

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

Masterarbeit

Name: Domenic Klohs

Matr.-Nr.: 309355

Thema: Konzeptentwicklung und Konstruktion modulärer Lithium-Ionen-Rundzellen für Elektrofahrzeuge

Betreuer Assistent: Hendrik Löbberding, M.Sc.

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

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

Aachen, den 29.10.2020

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	iii
III	Abkürzungen.....	iv
IV	Abbildungsverzeichnis.....	v
V	Tabellenverzeichnis.....	vii
1	Einführung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Aufbau und Methodik der Arbeit.....	2
2	Produktentwicklung von Batterien für den automobilen Anwendungsfall.....	5
2.1	Grundlagen der Produktentwicklung	5
2.1.1	Der Produktentstehungsprozess	5
2.1.2	Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess.....	7
2.1.3	Methoden in der Produktentwicklung und Konstruktion	10
2.2	Stand der Technik von Lithium-Ionen-Batterien.....	17
2.2.1	Grundlegender Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen.....	17
2.2.2	Zelltypen für den Einsatz in elektrischen Fahrzeuganwendungen	21
2.2.3	Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batteriezellen	24
2.2.4	Aufbau und Bauteile von Lithium-Ionen-Rundzellen	27
3	Produktplanungsphase der Li-Ionen-Rundzelle	41
3.1	Technische Analyse relevanter Wettbewerberprodukte.....	42
3.2	Untersuchung der Produktstruktur auf Abhängigkeiten	48
3.3	Ausarbeitung der Anforderungsliste	50
4	Konzeptionsphase der Li-Ionen-Rundzelle.....	53
4.1	Produktstruktur und Modularitätskonzept der Bauteile	53
4.2	Definition der Zellausprägungen	55
4.2.1	Merkmale der Sicherheitsvariante	58
4.2.2	Merkmale der Energievariante.....	59
4.2.3	Merkmale der Leistungsvariante.....	60
5	Konstruktions-/Entwurfsphase der Li-Ionen-Rundzelle.....	62
5.1	Vorläufiger Konstruktionsentwurf.....	62

5.1.1	Entwurf der Sicherheitsvariante	62
5.1.2	Entwurf der Energievariante	73
5.1.3	Entwurf der Leistungsvariante	77
5.2	Simulationen und endgültiger Konstruktionsentwurf	82
5.2.1	Belastungs- und Fluidsimulationen	82
5.2.2	Ergebnisvalidierung und abschließende Konstruktion	85
6	Abschließende Betrachtung	88
6.1	Zusammenfassung der Arbeit	88
6.2	Kritische Reflexion des Vorgehens.....	89
6.3	Forschungsbedarf und Ausblick	91
VI	Literaturverzeichnis.....	93
VII	Anhang	98

II Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$d_{AB,\text{außen}}$	μm	Außenbeschichtungsdicke der Anodenfolie
$d_{AB,\text{innen}}$	μm	Innenbeschichtungsdicke der Anodenfolie
d_{AF}	μm	Anodenfoliendicke
d_w	μm	Windungsdicke
D	μm	Windungsabstand
D_φ		diffusiver Fluss von φ
E	N/m^2	Elastizitätsmodul
F_N	N	Normalkraft
F_φ		konvektiver Fluss von φ
I	A	Stromstärke
Q	J	Wärme
Q_φ		Quellen und Senken von φ
r		Radialkoordinate
R_{Kern}	mm	Kernradius
r_0		initialer Radius
R	Ω	Innenwiderstand
U	V	Spannung
$W_{KF,\text{Anode}}$		Kompressionsfaktor der Anodenbeschichtung
ε		Dehnung
θ		Winkelkoordinate
ρ	kg/m^3	Dichte
σ_z	N/m^2	Zugspannung
φ		Strömungsgröße (z.B. Strömungsgeschwindigkeit oder Temperatur)

III Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
BMS	engl. „Battery Management System“
CAD	engl. „Computer-Aided Design“
CFD	engl. „Computational Fluid Dynamics“
CID	engl. „Current Interrupt Device“
DSM	engl. „Design Structure Matrix“
EKP	Entwicklungs- und Konstruktionsprozess
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
Li-Ionen	Lithium-Ionen
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
MO	Metalloxide
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
NCM	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
NWA	Nutzwertanalyse
PCB	engl. „Printed Circuit Board“
PEP	Produktentstehungsprozess
PKW	Personenkraftwagen
PTC	engl. „Positive Temperature Coefficient“
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
z.B.	zum Beispiel

IV Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Produktentstehungsprozess (PEP) mit begleitenden Prozessen.....	7
Abbildung 2.2: Wasserfallmodell der vier Phasen des Konstruktionsprozesses.....	8
Abbildung 2.3: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221).....	10
Abbildung 2.4: Graphisch dargestellter Produktstrukturplan	12
Abbildung 2.5: Integrationsebenen des Lithium-Ionen-Hochvoltspeichers	18
Abbildung 2.6: Grundlegende Aufbaustruktur des Batterie-Management-Systems.....	20
Abbildung 2.7: Grundlegende Unterteilung von Zellen in drei Klassen.....	21
Abbildung 2.8: Vereinfachte Darstellung der drei Zelltypen für Elektrofahrzeuge	22
Abbildung 2.9: Energieausprägungen unterschiedlicher Batterietechnologien.....	24
Abbildung 2.10: Transport der Lithium-Ionen beim Laden und Entladen.....	26
Abbildung 2.11: Übersicht der wichtigsten Bauteile einer Li-Ionen-Rundzelle.....	28
Abbildung 2.12: Einkerbungsvarianten am Gehäusebecher	29
Abbildung 2.13: Querschnitt der Wickelschichten einer Rundzelle.....	30
Abbildung 2.14: Archimedische Spirale als Grundlage der Wickelungsdarstellung	32
Abbildung 2.15: Ausprägungsmöglichkeiten des Wickeldorns	33
Abbildung 2.16: Möglichkeiten der Ableiteranordnung am Wickel.....	35
Abbildung 2.17: Schnittansicht des CID innerhalb der Kopfbaugruppe	37
Abbildung 3.1: Konkreter Ablaufplan der zu durchlaufenden Prozessphasen	41
Abbildung 3.2: Analyse der Wettbewerberzellen durch Reverse Engineering.....	43
Abbildung 3.3: Beziehungen und Abhängigkeiten grundlegender Bauteilmerkmale.....	49
Abbildung 4.1: Produktstrukturplan der Lithium-Ionen-Rundzelle	54
Abbildung 4.2: Aufbauerläuterung des morphologischen Kastens mit Nutzwertanalyse	56

Abbildung 5.1: Übersicht der besonderen Merkmale der Sicherheitsvariante	63
Abbildung 5.2: Eckpunkte der Wickelkonstruktion	65
Abbildung 5.3: Konstruktive Auslegung des Wickeldorns der Sicherheitszelle.....	67
Abbildung 5.4: Konstruktion und Modellierung des Gehäusebechers	69
Abbildung 5.5: Bauteilübersicht der Kopfbaugruppe für die Sicherheitszelle.....	70
Abbildung 5.6: Aufbau der Abstandshalter für Plus- und Minuspol	72
Abbildung 5.7: Übersicht der besonderen Merkmale der Energievariante.....	74
Abbildung 5.8: Hervorgehobene Ansicht der integrierten CID-Terminal-Konstruktion	75
Abbildung 5.9: Designbedingtes Einsparungspotential der Energiezelle.....	77
Abbildung 5.10: Übersicht der besonderen Merkmale der Leistungsvariante.....	78
Abbildung 5.11: Ableiterkühlkreislauf im Inneren der Leistungszelle	80
Abbildung 5.12: Ableiteranordnung und -geometrie der Leistungszelle	82
Abbildung 5.13: Statische Druckbelastung des Gehäusebodens der Sicherheitszelle	83
Abbildung 5.14: Ansteigende Druckbelastung der Sicherheits- und Energiezelle	84
Abbildung 5.15: CFD-Simulation des alten und neuen Kühlkörpers im Vergleich	85
Abbildung 5.16: Änderung des Konstruktionsdesigns der Kühlkörper.....	86
Abbildung 6.1: Rückblickende Einschätzung der Vorgehensparameter	91
Abbildung VII.1: Beziehungsmatrix (DSM) der Bauteile einer Lithium-Ionen-Rundzelle	98

V Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Auszug eines morphologischen Kastens für die PKW-Auslegung	13
Tabelle 2.2: Beispiel einer Nutzwertanalyse (NWA).....	13
Tabelle 2.3: Darstellung einer binären Design-Structure-Matrix (DSM).....	14
Tabelle 2.4: Vergleich der verwendeten Zelltypen verschiedenen Fahrzeugmodelle	23
Tabelle 2.5: Alternative Kathodenmaterialien zu Lithium-Kobalt-Oxid.....	26
Tabelle 3.1: Aufstellung der Zelldaten und Abmaße des Gehäuses.....	44
Tabelle 3.2: Abmaße von Elementen der Kopfbaugruppe und des Isolationsrings	45
Tabelle 3.3: Abmaße und Positionen der Kathoden- und Anodenableiter	46
Tabelle 3.4: Abmaße und Aufbau von Elektrodenfolien und Abstandshaltern.....	47
Tabelle 3.5: Auszug der Abhängigkeitsmatrix für die Gehäuse-Ableiter-Beziehung.....	48
Tabelle 3.6: Auszug der initialen Anforderungsliste für die Zellentwicklung	51
Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten mit Nutzwertanalyse.....	57
Tabelle 4.2: Ausprägungsauswahl der Sicherheitszelle	58
Tabelle 4.3: Ausprägungsauswahl der Energiezelle	59
Tabelle 4.4: Ausprägungsauswahl der Leistungszelle	60
Tabelle 5.1: Konstruktive Wickelparameter der Sicherheitsvariante.....	64
Tabelle 5.2: Konstruktive Parameter des Wickeldorns der Sicherheitszelle	67
Tabelle 5.3: Konstruktive Gehäuseparameter der Sicherheitsvariante.....	68
Tabelle 5.4: Konstruktive Parameter der Bauteile der Kopfbaugruppe.....	71
Tabelle 5.5: Konstruktive Parameter der Kathoden- und Anodenableiter.....	73
Tabelle 5.6: Konstruktive Parameter des integrierten CID-Terminal-Bauteils.....	76
Tabelle 5.7: Konstruktive Parameter des Wickels und der Abstandshalter	77

Tabelle 5.8: Konstruktive Parameter des Kühlkreislaufs der Leistungszelle.....81

1 Einführung

Die Automobilindustrie bildet einen der größten Wirtschaftszweige weltweit. Seit diesem Jahrzehnt aber befindet sich der Mobilitätssektor in einem tiefgreifenden Wandel, welcher, getrieben durch ökologische, politische und gesellschaftliche Randbedingungen, immer weiter an Fahrt aufnimmt. Das Thema Elektromobilität führt zu einer der disruptivsten Veränderungen in Bezug auf die technologische Ausrichtung und zukünftige Wettbewerbsfähigkeit aller Automobilhersteller und -zulieferer.¹ Im Zentrum der Elektromobilität steht neben dem Elektromotor insbesondere die Batterie, weil sie als sehr komplexes Element viele grundlegende Anforderungen der Kunden auf direktem und indirektem Weg in sich vereint. Neben Reichweite und Leistung wirkt sich die Batterie vor allem als Kostentreiber auf die Preisgestaltung von Elektrofahrzeugen aus.² Aus diesem Grund besteht ein hohes Interesse an der Ausschöpfung von Entwicklungspotentialen rund um die Batterie. Sie bildet deshalb die thematische Grundlage der in dieser Arbeit betrachteten Forschungsfrage.

In den folgenden beiden Kapiteln werden zu Beginn die Rahmenbedingungen dieser Arbeit abgesteckt. Kapitel 1.1 beschreibt dabei die Motivation, welche hinter der Batteriethematik und der damit verbundenen Forschungsfrage steht. Es wird darauf eingegangen, warum die Batterie in der Elektromobilität eine so wichtige Rolle spielt und wie sich daraus die Themenstellung dieser Arbeit ableiten lässt. Außerdem beschreibt das Kapitel die Zielsetzungen, die durch die Ausarbeitung des Konzeptions- und Konstruktionsansatzes von Lithium-Ionen-Rundzellen für Elektrofahrzeuge erfüllt werden sollen. Im Anschluss daran befasst sich das Kapitel 1.2 mit dem Aufbau der wissenschaftlichen Arbeit. Neben einer Übersicht der strukturellen Gliederung der Grundlagen im Bereich der Produktentwicklung, des Stands der Technik von Batterien für elektrische Fahrzeuganwendungen und der praktischen Umsetzung der Forschungsfrage thematisiert das Kapitel die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Elektromobilität verändert den Mobilitätsmarkt nicht nur auf der Kundenseite, sondern beeinflusst im großen Maße die Entwicklungs- und Produktionsprozesse der Automobilhersteller. Die disruptiven Veränderungen zugunsten alternativer, umweltfreundlicher Antriebsformen zwingen die Automobilindustrie dazu neue Wege und Lösungen zu finden, um den heutigen Kundenanforderungen gerecht zu werden. Die Batterie steht dabei im Zentrum der Neuausrichtung von Fahrzeugherrstellern auf der ganzen Welt. Neben den Hürden eines Ausbaus der Ladeinfrastruktur spielt vor allem die Batterie als Kostentreiber von elektrischen Fahrzeugen eine wichtige Rolle in den strategischen Planungen der Unternehmen. Sie nimmt einen großen Anteil der Gesamtfahrzeugkosten ein und bringt gleichzeitig enorme Entwicklungspotentiale

¹ Vgl. Kampker et al. (Using E-mobility as an Enabler for a Fast and Lean Product Development) 2016, S. 167f.

² Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 1f.

mit sich.³ Der komplexe Aufbau von Batteriesystemen eröffnet daher viele Ansatzpunkte zur wissenschaftlichen Betrachtung und Weiterentwicklung.

Diese wissenschaftliche Arbeit fokussiert sich dabei auf die Zellebene. Batteriezellen sind nicht nur aus zellchemischer Sicht interessant, sondern besitzen ebenfalls einen vielschichtigen, strukturellen Aufbau. Die Reduktion des Kostenaspekts durch neue, angepasste Konzeptansätze der Produktentwicklung im Zellbereich bildet daher eine wichtige Grundlage für die Entwicklungsbemühungen der Automobilhersteller. Die ansteigende Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien und die hohen Kundenanforderungen in Bezug auf Reichweite und Leistung von elektrischen Fahrzeugen erhöhen den Druck zur Weiterentwicklung bestehender Batteriesysteme. Insbesondere die Zellen verkörpern diese Kundenanforderungen nach Reichweite und Leistung durch ihre Energie- und Leistungsdichte. Mit einem Anstieg dieser Attribute vergrößert sich auch der Bedarf nach Sicherheit und Zuverlässigkeit der Lithium-Ionen-Zellen.⁴ Besonders der strukturelle Aufbau von Batteriezellen muss mit der Auslegung der Zellen mitwachsen. Diese Tatsache stellt die Motivationsgrundlage der thematischen Ausrichtung dieser Arbeit dar.

Abgeleitet von diesem Motivationsansatz umfasst das Thema der wissenschaftlichen Arbeit die Konzeptentwicklung und Konstruktion modularer Lithium-Ionen-Rundzellen für Elektrofahrzeuge. Konkret soll damit der Forschungsfrage nachgegangen werden, wie ein Konzept in der frühen Phase der Produktentwicklung für Lithium-Ionen-Rundzellen aufgebaut sein muss, um alle relevanten Daten und Informationen für einen konstruktiven Entwurf der Zelle unter den gegebenen Randbedingungen der Energie-, Leistungs- und Sicherheitsauslegung zu liefern. Das Format der Rundzellen wurde deshalb ausgewählt, weil Standards, wie die 21700er-Rundzelle, aus wissenschaftlicher Sicht bisher nicht ausgiebig genug untersucht wurden, obwohl sie kleinere Zellformate bereits in aktuellen Fahrzeugprojekten ersetzen.⁵

Die Zielsetzung dieser Arbeit, welche sich aus der Forschungsfrage ergibt, umfasst die Entwicklung eines Vorgehenskonzepts für die Strukturierung der Zelle auf Basis von wissenschaftlichen Methoden der Produktentwicklung. In Anlehnung an die genannten Randbedingungen sollen aus den Ergebnissen des Konzeptansatzes drei konstruktive Zellentwürfe entstehen, welche jeweils einen der genannten Schwerpunkte Sicherheit, Energie und Leistung thematisch abbilden.

1.2 Aufbau und Methodik der Arbeit

Dieses Kapitel umreißt den grundlegenden Aufbau dieser Arbeit. Außerdem wird das methodische Vorgehen beschrieben, welches für die Ausarbeitung der behandelten Themenstellung angewandt wurde.

³ Vgl. Mahmoudzadeh Andwari et al. (Battery Electric Vehicle Technology) 2017, S. 415.

⁴ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 1.

⁵ Vgl. Quinn et al. (Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells) 2018, S. 3284.

Im Anschluss an dieses Kapitel beginnt die inhaltliche Erarbeitung der wissenschaftlichen Literaturgrundlagen. Da in der praktischen Anwendung die Grundlagen im Bereich Produktentwicklung und Batterietechnik benötigt werden, gliedert sich dieses Kapitel in die Betrachtung der prozessualen Produktentstehung und des aktuellen Stands der Technik von Batterien für Elektrofahrzeuge.

Es wird zunächst auf den Produktentstehungsprozess sowie seinen untergeordneten Teilprozess, den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess, eingegangen. Zusammen mit einem Unterkapitel über methodische Werkzeuge und Vorgehensweisen zur Informationsgewinnung und Entscheidungsfindung innerhalb der genannten Prozessabschnitte bilden diese Kapitel die Basis für die praktische Ausarbeitung dieser Arbeit.

Im Anschluss daran wird der Stand der Technik im Bereich der Batteriesysteme näher beleuchtet. Nach einer Einführung in die Aufbaustruktur von Batteriesystemen wird erläutert, wie sich die verschiedenen Batteriezelltypen, welche in Elektrofahrzeugen zum Einsatz kommen, voneinander abgrenzen lassen. Darauf folgt eine grundsätzliche Erklärung der Funktionsweise von Lithium-Ionen-Zellen. Abgeschlossen wird dieser thematische Abschnitt durch eine detaillierte Betrachtung des grundlegenden Aufbaus von Lithium-Ionen-Rundzellen. Es wird dabei auf die einzelnen Bauteile einer Zelle eingegangen und ihre Funktionsweise im Verbund mit anderen Bauteilen beschrieben. Dieser Abschnitt dient dem inhaltlichen Verständnis der Batterietechnik und führt von der großen Betrachtungsweise auf Systemebene bis hin zum thematischen Fokus dieser Arbeit im Bereich der Lithium-Ionen-Rundzellenentwicklung.

Nachdem die wissenschaftlichen Grundlagen ausgiebig betrachtet wurden, behandeln die nachfolgenden Kapitel die praktische Ausarbeitung der thematischen Forschungsfrage. Aus diesem Grund sind die Kapitel in die drei Phasen der Produktentwicklung aufgeteilt und nutzen die vormals beschriebenen methodischen Werkzeuge zur Entwicklung eines Zellkonzepts.

Die Planungsphase gibt zunächst einen Überblick über das Vorgehen und die zu erreichenden Meilensteine der Zellentwicklung. Außerdem wird in Vorbereitung auf die Konzepterarbeitung eine technische Wettbewerberanalyse durchgeführt. In dieser Analyse werden Daten über den Aufbau und die Geometrie verschiedener Wettbewerberzellen gesammelt, welche im Anschluss daran in die Anforderungsliste einfließen. Mit den gewonnenen Daten der Wettbewerberanalyse werden außerdem die Bauteilbeziehung der Lithium-Ionen-Rundzelle betrachtet, um Abhängigkeitsrelationen ebenfalls in die Anforderungsliste zu übertragen.

Die Konzeptphase ist in drei Abschnitte gegliedert. Mit den gewonnenen Daten der Planungsphase werden die Bauteilbeziehung der Lithium-Ionen-Rundzelle in einen Produktstrukturplan umgewandelt. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls das Modularitätskonzept der Zellentwürfe thematisiert. Über methodische Entscheidungsansätze erfolgt im Anschluss daran die Definition und Auswahl der verschiedenen Zellausprägungsmerkmale für die Schwerpunkte Sicherheit, Energie und Leistung.

Im Kapitel der Konstruktions- und Entwurfsphase werden die Zellmodelle der drei Ausprägungsformen im Detail besprochen. Es wird erläutert, wie sich die Zellen auf Basis der durch das Konzept festgelegten Merkmale aufbauen und welche geometrischen Auswirkungen

dadurch entstehen. Die vorläufigen Zellentwürfe werden abschließend mithilfe von computergesteuerten Simulationsansätzen auf bestimmte Schwerpunkte hin analysiert. Mit der Validierung und Umsetzung der Ergebnisse entsteht zum Ende dieser Arbeit ein abschließender Zellentwurf der Sicherheits-, Energie- und Leistungszelle. Mit diesem Ergebnis ist die thematische Betrachtung dieser Arbeit abgeschlossen.

Das letzte Kapitel rekapituliert rückblickend die Vorgehensweise und gibt einen Ausblick über den zukünftigen Forschungsbedarf im Bereich der Zellentwicklung. Außerdem wird die Anwendung der Methodik kritisch reflektiert, um die Erkenntnisse der thematischen Bearbeitung der Forschungsfrage einordnen zu können.

2 Produktentwicklung von Batterien für den automobilen Anwendungsfall

Dieses Kapitel umfasst die wissenschaftlichen Grundlagen der Literatur aus den Bereichen Produktentwicklung und Batterietechnik für elektrische Fahrzeuganwendungen. Aus diesem Grund teilt sich das Kapitel in die zwei thematischen Schwerpunkte dieser Arbeit auf. Im ersten Teil werden die Grundlagen der Produktentwicklung besprochen. Hierzu wird der Produktentstehungsprozess sowie der für diese Arbeit wichtige Entwicklungs- und Konstruktionsprozess herangezogen und methodische Vorgehensweisen zur Informations- und Entscheidungsfindung für die einzelnen Phasen des Prozesses erläutert. Im zweiten Teil wird das Thema der Batterietechnik für Elektrofahrzeuge in den Vordergrund gestellt. Hierzu wird der Stand der Technik in diesem Bereich zunächst anhand der Struktur von Batteriesystemen aufgezeigt. Danach wird der Detaillierungsgrad Schritt für Schritt vergrößert, indem Unterschiede der zum Einsatz kommenden Batterietypen besprochen und die Funktionsweise der Lithium-Ionen-Technologie erklärt werden. Den Abschluss der wissenschaftlichen Grundlagen bildet die Erläuterung des Aufbaus und der Bauteile von Lithium-Ionen-Rundzellen.

2.1 Grundlagen der Produktentwicklung

Im Rahmen der strukturellen Unternehmensausrichtung und der Auslegung von Geschäftsprozessen nimmt das Produkt und der damit verbundene Entwicklungsprozess eine zentrale Rolle ein. In den beiden folgenden Kapiteln wird daher im Detail auf die prozessuale Struktur der Produktentwicklung eingegangen. In diesem Zusammenhang wird der Detaillierungsgrad der einzelnen Prozessphasen im Verlauf der beiden Kapitel immer enger um das Produkt gelegt, sodass der Kerngedanke dieser Arbeit, die Produktkonzeption und -konstruktion, immer weiter in den Vordergrund tritt. Im Anschluss daran erfolgt eine Übersicht gängiger Methodiken und Lösungsansätze für unterschiedlichste Anwendungsszenarien im Verlauf der Produktentwicklung.

2.1.1 Der Produktentstehungsprozess

Dieses Kapitel ordnet das Produkt und dessen Entstehungsschritte in die Ablauforganisation des Unternehmens ein. Hierbei wird zunächst auf das Produkt als solches und dessen Verständnis im Unternehmen eingegangen. Danach folgt eine Betrachtung der prozessualen Phasen von der Idee bis zur Herstellung im Rahmen des Produktentstehungsprozesses.

Bei einem Produkt kann es sich um ein materielles Erzeugnis, eine immaterielle Leistung oder eine Kombination der genannten Möglichkeiten handeln. Die Auslegung erfolgt in der Regel zielgruppengerecht zur Befriedigung der Bedürfnisse bestimmter Marktsegmente und Nutzergruppen. Dabei kann das Produkt allein oder als System angeboten werden.⁶

⁶ Vgl. VDI (VDI-Richtlinie 2221) 2019, S. 8.

Während sich die Komplexität durch die Art und Ausprägung des Produkts unterscheiden kann, findet sich der Systemgedanke insbesondere bei der Betrachtung des Produkts als Summe seiner untergeordneten Teile wieder. Eine hohe Teileanzahl führt zu größerer Vernetzung zwischen den Bauteilen, was wiederum eine steigende Zahl an Schnittstellen mit sich bringt. Die Betrachtung als System kann dazu beitragen, die dadurch entstehende Komplexität zu entzerrn.⁷ In Kapitel 2.1.2 wird unter Berücksichtigung des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses weiter auf die Betrachtungsweise des Produkts als System eingegangen.

Im Zusammenhang mit der Entstehung von Produkten und dem Aufbau von Unternehmensprozessen muss zunächst die allgemeine Definition der Prozessbezeichnung betrachtet werden. Ein Prozess kann als Folgen von Aktivitäten unter Einbezug von Informationen, Wissen und materiellen Ressourcen verstanden werden. Dabei werden Eingangsinformationen mithilfe von Aktivitäten zu Ausgangsinformationen weiterverarbeitet.⁸

Ein Produkt entsteht aber nicht in einem einzigen Arbeitsschritt. Vielmehr wird hierfür eine Abfolge vieler Arbeitsschritte mit unterschiedlichen Schwerpunkten benötigt, um eine initiale Idee in ein reales Produkt zu transformieren. Diese Arbeitsschritte lassen sich in Prozessen organisieren. Damit ein gleichbleibender, prozessualer Standard gewährleistet werden kann, ist der Prozessaufbau und seine angrenzenden Einflussfaktoren in der Norm DIN EN ISO 9000 einheitlich geregelt. Die Gesamtheit dieser Prozessschritte von der Planung bis zur Herstellung wird als Produktentstehungsprozess (PEP) bezeichnet.⁹ In Abbildung 2.1 sind die wesentlichen Prozessschritte des PEP zusammen mit seinen Begleitprozessen skizziert.

Der PEP sowie seine Begleitprozesse gliedern sich wiederum in den übergeordneten Geschäftsprozess des Unternehmens ein und werden von festgelegten Teilen der Unternehmensorganisation ausgeführt. Hierbei sind insbesondere Abläufe, Reihenfolgen und Verantwortlichkeiten durch die Unternehmensorganisation festzulegen.¹⁰

Die Produktentstehung kann dem Produktlebenszyklus aus ablauftechnischer Sicht als ein wesentlicher Abschnitt zugeordnet werden. Sie beginnt mit einer Planungsphase, in welcher der Bedarf beim Kunden ermittelt und die Produktidee ausgearbeitet wird. Der PEP endet in der Regel mit der Herstellung eines produzierbaren und funktionsfähigen Produktes. Zwischen diesen Stadien erfolgt die Konzeptentwicklung und Konstruktion in Form eines interdisziplinären Austauschs mit den parallel verlaufenden Begleitprozessen der beteiligten Unternehmensorganisationen.¹¹ Diese Abfolge von Prozessen zusammen mit der Ausarbeitung der Produktidee kann separat unter der Bezeichnung Entwicklungs- und Konstruktionsprozess (EKP) zusammengefasst werden.¹²

⁷ Vgl. Lindemann (Methodische Entwicklung technischer Produkte) 2009, S. 8f.

⁸ Vgl. Ponn et al. (Konzeptentwicklung technischer Produkte) 2011, S.16.

⁹ Vgl. Feldhusen et al. (Konstruktionslehre) 2013, S. 11.

¹⁰ Vgl. Jörg Feldhusen (Product Lifecycle Management) 2008, S. 35f.

¹¹ Vgl. Naefe et al. (Konstruktionsmethodik für die Praxis) 2016, S. 4f.

¹² Vgl. Feldhusen et al. (Konstruktionslehre) 2013, S. 13.

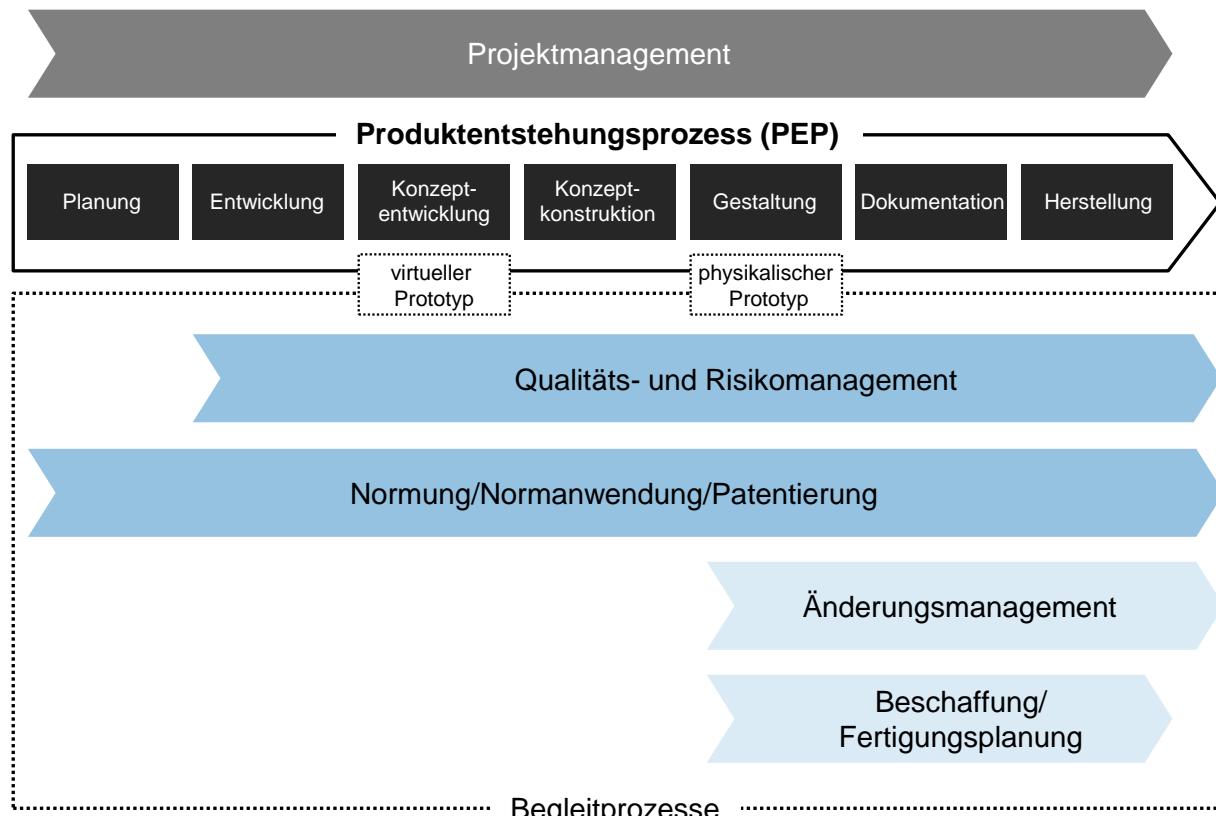


Abbildung 2.1: Produktentstehungsprozess (PEP) mit begleitenden Prozessen¹³

2.1.2 Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Aufbau und der Abfolge des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses (EKP). Außerdem wird schwerpunktmäßig auf die Rolle des Produkts in diesem Prozess eingegangen.

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 angedeutet, erstreckt sich der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess von der Planung des Produkts über mehrere Phasen bis kurz vor den Beginn der Herstellung. Diese Phasen lassen sich allgemein als Planungs-, Konzeptions-, Entwurfs- und Ausarbeitungsphasen beschreiben. Abbildung 2.2 gibt in Form eines Wasserfallmodells einen Überblick über die zeitliche Abfolge der genannten Phasen sowie ihrer Kernerzeugnisse.

Der Fokus dieser Arbeit liegt insbesondere auf den Phasen des Konzipierens (II) und des Entwerfens (III), wobei auch die Schnittpunkte zur Planungsphase miteinbezogen werden müssen, da die Ausgangserzeugnisse dieser Phase als Eingangsinformationen für die Konzeption dienen. Das Auskonstruieren von Modellen innerhalb dieser Phasen grenzt sich vorgezugsweise von anderen Funktionsbereichen der Produktentstehung, wie beispielsweise der Berechnung, der Simulation sowie dem Prototypenbau und der Versuchsdurchführung, ab.¹⁴ Da jedoch rudimentäre Simulationen an Konstruktionsmodellen mit heutiger CAD-Software

¹³ i. A. a. Feldhusen et al. (Konstruktionslehre) 2013, S. 23.

¹⁴ Vgl. Ponn et al. (Konzeptentwicklung technischer Produkte) 2011, S. 17.

relativ aufwandsarm zu realisieren sind und dadurch schon zu einem frühen Zeitpunkt eine Datengrundlage für Verbesserungen gegeben ist, wird auch dieser Funktionsbereich für ein qualitativeres Endergebnis marginal miteinbezogen.

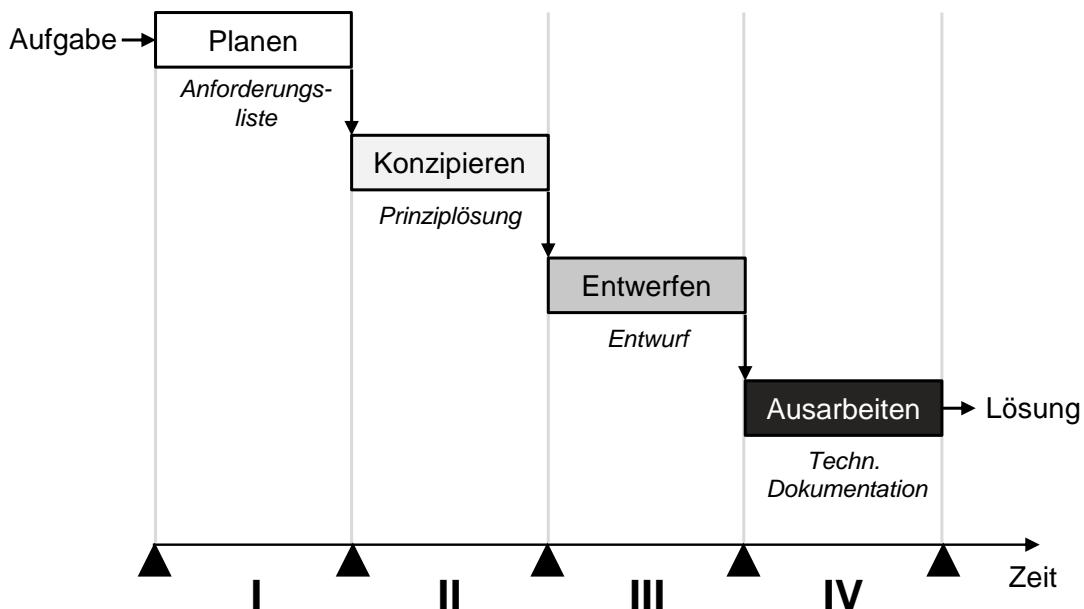


Abbildung 2.2: Wasserfallmodell der vier Phasen des Konstruktionsprozesses¹⁵

Das Vier-Phasen-Modell sowie verschiedene, andere Ansätze zur Beschreibung des EKPs bildeten in der Vergangenheit die Grundlage für die Ausarbeitung der VDI-Richtlinie 2221. Das Ergebnis spiegelt sich im allgemeinen Modell der Produktentwicklung wider. Hierbei wurde der Entwicklungsprozess in überschaubare, branchenunabhängige Aktivitäten unterteilt. Außerdem wurden die erforderlichen Arbeitsergebnisse der jeweiligen Aktivitäten in diesem Modell herausgearbeitet.¹⁶ Abbildung 2.3 zeigt den grundsätzlichen Aufbau dieses Modells in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221. Auf der rechten Seite sind die vier Phasen des Planens, Konzipierens, Entwerfens und Ausarbeitens dargestellt. Links daneben befinden sich die Erzeugnisse der einzelnen Aktivitätsabschnitte nach Abschluss des jeweiligen Abschnitts. Hierbei entsteht sehr früh im Prozess eine Anforderungsliste. Basierend auf diesen Anforderungen wird eine funktionale Produktstruktur erarbeitet und Lösungsansätze für anforderungsbasierte Fragestellungen entworfen. Danach folgen mehrere Entwurfsphasen, in denen Teile des Produkts ausgearbeitet und zusammengeführt werden. Abgeschlossen wird der Prozess mit der Produktdokumentation. Wichtige Bestandteile des allgemeinen Modells der Produktentwicklung sind die Iterationsphasen während und zwischen den einzelnen Arbeitsschritten. Ange deutet sind diese Phasen durch den schwarzen Balken auf der linken Seite der Abbildung, der sich über den gesamten Verlauf der Aktivitäten erstreckt. In der Praxis hat sich gezeigt, dass der EKP selten innerhalb eines einzelnen Durchlaufs zu den angestrebten Ergebnissen führt.

¹⁵ Vgl. Naefe et al. (Konstruktionsmethodik für die Praxis) 2016, S.7.

¹⁶ Vgl. VDI (VDI-Richtlinie 2221) 2019, S. 30ff.

Aus diesem Grund sind Iterationsphasen als Teil eines Kontrollprozesses des EKPs anzusehen. Dieser ist notwendig und muss in jedem Unternehmen individuell ausgelegt werden.¹⁷

Für einen gleichbleibenden Standard und eine effizientere Ausarbeitung der Aktivitätserzeugnisse haben sich verschiedene Methodiken und Herangehensweisen etabliert. Diese Methoden werden je nach Art und Komplexität des Produkts ausgewählt und helfen bei der Problemanalyse und Zerlegung in Teilprobleme.¹⁸ Kapitel 2.1.3 gibt einen Überblick über eine begrenzte Auswahl dieser Methoden. Die Zusammenstellung erfolgte dabei hauptsächlich mit Bezug auf die Fragestellung und Produktkategorie dieser Arbeit.

Für die Auswahl der richtigen Methodiken im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess bedarf es auf Seiten der Prozessverantwortlichen und durchführenden Organe eines ausgeprägten Verständnisses der Produktstruktur.¹⁹ Nachdem bereits in Kapitel 2.1.1 auf die grundsätzliche Definition des Produkts eingegangen wurde, soll zum Abschluss dieses Kapitel ein tieferes Produktverständnis in Anlehnung an die erörterte Prozessstruktur des EKPs vermittelt werden.

Ein Produkt kann zur Entzerrung seiner Komplexität als ein System mit darin enthaltenen Elementen betrachtet werden. Auch diese Elemente können weitere Systeme bilden. In der Systemtheorie ist das System als eine von der Umgebung durch eine gedachte Systemgrenze abgetrennte Menge von Elementen zu verstehen, die miteinander in Relation stehen und einen bestimmten Zweck erfüllen. Dabei bringt jedes Element gewisse Eigenschaften mit. Die Gesamteigenschaften des Systems definieren sich aber nicht nur über die Summe der Eigenschaften seiner Elemente, sondern sind ebenfalls stark durch Elementbeziehungen und das Zusammenwirken verschiedener Eigenschaften geprägt.

Zur Identifikation und Fokussierung auf einzelne Kerneigenschaften des Systems oder eines seiner Elemente erfolgt die Reduzierung in Form eines Modells. Modelle ähneln Systemen, bringen aber drei charakteristische Merkmale mit. Demzufolge ist ein Modell immer als Abbild eines Originale zu verstehen, welches nur einem bestimmten Zweck dient und einen deutlich reduzierten oder abstrahierten Umfang besitzt.²⁰ Die Wahl des Modells ist dabei entscheidend für den Erfolg der Konzeption und Konstruktion des Produkts. So muss das allgemeine Modell zur Voraussage einer Produkteigenschaft mit anwendungsspezifischen Daten befüllt werden. Im Fall einer technischen Zeichnung sind dies beispielsweise die Abmaße und bei Werkstoffgesetzen z.B. die genauen Werte für Zug- und Druckfestigkeit.²¹ Technische Systeme können in unterschiedlichen Bereichen modelliert werden. Die Bereiche der funktionellen, physikalischen und gestalterischen Lösungsmöglichkeiten finden dabei in der Konstruktionsmethodik häufig Verwendung.²²

¹⁷ Vgl. Feldhusen et al. (Konstruktionslehre) 2013, S. 16ff.

¹⁸ Vgl. VDI (VDI-Richtlinie 2221) 2019, S. 21ff.

¹⁹ Vgl. VDI (VDI-Richtlinie 2221) 2019, S. 21f.

²⁰ Vgl. VDI (VDI-Richtlinie 2221) 2019, S. 12ff.

²¹ Vgl. Feldhusen et al. (Konstruktionslehre) 2013, S. 12.

²² Vgl. Ehr lenspiel et al. (Integrierte Produktentwicklung) 2013, S. 37ff.

