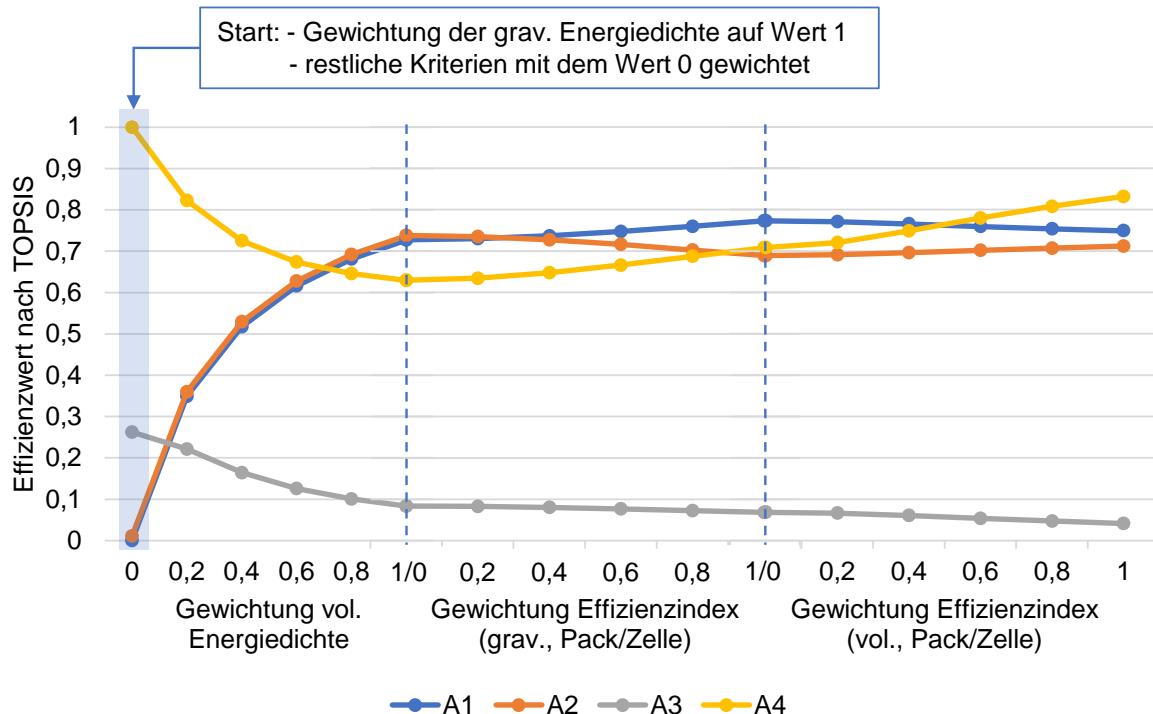
Nun wird zusätzlich zum Kriterium K1 das Kriterium K2 in der Ermittlung der optimalen Alternative betrachtet. Die Gewichtung des Kriteriums K2 wird dafür von dem Wert 0 schrittweise auf den Maximalwert erhöht. Aus nachfolgender Abbildung wird deutlich, dass bei zusätzlicher Betrachtung von K2 der Effizienzwert für jede Alternative Änderungen aufweist. Nach Erhöhung der Gewichtung von Kriterium K2 auf den Wert 1 ist Alternative A4, welche zu Beginn die optimale Lösung darstellte, lediglich auf Rang 3, hinter Alternative A1 und A2. Dies liegt in der niedrigen volumetrischen Energiedichte von Alternative A3 begründet, sodass bei Erhöhung der Gewichtung von K2, der Effizienzwert für A3 abgenommen hat. Der Effizienzwert für

A1 und A2 ist dabei nahezu identisch gestiegen, da einerseits dasselbe Zellformat vorliegt und andererseits die Zellchemien unterschiedlich sind, sodass sich lediglich ein geringer Unterschied in der Energie der Zellen ergeben hat. Die volumetrische Energiedichte der Zellen aus A1 und A2 ist somit nahezu identisch, sodass die Variation der Gewichtung von K2 einen ähnlichen Anstieg des Effizienzwertes von A1 und A2 bewirkt. In der resultierenden Rangfolge - am Ende der Variation von K2 - bietet sich Alternative A1 als optimale Alternative an, gefolgt von A2, A4 und A3.

Als nächstes wird zusätzlich zu den Kriterien K1 und K2 das Kriterium K3 (Effizienzindex – gravimetrische Energiedichte von Pack zu Zelle) in der Ermittlung der optimalen Alternative betrachtet. Auch hier wird die Gewichtung schrittweise erhöht, sodass sich eine Änderung des Effizienzwertes aller Alternativen ergibt. Am Ende der Variation der Gewichtung von Kriterium K3 stellt sich eine Rangordnung von A1, A4, A2 und A3 ein. Daraus erschließt sich, dass bei Kombination mehrerer Kriterien (K1 bis K3) Alternative A1 nun die optimale Lösung in dem Auswahlprozess darstellt.

Abschließend wird das letzte Kriterium K4 in der Bewertung der Alternativen hinzugefügt. Die Erhöhung der Gewichtung von K4 führt dazu, dass die Rangfolge sich erneut ändert, sodass sich nun für Alternative A4 der höchste Effizienzwert einstellt. Auf dem zweiten Rang befindet sich Alternative A1, gefolgt von Alternative A2. Die Alternative mit niedrigstem Effizienzwert lautet A3. Dem Anwender wird somit am Ende der Variation der Gewichtungen empfohlen, in Anbetracht der gewählten Präferenzen der Kriterien, die Alternative A4 auszuwählen.

Wichtig ist, dass der Effizienzwert der Alternativen nun aus der Kombination mehrerer Kriterien berechnet wird und nicht mit einer alleinigen Betrachtung von (in diesem Fall) K3 missverstanden werden darf. Beispielsweise kann eine Alternative einen hohen Wert für das Kriterium K3 aufweisen, jedoch ist diese Alternative nicht zwingend die optimale Lösung.



**Abbildung 4.17: Ergebnisse der Auswahl-Ebene bei Variation der Gewichtung verschiedener Kriterien**

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein anwendungsspezifisches Zellauswahltool für Elektrofahrzeuge nach dem Bottom-Up-Prinzip zu entwickeln. Dafür wurde ein Zellauswahltool in MATLAB mithilfe des App-Designers entwickelt, welches die Zellauswahl für einen vorgegebenen Anwendungsfall nach dem Bottom-Up-Prinzip ermöglicht. Die Entwicklung des Tools wurde auf fünf verschiedenen Ebenen durchgeführt, welche den Aufbau eines Batteriesystems nach dem Bottom-Up-Prinzip verfolgt und anschließend die Auswahl einer optimalen, anwendungsspezifischen Zelle ermöglicht.

Zur Erreichung des Ziels wurden zunächst die theoretischen Grundlagen von Lithium-Ionen-Zellen und deren Verbau zu einem Batteriesystem betrachtet. Anschließend wurde der Aufbau und die Implementierung des Zellauswahltools erläutert, welche in fünf Ebenen eingeteilt wurde. Die Entwicklung des Tools begann nach dem Bottom-Up-Prinzip bei der Elektroden-Ebene und endete bei der Auswahl-Ebene. Zwischen diesen Ebenen wurde die Zell-Ebene, die Modul-Ebene und die Pack-Ebene implementiert. Anschließend wurden die Ergebnisse aus dem Zellauswahltool validiert und analysiert.

Die Methodik, welche in dieser Arbeit verfolgt wurde, sieht vor, mithilfe des entwickelten Zellauswahltools eine optimale Auswahl der Zelle für ein anwendungsspezifisch-konfiguriertes Batteriepack treffen zu können. Die Zellauswahl erfolgt in dem Tool nach dem Bottom-Up-Prinzip, sodass angefangen in der Elektroden-Ebene zunächst die Elektroden-Stack-Dicke in Abhängigkeit der individuell auswählbaren Zellchemie und individuell einstellbarer Parameter berechnet werden kann. Daraufhin können technische Eigenschaften verschiedener Zellen berechnet werden, welche sich in ihrer Zellchemie und ihrem Zellformat unterscheiden. In der Modul-Ebene kann der Anwender seine anwendungsspezifischen Rahmenbedingungen angeben, sodass das Batteriepack die gewünschten technischen Spezifikationen aufweist. Hinweise in der Modul-Ebene weisen den Anwender zudem auf Änderungen der konfigurierten Zelle hin, falls definierte Kennzahlen überschritten werden. Dadurch werden die gewünschten Eigenschaften (z.B. die maximale Energiemenge) des Batteriesystems eingehalten. Die Pack-Ebene beschäftigt sich mit der Berechnung der technischen Eigenschaften des Batteriepacks und der Anordnung der Batteriemodule innerhalb eines vorgegebenen Bauraums. In der Auswahl-Ebene lassen sich schließlich die verschiedenen Batteriepack-Konfigurationen unter Angabe individueller Präferenzen mithilfe von Entscheidungstheorien untereinander bewerten, sodass eine optimale Lösung vorgeschlagen wird.

Mithilfe des entwickelten Tools lassen sich somit verschiedene Batteriepack-Konfigurationen berechnen und daraufhin Analysen durchführen. Nach den Ergebnissen der Arbeit wird deutlich, dass sowohl die Zellchemie als auch das Zellformat Einfluss auf die optimale Lösung für einen vorliegenden Anwendungsfall haben und für die Bewertung im Auswahlprozess gemeinsam betrachtet werden müssen. Mit Variation der Zellchemie ändert sich die gravimetrische und volumetrische Energiedichte der Zelle. Die Variation des Zellformats hat sowohl Auswirkung auf die spezifische Energiedichte als auch auf den Effizienzindex von spezifischer Energiedichte (Zelle zum Pack). Zu beachten ist, dass eine Zelle mit guten spezifisch-energetischen Eigenschaften nicht die optimale Zelle für den vorliegenden Anwendungsfall darstellt.

So weisen bspw. 18650-Rundzellen, verglichen mit den übrigen Zellformaten, hohe volumetrische Energiedichten und moderate gravimetrische Energiedichten auf, weshalb sie auf den ersten Blick für die Anwendung die optimale Lösung bieten können. Wird jedoch der Effizienzindex eines Batteriesystems mit Rundzellen betrachtet, ist die 18650-Rundzelle im Vergleich zu anderen Zellformaten im Nachteil. Mittels des Auswahltools lässt sich dann die Kombination beider Eigenschaften bewerten, sodass die optimale Lösung - in Abhängigkeit mehrerer Kriterien - ermittelt werden kann. Der Zellauswahlprozess ist somit abhängig von den eingestellten Präferenzen des Anwenders. Für unterschiedliche Präferenzen bieten sich unterschiedliche optimale Lösungen an, jedoch bedarf es dazu eines Tools, welches die optimale Lösung anhand vorgegebener Präferenzen bestimmt.

Aus kritischer Sicht hat das entwickelte Zellauswahltool Potential für Verbesserungen. Das Modell kann beispielsweise hinsichtlich der auswählbaren Zellchemie erweitert werden. Da eine ständige Weiterentwicklung der Zellchemien stattfindet, kann das Modell in Zukunft hinsichtlich der auswählbaren Anoden- und Kathodenmaterialien erweitert werden. Dadurch erhöht sich das Variationsspektrum für Batteriepack-Konfigurationen, da z.B. eine höhere Anzahl an Kombinationen von Zellchemie und Zellformat erstellt werden kann. Verbesserungspotential liegt zudem in dem Modell hinsichtlich des Thermomanagements vor. In dem entwickelten Modell wurden bezüglich der thermischen Auslegung lediglich konstruktive Maßnahmen ergriffen, indem bspw. Kühlplatten auf der Modul-Ebene integriert worden sind. Möglicherweise kann das Modell auch mit bestehenden Modellen verknüpft werden, sodass es zu einer Optimierung des in dieser Arbeit entwickelten Modells kommt.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das entwickelte Zellauswahltool im Entwicklungsprozess eines Elektrofahrzeugs als Werkzeug für eine anwendungsspezifische Vorauswahl der einzusetzenden Lithium-Ionen-Zellen Einsatz finden kann. Durch das Bottom-Up-Prinzip lässt sich zudem eine individuelle Gestaltung des Batteriesystems durchführen, welche sowohl den Zeitaufwand als auch die Kosten im Auswahlprozess positiv beeinflussen kann. Für zukünftige Arbeiten bietet sich eine Weiterentwicklung des entwickelten Auswahltools an, um die Aktualität zu bewahren und das Modell hinsichtlich thermischer Eigenschaften zu erweitern. Das entwickelte Zellauswahltool stellt somit die Lösung des eingangs erwähnten Problems der fehlenden Standardisierung in dem Entwicklungsprozess von Batteriesystemen dar.