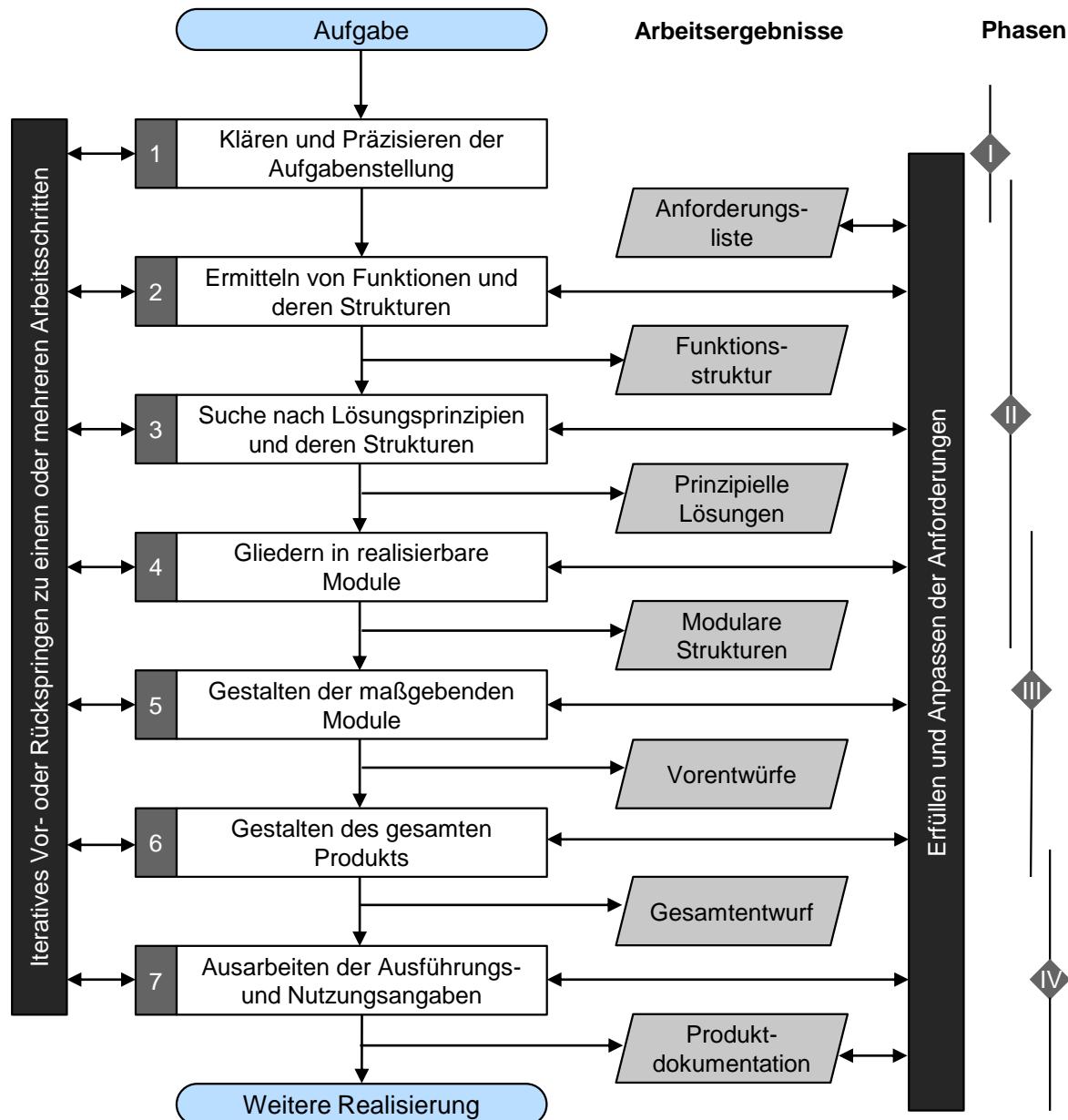


Abbildung 2.3: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221)²³

2.1.3 Methoden in der Produktentwicklung und Konstruktion

In diesem Kapitel wird auf einige methodischen Werkzeuge und Vorgehensweisen eingegangen, welche im Verlauf der praktischen Ausarbeitung der in dieser Arbeit betrachteten Forschungsthematik zum Einsatz kommen.

Teardown-Analyse

Die Methode der Teardown-Analyse ist in den Bereich der technischen Produktrekonstruktion (engl. reverse engineering) einzuordnen. In ihrer einfachsten Form wird das zu untersuchende

²³ i. A. a. Feldhusen et al. (Konstruktionslehre) 2013, S. 18.

Produkt systematisch in seine Einzelteile zerlegt. Dabei wird das Vorgehen ebenso dokumentiert wie mögliche Deformationsstellen, welche durch die Demontage auftreten. So ist das Verfahren vornehmlich für Entwicklungsteams interessant, welche in ein neues Produktsegment vorstoßen wollen und denen nur Wettbewerberprodukte als Anhaltspunkte der Entwicklung zur Verfügung stehen.²⁴

Mögliche Ziele einer Teardown-Analyse sind in den folgenden Stichpunkten aufgeführt:

- Dokumentation der Produktstruktur
- Anfertigung einer Bauteilstückliste
- Kostenkalkulation auf Basis der identifizierten Bauteile und Materialien
- Identifikation von Bauteilgeometrien und -abmessungen
- Zuordnung von Funktionen und Aufgabenbereichen einzelner Komponenten

Als sehr rudimentäres und zerstörendes Verfahren ist die Teardown-Analyse oftmals nicht geeignet, um sämtliche Funktionsweisen und Bauteilverwendungszwecke einwandfrei zu dokumentieren. Es kann aber initiale Informationen zur Ausrichtung und Planung der Produktentwicklung liefern, die im weiteren Prozess mithilfe anderer Verfahren validiert und vertieft werden müssen.²⁵

Produktstrukturplan

Strukturpläne können in verschiedenen Ausprägungen eingesetzt werden. Während Projektstrukturpläne den Aufbau des Projekts in Form seiner Phasen, Prozesse oder Aufgabenebenen skizzieren, basieren Produktstrukturpläne auf der Zusammensetzung des zu entwickelnden Produkts. Die Visualisierung eines solchen Produktstrukturplans ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Bei der Entwicklung initialer Produktstrukturpläne können Vorgängerversionen ein wichtiges Hilfsmittel sein. Aber auch im Fall einer Neukonstruktion lassen sich Produktstrukturpläne mithilfe von Vorbilderprodukten aufbauen.²⁶

Abbildung 2.4 zeigt die neben der tabellarischen Form gängige graphische Darstellungsweise. Hierbei wird zwischen der vertikalen und horizontalen Strukturierung unterschieden. Neben der vertikalen Aufteilung des Gesamtprodukts in Teilprodukte, welche beispielsweise durch Baugruppen und Komponenten gegliedert ist, lassen sich besonders auf horizontaler Ebene Untergruppierungen nach Funktionsweisen oder Entwicklungszuständen bilden.

²⁴ Vgl. Otto et al. (Reverse Engineering and Redesign Methodology) 1998, S. 231ff.

²⁵ Vgl. Clavier et al. (Cryptographic hardware and embedded systems analysis) 2009, S. 363ff.

²⁶ Vgl. Naefe et al. (Konstruktionsmethodik für die Praxis) 2016, S. 162ff.

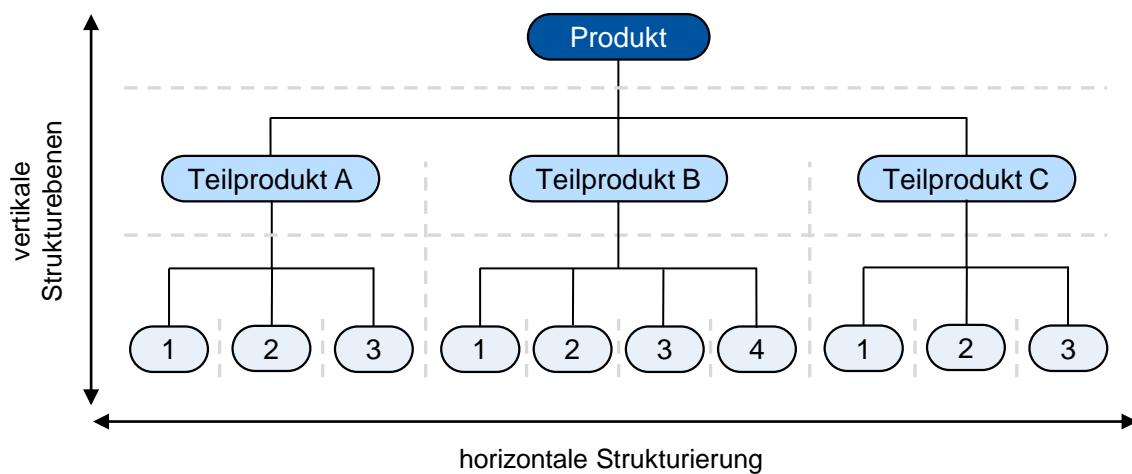


Abbildung 2.4: Graphisch dargestellter Produktstrukturplan²⁷

Im Regelfall wird der Produktstrukturplan kontinuierlich weiterentwickelt und ist somit kein statisches Erzeugnis eines einzelnen Prozesses. So hilft der Strukturplan bei der Aufgabenglieiderung von der Konzeptionsphase bis zur Serienfertigung und bildet zu jeder Zeit eine Übersicht des Produkts ab.²⁸

Morphologischer Kasten

Der morphologische Kasten stellt eine vielverwendete Methode in der Produktentwicklung dar. Er wird häufig in der frühen Phase der Entwicklung angewandt, um die Planung und Konzeption der Produktidee zu konkretisieren. Dabei dient der morphologische Kasten als einfach zu verstehende und übersichtliche Entscheidungsgrundlage im Prozess. Die Idee dahinter basiert auf der von Zwicky im Jahr 1966 vorgestellten morphologischen Methode zur Abbildung der Gesamtheit aller Teifunktionen eines Produkts. So wird in einem morphologischen Kasten die Gesamtfunktion eines Produkts in einzelne Teifunktionen aufgegliedert. Zu den jeweiligen Teifunktionen werden wiederum eine Anzahl möglicher Lösungsprinzipien vorgegeben.²⁹ Tabelle 2.1 zeigt diesen grundlegenden Aufbau in Form einer Merkmalsspalte und beliebig vielen Ausprägungsvarianten als Lösungsprinzipien. Die grün eingefärbten Zellen beschreiben die ausgewählten Teillösungen der beispielhaften PKW-Auslegung. Durch Verbindung der einzelnen Teillösungen entsteht eine übersichtliche Visualisierung der Gesamtfunktion des PKWs.

Die Methode des morphologischen Kastens kann auf unterschiedlichen Ebenen der Konkretisierung angewandt werden. Zwei wichtige Ebenen sind die Wirk- und die Bauebene. Entsprechend der Namensgebung beziehen sich die im morphologischen Kasten aufgelisteten Teillösungen auf die jeweiligen Wirkprinzipien oder auf konkrete Bauelemente des Produkts.³⁰

²⁷ i. A. a. Jakoby (Projektmanagement für Ingenieure) 2019, S. 151.

²⁸ Vgl. Naefe et al. (Konstruktionsmethodik für die Praxis) 2016, S. 163f.

²⁹ Vgl. Linke et al. (Einführung in die Konstruktionsmethodik) 2017, S.723.

³⁰ Vgl. Ponn et al. (Konzeptentwicklung technischer Produkte) 2011, S.116 ff.

Tabelle 2.1: Auszug eines morphologischen Kastens für die PKW-Auslegung

Merkmale	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4	Ausprägung 5
Antriebsform	Benzin-VKM*	Diesel-VKM*	Elektro	Gas	Hybrid
Reichweite	bis zu 100 km	bis zu 200 km	bis zu 400 km	bis zu 600 km	
Personen	2	4	5		
cw-Wert	max. 0,2	max. 0,25	max. 0,3	max. 0,5	
...

Nutzwertanalyse

Die ebenfalls als Entscheidungsinstrument verwendete Nutzwertanalyse (NWA) hilft durch einfache mathematische Rechenprozesse bei der Auswahl zwischen möglichen alternativen Ausprägungsformen eines Produkts. Wie der beispielhafte Aufbau in

Tabelle 2.2 zeigt, werden wie schon im morphologischen Kasten zuerst Merkmale oder Kriterien des Produkts, einzelner Baugruppen oder spezifischer Bauteile benötigt. Diese Kriterien erhalten eine Gewichtung, welche von der Gesamtrelevanz abhängt, aber auch andere Faktoren berücksichtigen kann. Zu jedem Kriterium werden eine gewissen Anzahl an alternativen Ausprägungen vorgeschlagen. In einem letzten Schritt werden die Alternativen nach einer festgelegten Bewertungsskala bewertet und mit dem Gewichtungsfaktor multipliziert. Die kumulierte Summe der gewichteten Bewertungen der jeweiligen Alternativen zeigt die zu präferierende Ausprägung.³¹

Tabelle 2.2: Beispiel einer Nutzwertanalyse (NWA)³²

		Alternative A		Alternative B		Alternative C	
Bewertungskriterien	Gewichtung (G)	Bewertung (B)	Nutzwert (B*G)	Bewertung (B)	Nutzwert (B*G)	Bewertung (B)	Nutzwert (B*G)
Kriterium 1	0,2	1	0,2	4	0,8	1	0,2
Kriterium 2	0,15	3	0,45	2	0,3	3	0,45
Kriterium 3	0,5	3	1,5	3	1,5	1	0,5
Kriterium 4	0,15	5	0,75	4	0,6	1	0,15
Gesamt	1		2,9		3,2		1,3

0 – keine Präferenz 1 – sehr geringe Präferenz 2 – geringe Präferenz 3 – normale Präferenz 4 – hohe Präferenz 5 – sehr hohe Präferenz

Die Qualität und Aussagekraft der Nutzwertanalyse ist im hohen Maße von der Kriteriengewichtung und der Bewertung der ausgewählten Alternativen abhängig. Der positive Aspekt dieses Verfahrens liegt in der transparenten Entscheidungsfindung. In der VDI-Richtlinie 2225 wurde aufgrund des geringen Aufwands der Nutzwertanalyse bei gleichzeitig vielver-

³¹ Vgl. Felkai et al. (Projektmanagement für technische Projekte) 2011, S.128f.

³² i. A. a. Felkai et al. (Projektmanagement für technische Projekte) 2011, S.129.

sprechender Aussagekraft eine daran angelehnte Methode des technischen und wirtschaftlichen Wertes vorgestellt. Bei dieser Methode bleibt das Bewertungsschema in Anlehnung an eine Werteskala erhalten, wohingegen der Gewichtungsfaktor zur Vereinfachung wegfällt.³³

Design-Structure-Matrix

Als eine Design-Structure-Matrix (DSM) wird eine Einfluss- oder Relationsmatrix verschiedener Komponenten eines Produkts bezeichnet. Durch die frühzeitige Modularisierung des Gesamtprodukts und die Abschätzung der Einflussmöglichkeiten der einzelnen Module untereinander können schon von Anfang an Parallelisierungspotentiale im Entwicklungsprozess identifiziert werden.³⁴ Dabei sind auf der X- und Y-Achse jeweils die identischen Auflistungen von Bauteilen, Komponenten oder Merkmalen zu finden. Wie aus Tabelle 2.3 ersichtlich, bildet die Zelle an der Schnittstelle der Achsverlängerungen beider Merkmale die Aussage über den Relationsgrad beider Merkmale zueinander. Das Beispiel zeigt dabei nur den binären Fall der Einflussnahme durch die Zahlen 0 und 1. Die Zahl 1 steht dabei für einen Einfluss der beiden Merkmale untereinander, wohingegen die Zahl 0 keinen Einfluss symbolisiert. Unterschiedliche Ausprägungen der Einflussmatrix mit gewichteten Faktoren sind ebenfalls denkbar.

Tabelle 2.3: Darstellung einer binären Design-Structure-Matrix (DSM)³⁵

		Bauteil A				Bauteil B			
		Bauteilmerkmal 1	Bauteilmerkmal 2	Bauteilmerkmal 3	Bauteilmerkmal 4	Bauteilmerkmal 1	Bauteilmerkmal 2	Bauteilmerkmal 3	Bauteilmerkmal 4
Bauteil B	Bauteil A	-	-	-	-	0	0	1	0
	Bauteilmerkmal 1	-	-	-	-	1	1	0	0
	Bauteilmerkmal 2	-	-	-	-	0	0	0	0
	Bauteilmerkmal 3	-	-	-	-	0	0	0	0
Bauteil B	Bauteilmerkmal 4	-	-	-	-	0	0	0	1
	Bauteilmerkmal 1	1	0	0	0	-	-	-	-
	Bauteilmerkmal 2	0	0	0	0	-	-	-	-
	Bauteilmerkmal 3	0	0	1	1	-	-	-	-
Bauteil B	Bauteilmerkmal 4	0	0	0	0	-	-	-	-

³³ Vgl. Naefe et al. (Konstruktionsmethodik für die Praxis) 2016, S.170f.

³⁴ Vgl. Naefe et al. (Konstruktionsmethodik für die Praxis) 2016, S. 37f.

³⁵ i. A. a. Browning (Design Structure Matrix Extensions and Innovations) 2016, S. 2.

Der Aufbau von Design-Structure-Matrizen im Entwicklungsprozess stößt Denkprozesse zur Identifizierung weiterer Anforderungen an. Er hilft dabei Risiken und Problempotentiale frühzeitig zu erkennen und ist als iterative Prozessbegleitung ein wichtiges Hilfsmittel bei der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Produkts.³⁶

Traditionell werden Design-Structure-Matrizen durch Experteninterviews mit relevanten Technologie-Ingenieuren oder über die Dokumentation bereits bekannter Entwicklungen derselben Produktkategorie ausgefüllt und während des Prozesses weiterentwickelt.³⁷

Simulationen

Der heutige Produktentwicklungsprozess sieht in seiner Konstruktionsphase eine computergestützte Modellierung (CAD-Modellierung) des Produkts und seiner Komponenten vor. Dieser Prozessschritt hilft nicht nur dabei, das Endprodukt zu visualisieren und die Übergänge an den Schnittstellen einzelner Bauteile zu gestalten, sondern kann auch für Simulationen in Bezug auf Belastungszustände durch Kräfte, Spannungen und thermische Einflüsse genutzt werden.³⁸

Noch bevor der erste physische Prototyp entsteht, können Finite-Element-Analysen (FEA) auf Grundlage der Finite-Element-Methode (FEM) an virtuellen CAD-Modellen angewandt werden, um Belastungszustände näherungsweise durch produkttypische Anwendungsszenarien zu simulieren. Dadurch lassen sich wichtige Ressourcen im Entwicklungsprozess einsparen, darunter Kosten und Zeit.

Grundlage der Finite-Element-Methode ist die Matrizenrechnung, welche mit Kraft- und Spannungsformeln aus der Festigkeitslehre angereichert wird. Dabei wird das geometrische Modell in eine Vielzahl kleiner, miteinander verbundener Elemente unterteilt. Durch vordefinierte Randbedingungen, wie die Größe der externen Krafteinwirkung, die Auswahl des Materials und etwaige Einspannungszustände lassen sich mit den folgenden Formeln mehrdimensionale Matrizen der einzelnen Elemente aufspannen, welche an den Schnittstellen Reaktionskräfte an angrenzende Elemente übergeben. So werden Verformungen des Gesamtmodells durch die Ergebnisse der einzelnen Elemente angenähert. Es folgt das Beispiel eines Zugversuchs:³⁹

$$\sigma_z = \frac{F_N}{A} \quad (1)$$

$$\sigma_z = E * \varepsilon \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3)$$

³⁶ Vgl. Ponn et al. (Konzeptentwicklung technischer Produkte) 2011, S. 54.

³⁷ Vgl. Wang et al. (Function Integration for Lightweight Chassis Based on DSM) 2018, S. 971f.

³⁸ Vgl. Wagner (Lineare und nichtlineare FEM: Umformsimulationen) 2017, S. 4f.

³⁹ Vgl. Brand (FEM-Praxis mit SolidWorks) 2016, S. 3ff.

$\sigma_z = \text{Zugspannung}$

$F_N = \text{Normalkraft}$

$E = \text{Elastizitätsmodul}$

$\varepsilon = \text{Dehnung}$

Durch Umstellen der Gleichung (1) nach der Normalkraft können Gleichungen (2) und (3) eingesetzt werden, sodass sich folgender Ausdruck ergibt:⁴⁰

$$F_N = \frac{E * A}{l_0} * \Delta l \quad (4)$$

Dieser Ausdruck der Kraft als das Produkt der Steifigkeit und der Verschiebung bildet die Ausgangsgleichung für die mehrdimensionale Matrizedarstellung. Für den Fall des Zugstabs mit zwei Kräften in entgegengesetzten Richtungen ergeben sich diese als Produkt aus der Element-Steifigkeitsmatrix und der Verschiebungsmatrix in folgender Schreibweise:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{EA_1}{l} * \Delta l_1 - \frac{EA_2}{l} * \Delta l_2 \\ F_2 = \frac{EA_2}{l} * \Delta l_2 - \frac{EA_1}{l} * \Delta l_1 \end{cases} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA_1}{l} & -\frac{EA_2}{l} \\ -\frac{EA_1}{l} & \frac{EA_2}{l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Diese unterbestimmte Gleichung lässt sich mithilfe der Randbedingungen lösen. FEM-Modelle vernetzen diese einzelnen endlichen Elemente und ihre Matrizen und können so Ergebnisse der Verformung oder Spannungsänderungen für das Gesamtmodell wiedergeben.⁴¹ Heutige CAD-Programme liefern dadurch schon in frühen Konstruktionsphasen erste Erkenntnisse und Schwachstellen für die Produktentwicklung. Die Element-Steifigkeitsmatrix stellt nur einen von vielen Ansätzen der FEA dar. Für die in dieser Arbeit verwendeten minimalen Simulationsansätze ist dieses Verständnis ausreichend, um den Weiterentwicklungsaspekt in der Entwurfsphase nachzuvollziehen zu können.

Eine weitere Form der Modellsimulation stellt die Flusssimulation dar, welche auch als CFD-Simulation (engl. Computational Fluid Dynamics) bekannt ist. Sie basiert auf den drei fundamentalen Prinzipien der Masseerhaltung, Energieerhaltung und dem Zusammenhang der beschleunigten Masse mit der Kraft (2. Newtonsches Gesetz). Diese Prinzipien lassen sich in mathematischen Gleichungen ausdrücken. In CFD-Analysen werden die partiellen Differentialgleichungen durch Zahlen ersetzt, welche in räumlicher und zeitlicher Form vorangetrieben werden und so eine numerische Beschreibung für Millionen von Fluidteilchen wiedergeben. Aus diesem Grund sind Fluid-Simulationen der Flussbewegungen nur über computergestützte Berechnungen zu realisieren.⁴²

Die partielle nichtlineare Differentialgleichung auf Basis der Erhaltungssätze von Masse, Impuls und Energie kann ganz grundlegend in Form der folgenden Modellgleichung beschrieben werden:

⁴⁰ Vgl. Klein (Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau) 2015, S. 46f.

⁴¹ Vgl. Brand (FEM-Praxis mit SolidWorks) 2016, S. 5.

⁴² Vgl. Wendt et al. (Computational Fluid Dynamics) 2008, S. 5ff.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + F_\varphi = D_\varphi + Q_\varphi \quad (6)$$

ρ = Dichte

φ = Strömungsgröße (z. B. Strömungsgeschwindigkeit oder Temperatur)

F_φ = konvektiver Fluss von φ

D_φ = diffusiver Fluss von φ

Q_φ = sonstige Quellen und Senken von φ

Durch Festlegung der Strömungsgröße, des diffusiven Fluxes und weiterer Quellen und Senken lassen sich einzelne Gleichungen des allgemeinen mathematischen Strömungsmodells aufstellen, welche durch Materialgesetze erweitert werden und beispielsweise mithilfe der Finite-Volumen-Methode (FVM) oder der Finite-Element-Methode auf ein Strömungsgebiet modelliert werden.⁴³ Durch die Annäherung an das tatsächliche Fluidverhalten lassen sich die erzielten Erkenntnisse auf die Konstruktionsauslegung übertragen.

2.2 Stand der Technik von Lithium-Ionen-Batterien

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über den aktuellen Stand in der Entwicklung und Auslegung von Lithium-Ionen-Energiespeichern. Zu Beginn wird der grundlegende Aufbau dieser Speichersysteme und ihrer Substrukturen erläutert. Daraufhin erfolgt eine Einordnung der unterschiedlichen am Markt erhältlichen Zelltypen für den Einsatz als Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen. Im Anschluss daran befasst sich das nachfolgende Unterkapitel mit der allgemeinen Funktionsweise der Lithium-Ionen-Speichertechnik auf molekularer Ebene. Abschließend wird der Aufbau, der in dieser Arbeit schwerpunktmäßig behandelten Lithium-Ionen-Rundzelle, untersucht. Dabei werden die gängigsten Bauteile in ihrer Ausprägung und Funktion beschrieben. Ziel des Kapitels ist es, ein vertieftes Verständnis für die Lithium-Ionen-Zelle zu schaffen und die für die Konzeption und konstruktive Auslegung der Zellbauteile wichtigen Merkmale zu unterstreichen. In diesem Zusammenhang sollen auf der einen Seite die Anforderungen an ein solches Zellsystem vermittelt werden. Auf der anderen Seite sollen sicherheitstechnische und leistungsbezogene Lösungsansätze für die konstruktive Ausgestaltung der Zelle dargelegt werden.

2.2.1 Grundlegender Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen

Dieser Abschnitt behandelt den strukturellen Aufbau von Batteriesystemen auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie. Es wird auf die verschiedenen Integrationsebenen des Batterie-Designs für elektrische Fahrzeuganwendungen eingegangen. Außerdem wird eine Übersicht über die wichtigsten Zusatzkomponenten des Batteriesystems gegeben.

⁴³ Vgl. Schwarze (CFD-Modellierung: Anwendung von Strömungsprozessen) 2013, S. 53ff.

Batterien werden auf Basis unterschiedlichster Anforderungsszenarien entwickelt und ausgelegt. Einige dieser Anforderungen betreffen die Energiedichte, die spezifische Energie, die maximale Spannung und Stromstärke sowie schnelle Ladeeigenschaften. Aber auch Faktoren wie die Dimensionierung, die Kostenkalkulation und Sicherheitsaspekte spielen eine wichtige Rolle bei der Spezifikation der Batterie. Aus diesem Grund werden Batterien für den Einsatz in Mobiltelefonen anders ausgelegt als elektrische Speicher für Unterhaltungselektronik. Noch komplexer gestaltet sich die Entwicklung von Batterien für die Automobilindustrie. Diese werden in Hybrid- und Elektrofahrzeugen als Antriebsenergiespeicher eingesetzt werden und müssen neben gesteigerten Sicherheitsanforderungen ebenfalls Aspekte wie das Kaltstartverhalten, Maximalgeschwindigkeiten und die Reichweite des Fahrzeugs berücksichtigen. Außerdem werden deutlich höhere Leistungen und eine größere elektrische Spannung zur Versorgung der Elektromotoren benötigt.⁴⁴

Um die hohen Spannungen im Bereich von 100 bis 800 Volt bei geforderten Antriebsleistungen von 15 bis 800 kW und zukünftigen Ladeleistungen im Bereich von 350 kW verarbeiten zu können, werden besondere Hochvolt-Batteriesysteme benötigt, welche aus mehreren Integrationsebenen aufgebaut sind.⁴⁵ Abbildung 2.5 gibt eine Übersicht über die drei wesentlichen Hauptgruppen der jeweiligen Integrationsebenen.

Das Batteriepack bildet die Hauptgruppe der obersten Strukturebene der Traktionsbatterie. Es besteht im Wesentlichen aus den Unterbaugruppen des Gehäuses, der Batteriemodule, des Batteriemanagementsystems, den 12V- und Hochvoltanschlüssen sowie dem Kühlsystem. Diese Unterbaugruppen lassen sich wiederum weiter unterteilen. So setzt sich das Gehäuse beispielsweise aus einem Trog, einem Gehäusedeckel, verschiedenen Modulhalterungen und Strukturelementen und einer Dichtung zusammen.⁴⁶

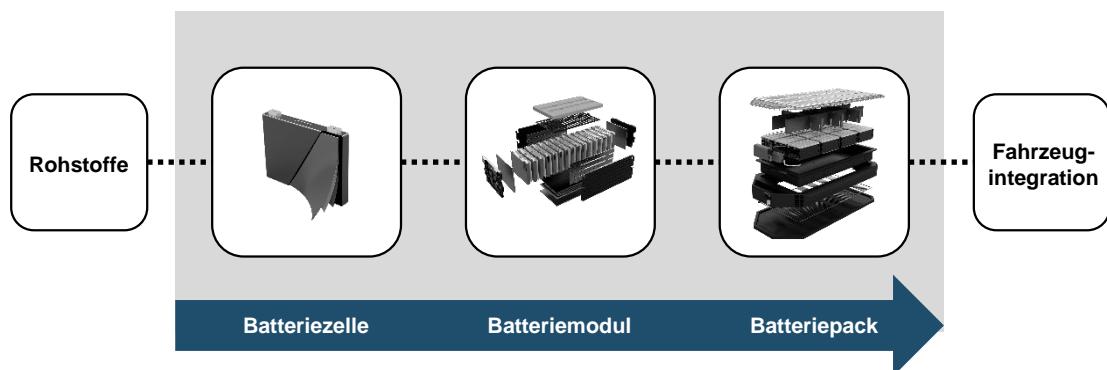


Abbildung 2.5: Integrationsebenen des Lithium-Ionen-Hochvoltspeichers⁴⁷

⁴⁴ Vgl. Korthauer (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications) 2018, S. 109f.

⁴⁵ Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 206f.

⁴⁶ Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 58.

⁴⁷ i. A. a. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 51.

Das Batteriemodul stellt die fundamentalste Unterbaugruppe des Batteriepacks dar. Ein Batteriepack besteht in der Regel aus einer Vielzahl dieser Module. Jedes Modul beinhaltet wiederum eine bestimmte Anzahl an Batteriezellen, welche normalerweise in Reihe geschaltet werden. Dadurch addieren sich die einzelnen Spannungen der verschalteten Zellen, sodass Spannungen im Hochvoltbereich erreicht werden können. Das Batterie-Management-System (BMS) hat die Möglichkeit, jedes der einzelnen Module innerhalb seiner Betriebsgrenzen zu steuern, um eben diese Spannungen und die Stromabgabe der Module aufrechtzuerhalten.⁴⁸ Zur Wahrung der mechanischen Integrität der Zellen bieten Module eine massive Gehäuseummantelung. Zusammen mit dem Packgehäuse kann so ein effektiver Schutz vor äußereren, mechanischen Einflüssen gewährleistet werden.⁴⁹

Die Batteriezelle stellt die unterste Ebene der Integrationsstufen dar. Zugleich ist sie aber das Kernelement, in welchem die eigentlichen Energiespeicherungs- und Umwandlungsprozesse ablaufen. Diese essenzielle Stellung unterstreicht auch die Kostenstruktur des gesamten Hochvolt-Batteriepacks pro zur Verfügung gestellter Wattstunde. Hierbei entfallen mehr als 60 Prozent der Kosten auf die Zellmaterialien und die Herstellung der Zellen. Prognostiziert wird bis 2025 sogar ein Anstieg dieses Wertes auf etwa 70 Prozent.⁵⁰ Weil die Batteriezelle für die Wertschöpfung und Kostenentwicklung des Batteriepacks einen so großen Beitrag leistet und der Fokus dieser Arbeit auf der Konzeptfindung und den Konstruktionsansätzen zu diesem Bauteil liegt, vertiefen die folgenden Kapitel den Aufbau, die Funktionsweise sowie die Klassifizierung von Batteriezellen, um ein grundlegendes Verständnis für die Zelle zu schaffen.

Bevor der Schwerpunkt vollends auf die Lithium-Ionen-Batteriezelle gelegt wird, ist zum Abschluss dieses Kapitels das Batterie-Management-System (BMS) als Bauteil der Batteriepackkonstruktion zu erwähnen, ohne welches der Aufbau in den Integrationsstufen aus Abbildung 2.5 in dieser Form nicht möglich wäre. Das BMS besteht aus Software- und Hardwarekomponenten wie Kommunikationsprotokollen zum Informationsaustausch mit anderen Fahrzeugbauteilen, Analysealgorithmen, Platinen, Sensoren und der Steuerungselektronik zum Messen und Regeln von Temperaturen, Ladezuständen und der Spannung.⁵¹ Eine Übersicht über den grundlegenden Aufbau und die Struktur dieser Software- und Hardwarebereiche lässt sich aus Abbildung 2.6 entnehmen.

Auch wenn das BMS auf aktuelle Sensordaten und gespeicherte Datenhistorien der einzelnen Zellen zugreifen und daraufhin vorbeugende Maßnahmen und Warnhinweise in Bezug auf den Austausch einzelner Module initiieren kann, ist es nicht in der Lage kurzfristige Szenarien wie den internen Kurzschluss einer einzelnen Zelle zu verhindern. Verursacht ein plötzlich auftretender interner Kurzschluss einen Temperaturanstieg innerhalb der Zelle, würde die Außen temperatur nicht sofort beeinflusst werden und auch die Zellspannung würde sich aufgrund

⁴⁸ Vgl. Kenney et al. (Modelling on lithium-ion battery modules) 2012, S. 391f.

⁴⁹ Vgl. Pistoia et al. (Behaviour of Lithium-Ion Batteries in EV) 2018, S.184.

⁵⁰ Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 136f.

⁵¹ Vgl. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 58f.

der großen Zellkapazität nur langsam ändern. Hierbei sind Mechanismen, die auf den Zellinnendruck und die Temperatur im Inneren der Zelle reagieren, nötig, um Kettenreaktionen zu vermeiden.⁵² Für die Auslegung der Sicherheitsmechanismen auf Zellebene ist daher ein Verständnis über den Funktionsumfang des BMS, aber auch seiner systemischen Grenzen ein wichtiger Informationsbaustein. So kann das BMS das Risiko eines thermalen Durchgehens einzelner Zellen zwar minimieren, würde jedoch zeitlich zu spät reagieren können, um diesen Vorgang zu verhindern.⁵³

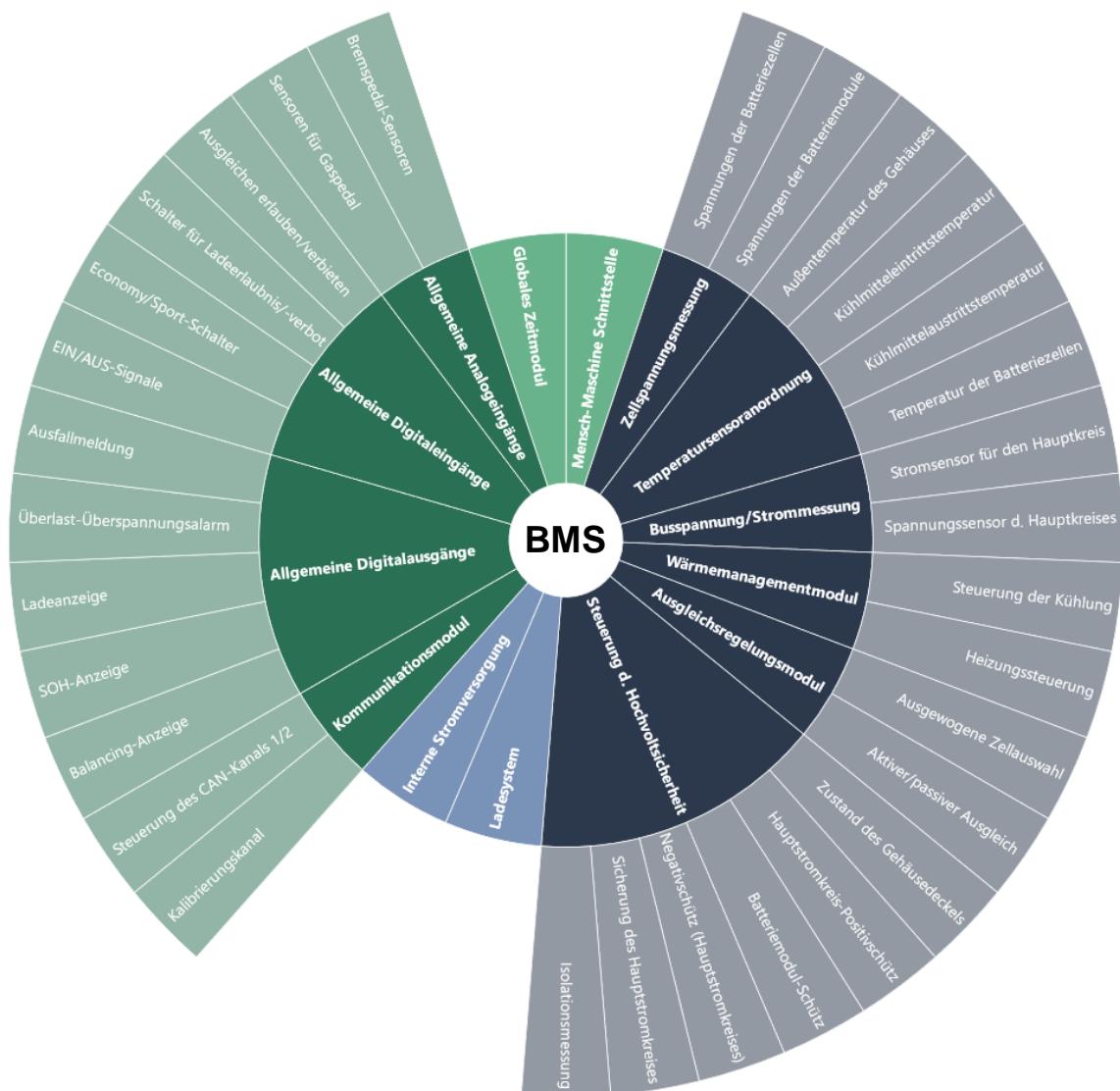


Abbildung 2.6: Grundlegende Aufbaustruktur des Batterie-Management-Systems⁵⁴

⁵² Vgl. Garche et al. (Electrochemical Power Sources) 2019, S. 316ff.

⁵³ Vgl. Finegan et al. (Characterising thermal runaway within li-ion cells) 2017, S. 1378.

⁵⁴ i. A. a. Lu et al. (issues for li-ion battery management in electric vehicles) 2013, S. 274.

2.2.2 Zelltypen für den Einsatz in elektrischen Fahrzeuganwendungen

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Unterteilung von Zellen für den Einsatz in vollelektrischen und hybriden Fahrzeugen. Dabei wird zuerst der Fokus auf die übergeordnete Klassifizierung der verschiedenen Zellen gelegt. Im Anschluss daran werden die drei grundlegenden Zelltypen betrachtet, welche in kommerziellen Fahrzeuganwendungen eingesetzt werden. Aufgrund des übergeordneten Schwerpunkts in Bezug auf die Rundzelle schließt dieses Kapitel mit der geometrischen Unterteilung der zylindrischen Zellen ab.

Typischerweise lassen sich Batteriezellen in eine von zwei Kategorien einordnen. Primärzellen sind einmalig nutzbare Batterien, welche nach ihrer Entladung nicht wiederverwendet werden können. Dagegen lassen sich Sekundärzellen vielfach wiederverwenden. Der größte kategorische Unterschied der beiden Zellklassen liegt also in ihrer Wiederaufladbarkeit.⁵⁵ Wie in Abbildung 2.7 sichtbar, wird diese Zellklassifizierungen oftmals um eine zusätzliche Zellkategorie erweitert. Ein Beispiel für die tertiären Zelle ist die Brennstoffzelle, welche ebenfalls zu den galvanischen Zellen gehört.

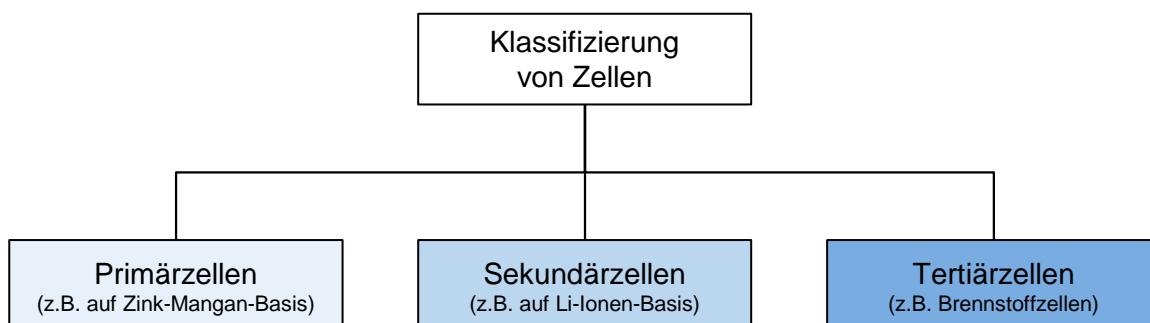


Abbildung 2.7: Grundlegende Unterteilung von Zellen in drei Klassen⁵⁶

Da Primärzellen durch ihre Eigenschaft als nicht wiederaufladbare Zellen in der Elektromobilität keine Rolle spielen, liegt der Fokus bei elektrischen Antriebsbatteriespeichern auf den Sekundärzellen. Diese lassen sich wiederum auf Basis ihrer Geometrie und ihres Aufbaus in drei Typen unterteilen. Den ersten Typ stellt die mit einem folierten Gehäuse ausgestattete Pouchzelle dar. Bei den zwei weiteren Typen, welche sich insbesondere durch ihr stabiles Metallgehäuse auszeichnen, handelt es sich um die prismatische sowie die zylindrische Zelle (auch Rundzelle).⁵⁷ Abbildung 2.8 gibt anhand von vereinfachten Darstellungen einen ersten Einblick über die Form und den grundlegenden Aufbau dieser drei Zelltypen.

Die Pouchzelle zeichnet sich durch ein aus Aluminiumfolie bestehendes Gehäuse aus. Durch diese leichte und flache Ummantelung ergeben sich hohe Energiedichten und gute Kühl eigenschaften für diesen Zelltyp. Dem gegenüber steht eine nicht optimale Stapelbarkeit der Elekt-

⁵⁵ Vgl. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S.65.

⁵⁶ i. a. A. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S.19.

⁵⁷ Vgl. Pistoia (Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications) 2014, S.389f.

roden und Separatoren im Inneren der Zelle. Außerdem reduziert sich der genannte Gewichtsvorteil auf Zellebene durch die Notwendigkeit eines stabilen Gehäuses auf Modulebene, da sich die Zellen bei einem steigenden inneren Druck aufblähen. Insgesamt stellt auch die Dichtigkeit über den gesamten Lebenszyklus der Batterie eine vielfach in der Literatur benannte Problematik dar.⁵⁸

Die prismatische Zelle wird verstärkt in Applikationen mit erhöhtem Speicherkapazitätsbedarf eingesetzt. Inmitten des prismatisch geformten Metallgehäuses werden die Elektroden zusammen mit einem Separator zu Stapeln zusammengesetzt. Der obere Teil des Gehäuses wird mit einem Deckel verschlossen. In diesem Deckel sind in der Regel optionale Elektronik und Sensorik integriert. Außerdem besitzt der Deckel eine Überdruckvorrichtung, welche zumeist zwischen den beiden Terminals angesiedelt ist.⁵⁹ Neben der gestapelten Variante kann die prismatische Zelle ebenfalls als gewickelte Elektroden-Separator-Kombinationen ausgeführt sein. Im Vergleich zu einer zylindrisch geformten Zelle weist der prismatische Zelltyp durch seine großen Gehäuseoberflächen bessere Wärmedissipationseigenschaften auf. Die Form der Oberflächen ermöglicht zudem eine einfachere Kühlung im Zellverbund.⁶⁰

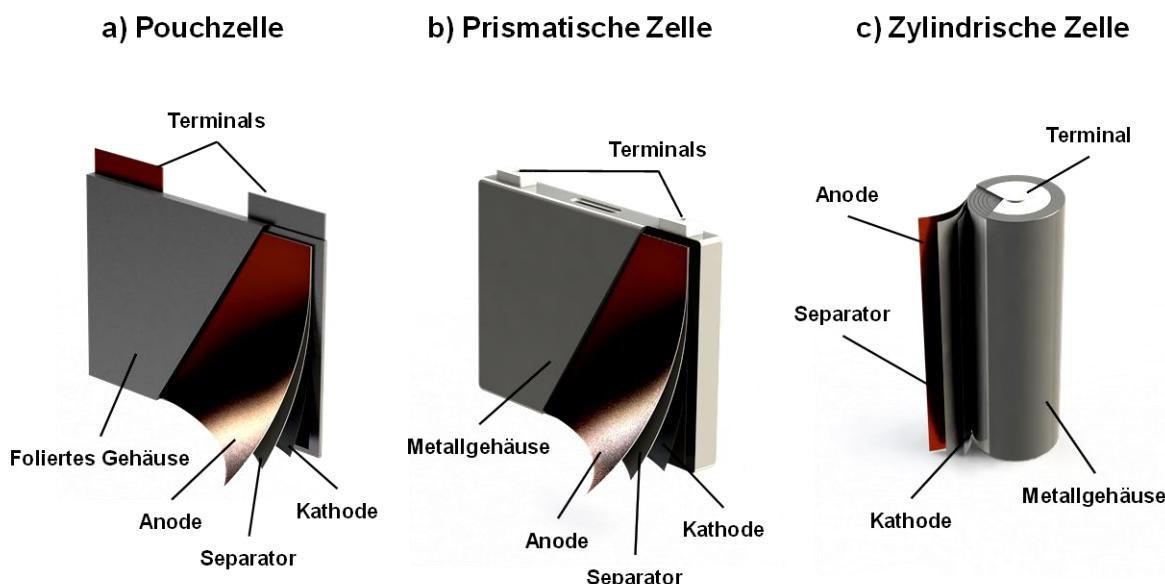


Abbildung 2.8: Vereinfachte Darstellung der drei Zelltypen für Elektrofahrzeuge^{61,62}

Zylindrische Zellen besitzen ebenfalls den Vorteil eines aus Edelstahl, nickelbeschichtetem Edelstahl oder Aluminium gefertigten Zellgehäuses. Dieses schützt den Zellwickel vor äußeren mechanischen Einflüssen und sorgt gleichzeitig für einen ausreichenden Fixierungsdruck auf

⁵⁸ Vgl. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 54f.

⁵⁹ Vgl. Garche et al. (Electrochemical Power Sources) 2019, S. 25.

⁶⁰ Vgl. Korthauer (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications) 2018, S. 108f, S. 220.

⁶¹ i. A. a. Johnson Matthey Battery Systems (Our Guide to Batteries) 2015, S. 6f.

⁶² i. A. a. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 54.

den gewickelten Folienzylinder im Inneren.⁶³ Kapitel 2.2.4 beschreibt den Aufbau der Rundzelle im Detail und geht auch auf die einzelnen Bauteile ein.

Insbesondere im Bereich der Rundzellentypisierung haben sich geometrische Standards etabliert. So wurden in den letzten Jahren für den Einsatz in Elektrofahrzeugen aber auch in leistungsfähigen Applikationen wie Notebooks fast ausschließlich sogenannte 18650er-Rundzellen eingesetzt. Die Nomenklatur 18650 steht dabei für einen standardisierte Durchmesser von 18 mm sowie eine vorgegebene Höhe von 65 mm.⁶⁴ Nachdem zunächst versucht wurde, diesen Standard zugunsten der 20700er-Geometrie auszutauschen, setzte sich schlussendlich jedoch der 21700er-Standard durch. Dieser erlaubt durch seine großzügigeren Abmessungen eine Vergrößerungen des Elektrodenbereichs und der vorhanden Windungen, was sich in einer höheren Energiedichte aber auch in gesteigerten Sicherheitsanforderungen widerspiegelt.⁶⁵ Trotz des gestiegenen Volumens gehören die Rundzellen zu den kleineren Batterietypen. Für den Einsatz in Elektrofahrzeugen wird demzufolge eine weitaus größere Anzahl an Zellen benötigt, als mit dem prismatischen Standard nötig wäre. In Tabelle 2.4 findet sich ein Vergleich der verwendeten Zelltypen zusammen mit der Anzahl an eingesetzten Zellen für verschiedene Fahrzeugmodelle.

Abschließend ist zu erwähnen, dass jeder Zelltyp seine Vor- und Nachteile mit sich bringt. Die Wahl sollte immer unter Einbezug der definierten Anforderungen getroffen werden. Die kleineren Abmessungen der Rundzelle sowie Standards, wie die 21700er-Geometrie, haben allerdings den Vorteil, dass dadurch große Stückzahlen produziert werden können, woraus sich hohe Skaleneffekte ableiten lassen. Außerdem bringt jede der kleineren Rundzellen eingebaute Sicherheitselemente mit sich. Dies kann die Gesamtsicherheit auf Modul- und Packebene verbessern. Auch der Ausfall einzelner Zellen hat weit weniger Auswirkungen als es bei verhältnismäßig wenigen prismatischen Zellen mit deutlich größeren Geometrien der Fall wäre.⁶⁶

Tabelle 2.4: Vergleich der verwendeten Zelltypen verschiedenen Fahrzeugmodelle^{67,68}

Modell	Zelltyp	Anzahl d. Zellen	Packkapazität [kWh]
Tesla Model-S Sedan	zylindrisch (18650)	>7000	85
GM Chevrolet Volt	Pouch	288	16,5
Nissan LEAF	Pouch	192	24
Mitsubishi i-MiEV	prismatisch	88	16

⁶³ Vgl. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S. 85.

⁶⁴ Vgl. Pistoia (Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications) 2014, S. 132f.

⁶⁵ Vgl. Quinn et al. (Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells) 2018, S. 3284.

⁶⁶ Vgl. Pistoia (Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications) 2014, S. 133.

⁶⁷ Vgl. Saw et al. (Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles) 2016, S. 1033.

⁶⁸ Vgl. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S. 84f.

2.2.3 Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batteriezellen

In diesem Unterkapitel geht es schwerpunktmäßig um das Funktionsprinzip der Lithium-Ionen-Batterie. Dazu erfolgt in erster Instanz eine Abgrenzung der Lithium-Ionen-Technologie von anderen bekannten Batteriezusammensetzungen. Im Anschluss werden die allgemeinen Reaktionsgleichungen an der Anode und Kathode betrachtet. Abschließend werden diese Reaktionen und der damit zusammenhängende Ionen- und Elektronentransport sowie die dafür nötigen Materialien und Elemente für den Lade- und Entladevorgang beleuchtet.

Die Lithium-Ionen-Batterietechnologie basiert namentlich auf dem Material ihrer Anode. Dabei handelt es sich um das sehr leichte und mit einer geringen Dichte ausgestattete Metall Lithium. In Kombination mit einem Kathodenmaterial, welches möglichst weit rechts im Periodensystem angesiedelt ist, ergeben sich hohe Spannungen und ein großer Energieinhalt.⁶⁹

Abbildung 2.9 zeigt die Energievorteile verschiedener Lithium-Kombinationen in Form eines Graphen. Auf den Achsen sind die gravimetrische und volumetrische Energiedichte für die Bereiche der jeweiligen Materialkombinationen aufgetragen. Sämtliche Lithium-Ansätze orientieren sich in Richtung der oberen, rechten Ecke des Graphen, wohingegen Nickel- oder auch Bleibatterielösungen im unteren, linken Bereich angesiedelt sind.

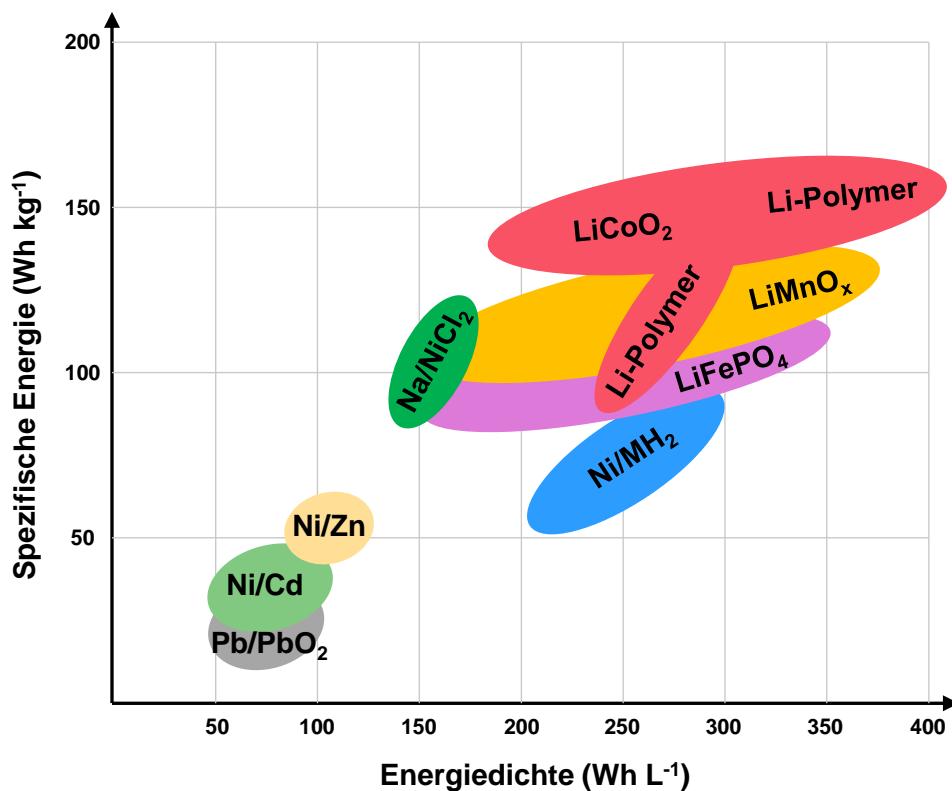


Abbildung 2.9: Energieausprägungen unterschiedlicher Batterietechnologien⁷⁰

⁶⁹ Vgl. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 19.

⁷⁰ i. A. a. Garche et al. (Electrochemical Power Sources) 2019, S. 51.

Weitere Vorteile der Lithium-Ionen-Batterien sind ihre hohe Betriebsspannung von etwa 3,7 Volt sowie die Operabilität in großen Temperaturbereichen. Hinzu kommt, dass Zellen auf Lithium-Ionen-Basis keine Memory-Effekte aufweisen und sich über einen langen Zeitraum nur geringfügig entladen (weniger als 20% im Jahr).⁷¹ Diese hohen Energiedichten der Lithium-Ionen-Akkumulatoren, zusammen mit ihren guten Leistungseigenschaften, prädestinieren damit diese Arten von Zellen als Antriebsbatterien in Elektrofahrzeugen, während kostengünstige Blei-Säure-Batterien weiterhin als Starterbatterien eingesetzt werden.⁷²

Wie der Name Lithium-Ionen-Batterie bereits andeutet, spielen bei den Lade- und Entladeprozessen die Lithium-Ionen eine entscheidende Rolle. Sowohl bei der Reaktion auf Kathodenseite als auch auf Seiten der Anode ist Lithium als Produkt oder Edukt involviert. In sehr allgemeiner Form lassen sich die Reaktionen folgendermaßen beschreiben, wobei MO für Metalloxid steht:⁷³



Für den Entladevorgang verlaufen die beiden Gleichungen (7) und (8) der jeweiligen Elektroden von links nach rechts. Beim Ladevorgang kehren sich die Reaktionsrichtungen um und beginnen auf der rechten Seite des Gleichgewichtspfeils.

Für das traditionell verwendete Kathodenmaterial Lithium-Kobalt-Oxid (LCO) kann die Reaktionsgleichung damit wie folgt dargestellt werden:



Dabei darf nur 50% des Lithiums während der Lade- und Entladevorgänge verwendet werden, da die Kristallstruktur ansonsten beim Verlassen der Lithium-Ionen (Deinterkalation) kollabieren könnte.⁷⁴

Lithium-Kobalt-Oxid stellt nur eines der potenziellen Kathodenmaterialien dar. Mögliche Alternativen, welche auch in kommerziellen Zellen zum Einsatz kommen, sind in Tabelle 2.5 zusammen mit ihren chemischen Strukturen aufgelistet.

Der Vorgang, welcher in den Formeln (7) bis (9) lediglich als Reaktionsgleichung dargestellt ist, kann auf Teilchenebene als reversible Interkalations- und Deinterkalationszyklen zweier Schichtverbindungen bezeichnet werden, bei der die Interkalation von Lithium in die Graphitstruktur in Stufen (z.B. LiC_{24} , LiC_{27} und LiC_{12}) erfolgt. Dabei können zu Beginn erste Polarisationen von Graphit-Elektroden einen Passivierungsschicht bilden, die in der Folge weitere irreversible Reaktionen verhindert und eine metastabile Umgebung schafft.⁷⁵

⁷¹ Vgl. Pistoia (Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications) 2014, S. 22.

⁷² Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 137.

⁷³ Vgl. Ramadesigan et al. (Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries) 2012, S. 33.

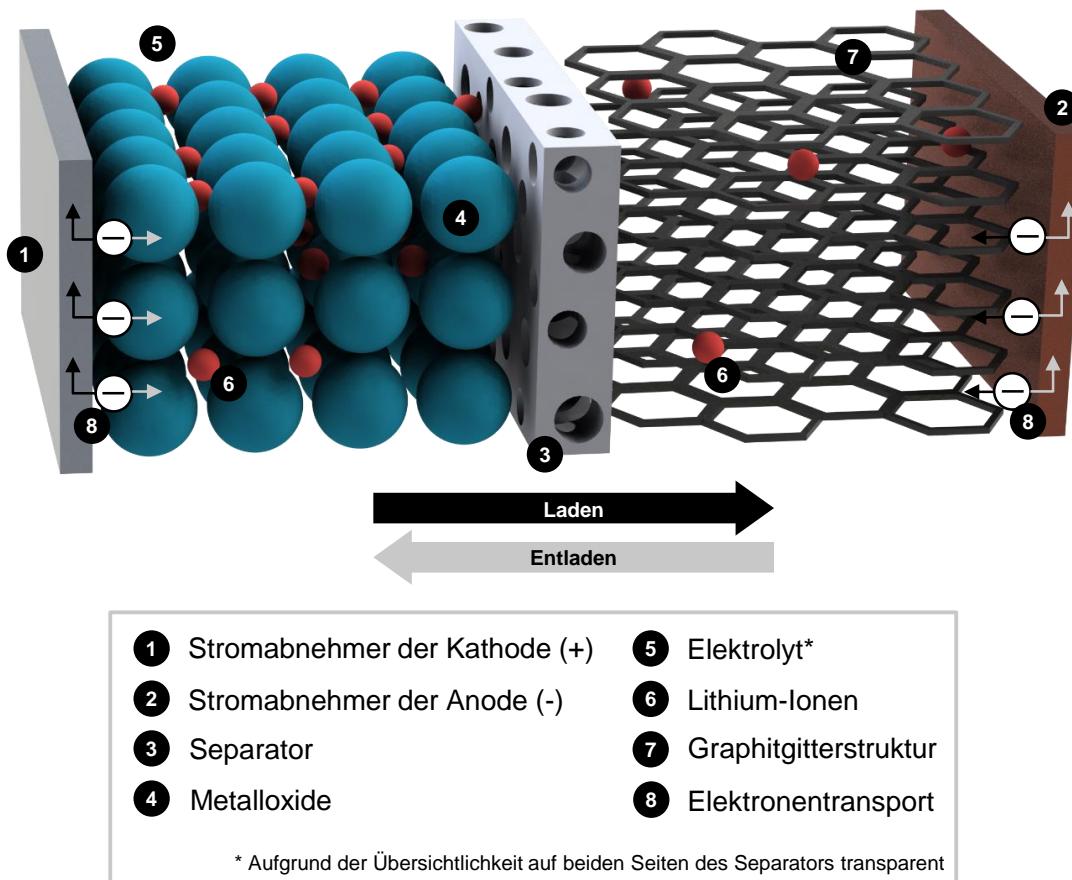
⁷⁴ Vgl. Korthauer (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications) 2018, S. 22f.

⁷⁵ Vgl. Etacheri et al. (Challenges in the development of Li-ion batteries) 2011, S.3.

Tabelle 2.5: Alternative Kathodenmaterialien zu Lithium-Kobalt-Oxid⁷⁶

Bezeichnung	Abkürzung	Chemische Struktur
Lithium-Mangan-Oxid	LMO	LiMn_2O_4
Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid	NCM	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$
Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid	NCA	$\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$
Lithium-Eisen-Phosphat	LFP	LiFePO_4

Die beschriebene Teilchenebene ist in Abbildung 2.10 in vereinfachter Form dargestellt. Auf der linken Seite befindet sich die aus Sicht des Entladevorgangs positive Elektrode. Diese sogenannte Kathode besteht meist aus dem Kollektormaterial Aluminium sowie einer Metallocidbeschichtung. Die Anode auf der rechten Seite der Abbildung 2.10 teilt sich in einen Kupferkollektor und eine Graphitstruktur auf. Getrennt sind diese beiden Elektroden durch einen Separator, welcher nur für die kleineren Lithium-Ionen durchlässig ist.

Abbildung 2.10: Transport der Lithium-Ionen beim Laden und Entladen⁷⁷

⁷⁶ Vgl. Korthauer (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications) 2018, S. 24f.

⁷⁷ i. a. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S. 76.

Bei der Entladung wandern die Lithium-Ionen über das Elektrolyt und durch den Separator von der Graphitstruktur der Anode zum Metalloxid. Die freiwerdenden Elektronen werden gleichzeitig über den Verbraucherkreis an die Kathode abgegeben. Wie die Pfeilrichtungen in der Abbildung 2.10 zeigen, verläuft dieser Vorgang beim Ladeprozess in umgekehrter Reihenfolge.⁷⁸

Lithium-Ionen-Batterien erfüllen viele Vorgaben in Bezug auf die spezifische Energie, hohe Spannungen und große Energiedichten. Da eine Zelle aber viele weitere Anforderungen, wie z.B. Sicherheit, Kosten, Gewicht, geforderte Abmaße und hohe Lebenszyklen einhalten muss und Batteriezellen generell in Übereinstimmung mit diesen Anforderungen entwickelt werden,⁷⁹ bedarf es weiterer Bauteile, welche im nachfolgenden Unterkapitel ausführlich behandelt werden.

2.2.4 Aufbau und Bauteile von Lithium-Ionen-Rundzellen

Dieses Unterkapitel behandelt den konkreten Aufbau einer Lithium-Ionen-Rundzelle. Dabei wird insbesondere auf die relevantesten Bauteile eingegangen, ihre besonderen Merkmale erläutert und verschiedene Bauteilausprägungen und -konfigurationen betrachtet. Außerdem wird in diesem Zusammenhang die Funktion der Bauteile vertieft sowie ihre Relevanz für die Sicherheit der gesamten Zelle hervorgehoben. Relevant sind besonders die Bauteile, die aufgrund Ihres Funktionsumfangs erhöhtes Forschungsinteresse in der Literatur auf sich gezogen haben und dadurch in der konstruktiven Auslegung wachsender Aufmerksamkeit bedürfen.

Einen ersten Überblick über die verschiedenen Bauteile einer Lithium-Ionen-Rundzelle gibt Abbildung 2.11 in Form einer Explosionsdarstellung.

Der Gehäusebecher (Unterpunkt 7) wurde in dieser Abbildung geteilt dargestellt, um das Innengeleben sichtbarer zu machen. Ein Großteil des Zellvolumens wird durch die Wickelkonstruktion (Unterpunkt 8) beansprucht. In ihr erfolgen die chemischen und physikalischen Prozesse zur Speicherung und Abgabe des Stroms. Die Wicklung ist damit eines der funktionsrelevantesten Bauteile, weist aber auch viele Sicherheitsaspekte auf, welche ebenfalls in diesem Kapitel behandelt werden. Direkt an den Wickel grenzen weitere Bauteile, die in das Wickelungskonzept integriert werden müssen (Unterpunkte 5, 6, 9 und 10).

Oberhalb des Wickels befindet sich die Kopfbaugruppe (Unterpunkte 2-4). Diese umfasst wichtige Bauteile, wie das positive Terminal (Unterpunkt 2) und verschiedene Sicherheitskomponenten (Unterpunkt 4, hier nur das CID). Neben dem Gehäuse ist die Kopfbaugruppe aus konstruktionstechnischer Sicht der interessanteste Bereich, da hier auf sehr geringem Bauraum eine hohe Funktionsdichte vereint wird.

⁷⁸ Vgl. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 45f.

⁷⁹ Vgl. Korthauer (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications) 2018, S. 109f.

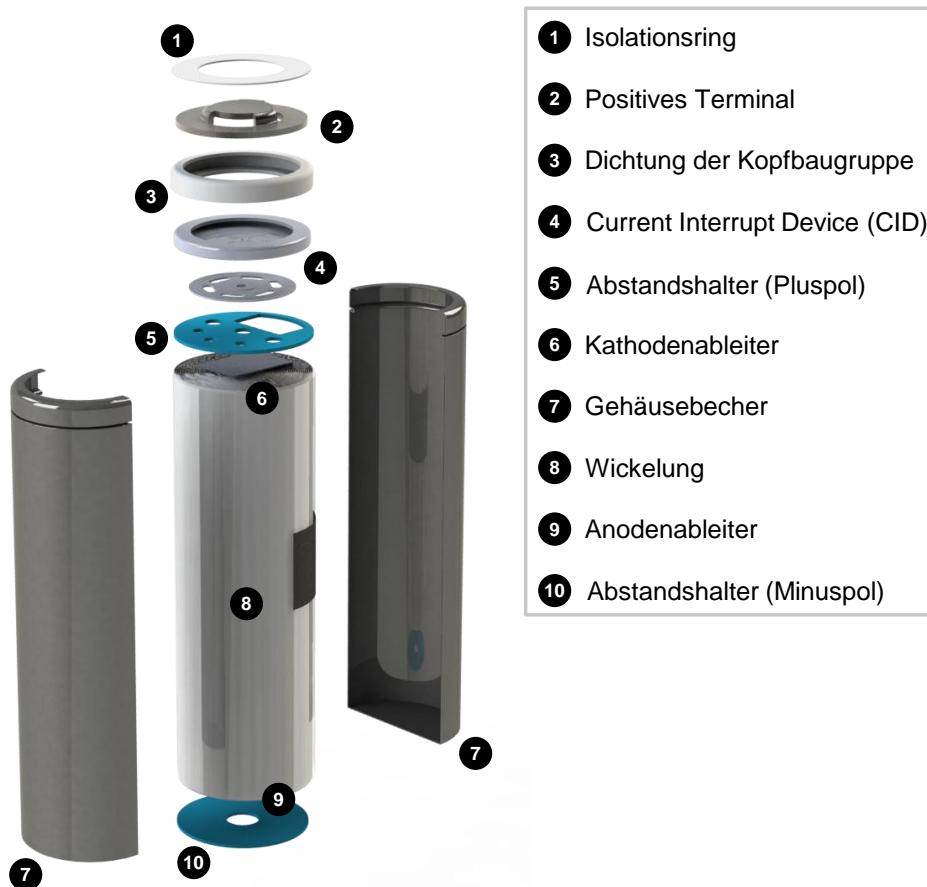


Abbildung 2.11: Übersicht der wichtigsten Bauteile einer Li-Ionen-Rundzelle

Im Folgenden werden nun die konstruktionsrelevantesten Bauteile im Einzelnen in Bezug auf ihre Funktion und Rolle innerhalb der Zelle beleuchtet. Wichtige Aspekte und Ausprägungsmöglichkeiten werden in diesem Zusammenhang ebenfalls vorgestellt.

Gehäuse

Das Gehäuse von Lithium-Ionen-Rundzellen umschließt den Wickel, die Kopfbaugruppe sowie alle weiteren funktions- und sicherheitsrelevanten Bauteile. Der Gehäusebecher besteht typischerweise aus Aluminium oder Edelstahl. Die Verwendung von Metall für die Becherstruktur bringt den Vorteil mit sich, dass der Eintritt von Feuchtigkeit und die daraus resultierenden schädlichen Reaktionen (z.B. Hydrolyse zu Fluorwasserstoff) vermieden werden. Außerdem schützt ein metallisches Gehäuse vor dem Austritt von Lösungsmitteln durch Diffusion. Dieser Umstand wäre bei einer Verwendung von Kunststoff nicht gewährleistet.⁸⁰ Die Wanddicken der Becher lagen bei verschiedenen wissenschaftlichen Versuchen mit kommerziellen Zellen zwischen 0,22 und 0,30 mm.⁸¹ Andere Untersuchungen kamen auf Werte zwischen 0,17 und 0,25 mm, wobei hier explizit festgestellt wurde, dass die Wanddicke nicht durchgängig bei

⁸⁰ Vgl. Korthauer (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications) 2018, S. 105f.

⁸¹ Vgl. Lao et al. (Thermal Runaway Induced Casing Rupture) 2020, S. 2.

einem konstanten Wert lag, sondern im oberen Abschnitt dicker war und zum Gehäuseboden hin abnahm.⁸²

Ein wichtiges Sicherheitsmerkmal der Becherkonstruktion ist die horizontal verlaufende, kreisförmige Einkerbung im oberen Bereich des Gehäuses. Diese sogenannte Sicke befindet sich oberhalb des Wickels mitsamt seiner beiden scheibenförmigen Abstandshalter und sorgt für eine Fixierung des Wickelzylinders innerhalb der Zellummantelung.

Die kreisförmige Einkerbung hat zusammen mit der Umstülpung am Kopf des Gehäuses, welche der Versiegelung dient, besonderen Einfluss auf den Berstdruck der Zelle. Abbildung 2.12 zeigt verschiedene Einkerbungsdesigns am Querschnitt des Gehäusebechers, welche sich in Einkerbungshöhe, Einkerbungstiefe und dem finalen Einkerbungswinkel unterscheiden. Über diese Parameter kann der Widerstand gegenüber dem Innendruck beeinflusst und so der nötige Berstdruck eingestellt werden. Je nach Ausprägung wird es der Kerbstelle ermöglicht, sich mehr oder weniger auszudehnen, bevor sie nachgibt und die Kopfbaugruppe freigibt.⁸³

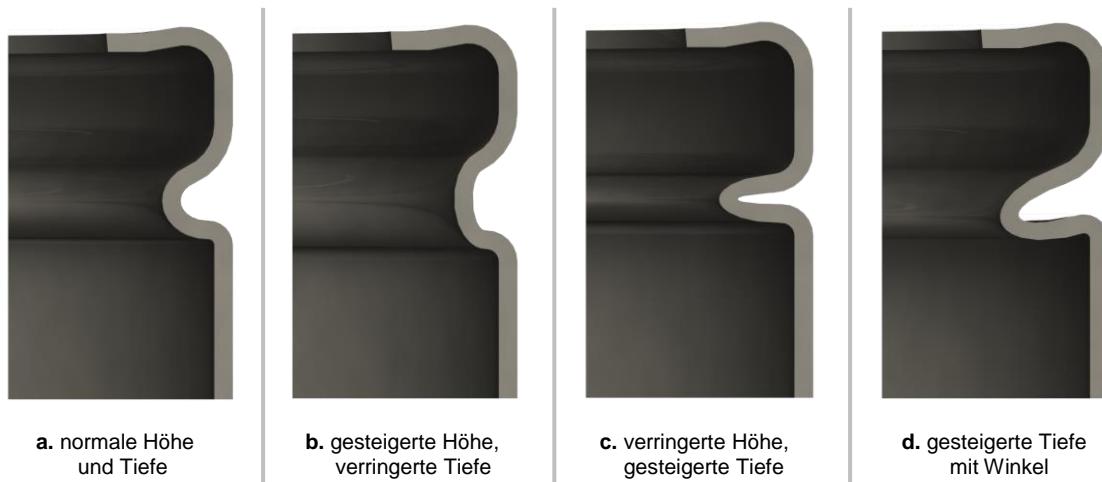


Abbildung 2.12: Einkerbungsvarianten am Gehäusebecher

Im Zusammenhang mit der Auslegung der Sicke sollte jedoch bedacht werden, dass eine gesteigerte Höhe der Einkerbung auch die Gesamthöhe der Zelle beeinflusst. Außerdem sind mögliche Ausdehnungsflächen im Rahmen der Modulkonstruktion einzuplanen, da sich sonst der Druck auf die Seitenwände verlagert. Seitenwandbrüche gefährden die umliegenden Zellen durch die Gefahr der Kettenreaktion in einem höheren Maß als ein Auswurf von Gasen und Materialien in eine definierte Richtung.⁸⁴

Wickelung

Der Wickel (engl. jelly roll) stellt eines der zentralen Elemente einer jeden Rundzelle dar. Das Zusammenspiel und die Kombination der Aktivmaterialien sowie der Aufbau der gesamten

⁸² Vgl. Zhu et al. (Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells) 2016, S. 334.

⁸³ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 2.

⁸⁴ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 8f.

Wickelkonstruktionen wirken sich direkt auf Parameter wie Sicherheit, Energiedichte und Leistungsvermögen der Zelle aus.

Bei Lithium-Ionen Batteriezellen wird grundsätzlich zwischen zwei unterschiedlichen Elektrodenstrukturen unterschieden. Während bei der Pouch-Zelle der Separator zusammen mit den beschichteten Anoden- und Kathodenfolien gestapelt wird, erfolgt bei der Rundzelle eine Wicklung der Folien zu einem Zylinder. Diese Form ist aus Sicht der CAD-Modellierung und im Hinblick auf Energieflossbetrachtungen weitaus komplexer in ihrer Realisierung als vergleichbare Pouch-Ansätze.⁸⁵ Zusätzlich zu der komplexen Wickelform kommen Inhomogenitäten innerhalb der vertikalen Geometrie und Deformationen an der aufgewickelten Rolle aufgrund von Lade- und Entladevorgängen, minimal variierenden Beschichtungsdicken und Ableiterpositionen.⁸⁶

Die Kathoden- und Anodenkollektorfolien des Wickels bestehen zumeist aus Aluminium und Kupfer. Ihre Dicke beträgt durchschnittlich 10 bis 15 µm. Im beschichteten Zustand wird eine Dicke von circa 0,1 bis 0,2 mm erreicht. Der polymere Separator zur Trennung von Anode und Kathode weist eine Dicke von etwa 10 bis 25 µm auf.⁸⁷ Abbildung 2.13 zeigt den Querschnitt einer solchen Folienanordnung für doppelseitig beschichtete Kathoden- und Anodenkollektorfolien sowie die Trennung der jeweiligen Folien mit ihren Beschichtungen durch einen Separator.

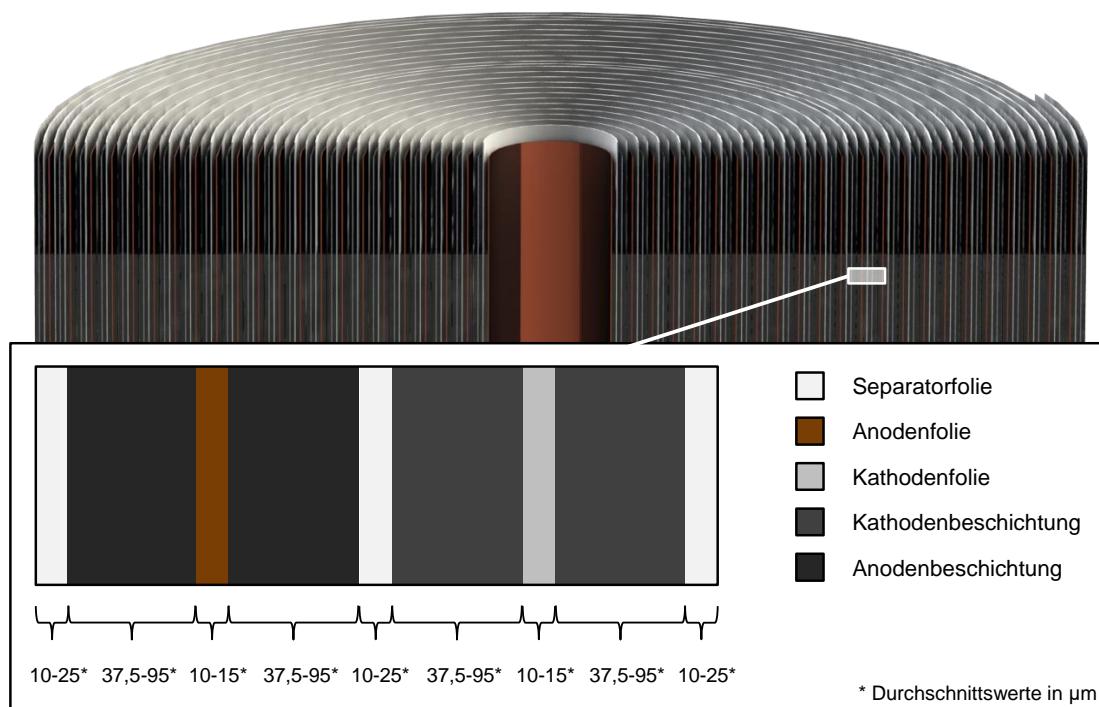


Abbildung 2.13: Querschnitt der Wickelschichten einer Rundzelle

⁸⁵ Vgl. Guo et al. (Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell) 2014, S. 220.

⁸⁶ Vgl. Pfrang et al. (Cause of Mechanical Failure in Li-Ion Batteries) 2019, S. 3749.

⁸⁷ Vgl. Wierzbicki et al. (Properties for the jellyroll of cylindrical Lithium-ion cells) 2013, S. 467.

Bei dieser Beschichtungsart auf beiden Seiten der Kupfer- und Aluminiumfolie muss jedoch berücksichtigt werden, dass die jeweiligen Beschichtungsdicken möglichst unterhalb von 100 µm liegen, um die Gefahr eines Bruches der ersten Beschichtungswindungen durch geringe Radien im Kern der Wickelung zu minimieren.⁸⁸

Ein weiteres Konstruktionsdetail, welches aus der Wickeldarstellung in Abbildung 2.13 entnommen werden kann, bezieht sich auf die Höhe des Separators im Zusammenhang mit den Höhen der Anoden- und Kathodenfolien. Der Separator überragt die beschichtete Anodenfolie sowohl am oberen als auch am unteren Rand der Wickelung. Die Anodenfolie wiederum weist eine erhöhte Weite im Vergleich zur Kathodenfolie auf. Diese Überstände dienen dem Schutz vor Kurzschlüssen und sind damit wichtige Sicherheitsaspekte.⁸⁹

Während für die Betrachtung des Energie- und Stromflusses aber auch des Wärmetransfers am Wickel meist zusätzliche mathematische Modelle verwendet werden,⁹⁰ lässt sich die Wickelung aus geometrischer Sicht auf Basis einer archimedischen Spirale beschreiben.⁹¹

Im Polarkoordinatensystem kann die archimedische Spirale mathematisch folgendermaßen dargestellt werden:⁹²

$$r = r_0 + \frac{D}{2\pi}\theta \quad (10)$$

r = Radialkoordinate

r₀ = initialer Radius

θ = Winkelkoordinate

D = Windungsabstand

Mit Hilfe einer Umrechnung der Polarkoordinaten in das kartesische Koordinatensystem, unter Einhaltung Koordinatenursprungs, lässt sich für x und y folgende Parameterdarstellung bestimmen:

$$x(\theta) = r \cos \theta \quad (11)$$

$$x(\theta) = (r_0 + \frac{D}{2\pi}\theta) \cos \theta \quad (12)$$

$$y(\theta) = r \sin \theta \quad (13)$$

$$y(\theta) = (r_0 + \frac{D}{2\pi}\theta) \sin \theta \quad (14)$$

Das Ergebnis ist ein mathematisches Modell zur Darstellung jedes Wickelpunktes durch die Variablen x und y. Abbildung 2.14 zeigt eine beispielhafte Visualisierung der archimedischen

⁸⁸ Vgl. Ciez et al. (Comparison between cylindrical and prismatic li-ion cells) 2017, S. 274.

⁸⁹ Vgl. Korthauer (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications) 2018, S. 216.

⁹⁰ Vgl. Guo et al. (Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell) 2014, S. 220f.

⁹¹ Vgl. Waldmann et al. (Mechanical Aging Mechanism in Li-Ion Batteries) 2014, S. 1745.

⁹² Vgl. Guo et al. (Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell) 2014, S. 221.

Spirale mithilfe der hergeleiteten Parameterdarstellung aus den Gleichungen (12) und (14) für ein Winkelintervall von $0 < \theta < 10\pi$, einem initialen Radius von 1 und einem konstanten Windungsabstand von 0,5. Eine solche Darstellung mittels der Parameterdarstellung kann dann als Grundlage für das CAD-Modell des Wickels dienen.

Bei der Wahl des Winkelintervalls spielt der Innendurchmesser des Gehäusebechers in der späteren CAD-Konstruktion als Randbedingung eine Rolle. Der initiale Radius ist abhängig von einem eventuell vorhandenen Wickeldorndurchmesser und der Windungsabstand bestimmt sich über die Dicken der Anoden- und Kathodenfolien, ihrer jeweiligen Beschichtungsdicke und der Dicke des Separators.

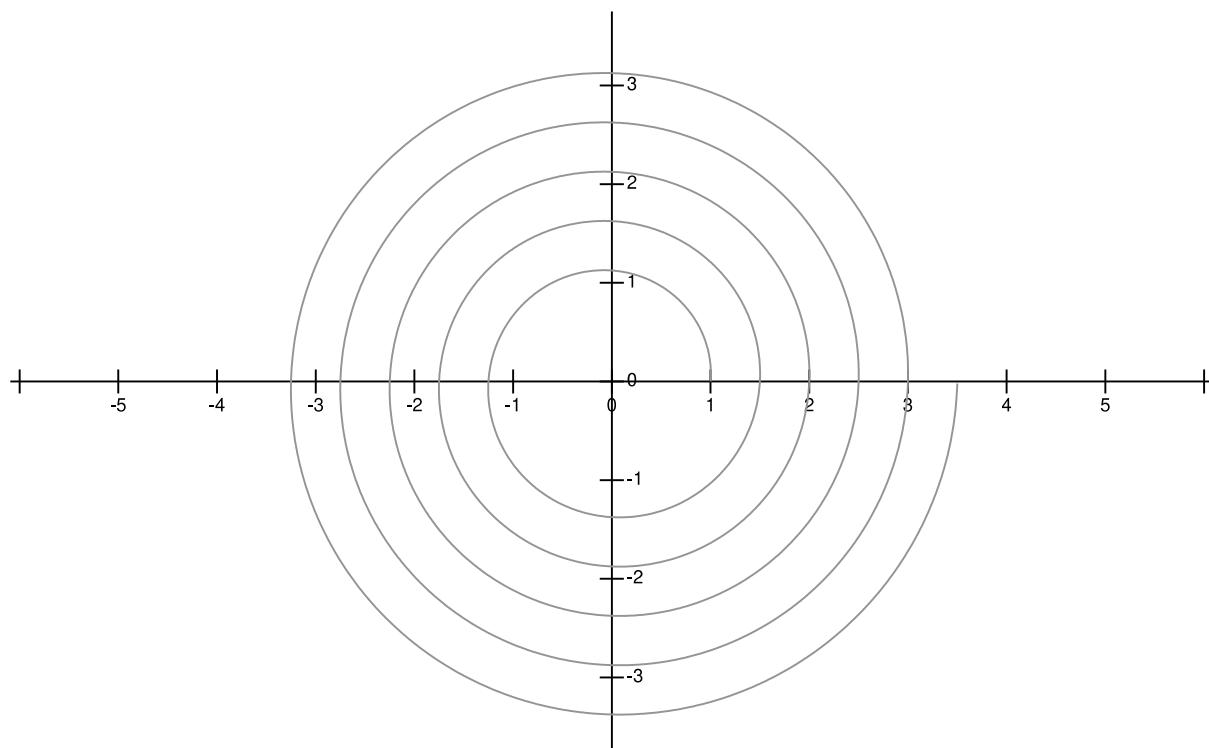


Abbildung 2.14: Archimedische Spirale als Grundlage der Wickelungsdarstellung

Bei Post-Mortem-Analysen verschiedener kommerzieller 21700er Zellen konnten für den Windungsabstand Durchschnittswerte von $376 \pm 13 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Der durchschnittliche innere Gehäusedurchmesser betrug bei diesen Zellen 20,7 mm. Außerdem wurde ein Maximum von 22 Windungen gezählt. In Bezug auf den Windungsabstand ist zu erwähnen, dass die ermittelten Werte minimal von den tatsächlichen Werten abweichen können, da durch die Entnahme und Reinigung des Wickels möglicherweise Material abgetragen wurde und der Außendruck nicht mehr vorhanden war.⁹³

Mithilfe der archimedischen Spirale als grundlegendes Modell lässt sich die Bogenlänge s der Windungen über die nachfolgende Formel berechnen:⁹⁴

⁹³ Vgl. Quinn et al. (Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells) 2018, S. 3286.

⁹⁴ Vgl. Waldmann et al. (Mechanical Aging Mechanism in Li-Ion Batteries) 2014, S. 1745.

$$s = \frac{D}{4\pi} \left[\theta \sqrt{1 + \theta^2} + \ln(\theta + \sqrt{1 + \theta^2}) \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (15)$$

Hierbei ist zu beachten, dass θ_1 den Winkel der archimedischen Spirale abdeckt, welcher im freien Kernbereich des Wickels angesiedelt ist und somit abgezogen werden muss. Die dadurch berechnete Länge ist vornehmlich für die konstruktive Auslegung der Kathoden-, Anoden- und Separatorfolien ein elementares Maß.

Eine zentrale Rolle bei der Konstruktion von Li-Ionen-Rundzellen nimmt der Wickeldorn im Kern der zylinderförmigen Wickelung ein. Insbesondere seine Sicherheitseigenschaften und Auswirkungen auf Ausfallmechanismen der Zelle machen den Dorn zu einem sicherheitsrelevanten Bauteil für die Gesamtkonstruktion.⁹⁵ Der Einsatz eines Wickeldorns unterstützt nicht nur die mechanische Stabilität der Zelle, sondern trägt in der entsprechenden Ausführung ausdrücklich zu einem verbesserten Gasflussverhalten bei. Den durch Lade- und Entladevorgänge entstehenden Gasen und fluidisierten Materialpartikeln wird durch das passende Dorndesign ein freier Pfad zu den Entlüftungsöffnungen geschaffen, sodass Druckanstiege durch Gaseinschlüsse minimiert werden.⁹⁶ Grundsätzlich lässt sich zwischen vier potentiellen Ausprägungsmöglichkeiten des Wickeldorns unterscheiden, welche in Abbildung 2.15 in ihrer jeweiligen Formgebung skizziert sind.