## V Literaturverzeichnis

**Ajanovic, A; Glatt, A. (Ajanovic et al. 2020)**

*Wirtschaftliche und ökologische Aspekte der Elektromobilität.* In: Elektrotech. Inftech., Jg. 137, 2020, Nr. 4-5Nr. , S. 136–146

**Alhanouti, M; Gießler, M; Blank, T; Gauterin, F. (Alhanouti et al. 2016)**

*New Electro-Thermal Battery Pack Model of an Electric Vehicle.* In: Energies, Jg. 9, 2016, Nr. 7, S. 563

**Arora, S; Kapoor, A; Shen, W. (Arora et al. 2018)**

*Application of Robust Design Methodology to Battery Packs for Electric Vehicles: Identification of Critical Technical Requirements for Modular Architecture.* In: Batteries, Jg. 4, 2018, Nr. 3, S. 30

**Balioti, V; Tzimopoulos, C; Evangelides, C. (Balioti et al. 2018)**

*Multi-Criteria Decision Making Using TOPSIS Method Under Fuzzy Environment. Application in Spillway Selection.* In: Proceedings, Jg. 2, 2018, Nr. 11, S. 637

**Berjoza, D; Jurgena, I.Berjoza et al. 2017**

*Influence of batteries weight on electric automobile performance.* 16th International Scientific Conference Engineering for Rural Development: Latvia University of Agriculture 2017

**Berki, P; Göbl, R; Karger-Kocsis, J. (Berki et al. 2017)**

*Structure and properties of styrene-butadiene rubber (SBR) with pyrolytic and industrial carbon black.* In: Polymer Testing, Jg. 61, 2017, S. 404–415

**Bestgo (Bestgo 2021)**

*Li-ion cells.* <https://www.bestgobattery.com/li-ion-cells.html>. Abruf 31.01.2021

**Chakraborty, A; Kunnikuruvan, S; Kumar, S; Markovsky, B; Aurbach, D; Dixit, M; Major, D. T. (Chakraborty et al. 2020)**

*Layered Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries: Review of Computational Studies on LiNi<sub>1-x-y</sub>Co<sub>x</sub>Mn<sub>y</sub>O<sub>2</sub> and LiNi<sub>1-x-y</sub>Co<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>O<sub>2</sub>.* In: Chem. Mater., Jg. 32, 2020, Nr. 3, S. 915–952

**Costa, C. M; Lee, Y.-H; Kim, J.-H; Lee, S.-Y; Lanceros-Méndez, S. (Costa et al. 2019)**

*Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes.* In: Energy Storage Materials, Jg. 22, 2019, S. 346–375

**Daniel Oberhaus (Daniel Oberhaus 2020)**

*Welcome to the Era of Supercharged Lithium-Silicon Batteries. Batteries with silicon anodes promise to make devices last more than 20 percent longer on a single charge.* 2020

**Dr. A. Schamel (Dr. A. Schamel 2020):**

*Der industrielle Entwicklungsprozess von PKW-Antriebssystemen*, 23.11.2020

**Dr. Achim Wiebelt, Tobias Isermeyer, Thomas Siebrecht, Dr. Thomas Heckenberger  
(Dr. Achim Wiebelt, Tobias Isermeyer, Thomas Siebrecht, Dr. Thomas Heckenberger 2009)**

*ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift. Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien* 2009

**Dr.-Ing. Heiner Heimes (Dr.-Ing. Heiner Heimes 2020)**

*Vorlesungsreihe: Herstellung elektrischer Energiespeicher 2020*

**electrive.net (electrive.net 2020)**

*Battery Day: Tesla zeigt neue 4680-Batteriezelle - electrive.net.*

<https://www.electrive.net/2020/09/23/battery-day-tesla-zeigt-neue-4680-batteriezelle/>.

Abruf 12.02.2021

**Fuller, T. F; Harb, J. N. (Fuller et al. 2018):**

*Electrochemical engineering* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Incorporated, 2018

**Gerhartz, W. (Gerhartz 2016):**

*Vernachlässigt, vergessen oder unwichtig? - Inaktivmaterialien für Lithium-Ionen Batterien*, 2016

**Günter, F. J; Burgstaller, C; Konwitschny, F; Reinhart, G. (Günter et al. 2019)**

*Influence of the Electrolyte Quantity on Lithium-Ion Cells.* In: *J. Electrochem. Soc.*, Jg. 166, 2019, Nr. 10, A1709-A1714

**Guo, M; White, R. E. (Guo et al. 2014)**

*Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell.* In: *Journal of Power Sources*, Jg. 250, 2014, S. 220–235

**Haftendorn, D. (Haftendorn 2017):**

*Kurven erkunden und verstehen* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017

**Heimes, H. H; Kampker, A; Lienemann, C; Locke, M; Offermanns, C; Michaelis, S; Rahimzei, E. (Heimes et al. 2018):**

*Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezelle*, 3. Auflage, [revidierte Ausgabe]  
Aufl. Aachen, Frankfurt am Main: PEM der RWTH Aachen; VDMA, Oktober 2018

**Heimes, H. H; Kampker, A; Wessel, S; Kehrer, M; Michaelis, S; Rahimzei, E. (Heimes et al. 2018):**

*Montageprozess eines Batteriemoduls und -packs*, 3. Auflage, [revidierte Ausgabe]  
Aufl. Aachen, Frankfurt am Main: PEM der RWTH Aachen; VDMA, 2018

**Heiskanen, S. K; Kim, J; Lucht, B. L. (Heiskanen et al. 2019)**

*Generation and Evolution of the Solid Electrolyte Interphase of Lithium-Ion Batteries.*  
In: *Joule*, Jg. 3, 2019, Nr. 10, S. 2322–2333

**Herrmann, M. (Hrsg.)Herrmann 2014**

*Packaging - Materials review. REVIEW ON ELECTROCHEMICAL STORAGE MATERIALS AND TECHNOLOGY: Proceedings of the 1st International Freiberg Conference*

on Electrochemical Storage Materials  
3–4 June 2013: AIP Publishing LLC 2014

**Heubner, C; Nickol, A; Seeba, J; Reuber, S; Junker, N; Wolter, M; Schneider, M; Michaelis, A. (Heubner et al. 2019)**

*Understanding thickness and porosity effects on the electrochemical performance of LiNi0.6Co0.2Mn0.2O2-based cathodes for high energy Li-ion batteries.* In: Journal of Power Sources, Jg. 419, 2019, S. 119–126

**Kampker, A. (Kampker 2014):**

*Elektromobilproduktion* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014

**Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Kampker et al. 2013):**

*Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie* Berlin, Heidelberg: Springer, 2013

**Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Kampker et al. 2018):**

*Elektromobilität* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018

**Keil, P. (Keil 2017)**

*Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles* 2017

**Korthauer, R. (Korthauer 2013):**

*Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013

**Kühnapfel, J. B. (Hrsg.) (Kühnapfel 2014)**

*Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb. essentials*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014

**Kwon, S.-J; Lee, S.-E; Lim, J.-H; Choi, J; Kim, J. (Kwon et al. 2018)**

*Performance and Life Degradation Characteristics Analysis of NCM LIB for BESS.* In: Electronics, Jg. 7, 2018, Nr. 12, S. 406

**Landini, S; Leworthy, J; O'Donovan, T. S. (Landini et al. 2019)**

*A Review of Phase Change Materials for the Thermal Management and Isothermalisation of Lithium-Ion Cells.* In: Journal of Energy Storage, Jg. 25, 2019, S. 100887

**Lewerenz, M; Münnix, J; Schmalstieg, J; Käbitz, S; Knips, M; Sauer, D. U. (Lewerenz et al. 2017)**

*Systematic aging of commercial LiFePO<sub>4</sub> |Graphite cylindrical cells including a theory explaining rise of capacity during aging.* In: Journal of Power Sources, Jg. 345, 2017, S. 254–263

**Liu, C; Neale, Z. G; Cao, G. (Liu et al. 2016)**

*Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries.* In: Materials Today, Jg. 19, 2016, Nr. 2, S. 109–123

**Löbberding, H; Wessel, S; Offermanns, C; Kehrer, M; Rother, J; Heimes, H; Kampker, A. (Löbberding et al. 2020)**

*From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types.* In: WEVJ, Jg. 11, 2020, Nr. 4, S. 77

**Long, C. M; Nasarella, M. A; Valberg, P. A. (Long et al. 2013)**

*Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: physical and chemical distinctions.* In: Environmental pollution (Barking, Essex 1987), Jg. 181, 2013, S. 271–286

**MTI Corp - Leading provider of lab equipments and advanced crystal substrates (MTI Corp - Leading provider of lab equipments and advanced crystal substrates 2020)**

*18650 Cylinder Cell Case and Anti-Explosive Cap with Insulation O-ring - 100 Pcs/package - EQ-Lib-18650.* <https://www.mtixtl.com/18650CylinderCellCaseandAnti-ExplosiveCapwithInsulationO-ring-10-1.aspx>. Abruf 31.12.2020

**Nadimpalli, S. P; Sethuraman, V. A; Abraham, D. P; Bower, A. F; Guduru, P. R. (Nadimpalli et al. 2015)**

*Stress Evolution in Lithium-Ion Composite Electrodes during Electrochemical Cycling and Resulting Internal Pressures on the Cell Casing.* In: J. Electrochem. Soc., Jg. 162, 2015, Nr. 14, A2656-A2663

V-Modell XT - Teil 1: Grundlagen des V-Modells 2021. <http://ftp.uni-kl.de/pub/v-modell-xt/Release-1.1/Dokumentation/pdf/V-Modell-XT-Komplett.pdf>. Abruf 28.01.2021

**Nationale Plattform Elektromobilität (Nationale Plattform Elektromobilität 2016)**

*Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland 2016*

**Peljo, P; Girault, H. H. (Peljo et al. 2018)**

*Electrochemical potential window of battery electrolytes: the HOMO–LUMO misconception.* In: Energy Environ. Sci., Jg. 11, 2018, Nr. 9, S. 2306–2309

**PEM RWTH Aachen (PEM RWTH Aachen 2021):**

*Internes Dokument , 2021*

**Prof. David Greenwood (Prof. David Greenwood 2018):**

*Automotive Batteries 101 , 2018*

**Prof. Dr.-Ing. Andreas Nevoigt (B.Eng. Dennis Golombek, et al.)**

*Studie zu den möglichen Auswirkungen der Elektromobilitätauf die Automobilzulieferindustrie in Südwestfalen 2020*

**Quinn, J. B; Waldmann, T; Richter, K; Kasper, M; Wohlfahrt-Mehrens, M. (Quinn et al. 2018)**

*Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells: A Comparison of Commercial 18650 to the 21700 Cells.* In: J. Electrochem. Soc., Jg. 165, 2018, Nr. 14, A3284-A3291

**Schledde, D. (Schledde 2018):**

*Modellbasierte Identifikation von physikalischen Parametern zur Bestimmung der Veränderung charakteristischer Eigenschaften einer C/NMC Lithium-Ionen-Zelle durch Alterungsmechanismen zur Anwendung in Batteriemanagementsystemen. Eine empirische Studie* Kassel: kassel university press, 2018

**Schmiermund, T. (Hrsg.) (Schmiermund 2019)**

*Das Chemiewissen für die Feuerwehr*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019

**Sigma-Aldrich (Sigma-Aldrich 2021)**

*Lithiumhexafluorophosphat -Lösung 746746.* <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/746746?lang=de&region=DE>. Abruf 17.01.2021

**Tschöke, H. (Tschöke 2015):**

*Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

**TUM School of Management (TUM School of Management 2020):**

*Umweltbezogene Entscheidungen. Multidimensionale Bewertungsverfahren*, 2020

**Warner, J. (Warner 2015)**

*Battery Pack Design Criteria and Selection: The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design* Elsevier, 2015, S. 35–49

**Warner, J. (Warner 2015):**

*The handbook of lithium-ion battery pack design. Chemistry, components, types and terminology* (Chemical engineering). Amsterdam, Boston, Heidelberg: Elsevier, 2015

**Weber, C. J; Geiger, S; Falusi, S; Roth, M. Weber et al. 2014**

*Material review of Li ion battery separators.* In: Weber, C. J; Geiger, S; Falusi, S; Roth, M. (Hrsg.). REVIEW ON ELECTROCHEMICAL STORAGE MATERIALS AND TECHNOLOGY: Proceedings of the 1st International Freiberg Conference on Electrochemical Storage Materials, 3–4 June 2013: AIP Publishing LLC 2014, S. 66–81

**Wentker, M; Greenwood, M; Leker, J. (Wentker et al. 2019)**

*A Bottom-Up Approach to Lithium-Ion Battery Cost Modeling with a Focus on Cathode Active Materials.* In: Energies, Jg. 12, 2019, Nr. 3, S. 504

**Worwood, D; Marco, J; Kellner, Q; Hosseinzadeh, E; McGlen, R; Mullen, D; Lynn, K; Greenwood, D. (Worwood et al. 2019)**

*Experimental Analysis of a Novel Cooling Material for Large Format Automotive Lithium-Ion Cells.* In: Energies, Jg. 12, 2019, Nr. 7, S. 1251

**Ye, B; Rubel, M; Li, H. (Ye et al. 2019a)**

*Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle.* In: Applied Sciences, Jg. 9, 2019, Nr. 4, S. 754

*Dichte – Lexikon der Kunststoffprüfung* 2021. <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Dichte>. Abruf 17.02.2021

*Prismatic Lithium Ion Battery\_Greenway battery | E-BIKE Battery-Custom Lithium Battery Pack* 2021. <https://m.greenway-battery.com/news/Prismatic-Lithium-Ion-Battery-208.html>. Abruf 17.01.2021

*Automotive Battery - Battery Module | Samsung SDI* 2021. <https://www.samsungsdi.com/automotive-battery/products/battery-module.html>. Abruf 18.01.2021

**Samsung - SDI94 - 3,7 Volt 94Ah Li-Ion - Prismatic Lithium-ion Batter (Samsung - SDI94 - 3,7 Volt 94Ah Li-Ion - Prismatic Lithium-ion Batter 2021)**

*Samsung - SDI94 - 3,7 Volt 94Ah Li-Ion - Prismatic Lithium-ion Batter.* <https://akku-plus.de/Samsung-SDI94-37-Volt-94Ah-Li-Ion-Prismatic-Lithium-ion-Battery-Cell>. Abruf 18.01.2021

**Smith, J; Hinterberger, M; Hable, P; Koehler, J. (Smith et al. 2014)**

*Simulative method for determining the optimal operating conditions for a cooling plate for lithium-ion battery cell modules.* In: Journal of Power Sources, Jg. 267, 2014, S. 784–792

**Targray (Targray 2020)**

*PVDF Binder for Lithium-ion Battery Manufacturers | Targray.* <https://www.targray.com/li-ion-battery/binders/pvdf>. Abruf 16.02.2021

**Tornow, A; Graubohm, R; Dietrich, F; Dröder, K. (Tornow et al. 2016)**

*Design Automation for Battery System Variants of Electric Vehicles with Integrated Product and Process Evaluation.* In: Procedia CIRP, Jg. 50, 2016, S. 424–429

**Usubelli, C; Besli, M. M; Kuppan, S; Jiang, N; Metzger, M; Dinia, A; Christensen, J; Gorlin, Y. (Usubelli et al. 2020)**

*Understanding the Overlithiation Properties of LiNi 0.6 Mn 0.2 Co 0.2 O 2 Using Electrochemistry and Depth-Resolved X-ray Absorption Spectroscopy.* In: J. Electrochem. Soc., Jg. 167, 2020, Nr. 8, S. 80514

**Wu, B; Yang, Y; Liu, D; Niu, C; Gross, M; Seymour, L; Lee, H; Le, P. M. L; Vo, T. D; Deng, Z. D; Dufek, E. J; Whittingham, M. S; Liu, J; Xiao, J. (Wu et al. 2019)**  
*Good Practices for Rechargeable Lithium Metal Batteries.* In: J. Electrochem. Soc., Jg. 166, 2019, Nr. 16, A4141-A4149**Yang, Y; Yuan, W; Zhang, X; Ke, Y; Qiu, Z; Luo, J; Tang, Y; Wang, C; Yuan, Y; Huang, Y. (Yang et al. 2020)**