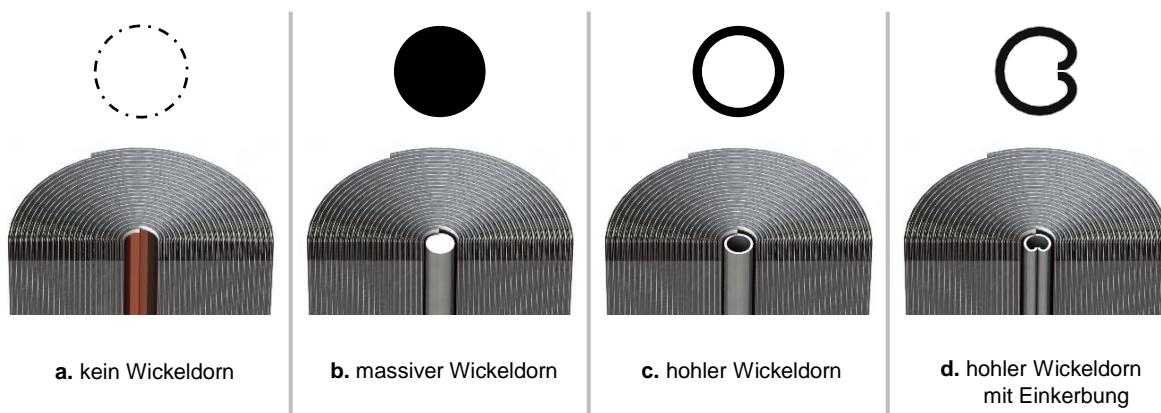


Abbildung 2.15: Ausprägungsmöglichkeiten des Wickeldorns

Abbildung 2.15.a zeigt die Ausprägungsmöglichkeit eines fehlenden Dorns. Dies bringt Vorteile in Bezug auf das Gewicht, die optimale Bauraumausnutzung sowie Material- und Herstellungskostensparnisse mit sich. Ein wesentlicher Nachteil des fehlenden Wickeldorns besteht aber darin, dass der Elektrodenanordnung im Fall eines Kollapses durch den raschen Temperaturanstieg kein freier Pfad zum Entweichen der entstehenden Gase mehr vorliegt. Dadurch erhöht sich das Risiko den Berstdruck der Zelle zu erreichen.⁹⁷

⁹⁵ Vgl. Finegan et al. (Characterising thermal runaway within li-ion cells) 2017, S. 1384f.

⁹⁶ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 3.

⁹⁷ Vgl. Finegan et al. (Characterising thermal runaway within li-ion cells) 2017, S. 1385.

Die gleiche Problematik lässt sich ebenfalls auf die Ausprägung in Form eines massiven Wickeldorns (Abbildung 2.15.b) anwenden. Hier wird der Sicherheitsaspekt der mechanischen Stabilität gestärkt, wohingegen Druckausgleichsmechanismen deutlich eingeschränkt werden.

In Ausprägung c und d der Abbildung 2.15 kommt ein hohles Dorndesign zum Einsatz, welches sowohl die mechanischen Stabilitätsaspekte unterstützt als auch der Druckentwicklungsproblematik Tribut zollt. Überdies besitzt Ausprägung d eine vertikal verlaufende Einkerbung. Dieser Schlitz ermöglicht es den Gasen auf jeder Höhe der Wickelung in den hohen Kern des Dorns zu entweichen und so ungehindert zu den Entlüftungsöffnungen zu gelangen. Dadurch wird die Druckentlastung nochmals verbessert.⁹⁸

Das größte Sicherheitsrisiko eines vorhandenen Wickeldorns, unabhängig von seiner Ausprägung, besteht darin, dass bei einem thermischen Durchgehen der Zelle (engl. thermal runaway) und der damit verbundenen Unumkehrbarkeit des Druckanstiegs, der Dorn wie ein Projekttil in die Kopfbaugruppe oder im schlimmsten Fall aus der Zelle katapultiert werden kann.⁹⁹

Unabhängig von der Tatsache, ob ein Wickeldorn verbaut wurde oder nicht, schwanken die Angaben für den Kerndurchmesser in wissenschaftlichen Veröffentlichungen. In den meisten Fällen liegen die Werte für den Durchmesser in einem Bereich von 1 mm bis 2 mm bei schwankenden Wanddicken in Annäherung an die Gehäusewanddicke.^{100,101}

Kathoden- und Anodenableiter

Ableiter stellen die Verbindungsglieder zwischen der Wickelung und den jeweiligen Terminals dar. Ihre Rolle besteht darin, eine stromleitende Verbindung zwischen den jeweiligen Elektroden und den Terminals herzustellen. Diese Funktion macht es erforderlich, den Ableiter in Bezug auf seine Geometrie zu optimieren. Dadurch können ohmsche Verluste minimiert und die Stromaufnahmefähigkeit verbessert werden. Außerdem beeinflussen die Ableiterabmessungen wichtige Sicherheitsaspekte wie die Temperaturrentwicklung am Wickel.¹⁰²

Besteht die Anforderung beispielsweise darin, eine Zelle mit gesteigerter Leistung bei gleichzeitig hoher Energiedichte auszulegen, so zeichnet sich ein verbessertes Design dadurch aus, dass der Ableiter längsseitig über die gesamte Höhe des Wickels mit der Elektrodenfolie verbunden wird. Damit wird sichergestellt, dass der Stromfluss gleichmäßig über eine größere Fläche erfolgen kann.¹⁰³

Typischerweise werden die Kathodenableiter aus Aluminium gefertigt, wohingegen Nickel für die Anodenableiter verwendet wird. Während Aluminium eine elektrische Leitfähigkeit von

⁹⁸ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 4f.

⁹⁹ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 6f.

¹⁰⁰ Vgl. Sturm et al. (Impact of Cell Design on Charging of Li-Ion Cells) 2020, S. 8.

¹⁰¹ Vgl. Pfrang et al. (Cause of Mechanical Failure in Li-Ion Batteries) 2019, S. 3747.

¹⁰² Vgl. Garche et al. (Electrochemical Power Sources) 2019, S. 104.

¹⁰³ Vgl. Korthauer (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications) 2018, S. 220.

369000 S/cm (Siemens pro Zentimeter) aufweist, besitzt Nickel lediglich eine elektrische Leitfähigkeit von 140000 S/cm. Dieser Umstand führt dazu, dass sich die Oberflächentemperatur der Zelle bei hohen C-Raten besonders im Bereich der Anodenableiter deutlich erhöht, was wiederum die Leistungsfähigkeit der Zelle einschränkt. Um diesem Umstand der Wärmeentwicklung entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit, Kupfer als Material für den Anodenableiter zu verwenden. Auch eine Nickel-Kupfer-Legierung wird in der Literatur vorgeschlagen. Dadurch lässt sich die elektrische Leitfähigkeit auf etwa 584000 S/cm steigern.¹⁰⁴

Abbildung 2.16 geht auf weitere Aspekte bei der Ableiterauslegung ein – die Anzahl und Positionierung der Ableiter. Für die Leistung und Sicherheit der Zelle ist es nicht unerheblich, ob jeweils ein Ableiter (Abbildung 2.16.a-b) mit dem positiven und negativen Terminal verbunden wird oder gleichzeitig mehrere Ableiter (Abbildung 2.16.c-f) eingesetzt werden.

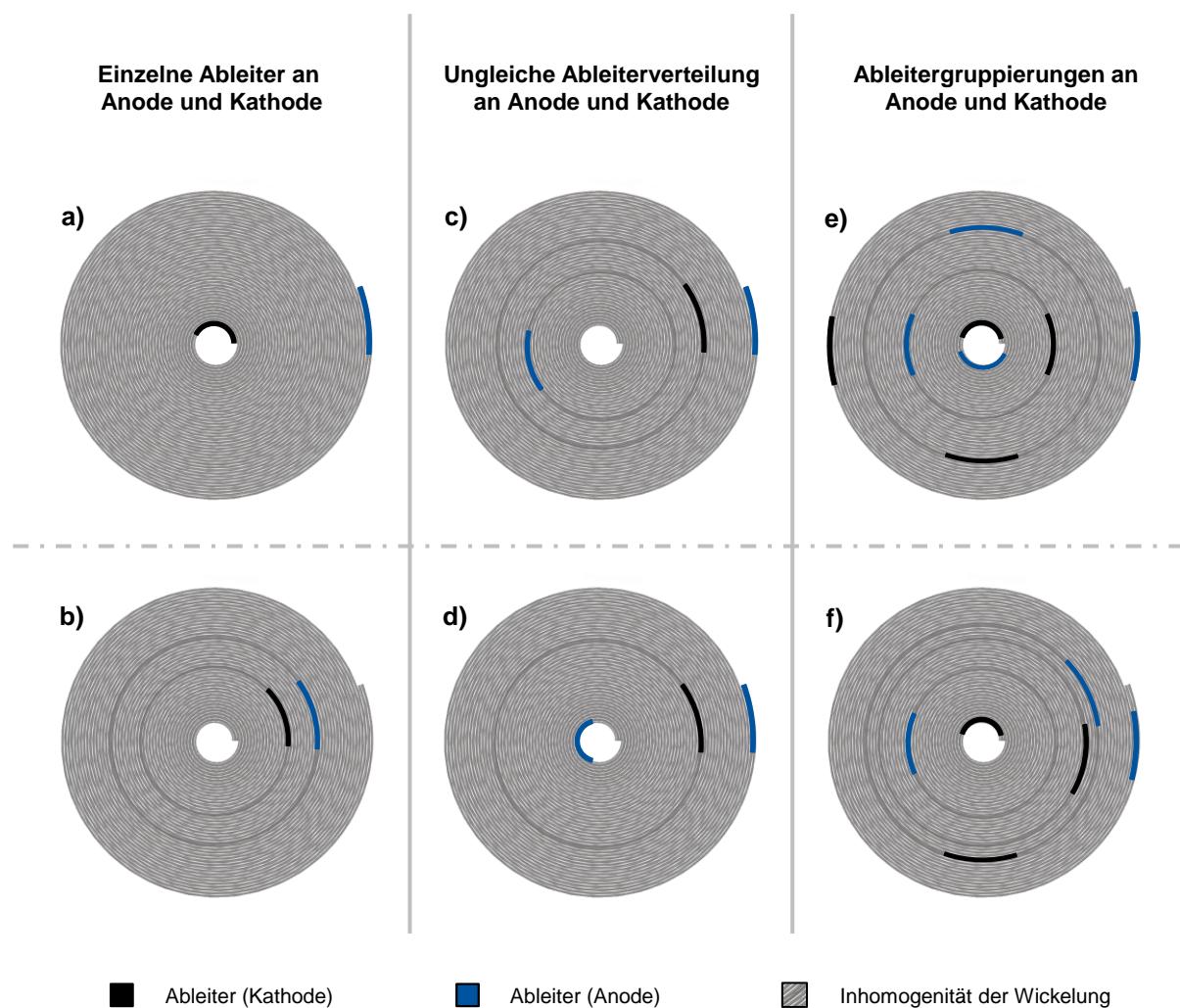


Abbildung 2.16: Möglichkeiten der Ableiteranordnung am Wickel

¹⁰⁴ Vgl. Yao et al. (Tab Design and Failures in Cylindrical Li-ion Batteries) 2019, S. 24084f.

Grundsätzlich wirken sich mehrere Ableiter positiv auf die elektrische Homogenität, den internen Widerstand, die Entladekapazität sowie das Temperaturverhalten der Zelle aus.¹⁰⁵ Bei nur einem Ableiterpaar ist insbesondere darauf zu achten, dass die jeweiligen Ableiter der Anode (blau) und der Kathode (schwarz) ausreichend Abstand zueinander haben. Damit wird sicher gestellt, dass ein versehentlicher Kontakt, welcher zwangsläufig zum internen Kurzschluss führen würde, ausgeschlossen werden kann. Außerdem verteilt sich die Wärmeentwicklung an den Ableitern bei größerem Abstand besser auf den Wickel, was durch die Positionierung eines Ableiters an der wärme- und gasabführenden Wickeldornkonstruktion nochmals verbessert wird.¹⁰⁶ Aus diesem Grund ist die Anordnung in Abbildung 2.16.a der Abbildung 2.16.b vorzuziehen. Beim Vergleich der Abbildung 2.16.c-d ist letztere Darstellung aufgrund der Nähe zum Wickeldorn zu favorisieren. Insbesondere bei größeren Anordnungen von Ableitern, wie sie in Abbildung 2.16.e-f vorliegen, sollte der Abstand konstant gleichmäßig ausgelegt werden, um die Strecke, die der Strom von der Elektrode zum Ableiter und Terminal benötigt, für alle Bereiche auf einen einheitlichen Wert zu reduzieren.¹⁰⁷ Abbildung 2.16.e stellt damit die vorteilhaftere Anordnung dar.

Zur Fixierung der Ableiter an der Elektrodenfolie und an den jeweiligen Terminals kommen Technologien wie das Ultraschallschweißen bei mindestens 20 kHz und das Laserschweißen zum Einsatz. Durch beide Methoden kann es zur Gratentstehung an den Verbindungspunkten kommen. Ein Grat kann den Separator beschädigen und zu einem internen Kurzschluss führen.¹⁰⁸

Aktuelle Forschungsbestrebungen sollen Ableiter weiter in das Sicherheitskonzept der gesamten Zelle miteinbeziehen. Zu diesem Zweck gibt es Bestrebungen den Ableiter in zwei Streifen aufzuteilen, welche durch einen Kaltleiter miteinander verbunden werden. Dieser Kaltleiter baut mit einer steigenden Temperatur einen materialbedingten Widerstand auf, sodass der Stromfluss unterbrochen wird.¹⁰⁹

Current Interrupt Device (CID)

Viele Bauteile der Lithium-Ionen-Rundzelle bringen Vorkehrungen mit sich, die neben ihrer primären Funktionsaufgabe weitere Sicherheitsaspekte in das Bauteilkonzept integrieren. Daneben besitzt die Zelle einige wenige Elemente mit primärfunktionalen Sicherheitsaufgaben. Zu dieser Art von Bauteilen gehört auch das CID.

Die zwei Parameter Druck und Temperatur sind besonders interessant für die Auslegung von Sicherheitselementen. Im Fall des thermischen Durchgehens der Zelle, steigen diese beiden

¹⁰⁵ Vgl. Quinn et al. (Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells) 2018, S.3285f.

¹⁰⁶ Vgl. Yao et al. (Tab Design and Failures in Cylindrical Li-ion Batteries) 2019, S. 24092f.

¹⁰⁷ Vgl. Yue Ma, Ho Teng, Marina Thelliez (Modeling of a Li-Ion Battery) 2010, S. 309.

¹⁰⁸ Vgl. Yao et al. (Tab Burrs in Li-Ion Batteries) 2019, S. 45979.

¹⁰⁹ Vgl. Yao et al. (Tab Design and Failures in Cylindrical Li-ion Batteries) 2019, S. 24085.

Parameter meist schon im Voraus deutlich an. Genau an diesem Punkt setzt das druckabhängige CID an. Die zwei Bauteile des CID agieren wie eine Sicherung, indem sie sich bei einem zu hohen Druck voneinander trennen und so den Stromfluss innerhalb der Zelle unterbrechen.¹¹⁰ Dabei besitzt eines der Bauteile meist eine gewölbte Struktur. Das zweite Bauteil liegt in Form einer mit Öffnungen versehenen Scheibe auf dieser Wölbung auf. Die Ränder sind durch ein nichtleitendes Material voneinander getrennt. Die gewölbte Bauteilscheibe besitzt außerdem einen eingekerbten Ring, der bei Erreichen eines bestimmten Drucks aufbricht und den Entlüftungsvorgang einleitet. Damit wird der physische Kontakt der beiden Bauteile unterbrochen.¹¹¹

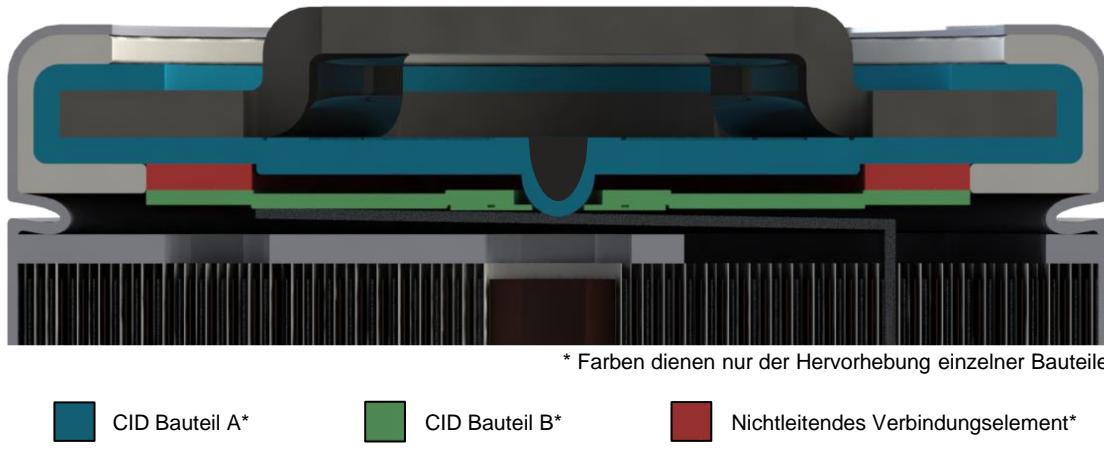


Abbildung 2.17: Schnittansicht des CID innerhalb der Kopfbaugruppe

Eine beispielhafte Darstellung der Bauteilanordnung des CID innerhalb der Kopfbaugruppe zeigt Abbildung 2.17. Bauteil A (blau) schließt das positive Terminal ein, während Bauteil B (grün) die Verbindung zum Ableiter und damit zur Wickelung herstellt. Unterhalb der Erhöhung des positiven Terminals befinden sich auf der Innenseite des Bauteils A die bereits beschriebenen Einkerbungen, welche als Sollbruchstellen bei steigendem Druck dienen und auch in der Schnittansicht als minimale Vertiefungen zu erkennen sind.

Das CID unterbricht, im Gegensatz zu anderen primärfunktionalen Sicherheitselementen, nicht nur temporär den Stromfluss innerhalb der Zelle, sondern lässt sich in der Regel nicht wieder zurücksetzen.¹¹²

Kaltleiter

Ein weiteres Sicherheitselement stellt der Kaltleiter dar, welcher auch als PTC-Widerstand (engl. positive temperature coefficient) bezeichnet wird. Kaltleiter agieren innerhalb der Zelle als temperaturabhängige Sicherungen. Sie unterbrechen den Stromfluss, wenn die Eigentemperatur einen materialabhängigen Temperaturbereich erreicht hat. Kühlte sich das PTC wieder

¹¹⁰ Vgl. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S. 83.

¹¹¹ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 2.

¹¹² Vgl. Pistoia (Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications) 2014, S. 393.

ab und verlässt diesen Temperaturbereich, so ist der Stromfluss wieder möglich.¹¹³ Dieser Umstand kann insbesondere dann als sehr wertvoll erachtet werden, wenn man sich die Wärmeentwicklung durch einen elektrischen Strom bei einem externen Kurzschluss anschaut. Wenn die Zelle beispielsweise eine Spannung von 3,6 Volt und einen Innenwiderstand von 0,1 Ohm aufweist, entsteht bei einem fehlerhaften Verhalten innerhalb von kurzer Zeit eine hohe Wärmeleistung, welche sich an den folgenden Berechnungen orientiert:¹¹⁴

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3,6 \text{ V}}{0,1 \Omega} = 36 \text{ A} \quad (16)$$

$$Q = I^2 R = (36 \text{ A})^2 * 0,1 \Omega = 129,6 \text{ W} \quad (17)$$

I = Stromstärke

U = Stromspannung

R = Innenwiderstand

Q = Wärme

Diese Wärme würde innerhalb eines begrenzten Zeitintervalls zu einem thermischen Durchgehen der Zelle führen. Diese Abschätzung berücksichtigt nicht alle wärmeabsorbierenden Mechanismen in der Zelle. Sie soll lediglich als Indikator für die potenzielle Gefährdung durch Wärmeentwicklung in der Zelle dienen. Um diese Kausalitätskette zu unterbrechen, kann ein PTC in Form eines scheibenförmigen Rings in die Kopfbaugruppe integriert werden.

Das PTC besteht aus einem zusammengepressten Polymer-Graphit-Ring, welcher sich zwischen zwei Metallfolien aus Nickel-beschichtetem Kupfer befindet. Unter normalen Temperaturbedingungen berühren sich die Graphitpartikel, sodass der Stromfluss gewährleistet ist. Steigt nun die Temperatur, erhöht sich auch der Widerstand des PTCs durch die Expansion des Polymers und den daraus resultierenden Kontaktverlusten der Graphitpartikel.¹¹⁵

Kaltleiter reagieren jedoch nicht nur temperaturabhängig, sondern verändern ihren Widerstandswert ebenfalls in Abhängigkeit der angelegten Spannung. Dieses Phänomen nennt sich „Varistoreffekt“ und bezieht sich auf den Zusammenhang des Widerstandes der Sperrsichten mit der Feldstärke. Übersteigt die angelegte Spannung einen Schwellbereich, reduziert sich der Widerstand des PTCs abrupt.¹¹⁶ In Abhängigkeit von der verwendeten Materialkombination tritt dieser Abfall bereits bei 30 bis 60 Volt auf. Versuche in diesem Zusammenhang zeigten außerdem, dass Kaltleiter bei spontan angelegten Spannungen von mehr als 30 Volt

¹¹³ Vgl. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S. 83.

¹¹⁴ Vgl. Garche et al. (Electrochemical Power Sources) 2019, S. 100.

¹¹⁵ Vgl. Garche et al. (Electrochemical Power Sources) 2019, S. 101.

¹¹⁶ Vgl. Stiny (Passive elektronische Bauelemente) 2019, S. 119f.

entflammen können.¹¹⁷ Der Varistoreffekt des Kaltleiters limitiert demnach die maximale Spannung der Zelle und wirkt sich damit in der Folge auf Modul und Pack aus. Aus diesem Grund kommen PTCs in Hochvoltsystemen in der Regel nur bedingt zum Einsatz.¹¹⁸

Entlüftungsöffnungen

Ein weiteres Risiko stellt die Gasentwicklung in der Zelle während der zahlreichen Lade- und Entladevorgänge dar. An den Kathoden vieler bekannter Zelltypen, wie z.B. der LCO-, NCA- oder NMC-Zelle, entsteht Sauerstoff als ein Nebenprodukt. Außerdem können Reaktionen am Elektrolyt weitere Gase hervorbringen. Hierzu zählen unter anderem die schnell entflammbareren Ethan- und Methangase. Durch die Kombination von Sauerstoff und brennbaren Gasen wird ein Szenario geschaffen, in dem eine Verbrennung unabhängig von der atmosphärischen Zusammensetzung möglich ist.¹¹⁹ Aus diesem Grund werden Entlüftungsmechanismen in Form von Berstventilen in die Zellen integriert, um über einen festgelegten Pfad eine kontrollierte Entgasung zu gewährleisten. Die Änderung des Gasvolumens in der Zelle führt außerdem zu einem Kühlungseffekt, der wiederum ein thermales Durchgehen der Zelle verhindern kann.¹²⁰

Für 18650er NCA-Rundzellen ergaben Messungen einen Gasausstoß von etwa 2,5 Litern pro Ah während des thermalen Durchgehens, was bei einer Zelle mit einer Kapazität von bis zu 3,4 Ah einem Gasvolumen von mehr als 8 Litern entsprechen würde.¹²¹ Für 21700er Zellen kann demzufolge mit noch größeren Volumina gerechnet werden.

Das Design der Berstöffnungen variiert von Hersteller zu Hersteller. Eine Klassifizierung der Öffnungen kann beispielsweise anhand ihrer Form erfolgen. Mögliche Designs sind hierbei ein Halbmond oder Formen in Anlehnung an einen Knochen. Eine weitere Klassifizierungsmöglichkeit stellt die Herstellungstechnologie dar. Hierbei kann zwischen geritzten, geprägten bzw. gestanzten oder geätzten (chemisch oder Laser) Konturen unterschieden werden.¹²²

Eine typische Positionierung von Berstöffnungen befindet sich auf dem CID in der Kopfbaugruppe. Hierbei verhindert das positive Terminal oberhalb des CIDs, dass die abgetrennten Oberflächenteile im Fall eines Berstvorganges wie ein Projektil aus der Zelle katapultiert werden. Außerdem wird bei dieser Positionierung sichergestellt, dass die Zelle durch das Aufbrechen des CIDs als offener Kreislauf elektrisch ausfallen würde.¹²³

Im Rahmen der Ausweitung von Sicherheitsvorkehrungen nutzen einige Hersteller eine zweite Berstfläche am Boden der Zelle, um die bestehende Entlüftungsstrategie weiter zu optimieren.

¹¹⁷ Vgl. Pistoia (Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications) 2014, S. 390f.

¹¹⁸ Vgl. Warner (The handbook of lithium-ion battery pack design) 2015, S. 84.

¹¹⁹ Vgl. Austin Mier et al. (Vent Mechanism Flow Parameters in 18650 Cells) 2019, S. 1.

¹²⁰ Vgl. Garche et al. (Electrochemical Power Sources) 2019, S. 101.

¹²¹ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 7.

¹²² Vgl. Garche et al. (Electrochemical Power Sources) 2019, S. 101.

¹²³ Vgl. Austin Mier et al. (Vent Mechanism Flow Parameters in 18650 Cells) 2019, S. 6.

In Versuchen zeigte sich, dass die Bodenberstöffnung während eines thermischen Durchgehens der Zelle für eine größere Druckentlastung sorgte als Öffnungen im Bereich der Kopfbaugruppe. Durch die Bereitstellung einer alternativen Austrittsstrecke für das erzeugte Gas schien die Bodenentlüftung das Risiko eines Zellgehäusebruchs und der Projektilbildung des Wickeldorns zu verringern. Darüber hinaus wird die Rolle des Wickeldorns bei der Aufrechterhaltung eines offenen Pfades für den Gasstrom vom unteren Wickelbereich zu den oberen Berstflächen mit der Einführung der Bodenentlüftungsöffnung redundant.¹²⁴

Bei 18650er Rundzellen wurden für Varianten von LG und MTI durchschnittliche Berstdrücke von 1,906 bis 2,158 MPa gemessen wobei das Maximum zwischen 1,961 und 2,364 MPa lag. Die in diesem Zusammenhang vorliegenden Berstöffnungen besaßen eine durchschnittliche Fläche von 7,025 bis 8,967 mm².¹²⁵ Für 21700er Zellen lagen bei Tests von Lao et al. ein CID-Berstdruck von 2,1 MPa ($\pm 0,15$ MPa) sowie ein Berstdruck der Bodenöffnung von 3,1 MPa ($\pm 0,15$ MPa) vor.¹²⁶

Weitere Bauteile

Essenzielle Bauteile, die bisher noch nicht gesondert aufgeführt wurden, sind die Isolationsscheiben am Wickel, das positive Terminal und die Dichtung der Kopfbaugruppe. Ihre Aufgaben im Gesamtverbund der Zelle sind wichtig. Dennoch finden sich in der wissenschaftlichen Literatur nur Randnotizen zu diesen Bauteilen. Das Innovations- und Entwicklungspotential anderer Bauteile wird durch die Forschung als deutlich größer erachtet. Auch aus konstruktionstechnischer Sicht lassen sich die einzelnen Bauteilparameter über Randbedingungen und Abhängigkeiten zu anderen Bauteilen herleiten.

Im Zusammenhang mit den primären Sicherheitselementen findet die Schutzplatine (engl. protection board) in der aktuellen Übersicht noch keine Erwähnung. Schutzplatten werden insbesondere in tragbaren elektronischen Geräten eingesetzt, um den elektrischen Strom sowie den Be- und Entladestrom der Batteriezelle zu überwachen. Dies geschieht über einen integrierten Chip.¹²⁷ Da bei Fahrzeugantriebsbatterien die Überwachung in der Regel über das Batteriemanagementsystem (BMS) auf Modul- und Packebene erfolgt,¹²⁸ wird auf den integrierten Chip nicht vertieft eingegangen.

¹²⁴ Vgl. Finegan et al. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries) 2018, S. 9.

¹²⁵ Vgl. Austin Mier et al. (Vent Mechanism Flow Parameters in 18650 Cells) 2019, S. 7f.

¹²⁶ Vgl. Lao et al. (Thermal Runaway Induced Casing Rupture) 2020, S. 2.

¹²⁷ Vgl. Wang et al. (One cell Lithium-ion battery protection IC) 2014 - 2014, S. 1427.

¹²⁸ Vgl. Lu et al. (issues for li-ion battery management in electric vehicles) 2013, S. 273ff.

3 Produktplanungsphase der Li-Ionen-Rundzelle

Dieses Kapitel leitet die praktische Ausarbeitung der Zellkonzeption und -konstruktion ein. Gemäß dem Titel fokussiert sich diese Arbeit auf die Lithium-Ionen-Rundzelle. Da der Einsatzbereich der hier auszuarbeitenden Zelle vollends auf die Verwendung als Traktionsbatterie für Elektrofahrzeuge eingegrenzt ist, wird das 21700er-Format für die Konstruktion festgelegt. Dieses Format bildet den heutigen Speicherstandard für Elektrofahrzeuge und ist in Kapitel 2.2.2 näher beschrieben.

Die Aufgabenstellung der Arbeit ist es, einen Konzeptions- und Konstruktionsansatz zur Entwicklung von Lithium-Ionen-Rundzellen auszuarbeiten. Die Validierung dieses Ansatzes erfolgt über das Durchlaufen der einzelnen Prozessschritte für den konkreten Anwendungsfall der 21700er-Zellentwicklung. Wie der Stand der Technik von Lithium-Ionen-Batteriezellen in Kapitel 2.2 zeigt, bewegt sich die aktuelle Zellentwicklung in einem Spannungsfeld von kontinuierlich wachsenden Energieanforderungen zusammen mit einem ansteigenden Leistungsbedarf durch den Übergang von Hybrid-Antrieben zu rein elektrischen Antriebsträngen. Im Gegenzug steigen aber auch die Sicherheitsanforderungen auf Pack-, Modul- und Zellebene. Während Kapitel 2.2.1 einige der Sicherheitsmerkmale der Modul- und Packkonstruktionen anreißt, vertieft Kapitel 2.2.4 die Lösungsansätze in der Zelle. Um eingehender verstehen zu können, was die drei Auslegungsformen nach Sicherheit, Energie und Leistung für das Zellkonzept und die Konstruktion der einzelnen Bauteile bedeuten, werden mit Abschluss der praktischen Ausarbeitung drei Konstruktionsentwürfe mit diesen Schwerpunkten entstehen.

Der Ablauf richtet sich nach den Vorgehensmodellen des Produktentstehungsprozesses sowie des Konstruktions- und Entwicklungsprozesses. Die Reihenfolge der Prozessschritte ist für den PEP in Kapitel 2.1.1 und für den EKP in Kapitel 2.1.2 detailliert aufgeführt. Der konkrete Ablaufplan dieser wissenschaftlichen Ausarbeitung ist, angelehnt an diese Prozessschritte, in Abbildung 3.1 skizziert.

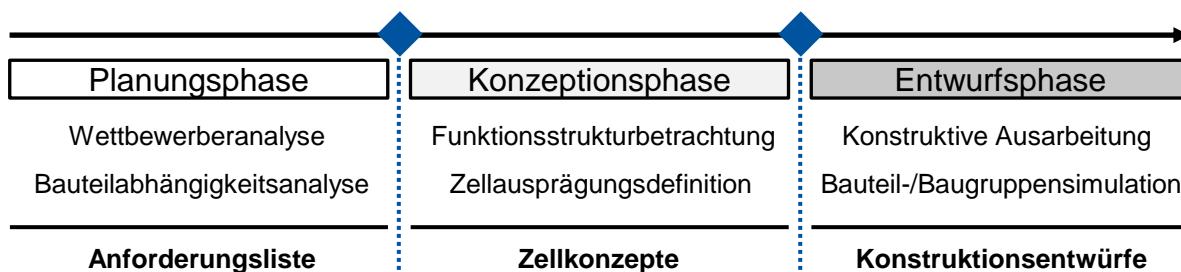


Abbildung 3.1: Konkreter Ablaufplan der zu durchlaufenden Prozessphasen

Im Einzelnen sieht die Planungsphase vor, dass zu Beginn Wettbewerberzellen verschiedener Hersteller in ihrer Struktur und ihrem Aufbau dokumentiert werden. Dazu wird das Produkt im Rahmen einer Teardown-Analyse systematisch demontiert. Mithilfe der so gewonnenen Bauteilmerkmale und dem Wissen über den Aufbau von Lithium-Ionen-Rundzellen aus Kapitel 2.2.4 lassen sich in der Folge Abhängigkeiten der einzelnen Bauteile und ihrer Merkmale festlegen.

Auf Basis dieser beiden Datensätze entsteht als Endergebnis der Planungsphase eine Anforderungsliste, welche im Folgenden den konstruktiven Rahmen für die Ausprägungsvarianten bildet.

Die Konzeptionsphase ist in die beiden Abschnitte der modularen Produktstrukturbetrachtung und der Zellausprägungsdefinition gegliedert. Im ersten Abschnitt werden die Bauteile in übergeordnete Strukturbereiche eingeordnet und Modularitätsaspekte beleuchtet, um die spätere Konstruktionsreihenfolge effizienter steuern zu können. Ein morphologischer Kasten dient im nachfolgenden Abschnitt zur Entscheidungsfindung in Bezug auf spezifische Merkmalsausprägungen der drei Zellvarianten. Zusätzlich wird eine Nutzwertanalyse zur Absicherung der Entscheidungsergebnisse durchgeführt. Als Kernergebnis dieser Konzeptionsphase werden die drei Zellkonzepte in die Entwurfsphase übernommen.

Um die Sicherheits-, Energie- und Leistungsvariante der 21700er-Rundzelle auszukonstruieren, werden die Anforderungsliste und die jeweiligen Zellkonzepte in der Entwurfsphase als Eingangsgrößen für den Prozess benötigt. In einem ersten Grobentwurf entstehen drei Baugruppenmodelle. Mithilfe von schwerpunktmäßigen Belastungs- und CFD-Simulationen werden die entstandenen CAD-Modelle geprüft und in einem letzten Schritt mithilfe der validierten Erkenntnisse weiter verfeinert.

3.1 Technische Analyse relevanter Wettbewerberprodukte

Den Schwerpunkt dieses Kapitels bildet die Analyse und Dokumentation verschiedener 21700er-Wettbewerberzellen. Der erste Teil beschreibt das Vorgehen, welches angewendet wurde, um passende Zellen auszuwählen. Außerdem wird darauf eingegangen, wie die Rundzellen geöffnet wurden und welche Bauteildaten danach extrahiert werden konnten.

Die in diesem Kapitel beschriebene Wettbewerberanalyse hat das primäre Ziel, die am Markt gängigen Aufbaustrukturen von 21700er-Rundzellen zu identifizieren, alle essenziellen Bauteile zu extrahieren und Messwerte der Geometrien dieser Bauteile zu dokumentieren. Diese Daten fließen in einem späteren Schritt als Randbedingungen in die Anforderungsliste. Nur so lassen sich bei der Konstruktion der Bauteile realistische Proportionen der Bauteilmerkmale generieren.

Die methodische Grundlage der Wettbewerberanalyse stellt die Teardown-Analyse dar. Diese Methode ist grundlegend in Kapitel 2.1.3 beschrieben. Im Gegensatz zu anderen, nichtzerstörenden Vorgehensweisen, wird das Produkt irreversibel in seine einzelnen Bauteile zerlegt und dadurch für eine weitere Verwendung unbrauchbar. So lassen sich Bauteile relativ einfach dokumentieren und vermessen. Abbildung 3.2 zeigt den hier verwendeten Ablauf der Teardown-Analyse in bildlicher Form.

Das Vorgehen sieht zunächst eine Auswahl verschiedener 21700er-Rundzellen vor. Hierbei wurde darauf geachtet, dass sowohl Produkte bekannter Hersteller als auch unbekannter Produzenten unter den Proben zu finden sind. Ein weiteres Kriterium stellten die Kapazitäten der Zellen dar. Bei der hier durchgeföhrten Teardown-Analyse kamen sowohl Produkte mit 3000 mAh, 4000 mAh als auch 5000 mAh zum Einsatz. So konnte sichergestellt werden, dass Struktur- und Bauteildifferenzen aufgrund von Kapazitätsunterschieden mitberücksichtigt werden.

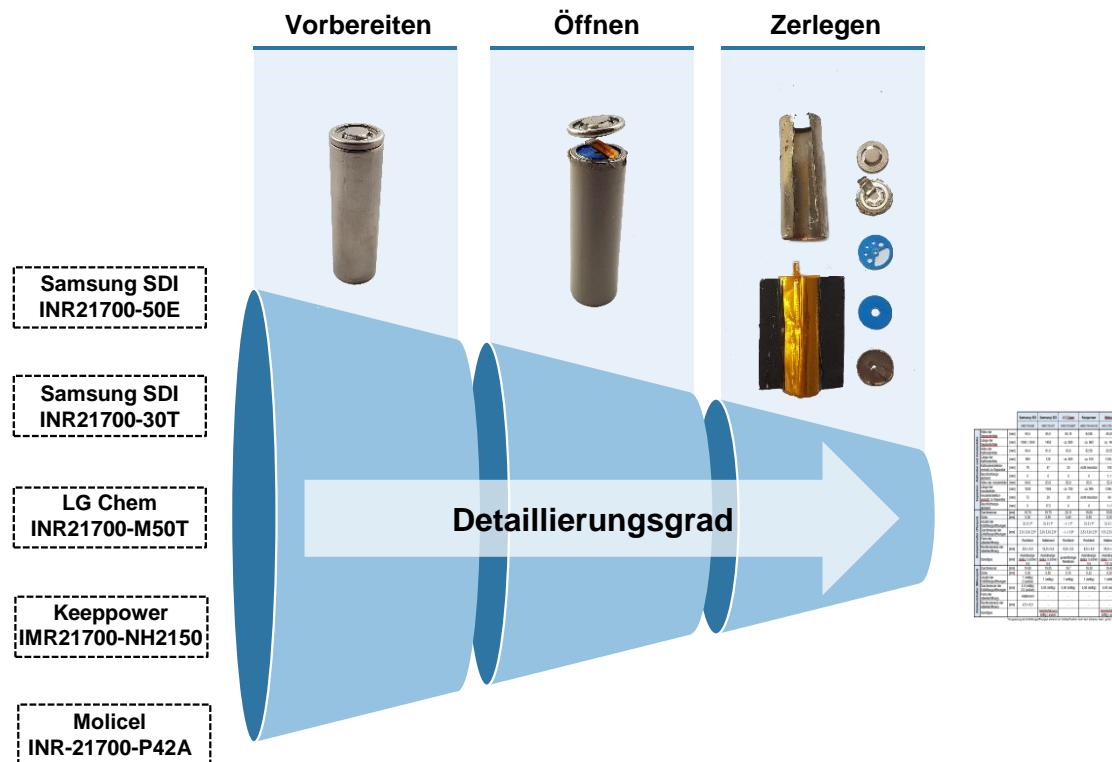


Abbildung 3.2: Analyse der Wettbewerberzellen durch Reverse Engineering

Nachdem die Zellen ausgewählt wurden, erfolgte die Vorbereitung jeder einzelnen Zelle. Bei diesem Schritt wurde die Kunststoffummantelung der Zellen entfernt. Außerdem musste jede Zelle aus Sicherheitsgründen komplett entladen werden, um bei einem Kurzschluss während des Öffnungsvorgangs keiner Brand- oder Explosionsgefahr ausgesetzt zu sein.

Nach den vorbereitenden Maßnahmen wurden die Gehäusebecher an der Sicke und im Bodenbereich quer aufgetrennt. Nachdem die Kathodenableiter durchtrennt waren, ließ sich die Kopfbaugruppe ohne weitere Probleme entfernen. Der geöffnete Gehäusebecher wurde nun in einem nächsten Schritt in Längsrichtung aufgeschnitten. Die Herausforderung hierbei lag vor allem darin, eine mögliche Beschädigung des Wickels zu vermeiden.

In der letzten Phase der Teardown-Analyse wurden die Kopfbaugruppe und der Wickel bis in ihre Einzelteile zerlegt. Im Fall der Dichtung und des Wickels waren Beschädigungen in einigen wenigen Fällen nicht zu vermeiden. Falls ein Wert nicht ablesbar war, wurde dies in der entsprechenden Dokumentationstabelle vermerkt. Alle Bauteile wurden mithilfe eines Messschiebers vermessen. Die Ungenauigkeiten im Zehntel- und Hundertstelbereich durch die manuellen Messungen mit dem Messschieber stellen für die weitere Verwendung der Ergebnisse insofern keine Behinderung dar, als dass durch die Abmaße lediglich ein Wertebereich für die spätere Konstruktion abgesteckt werden sollte.

Im Folgenden sind die Dokumentationsergebnisse der fünf 21700er-Rundzellen in Tabelle 3.1 bis Tabelle 3.4 aufgeführt. Dabei wurden einzelne Bereiche der Zellen gruppiert und in separaten Tabellen dokumentiert.

In Tabelle 3.1 finden sich in den Zeilen der Zelldatenkategorie die allgemeinen Herstellerangaben zu grundlegenden Zellparametern der Spannung, Temperatur und Kapazität wieder. Die Daten der ausgewählten Zellen weichen kaum voneinander ab. Lediglich bei den Kapazitätsangaben sind verschiedene Werte im Bereich von 3000 mAh bis 5000 mAh zu finden, was daran liegt, dass kapazitative Einflüsse auf Bauteilspezifikationen in dieser Dokumentation erkennbar sein sollten. Auch bei der Lade- und Entladetemperatur geben die Herstellerangaben der Molicel-Zelle einen vergrößerten Temperaturbereich von 0 °C bis 60 °C bzw. -40 °C bis 60 °C aus.