*A review on structuralized current collectors for high-performance lithium-ion battery anodes.* In: Applied Energy, Jg. 276, 2020, S. 115464

**Yuan, C; Deng, Y; Li, T; Yang, F. (Yuan et al. 2017)**

*Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles.* In: CIRP Annals, Jg. 66, 2017, Nr. 1, S. 53–56

**US20150093617A1 - Lithium ion prismatic cell comprising multiple jelly rolls with additional material between jelly rolls - Google Patents 2021.** <https://patents.google.com/patent/US20150093617A1/en>. Abruf 17.01.2021**Ullrich, C; Bodmer, T. (Ullrich et al. 2019)**

*D6.1 Thermophysikalische Stoffwerte von Metallen und Metalllegierungen.* In: Stephan, P; Kabelac, S; Kind, M; Mewes, D; Schaber, K; Wetzel, T. (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas: *Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen* (Reihe: VDI Springer Reference), 12th ed. 2019 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg, 2019, S. 645–658

**Xia, B; Liu, F; Xu, C; Liu, Y; Lai, Y; Zheng, W; Wang, W. (Xia et al. 2020)**

*Experimental and Simulation Modal Analysis of a Prismatic Battery Module.* In: Energies, Jg. 13, 2020, Nr. 8, S. 2046

**Ye, B; Rubel, M; Li, H. (Ye et al. 2019b)**

*Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle.* In: Applied Sciences, Jg. 9, 2019, Nr. 4, S. 754

**Yu Miao , Patrick Hynan, Annette von Jouanne, Alexandre Yokochi (Yu Miao et al.**

**2019):**

*Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements , 2019*

## VI Anhang

### A.1. Tabellen

**Tabelle 0.1: Dichte verschiedener Materialien<sup>132 133</sup>**

Material	Dichte in g/cm <sup>3</sup>
Aluminium	2,70
Kupfer	8,96
Nickel	8,91
Stahl (legiert)	7,90
Polyvinylchlorid (PVC)	1,20
Polypropylen (PP)	0,95
Polyamid (PA)	1,20

**Tabelle 0.2: Parameter der Elektroden-Ebene<sup>134 135 136</sup>**

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Wert
$\epsilon$	Porosität	%	30
$\delta_{Cu}$	Dicke Kupferableiter	µm	10
$\rho_{B1}$	Dichte Polyvinylidendifluorid (PVDF)	g/cm <sup>3</sup>	1,79
$\rho_{B2}$	Dichte Styrene-Butadiene Rubber (SBR)	g/cm <sup>3</sup>	0,973
$\rho_{CA}$	Dichte Carbon Black (Super P)	g/cm <sup>3</sup>	1,9

<sup>132</sup> (Dichte – Lexikon der Kunststoffprüfung) 2021.

<sup>133</sup> Vgl. Ullrich et al. (D6.1 Thermophysikalische Stoffwerte von Metallen und Metalllegierungen) 2019, S. 646, S. 648.

<sup>134</sup> Vgl. Targray (PVDF Binder for Lithium-ion Battery Manufacturers | Targray) 2020.

<sup>135</sup> Vgl. Berki et al. (Structure and properties of styrene-butadiene rubber (SBR) with pyrolytic and industrial carbon black) 2017, S. 411.

<sup>136</sup> Vgl. Long et al. (Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: physical and chemical distinctions) 2013, S. 276.

$\omega_{CA,neg}$	Massenanteil Additiv	%	0,5
$\delta_{Sep}$	Dicke Separator	$\mu\text{m}$	16
$\delta_{Cu}$	Dicke Aluminiumableiter	$\mu\text{m}$	15
$\omega_{AM,pos}$	Massenanteil Aktivmaterial Kathode	%	96
$\omega_{B,pos}$	Massenanteil Binder	%	3
$\omega_{CA,pos}$	Massenanteil Binder	%	1

**Tabelle 0.3: Parameter Zell-Ebene - Rundzelle**

Parameter	Bezeichnung	Einheit	18650	21700
$d_{18650/21700}$	Durchmesser	mm	18	21
$h_{18650/21700}$	Höhe	mm	65	70
$t_{18650/21700}$	Wandstärke	mm	0,2	0,2
$d_{Pin,18650/21700}$	Pin-Durchmesser	mm	1	1
$h_{leer,18650/21700}$	Passive Höhe	mm	5	5
-	Gehäusematerial	-	Stahl	Stahl

**Tabelle 0.4: Parameter Zell-Ebene - Pouchzelle**

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Wert
$d_{außenSch}$	Dicke der äußeren Schicht (PA)	$\mu\text{m}$	25
$d_{innenSch}$	Dicke der inneren Schicht (PP)	$\mu\text{m}$	50
$d_{AlSch}$	Dicke der Barrièreschicht	$\mu\text{m}$	40
$d_{Vers}$	Dicke der Siegelnahrt	mm	5

**Tabelle 0.5: Parameter Zell-Ebene - Prismatische Zelle**

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Wert
$h_{leer,prism}$	Passive Höhe in dem Gehäuse	mm	5
$d_{Pin,Prism}$	Pin-Durchmesser	mm	1
$t_{Wand,Prism}$	Wandstärke	mm	0,8
$m_{Geh,spez}$	Spezifische Masse des Gehäuses (berechnet)	$\frac{\text{g}}{\text{mm}}$	0.00040368
-	Gehäusematerial	-	Aluminium

**Tabelle 0.6: Parameter Modul-Ebene**

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Wert
$h_{leer,circuit}$	Passive Höhe für Verkabelung, etc.	mm	15
$d_{Klebe}$	Dicke der Klebschicht	mm	0,2
$d_{Kühl}$	Dicke der Kühlplatte (Aluminium)	mm	50
$d_{Kont}$	Dicke der Kontaktierung (Nickel)	mm	1
$d_{Isoplatte}$	Dicke der Isolationsplatte (Kunststoff)	mm	2
$t_{Wand,Modul}$	Wandstärke	mm	2
-	Gehäusematerial	-	Aluminium

**Tabelle 0.7: Parameter Pack-Ebene**

Parameter	Bezeichnung	Einheit	Wert
$t_{Wand,Pack}$	Wandstärke	mm	5
$m_{BMS}$	Masse BMS	kg	8,5
$m_{Cool}$	Masse Kühlsystem	kg	8,9
-	Gehäusematerial	-	Aluminium

**Tabelle 0.8: Parameter der Auswahl-Ebene<sup>137</sup>**

Zellchemie	Sicherheitskennzahl	Lebensdauerkennzahl	Kostenkennzahl
LFP	4	4	2
LMO	3	2	2
NCA	2	3	3
LCO	2	2	3
NMC111	3	3	2
NMC622	3	3	2,5
NMC811	3	3	3

<sup>137</sup> Abgeschätzt nach Yu Miao et al. (Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements) 2019, S. 10.

## A.2. Weitere Ergebnisse aus dem Zellauswahltool

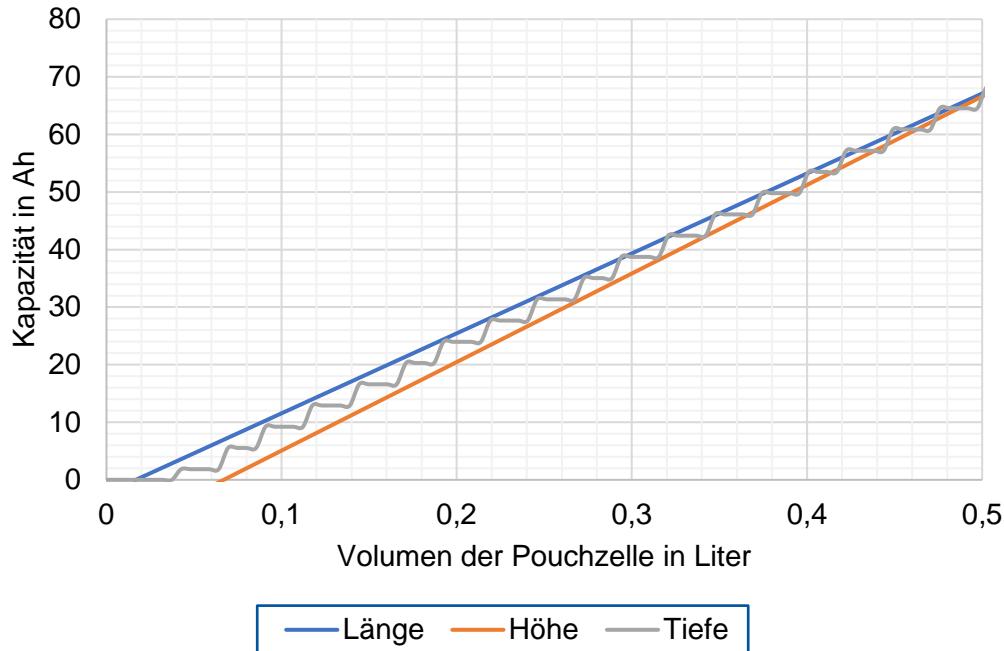


Abbildung 0.1: Einfluss der Variation der Länge, Höhe und Tiefe auf die Kapazität der Pouchzelle

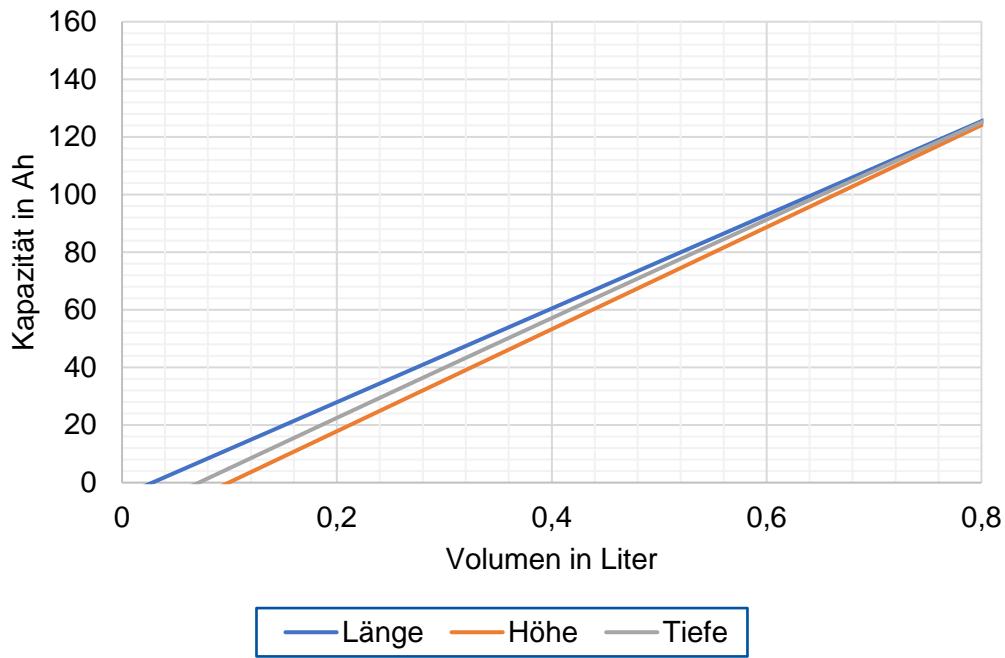
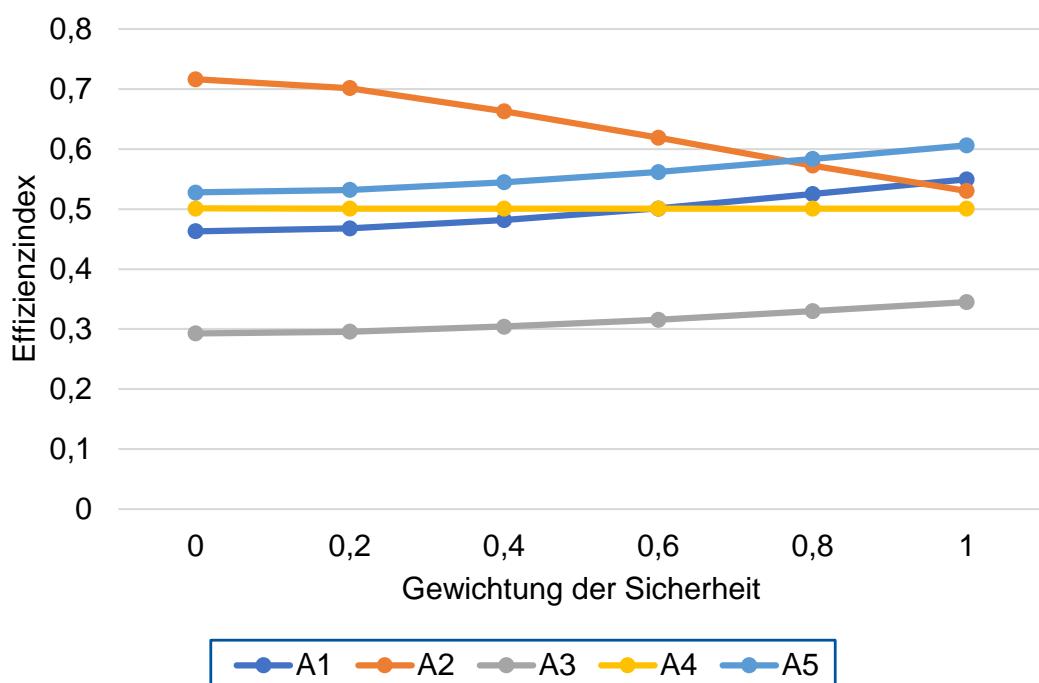


Abbildung 0.2: Einfluss der Variation der Länge, Höhe und Tiefe auf die Kapazität der prismatischen Zelle

**Tabelle 0.9: Berechnete Batteriepack-Konfigurationen mit gleichem Zellformat und einer Ausnahme**

Alternative	Zellformat	Zellchemie
A1	Rundzelle-18650	LFP
A2	Prismatisch (Flachwickel)	NCA
A3	Prismatisch (Flachwickel)	LNMO
A4	Prismatisch (Flachwickel)	NMC111
A5	Prismatisch (Flachwickel)	LFP