Tabelle 3.1: Aufstellung der Zelldaten und Abmaße des Gehäuses

		Samsung SDI	Samsung SDI	LG Chem	Keeppower	Molicel
		INR21700-50E	INR21700-30T	INR21700-M50T	IMR21700-NH2150	INR-21700-P42A
Zelldaten	Nominale Zellspannung	[V]	3,6	3,6	3,63	3,7
	Maximale Zellspannung	[V]	4,2	4,2	4,2	4,2
	Minimale Zellspannung	[V]	2,5	2,5	2,5	2,5
	Kapazität (laut Hersteller)	[mAh]	4900	3000	5000	4000 – 4200
	Arbeitstemperatur (Laden)	[°C]	0 – 45	0 – 45	0 – 45	0 – 60
	Arbeitstemperatur (Entladen)	[°C]	-20 – 60	-20 – 60	-20 – 55	-20 – 60
Zelle	Höhe	[mm]	70,71	70,39	70,69	70,61
	Durchmesser	[mm]	20,96	20,98	21,05	20,97
	Höhe	[mm]	70,51	70,20	70,05	70,10
	Höhe der Einkerbung	[mm]	67,28	66,9	66,50	66,57
	Tiefe der Einkerbung	[mm]	(1,75)	(2,10)	(1,55)	(2)
	Außendurchmesser	[mm]	21,04	20,92	21,00	20,92
Gehäusebecher	Materialdicke	[mm]	0,25	0,25	0,30	0,23
	Innerer Überhang	[mm]	2,35	2,45	2,75	(1,95)
						(2,10)

Ein auffälliges Merkmal in der Kategorie Zelle stellt die Tatsache dar, dass trotz des 21700er-Standards ausnahmslos alle gemessenen Zellen in ihrer Höhe über dem Wert von 70 mm lagen. Beim Zelldurchmesser lagen die Werte mit Ausnahme der Molicel-Zelle nah am Standard.

Die Gehäusebecher der Zellen lieferten neben ihren Höhen- und Durchmesserangaben ebenfalls Erkenntnisse in Bezug auf die Höhe der Einkerbung und der Materialdicke. Hierbei traten keine nennenswerten Ausreißer auf, sodass sich die Materialdicke in einem Bereich von 23 mm bis 30 mm aufhielt. Nur die Einkerbungshöhe der INR21700-50E von Samsung war mit über 67 mm deutlich höher angesiedelt als bei anderen Wettbewerbern. Diesen Samsung-Trend bestätigte die 30T-Zelle, welche ebenfalls fast an die 67 mm heranreichte.

Tabelle 3.2 zeigt die Messdaten zu den Elementen der Kopfbaugruppe sowie des Isolationsrings an der Schnittstelle zum Gehäusebecher. Während sich beim Isolationsring, als weniger kritisches Bauteil, und der Dichtung keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Zellen ergaben, war auffällig, dass die Zelle von LG Chem bei ihrem positiven Terminal mit 0,45 mm nur die Hälfte der Materialdicke der anderen Zellen benötigte. Besonders bei den Bauteilen

der Kopfbaugruppe kann jeder Zehntel eines Millimeters für die letztendliche Höhenauslegung des Wickels entscheidend sein.

Tabelle 3.2: Abmaße von Elementen der Kopfbaugruppe und des Isolationsrings

		Samsung SDI	Samsung SDI	LG Chem	Keepower	Molicel
		INR21700-50E	INR21700-30T	INR21700-M50T	IMR21700-NH2150	INR-21700-P42A
Ring*	Außendurchmesser [mm]	19,71	19,74	20,12	18,82	19,85
	Innendurchmesser [mm]	12,91	13,04	14,05	11,12	12,85
	Dicke [mm]	0,25	0,25	0,22	0,15	0,25
Dichtung	Außendurchmesser [mm]	20,40	20,25	20,75	20,43	20,85
	Durchmesser der unteren Öffnung [mm]	15,00	15,00	12,00	15,00	15,40
	Dicke der Dichtungswandung [mm]	0,5	0,5	0,55	0,75	nicht messbar
Positives Terminal	Durchmesser der Terminalkops [mm]	9,00	9,00	10,00	8,90	9,55
	Durchmesser der Terminalbodens [mm]	18,45	18,30	18,30	18,25	18,41
	Terminalhöhe [mm]	2,30	2,52	2,20	2,52	2,43
	Materialdicke der Terminals [mm]	0,7	0,9	0,45	0,9	0,9
	Anzahl der Entlüftungsöffnungen	3	3	3	3	3
Sicherheitselemente	Current Interrupt Device (CID)	ja	ja	ja	ja	ja
	Außendurchmesser des CID [mm]	19,00	19,05	18,90	18,92	19,10
	Höhe des CID [mm]	2,80	2,72	1,75	2,38	2,19
	Anzahl der Entlüftungsöffnungen am CID	6	6	8	6	6
	Kalteiter-Widerstand (PTC)	nein	nein	nein	nein	nein
	PCB-Steuerplatine	nein	nein	nein	nein	nein

*Isolationsring/-scheibe an der Schnittstelle von Gehäuse, Dichtung und positivem Terminal

Alle aufgeschnittenen 21700er-Rundzellen besaßen ein CID als Sicherheitselement. Durch die geringeren Terminalabmessungen ergab sich für die LG-Zelle ebenfalls eine geringere CID-Höhe. Bei keiner Zelle konnte ein PTC oder eine PCB-Steuerplatine durch die Teardown-Analyse ausgemacht werden.

Tabelle 3.3 beschäftigt sich mit den durch die Teardown-Analyse dokumentierten Daten der Kathoden- und Anodenableiter. Die offensichtlichste Änderung zwischen den Zellen mit einer hohen Kapazität und den kleineren Leistungszellen bestand in der Anzahl der Kathoden- und Anodenableiter. Samsungs INR21700-30T und Molicels INR-21700-P42A wiesen auf beiden Seiten jeweils zwei Ableiter auf. Außerdem hatten diese Ableiter in wenigstens einem der beiden Fälle eine vergrößerte Breite.

Eine weitere Auffälligkeit lag in der Anordnung der Ableiter. Während alle Kathodenableiter mittig im Wickel (ca. halber Radius) angeordnet waren, was auch für die Zellen mit zwei Ableitern der Fall war, saßen die Anodenableiter bei fast allen Zellen entweder zentral, direkt am Kern, oder am äußersten Rand des Wickels. Nur die INR21700-50E von Samsung wies einen mittig angeordneten Anodenableiter auf.

Die Beschichtungsabstände um die jeweiligen Ableiter variierten von minimal 2,5 mm in beiden Richtungen bis auf maximale Werte von 12 mm.

Tabelle 3.3: Abmaße und Positionen der Kathoden- und Anodenableiter

		Samsung SDI INR21700-50E	Samsung SDI INR21700-30T	LG Chem INR21700-M50T	KeepPower IMR21700-NH2150	Molicel INR-21700-P42A
Ableiter (Kathode)	Anzahl	1	2	1	1	2
	Position am Wickel	halber Radius	halber Radius	halber Radius	halber Radius	halber Radius
	Position an Kopfgruppe	Am CID (mittig)	Am CID (mittig)	Am CID (mittig)	Am CID (mittig)	Am CID (nicht mittig)
	Länge im Wickel [mm]	29,5	42 52	60,5	56	48 48
	Breite des Ableiters [mm]	5,00	6,5 3,0	3,5	4,00	6,00 6,00
	Dicke des Ableiters [mm]	0,2	0,15	0,15	0,12	0,2
	Oberflächenbeschaffenheit	massiv	massiv	massiv	massiv	massiv
	Abstand zum Separatorbeginn [1] [mm]	465	400	210	330	405
	Abstand zum Separatorbeginn [2] [mm]	-	860	-	-	1010
	Beschichtungsabstand [1] [mm]	links: 6 rechts: 6	links: 3,5 rechts: 3,5	links: 3,5 rechts: 3,5	links: 2,5 rechts: 2,5	links: 7 rechts: 7
	Beschichtungsabstand [2] [mm]	-	links: 12 rechts: 8,5	-	-	links: 7 rechts: 7
	Sonstiges	61 mm isoliert (Rückseite)	Komplett abisolirt	Komplett abisolirt	Komplett abisolirt	Komplett abisolirt
Ableiter (Anode)	Anzahl	1	2	1	1	2
	Position am Wickel	halber Radius	zentral außen	außen	zentral	zentral
	Position an Gehäuseboden	zentral	zentral zentral	zentral	zentral	zentral zentral
	Länge im Wickel [mm]	31	42 52	35	55	55 33
	Breite des Ableiters [mm]	4,0	6,5 3,0	4,0	4,0	3,00 4,00
	Dicke des Ableiters [mm]	0,2	0,15	0,15	0,13	0,2
	Oberflächenbeschaffenheit	massiv mit Maserung	massiv mit Maserung	massiv mit Maserung	massiv	massiv
	Abstand zum Separatorbeginn [1] [mm]	450	25	nicht messbar	nicht messbar	88,5
	Abstand zum Separatorbeginn [2] [mm]	-	1360	-	-	1341
	Beschichtungsabstand [1] [mm]	links: 3,0 rechts: 3,0	links: 11 rechts: 3,5	nicht messbar	nicht messbar	links: 4,5 rechts: 3,5
	Beschichtungsabstand [2] [mm]	-	links: 21,5 rechts: 14,5	-	-	links: 3,5 rechts: 4,5
	Sonstiges	komplett abisolirt	komplett abisolirt	komplett abisolirt	keine Isolierung	komplett abisolirt

Die Länge der Ableiter im Wickel unterschied sich ebenfalls stark. In keinem der Fälle erstreckte sich die Länge des Ableiters allerdings über die komplette Höhe der Elektrodenfolie. Sowohl Kathoden- als auch Anodenableiter der Zellen waren komplett mit einer Kunststofffolie abisoliert. Die einzige Ausnahme bestand im Anodenableiter der KeepPower-Zelle, welcher keine Isolierung besaß.

Abschließend finden sich die Daten der Wickelfolien sowie die Informationen der beiden Abstandshalter des Wickels der 21700er-Rundzellen in Tabelle 3.4 wieder. Die Separatorfolien, welche den Wickel in seiner Höhe definieren, lagen fast konstant bei Werten über 65 mm. In den Messungen aller Zellen besaßen die Anodenfolien eine minimal größere Höhe im Vergleich zu den jeweiligen Kathodenfolien.

Unter den fünf geöffneten Zellen wies lediglich die Molicel-Zelle einen minimalen Beschichtungsabstand von 1 mm zu beiden Seiten und für beide Elektrodenfolien auf. Bei allen anderen Zellen wurde die komplette Höhe der Folien für die Beschichtung ausgenutzt.

Tabelle 3.4: Abmaße und Aufbau von Elektrodenfolien und Abstandshaltern

		Samsung SDI	Samsung SDI	LG Chem	KeepPower	Molicel
		INR21700-50E	INR21700-30T	INR21700-M50T	IMR21700-NH2150	INR-21700-P42A
Separator-, Kathoden und Anodenfolie	Höhe der Separatorfolie	[mm]	65,5	65,5	65,15	64,98
	Länge der Separatorfolie	[mm]	1060 1030	1450	ca. 880	ca. 980
	Höhe der Kathodenfolie	[mm]	64,4	62,5	63,6	62,58
	Länge der Kathodenfolie	[mm]	960	126	ca. 800	ca. 910
	Kathodenkollektorsatz zu Separator	[mm]	79	47	20	nicht messbar
	Beschichtungsabstand	[mm]	0	0	0	1 1
	Höhe der Anodenfolie	[mm]	64,9	63,9	63,8	63,5
	Länge der Anodenfolie	[mm]	1030	1365	ca. 780	ca. 895
	Anodenkollektorsatz zu Separator	[mm]	72	20	20	nicht messbar
	Beschichtungsabstand	[mm]	0	0	0	1 1
Abstandshalter (Pluspol)	Durchmesser	[mm]	19,70	19,75	20,11	19,80
	Dicke	[mm]	0,30	0,55	0,40	0,50
	Anzahl der Entlüftungsöffnungen		3 2 1*	3 2 1*	- - 1*	3 2 1*
	Durchmesser der Entlüftungsöffnungen	[mm]	2,5 3,0 2,5*	2,0 3,0 2,0*	- - 1,0*	2,5 3,0 2,5*
	Form der Ableiteröffnung		Rechteck	Halbmond	Rechteck	Halbmond
	Rechteckmaße der Ableiteröffnung	[mm]	8,5 x 4,0	13,0 x 5,5	6,9 x 3,5	8,5 x 4,0
	Sonstiges	[mm]	Anordnungsradius (Löcher) 5,5	Anordnungsradius (Löcher) 5,5	porenförmige Membran	Anordnungsradius (Löcher) 5,5
Abstandshalter (Minuspole)	Durchmesser	[mm]	19,90	19,05	19,7	19,30
	Dicke	[mm]	0,30	0,55	0,20	0,32
	Anzahl der Entlüftungsöffnungen		1 (mittig) 2 (außen)	1 (mittig)	1 (mittig)	1 (mittig)
	Durchmesser der Entlüftungsöffnungen	[mm]	4,0 (mittig) 3,0 (außen)	5,00 (mittig)	5,00 (mittig)	5,00 (mittig)
	Form der Ableiteröffnung		Halbmond	-	-	-
	Rechteckmaße der Ableiteröffnung	[mm]	4,5 x 8,0	-	-	-
	Sonstiges			Ableiterführung mittig außen		Ableiterführung mittig außen

*Gruppierung der Entlüftungsöffnungen anhand von Größe/Position nach dem Schema: klein | groß | zentral

Die Abstandhalter auf Seiten des Pluspols unterschieden sich im Design der Ableiteröffnungen und in ihrer Dicke. Hier wurde ein Intervall von 0,25 mm bis 0,55 mm gemessen. Die INR21700-M50T-Zelle von LG Chem stach mit einem besonderen Design hervor. Bei dieser Rundzelle wurde eine porenförmige, membranartige Scheibe mit nur einer zentralen Öffnung verwendet.

Im Bereich des Minuspols wiesen vier von fünf Abstandhalter ein zentrales Loch auf. Samsungs INR21700-50E-Zelle nutzte auch für diese Scheibe ein Design mit einer separaten Ableiteröffnung.

Die gesammelten Daten der Teardown-Analyse aus den vorangegangenen Tabellen fließen in einem nächsten Schritt in die Anforderungsliste, um die Rahmenbedingungen für die Geometrien der einzelnen Bauteile in den späteren Konstruktionsentwürfen vorzugeben. Bevor

dies geschieht, werden die identifizierten Bauteile, welche typischerweise in einer Lithium-Ionen-Rundzellen verbaut sind, auf Beziehungen untereinander geprüft. Auch diese Ergebnisse sind für die Anforderungsliste wichtig.

3.2 Untersuchung der Produktstruktur auf Abhängigkeiten

In diesem Kapitel der Planungsphase liegt der Fokus auf der Identifikation relevanter Beziehungen zwischen einzelnen Bauteilen der Zelle. Um die grundlegenden Beziehungen zwischen den Bauteilen zu erkennen, wird die Methodik der Design-Structure-Matrix angewandt. Mithilfe dieser Art von Matrix, welche auch als Einfluss- oder Relationsmatrix bekannt ist, lassen sich über die Betrachtung einzelner Bauteile und Bauteilmerkmale die Gesamtbeziehungen in einer Art Bottom-Up-Prinzip ableiten. Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, werden im Detail einzelne Parameter verglichen und in die DSM eingetragen. Zum Schluss stechen bei der Gesamtbetrachtung die Primärrelationen der Bauteile hervor. Daraus lassen sich übergeordnete Baugruppen definieren, welche mehrere vernetzte Bauteile als Module mit einem hohen Vernetzungsgrad in sich vereinen.

Die in dieser Arbeit aufgestellte DSM bewegt sich nicht auf Bauteilebene, sondern listet relevante Bauteilmerkmale auf. Daraus ergeben sich Vorteile in der Ausarbeitung des Modularitätskonzepts. Dieses Konzept wird in Kapitel 4.1 eingehender besprochen.

Die für die Aufstellung der DSM benötigten Bauteilmerkmale basieren auf den Dokumentationsstabellen des vorangegangenen Kapitels 3.1. Außerdem wurden die Erkenntnisse der Fachliteratur zum Aufbau der einzelnen Bauteile einer Lithium-Ionen-Rundzelle aus Kapitel 2.2.4 miteinbezogen. In Tabelle 3.5 wird die beispielhafte Gegenüberstellung der Merkmale des Kathodenableiters mit den Parametern des Gehäusebechers skizziert. Nach diesem Prinzip ist die DSM für alle Bauteile und ihre Merkmale strukturiert.

Tabelle 3.5: Auszug der Abhängigkeitsmatrix für die Gehäuse-Ableiter-Beziehung

		Gehäusebecher													
		Außendurchmesser	Gesamthöhe	Wanddicke	Bodendicke	Überhanglänge	Überhangwinkel	Oberer Außenkanteradius	Unterer Außenkanteradius	Gehäusehöhe der Sicke	Sickentiefe	Sickenhöhe	Sickenwinkel	Oberer Sickenkanteradius	Unterer Sickenkanteradius
Ableiter (Kathode)	Länge	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	Breite	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Dicke	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	Anzahl d. Ableiter	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0

Die Primärrelationen, welche durch eine 1 gekennzeichnet sind (binäre Bewertung), beziehen sich nur auf die direkte Relation der beiden Merkmale und zeigen keine Wertung für verkettete Beziehungen. So hängt die Länge des Kathodenableiters beispielsweise direkt von der Gesamthöhe der Sicke ab, da eine Veränderung der Sickenhöhe den zu überbrückenden Raum zwischen CID und Wickel beeinflusst und somit eine Längenänderung des Ableiters nötig macht. Über die Fragestellung, ob sich ein Parameter A verändert würde, wenn sich ein Parameter B verändert, wurden alle Schnittpunkte der DSM bewertet. Außerdem musste die Bedingung der Primärrelation erfüllt sein, um eine Beziehung zu bestätigen.

Die sich so aufspannende DSM umfasst 103 Bauteilmerkmale, wodurch sich 10.609 mögliche Primärrelationen ergeben. Insgesamt wurden 289 Relationen identifiziert. Die Komplexität, die sich bei einer solchen Größe für den modularen Aufbau der Rundzelle ergibt, ist enorm. Einzelne Merkmalsänderungen, welche zu späten Zeitpunkten im Prozess durchgeführt werden, könnten zu massiven Änderungswellen anderer Bauteile führen. Das Ausmaß dieser Komplexität ist in Abbildung 3.3 in Form eines Diagramms dargestellt. Dieses Diagramm visualisiert die Ergebnisse der gesamten DSM in einem Schaubild.

289 identifizierte Relationen von 10.609 möglichen Primärrelationen

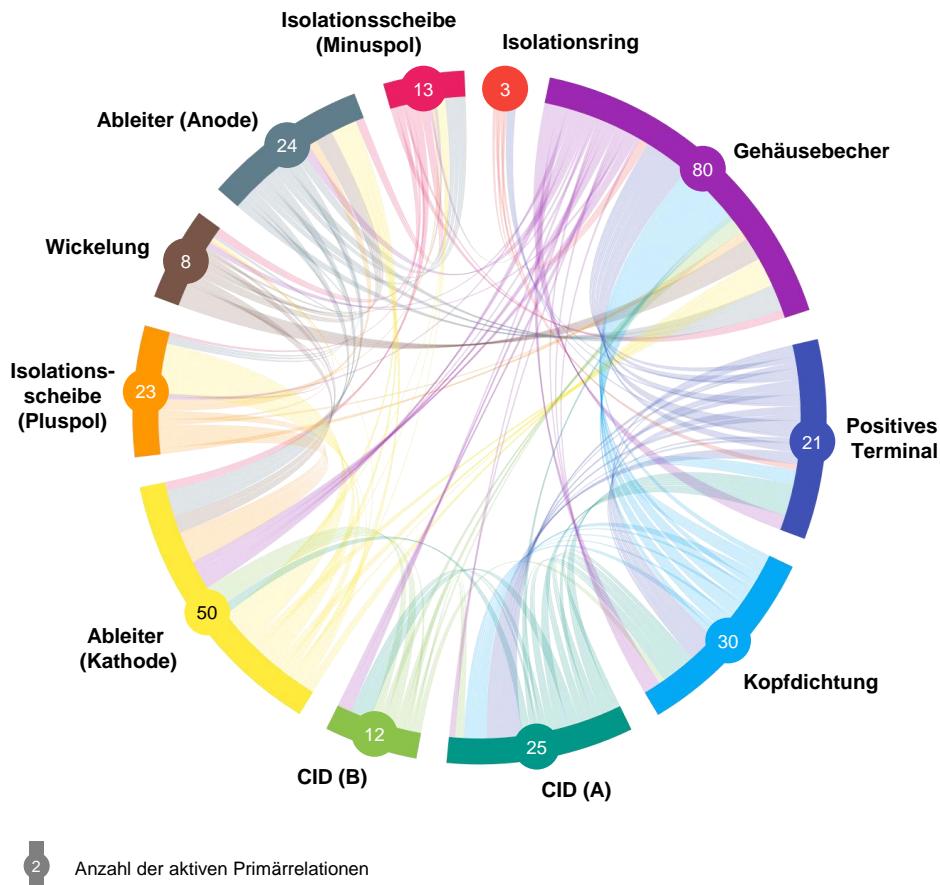


Abbildung 3.3: Beziehungen und Abhängigkeiten grundlegender Bauteilmerkmale¹²⁹

¹²⁹ Darstellung auf Basis der Datengrundlage der Design-Structure-Matrix in Abbildung VII.

Die aktiven Primärrelationen in der Abbildung 3.3 bezeichnen die Schnittpunkte, in denen das jeweilige Bauteil aktiv andere Bauteile bzw. deren Merkmale durch eine eigene Änderung beeinflusst. Im Ergebnis ist es daher wenig überraschend, dass der Gehäusebecher mit 80 aktiven Relationen die meisten anderen Bauteile beeinflusst, da er in physischer Hinsicht über die gesamte Zelle in direkten Kontakt mit fast allen Bauteilen kommt. Weit interessanter ist dagegen der Kathodenableiter. 50 aktive Relationen zeigen deutlich mehr Einflüsse als die vergleichsweise geringe Anzahl von acht Relationen beim Wickel. Da der Anodenableiter ebenfalls deutlich weniger aktive Relationen bei fast identischen Bauteilmerkmalen aufweist, muss der Grund in der Position des Ableiters liegen. Als Schnittstelle ist der Kathodenableiter das Bindeglied zwischen dem Wickel und den Bauteilen im Kopf der Zelle. Dadurch würden sich Veränderungen des Ableiters auf beide Bereiche auswirken. Auch die Dichtung verbindet mit 30 aktiven Relationen die Bauteile im Kopf der Zelle mit dem Gehäusebecher. Die geringen Auswirkungen des Wickels liegen dem Umstand zu Grunde, dass durch seine zylindrische Form nur zwei Bauteilmerkmale einen wirklichen Einfluss nach außen ausüben können – die Höhe und der Durchmesser.

Bei der Arbeit mit den Ergebnissen der DSM ist zu jedem Zeitpunkt zu beachten, dass einige Relationsentscheidungen durchaus schwierig einzuschätzen sind und sich subjektive Einflüsse auf die Bewertung auswirken können. Deshalb sollte eine DSM zu bestimmten Abständen des Entwicklungsprozesses auf Basis der neuen Erkenntnisse regelmäßig aktualisiert werden.

Die Ergebnisse der DSM fließen als Eingangsgrößen neben den Auswertungen der Teardown-Analyse in die Anforderungsliste. Die Erstellung der Anforderungsliste wird das Thema des folgenden Kapitels sein. Nachdem die Anforderungsliste finalisiert wurde, ist die Planungsphase abgeschlossen und es erfolgt der Übergang zur Konzeptionsphase.

3.3 Ausarbeitung der Anforderungsliste

Dieses Kapitel behandelt die Erstellung einer grundlegenden Anforderungsliste für die Entwicklung der Zellmodelle. Zu Beginn wird die Zielsetzung, welche mit der Erstellung der Anforderungsliste einhergeht, thematisiert. Im Anschluss daran wird der Aufbau einer solchen Anforderungsliste beschrieben. Darauf folgt an einem Beispiel die Überführung der bereits erarbeiteten Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln in die Anforderungsliste. Zum Schluss wird auf einige Anomalien der in dieser Arbeit erstellten Anforderungsliste eingegangen.

Die Anforderungsliste stellt das wesentliche Erzeugnis der Planungsphase eines Konstruktions- und Entwicklungsprozesses dar. Nachdem zu Beginn der Produktentwicklung nur die Idee einer 21700er-Lithium-Ionen-Rundzelle stand, sollten mit der Planungsphase die Rahmenbedingungen für die Konzeption und Konstruktion mehrerer Zellausprägungen geschaffen werden. Die Anforderungsliste vereint die bisherigen Erkenntnisse der Planung in sich und schafft somit einen neuen Detaillierungsgrad in Bezug auf die Konkretisierung der Zellausprägungen. Dieser Prozess, bei dem die erste Festlegung der Anforderungen einen wichtigen Meilenstein einnimmt, ist in Kapitel 2.1.2 genau beschrieben. Das Ziel ist es aber nicht, zu

diesem Zeitpunkt eine statische, unumstößliche Liste zu erstellen, die keine Potentiale für Änderungen bietet, sondern eine erste Orientierung für den weiteren Prozessverlauf und die Konkretisierung der Zellausprägungen zu schaffen. Anpassungen und Änderungen aufgrund von neuen Erkenntnissen sind daher nicht nur gewünscht, sondern für eine erfolgreiche Entwicklung sogar gefordert.

Die Anforderungsliste ist in mehrere Spalten aufgeteilt. Nach der Nummerierung wird in der hier vorliegenden Anforderungsliste das jeweilige Bauteil eingetragen. In der Ausprägungsspalte wird angegeben, ob die jeweilige Anforderung für alle Ausprägungen gelten soll oder nur für eine spezifische Ausprägung, wie beispielsweise die Sicherheitszelle, angewandt wird. Darauf folgt die Klassifizierung der Anforderung in Bezug auf gewünschte (W) bzw. geforderte (F) Listeneinträge. In der Anforderungsspalte ist die jeweilige Anforderung formuliert oder das zu betrachtende Bauteilmerkmal eingetragen. In den weiteren Spalten folgen Minimal- bzw. Maximalwerte sowie eine Idealvorstellung des Werts und die jeweilige Einheit. Abschließend lassen sich weitere Anmerkungen zum Ursprung der Anforderung formulieren. Ein Auszug der unter dieser Beschreibung erstellten Anforderungsliste für die Auslegung der drei Zellvarianten findet sich in Tabelle 3.6 wieder.

Tabelle 3.6: Auszug der initialen Anforderungsliste für die Zellentwicklung

Anforderungsliste (Lithium-Ionen-Rundzelle)									
Nr.	Bauteil	Ausprägung	F/W	Anforderungen	Min.	Max.	Ideal	Einheit	Anmerkung
Gesamtzelle									
1	Gesamtzelle	alle	F	Abmessung gem. 21700-Standard – Durchmesser	20,5	21,5	21	mm	Projektanforderung
2	Gesamtzelle	alle	F	Abmessung gem. 21700-Standard – Höhe	69,5	71	70	mm	Projektanforderung
3	Gesamtzelle	alle	F	Finale Zellspannung (Standardumgebungsbedingungen)	3,6	3,7	3,7	V	Projektanforderung
4	Gesamtzelle	High-Energy	F	Energiekapazität der einzelnen Rundzelle	4900	5000	5000	mAh	Projektanforderung
5	Gesamtzelle	High-Power	F	Energiekapazität der einzelnen Rundzelle	3900	4000	4000	mAh	Projektanforderung
6	Gesamtzelle	High-Safety	F	Energiekapazität der einzelnen Rundzelle	3900	4000	4000	mAh	Projektanforderung
Isolationsring									
7	Isolationsring	alle	F	Außendurchmesser	19,71	20,12	-	mm	Wettbewerberanalyse
8	Isolationsring	alle	F	Innendurchmesser	11,12	13,04	-	mm	Wettbewerberanalyse
9	Isolationsring	alle	F	Dicke	0,15	0,25	0,2	mm	Wettbewerberanalyse
10	Isolationsring	alle	F	Abhängigkeit zwischen Außendurchmesser (Isolationsring) und Außendurchmesser (Gehäusebecher)					Design-Structure-Matrix (DSM)
11	Isolationsring	alle	F	Abhängigkeit zwischen Innendurchmesser (Isolationsring) und Deckeldurchmesser (Positives Terminal)					Design-Structure-Matrix (DSM)
12	Isolationsring	alle	F	Abhängigkeit zwischen Innendurchmesser (Isolationsring) und Überhanglänge (Gehäusebecher)					Design-Structure-Matrix (DSM)
13	Isolationsring	alle	F	Abhängigkeit zwischen Dicke (Isolationsring) und Gesamthöhe (Positives Terminal)					Design-Structure-Matrix (DSM)
14	Isolationsring	alle	F	Abhängigkeit zwischen Dicke (Isolationsring) und Gesamthöhe (Gehäusebecher)					Design-Structure-Matrix (DSM)
Positives Terminal									
15	Positives Terminal	alle	F	Außendurchmesser	18,25	18,45	18,45	mm	Wettbewerberanalyse
16	Positives Terminal	alle	F	Innendurchmesser	abh.	abh.	-	mm	Wettbewerberanalyse
17	Positives Terminal	alle	F	Dicke	0,45	0,9	0,9	mm	Wettbewerberanalyse
18	Positives Terminal	alle	F	Gesamthöhe	2,3	2,52	-	mm	Wettbewerberanalyse
19	Positives Terminal	alle	F	Deckeldurchmesser	8,9	10	-	mm	Wettbewerberanalyse

Der bereits beschriebene Aufbau soll nun nochmals konkret an dem Anforderungsblock mit den Nummern 7 bis 14, den Anforderungen an den Isolationsring, besprochen werden. Der Isolationsring bringt im Wesentlichen drei wichtige Parameter für die Konstruktion mit. Dabei

handelt es sich um den Außendurchmesser, den Innendurchmesser sowie die Dicke. Hierfür liegt in der Anforderungsliste beispielhaft für die Dicke ein Intervall mit einem Minimal- und einem Maximalwert vor. In diesem Fall spannt sich das Intervall in einem Bereich von 0,15 mm bis 0,25 mm auf. Der Idealwert wurde zu diesem Zeitpunkt mit 0,2 mm terminiert. Der Ursprung dieses Wertebereichs liegt in der Wettbewerbsanalyse. Zusätzlich zu den Parametern mit konkreten Wertepaaren, sind in der Anforderungsliste für den Isolationsring alle identifizierten Abhängigkeiten eingetragen. So ist der Isolationsring durch wenigstens einen seiner Parameter abhängig vom Gehäusebecher. Diese Informationen wurden der DSM entnommen.

Die Anforderungsliste vereint damit die Werteangaben der Bauteilmerkmale aus Kapitel 3.1 (Wettbewerberanalyse) sowie die Relation der Bauteilmerkmale aus Kapitel 3.2 (DSM) in einem Dokument.

Die in dieser Arbeit angefertigte Anforderungsliste bringt zwei Anomalien mit sich, welche zum Abschluss des Kapitels noch einmal angesprochen werden sollen. Einerseits fehlen in der Anforderungsliste mathematisch-physikalische Randbedingungen durch Formeln oder Materialkennwerte. Andererseits liefert die Anforderungsliste aufgrund der Wettbewerberanalyse genug Randbedingungen für eine erste konstruktive Auslegung. In einer weiteren Überarbeitungsschleife sollten solche mathematisch-physikalischen Werte in die Anforderungsliste aufgenommen und mit den Modellen abgeglichen werden. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ein weiterer Punkt, der durch diese Anforderungsliste nicht abgedeckt wird, welcher aber aus unternehmerischer Sicht sehr relevant ist, bezieht sich auf die wirtschaftlichen Randbedingungen wie Kosten oder zur Verfügung stehende Fertigungstechnologien. Auch dieser Aspekt ist nicht Teil dieser Ausarbeitung, soll an dieser Stelle jedoch erwähnt werden.

4 Konzeptionsphase der Li-Ionen-Rundzelle

Dieses Kapitel baut auf den Ergebnissen der Produktplanungsphase aus Kapitel 3 auf. Mit der Konzeptentwicklung erfolgt die Konkretisierung der Gesamtzelle auf Basis der Bauteilbeziehungen und -anforderungen. Dazu wird in Abschnitt 4.1 zunächst ein anwendbarer Produktstrukturplan zusammen mit einer Modularitätsstruktur entworfen. Abschnitt 4.2 fokussiert sich im Anschluss daran auf die Definition und Festlegung konkreter Konstruktionsausprägungen für die Sicherheits-, Energie- und Leistungsvariante der Zelle.

Die Konzeptentwicklungsphase schließt direkt an die Planungsphase an. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, bildet das Ziel der Konzeption den Aufbau einer funktionalen, modularen Produktstruktur. Außerdem soll mit Abschluss dieser Phase ein prinzipielles Lösungskonzept für die konstruktive Ausarbeitung der drei Zellmodelle vorliegen. Aus prozessualer Sicht werden somit die Erzeugnisse der Planungsphase als Eingangsgrößen in der Konzeptentwicklungsphase verarbeitet und wiederum als Eingangsgrößen für die Entwurfsphase zur Verfügung gestellt.

4.1 Produktstruktur und Modularitätskonzept der Bauteile

In diesem Kapitel soll aus den bisher gewonnenen Daten über den Aufbau und die Bauteile einer Lithium-Ionen-Rundzelle eine Produktstruktur, für die in dieser Arbeit zu entwerfenden Zellausprägungen, abgeleitet werden. Dazu wird ein Produktstrukturplan entworfen, welcher sowohl funktionale als auch modulare Bauteilaspekte berücksichtigt. Außerdem wird das Vorgehen beschrieben, welches es auch zu einem späteren Zeitpunkt in der Entwicklung ermöglicht, mit geringen Aufwendungen konkrete Änderungen an den Parametern der Bauteile vorzunehmen.

Das Ziel des Produktstrukturplans ist es, neben der Visualisierung von Produkthierarchien, eine Strukturierung des Projekts und der damit einhergehenden Konstruktionsaufgaben zu skizzieren. Über den Produktstrukturplan lassen sich Baugruppen definieren, welche beispielsweise aufgrund der Position und den jeweiligen Relationen ihrer Bauteile zusammengesetzt sein können. Dadurch hilft diese Art des Strukturplans bei der Aufteilung und Reihenfolge der abzuleistenden Konstruktionsaufgaben.

Die vertikalen Ebenen spiegeln einen wesentlichen Teil des Produktstrukturplans wider. Als Teil des Gesamtaufbaus sind sie in Kapitel 2.1.3 allgemein beschrieben. Über diese Ebenen lassen sich die Module der Rundzelle ableiten. Ein Modul stellt dabei eine nach Montageaspekten abgrenzbare Einheit als Teil eines Ganzen dar.¹³⁰ Eine Kategorisierung kann anhand des Komponentenunabhängigkeitsgrads in Bezug auf seine Schnittstellen erfolgen.¹³¹ Daraus ergibt sich, dass sowohl Baugruppen als auch einzelne Bauteile als Module bezeichnet werden

¹³⁰ Vgl. Piller et al. (Modularisierung in der Automobilindustrie) 1999.

¹³¹ Vgl. Hoffmann (Methodik zur Steuerung modularer Produktbaukästen) 2018, S. 12.

und anhand ihrer Relation zu anderen Modulen, welche sich für die Zellbauteile aus der DSM in Kapitel 3.2 ergeben, kategorisiert werden können.

Abbildung 4.1 zeigt die Ergebnisse des Produktstrukturplans der Lithium-Ionen-Rundzelle. Die vertikale Strukturierung ist in drei Ebenen aufgeteilt. Auf Basis der Ergebnisse der DSM ergaben sich drei Hauptbaugruppen, welche in sich alle jeweiligen Bauteile vereinen, die untereinander die höchsten Relationen aufwiesen.

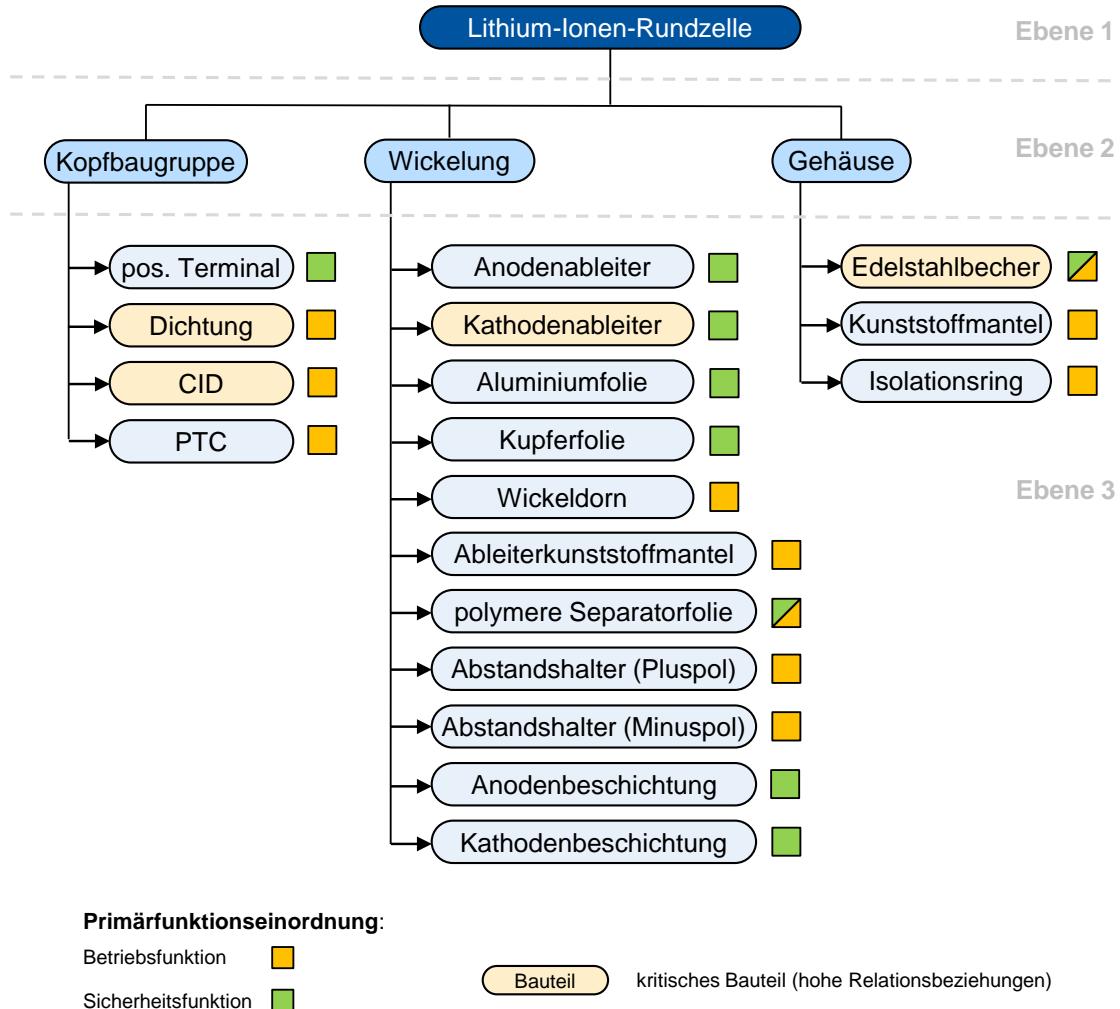


Abbildung 4.1: Produktstrukturplan der Lithium-Ionen-Rundzelle

In der Kopfbaugruppe befinden sich mit dem CID und der Dichtung zwei kritische Bauteile. Durch ihre Schnittstellenposition zum Gehäusebecher bzw. dem Wickel ergeben sich für diese beiden Bauteile viele Relationen zu anderen Baugruppen. Dieser Umstand sollte bei späteren Änderungen immer berücksichtigt werden. Gleiches gilt für den Kathodenableiter in der Wickelbaugruppe. Offensichtlich ist auch die Vernetzung des Edelstahlbechers mit fast allen Bauteilen der anderen Baugruppen.

Neben der Einteilung in Baugruppen enthält Abbildung 4.1 ebenfalls Aussagen über die Einordnung der Bauteilprimärfunktionen. Hierbei wurde zwischen der Betriebs- und der Sicherheitsfunktion unterschieden. Bauteile, welche in ihrer Funktionalität die Kernaufgaben der Zelle, die Aufnahme, Speicherung und Abgabe der elektrischen Energie, primär unterstützen,

wurden der Betriebsfunktion zugeordnet. Andere Bauteile mit klaren sicherheitsrelevanten Aufgabenbereichen wurden in die Sicherheitsfunktion eingeordnet. Die Separatorfolien und der Edelstahlbecher übernehmen Aufgaben aus beiden Bereichen. Während die Separatorfolie als Trennwand für die Speicherung und den Transport der Lithium-Ionen eine wichtige Rolle einnimmt, schützt sie gleichzeitig die Zelle vor Kurzschlüssen durch einen direkten Kontakt der Anoden- und Kathodenseiten. Der Edelstahlbecher sorgt für die mechanische Stabilität der Zellkonstruktion und dichtet den Wickel vor äußeren Einflüssen ab. Außerdem übernimmt die Sicke des Bechers weitere wichtige Sicherheitsfunktionen. Diese sind unter anderem in Kapitel 2.2.4 näher erläutert. Neben diesen Sicherheitsfunktionalitäten agiert der Becher als negativer Pol der Zelle und ist damit für die Betriebsfunktion wichtig.

Um den Modularitätsgedanken aller Bauteile der dritten Ebene auch bei späteren Änderungen im Entwicklungsprozess noch ausreichend Tribut zollen zu können, wird bei den konstruktiven Entwürfen im nächsten Kapitel mit globalen Variablen gearbeitet. Diese ermöglichen es über eine zentrale Liste bestimmte Parameter anzupassen, ohne das Modell neukonstruieren zu müssen. In diesem Zusammenhang ist es essenziell, Relationen und Auswirkungen auf andere Bauteile mit dem Produktstrukturplan und der DSM abzugleichen.

4.2 Definition der Zellausprägungen

Nachdem der Aufbau und das Modularitätskonzept der Zelle durch den Produktstrukturplan eingehend behandelt wurden, widmet sich dieses Kapitel der konkreten Festlegung der einzelnen Ausprägungen für die drei Zellvarianten. Um den Entscheidungsprozess bei der Auswahl der Ausprägungen so nachvollziehbar und plausibel wie möglich zu gestalten, wird in diesem Kapitel ein morphologischer Kasten aufgebaut und eine Nutzwertanalyse der auswählbaren Ausprägungen angefertigt. Im Anschluss an die allgemeine Betrachtung der beiden Methodiken thematisieren die nachfolgenden Unterkapitel die jeweiligen Ergebnisse für die Sicherheits-, Energie- und Leistungszelle. Am Ende dieser Kapitel ist die Konzeptionsphase durch die Definition der konkreten Zellkonzepte abgeschlossen.

In der frühen Phase der Konzeption, in der die Zelle durch die Planungsergebnisse bisher nur grob umrissen wurde, ist der Prozess der konkreten Festlegung von Ausprägungsmerkmalen oftmals sehr undurchsichtig. Durch die Planungsphase steht bisher nur die grobe Idee der Zelle. Mit den Ergebnissen der Wettbewerberanalyse und aufgrund der Merkmalsidentifikation durch die DSM lassen sich aber weitere Möglichkeiten von abgewandelten Merkmalen ableiten. An diesem Punkt setzt der morphologische Kasten als Instrument zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses an.

Wie in Kapitel 2.1.3 bereits beschrieben, versucht der morphologische Kasten die Gesamtfunktion des Produkts durch die Summe an ausgewählten Ausprägungen wiederzugeben. Durch die Gegenüberstellung der möglichen Ausprägungen für ein spezielles Merkmal kann der Entscheidungsprozess sinnvoll geordnet werden und ist in seiner Gänze auch im späteren Verlauf des Prozesses nachvollziehbar. Mit den begrenzten Informationen, welche zu diesem Zeitpunkt in der Produktentwicklung der Zelle vorliegen, lässt sich auch für die Zellkonzeption ein morphologischer Kasten aufbauen.

In dieser Arbeit wird neben dem morphologischen Kasten auf ein weiteres Werkzeug der Entscheidungsfindung zurückgegriffen. Die Nutzwertanalyse nutzt einfache Rechenoperationen, um auf Basis der Bewertungen durch die Prozessteilnehmer und einer Gewichtung nach spezifischen Kriterien eine zahlenbasierte Entscheidung zu ermöglichen. Das grundlegende Vorgehen dieser Methodik ist ebenfalls in Kapitel 2.1.3 erläutert.

Die Kombination beider Methodiken in einer Darstellung ermöglicht eine übersichtliche Entscheidungsfindung für die drei Zellausprägungen. Abbildung 4.2 zeigt den Aufbau dieser Zusammenführung in Form eines Beispiels. In der ersten Spalte befindet sich das betrachtete Merkmal. Danach folgen drei Spalten, in denen die Gewichtung des Merkmals in Bezug auf die Aspekte Sicherheit (S), Energie (E) und Leistung (L) eingetragen ist. An diese Spalten grenzen die jeweiligen Ausprägungsalternativen, welche für das betrachtete Merkmal in Frage kommen. Auch diese Spalten sind jeweils in die drei Gewichtungsaspekte unterteilt.

Das zu betrachtende Kernmerkmal			Auflistung der wählbaren Ausprägungsmöglichkeiten									
Merkmale	Gewichtung			Ausprägung 1			Ausprägung 2			Ausprägung 3		
	S	E	L	S	E	L	S	E	L	S	E	L
Merkmalesausprägung (übergreifende Kategorie)	0,8	0,15	0,05	Alternative A			Alternative B			Alternative C		
	5	2	1	1	2	1	3	4	1	2,4	0,6	0,05
	4	0,3	0,05	0,8	0,3	0,05	2,4	0,6	0,05	4,35	1,15	3,05
	Gewichtung des Merkmals bzgl. Sicherheit, Energie und Leistung			Kumulierte Ergebnisse			Bewertung * Gewichtung			Bewertung nach Skala		

Abbildung 4.2: Aufbauerläuterung des morphologischen Kastens mit Nutzwertanalyse

Aus Abbildung 4.2 geht außerdem hervor, dass jede Ausprägung innerhalb der weißen Zellen auf Grundlage der Bewertungsskala von 0 (keine Präferenz) bis 5 (sehr hohe Präferenz) bewertet wird. Die Bewertung erfolgte in dieser Arbeit mithilfe der Erkenntnisse der Wettbewerberanalyse und der literarischen Grundlage zu Lithium-Ionen-Batterien aus den Unterkapiteln des Kapitels 2.2. So ergeben sich gewichtete Bewertungen für die drei Aspekte Sicherheit, Energie und Leistung. Außerdem lässt sich so ebenfalls ein Gesamtfavorit ermitteln (dunkelblau).

Der in dieser Arbeit erstellte morphologische Kasten mit integrierter Nutzwertanalyse ist in Tabelle 4.1 abgebildet. Insgesamt wurden dabei zehn Merkmale verschiedener Bauteile und Baugruppen betrachtet. Dabei wurden im Vorhinein zwischen drei und fünf Alternativen festgelegt. Die jeweils ausgewählte Alternative kann mitunter vom Gesamtfavoriten abweichen, da jeweils nach den drei zu entwickelnden Zellalternativen unterschieden wurde. Die Betrachtung der Ergebnisse aus Tabelle 4.1 erfolgt in den Unterkapiteln 4.2.1, 4.2.2 und 4.2.3.

Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten mit Nutzwertanalyse

Merkmale	Gewichtung			Ausprägung 1			Ausprägung 2			Ausprägung 3			Ausprägung 4			Ausprägung 5			
	S	E	L	S	E	L	S	E	L	S	E	L	S	E	L	S	E	L	
Ausprägung der Sicke (Gehäusebecher)	0,7	0,3	0	keine Sicke			minimale Höhe und Tiefe, horizontal			minimale Höhe und Tiefe, angewinkelt			ausgeprägte Höhe und Tiefe, horizontal			ausgeprägte Höhe und Tiefe, angewinkelt			
				1	5	5	3	3	3	3	2	4	4	1	3	5	0	3	
				0,7	1,5	0	2,1	0,9	0	2,1	0,6	0	2,8	0,3	0	3,5	0	0	
Gehäuseboden (Gehäusebecher)	0,9	0,1	0	gleiche Dicke wie Wandung			erhöhte Dicke			Berstfläche			erhöhte Dicke und Berstfläche						
				2	5	3	3	1	3	4	4	3	5	1	3				
				1,8	0,5	0	2,7	0,1	0	3,6	0,4	0	4,5	0,1	0				
Kopfbaugruppen -konzepte (Kopfbaugruppe)	0,3	0,6	0,1	Standard-anordnung			integrierte Terminal-CID-Kombination			flaches Terminal mit geringer Dicke									
				4	2	3	3	5	3	2	4	3							
				1,2	1,2	0,3	0,9	3,0	0,3	0,6	2,4	0,3							
Wickelausprägung (Wickel)	0,4	0,4	0,2	2,7			4,2			3,3									
				0	5	3	3	3	3	2	4	3	5	1	3	4	2	3	
				0	2	0,6	1,2	1,2	0,6	0,8	1,6	0,6	2	0,4	0,6	1,6	0,8	0,6	
Wickeldorngeometrie (Wickel)	0,8	0,1	0,1	2,6			3			3			3			3			
				kein Dorn			massiver Dorn (rund)			hohler Dorn (rund)			hohler Dorn mit Längskerbe (rund)						
				1	4	3	3	3	3	4	3	3	5	3	3				
Anzahl der Ableiter (Ableiter)	0,4	0	0,6	0,8			0,4			0,3			0,3			0,3			
				1,5	3			3,8			4,6								
				3	3			3			3			4,6					
Ableiteranordnung (Ableiter)	0,7	0	0,3	Kathode: mittig Anode: innen gleichmäßig verteilt			Kathode: außen Anode: außen zusammenliegend			Kathode: mittig Anode: außen gleichmäßig verteilt			Kathode: innen Anode: außen zusammenliegend						
				2	3	3	2	3	3	5	3	4	4	3	3				
				1,4	0	0,9	1,4	0	0,9	3	0	1,2	2,8	0	0,9	3,7			
Ableiterdicke (Ableiter)	0,5	0,1	0,4	2,3			2,3			4,2			3,7						
				3	1,8			4,2											
				1,5	3			3			1,6			2,4			3,8		
Funktionsintegrierte Sicherheitselemente (Zelle)	0,7	0,3	0	keine Sicherheits-elemente			CID			PTC			CID und PTC			CID, PTC und PCB			
				0	5	3	3	3	3	1	3	3	4	2	3	5	1	3	
				0	1,5	0	2,1	0,9	0	0,7	0,9	0	2,8	0,6	0	3,5	0,3	0	
Übergreifende Bauteilkonzepte (Zelle)	0,2	0,2	0,6	1,5			3			1,6			2,4			3,8			
				Keine Änderung			Oberflächen-kühlung an Wickelaußenhaut			Ableiterkühlung über/unter dem Wickel									
				3	3			2,4			0,4			3,8					

4.2.1 Merkmale der Sicherheitsvariante

Dieser Abschnitt beinhaltet die Ergebnisse des Entscheidungsprozesses auf Grundlage des morphologischen Kastens aus Tabelle 4.1 für die Sicherheitszelle. Obwohl Sicherheitsaspekte die primären Entscheidungstreiber bei der Auswahl der Merkmalsausprägungen darstellten, wurde in einigen wenigen Situationen durch Abwägungen abweichende Entscheidungen getroffen. Diese werden in der Folge begründet.

In Tabelle 4.2 befindet sich eine Übersicht aller ausgewählten Ausprägungen für die Sicherheitszelle. Dabei zeigt die jeweils erste Zeile das betrachtete Merkmal. Danach folgt die Nummer der Ausprägung sowie die Beschreibung der Ausprägung.

Tabelle 4.2: Ausprägungsauswahl der Sicherheitszelle

Ausprägung der Sicke (Gehäusebecher)	Gehäuseboden (Gehäusebecher)	Kopfbaugruppenkonzepte (Kopfbaugruppe)	Wickelausprägung (Wickel)	Wickeldorngeometrie (Wickel)
Ausprägung 5	Ausprägung 4	Ausprägung 1	Ausprägung 4	Ausprägung 4
ausgeprägte Höhe und Tiefe, angewinkelt	erhöhte Dicke und Berstfläche	Standardanordnung	großer Separatorüberstand, Beschichtungsabstand	hohler Dorn mit Längskerbe (rund)
Anzahl der Ableiter (Ableiter)	Ableiteranordnung (Ableiter)	Ableiterdicke (Ableiter)	Funktionsintegrierte Sicherheitselemente (Zelle)	Übergreifende Bauteilkonzepte (Zelle)
Ausprägung 1	Ausprägung 3	Ausprägung 3	Ausprägung 4	Ausprägung 1
Kathode: 1 Anode: 1	Kathode: mittig Anode: außen gleichmäßig verteilt	erhöht	CID und PTC	keine Änderung

Während die Ausprägung der Sicke wenig Überraschungen enthielt wurde beim Gehäuseboden die Variante mit einer erhöhten Dicke und einer zusätzlichen Berstfläche gewählt. Dies entspricht nicht dem Standarddesign der Zellen aus der Wettbewerberanalyse. Die zusätzliche Berstfläche steigert aber die Sicherheit der Zelle durch einen weiteren Gasaustrittsweg und die Unterbrechung des Stromflusses, was nicht zuletzt auch in anderen wissenschaftlichen Veröffentlichungen beschrieben wurde (Kapitel 2.2.4).

Wenngleich die Standardanordnung von Terminal, Sicherheitselement und Dichtung gewählt wurde, wird diese Auswahl in konstruktiver Hinsicht durch die Verwendung einer Kombination aus CID und PTC beeinflusst. Im Fall der funktionsintegrierten Sicherheitselemente wurde nicht die sicherheitstechnische Optimallösung der Nutzwertanalyse gewählt. Der Grund hierfür lag in der Kosten-Nutzen-Abwägung einer zusätzlichen PCB-Schutzplatine. Hierbei sprachen die Bauteilkosten, Platzeinbußen und die Funktionsüberschneidung mit dem Aufgabenbereich des BMS (Kapitel 2.2.1) gegen eine Auswahl.

Eine weitere konstruktiv relevante Entscheidung stellt die Wickeldorngeometrie dar. Die Tatsache, dass ein Wickeldorn in der Sicherheitszelle vorhanden sein sollte, ist wichtig für die Auslegung des Wickels. Die Einkerbung und der hohle Innenbereich steigern die Sicherheit in Bezug auf Stabilität und Gasfluss. Die Erkenntnisse dazu können in Kapitel 2.2.4 nachgelesen werden.

Die Ausprägungen der Ableiter wurden anhand der Literatur und den untersuchten Wettbewerberzellen gewählt. Insbesondere die Anordnung der Ableiter in gleichmäßigen Abständen

ist der Grundlage geschuldet, dass die Wärmeverteilung im Wickel durch diese Auslegung optimiert wird (Kapitel 2.2.4).

Die Ausprägungen der Sicherheitszelle aus Tabelle 4.2 stimmen, bis auf wenige Ausnahmen, mit den gewichteten Gesamtergebnissen der Nutzwertanalyse überein. Dies liegt mitunter daran, dass die festgelegten Gewichtungen meist durch die Sicherheit dominiert werden. Bei der Energie- und Leistungszelle liegen daher stärkere Abweichungen in Bezug auf Auswahl zwischen dem besten Gesamtergebnis und der Wahl der individuell besten Einzelbewertung vor.

4.2.2 Merkmale der Energievariante

In diesem Abschnitt wird auf die Ergebnisse des morphologischen Kastens für die Energiezelle eingegangen. Die Grundlage dafür liefern die Ausprägungsmöglichkeiten der Tabelle 4.1. Da die Zellchemie in dieser Arbeit als gegeben und unveränderlich angesehen wird, konzentriert sich die Auswahl der Ausprägungen auf die Maximierung der beschichteten Wickelfläche, um dadurch die Energiedichte der Zelle zu steigern.

Tabelle 4.3 fasst die Ergebnisse für die Energiezelle zusammen. Aufgrund der Tatsache, dass die Maximierung der Energiedichte im Vordergrund stand, wurde bei der Auswahl bewusst in Kauf genommen, dass sich Sicherheitsaspekte der Zelle verschlechtern, wenn dies gleichzeitig bedeutet, dass dadurch Volumen für den Wickel generiert wird.

Tabelle 4.3: Ausprägungsauswahl der Energiezelle

Ausprägung der Sicke (Gehäusebecher)	Gehäuseboden (Gehäusebecher)	Kopfbaugruppenkonzepte (Kopfbaugruppe)	Wickelausprägung (Wickel)	Wickeldorngeometrie (Wickel)
Ausprägung 1	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 1
keine Sicke	gleiche Dicke wie Wandung	integrierte Terminal-CID-Kombination	kleiner Separator-überstand, kein Beschichtungsabstand	kein Dorn
Anzahl der Ableiter (Ableiter)	Ableiteranordnung (Ableiter)	Ableiterdicke (Ableiter)	Funktionsintegrierte Sicherheitselemente (Zelle)	Übergreifende Bauteilkonzepte (Zelle)
Ausprägung 1	Ausprägung 3	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 1
Kathode: 1 Anode: 1	Kathode: mittig Anode: außen gleichmäßig verteilt	Standard	CID	keine Änderung

Zu den radikalsten Ausprägungen zählt der Verzicht auf die Sicke. Dadurch lässt sich die Wickelhöhe steigern, es bedeutet aber auch, dass Änderungen von Bauteilen oberhalb des Wickels im Vergleich zum Standarddesign unumgänglich sind. Außerdem werden die Sicherheitseigenschaften der Zelle drastisch beschnitten, was für die schlechte Gesamtbewertung dieser Ausprägungsalternative in der Nutzwertanalyse verantwortlich ist. Diese Änderung weist aber das größte Potential zur Generierung von zusätzlicher Wickelhöhe auf. Aus diesem Grund wurde sich trotzdem für einen Verzicht der Sicke entschieden.

Weitere wichtige Ausprägungen stellen das Kopfbaugruppenkonzept sowie die Wickeldorngeometrie dar. Bezüglich der Kopfbaugruppe wurde sich für die integrierte Terminal-CID-Kombination entschieden, weil dadurch die Höhe der beiden Bauteile effektiv reduziert werden kann.

Das wiederum ermöglicht es, das freigewordene Volumen für den Wickel zu nutzen. Gleiches gilt auch für den Wickeldorn. Durch den Verzicht auf einen Wickeldorn sind im Inneren des Wickels mehr Windungen möglich. Dieser Effekt vergrößert die beschichtete Fläche aber im Vergleich zu den anderen beiden Ausprägungen nur bedingt.

Die weitere Auswahl bedarf keiner gesonderten Erklärung. Die Aluminium- und Kupferfolien werden bis an den Rand beschichtet und die Nutzung des CIDs dient zur Erhaltung eines minimalen Sicherheitsstandards für die Zelle, insbesondere da jeder Zelle der Wettbewerbsanalyse ein CID besaß.

4.2.3 Merkmale der Leistungsvariante

Mit diesem Abschnitt wird die Konzeptionsphase durch die Festlegung der Ausprägung der Leistungsquelle abgeschlossen. Auch diese Auswahl beruht auf der Kombination aus morphologischem Kasten und Nutzwertanalyse, welche in Tabelle 4.1 visualisiert ist.

Tabelle 4.4 beinhaltet die Ergebnisse der Entscheidungen bezüglich der leistungsorientierten Zelle. Wie auch schon bei der Energiezelle weichen einige der ausgewählten Ausprägungen von der höchsten Gesamtbewertung ab. Außerdem wurde bei der Auswahl zu jeder Zeit die Maximierung der Leistungsfähigkeit favorisiert, was wiederum in manchen Fällen mit Einbußen im Bereich der Sicherheitsaspekte einherging.

Tabelle 4.4: Ausprägungsauswahl der Leistungsquelle

Ausprägung der Sicke (Gehäusebecher)	Gehäuseboden (Gehäusebecher)	Kopfbaugruppenkonzepte (Kopfbaugruppe)	Wickelausprägung (Wickel)	Wickeldorngeometrie (Wickel)
Ausprägung 5	Ausprägung 2	Ausprägung 1	Ausprägung 4	Ausprägung 3
ausgeprägte Höhe und Tiefe, angewinkelt	erhöhte Dicke	Standardanordnung	großer Separatorüberstand, Beschichtungsabstand	hohler Dorn (rund)
Anzahl der Ableiter (Ableiter)	Ableiteranordnung (Ableiter)	Ableiterdicke (Ableiter)	Funktionsintegrierte Sicherheitselemente (Zelle)	Übergreifende Bauteilkonzepte (Zelle)
Ausprägung 4	Ausprägung 3	Ausprägung 3	Ausprägung 2	Ausprägung 3
Kathode: 2 Anode: 2	Kathode: mittig Anode: außen gleichmäßig verteilt	erhöht	CID	Ableiterkühlung über/unter dem Wickel

Zu den interessantesten Ausprägungen der Leistungsquelle zählt die Anzahl der Ableiter und ihre Dicke. Für die Leistungsvariante sollen jeweils zwei Ableiter auf Anoden- und Kathodenseite verwendet werden, um den Stromfluss auch bei höheren Bedarfsleistungen gleichmäßig zur Verfügung stellen zu können. In diesem Zug werden auch die Dicken der Ableiter angepasst, sodass keine unnötige Wärmeentwicklung im Bereich des Wickels entsteht.

Neben diesen einfach umsetzbaren Ausprägungen bekommt die Leistungsquelle eine Ableiterkühlung, die über und unter dem Wickel platziert wird. Während das zweite Bauteil des CIDs im oberen Bereich zu einem Behältnis für die Kühlflüssigkeit modifiziert wird, erhält die Zelle unterhalb des Wickels ein zusätzliches Bauteil, das die Kühlflüssigkeit in sich aufnimmt. Um einen kontinuierlichen Kühlmittelfluss zu gewährleisten, wird der hohle Dorn des Wickels zu

einer zweigeteilten Kapillare umfunktioniert, welche beide Kühlbehältnisse miteinander verbindet. Die externe Zu- und Aufnahme erfolgt über den Boden des Gehäusebechers. Diese Form der Kühlung weicht stark vom Standarddesign ab und konnte in keiner der betrachteten Zellen aus der Wettbewerberanalyse identifiziert werden. Trotzdem soll diese Ausprägung konstruktiv umgesetzt werden, um zu prüfen, ob ein solcher Zellaufbau möglich ist und welche Schwierigkeiten dabei auftreten können.

Mit dem Abschluss der Konzeptionsphase gehen der Produktstrukturplan und die drei Zellkonzepte der Sicherheits-, Energie- und Leistungsvariante als Erzeugnisse in die Entwurfsphase über. Mithilfe der festgelegten Ausprägungen und anhand der Bedingungen der Anforderungsliste werden im nächsten Kapitel digitale Konstruktionsmodelle der Zellen entstehen, welche daraufhin simulativ geprüft und anhand ihrer Schwächen punktuell angepasst werden.

5 Konstruktions-/Entwurfsphase der Li-Ionen-Rundzelle

Dieses Kapitel behandelt mit der Konstruktion und Modellierung der Zellbauteile einen der Schwerpunkte dieser Arbeit. Mithilfe der Ergebnisse aus der Planungsphase in Kapitel 3 und den konzeptionellen Erkenntnissen des Kapitels 4 sollen in einem ersten Schritt zunächst vorläufige Konstruktionsentwürfe entstehen. Auf Basis dieser computergestützten Konstruktionsmodelle (CAD-Modelle) werden in Kapitel 5.2.1 schwerpunktmaßige Belastungs- und Flusssimulationen durchgeführt. Ziel dieser Simulationsansätze ist es, Schwachstellen und kritische Bereiche an den Bauteilmustern zu identifizieren. In Kapitel 5.2.2 werden die validierten Simulationsergebnisse auf die Bauteilmuster umgelegt, sodass am Ende der Konstruktionsphase ein überarbeiteter Konstruktionsentwurf vorliegt, welcher im weiteren Verlauf des Produktentstehungsprozesses für die Ausarbeitung erster physischer Prototypen herangezogen werden kann.

5.1 Vorläufiger Konstruktionsentwurf

Kapitel 5.1 skizziert den Prozess der Entstehung vorläufiger Konstruktionsmodelle. Unter Zu-hilfenahme einer CAD-Software lassen sich 2D- und 3D-Modelle der einzelnen Bauteile erstellen. Durch parametrische Modellierungsansätze, wie die Verwendung von globalen Variablen, besteht die Möglichkeit, Bauteilmuster im Verlauf der Produktentstehung leicht anzupassen, was wiederum zur Verfeinerung des Produktreifegrads bei geringem zeitlichem Aufwand führt. Außerdem bietet das Zusammenführen von Bauteilen zu Baugruppen einen komfortablen Weg die Funktions- und Geometrieschnittstellen einzelner Bauteile zu überprüfen.

Die Eingangsgrößen für diesen Prozess sind in den folgenden Stichpunkten aufgeführt:

- Produktanforderungsliste auf Basis der Wettbewerberanalyse und DSM aus Kapitel 3.3
- Ergebnisse des Produktstrukturplans und des Modularitätskonzepts aus Kapitel 4.1
- Ergebnis der Ausprägungsdefinition aus Kapitel 4.2

Die angestrebten Ausgangsgrößen dieses Prozessschritts umfassen die ausgearbeiteten CAD-Modelle der verschiedenen Variationsausprägungen sowie ihrer Zusammenführungen in Form von Baugruppen.

5.1.1 Entwurf der Sicherheitsvariante

Dieser Abschnitt beinhaltet die Konstruktion des in der Planungs- und Konzeptionsphase ausgearbeiteten Zellkonzepts für die Sicherheitsvariante. Dazu wird zuerst ein Überblick der Zellkonstruktion betrachtet, in welchem die neuen sicherheitsrelevanten Bauteile benannt und hervorgehoben werden. Im Anschluss wird auf die einzelnen Bauteile und die jeweilige Herangehensweise bei ihrer Konstruktion eingegangen. Bauteile, die im weiteren Verlauf bei der Energie- und Leistungszelle geringe bis keine Änderungen erfahren, werden bei den jeweiligen Varianten nur in Bezug auf ihre Änderungen thematisiert. Eine vollumfängliche Konstruktionsbeschreibung dieser Bauteile findet in diesem Kapitel statt.

Für einen übersichtlichen Einstieg in die Konstruktion der Sicherheitszelle zeigt Abbildung 5.1 in einem Querschnitt der auskonstruierten Sicherheitszelle alle wichtigen Sicherheitsaspekte, welche im Zuge des Zellentwurfs in die Konstruktion integriert wurden.

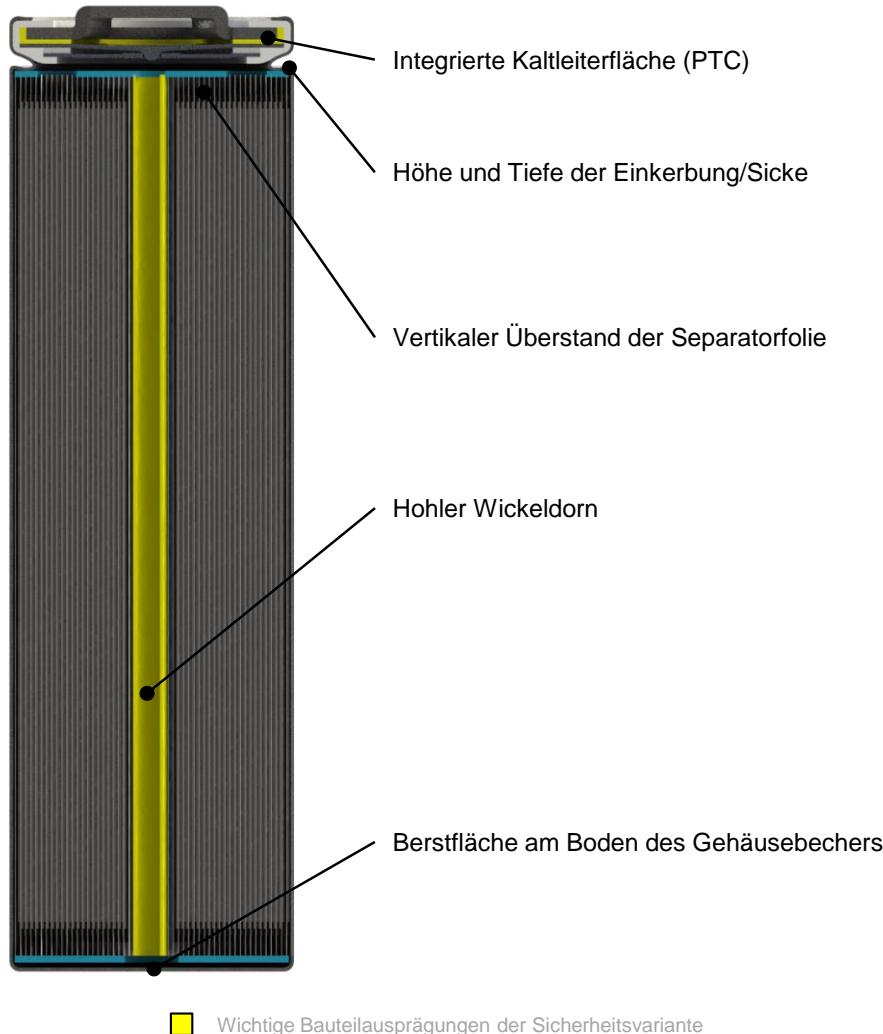


Abbildung 5.1: Übersicht der besonderen Merkmale der Sicherheitsvariante

Die dargestellten Bauteilausprägungen entstammen dem Sicherheitskonzept aus Kapitel 4.2.1, welches durch den morphologischen Kasten abgeleitet wurde. Die konstruktiven Details der gelb hinterlegten Bauteile sowie aller anderen Komponenten werden im weiteren Verlauf des Kapitels erläutert. In erster Linie sticht der eingekerbt Wickeldorn aufgrund seiner Position und Form in der Schnittdarstellung hervor. Außerdem ist das PTC-Element in der Kopfbaugruppe deutlich zu erkennen. Die weiteren Veränderungen sind schwerer ersichtlich. Sie werden aber bei der folgenden Besprechung der einzelnen Bauteilkonstruktionen aufgegriffen und beleuchtet.

Konstruktion des Elektrodenwickelung

Die zylindrisch gewickelten Elektroden bilden das Herz der 21700er-Rundzelle. Im beschichteten Aktivmaterial auf den Kathoden- und Anodenfolien laufen die chemischen Vorgänge zur Umwandlung und Speicherung der elektrischen Energie ab. Aus diesem Grund kommt dem

Wickel eine besondere Bedeutung für die Zellauslegung zu. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht auf der Zellchemie, sondern auf der Konzeption und Konstruktion der Gesamtzelle liegt, werden auch nur geometrische Aspekte und relevante Schnittstellen, wie die Positionierung der Ableiter, für die konstruktive Modellierung herangezogen.

Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben, besteht der Wickel aus Lagen von Aluminium- und Kupferfolien. Diese Folien bilden die Stromabnehmer der Kathode und Anode und sind, je nach Ausführung der Zelle, einseitig oder beidseitig beschichtet. Getrennt sind die beiden beschichteten Folien durch zwei Separatorfolien.

Auf Grundlage der Wettbewerberanalyse konnten für die wichtigsten Parameter der Wickelkonstruktion Wertintervalle in der Anforderungsliste festgelegt werden. Weitere Parameterwerte entstammen wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Tabelle 5.1 zeigt die Wickelpараметer und ihre Datengrundlage. Folien- und Beschichtungsdicken wurden den Angaben der Literatur in Kapitel 2.2.4 entnommen und betragen bei allen Ausprägungen 15 µm für die Kathoden- und Anodenfolie sowie 20 µm für die Separatorfolie. Die Beschichtungsdicken wurden pauschal für die Innenbeschichtung mit 70 µm und für die Außenbeschichtung mit 80 µm veranschlagt.

Tabelle 5.1: Konstruktive Wickelparameter der Sicherheitsvariante

Parameter	Datengrundlage	Intervall	Festlegung
Separatorhöhe	Kapitel 3.3	64,98 – 65,5 mm	65 mm
Kathodenfolienhöhe	Kapitel 3.3	62,0 – 64,4 mm	62 mm
Anodenfolienhöhe	Kapitel 3.3	63,0 – 64,9 mm	63 mm
Wickeldurchmesser	–	abh. vom Gehäuse	20,5 mm
Kerndurchmesser	Kapitel 2.2.4	1 – 2 mm	2 mm

Die in Tabelle 5.1 aufgeführten Parameter wurden als globale Variablen im Konstruktionsmodell hinterlegt. Die festgelegten Werte in der letzten Spalte der Tabelle können so bei einer Zusammenführung mit anderen Bauteilen noch angepasst werden. Das hinterlegte Intervall basiert auf den Ergebnissen der Wettbewerberanalyse und wurde als Randbedingung in der Anforderungsliste definiert. Der Wickeldurchmesser richtet sich nach dem Außendurchmesser und der Wanddicke des Gehäusebechers. Für eine 21700er-Zelle wird mit einem Außendurchmesser von 21 mm gerechnet. Davon sind die Wanddicken abzuziehen, welche jeweils 0,25 mm betragen und bei der Konstruktion des Gehäusebechers definiert wurden.

Zur Darstellung der aufgewickelten Folien wurde im CAD-Modell näherungsweise die archimedische Spirale verwendet, welche in der Forschung vielfach als Ersatzmodell für den Wickel in zylindrischen Zellen herangezogen wird. Der formeltechnische Ansatz und die Überführung der Koordinaten aus dem Polarkoordinatensystem in die Parameterdarstellung des kartesischen Koordinatensystems ist in Kapitel 2.2.4 beschrieben. Da sowohl für jede Folie als auch für jede Beschichtungsschicht eine eigene, angepasste Spirale benötigt wurde, belief sich die Anzahl der individuellen archimedischen Spiralen auf acht Stück für die einfache Darstellung.

Abbildung 5.2 zeigt unter dem Punkt „Spiralkonstruktion“ die Spiranordnungen in absteigender Reihenfolge. Unter Berücksichtigung der Anzahl und Position der Ableiter können weitere Beschichtungsspiralen hinzukommen, sodass eine Spirale bis zum Ableiter verläuft und nach einem unbeschichteten Bereich für den jeweiligen Ableiter durch eine neue Spirale fortgeführt wird.

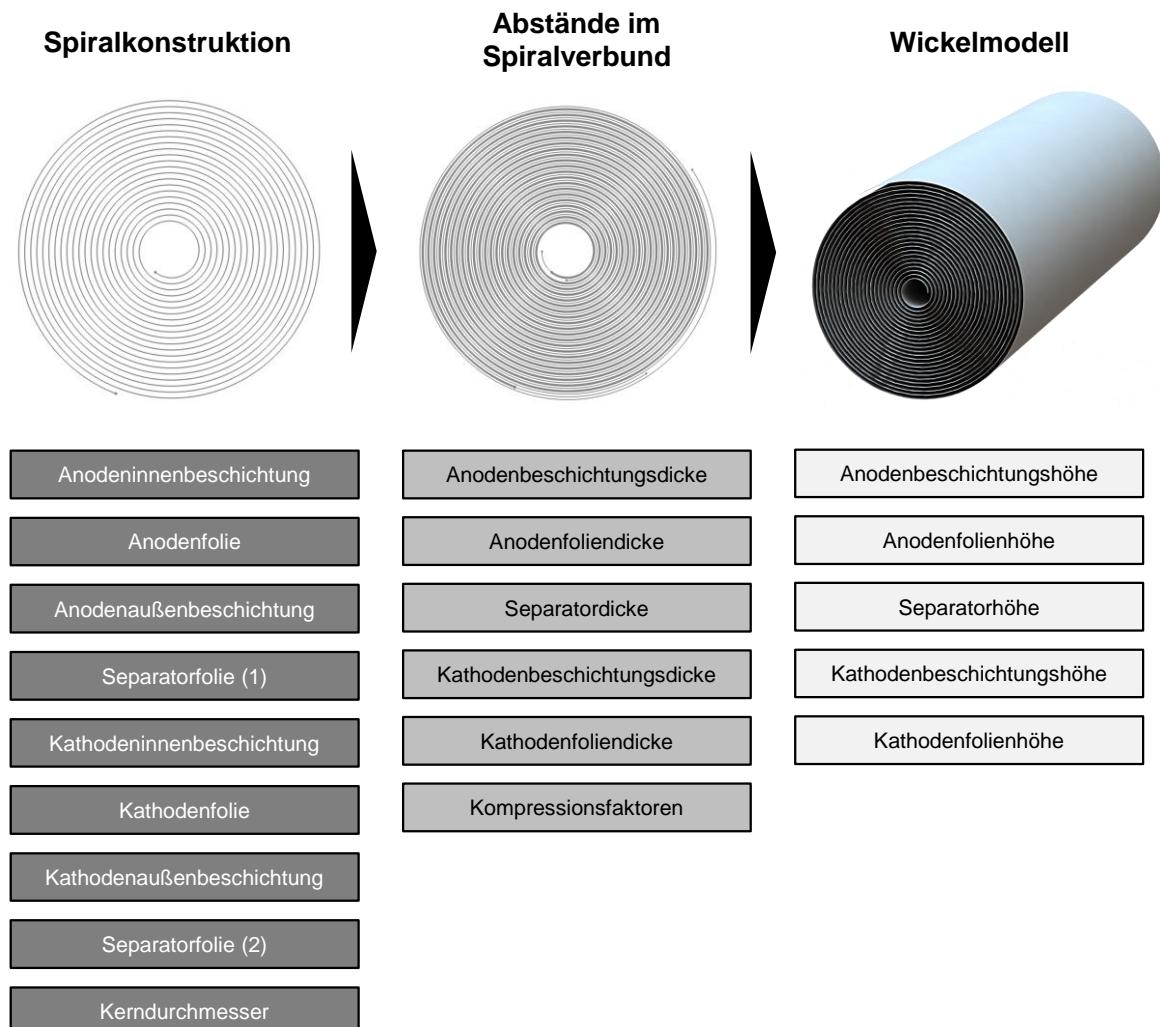


Abbildung 5.2: Eckpunkte der Wickelkonstruktion

Die Gleichungen der X- und Y-Parameter der jeweiligen Spiralen unterscheiden sich aufgrund ihres Versatzes und der dadurch entstehenden neuen Position. Der Versatz bestimmt sich über den Kernradius kumuliert mit den jeweiligen Folien- und Beschichtungsdicken. Gleichungen (18) bis (23) zeigen den konkreten Aufbau der Parameterdarstellung für die Anode.

Innenbeschichtung der Anodenfolie:

$$x(t) = \left(R_{Kern} + d_{AB,innen} * \frac{w_{KF,Anode}}{2} + \frac{d_W}{2\pi} * t \right) * \cos(t) \quad (18)$$

$$y(t) = \left(R_{Kern} + d_{AB,innen} * \frac{w_{KF,Anode}}{2} + \frac{d_W}{2\pi} * t \right) * \sin(t) \quad (19)$$

Anodenfolie:

$$x(t) = \left(R_{Kern} + d_{AB,innen} * w_{KF,Anode} + \frac{d_{AF}}{2} + \frac{d_W}{2\pi} * t \right) * \cos(t) \quad (20)$$

$$y(t) = \left(R_{Kern} + d_{AB,innen} * w_{KF,Anode} + \frac{d_{AF}}{2} + \frac{d_W}{2\pi} * t \right) * \sin(t) \quad (21)$$

Außenbeschichtung der Anodenfolie:

$$\begin{aligned} x(t) = & \left(R_{Kern} + d_{AB,innen} * w_{KF,Anode} + d_{AF} + d_{AB,außen} * \frac{w_{KF,Anode}}{2} \right. \\ & \left. + \frac{d_W}{2\pi} * t \right) * \cos(t) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} y(t) = & \left(R_{Kern} + d_{AB,innen} * w_{KF,Anode} + d_{AF} + d_{AB,außen} * \frac{w_{KF,Anode}}{2} \right. \\ & \left. + \frac{d_W}{2\pi} * t \right) * \sin(t) \end{aligned} \quad (23)$$

R_{Kern} = Kernradius

$d_{AB,innen}$ = Innenbeschichtungsdicke der Anodenfolie

$d_{AB,außen}$ = Außenbeschichtungsdicke der Anodenfolie

d_{AF} = Anodenfoliendicke

d_W = Windungsdicke

$w_{KF,Anode}$ = Kompressionsfaktor der Anodenbeschichtung

Mit Bezug auf die allgemeinen Gleichungen (12) und (14) aus Kapitel 2.2.4 lässt sich feststellen, dass mit jeder weiteren Spirale der initiale Radius um die halbe Dicke der vorherigen Lage sowie die halbe Dicke der neu hinzugekommenen Lage erweitert wird. Dies geschieht, damit die jeweilige Spirale im Kern als Pfad für die Extrusion des Wickelkörpers dienen kann.

Das Wickelmodell bringt auch Einschränkungen mit sich. Die statische Darstellung bietet, mit Ausnahme des Kompressionsfaktors der Beschichtungen, keine Möglichkeiten, um Volumenänderungen durch dynamische Prozesse adäquat zu modellieren. Solche Prozesse können zum Beispiel Lade- und Entladevorgänge, die Elektrolytbefüllung und Pressung des Wickels darstellen.

Konstruktion des eingekerbten Wickeldorns

Die Konstruktion des Wickeldorns orientiert sich stark an den Parametern der Wickelung. Dabei übernimmt der Wickel wesentliche Sicherheitsfunktionen in der Zelle. Neben seinen stabilisierenden Eigenschaften wirkt sich der Aufbau des Wickeldorns auf die Druckverteilung innerhalb der Zelle aus.

Die wichtigsten Parameter des Wickeldorns sind der Durchmesser, die Länge sowie die Wandungsdicke. Da keine der betrachteten Zellen aus der Wettbewerberanalyse einen Wickeldorn besaß, wurden für die Konstruktion Informationen aus Kapitel 2.2.4 zum Aufbau und Funktionsweise des Dorns verwendet. In Tabelle 5.2 sind die Informationen der Basisparameter des Wickeldorns für die Sicherheitsvariante eingetragen.

Tabelle 5.2: Konstruktive Parameter des Wickeldorns der Sicherheitszelle

Parameter	Datengrundlage	Intervall	Festlegung
Wickeldornhöhe	–	abh. vom Wickel	65 mm
Außendurchmesser	–	abh. vom Wickel	2 mm
Wanddicke	Kapitel 2.2.4	–	0,3 mm

In der Literatur werden für die Lithium-Ionen-Rundzelle verschiedene Varianten des Wickeldorns thematisiert. Aus den Erläuterungen rund um die verschiedenen Ausprägungsformen der Abbildung 2.15 geht hervor, dass ein hohler Wickeldorn mit einer längsverlaufenden Einkerbung die meisten Sicherheitseigenschaften mit sich bringt. Entsprechend dieser Erkenntnisse wurde für die Sicherheitsvariante der Lithium-Ionen-Rundzelle ein solcher Wickeldorn auskonstruiert und in den Wickel eingebbracht. Abbildung 5.3 zeigt diesen Konstruktionsansatz zusammen mit der zentralen Funktionsweise der Einkerbung.