**Abbildung 0.3: Einfluss der Gewichtung (Sicherheit) der Konfigurationen aus Tabelle 0.9 nach TOPSIS**

**Tabelle 0.10: Berechnete Batteriepack-Konfigurationen für die Auswahl-Ebene**

Alternative	Zellchemie	Zellgehäuse	Grav. Energiedichte K1	Vol. Energiedichte K2	Effizienzindex (grav.) K3	Effizienzindex (vol.) K4
A1	LMO	Prismatisch (Sheets)	147,33	226,94	0,7312	0,4344
A2	LFP	18650-Rundzelle	122,04	155,23	0,6236	0,3082
A3	NMC622	Pouchzelle	185,71	243,98	0,7291	0,4871

<b>A4</b>	NCA	Prismatisch (Flachwickel)	161,67	256,64	0,6773	0,4367
-----------	-----	------------------------------	--------	--------	--------	--------

**Tabelle 0.11: Auswertung der Konfigurationen aus Tabelle 0.10 bei Betrachtung der Kriterien K1 bis K4 (jeweils zu 100 % gewichtet)**

Rang	Betrachtung K1 + K2 + K3 + K4
1	A3
2	A4
3	A1
4	A2

### A.3. Quellcode

```
%% START

%% Elektroden-Ebene

app.capa_areal_pos=app.FlchenbeladungKathodeinmAhcm2EditField.Value; % real capacity pos. Elektrode in mAh/cm^2

NP_ratio=app.NPRatioinEditField.Value; % Balancing in %

capa_areal_neg=(NP_ratio/100)*app.capa_areal_pos; % Areal capacity neg. Elektrode in mAh/cm^2

e=app.PorositinEditField.Value; % Porosität in % für beide Elektroden gleich

w_AM_pos=app.KathodewtAMinEditField.Value; % Massenanteil Aktivmasse Kathode in %

w_B_pos=app.KathodewtBinderinEditField.Value; % Massenanteil Binder PVdF Kathode in %

w_CA_pos=app.KathodewtAdditiveinEditField.Value; % Massenanteil Additive SuperP Kathode in %

w_AM_neg=app.AnodewtAMinEditField.Value; % Massenanteil Aktivmasse Anode in %

w_B_neg=app.AnodewtBinderinEditField.Value; % Massenanteil Binder CMC Anode in %
```

```
w_CA_neg=app.AnodewtAdditiveinEditField.Value; %  
Massenanteil Additive Anode in %;  
  
rho_B_neg=1.6; %  
Dichte Binder in g/cm^3  
  
rho_CA_neg=2.25;  
% Dichte Additiv in g/cm^3  
  
rho_AM_neg=2.2; %  
Dichte Aktivmaterial Anode in g/cm^3  
  
rho_B_pos=1.8; %  
Dichte Binder in g/cm^3  
  
rho_CA_pos=2.25;  
% Dichte Additiv in g/cm^3  
  
. celldata=readtable('Zelldaten.xlsx');  
numRows=size(celldata(:,1),1);  
celltable=table2array(celldata(:,1));  
cellCapa=table2array(celldata(:,2));  
cellDensity=table2array(celldata(:,3));  
cellVoltage=table2array(celldata(:,4));  
Zeile=1;  
for i=1:numRows  
if strcmp(celltable(i,1),app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value )  
break  
else Zeile=Zeile+1;  
end  
end  
capa_pos=cellCapa(Zeile);  
rho_AM_pos=cellDensity(Zeile);  
app.voltage_pos=cellVoltage(Zeile);  
Zeile1=1;  
for i=1:numRows  
if strcmp(celltable(i,1),app.AktivmaterialAnodeDropDown.Value )  
break
```

```
else Zeile1=Zeile1+1;  
end  
end  
capa_neg=cellCapa(Zeile1);  
rho_AM_neg=cellDensity(Zeile1);  
app.voltage_neg=cellVoltage(Zeile1);  
  
%% Dicke der beschichteten Elektroden  
m_areal_active_pos= app.capa_areal_pos/(capa_pos/1000); % Mass Loading (active) in mg/cm2 Kathode  
m_areal_active_neg= capa_areal_neg/(capa_neg/1000); % Mass Loading (active) in mg/cm2 Anode  
app.m_areal_ges_pos=m_areal_active_pos/(w_AM_pos/100); % Mass Loading total in kg/cm2 Kathode  
app.m_areal_ges_neg=m_areal_active_neg/(w_AM_neg/100); % Mass Loading total in kg/cm2 Anode  
app.d_el_pos=((app.m_areal_ges_pos/1000)*((w_AM_pos/100)/rho_AM_pos)+((w_B_pos/100)/rho_B_pos)+((w_CA_pos/100)/rho_CA_pos))/(1-e/100)*10^4; % [g/cm2]*[cm3/g] * 10^-4 = um  
  
app.d_el_neg=((app.m_areal_ges_neg/1000)*((w_AM_neg/100)/rho_AM_neg)+((w_B_neg/100)/rho_B_neg)+((w_CA_neg/100)/rho_CA_neg))/(1-e/100)*10^4; % [g/cm2]*[cm3/g] * 10^-4 = um  
app.BeschichtungsdickederAnodeinumEditField.Value=app.d_el_neg;  
app.BeschichtungsdickederKathodeinumEditField.Value=app.d_el_pos;  
%% Dicke des Elektroden-Stack  
%Parameter  
app.d_sep=app.DickeSeparatorinumEditField.Value; % Dicke Separator in um  
app.d_cu=app.DickeKupferfolieinumEditField.Value; % Dicke Kupferfolie in um  
app.d_al=app.DickeAlufolieinumEditField.Value; % Dicke Aluminiumfolie in um  
app.d_el_stack=2*(app.d_el_pos+app.d_el_neg+app.d_sep)+app.d_cu+app.d_al; %% Dicke des Elektroden-Stacks in um
```

```
app.DickeElektrodenStackinumEditField.Value=app.d_el_stack;  
row={app.AktivmaterialAnodeDropDown.Value  
app.AnodewtAMinEditField.Value  
app.AnodewtBinderinEditField.Value  
app.AnodewtAdditiveinEditField.Value  
app.DickeKupferfolieinumEditField.Value  
app.BeschichtungsdickederAnodeinumEditField.Value};  
row1=app.UITable4.Data;  
app.UITable4.Data=[row;row1];  
row2={app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value app.KathodewtAMinEditField.Value  
app.KathodewtBinderinEditField.Value  
app.KathodewtAdditiveinEditField.Value  
app.DickeAlufolieinumEditField.Value  
app.BeschichtungsdickederKathodeinumEditField.Value};  
row3=app.UITable4_2.Data;  
app.UITable4_2.Data=[row2;row3];  
row4={app.FlchenbeladungKathodeinmAhcm2EditField.Value  
app.PorosittinEditField.Value app.NPRatioinEditField.Value  
app.DickeSeparatorinumEditField.Value  
app.DickeElektrodenStackinumEditField.Value};  
row5=app.UITable4_3.Data;  
app.UITable4_3.Data=[row4;row5];  
end  
  
% Button pushed function: BerechnenButton  
function BerechnenButtonPushed(app, event)  
%% Rundzelle 18650  
%Parameter  
  
d_18650=18+0.4; % Gesamter Durchmesser mit 2 mal der Wandstärke in mm  
d_void_18650=1; %Durchmesser Void in mm  
h_18650=65+0.2; %Gesamte Höhe in mm mit Wandstärke  
h_leer_18650=5; %Leere Höhe in mm 5 für  
t_wand_18650=0.2; %Dicke der Wand in mm  
r_void_18650=0.5; % Offset im Inneren Jelly-Roll in mm
```

```
%%Für Jelly-Roll verfügbares Volumen
V_ges_18650=(pi/4)*((d_18650).^2)*h_18650*10^(-6); % Volumen in Liter
d_jelly_18650=d_18650-2.*t_wand_18650; % Durchmesser Jelly in mm
V_jelly_18650=((d_jelly_18650).^2)*(h_18650-h_leer_18650-t_wand_18650)*(pi/4); %
Volumen Jelly ohne Void in mm^3
V_jelly_mitVoid_18650=V_jelly_18650-(pi/4)*((d_void_18650)^2)*(h_18650-
h_leer_18650-t_wand_18650); %Volumen Jelly mit Void in mm^3

%% Rundzelle 21700

%%Parameter
d_21700=21;      % Durchmesser in mm
d_void_21700=1;   % Durchmesser Void in mm
h_21700=70;       % Gesamte Höhe in mm
h_leer_21700=5;    % Leere Höhe in mm 3
t_wand_21700=0.2; % Dicke der Wand in mm
r_void_21700=0.5; % Offset im Inneren Jelly-Roll in mm

%%Für Jelly-Roll verfügbares Volumen des Gehäuses
V_ges_21700=(pi/4)*((d_21700)^2)*h_21700*10^(-6); % Volumen in Liter
d_jelly_21700=d_21700-2*t_wand_21700; % Durchmesser Jelly in mm
V_jelly_21700=((d_jelly_21700)^2)*(h_21700-h_leer_21700-2*t_wand_21700)*(pi/4);
% Volumen Jelly ohne Void in mm^3
V_jelly_mitVoid_21700=V_jelly_21700-(pi/4)*((d_void_21700)^2)*(h_21700-
h_leer_21700-2*t_wand_21700); %Volumen Jelly mit Void in mm^3

%% Länge des Elektroden-Stack-Bandes für Jelly-Roll
N_w_18650=((d_jelly_18650/2)-r_void_18650)/(app.d_el_stack/1000);
% Windungszahl Jelly-Roll evtl. (d_jelly/2 -0.5 )/d_el wegen void [-]
N_w_21700=((d_jelly_21700/2)-r_void_21700)/(app.d_el_stack/1000);
x_stack_18650=(((N_w_18650*(app.d_el_stack/1000)+r_void_18650).^2)-
(r_void_18650)^2)*(pi/(app.d_el_stack/1000));    % Archimedes Spirale; Länge Elektroden-Stack-Band in mm
x_stack_21700=(((N_w_21700*(app.d_el_stack/1000)+r_void_21700).^2)-
(r_void_21700)^2)*(pi/(app.d_el_stack/1000));

%% Berechnung der technischen Eigenschaften der Jelly-Rolls
```

```
% Parameter 18650 Zelle

o_hang=5.6; % Share of Overhang Kathode//Anode in 5,6% [%]

mass_gehause_18650=9.5; % Gewicht des Gehäuses in g nach mtixtl.com
mass_gehause_21700=10.5; % Gewicht des 21700 Gehäuse in g nach mtixtl.com

mass_elektrolyt_18650=2.2; % Masse des Elektrolyt in g nach "Winter02"
mass_elektrolyt_21700=2.9; % Masse des Elektrolyt in g nach "Winter02"

mass_separator_18650=2; % Masse Separator in g nach "Winter02"
mass_separator_21700=2.9; % Masse Separator in g Skaliert nach 18650

rho_alu=2.7; % Dichte von Alumunium in g/cm3

rho_cu=8.96; % Dichte von Kupfer in g/cm3

d_isolationfoil=0.1; % Dicke Isolationsfolie in mm

rho_PVC=1.4; % Dichte PVC in g/cm3

surface_21700=pi*d_21700*h_21700; % Oberfläche in mm2
surface_18650=pi*d_21700*h_18650; % Oberfläche in mm2

mass_Isofolie_21700=rho_PVC*d_isolationfoil*surface_21700/1000;
mass_Isofolie_18650=rho_PVC*d_isolationfoil*surface_18650/1000;

mass_alu_18650=((app.d_al/1000)*x_stack_18650*(h_18650-h_leer_18650-t_wand_18650)*rho_alu)/1000; % Masse Kupferfolie in g
mass_cu_18650=((app.d_cu/1000)*x_stack_18650*(h_18650-h_leer_18650-t_wand_18650))*rho_cu)/1000; % Masse Alufolie in g

mass_alu_21700=((app.d_al/1000)*x_stack_21700*(h_18650-h_leer_21700-t_wand_21700)*rho_alu)/1000; % Masse Kupferfolie in g
mass_cu_21700=((app.d_cu/1000)*x_stack_21700*(h_21700-h_leer_21700-t_wand_21700))*rho_cu)/1000; % Masse Alufolie in g

capa_jelly_max_18650=2*(app.capa_areal_pos*((x_stack_18650*(h_18650-h_leer_18650-t_wand_18650)/100))/(1+o_hang/100))/1000; % max. Kapazität
des Jelly-Rolls nach oben durch die Kathode begrenzt in Ah

capa_jelly_max_21700=2*(app.capa_areal_pos*((x_stack_21700*(h_21700-h_leer_21700-t_wand_21700)/100))/(1+o_hang/100))/1000; % max. Kapazität
des Jelly-Rolls nach oben durch die Kathode begrenzt in Ah
```

```
mass_elektroden_18650=2*((app.m_areal_ges_neg)*(x_stack_18650*(h_18650-
h_leer_18650-t_wand_18650)/100)+(app.m_areal_ges_pos)*(x_stack_18650*
(((h_18650-h_leer_18650-t_wand_18650)/100)/(1+o_hang/100)))/1000; %  
Gewicht des 18650 Jelly-Rolls in g  
  
mass_elektroden_21700=2*((app.m_areal_ges_neg)*(x_stack_21700*(h_18650-
h_leer_21700-t_wand_21700)/100)+(app.m_areal_ges_pos)*(x_stack_21700*
(((h_21700-h_leer_21700-t_wand_21700)/100)/(1+o_hang/100)))/1000;  
% Gewicht des Jelly-Rolls in g  
  
%mass_elektrolyt_18650=capa_jelly_max_18650*1.81*1.26;  
%mass_elektrolyt_21700=capa_jelly_max_21700*1.81*1.26;  
mass_stack_18650=mass_elektroden_18650+mass_separa-
tor_18650+(mass_alu_18650+mass_cu_18650);  
mass_stack_21700=mass_elektroden_21700+mass_separator_21700+
(mass_alu_21700+mass_cu_21700);  
mass_total_18650=mass_Isofolie_18650+mass_elektroden_18650+mass_ge-
hause_18650+mass_elektrolyt_18650+mass_separator_18650+
(mass_alu_18650+mass_cu_18650); % Gesamtmasse der 18650 Zelle  
mass_total_21700=mass_Isofolie_21700+mass_elektroden_21700+mass_ge-
hause_21700+mass_elektrolyt_21700+mass_separator_21700+
(mass_alu_21700+mass_cu_21700);  
voltage_ges_18650=app.voltage_pos-app.voltage_neg;  
% Spannung bei Graphit als Anode mit 0.1V vs. Li/li+  
voltage_ges_21700=app.voltage_pos-app.voltage_neg;  
E_ges_18650=voltage_ges_18650*capa_jelly_max_18650;  
% Gesamte Energie des Jollys in Wh  
e_ges_grav_18650=E_ges_18650/(mass_total_18650/1000);  
% Gesamte grav. Energiedichte in Wh/kg ohne Gehäuse Masse  
e_ges_vol_18650=E_ges_18650/V_ges_18650;  
E_ges_21700=voltage_ges_21700*capa_jelly_max_21700;  
e_ges_grav_21700=E_ges_21700/(mass_total_21700/1000);  
e_ges_vol_21700=E_ges_21700/V_ges_21700;  
  
%% Pouch Zelle  
% Maße der Pouch Zelle für BEV nach S. Landini (Journal)  
rho_alu=2.7; % Dichte von Alumunium in g/cm3
```

```
rho_cu=8.96;           % Dichte von Kupfer in g/cm3
l_pouch=app.PouchLngeinmmEditField.Value-2*5;      % Länge in mm ohne äußere
versiegelte Fläche
h_pouch=app.PouchHheinmmEditField.Value-5-15;      % Höhe in mm ohne Pole
und untere versiegelte Fläche
t_pouch=app.PouchTiefeinmmEditField.Value;          % Tiefe in mm -- variiert von
4mm bis 12mm
l_ges_pouch=app.PouchLngeinmmEditField.Value;        % Gesamtlänge mit Überstand
durch Versiegelung (obere Seite) und Pole
h_ges_pouch=app.PouchHheinmmEditField.Value;          % Gesamthöhe mit Überstand
durch Versiegelung (beide Seiten)
V_pouch=(h_ges_pouch*l_ges_pouch*t_pouch)*10^(-6); % V in Liter
% Packaging der Zell-Stacks
d_outer_layer=25;         % Dicke Outer-Layer (PA) in um nach "Packaging Materials
review"
d_al_barrier=40;          % Dicke Aluminium -Layer (Al) in um nach "Packaging Materials
review"
d_inner_layer=50;          % Dicke Inner-Layer (PP) in um nach "Packaging Materials
review"
rho_PP=0.95;              % Dichte Polyethylene (PP) in g/cm3
rho_PE=0.92;              % Dichte Polypropylene (PE) in g/cm3
d_foil=(d_outer_layer+d_al_barrier+d_inner_layer)/1000;    % Dicke Packaging in mm
nach "Packaging - Materials review + passend zu Dicke in mm der Folie nach Article:
Critical Parameters for Evaluating Coin Cells and Pouch Cells + auch

% Doppelbeschichtung --> Beschichtung + Alu (oder Cu) Folie +
% Beschichtung
A_sep_pouch=(l_pouch-2*d_foil)*(h_pouch-2*d_foil);    % Fläche des Separators in
der Pouch-Zelle in mm2
A_elek_neg_pouch=A_sep_pouch/1.13455;    % Fläche der neg. Elektrode in der
Pouch-Zelle in mm2 skaliert nach Paper: A Bottom-Up Approach to Lithium...
A_elek_pos_pouch=A_elek_neg_pouch/(1+0.0837); % Skalierte Fläche der Kathode
nach Paper: "Bottom-Up Approach to Li-Ion Battery Cost Modelling [...]
d_stack_pouch=app.d_sep+app.d_el_neg+app.d_cu+app.d_el_neg+app.d_sep+app.
d_el_pos+app.d_al+app.d_el_pos;           % Zell-Stack bestehend aus
(S+A+Cu+A+S+K+Al+K)
```

```
n_stacks=floor((t_pouch-2*d_foil-(app.d_sep/1000))/(d_stack_pouch/1000)); % Anzahl der Stacks in der Pouch-Zelle

n_aktive_flaechen=2*n_stacks-1; % Anzahl der aktiven Flächen --> pro Stack eine PLUS an der Grenze zum nächsten Stack jeweils

voltage_pouch=app.voltage_pos-app.voltage_neg;

capa_ges_pouch=(app.capa_areal_pos/1000)*(A_elek_pos_pouch*n_aktive_flaechen/100); % Kapazität der Pouch-Zelle in Ah

E_ges_pouch=capa_ges_pouch*voltage_pouch;

% Massen

mass_elek_pos_pouch=2*n_stacks*app.m_areal_ges_pos*(A_elek_pos_pouch/100)/1000; % Gewicht pos. Elektrode in g

mass_elek_neg_pouch=2*n_stacks*app.m_areal_ges_neg*(A_elek_neg_pouch/100)/1000; % Gewicht neg. Elektrode in g

mass_cu_pouch=n_stacks*rho_cu*(A_sep_pouch*(app.d_cu/1000))/1000;

mass_alu_pouch=n_stacks*rho_alu*(A_sep_pouch*(app.d_al/1000))/1000;

mass_spez_sep=20; % Spez. Gewicht des Separators in g/m2 abgeleitet aus "Material Review of Li ion battery separators"

mass_sep_pouch=2*n_stacks*mass_spez_sep*A_sep_pouch*(10^-6);

mass_stack=(mass_elek_pos_pouch+mass_elek_neg_pouch)+mass_alu_pouch+mass_cu_pouch+mass_sep_pouch;

mass_gehause_pouch=((l_pouch*h_pouch+l_pouch*t_pouch+h_pouch*t_pouch)/100)*2*(d_inner_layer*rho_PP+d_outer_layer*rho_PE+d_al_barrier*rho_alu)/10000; % in g

%mass_elektrolyt_pouch=capa_ges_pouch*spez_mass_elektrolyt_pouch; % Masse in g des Elektrolyts

mass_elektrolyt_pouch=1.81*1.26*capa_ges_pouch;

mass_ges_pouch=mass_stack+mass_elektrolyt_pouch+mass_gehause_pouch; % Gesamtmasse der Pouch-Zelle in g

E_ges_pouch=capa_ges_pouch*voltage_pouch; % Energie der Pouch-Zelle in Wh

e_ges_grav_pouch=E_ges_pouch*1000/mass_ges_pouch; % Gravimetrische Energie der Pouch-Zelle in Wh/kg

e_ges_vol_pouch=E_ges_pouch/V_pouch; % Vol. Edichte in Wh/Liter

%% Prismatische Zelle
```

```
% Geometrische Maße des Gehäuse  
voltage_prism=app.voltage_pos-app.voltage_neg; % max. Spannung in V  
l_prism=app.PrismLngeinmmEditField.Value; % Länge in mm 173 150 220.7  
h_prism_mPole=app.PrismHheinmmEditField.Value; % Höhe mit Höhe der Pole  
in mm 115 102 91  
t_prism=app.PrismTiefeinmmEditField.Value; % Tiefe in mm 32 32 21.6  
d_wand_prism=0.8; % Dicke der Wand in mm  
h_pole=5; % Höhe der Pole 6 in mm  
h_leer_prism=5; % Höhe der Pole + Höhe der Komponenten zw. Jelly und Pole  
(9mm)  
r_0_prism=0.5; % Radienoffset im Inneren in mm  
h_prism=h_prism_mPole-h_pole;  
d_collector=3; % Dicke Current-Collector in mm  
mass_spez_sep=20; % Spez. Gewicht des Separators in g/m2 nach "Material  
Review of Li ion battery separators"  
d_el_stack_prism=2*(app.d_el_pos+app.d_el_neg+app.d_sep)+app.d_cu+app.d_al;  
%% Dicke des Elektroden-Stacks in um  
V_ges_prism=l_prism*(h_prism_mPole)*t_prism*10^(-6); % in Liter  
%V_ges_eff_prism=l_prism*h_prism*t_prism*10^(-6); % in Liter  
h_ges_prism=h_prism_mPole;  
l_ges_prism=l_prism;  
t_ges_prism=t_prism;
```

% Methode 6 - Nur Sheets

```
l_sheet_s=l_prism-2*d_wand_prism; % Ohne Kollektor !!!!  
h_sheet_s=h_prism-h_leer_prism-d_wand_prism; % Ohne Dicke des Kollektor in Hö-  
henrichtung  
d_stack_sheets_prism=app.d_sep+app.d_el_neg+app.d_cu+app.d_el_neg+app.d_se  
p+app.d_el_pos+app.d_al+app.d_el_pos; % Zell-Stack bestehend aus  
(S+A+Cu+A+S+K+Al+K)  
n_s_prism=floor((t_prism-2*d_wand_prism)/(d_stack_sheets_prism/1000));  
n_aktiv_s=2*n_s_prism-1;  
A_sheet_pos_prism_s=l_sheet_s*h_sheet_s/(1+o_hang/100);
```

```
A_sheet_neg_prism_s=l_sheet_s*h_sheet_s;  
capa_ges_prism_s=n_ak-  
tiv_s*(app.capa_areal_pos/1000)*(A_sheet_pos_prism_s/100);  
mass_alu_sheet_prism_s=n_s_prism*((app.d_al/1000)*l_sheet_s*h_sheet_s*rho_alu)/  
1000; % Masse Kupferfolie sheet in g  
mass_cu_sheet_prism_s=n_s_prism*((app.d_cu/1000)*l_sheet_s*h_sheet_s*rho_cu)/  
1000; % Masse Alufolie sheet in g  
mass_elek_prism_s=2*n_s_prism*(app.m_areal_ges_pos*(A_sheet_pos_prism_s/100)+  
app.m_areal_ges_neg*(A_sheet_neg_prism_s/100))/1000; % Gewicht Sheets in g  
mass_sep_prism_s=2*n_s_prism*mass_spez_sep*A_sheet_neg_prism_s*(10^(-6));  
% Masse Separator nach Quelle aus Pouch-Zelle  
spez_mass_prism=0.00040368; % Masse pro Volumen eines Gehäuses in g/mm3  
nach Auswertung aus CAD-Modell  
mass_gehause_prism_s=spez_mass_prism*(l_prism*h_prism_mPole*t_prism);  
mass_elektrolyt_prism_s=1.81*1.26*capa_ges_prism_s;  
mass_stack_prism_s=mass_alu_sheet_prism_s+mass_cu_sheet_prism_s+mass_se-  
p_prism_s+mass_elek_prism_s;  
mass_ges_prism_s=mass_alu_sheet_prism_s+mass_cu_sheet_prism_s+mass_sep_-  
prism_s+mass_elek_prism_s+ mass_gehause_prism_s+mass_elektrolyt_prism_s; %  
Masse in Gramm  
E_prism_s=capa_ges_prism_s*voltage_prism; % In Wh  
e_ges_grav_prism_s=E_prism_s*1000/mass_ges_prism_s; % in Wh/kg  
e_ges_vol_prism_s=E_prism_s/V_ges_prism; % in Wh/L
```