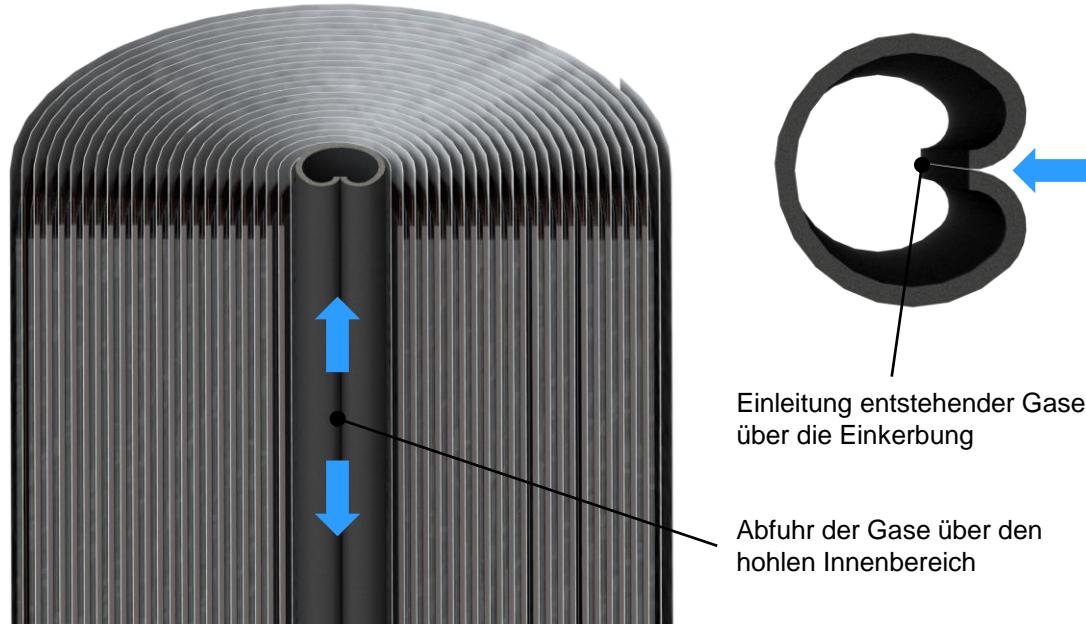


Abbildung 5.3: Konstruktive Auslegung des Wickeldorns der Sicherheitszelle

Die Einkerbung, welche längs entlang der gesamten Höhe verläuft, dient dazu, den durch Lade- und Entladevorgänge entstehenden Gasen innerhalb des Wickels eine Möglichkeit zum Entweichen zu bieten. Nachdem die Gase durch die Einkerbung in das Innere des Dorns gelangt sind, können sie über den hohlen Innenbereich nach oben oder unten in das Gehäuse abgeführt werden. Dadurch verteilt sich der Druck gleichmäßig in der Zelle und die druckabhängigen Sicherheitsvorkehrungen, wie z.B. das CID oder die Berstflächen, können ihre Aufgabe erfüllen. Wenn die Gase nicht ordnungsgemäß abgeführt werden, besteht immer die Gefahr, dass sich Hohlräume mit hohen Drücken entwickeln und den Wickel oder die Gehäusewände durch den ansteigenden Gasdruck beschädigen. Deshalb bildet der eingekernte,

hohle Wickeldorn die beste Alternative für die Sicherheitszelle. Die Konstruktion der Einkerbung führt zu einem Erscheinungsbild wie in Abbildung 5.3.

Konstruktion des Gehäusebechers

Der Gehäusebecher definiert im weitesten Sinne die äußereren Grenzen der 21700er Rundzellenkonstruktion. Seine Schutzeigenschaften in Bezug auf äußere Einflüsse und die mechanische Stabilität wurden in Kapitel 2.2.4 hinreichend erläutert.

Für die Auslegung der Sicherheitsvariante wurden über den morphologischen Kasten in Kapitel 4.2 mehrere Merkmale definiert, welche den Gehäusebecher in seiner Konstruktion beeinflussen. Diese finden sich in den folgenden Punkten noch einmal aufgelistet:

- Höhe, Tiefe und Winkel der Sicke am Gehäusebecher
- Dicke des Gehäusebodens
- Berstfläche am Boden des Gehäusebechters

Wie bereits im Fall der Wickelkonstruktion stellte die Anforderungsliste Intervalle für die Parameterwerte der Gehäusebecherkonstruktion. Diese sind in Tabelle 5.3 zusammen mit den festgelegten Werten in der letzten Spalte aufgeführt.

Tabelle 5.3: Konstruktive Gehäuseparameter der Sicherheitsvariante

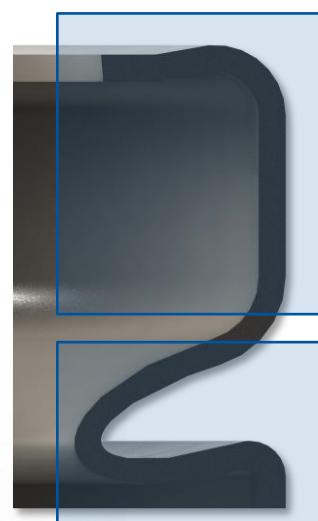
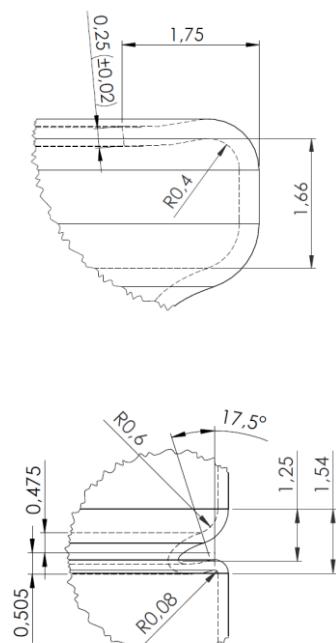
Parameter	Datengrundlage	Intervall	Festlegung
Becherhöhe	Kapitel 3.3	70,05 – 70,51 mm	70,5 mm
Becherdurchmesser	Kapitel 3.3	20,92 – 21,13 mm	21,0 mm
Wanddicke	Kapitel 3.3	0,23 – 0,3 mm	0,25 mm
Bodendicke	–	abh. von Wanddicke	0,3 mm
Höhe der Sicke am Becher	Kapitel 3.3	66,5 – 67,28 mm	67,2 mm
Sickenhöhe	Kapitel 2.2.4	abh. von Kopfbaugruppe	0,7 mm
Sickentiefe	Kapitel 3.3	1,55 – 2,1 mm	1,9 mm

Hohe Relevanz für die Sicherheitszelle haben insbesondere die Wand- und Bodenwerte des Edelstahlbecher sowie alle zur Definition notwendigen Werte der Sicke. Das Konzept der Sicherheitsvariante aus Kapitel 4.2.1 sah erhöhte Höhen- und Tiefenwerte und eine angewinkelte Ausrichtung der Sicke vor. Diese mussten bei der Konstruktion berücksichtigt werden. Außerdem war die Form und Position der Kopfbaugruppe für die Höhe der Sicke am Gehäusebecher und die Höhe der Sicke selbst einzukalkulieren.

Abbildung 5.4 zeigt den auskonstruierten Edelstahlbecher mitsamt der berücksichtigten Werte für die Sicke. Die dreiteilige Darstellung illustriert den Detailgrad, welcher die Konstruktion des Bechers hauptsächlich im Bereich der Sicke mit sich bringt. Dazu wird zuerst das Gesamtergebnis in Form einer Schnittansicht (A) dargestellt. Eine Detailansicht (B) liefert eine hochauf-

lösende Darstellung der Umstülpung des Bechers sowie der Geometrie der Sicke. Abschließend zeigt die Skizzenansicht (C) einen nochmals gesteigerten Detaillierungsgrad des Gehäusebechers, indem Ausschnitte der technischen Zeichnungen für die Bereiche der Detailansicht zusammen mit den jeweiligen Abmessungen für die Sicherheitszelle abgebildet sind. Daraus ist ersichtlich, dass für den Winkel der Sicke ein Wert von $17,5^\circ$ festgelegt wurde. Auch dieser Wert ist durch eine globale Variable hinterlegt und musste bei der Zusammenführung mit der Kopfbaugruppe, dem Wickel, den Ableitern und dem Abstandshalter austariert werden.

Auch wenn das CAD-Modell des Gehäusebechers so nah wie möglich an den späteren, konstruktiven Aufbau angelehnt werden sollte, sind im weiteren Verlauf der Erstellung physischer Prototypen die Kraftauswirkungen des Fertigungsprozesses auf die Sicke sowie die Umstülpung zu prüfen, da die horizontalen und vertikalen Kräfte sowie die Positionierung und Fixierung des Edelstahlbechers maschinenabhängig von den optimalen Annahmen der Softwarebetrachtung abweichen können. Dieser Umstand kann es nötig machen, die Abmessungen im späteren Verlauf an die gegebenen Bedingungen anzupassen.

A. Schnittansicht**B. Detailansicht****C. Skizzenansicht****Abbildung 5.4: Konstruktion und Modellierung des Gehäusebechers**

Die Berstfläche auf der Unterseite des Edelstahlbechers zählt ebenfalls zu den Sicherheitsverbesserung am Gehäuse. Sie wird von außen auf die Unterseite des Bechers aufgetragen und hat den Zweck, eine vordefinierte, senkrechte Austrittsstelle bei einem unkontrollierten

Druckanstieg in der Zelle zu bieten. Dadurch wird die Zelle auf einer Seite vor einem horizontalen Hüllenbruch geschützt, der zu Kettenreaktionen im Batteriemodul führen könnte. Auf der anderen Seite dient die Berstfläche auch dem Schutz des Wickeldorns. Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben, besteht bei hohen Drücken die Gefahr, dass der Wickeldorn wie eine Pistolenpatrone aus dem Gehäuse katapultiert und so zu einem unberechenbaren Geschoss wird. Diese Sollbruchstelle verhindert das Erreichen eines solchen Drucks.

Konstruktion der Kopfbaugruppe

Die Kopfbaugruppe besteht aus einer Anzahl an geometrisch aufeinander abgestimmten Bauteilen, welche sowohl Betriebs- als auch Sicherheitsfunktionen übernehmen. Sie ist aufgebaut aus dem positiven Terminal, den beiden Bauteilen des CIDs und einer umschließenden Dichtung, welche die Bauteile vom Edelstahlbecher des Gehäuses abschirmt und die Zelle nach außen abdichtet.

Abbildung 5.5 zeigt sowohl den Aufbau der gesamten Kopfbaugruppe innerhalb der Zelle als auch die Strukturen der einzelnen Bauteile. Für die Sicherheitszelle wurde über den morphologischen Kasten festgelegt, dass zusätzlich zum bereits vorhandenen CID ein Kaltleiter-Widerstand (PTC) verbaut werden soll. Dieser wurde zwischen dem CID und dem positiven Terminal positioniert, sodass er bei steigenden Temperaturen seiner Sicherheitsfunktion nachkommen kann. Das PTC bildet temperaturabhängig einen Widerstand aus, welcher den Stromkreislauf bei zu hohen Temperaturen unterbricht.

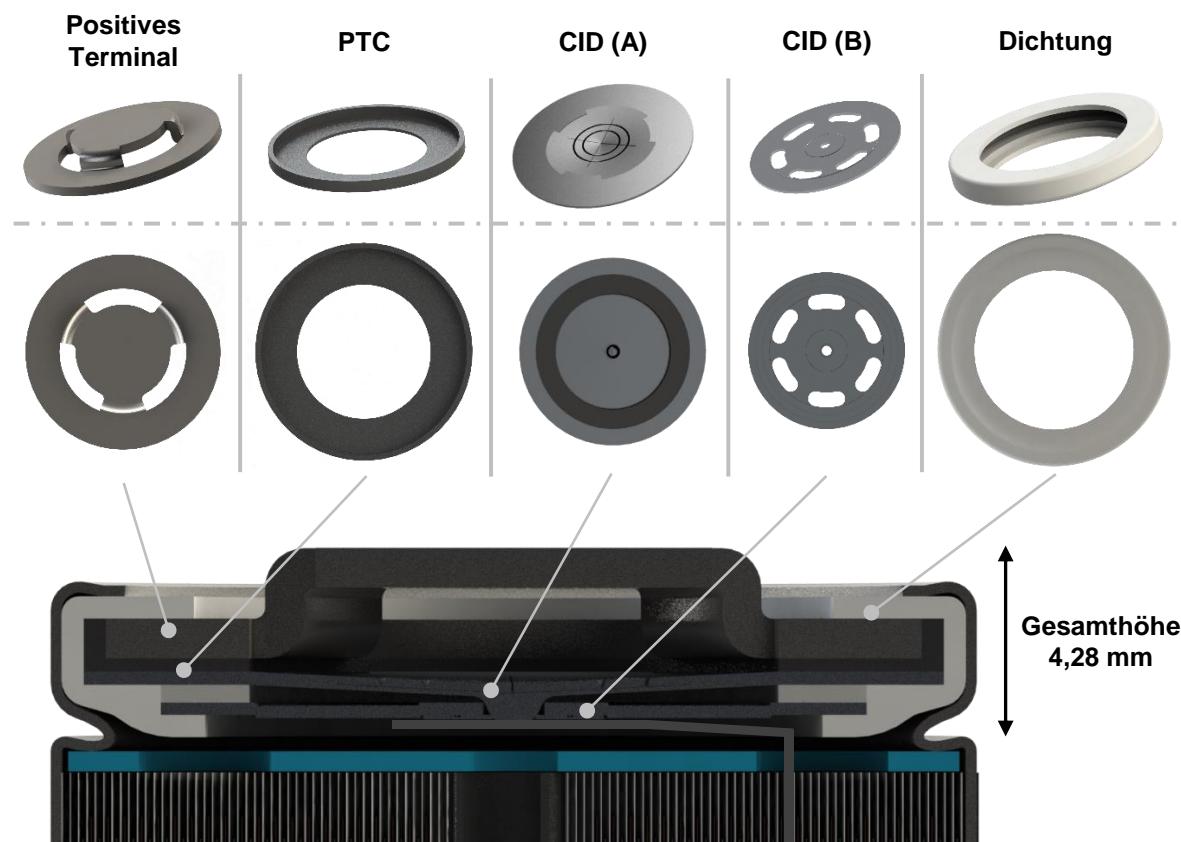


Abbildung 5.5: Bauteilübersicht der Kopfbaugruppe für die Sicherheitszelle

Die Vielzahl an geometrischen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Bauteilen der Kopfbaugruppe untereinander und zu ihren Schnittstellen am Gehäuse und dem Wickel erfordert einen hohen Abstimmungsaufwand. Die Auslegung der einzelnen Teile wird durch den geringen Bauraum und die minimalen Toleranzen nochmals erschwert. Einen Überblick über die Auswahl und Festlegung der wichtigsten konstruktiven Parameter für die Bauteile der Kopfbaugruppe liefert Tabelle 5.4.

Tabelle 5.4: Konstruktive Parameter der Bauteile der Kopfbaugruppe

	Parameter	Datengrundlage	Intervall	Festlegung
Pos. Terminal	Terminalhöhe	Kapitel 3.3	2,2 – 2,52 mm	2,5 mm
	Außendurchmesser	Kapitel 3.3	18,25 – 18,45 mm	18,45 mm
	Innendurchmesser (Kopf)	Kapitel 3.3	8,9 – 10,0 mm	9 mm
	Materialdicke	Kapitel 3.3	0,45 – 0,9 mm	0,9 mm
PTC	Höhe des PTC	–	abh. vom Terminal	1,2 mm
	Außendurchmesser	–	–	19,5 mm
	Innendurchmesser	–	–	12 mm
	Materialdicke	–	–	0,3 mm
CID (A)	Außendurchmesser	Kapitel 3.3	18,9 – 19,1 mm	19,5 mm
	Materialdicke	–	–	0,3 mm
	Dicke der Isolationsfläche	–	–	0,4 mm
CID (B)	Außendurchmesser	–	abh. vom CID (A)	16 mm
	Materialdicke	–	–	0,35 mm
Dichtung	Anzahl der Öffnungen	Kapitel 3.3	6 – 8	6
	Dichtungshöhe	–	abh. von restlicher Kopfbaugruppe	3,18 mm
	Außendurchmesser	–	abh. vom Gehäuse	20,5 mm
	Innendurchmesser (oben)	–	abh. vom Terminal	14,5 mm
	Innendurchmesser (unten)	–	abh. vom CID	14 mm

Während sich beim positiven Terminal und dem CID noch zum Großteil an den Ergebnissen der Teardown-Analyse aus Kapitel 3.1 und der Anforderungsliste aus Kapitel 3.3 orientiert werden konnte, wurde das PTC vollständig in Bezug auf den zur Verfügung stehenden Bauraum und die Bemaßungen der angrenzenden Bauteile definiert. Um die Kontaktfläche und die Auflagegenauigkeit des Terminals auf dem PTC zu optimieren, wurde der äußere Rand des PTCs angehoben. Die Dichtung ist aufgrund ihrer Funktion und Position fast vollständig abhängig von den Abmessungen der anderen Bauteile der Kopfbaugruppe sowie den Formen

des Gehäusebechers. Deshalb richten sich alle genannten Werte aus Tabelle 5.4 nach den jeweiligen Bezugsbauteilen.

Konstruktion der Ableiter und Abstandshalter

An der Schnittstelle zwischen Kopfbaugruppe und Wickel ist einer der beiden Abstandshalter und der Kathodenableiter platziert. Während der Kathodenableiter den Wickel mit dem CID verbindet, liegt der Abstandshalter des Pluspols auf dem Wickelzylinder auf und ist an den Außenseiten über die Sicke des Gehäusebechers fixiert. Die Kunststoffscheibe stabilisiert auf der einen Seite die Position des Wickels und verhindert auf der anderen Seite Kurzschlüsse durch unrechtmäßigen Kontakt der Anoden- bzw. Kathodenfolie.

Für die Konstruktion des Abstandshalters am Pluspol ist zu beachten, dass eine Ableiteröffnung und weitere Entlüftungsöffnungen für die aus dem Wickel austretenden Gase vorgesehen werden. Da der Anodenableiter im Fall der Sicherheitszelle ganz außen angeordnet ist, wird dieser am äußeren Rand des Abstandshalters am Minuspol vorbeigeführt. Es ist also keine zusätzliche Ableiteröffnung eingeplant. Abbildung 5.6 illustriert das Aussehen der beiden Abstandhalter für die Sicherheitsvariante der Lithium-Ionen-Zelle.

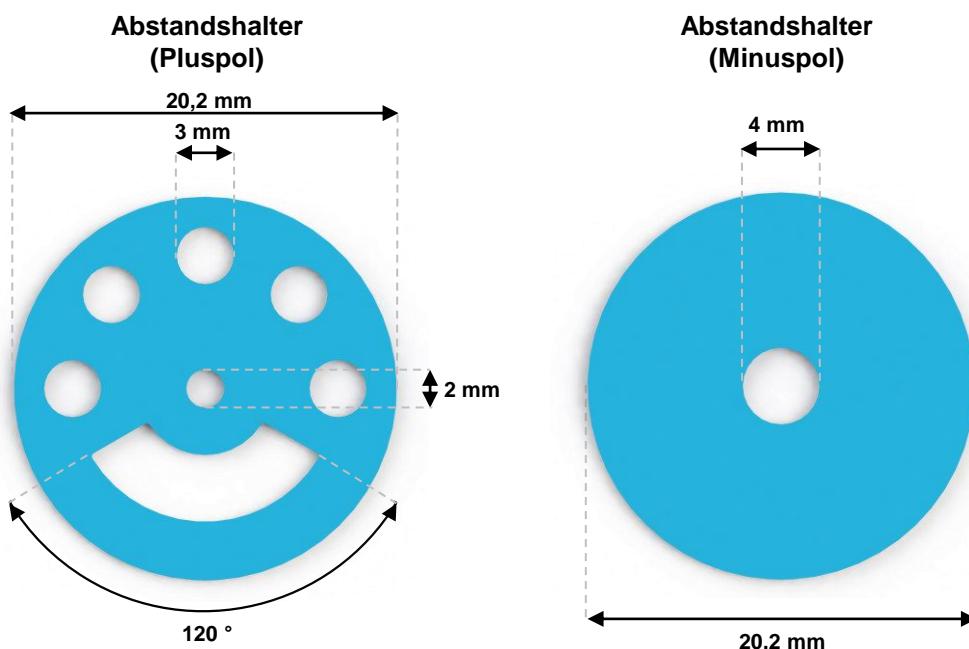


Abbildung 5.6: Aufbau der Abstandshalter für Plus- und Minuspol

Aus der Abbildung geht hervor, dass der Kathodenableiter mittig auf Länge des halben Radius im Wickel verortet ist, da hier die 120 ° große Öffnung vorgesehen wurde. Für die Dicke der Abstandhalter wurden, basierend auf dem Intervall der Anforderungsliste von 0,2 mm bis 0,55 mm, ein Wert von 0,45 mm festgelegt.

Die relevanten Maße für die beiden Ableiter finden sich in Tabelle 5.5 wieder. Dabei wurden für beide Ableiter die gleichen Abmessungen der drei wesentlichen Parameter gewählt.

Die Abmessungen der Ableiter können sich im weiteren Verlauf des Produktentwicklungsprozesses ändern, da eine Validierung der getroffenen Maße erst final mit Leistungstests physischer Prototypen vorgenommen werden kann.

Insgesamt orientiert sich die Sicherheitszelle vom grundsätzlichen Aufbau sehr stark an den betrachteten Wettbewerberzellen. Die größten Veränderungen durch den Einsatz eines Wickeldorns und der Platzierung eines Kaltleiter-Widerstands (PTC) in der Kopfbaugruppe erfordern keine radikalen Anpassungen in Bezug auf den Fertigungsprozess oder die Struktur der Zelle.

Tabelle 5.5: Konstruktive Parameter der Kathoden- und Anodenableiter

Parameter	Datengrundlage	Intervall	Festlegung
Breite (Anodenableiter)	Kapitel 3.3	3 – 6,5 mm	4 mm
Dicke (Anodenableiter)	Kapitel 3.3	0,13 – 0,2 mm	0,2 mm
Beschichtungsabstand (Anodenableiter)	Kapitel 3.3	3 – 11 mm	5 mm
Breite (Kathodenableiter)	Kapitel 3.3	3 – 6,5 mm	4 mm
Dicke (Kathodenableiter)	Kapitel 3.3	0,12 – 0,2 mm	0,2 mm
Beschichtungsabstand (Kathodenableiter)	Kapitel 3.3	2,5 – 7 mm	5 mm

Das PTC stellt aus sicherheitstechnischer Sicht eine deutliche Verbesserung dar, kann jedoch in Fahrzeuganwendungen aufgrund des spannungsabhängigen Varistoreffekts, welcher in Kapitel 2.2.4 beschrieben ist, zu Problemen und Sicherheitsrisiken führen. Auch hier müssen abschließende physische Testszenarien herangezogen werden, um den Nutzen oder die Risiken richtig einschätzen zu können.

5.1.2 Entwurf der Energievariante

In diesem Kapitel werden der konstruktive Aufbau und die Ausarbeitung der Energiezelle behandelt. Wie der Name schon vermuten lässt, besteht das Ziel dieser Variante darin, die Zelle so zu gestalten, dass der Energiegehalt maximiert wird. Da diese Arbeit nur konzeptionelle und konstruktive Merkmale behandelt und die zellchemischen Eigenschaften der Beschichtung als gegeben betrachtet werden, bietet sich nur eine Möglichkeit, die Energiedichte der Zelle zu beeinflussen. Diese Möglichkeit liegt in der Maximierung der beschichteten Wickelfläche und damit in der Vergrößerung des Wickelvolumens.

Wie auch schon bei der Sicherheitszelle wurden in Kapitel 4.2 Ausprägungen festgelegt, welche in der nun folgenden Konstruktion umgesetzt werden. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass nur signifikante Änderungen und neue Bauteile im Vergleich zur Sicherheitsvariante beschrieben werden. Bei unveränderten Bauteilen und minimalen Abänderungen wird auf die Beschreibung des Kapitels 5.1.1 verwiesen.

Um das Wickelvolumen in einem relevanten Ausmaß zu vergrößern, bedarf es einiger unkonventioneller Herangehensweisen, da die geringen Toleranzen und kompakten Bauteilabmessungen nur wenig Spielraum für Bauraumgewinnung lassen. Von außen ist die Zelle durch den 21700er-Standard limitiert, sodass auch eine Verlagerung der Bauteile nicht möglich ist. Was schlussendlich bleibt, sind minimale Potentiale in einzelnen Bauteilen, die durch ihre kumulative Wirkung zusammen eine relevante Gewinnung von Bauraum ermöglichen.

Abbildung 5.7 zeigt vorab alle besonderen Änderungen in Form einer grafischen Schnittansicht der Energiezelle. Die radikalsten Konstruktionsänderungen im Vergleich zur Sicherheitsvariante stellen die Kopfbaugruppe und der Gehäusebecher dar. Innerhalb der Kopfbaugruppe wurde das positive Terminal mit dem CID zu einem zusammenhängenden Bauteil verschmolzen. Darüber hinaus musste der Abstandshalter angepasst werden, um eine Auflagefläche für die Kopfbaugruppe zu bieten. Dieser Umstand war nötig, weil bei der Energievariante die Sicke entfernt wurde. Dieser sicherheitskritische Schritt bot das größte Bauraumgewinnungspotential.

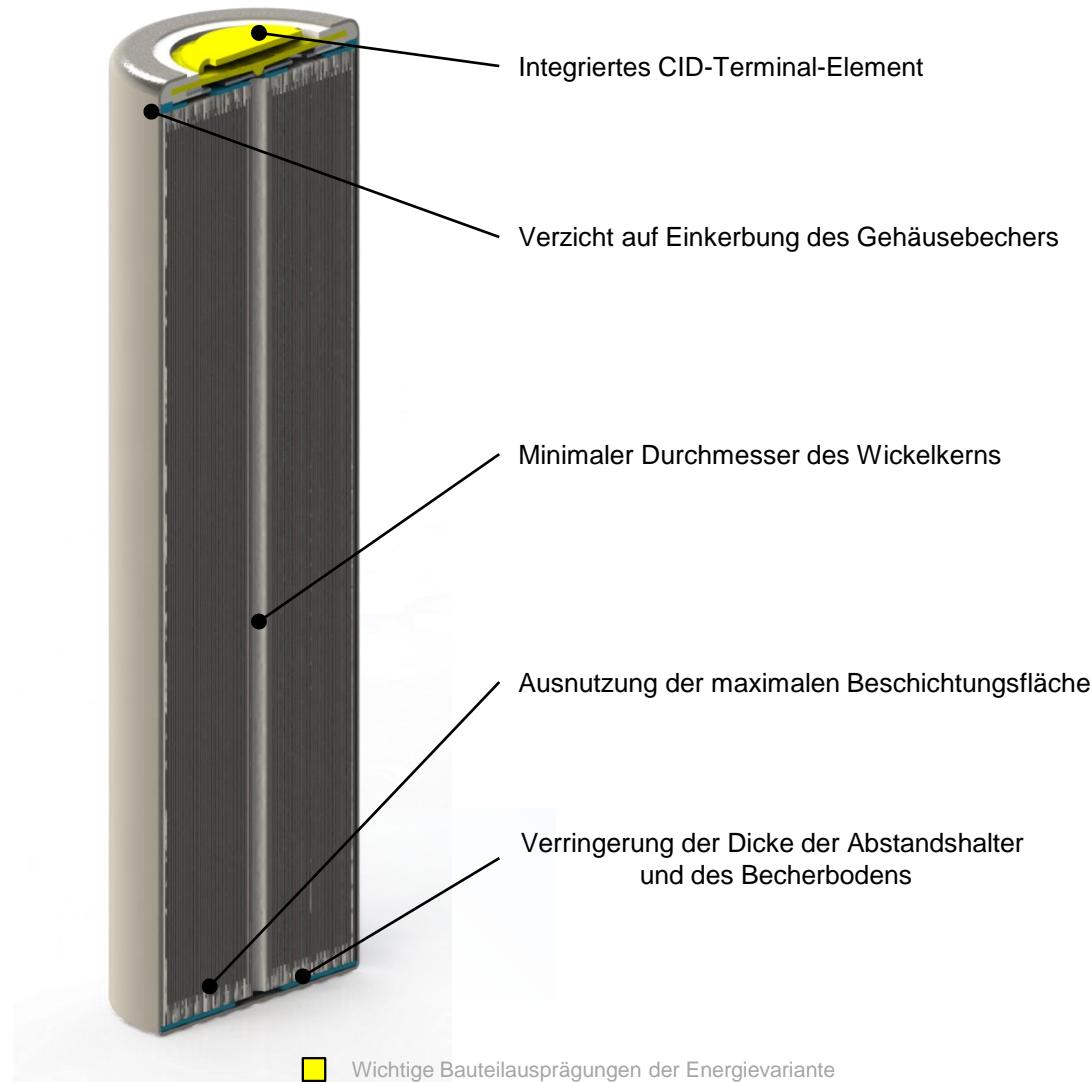


Abbildung 5.7: Übersicht der besonderen Merkmale der Energievariante

Weitere Änderungen besitzt die Energiezelle am Wickel. Hier wurde auf einer Seite der Kerndurchmesser des Wickels verringert, was zu einer minimalen Vergrößerung der Windungsanzahl führte. Auf der anderen Seite wurden die Aluminium- und Kupferfolien der Kathode und Anode vollständig, mit Verzicht auf einen Beschichtungsabstand an den Rändern, beschichtet. Abschließend wurden ebenfalls die Dicken der Abstandshalter sowie des Becherbodens reduziert.

Konstruktion des integrierten CID-Terminal-Bauteils

Das integrierte CID-Terminal-Bauteil spiegelt eines der zentral Höheneinsparungspotentiale der Energiezelle wider. In Standardzellen und auch bei den Zellen der Wettbewerberanalyse liegt das Terminal auf dem CID auf oder wird von diesem im äußeren Bereich des Aufstandsringes umschlossen. Insbesondere bei der zweiten Variante entsteht so ein ausgeprägter Außenring. Durch die Kombination der beiden Bauteile lässt sich dieser Umstand vermeiden und die Gesamtdicke reduziert sich um die Dicke des CIDs (Element A). Abbildung 5.8 zeigt die daraus entstehende Konstruktion innerhalb der Kopfbaugruppe. Durch diese konstruktive Veränderung entstehen keine funktionalen Nachteile. Lediglich die Materialauswahl ist bezüglich der Berstfähigkeit und Beweglichkeit des CID-Teilbereichs in späteren Versuchen zu überprüfen.

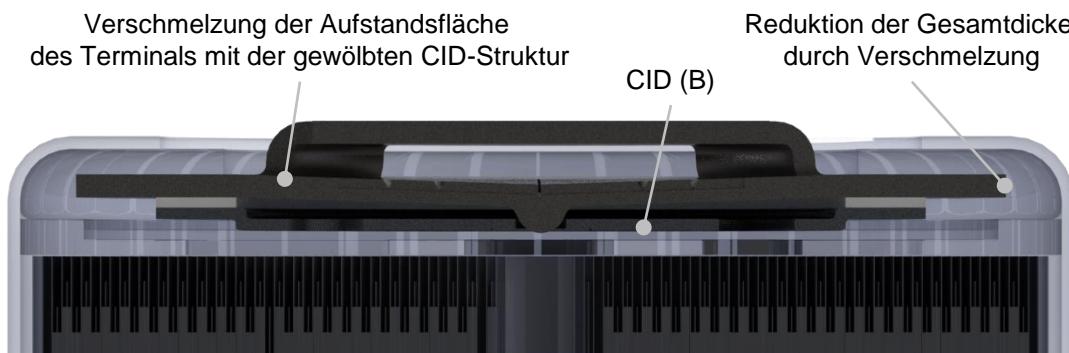


Abbildung 5.8: Hervorgehobene Ansicht der integrierten CID-Terminal-Konstruktion

Neben der Integration als offensichtliche konstruktive Änderung der Kopfbaugruppe wurden ebenfalls die Materialdicke des Terminals sowie die Höhe des Aufstandsbereichs reduziert. Die festgelegten Parameter finden sich in Tabelle 5.6 wieder. Sie beruhen auf den Randbedingungen der Anforderungsliste und den Ergebnissen der Literaturoauswertung.

Auffällige Werte der Tabelle stellen die Dicke des Außenrings sowie die Gesamthöhe des integrierten Bauteils dar. Als Vorlage für diese deutliche Reduzierung im Vergleich zum Terminal der Sicherheitsvariante diente die Zelle von LG Chem aus der Wettbewerberanalyse. Besonders ihre Terminalparameter bilden in den Randbedingungen der Tabelle 5.6 häufig die untere Schranke. So war es möglich, neben den konstruktiven Einsparungen der Integration, zusätzliche Ersparnisse in den Materialdicken zu generieren.

Tabelle 5.6: Konstruktive Parameter des integrierten CID-Terminal-Bauteils

Parameter	Datengrundlage	Intervall	Festlegung
Außendurchmesser	Kapitel 3.3	18,25 – 18,45 mm	18,3 mm
Durchmesser der Aufstandsfläche	Kapitel 3.3	8,9 – 10 mm	9 mm
Dicke des Außenrings	Kapitel 3.3	0,45 – 0,9 mm	0,45 mm
Gesamthöhe	–	–	1,7 mm
Innendurchmesser der Isolationsschicht	–	–	12 mm
Außendurchmesser der Isolationsschicht	–	–	15,15 mm

Konstruktion des Gehäusebechers

Neben der Anpassung der Kopfbaugruppe besitzt die Modifikation des Gehäuses das größte Einsparungspotential in Bezug auf den freigelegten Bauraum. Die Bewertung durch den morphologischen Kasten aus Kapitel 4.2 setzt fest, dass bei der Konstruktion des Gehäusebechers auf die Sicke verzichtet werden soll. Die gleichzeitig schlechte Bewertung dieser Ausprägung im Bereich der Sicherheit suggeriert jedoch, dass diese radikale Änderung mit deutlichen Sicherheitseinbußen einhergeht. Wie in Kapitel 2.2.4 und 5.1.1 beschrieben, handelt es sich bei der Sicke nicht nur um eine stabilisierendes Merkmal der Zelle. Gleichzeitig werden zahlreiche Sicherheitsfunktionen durch die Sicke abgedeckt, welche beispielsweise bei Druckentwicklung innerhalb der Zelle zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund müssen physische Prototypentests im Verlauf der Entwicklung zeigen, ob gängige Sicherheitsstandards eingehalten werden.

Abbildung 5.9 verdeutlicht das Einsparungspotential, das aus den Änderungen der Kopfbaugruppe zusammen mit dem Verzicht auf die Sicke hervorgeht. Bedingt durch diese Änderungen wurde der Abstandshalter mit einer Aufstandsfläche versehen, um dem Ableiter einen minimalen Raum an der Unterseite des CIDs (Element B) zu gewähren. Zugleich erfolgten ebenfalls Anpassungen an der Dichtung, damit diese den neuen Anforderungen gerecht wird.

Die 2,5 mm an freigewordenem Bauraum stellen dabei nur einen Teil des Gesamtvolumens dar, welches am Ende durch alle Maßnahmen erzielt wurde. Allein dieser Wert bildet aber etwa 3,5 % des gesamten Zellvolumens ab.

Zusätzlich zur Änderung im Bereich der Sicke wurde die Dicke des Gehäusebodens auf die Dicke der Wandung angepasst, was eine Einsparung von 0,05 mm ergab.

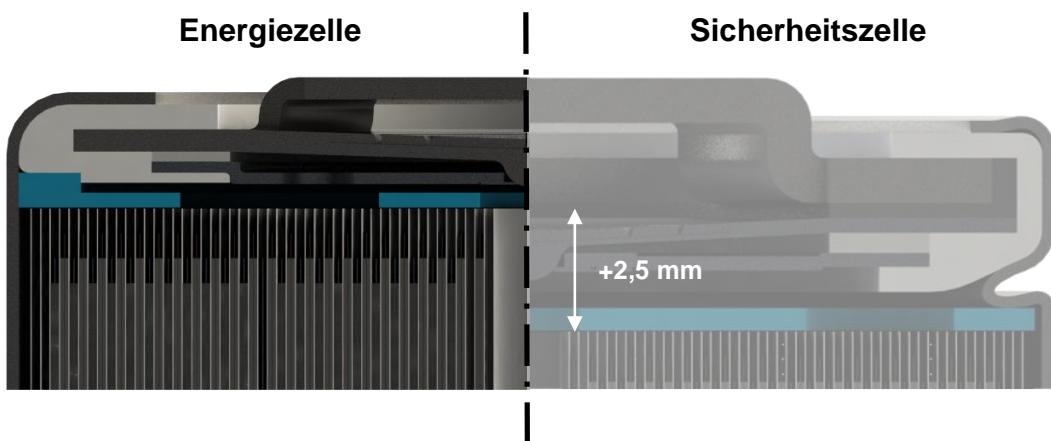


Abbildung 5.9: Designbedingtes Einsparungspotential der Energiezelle

Wickelung und Abstandshalter

Die Ausprägungen im Bereich des Wickels sahen eine Anpassung des Kerndurchmessers sowie des Beschichtungsabstands vor. Außerdem wurde die Dicke der Abstandhalter gemäß dem unteren Grenzbereich der Anforderungsliste reduziert. Alle festgelegten Werte sind in Tabelle 5.7 aufgelistet.

Tabelle 5.7: Konstruktive Parameter des Wickels und der Abstandshalter

Parameter	Datengrundlage	Intervall	Festlegung
Beschichtungsabstand	Kapitel 3.3	0 – 1 mm	0 mm
Kerndurchmesser	Kapitel 2.2.4	1 – 2 mm	1,2 mm
Materialdicke der Abstandhalter	Kapitel 3.3	0,2 – 0,55 mm	0,3 mm

Im Vergleich zur Sicherheitszelle ergeben sich durch die in der Tabelle festgelegten Werte eine gewonnene Beschichtungshöhe von 2,15 mm, welche sich aufteilt in zweimal 1 mm Beschichtungsfläche und eine reduzierte Materialdicke von 0,15 mm für den Abstandshalter am Boden der Zelle. Hinzu kommen noch die zusätzlichen Windungen durch den verkleinerten Kerndurchmesser.

Die Energiezelle kommt mit ihrem innovativen Design insgesamt auf eine freigewordene Höhe von 4,7 mm, welche für die Vergrößerung des Wickels und der darin enthaltenen beschichteten Folien dienen kann. Dies bedeutet einen Zuwachs der beschichteten Fläche im Bereich von etwa 6,7 % der Gesamthöhe (70 mm).

5.1.3 Entwurf der Leistungsvariante

Die Leistungs zelle bildet das radikalste Design der drei Zellkonzepte. Der Fokus dieser Variante liegt auf der Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch Anpassung und Veränderung des Aufbaus und der Bauteile. Die konstruktive Ausarbeitung der Leistungs zelle basiert, wie

auch schon bei den anderen beiden Varianten, auf dem morphologischen Kasten aus Kapitel 4.2 und den Randbedingungen der Anforderungsliste aus Kapitel 3.3.

Während bei der Energiezelle das Freilegen von Bauraum zur Vergrößerung des Wickelzyinders bei der Betrachtung der Bauteile die wichtigste Rolle spielte, sollen die Leistungseigenschaften der Zelle für diese Variante den Kern der Bauteilanpassungen bieten. Da eine hohe Leistung in der Regel immer mit vermehrter Abwärme und einer ansteigenden Temperatur im belasteten Bauteil einhergeht, welche in der Folge die Temperatur der Gesamtzelle beeinflussen kann, ist die Verbesserung der Temperatureigenschaften besonders belasteter Bauteile ein Anhaltspunkt bei der Auslegung der Leistungszelle.

Abbildung 5.10 beschreibt in einer Übersicht der Zelle die relevantesten Änderungen. Die Schnittansicht zeigt, dass den Ableitern auf Kathoden- und Anodenseite eine besondere Bedeutung bei diesem Zellkonzept zugeschrieben wird.

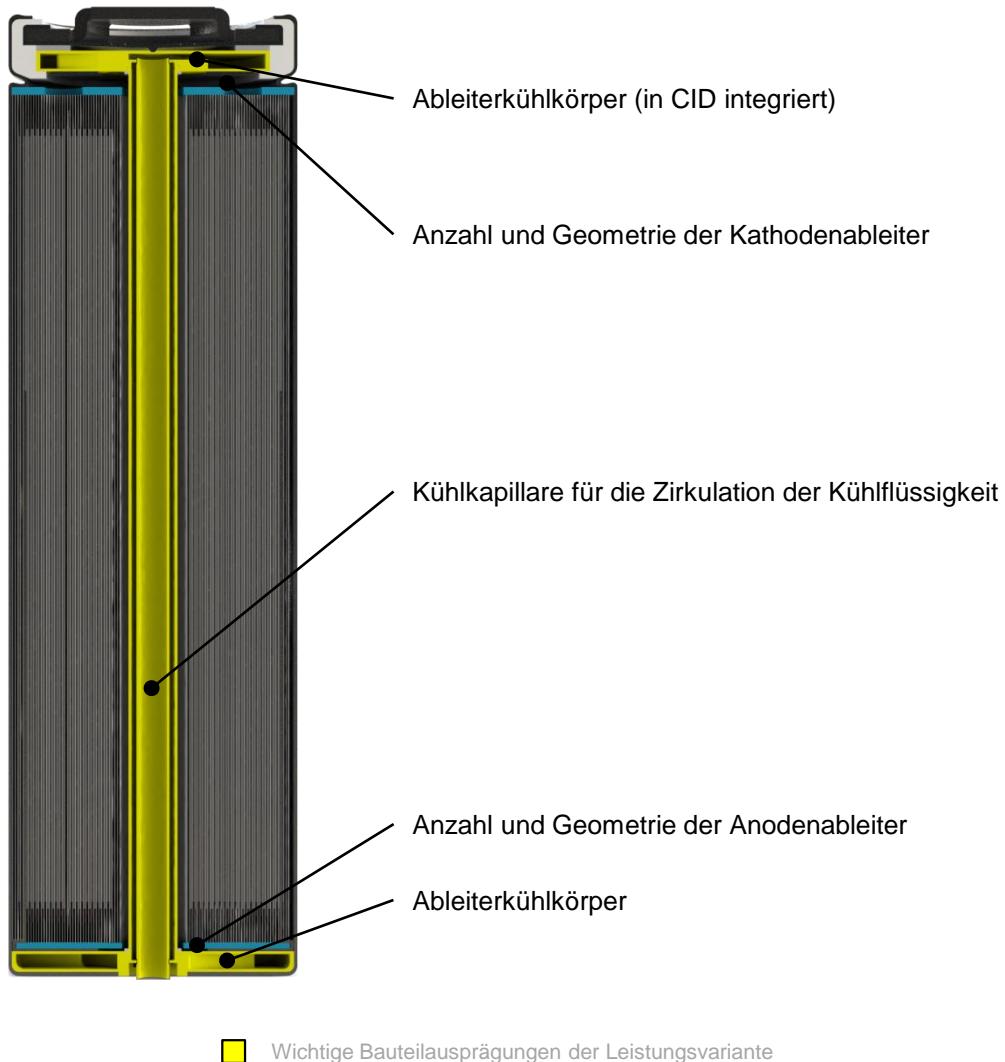


Abbildung 5.10: Übersicht der besonderen Merkmale der Leistungsvariante

Auf der einen Seite wurde die Geometrie der Ableiter angepasst und auf der anderen Seite auch die Anzahl an Ableitern in der Zelle erhöht. So besitzt die Leistungszelle nun zwei Ableiter

auf jeder Seite. Die besonders auffällige, gelb hervorgehobene Konstruktion, welche sich über die komplette Zelle erstreckt, hängt ebenfalls mit den Ableitern zusammen. Es handelt sich dabei um einen Kühlkreislauf bestehend aus zwei Kühlkörpern oberhalb und unterhalb des Wickels sowie einer Doppelkapillare, welche beide Kühlkörper miteinander verbindet. Dieser Kreislauf führt eine Kühlflüssigkeit durch einen Eingang am Boden der Zelle. Die Flüssigkeit durchläuft beide Kühlkörper und verlässt die Zelle ebenfalls am Gehäuseboden. An den Kühlkörpern sind die Ableiter angeschweißt. Der genaue Aufbau und das inhaltliche Konzept des Kühlsystems werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels erläutert.