%% Methode 5.1 - 2 Jelly Rolls und 2 sheet-stacks

% Jelly-Roll

```
d_Jelly_2_1=(t_prism-2*d_wand_prism)/2; % in mm  
N_w_prism_2_1=((d_Jelly_2_1/2)-(r_0_prism))/(d_el_stack_prism/1000); % Windungszahl Jelly-Roll [-] r_0_prism  
x_stack_prism_2_1=(((N_w_prism_2_1*(d_el_stack_prism/1000)+r_0_prism).^2)-  
(r_0_prism).^2)*(pi/(d_el_stack_prism/1000)); % Archimedes Spirale; Länge Elektroden-Stack-Band in mm
```

```
capa_Jelly_prism_2_1=2*2*(app.capa_areal_pos*((x_stack_prism_2_1*((h_prism-
h_leer_prism)-(d_wand_prism))/100))/(1+o_hang/100))/1000; % max. Kapazität des
Jelly-Rolls in Ah (Doppelbeschichtung also x2),(2 Jellys also x2)

% Sheets

l_sheet_prism_2_1=l_prism-2*d_wand_prism-d_Jelly_2_1; % Ohne Kollektor !!!!

h_sheet_prism_2_1=h_prism-h_leer_prism-d_wand_prism; % Ohne Dicke des Kollek-
tor in Höhenrichtung

%l_sheet_prism_2=l_prism-2*d_wand_prism-d_Jelly_2_1;

%h_sheet_prism_2=h_prism-h_leer_prism-d_wand_prism-d_collector;

n_sheet_prism_2_1=2*N_w_prism_2_1; % Anzahl "gestapelter" Sheets

A_sheet_pos_prism_2_1=(l_sheet_prism_2_1*h_sheet_prism_2_1)/(1+o_hang/100);

A_sheet_neg_prism_2_1=(l_sheet_prism_2_1*h_sheet_prism_2_1);

capa_sheet_2_1=2*2*(app.capa_areal_pos/1000)*(A_sheet_pos_prism_2_1.*n_shee-
t_prism_2_1/100); % Kapazität der Pouch-Zelle in Ah

% Gesamte Kapazität

capa_ges_prism_2_1=capa_Jelly_prism_2_1+capa_sheet_2_1;

% Energie

voltage_prism=app.voltage_pos-app.voltage_neg; % max. Spannung in V

E_Jelly_Sheet_prism_2_1=capa_ges_prism_2_1*voltage_prism; % Energie in Wh

% Masse

% Jelly-Roll

mass_alu_Jelly_prism_2_1=2*((app.d_al/1000)*x_stack_prism_2_1*(h_prism-
d_wand_prism)*rho_alu)/1000; % Masse Kupferfolie Jelly in g 2x da Zwei Jellys

mass_cu_Jelly_prism_2_1=2*((app.d_cu/1000)*x_stack_prism_2_1*(h_prism-
d_wand_prism)*rho_cu)/1000; % Masse Alufolie Jelly in g

mass_alu_sheet_prism_2_1=2*n_sheet_prism_2_1.*((app.d_al/1000)*l_sheet_prism_-
2_1*h_sheet_prism_2_1*rho_alu)/1000; % Masse Kupferfolie sheet in g

mass_cu_sheet_prism_2_1=2*n_sheet_prism_2_1.*((app.d_cu/1000)*l_sheet_prism_-
2_1*h_sheet_prism_2_1*rho_cu)/1000; % Masse Alufolie sheet in g

mass_elek_Jelly_prism_2_1=2*2*(app.m_areal_ges_neg*(x_stack_prism_2_1
*(h_prism-h_leer_prism)/100)
+app.m_areal_ges_pos*(x_stack_prism_2_1
```

```
*(((l_prism-d_wand_prism)/100))/(1+o_hang/100))/1000; % Gewicht des Jelly-
Rolls in g // 2 Jellys und jeweils doppel beschichtet = 2x2x...
mass_sep_prism_2_1=2*2*mass_spez_sep*(x_stack_prism_2_1.* (h_prism-
h_leer_prism-d_wand_prism)+n_sheet_prism_2_1.*A_sheet_neg_prism_2_1)*(10^(-
6));
mass_elek_sheet_prism_2_1=2*2*n_sheet_prism_2_1.* (app.m_areal_ges_pos*(A_s
heet_pos_prism_2_1/100)+app.m_areal_ges_neg*(A_sheet_pos_prism_2_1/100))/10
00; % Gewicht Sheets in g
mass_stack_prism_2_1=mass_alu_Jelly_prism_2_1+mass_cu_Jelly_prism_2_1+mas
s_alu_sheet_prism_2_1+mass_cu_sheet_prism_2_1+mass_elek_Jelly_prism_2_1+mas
s_elek_sheet_prism_2_1;
spez_mass_prism=0.00040368; % Masse pro Volumen eines Gehäuses in g/mm3
nach Auswertung aus CAD-Modell
mass_gehause_prism_2_1=spez_mass_prism*(l_prism*h_prism_mPole*t_prism); % Masse Gehäuse ohne Jelly in g
mass_elektrolyt_prism_2_1=1.81*1.26*capa_ges_prism_2_1; %Masse Elektrolyt in g
geschätzt nach Quelle
mass_ges_prism_2_1=mass_alu_sheet_prism_2_1+mass_cu_sheet_prism_2_1
+mass_alu_Jelly_prism_2_1+mass_cu_Jelly_prism_2_1
+mass_elek_Jelly_prism_2_1
+mass_elek_sheet_prism_2_1+mass_sep_prism_2_1+mass_ge-
hause_prism_2_1+mass_elektrolyt_prism_2_1; % Masse in Gramm
e_ges_grav_prism_2_1=E_Jelly_Sheet_prism_2_1*1000/mass_ges_prism_2_1; % in Wh/kg
e_ges_vol_prism_2_1=E_Jelly_Sheet_prism_2_1/V_ges_prism; % in Wh/L
% DropDown
if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Pouch')
    app.MasseingEditField.Value=mass_ges_pouch;
    app.VolumeninLEditField.Value=V_pouch;
    app.gravEnergiedichteinWhkgEditField.Value=e_ges_grav_pouch;
    app.volEnergiedichteinWhLEditField.Value=e_ges_vol_pouch;
    app.EnergieinWhEditField.Value=E_ges_pouch;
    app.KapazittinAhEditField.Value=capa_ges_pouch;
    app.SpannunginVEditField.Value=voltage_pouch;
end
```

```
if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-18650')
    app.MasseingEditField.Value=mass_total_18650;
    app.VolumeninLEditField.Value=V_ges_18650;
    app.gravEnergiedichteinWhkgEditField.Value=e_ges_grav_18650;
    app.volEnergiedichteinWhLEditField.Value=e_ges_vol_18650;
    app.EnergieinWhEditField.Value=E_ges_18650;
    app.KapazittinAhEditField.Value=capa_jelly_max_18650;
    app.SpannunginVEditField.Value=voltage_ges_18650;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-21700')
    app.MasseingEditField.Value=mass_total_21700;
    app.VolumeninLEditField.Value=V_ges_21700;
    app.gravEnergiedichteinWhkgEditField.Value=e_ges_grav_21700;
    app.volEnergiedichteinWhLEditField.Value=e_ges_vol_21700;
    app.EnergieinWhEditField.Value=E_ges_21700;
    app.KapazittinAhEditField.Value=capa_jelly_max_21700;
    app.SpannunginVEditField.Value=voltage_ges_21700;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Flachwickel')
    app.MasseingEditField.Value=mass_ges_prism_2_1;
    app.VolumeninLEditField.Value=V_ges_prism;
    app.gravEnergiedichteinWhkgEditField.Value=e_ges_grav_prism_2_1;
    app.volEnergiedichteinWhLEditField.Value=e_ges_vol_prism_2_1;
    app.EnergieinWhEditField.Value=E_Jelly_Sheet_prism_2_1;
    app.KapazittinAhEditField.Value=capa_ges_prism_2_1;
    app.SpannunginVEditField.Value=voltage_prism;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Sheets')
    app.MasseingEditField.Value=mass_ges_prism_s;
    app.VolumeninLEditField.Value=V_ges_prism;
    app.gravEnergiedichteinWhkgEditField.Value=e_ges_grav_prism_s;
    app.volEnergiedichteinWhLEditField.Value=e_ges_vol_prism_s;
```

```
app.EnergieinWhEditField.Value=E_prism_s;
app.KapazittinAhEditField.Value=capa_ges_prism_s;
app.SpannunginVEditField.Value=voltage_prism;
end

row={app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value
app.ZellgehuseDropDown.Value app.SpannunginVEditField.Value
app.KapazittinAhEditField.Value
app.EnergieinWhEditField.Value
app.MasseingEditField.Value
app.VolumeninLEditField.Value
app.gravEnergiedichteinWhkgEditField.Value
app.volEnergiedichteinWhLEditField.Value};

row1=app.UITable.Data;
app.UITable.Data=[row;row1];

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Flachwickel')
row2={app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value
app.ZellgehuseDropDown.Value
app.PrismLngeinmmEditField.Value
app.PrismTiefeinmmEditField.Value
app.PrismHheinmmEditField.Value

row3=app.UITable3.Data;
app.UITable3.Data=[row2;row3];
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Sheets')
row2={app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value    app.ZellgehuseDropDown.Value
app.PrismLngeinmmEditField.Value            app.PrismTiefeinmmEditField.Value
app.PrismHheinmmEditField.Value        mass_ges_prism_s      mass_ge-
hause_prism_s mass_elektrolyt_prism_s mass_stack_prism_s};

row3=app.UITable3_2.Data;
app.UITable3_2.Data=[row2;row3];
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Pouch')
```

```
row2={app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value    app.ZellgehuseDropDown.Value  
app.PouchLngeinmmEditField.Value app.PouchTiefeinmmEditField.Value app.Pouch-  
HheinmmEditField.Value mass_ges_pouch mass_gehause_pouch mass_elektro-  
lyt_pouch mass_stack};  
  
row3=app.UITable3_3.Data;  
  
app.UITable3_3.Data=[row2;row3];  
  
end  
  
if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-18650')  
  
row2={app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value    app.ZellgehuseDropDown.Value  
d_18650 h_18650 mass_total_18650 mass_gehause_18650 mass_elektrolyt_18650  
mass_stack_18650};  
  
row3=app.UITable3_4.Data;  
  
app.UITable3_4.Data=[row2;row3];  
  
end  
  
if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-21700')  
  
row2={app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value    app.ZellgehuseDropDown.Value  
d_21700 h_21700 mass_total_21700 mass_gehause_21700 mass_elektrolyt_21700  
mass_stack_21700};  
  
row3=app.UITable3_4.Data;  
  
app.UITable3_4.Data=[row2;row3];  
  
end  
  
  
% Button pushed function: BerechnenButton_3  
  
function BerechnenButton_3Pushed(app, event)  
  
%% Modul-Level  
  
E_Fzg=app.GewnschteEnergiemengeinWhEditField.Value; % Energiebedarf Fahr-  
zeug in Wh  
  
U_Fzg=app.GewnschteNormspannunginVEditField.Value; % Normspannung in V  
  
  
f_nutz=(app.NutzbereichderGesamtenergieinEditText.Value)/100; % genutztes  
Energie-Fenster des Packs in %/100  
  
eta_elek=1; % Elektrischer Antriebsstrang  
  
% Für Inizialisierung in der App
```

```
t_prism=app.PrismTiefeinmmEditField.Value;
h_prism=app.PrismHheinmmEditField.Value;
l_prism=app.PrismLngeinmmEditField.Value;

t_pouch=app.PouchTiefeinmmEditField.Value;
h_pouch=app.PouchHheinmmEditField.Value;
l_pouch=app.PouchLngeinmmEditField.Value;

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Flachwickel')

    U_Zelle=app.SpannunginVEditField.Value;
else if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Sheets')
    U_Zelle=app.SpannunginVEditField.Value;
end
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-18650')
    U_Zelle=app.SpannunginVEditField.Value;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-21700')
    U_Zelle=app.SpannunginVEditField.Value;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Pouch')
    U_Zelle=app.SpannunginVEditField.Value;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Flachwickel')
    capa_Zelle=app.KapazittinAhEditField.Value;
    mass_Zelle=app.MasseingEditField.Value/1000;
else if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Sheets')
    capa_Zelle=app.KapazittinAhEditField.Value;
    mass_Zelle=app.MasseingEditField.Value/1000;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Pouch')
```

```
capa_Zelle=app.KapazittinAhEditField.Value;
mass_Zelle=app.MasseingEditField.Value/1000;
end
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-18650')
    capa_Zelle=app.KapazittinAhEditField.Value;
    mass_Zelle=app.MasseingEditField.Value/1000;
else if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-21700')
    capa_Zelle=app.KapazittinAhEditField.Value;
    mass_Zelle=app.MasseingEditField.Value/1000;
end
end

n_seriell=ceil(U_Fzg/U_Zelle);
capa_Fzg_ges=ceil((E_Fzg/(f_nutz*eta_elek))/U_Fzg);
n_parallel_capa=ceil(capa_Fzg_ges/capa_Zelle);
n_Zellen_ges=n_seriell*n_parallel_capa;
n_Zellen_ges_2=app.GewnschteEnergiemengeinWhEditField.Value/(f_nutz*eta_elek*app.SpannunginVEditField.Value*app.KapazittinAhEditField.Value);

%% Modulauslegung

% Zellverschaltung im Modul (idR Pouch und Prismatisch: <15 ; Rundzelle: <2000)
if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Flachwickel')
    n_Module_Pack=app.AnzahlModuleproPackEditField.Value;
    n_Zellen_M_s=ceil(n_seriell/n_Module_Pack); % Im Pack werden Module zunächst nur seriell verschaltet --> Xs1p
    n_Zellen_M_p=n_parallel_capa; % Für den Anfang wird die Kapazitätsanforderung durch die Module erfüllt
    n_Zellen_Modul=n_Zellen_M_s*n_Zellen_M_p;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Sheets')
    n_Module_Pack=app.AnzahlModuleproPackEditField.Value;
```

```
n_Zellen_M_s=ceil(n_seriell/n_Module_Pack); % Im Pack werden Module zunächst
nur seriell verschaltet --> Xs1p

n_Zellen_M_p=n_parallel_capa; % Für den Anfang wird die Kapazitätsanforderung
durch die Module erfüllt

n_Zellen_Modul=n_Zellen_M_s*n_Zellen_M_p;

end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Pouch')

n_Module_Pack=app.AnzahlModuleproPackEditField.Value; % Im Pack werden Mo-
dule nur seriell verschaltet zunächst --> Xs1p

n_Zellen_M_s=ceil(n_seriell/n_Module_Pack); % Für den Anfang werden alle Zellen
im Modul seriell verschaltet

n_Zellen_M_p=n_parallel_capa; % Für den Anfang wird die Kapazitätsanforderung
durch die Module erfüllt

n_Zellen_Modul=n_Zellen_M_s*n_Zellen_M_p;

end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-18650')

n_Module_Pack=app.AnzahlModuleproPackEditField.Value;

n_Zellen_M_s=ceil(n_seriell/n_Module_Pack);

n_Zellen_M_p=n_parallel_capa; % Für den Anfang wird die Kapazitätsanforderung
durch die Module erfüllt

n_Zellen_Modul=n_Zellen_M_s*n_Zellen_M_p;

end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-21700')

n_Module_Pack=app.AnzahlModuleproPackEditField.Value;

n_Zellen_M_s=ceil(n_seriell/n_Module_Pack);

n_Zellen_M_p=n_parallel_capa;

n_Zellen_Modul=n_Zellen_M_s*n_Zellen_M_p;

end

% Modulgehäuse Prismatisch Flachwickel -- Verkleben der Zellen

d_Modul_Gehause_prism=2; % Dicke des Gehäuse in mm

d_kleben=0.2; % Klebschichtdicke im mm zw. den Prismatischen Zellen

h_circuit_prism=15; % Höhe für Verbindungen

rho_Isoplatte_prism_2=1; % Dichte der Isolationsplatten aus Kunststoff in g/cm3
```

d\_Isoplatte\_prism\_2=2; % Dicke der Isolationsplatten in mm  
 rho\_kuehlplatte=2700; % Dichte Aluminium 6063 kg/m3  
 d\_kuehlplatte=20; % Dicke der Kühlplatte in mm nach "Design and Optimization of Cooling Plate for Battery Module of an Electric Vehicle"  
 b\_elek\_kontakt\_prism\_2=15; % Breite der elektrischen Kontaktierung in mm  
 l\_elek\_kontakt\_prism\_2=t\_prism; % Länge der elektrischen Kontaktierung in mm  
 d\_elek\_kontakt\_prism\_2=1; % Dicke der elektrischen Kontaktierung in mm  
 rho\_nickel=8.19; % Dichte Nickel in g/cm3

$T_{Modul\_prism\_2} = n_{Zellen\_Modul} \cdot t_{prism} + (n_{Zellen\_Modul} - 1) \cdot d_{kleben} + d_{Modul\_Gehause\_prism}^* 2$ ; % in mm

$H_{Modul\_prism\_2} = h_{prism} + d_{Modul\_Gehause\_prism}^* 2 + h_{circuit\_prism}$ ; % in mm

$L_{Modul\_prism\_2} = l_{prism} + d_{Modul\_Gehause\_prism}^* 2$ ; % in mm

$V_{Isoplatte\_prism\_2} = (T_{Modul\_prism\_2} - d_{Modul\_Gehause\_prism}^* 2) * (H_{Modul\_prism\_2} - d_{Modul\_Gehause\_prism}^* 2 - h_{circuit\_prism}) * d_{Isoplatte\_prism\_2}^* 0.5$ ;  
% Volumen in mm3 der Isolationsplatten der Dicke 1 mm jedoch HOHL--> Faktor 0.5

$V_{kuehlplatte\_prism\_2} = (T_{Modul\_prism\_2} - d_{Modul\_Gehause\_prism}^* 2) * (L_{Modul\_prism\_2} - d_{Modul\_Gehause\_prism}^* 2) * d_{kuehlplatte}^* 0.5$ ;

$mass_{elek\_kontakt\_prism\_2} = (l_{elek\_kontakt\_prism\_2} * b_{elek\_kontakt\_prism\_2} * d_{elek\_kontakt\_prism\_2}) / 1000 * (\rho_{nickel} / 1000) * ((n_{Zellen\_M\_p} - 1) + (n_{Zellen\_M\_s} - 1))$ ; % Masse der elektrischen Kontaktierung in kg

$mass_{Isoplatte\_prism\_2} = (\rho_{Isoplatte\_prism\_2} / 1000) * (V_{Isoplatte\_prism\_2} / 1000)$ ;% Masse einer Isoplatte in kg

$mass_{kuehlplatte\_prism\_2} = (V_{kuehlplatte\_prism\_2} * 10^{-9}) * \rho_{kuehlplatte}$ ; % Masse der Kühlplatte in kg

$mass_{Modul\_prism\_2} = (\rho_{alu} / 1000) * (T_{Modul\_prism\_2} * H_{Modul\_prism\_2} * L_{Modul\_prism\_2}) / 1000 - (\rho_{alu} / 1000) * ((T_{Modul\_prism\_2} - 2 * d_{Modul\_Gehause\_prism}) * (H_{Modul\_prism\_2} - 2 * d_{Modul\_Gehause\_prism}) * (L_{Modul\_prism\_2} - 2 * d_{Modul\_Gehause\_prism})) / 1000 + mass_{Zelle} * n_{Zellen\_Modul} + mass_{Isoplatte\_prism\_2} * 2 + mass_{kuehlplatte\_prism\_2} + mass_{kuehlplatte\_prism\_2} + mass_{elek\_kontakt\_prism\_2}$ ; % Masse in kg  
% Modulgehäuse Prismatisch Sheets -- Verkleben der Zellen

```
d_Modul_Gehause_prism=2; % Dicke des Gehäuse in mm
d_kleben=0.2; % Klebschichtdicke im mm zw. den Prismatischen Zellen
h_circuit_prism=15; % Höhe für Verbindungen
rho_Isoplatte_prism_s=1; % Dichte der Isolationsplatten aus Kunststoff in g/cm3
d_Isoplatte_prism_s=2; % Dicke der Isolationsplatten in mm
b_elek_kontakt_prism_s=15; % Breite der elektrischen Kontaktierung in mm
l_elek_kontakt_prism_s=t_prism; % Länge der elektrischen Kontaktierung in mm
d_elek_kontakt_prism_s=2; % Dicke der elektrischen Kontaktierung in mm

T_Modul_prism_s=n_Zellen_Modul*t_prism+(n_Zellen_Modul-1)*d_kleben+d_Modul_Gehause_prism*2; % in mm
H_Modul_prism_s=h_prism+d_Modul_Gehause_prism*2+h_circuit_prism; % in mm
L_Modul_prism_s=l_prism+d_Modul_Gehause_prism*2; % in mm
V_Isoplatte_prism_s=(T_Modul_prism_s-d_Modul_Gehause_prism*2)*(H_Modul_prism_s-d_Modul_Gehause_prism*2-h_circuit_prism)*d_Isoplatte_prism_s; % Volumen in mm3 der Isolationsplatten der Dicke 1 mm
V_kuehlplatte_prism_s=(T_Modul_prism_s-d_Modul_Gehause_prism*2)*(L_Modul_prism_s-d_Modul_Gehause_prism)*d_kuehlplatte*0.5;
mass_elek_kontakt_prism_s=((l_elek_kontakt_prism_s*b_elek_kontakt_prism_s*d_elek_kontakt_prism_s)/1000)*(rho_nickel/1000)*((n_Zellen_M_p-1)+(n_Zellen_M_s-1)); % Masse der elektrischen Kontaktierung in kg
mass_Isoplatte_prism_s=(rho_Isoplatte_prism_s/1000)*(V_Isoplatte_prism_s/1000);
mass_kuehlplatte_prism_s=(V_kuehlplatte_prism_s*10^-9)*rho_kuehlplatte; % Masse der Kühlplatte in kg

mass_Modul_prism_s=(rho_alu/1000)*(T_Modul_prism_s*H_Modul_prism_s*L_Modul_prism_s)/1000-(rho_alu/1000)*((T_Modul_prism_s-2*d_Modul_Gehause_prism)*(H_Modul_prism_s-2*d_Modul_Gehause_prism)*(L_Modul_prism_s-2*d_Modul_Gehause_prism))/1000+mass_Zelle*n_Zellen_Modul+mass_Isoplatte_prism_s*2+mass_kuehlplatte_prism_s+mass_elek_kontakt_prism_s; % Masse in kg

% Modulgehäuse Pouch -- Verpannen der Zellen
d_Modul_Gehause_pouch=2; % Dicke des Gehäuse in mm
h_circuit_pouch=15; % Höhe für Verbindungen
```

```

rho_Isoplatte_pouch=1;    % Dichte der Isolationsplatten aus Kunststoff in g/cm3
d_Isoplatte_pouch=2;    % Dicke der Isolationsplatten in mm
b_elek_kontakt_pouch=15;      % Breite der elektrischen Kontaktierung in mm
l_elek_kontakt_pouch=t_pouch;  % Länge der elektrischen Kontaktierung in mm
d_elek_kontakt_pouch=1;      % Dicke der elektrischen Kontaktierung in mm
T_Modul_pouch=n_Zellen_Modul*t_pouch+d_Modul_Gehause_pouch*2; % in mm
H_Modul_pouch=h_pouch+d_Modul_Gehause_pouch*2+h_circuit_pouch; % in mm
L_Modul_pouch=l_pouch+d_Modul_Gehause_pouch*2; % in mm
V_kuehlplatte_pouch=(T_Modul_pouch-d_Modul_Gehause_pouch*2)*(L_Modul_pouch-d_Modul_Gehause_pouch)*d_kuehlplatte*0.5;
V_Isoplatte_pouch=(T_Modul_pouch-d_Modul_Gehause_pouch*2)*(H_Modul_pouch-d_Modul_Gehause_pouch*2-h_circuit_pouch)*d_Isoplatte_pouch; % Volumen in mm3 der Isolationsplatten der Dicke 1 mm

mass_elek_kontakt_pouch=((l_elek_kontakt_pouch*b_elek_kontakt_pouch*d_elek_kontakt_pouch)/1000)*(rho_nickel/1000)*((n_Zellen_M_p-1)+(n_Zellen_M_s-1)); % Masse der elektrischen Kontaktierung in kg
mass_Isoplatte_pouch=(rho_Isoplatte_pouch/1000)*(V_Isoplatte_pouch/1000);      % Masse der Isolationsplatten in kg
mass_kuehlplatte_pouch=(V_kuehlplatte_pouch*10^-9)*rho_kuehlplatte;      % Masse der Kühlplatte in kg
mass_Modul_pouch=(rho_alu/1000)*(T_Modul_pouch*H_Modul_pouch*L_Modul_pouch)/1000-(rho_alu/1000)*((T_Modul_pouch-2*d_Modul_Gehause_pouch)*(H_Modul_pouch-2*d_Modul_Gehause_pouch)*(L_Modul_pouch-2*d_Modul_Gehause_pouch))/1000+mass_Zelle*n_Zellen_Modul+mass_Isoplatte_pouch*2+mass_elek_kontakt_pouch+mass_kuehlplatte_pouch; % Masse in kg

% Modulgehäuse Rundzelle 18650 -- Zellhalter
d_elek_kontakt=1;      % Dicke der elektrischen Kontaktierung in mm
rho_nickel=8.9;        % Dichte der elektrischen Kontaktierung in g/cm3
d_Modul_Gehause_Rund=2; % Dicke des Gehäuse in mm
h_circuit_Rund_18650=15; % Höhe für Verbindungen
rho_Isoplatte_Rund_18650=1; % Dichte der Isolationsplatten aus Kunststoff in g/cm3

```

$d\_Isoplatte\_Rund\_18650=2;$  % Dicke der Isolationsplatten in mm  
 $l\_elek\_kontakt\_Rund\_18650=d\_18650;$  % Länge der elektrischen Kontaktierung in mm  
 $b\_elek\_kontakt\_Rund\_18650=10;$  % Breite der elektrischen Kontaktierung in mm

$L\_Modul\_Rund\_18650=n\_Zellen\_M\_s*(2*d\_18650/2)+d\_18650/2+2*d\_Modul\_Gehause\_Rund;$  % in mm  
 $T\_Modul\_Rund\_18650=d\_18650/2+sqrt(3)*(d\_18650/2)*(n\_Zellen\_M\_p-1)+d\_18650/2+2*d\_Modul\_Gehause\_Rund;$  % in mm  
 $H\_Modul\_Rund\_18650=h\_18650+2*d\_Modul\_Gehause\_Rund+h\_circuit\_Rund\_18650;$  % in mm

$V\_kuehlplatte\_Rund\_18650=(T\_Modul\_Rund\_18650-d\_Modul\_Gehause\_Rund*2)*(L\_Modul\_Rund\_18650-d\_Modul\_Gehause\_Rund)*d\_kuehlplatte*0.5;$   
 $V\_Isoplatte\_Rund\_18650=(T\_Modul\_Rund\_18650-d\_Modul\_Gehause\_Rund*2)*(H\_Modul\_Rund\_18650-d\_Modul\_Gehause\_Rund*2-h\_circuit\_Rund\_18650)*d\_Isoplatte\_Rund\_18650;$  % Volumen in mm<sup>3</sup> der Isolationsplatten der Dicke 1 mm

$mass\_kuehlplatte\_Rund\_18650=(V\_kuehlplatte\_Rund\_18650*10^-9)*rho\_kuehlplatte;$  % Masse der Kühlplatte in kg  
 $mass\_elek\_kontakt\_Rund\_18650=((l\_elek\_kontakt\_Rund\_18650*b\_elek\_kontakt\_Rund\_18650*d\_elek\_kontakt)/1000)*(rho\_nickel/1000)*((n\_Zellen\_M\_p-1)+(n\_Zellen\_M\_s-1));$  % Masse der elektrischen Kontaktierung in kg  
 $mass\_Isoplatte\_Rund\_18650=(rho\_Isoplatte\_Rund\_18650/1000)*(V\_Isoplatte\_Rund\_18650/1000);$  % Masse einer Isolationsplatte in kg

$mass\_Modul\_Rund\_18650=(rho\_alu/1000)*(T\_Modul\_Rund\_18650*H\_Modul\_Rund\_18650*L\_Modul\_Rund\_18650)/1000-(rho\_alu/1000)*((T\_Modul\_Rund\_18650-2*d\_Modul\_Gehause\_Rund)*(H\_Modul\_Rund\_18650-2*d\_Modul\_Gehause\_Rund)*(L\_Modul\_Rund\_18650-2*d\_Modul\_Gehause\_Rund))/1000+mass\_Zelle*n\_Zellen\_Modul+mass\_elek\_kontakt\_Rund\_18650+mass\_Isoplatte\_Rund\_18650*2+mass\_kuehlplatte\_Rund\_18650;$   
% Masse in kg

% Modulgehäuse Rundzelle 21700 -- Verklebung (oder Zellhalter)

```
d_Modul_Gehause_Rund=2; % Dicke des Gehäuse in mm
h_circuit_Rund_21700=15; % Höhe für Verbindungen
rho_Isoplatte_Rund_21700=1; % Dichte der Isolationsplatten aus Kunststoff in g/cm3
d_Isoplatte_Rund_21700=2; % Dicke der Isolationsplatten in mm
l_elek_kontakt_Rund_21700=d_21700; % Länge der elektrischen Kontaktierung in mm
b_elek_kontakt_Rund_21700=15; % Breite der elektrischen Kontaktierung in mm

L_Modul_Rund_21700=n_Zellen_M_s*(2*d_21700/2)+d_21700/2+2*d_Modul_Gehause_Rund;
T_Modul_Rund_21700=d_21700/2+sqrt(3)*(d_21700/2)*(n_Zellen_M_p-1)+d_21700/2+2*d_Modul_Gehause_Rund;
H_Modul_Rund_21700=h_21700+2*d_Modul_Gehause_Rund+h_circuit_Rund_21700;

V_kuehlplatte_Rund_21700=(T_Modul_Rund_21700-d_Modul_Gehause_Rund*2)*(L_Modul_Rund_21700-d_Modul_Gehause_Rund)*d_kuehlplatte*0.5; % !Keine Homogene Platte
V_Isoplatte_Rund_21700=(T_Modul_Rund_21700-d_Modul_Gehause_Rund*2)*(H_Modul_Rund_21700-d_Modul_Gehause_Rund*2-h_circuit_Rund_21700)*d_Isoplatte_Rund_21700; % Volumen in mm3 der Isolationsplatten der Dicke 1 mm
mass_elek_kontakt_Rund_21700=((l_elek_kontakt_Rund_21700*b_elek_kontakt_Rund_21700*d_elek_kontakt)/1000)*(rho_nickel/1000)
*((n_Zellen_M_p-1)+(n_Zellen_M_s-1)); % Masse der elektrischen Kontaktierung in kg

mass_Isoplatte_Rund_21700=(rho_Isoplatte_Rund_21700/1000)*(V_Isoplatte_Rund_21700/1000); % Masse einer Isolationsplatte in kg
mass_kuehlplatte_Rund_21700=(V_kuehlplatte_Rund_21700*10^-9)*rho_kuehlplatte; % Masse der Kühlplatte in kg
mass_Modul_Rund_21700=(rho_alu/1000)*(T_Modul_Rund_21700*H_Modul_Rund_21700*L_Modul_Rund_21700)/1000-(rho_alu/1000)*((T_Modul_Rund_21700-2*d_Modul_Gehause_Rund)*(H_Modul_Rund_21700-2*d_Modul_Gehause_Rund)*(L_Modul_Rund_21700-2*d_Modul_Gehause_Rund))/1000+mass_Zelle*n_Zellen_Modul+mass_Isoplatte_Rund_21700*2+mass_kuehlplatte_Rund_21700; % Masse in kg
```

```
%% Technische Daten des Moduls

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Flachwickel')
mass_Modul=mass_Modul_prism_2;
app.L_Modul=L_Modul_prism_2;
app.H_Modul=H_Modul_prism_2;
app.T_Modul=T_Modul_prism_2;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Prismatisch-Sheets')
mass_Modul=mass_Modul_prism_s;
app.L_Modul=L_Modul_prism_s;
app.H_Modul=H_Modul_prism_s;
app.T_Modul=T_Modul_prism_s;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Pouch')
mass_Modul=mass_Modul_pouch;
app.L_Modul=L_Modul_pouch;
app.H_Modul=H_Modul_pouch;
app.T_Modul=T_Modul_pouch;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-18650')
mass_Modul=mass_Modul_Rund_18650;
app.L_Modul=L_Modul_Rund_18650;
app.H_Modul=H_Modul_Rund_18650;
app.T_Modul=T_Modul_Rund_18650;
end

if strcmp(app.ZellgehuseDropDown.Value,'Rundzelle-21700')
mass_Modul=mass_Modul_Rund_21700;
app.L_Modul=L_Modul_Rund_21700;
app.H_Modul=H_Modul_Rund_21700;
app.T_Modul=T_Modul_Rund_21700;
```

```
end

%% Packauslegung
L_Bauraum=app.BauraumLngeinmmEditField.Value; % 1000
T_Bauraum=app.BauraumTiefeinmmEditField.Value*0.8; % 2000 80% genutzt für
Module
T_Bauraum_ges=app.BauraumTiefeinmmEditField.Value;
H_Bauraum=app.BauraumHheinmmEditField.Value; % 300

% notw. Bedingung: Anzahl max. Module im Bauraum > Anzahl gewünschte Module
pro Pack

A_Modul=app.L_Modul*app.T_Modul;
A_Bauraum=L_Bauraum*T_Bauraum; % ca. 20% für andere Komponenten als Mo-
dule genutzt
n_max_Modul=floor(A_Bauraum/A_Modul);
app.MaxmglAnzanModulenimverfgBauraumEditField.Value=n_max_Modul;
n_Module_Pack=app.AnzahlModuleproPackEditField.Value;

if n_Module_Pack>n_max_Modul
    app.HinweisTextArea_3.Value='NICHT ERFÜLLT! Gewünschte Anzahl an Modulen
    kann geom. bedingt (A_Module_ges>A_Bauraum) nicht in vorgegeben Bauraum inte-
    griert werden';
else
    app.HinweisTextArea_3.Value='ERFÜLLT! Gewünschte Anzahl an Modulen kann
    geom. bedingt (A_Module_ges<A_Bauraum) in vorgegebenen Bauraum integriert wer-
    den';
end

% Ausrichtung 1: x_M auf x_B und y_M auf y_B
if isprime(n_Module_Pack)>0
    app.HinweisTextArea_3.Value='Module können nicht in Rechteck-Form angeordet
    werden, da gewünschte Anzahl an Modulen einer Primzahl entspricht. Bitte ändern Sie
    im Modul-Level die Anzahl der Module pro Pack!';
end
```

```
% Wieviele Module lassen sich geometrisch in Ausrichtung 1 in Richtung x_B und y_B  
anordnen  
  
n_M_xx_B_max=floor(L_Bauraum/app.L_Modul);  
  
n_M_yy_B_max=floor(T_Bauraum/app.T_Modul);  
  
n_M_xxxy_B=n_M_xx_B_max*n_M_yy_B_max;  
  
% Wieviele Module lassen sich geometrisch in Ausrichtung 2 in Richtung x_B und y_B  
anordnen  
  
n_M_xy_B_max=floor(L_Bauraum/app.T_Modul);  
  
n_M_yx_B_max=floor(T_Bauraum/app.L_Modul);  
  
n_M_xyxy_B=n_M_xy_B_max*n_M_yx_B_max;  
  
% Algorithmus für die Anzahl an Modulen je Richtung  
  
if n_M_xx_B_max>n_M_yy_B_max  
  
while rem(n_Module_Pack,n_M_xx_B_max)>0  
  
n_M_xx_B_max=n_M_xx_B_max-1;  
  
end  
  
n_M_yy_B_max=n_Module_Pack/n_M_xx_B_max;  
  
else  
  
while rem(n_Module_Pack,n_M_yy_B_max)>0  
  
n_M_yy_B_max=n_M_yy_B_max-1;  
  
end  
  
n_M_xx_B_max=n_Module_Pack/n_M_yy_B_max;  
  
end  
  
if n_M_xy_B_max>n_M_yx_B_max  
  
while rem(n_Module_Pack,n_M_xy_B_max)>0  
  
n_M_xy_B_max=n_M_xy_B_max-1;  
  
end  
  
n_M_yx_B_max=n_Module_Pack/n_M_xy_B_max;  
  
else  
  
while rem(n_Module_Pack,n_M_yx_B_max)>0  
  
n_M_yx_B_max=n_M_yx_B_max-1;  
  
end
```

```
n_M_xy_B_max=n_Module_Pack/n_M_yx_B_max;  
end  
  
T_erf_Bauraum_xxxy=n_M_xx_B_max*app.T_Modul;  
L_erf_Bauraum_xxxy=n_M_yy_B_max*app.L_Modul;  
app.AnzahlModuleinxinmmEditField.Value=n_M_xx_B_max;  
app.AnzahlModuleinyinmmEditField.Value=n_M_yy_B_max;  
L_erf_Bauraum_xyyx=n_M_xy_B_max*app.T_Modul;  
T_erf_Bauraum_xyyx=n_M_yx_B_max*app.L_Modul;  
app.AnzahlModuleinxinmmEditField.Value=n_M_xy_B_max;  
app.AnzahlModuleinyxinmmEditField.Value=n_M_yx_B_max;  
% Maße Pack resultierend  
d_Pack_Gehause=5; % in mm  
rho_alu=2.7; % in g/cm3  
% Anordnung 1  
L_Pack_Res_xxxy=L_erf_Bauraum_xxxy+2*d_Pack_Gehause;  
T_Pack_Res_xxxy=T_erf_Bauraum_xxxy*1.2+2*d_Pack_Gehause; % 20% Zuschlag  
für weitere Komponenten  
% Anordnung 2  
L_Pack_Res_xyyx=L_erf_Bauraum_xyyx+2*d_Pack_Gehause;  
T_Pack_Res_xyyx=T_erf_Bauraum_xyyx*1.2+2*d_Pack_Gehause; % 20% Zu-  
schlag für weitere Komponenten  
H_Pack_Res=app.H_Modul+30+2*d_Pack_Gehause; % Höhe des Packs mit 30mm  
Freiraum + Deckel (2mm) + Boden (2mm)  
  
% Hinreichende Bedingung 2: Resultierende Länge und Tiefe der Module in Anordnung  
1 < max. vorgegebene BauraumLänge-/Tiefe?  
hinrBed2_1_xxxy=false;  
hinrBed2_2_xxxy=false;  
hinrBed2_1_xyyx=false;  
hinrBed2_2_xyyx=false;  
if L_Pack_Res_xxxy<=L_Bauraum && T_Pack_Res_xxxy<=T_Bauraum*1.25 ||  
L_Pack_Res_xxxy<=T_Bauraum*1.25 && T_Pack_Res_xxxy<=L_Bauraum  
hinrBed2_1_xxxy=true;
```

```
end

if hinrBed2_1_xxxy==true %&& n_M_xxxy_B>=n_Module_Pack
    app.Anordnung1xxEditField.Value='Realisierbar!';
else app.Anordnung1xxEditField.Value='Nicht realisierbar!';
end

if      L_Pack_Res_xyyx<=app.BauraumLngeinmmEditField.Value      &&
T_Pack_Res_xyyx<=T_Bauraum_ges || L_Pack_Res_xyyx<=T_Bauraum_ges &&
T_Pack_Res_xyyx<=app.BauraumLngeinmmEditField.Value
    hinrBed2_1_xyyx=true;
end

if hinrBed2_1_xyyx==true %&& n_M_xyyx_B>=n_Module_Pack
    app.Anordnung2xyEditField.Value='Realisierbar!';
else app.Anordnung2xyEditField.Value='Nicht realisierbar!';
end

%% Pack-Masse/Konstruktion
mass_BMS=8.5; % Masse in kg
mass_CoolingSystem=8.9; % Masse Kühlsystem
%Anordnung 1
mass_gehause_Pack_An1=(rho_alu/1000)*(((L_Pack_Res_xxxy+2*d_Pack_Gehause)*(T_Pack_Res_xxxy+2*d_Pack_Gehause)*(H_Pack_Res +2*d_Pack_Gehause))/1000-(L_Pack_Res_xxxy*T_Pack_Res_xxxy*H_Pack_Res)/1000);
mass_Pack_An1=mass_BMS+mass_CoolingSystem+app.ModulGewichtinkgEditField.Value*app.AnzahlModuleproPackEditField.Value+mass_gehause_Pack_An1;
Volumen_Pack_An1=1.2*(L_Pack_Res_xxxy*T_Pack_Res_xxxy*H_Pack_Res/1000);
% Zuschlag von 20% durch weitere Komponenten
%Anordnung 2
mass_gehause_Pack_An2=(rho_alu/1000)*(((L_Pack_Res_xyyx+2*d_Pack_Gehause)*(T_Pack_Res_xyyx+2*d_Pack_Gehause)*(H_Pack_Res +2*d_Pack_Gehause))/1000-(L_Pack_Res_xyyx*T_Pack_Res_xyyx*H_Pack_Res)/1000);
```

```
mass_Pack_An2=mass_BMS+mass_CoolingSystem+app.ModulGewichtinkgEdit-
Field.Value*app.AnzahlModuleproPackEditField.Value+mass_gehause_Pack_An2;
Volumen_Pack_An2=1.2*(L_Pack_Res_xyx*T_Pack_Res_xyx*H_Pack_Res/1000);
% Zuschlag von 20% durch weitere Komponenten
U_Modul=app.ModulNormspannunginVEditField.Value;
Capa_Modul=app.ModulKapazittinAhEditField.Value;
U_Pack=n_Module_Pack*app.ModulNormspannunginVEditField.Value;
Capa_Pack=Capa_Modul;
E_Pack=app.AnzahlModuleproPackEditField.Value*app.ModulNormspannungin-
VEditField.Value*app.ModulKapazittinAhEditField.Value;

% Button pushed function: EffizienzindexberechnenButton
function EffizienzindexberechnenButtonPushed(app, event)
app.PackGravEnergiedichteinWhkgEditField.Value app.PackVolEnergiedichteinWh-
LEditField_2.Value s l k ; app.AktivmaterialKathodeDropDown.Value app.Zellge-
huseDropDown.Value app.Anordnung2xyEditField.Value app.PackGravEnergiedicht-
einWhkgEditField_2.Value app.PackVolEnergiedichteinWhLEditField_2.Value s l k};
T=app.UITable5_4.Data;
T_table=cell2table(T);
Ta=table2array(T_table(:,4:10)); %Ta=table2array(T_table(:,3:6));
matrix=Ta; % Entscheidungsmatrix
sumDmm=sum(matrix.^2); % Spaltensumme
nw=sqrt(sumDmm); % Normierungswert
normmatrix=matrix./nw; % normierte Matrix
gw=[app.gravEnergiedichtetedesPacksSlider.Value app.volEnergiedichtetedesPacksSli-
der.Value app.EffizienzPackZellegravimetischSlider.Value app.EffizienzPack
ZellevolumerischSlider.Value app.SicherheitbezaufZellchemieSlider.Value app.Le
bensdauerbezaufZellchemieSlider.Value app.KostenbezaufZellchemieSlider.Va
lue]; % Gewichtungswerte je Spalte

gmatrix=normmatrix.*gw; % Gewichtete Matrix
Aneg=min(gmatrix(:,::));
Apos=max(gmatrix(:,::));
Anegmatrix=repmat(Aneg,size(matrix,1),1);
```

```
Aposmatrix=repmat(Apos,size(matrix,1),1);  
Sminmatrix=gmatrix-Aneg;  
Sminmatrix2=Sminmatrix.^2;  
sumSminmatrix2=sum(Sminmatrix2,2);  
sqrtsumSminmatrix2=sqrt(sumSminmatrix2);  
Smin=sqrt(sum(Sminmatrix2,2));  
Smaxmatrix=gmatrix-Apos;  
Smaxmatrix2=Smaxmatrix.^2;  
sumSmaxmatrix2=sum(Smaxmatrix2,2);  
sqrtsumSmaxmatrix2=sqrt(sumSmaxmatrix2);  
Smax=sqrt(sum(Smaxmatrix2,2));  
Srel=Smin./(Smin+Smax);  
app.UITable5_5.Data=Srel;  
  
%Ende
```

#### **A.4. Archivierung der Arbeit**

Die Arbeit wird nach dem Prozess im PEM-Wiki archiviert.

## **VII Eidesstattliche Versicherung**

Die Eidesstattliche Versicherung befindet sich unterschrieben auf den nachfolgenden Seiten.

# Eidesstattliche Versicherung

## Statutory Declaration in Lieu of an Oath

Singh, Ramandeep

344846

Name, Vorname/Last Name, First Name

Matrikelnummer (freiwillige Angabe)

Matriculation No. (optional)

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit/Bachelorarbeit/  
Masterarbeit\* mit dem Titel

I hereby declare in lieu of an oath that I have completed the present paper/Bachelor thesis/Master thesis\* entitled

-- Entwicklung eines Tools für die anwendungsspezifische Zellauswahl für

Elektrofahrzeuge nach dem Bottom-Up-Prinzip --

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.

independently and without illegitimate assistance from third parties. I have used no other than the specified sources and aids. In case that the thesis is additionally submitted in an electronic format, I declare that the written and electronic versions are fully identical. The thesis has not been submitted to any examination body in this, or similar, form.

Aachen, den 17.02.2021

Ort, Datum/City, Date



Unterschrift/Signature

\*Nichtzutreffendes bitte streichen

\*Please delete as appropriate

**Belehrung:**

Official Notification:

**§ 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.

**Para. 156 StGB (German Criminal Code): False Statutory Declarations**

Whoever before a public authority competent to administer statutory declarations falsely makes such a declaration or falsely testifies while referring to such a declaration shall be liable to imprisonment not exceeding three years or a fine.

**§ 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.

**Para. 161 StGB (German Criminal Code): False Statutory Declarations Due to Negligence**

(1) If a person commits one of the offences listed in sections 154 through 156 negligently the penalty shall be imprisonment not exceeding one year or a fine.

(2) The offender shall be exempt from liability if he or she corrects their false testimony in time. The provisions of section 158 (2) and (3) shall apply accordingly.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

I have read and understood the above official notification:

Aachen, den 17.02.2021

Ort, Datum/City, Date

  
Unterschrift/Signature