Durch das Einbringen der neuen Kühlbauteile verliert der Wickel an Höhe. Außerdem reduzieren sich die Windungen aufgrund des erhöhten Kerndurchmessers. Die Folge ist, dass die Energiedichte der Leistungs zelle im Vergleich zur Energiezelle und der Sicherheitszelle abnimmt. Da der primäre Fokus dieser Zellkonstruktion auf der Absicherung und Verbesserung der Leistungsfähigkeit liegt, wird dieser Effekt hier in Kauf genommen.

Konstruktion der Ableiterkühlung

Das Zelldesign der Leistungsvariante wird von drei neuen Bauteilen dominiert. Dabei handelt es sich um zwei Ableiterkühlkörper und eine Doppelkapillare. Die beiden Kühlkörper sind jeweils oberhalb und unterhalb des Wickels angeordnet. Die Doppelkapillare verbindet beide Kühlkörper und ist im Kern der Wickelung verortet. Ziel dieses Kühlsystems ist es, die Anoden- und Kathodenableiter direkt nach dem Austreten aus dem Wickel zu kühlen. Außerdem ersetzt der obere Kühlkörper das Bauteil CID (B), um in der Folge wenigstens einen kleinen Teil des zusätzlich benötigten Volumens wieder einzusparen. Die Ableiter werden an die Oberflächen der Kühlkörper geschweißt, wobei ein zusätzlicher Auftrag von Wärmeleitpaste auf den Verbindungsflächen eine bestmögliche Nutzung der Wärmeübertragung fördert. Die Kühlkörper werden mit einer Kühlflüssigkeit durchströmt, um die generierte Wärme der Ableiter bei hohen Leistungsbelastungen adäquat abführen zu können. Die ausgewählte Kühlflüssigkeit sollte neben einer hohen Wärmekapazität, nicht elektrisch leitfähig und nicht brennbar sein. Außerdem wird ein nicht toxisches Verhalten bevorzugt. Eine mögliche Wahl, welche durch weitere Forschung zu validieren ist, stellt beispielsweise Silikonöl dar, welches in verschiedenen Viskositäten verfügbar ist und bereits in elektrischen Systemen zur Kühlung eingesetzt wird.¹³² Eine nicht elektrisch leitfähiges Medium zu wählen, liegt der Tatsache zu Grunde, dass über die Kühlkörper der Stromkreislauf zum positiven und negativen Pol geschlossen wird.

Der hier zum Einsatz kommende Kühlmechanismus wird als Ableiterkühlung (eng. tab cooling) bezeichnet. Anders als bei der Oberflächenkühlung, bei der die Außenflächen des Wickels oder des Gehäuses gekühlt werden, wird bei der Ableiterkühlung die Temperatur der Ableiter reduziert und stabilisiert. Insbesondere bei hohen Entladeleistungen und vielen Lade- und Entladezyklen weist dieses Verfahren deutliche Vorteile in Bezug auf den Verlust der nominal nutzbaren Kapazität auf.¹³³ Dieses Phänomen wurde in der Literatur insbesondere bei Pouch-

¹³² Vgl. Nikhil et al. (Performance enhancement of solar module by cooling) 2012, S. 80.

¹³³ Vgl. Hunt et al. (Surface Cooling Compared to Tab Cooling) 2016, S. 1851f.

Zellen untersucht. Dabei erzielt die Oberflächenkühlung zwar eine geringere Gesamttemperatur, aber der Temperaturgradient innerhalb des Wickels steigt deutlich an im Vergleich zur Ableiterkühlung.¹³⁴

Abbildung 5.11 zeigt den Aufbau des Kreislaufs und die innere Struktur der beiden Kühlkörper für den auf die Rundzelle übertragenen Ansatz der Ableiterkühlung. Es wird ersichtlich, dass durch die Flüssigkeitsführung im Außenbereich der Doppelkapillare zusätzlich eine Kühlung des Wickelkerns erfolgt, bevor die Flüssigkeit über die Innenkapillare wieder abgeführt wird. Die Innenstruktur der Kühlkörper sorgt dafür, dass die Kühlflüssigkeit möglichst alle Flächen des Innenbereich durchfließt. Insgesamt fließt die Flüssigkeit zu Beginn durch den Kühlkörper am Minuspol. Danach erfolgt der Transport über die Außenkapillare zum Kühlkörper des Pluspols. Abschließen wird die Kühlflüssigkeit über die Innenkapillare abgeführt.

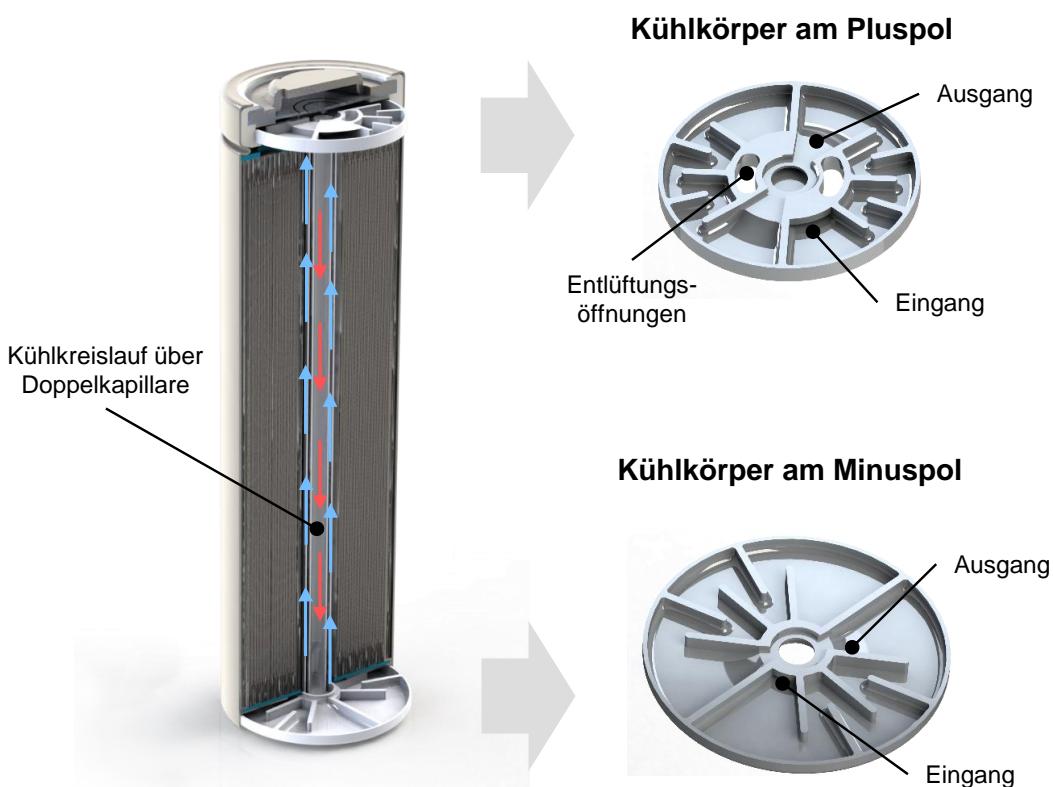


Abbildung 5.11: Ableiterkühlkreislauf im Inneren der Leistungszelle

Aus fertigungstechnischer Sicht wird die Produktion und Montage der Leistungszelle durch dieses Kühlsystem deutlich erschwert. Ein beispielhaftes Szenario dafür stellt die Vormontage des Wickelbereichs mitsamt dem Kühlsystem dar. Hierbei besteht die Möglichkeit, den unteren Kühlkörper auf der Kontaktfläche mit einem wärmmäshärtenden, elektrisch leitfähigen Klebstoff zu beschichten, bevor der vormontierte Wickel in das Gehäuse eingeführt wird. Durch den Anpressdruck der Sicke und eine Wärmebehandlung entsteht in einem nächsten Schritt

¹³⁴ Vgl. Zhao et al. (Modeling the Effects of Thermal Gradients on Li-Ion Cells) 2018, S. 3176f.

eine Verbindung der Bauteile. Nichtsdestotrotz bedarf es einer Überarbeitung des Fertigungsprozesses sowie Anpassungen im Schnittstellenbereich mit dem Batteriemodul.

Der obere Kühlkörper weist einen kleineren Außendurchmesser auf als sein Gegenstück auf der Unterseite des Wickels. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Sicke und die weitere Geometrie der Kopfbaugruppe den Kühlkörper in seiner horizontalen Ausdehnung limitieren. Der festgelegte Wert für den Außendurchmesser sowie weitere relevante Parameter können Tabelle 5.8 entnommen werden.

Tabelle 5.8: Konstruktive Parameter des Kühlkreislaufs der Leistungszelle

Parameter	Datengrundlage	Intervall	Festlegung
Höhe (unterer Kühlkörper)	–	–	1,5 mm
Außendurchmesser (unterer Kühlkörper)	–	abh. von Gehäuse	20,5 mm
Höhe (oberer Kühlkörper)	–	–	1,5 mm
Außendurchmesser (oberer Kühlkörper)	–	abh. von Gehäuse & Kopfbaugruppe	17 mm
Materialdicke (Kapillare)	–	abh. von Wickel	0,2 mm
Außendurchmesser (Kapillare)	–	abh. von Wickel	3,55 mm
Innendurchmesser (Kapillare)	–	abh. von Wickel	2,4 mm

Bei der Konstruktion der Doppelkapillare ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Kreisflächen der Kapillare unter Einbezug der Durchmesser und Materialdicken ungefähr dieselben Werte erreichen, damit ein stetiger Kühlmittelfluss gewährleistet ist. Der Wert liegt bei diesen Flächen bei ca. 3,2 mm².

Geometrie und Anordnung der Ableiter

Die Ableiter spielen bei der Leistungszelle eine wichtige Rolle, da sie den Flaschenhals beim Transport des Stroms von und zu den Polen bilden. Aus diesem Grund wurde die Materialdicke der Ableiter auf einen Wert von 0,2 mm erhöht.

Abbildung 5.12 zeigt die weiteren Anpassungen in Bezug auf die Ableiter der Leistungszelle. Aus der mittleren Darstellung kann entnommen werden, dass nunmehr zwei Ableiter für die Anode und zwei Ableiter für die Kathode verbaut wurden. Dadurch kann die Belastung verteilt werden. Außerdem erfolgt über die gleichmäßige Verteilung der Ableiter im Wickel eine homogene Stromauf- und -entnahme. Wie auch schon bei den Wettbewerberzellen sind die Anodenableiter zentral und auf der Außenbahn positioniert, wohingegen die Kathodenableiter mittig im Wickel bei etwa einem Drittel bzw. zwei Dritteln der Wickellänge verortet sind.

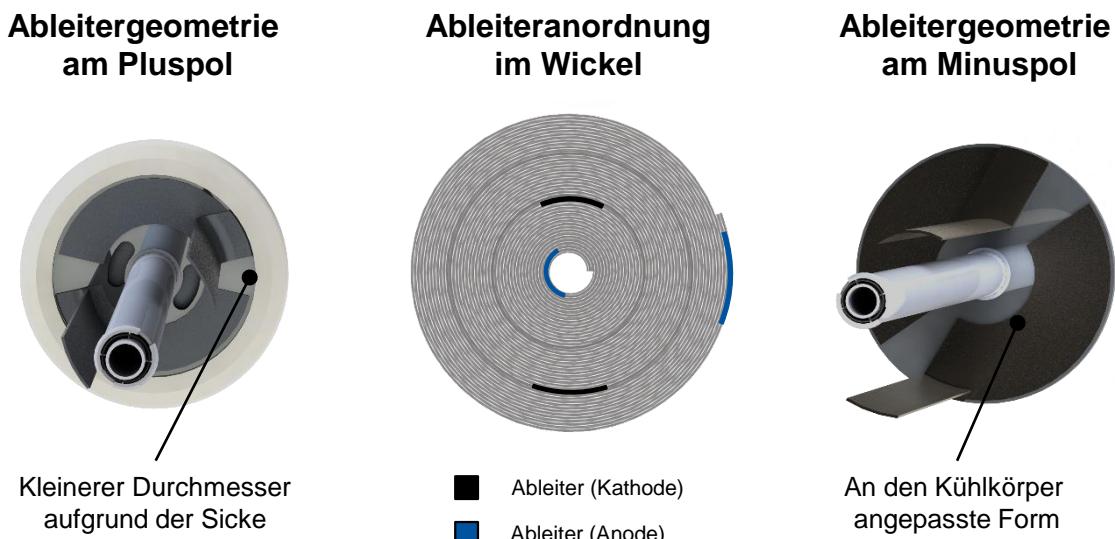


Abbildung 5.12: Ableiteranordnung und -geometrie der Leistungszelle

Die beiden Darstellungen auf der linken und rechten Seite zeigen eine weitere Anpassung der Ableiter. Sowohl Anoden- als auch Kathodenableiter wurden in ihrer Form an einem Ende so angepasst, dass die Auflagefläche auf den Kühlkörpern maximiert wird. Nur durch diese Anpassung ist die Ableiterkühlung eine sinnvolle Ergänzung der Leistungszelle.

Durch das integrierte Kühlssystem bildet die Leistungszelle das innovativste Design der drei Zellen. Insbesondere bei der Funktionsstabilität, Fertigung und in Bezug auf die Schnittstelle zum Batteriemodul, welches die Anschlüsse für den Kühlkreislauf liefert, sind viele Abstimmungspunkte entstanden. Diese Punkte sind im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses abzuklären. Diese Arbeit betrachtet zum Abschluss der Entwurfsphase einige schwerpunkt-mäßige Belastungs- und Betriebszustände der Zellen. Die sich daraus ergebenden Verbesserungsvorschläge werden ebenfalls im folgenden Kapitel erläutert.

5.2 Simulationen und endgültiger Konstruktionsentwurf

Dieses Kapitel umfasst punktuelle Simulationsansätze in Bezug auf einige kritische Konstruktionsbereiche und die aus der Validierung entstandenen Lösungsansätze in Form der endgültigen Konstruktionsentwürfe. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Belastungsfälle der Energie- und Sicherheitszelle sowie die Flusseigenschaften der Fluid führenden Kühlkörper der Leistungszelle gelegt. Die Betrachtung erfolgte mit den Softwarelösungen von „Solidworks Flow Simulation“ und „Autodesk Fusion 360 Simulation“.

5.2.1 Belastungs- und Fluidsimulationen

Simulationen sind besonders in der frühen Phase der Produktentwicklung eine hilfreiche Informationsquelle für die weitere Auslegung der Zelle. Auf der einen Seite ermöglichen sie die Überprüfung der bisher erarbeiteten Konstruktionsentwürfe. Auf der anderen Seite lassen sich über Simulationen von Belastungszuständen neue Produktdetails, wie verschiedene Materialkombinationen von Bauteilen oder Schwachstellen bestimmter Aufbauformen, generieren. Der

Einsatzbereich von Simulationsansätzen kann sich dabei von einfachen statischen Belastungszuständen bis hin zu sehr komplexen, auf das jeweilige Produkt zugeschnittenen Modellen erstrecken.

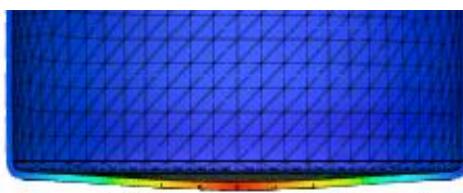
Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Konzeption neu entwickelter Lithium-Ionen-Rundzellen und ihrer konstruktiven Ausarbeitung. Aus diesem Grund behandelt das Kapitel nur den Standardfall der Simulationsanwendung und dringt nicht tiefer in die Thematik komplexer, mathematischer Zellmodelle ein. Nichtsdestotrotz helfen die hier besprochenen FEM- und CFD-Simulationsansätze bei der Überprüfung und Verbesserung konstruktiver Zellauslegungen aus Kapitel 5.1. Die Grundlagen der Finite-Element-Methode sowie der Flussanalyse, welche für diese Simulationen zum Einsatz kommen, sind in Kapitel 2.1.3 grundlegend erläutert.

Belastungen der Zellmodelle durch eine statische Kraft oder einen Druck sind insbesondere für die Sicherheits- und Energiezelle interessant, da ersteres Zelldesign in Bezug auf Belastungen verstärkt wurde und beim zweiten Design sicherheitstechnische Merkmale zu Gunsten einer gesteigerten Energiedichte weichen mussten. Im Fall der Leistungszelle wird in diesem Kapitel der strukturelle Aufbau der Kühlkörper hinsichtlich des Flussverhaltens der Kühlflüssigkeit untersucht.

Durch den hohlen Wickeldorn findet in der Sicherheitszelle eine nahezu gleichmäßige Verteilung der im Wickel entstehenden Gase statt. Aus diesem Grund wurde der Gehäuseboden verstärkt und gleichzeitig mit einer Berstfläche versehen. Diese Fläche dient dem Zweck, einem horizontalen Berstverhalten mit Kettenwirkungen für benachbarte Zellen zuvor zu kommen. In der ersten FEM-Simulation wurde daher der Innenraum des Gehäusebechers mit verschiedenen Druckzuständen belastet, um das Verhalten des Gehäuses in einem solchen Fall nachvollziehen zu können. Abbildung 5.13 zeigt zwei Ausschnitte für die Belastung des Edelstahlbechers mit einem Druck von 1,0 MPa und 2,0 MPa. Diese Werte orientieren sich an den Auslösedrücken für Berstflächen von Lithium-Ionen-Rundzellen aus der Literatur, welche in Kapitel 2.2.4 beschrieben wurden.

Sicherheitszelle

Verschiebung des Gehäusebodens
bei 1,0 MPa



Verschiebung des Gehäusebodens
bei 2,0 MPa

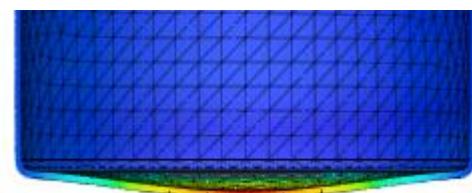


Abbildung 5.13: Statische Druckbelastung des Gehäusebodens der Sicherheitszelle

Aus der Abbildung geht hervor, dass die Belastungsspitzen im Zentrum der Bodenfläche zu finden sind. Im Fall der Druckbelastung von 2,0 MPa ist eine deutliche Ausdehnung der Bodenfläche zu verzeichnen. Diese Ausdehnung hätte bei einer realen physischen Zelle schon unterhalb der 2,0 MPa dazu geführt, dass die Berstfläche aktiviert worden wäre. Aus diesem

Grund entsteht aus der Simulation die Empfehlung, die Materialdicke des Bodens nochmals minimal zu vergrößern, um dem Zellgehäuse der Sicherheitszelle noch etwas mehr Belastungsspielraum zu geben.

Auch das zweite FEM-Simulationsszenario beschäftigt sich mit der Druckbelastung des Gehäuseinnenraums. In dieser Simulation steht der obere Teil des Gehäuses mitsamt der Kopfbaugruppe im Fokus. Abbildung 5.14 zeigt die Belastungsentwicklung für die Sicherheits- und Energiezelle. Hierbei wurden die Zellen von 0,3 MPa bis weit über den Berstdruck von 2,0 MPa belastet.

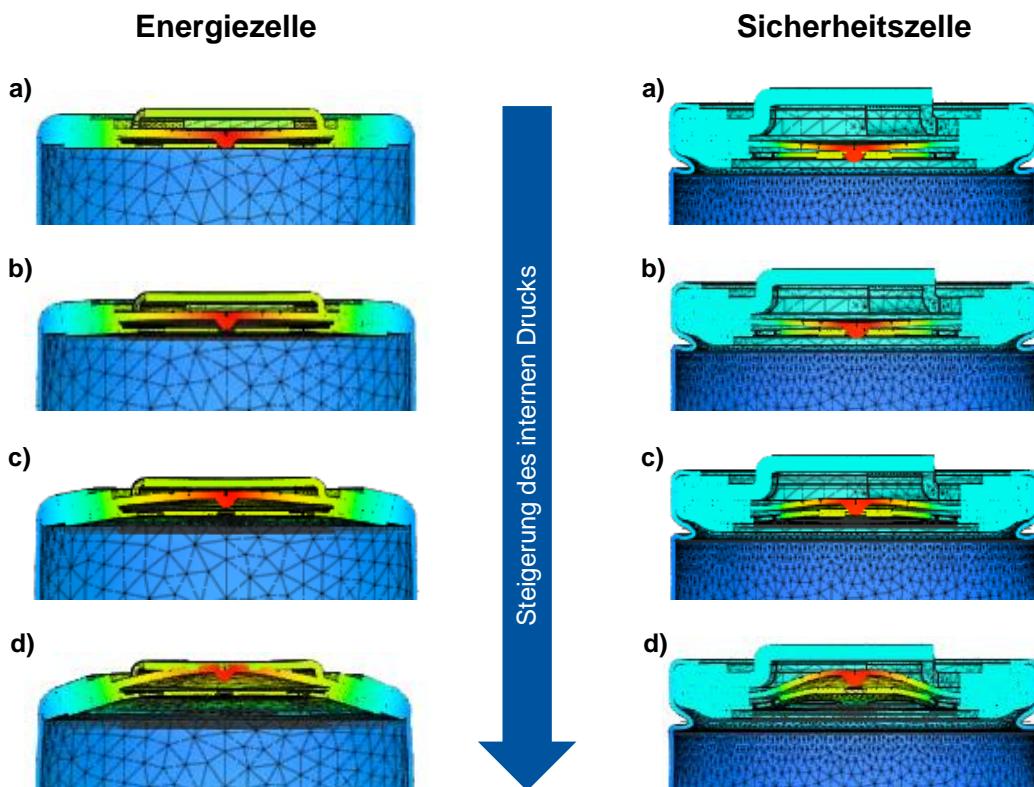


Abbildung 5.14: Ansteigende Druckbelastung der Sicherheits- und Energiezelle

Das Ergebnis der Simulation lässt gleich mehrere Schlüsse zu. Zunächst einmal fokussiert sich die höchste Belastung bei beiden Zellvarianten auf das CID. Dieser Umstand ist besonders im Fall der Energiezelle wichtig, da diese Zelle keine Sicke besitzt, was wiederum die Umstülpung am obersten Rand des Gehäuses stärker belastet. Die Simulation zeigt, dass die Umstülpung zwar mit ansteigender Belastung nachgibt (c und d), aber dass das CID die Zelle jedoch schon viel früher entkoppelt (b) und die Berstfläche aktiviert wird (b bis c). Im Fall der Sicherheitszelle lassen sich die Belastungen noch deutlicher auf den CID-Bereich eingrenzen. Auch hier wird die Zelle beim Übergang von c) nach d) entkoppelt und an der Sollbruchstelle aufgebrochen bzw. überdehnt. Mit ansteigender Spannung gibt auch die Sicke etwas nach und dehnt sich marginal aus.

Auch die Leistungszelle wurde einer simulativen Untersuchung unterzogen, wobei der Schwerpunkt auf der Optimierung des neuen Ableiterkühlsystems lag. Neben der Wahl des passen-

den Kühlmittels besitzen das Flussverhalten und die Fluidgeschwindigkeit einen hohen Einfluss auf die Effizienz des Kühlkreislaufs. Deshalb wurden die Kühlkörper mittels CFD-Simulationen genauer analysiert. Abbildung 5.15 zeigt einen Ausschnitt dieser Simulationen, welcher die gewonnenen Erkenntnisse unterstreicht.

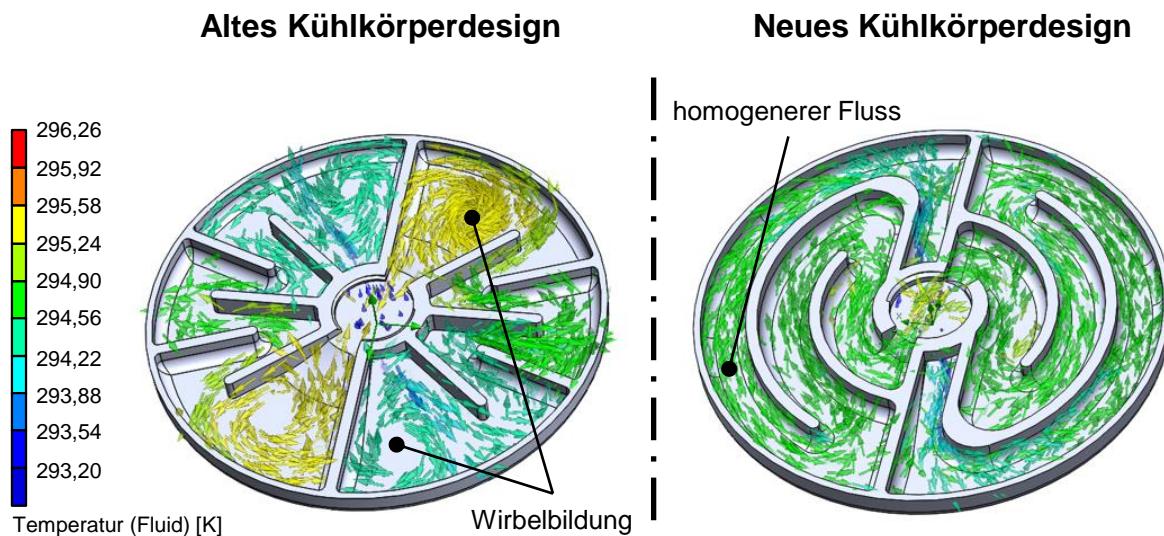


Abbildung 5.15: CFD-Simulation des alten und neuen Kühlkörpers im Vergleich

Auf der linken Seite der Darstellung ist das aktuelle Design des Kühlkörpers zu erkennen. Die CFD-Simulation bildet das Fluidverhalten innerhalb dieses Körpers ab. Dabei fallen die beiden Wirbel am Ein- und Auslauf des Kühlkörpers besonders ins Auge. Sie behindern nicht nur den Fluidfluss, sondern formen durch die längere Verweildauer einiger Fluidpartikel gleichzeitig drei Temperaturbereiche. Dieses Verhalten wird durch das weitere Design des Flussweges noch verstärkt. Insgesamt ist darauf zu achten, dass die Fluidpartikel über den gesamten Kreislauf Wärme aufnehmen. In diesem Szenario, bei dem die Kühlkörperoberflächen mit einer Temperatur von 40 °C belastet wurden, ist davon auszugehen, dass der obere Kühlkörper aufgrund der Fluidtemperatur ineffizienter arbeitet. Um diesem Umstand etwas entgegenzuwirken, wurde das Design der Kühlkörper verändert. Die CFD-Ergebnisse dieser Anpassungen zeigt Abbildung 5.15 vorausblickend im rechten Teilbild. Die Darstellung zeigt ein deutlich homogeneres Fluss- und Temperaturbild für die neuen Geometrien des Kühlkörpers. Das überarbeitete Design wird im nachfolgenden Kapitel thematisiert.

Die FEM- und CFD-Ergebnisse der drei Zellvarianten zeigen einige Verbesserungspotentiale des aktuellen Entwicklungsstands auf. Die Einarbeitung der Änderungen zum abschließenden Konstruktionsergebnis fasst das nächste Kapitel zusammen.

5.2.2 Ergebnisvalidierung und abschließende Konstruktion

In diesem Kapitel werden die konstruktiven Änderungen der Zellentwürfe auf Basis der Validierungsergebnisse aus den Simulationsszenarien abgehandelt. Durch die Modellierungsan-

passungen einzelner Bauteile entsteht zum Ende dieses Kapitels der abschließende Konstruktionsentwurf der Sicherheits-, Energie- und Leistungs zelle, mit dem diese Arbeit thematisch abgeschlossen wird.

Die Sicherheitszelle wurde im Kapitel 5.2.1 mittels FEM-Simulationen auf Druckbelastungen untersucht. Während die Belastungszustände im Bereich der Kopfbaugruppe akzeptable Ergebnisse vorwiesen und die Sicke mit steigendem Druck funktionsgemäß marginal nachgab, waren die Ausdehnungen des Becherbodens, welcher bereits im vorläufigen Konstruktionsentwurf verstärkt wurde, als kritisch zu betrachten. Es ist davon auszugehen, dass die Vergrößerung der Materialdicke aufgrund der zusätzlich eingeführten Berstfläche in diesem Bereich des Edelstahlbechers nicht ausreichend genug bemessen wurde. Deshalb wurde die Dicke des Becherboden im abschließenden Konstruktionsentwurf nochmals von 0,3 mm auf 0,35 mm angehoben. Änderungen an der Kopfbaugruppe sowie an der Sicke waren nicht notwendig, da sich die Belastungsspitzen auf den zentralen Bereich des CIDs konzentrierten und der Gehäusebecher nicht übermäßig verformt wurde.

Für die Energiezelle ließen sich die Belastungsspitzen ebenfalls im Zentrum des CIDs lokalisieren. Dieses Ergebnis ist dahingehend positiv zu bewerten, als dass besonders das Gehäusedesign der Energiezelle ohne eine vorhandene Sicke in Bezug auf interne Druckbelastungen als kritisch anzusehen war. Die FEM-Simulation zeigt zwar einen stärkeren Ausdehnungsausschlag als bei der Sicherheitszelle, das am stärksten belastete Bauteil ist in diesem Szenario jedoch das CID. Somit würde das CID die Zelle schon deutlich vor einem Gehäuseversagen entkoppeln und auch die Berstfläche würde frühzeitig vor einem Gehäuseversagen aktiviert werden. Aus diesem Grund sind zu diesem Zeitpunkt des Produktentwicklungsprozesses keine direkten Änderungen am kritischsten Bereich der Energiezelle vorgesehen.

Die Leistungs zelle wurde aufgrund der vorgesehenen Ableiterkühlung in Bezug auf das Fluidverhalten analysiert. Die CFD-Simulation der Kühlkörper ergab jeweils zwei Wirbelbildungen am Ein- und Auslauf des Kühlkörpers. Zusammen mit dem verzweigten Flussweg im Inneren führte dieser Umstand dazu, dass sich die Kühlflüssigkeit länger als geplant im Kühlkörper aufhielt. Dadurch entstanden Temperaturzonen des Fluids und die Wärmeaufnahme war schon im unteren Kühlkörper erhöht. Abbildung 5.16 zeigt die Modellierungsänderungen des Kühlkörpers, welche als Reaktion auf die CFD-Ergebnisse ausgearbeitet wurden.

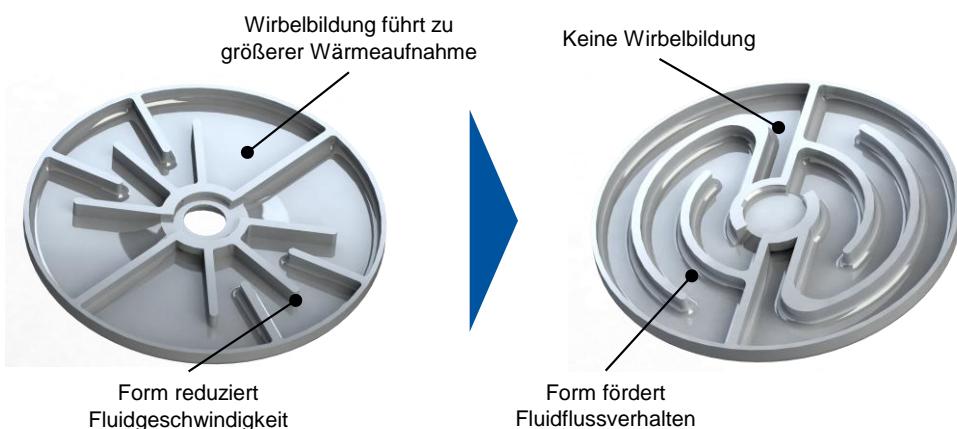


Abbildung 5.16: Änderung des Konstruktionsdesigns der Kühlkörper

Wie die Fluidsimulationen mit dem neuen Kühlkörpermodell zeigen, unterstützt die geschwungene Bahnführung den homogenen Fluss der Kühlflüssigkeit innerhalb des Körpers. Insgesamt entwickelt sich über den gesamten Verlauf der Bahnen ein besser übergehendes Temperaturbild der Flüssigkeit. Dadurch steigt die Temperatur des Fluids nicht schon im ersten Bereich des Kühlkreislaufs zu deutlich an. Der untere Kühlkreislauf wurde im abschließenden Design durch das neue Bauteilmodell ersetzt. Für den oberen Kühlkörper, welcher in der Fläche kleiner dimensioniert ist, wird zunächst das alte Design verwendet. Hier wird sich der längeren Verweildauer bedient, um über die kleinere Fläche mehr Wärme abführen zu können, bevor die Flüssigkeit aus der Zelle geführt wird. Reale Prototypenversuche werden im weiteren Entwicklungsverlauf für Messergebnisse in diesem Bereich nötig sein, damit diese Thematik abschließend geklärt werden kann.

Mit diesem Kapitel liegt ein abschließender Konstruktionsentwurf der drei auszuarbeitenden Zellvarianten vor. Außerdem schließt dieses Kapitel den thematischen Fokus dieser Arbeit ab, welcher neben der Ausarbeitung eines Konzeptionsansatzes zur Entwicklung von Lithium-Ionen-Rundzelle auch die konstruktive Umsetzung der erarbeiteten Zellausprägungen zu einem Konstruktionsentwurf beinhaltete. Der weitere Verlauf des Produktentstehungsprozesses und seines Konstruktions- und Entwicklungsprozesses sieht nun weitere Detaillierungsschleifen und Überarbeitungen der Entwürfe vor, welche durch zusätzliche digitale und physische Prototypen unterstützt werden. Diese Abschnitte sind jedoch nicht mehr Teil der Fragestellung dieser Arbeit.

6 Abschließende Betrachtung

In diesem Kapitel wird zunächst die Arbeit kurz zusammengefasst, bevor das Vorgehen kritisch reflektiert wird. Zum Abschluss erfolgt ein Ausblick auf die Weiterführung des Forschungsthemas zusammen mit einer Einschätzung des künftigen Forschungsbedarfs in diesem Feld.

6.1 Zusammenfassung der Arbeit

Im nachfolgenden Abschnitt werden die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit nach Kapiteln vorgestellt und zusammengefasst. Die zu behandelnde Forschungsfrage dieser Arbeit bezog sich auf die Suche und Erarbeitung eines Konzeptansatzes zur Konstruktion von Lithium-Ionen-Rundzellen unter den Randbedingungen des Sicherheits-, Energie und Leistungsfokus.

Das zweite Kapitel behandelte die Grundlagen der Produktentwicklung und den Stand der Technik von Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge. Zunächst wurden der Produktentstehungsprozesses sowie sein untergeordneter Teilprozesses, der Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses erläutert. Dabei wurde darauf eingegangen wie sich die Forschungsthematik von Produkten wie der Lithium-Ionen-Rundzelle in diesen prozessualen Aufbau eingliedert. Zusätzlich wurden die methodischen Vorgehensweisen zur Informations- und Entscheidungsfindung innerhalb dieser Prozessschritte thematisiert. Der zweite Teil des Kapitels befasste sich neben der Struktur von Batteriesystemen und der Unterscheidung von Zelltypen für elektrische Fahrzeuganwendungen hauptsächlich mit der Funktionsweise von Lithium-Ionen-Zellen und dem Aufbau sowie den Bauteilen der Lithium-Ionen-Rundzelle. Das Kapitel lieferte damit eine wissenschaftliche Basis für die praktische Betrachtung der Forschungsfrage.

Im dritten Kapitel begann die praktische Ausarbeitung der Themenstellung in Form einer Planungsphase. Es wurde das Vorgehen zur Konzeption und Konstruktion der Batteriezellenentwürfe vorgestellt und festgelegt, welche Erzeugnisse im Verlauf der Arbeitsschritte zu generieren waren. Außerdem erfolgte durch die Teardown-Analyse mehrerer Wettbewerberzellen der Aufbau einer ersten Datengrundlage. Diese Daten wurden mit dem Abschluss der Planungsphase in die Anforderungsliste überführt. Daneben wurde die Anforderungsliste weiter mit den Erkenntnissen der Design-Structure-Matrix befüllt. In dieser Beziehungsmatrix der einzelnen Zellbauteile wurden die Abhängigkeiten der Bauteilmerkmale untereinander betrachtet. Durch eine Abschätzung dieser Abhängigkeiten auf Basis der Wettbewerberanalyse sowie der wissenschaftlichen Grundlagen konnten wichtige Informationsbausteine für die modulare Zusammensetzung der Zelle abgeleitet werden. Die Struktur des dritten Kapitels sowie der nachfolgenden Kapitel war dabei an den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess angelehnt.

Mit dem vierten Kapitel wurde die Konzeptionsphase für die konkreten Auslegungsmerkmale der späteren Zellentwürfe eingeleitet. Als Eingangsgröße wurde aus der Anforderungsliste eine strukturelle Hierarchie der Zellbauteile unter Zuhilfenahme der DSM abgeleitet. Mit dem Produktstrukturplan entstand eine Visualisierung dieser Bauteilhierarchie. Das wichtigste Erzeugnis der Konzeptionsphase stellte die Festlegung der Merkmalsausprägungen für die Sicherheits-, Energie- und Leistungszellen dar. Durch eine Kombination aus Nutzwertanalyse

und morphologischem Kasten wurde eine Entscheidungsgrundlage geschaffen, welche auf nachvollziehbare Weise eine Auswahl der Bauteilausprägungen ermöglichte.

Das fünfte Kapitel widmete sich dem Entwurf der Zellkonstruktionen auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse. Dazu wurden die Entscheidungen des morphologischen Kastens und der Anforderungsliste in vorläufige Konstruktionsentwürfe überführt. Diese Konstruktionsentwürfe orientierten sich an den Randbedingungen der Sicherheits-, Energie- und Leistungsauslegung und wiesen, bedingt durch die getroffenen Merkmalsentscheidungen, einen unterschiedlichen Innovationsgrad auf. Mithilfe von FEM- und CFD-Simulationen wurden zum Abschluss des Kapitels einige Belastungs- und Fluidanalysen der Zellmodelle angefertigt. Die validierten Ergebnisse führten zu einigen Anpassungen der Entwürfe, sodass am Ende des Kapitels drei abschließende Konstruktionsentwürfe entstanden. Mit diesem Erzeugnis und dem vorgelagerten Konzeptansatz wurde die thematische Bearbeitung der Forschungsfrage abgeschlossen.

6.2 Kritische Reflexion des Vorgehens

In diesem Abschnitt wird das in der Arbeit verwendete Vorgehen rekapituliert und die einzelnen Schritte kritisch reflektiert. Dazu wird im Folgenden zwischen der Struktur des Vorgehens in Bezug auf die aufgeteilten Phasen, der angewandten Vorgehensmethodik zur Informationsgewinnung und Entscheidungsfindung, der Qualität und Aussagekraft der erzielten Ergebnisse sowie die Beantwortung der in der Einleitung formulierten Forschungsfrage unterschieden.

Das methodische Vorgehen in dieser Arbeit war an den in der Produktentwicklung verwendeten Produktentstehungsprozess sowie seinen Teilprozess, den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess, angelehnt. Durch diesen Bezug leitete sich der Ablauf in die Phasen der Planung, Konzeption und Konstruktion ab. Insgesamt führten die Erzeugnisse der einzelnen Phasen zu validen Eingangsgrößen der darauffolgenden Phasen. Insbesondere die Ergebnisse des morphologischen Kastens waren so konkret, dass sie unkompliziert in die Ausprägungen der Entwurfsmodelle übernommen werden konnten. Als etwas problematischer stellte sich dagegen der Informationsgehalt der Anforderungsliste heraus. In realen Entwicklungsprojekten bezieht sich der Informationsgehalt der Anforderungen in der Regel nicht nur auf Wettbewerberanalysen, sondern schließt auch mathematische Modelle und wirtschaftliche Faktoren der Produktstrategie mit ein. Da ein Einbezug all dieser Informationsquellen den Rahmen und die Fokussierung dieser Arbeit überschritten hätte, waren die Wettbewerberdaten mit einigen Unsicherheiten behaftet. So konnte beispielsweise nicht miteinbezogen werden, inwiefern bestimmte Fertigungsverfahren und Produktionsschritte einen Einfluss auf die Geometrien ausgeübt hätten. Ein anderes Beispiel stellt die Restriktion bestimmter Materialien aufgrund von Lieferbeschränkungen oder Kostenaspekten dar, welche den Informationsgehalt der Anforderungsliste weiter vergrößert hätte. Dieser Freiheitsgrad ermöglichte auf der einen Seite etwas Spielraum für Entscheidungen, ließ aber auf der anderen Seite die Planungssicherheit leiden. Insgesamt waren die generierten Informationen für den Grad der Ausarbeitung dieser Arbeit aber ausreichend bemessen.

Die methodischen Werkzeuge, welche in dieser Arbeit zum Einsatz kamen, teilten sich in die Bereiche der Informationsgewinnung und der Entscheidungsfindung auf. In der Planungsphase kam mit der Teardown-Analyse ein wichtiges Instrument zur Generierung von Realdaten zum Einsatz. Auch, wenn nur ein kleiner Teil des Wettbewerberfelds durch die Teardown-Analyse erfasst wurde, waren die aufgenommenen Daten essenziell für den Entwurfsprozess und durch eine Ergänzung von Literaturdaten in ihrer Informationsdichte ausreichend bemessen. Das gewonnene Verständnis der Bauteilbeziehungen und die dadurch entstehenden Abhängigkeiten für den Konstruktionsentwurf, welche durch die DSM geschaffen wurden, half bei der Ausarbeitung der Bauteilschnittstellen und begrenzender Geometrien. Mit der Produktstruktur, der Nutzwertanalyse und dem morphologischen Kasten kamen Methodiken zum Einsatz, welche auf verschiedenen Entscheidungsgrundlagen aufgebaut waren. So weist die Nutzwertanalyse einen mathematischen Ansatz auf, während die Produktstruktur einen stark visualisierenden Charakter mit sich bringt. Der morphologische Kasten unterstützt durch seine klare Struktur der Alternativen bei der Fokussierung auf die Kernentscheidungen. Durch den Vergleich der mathematischen Bewertungen der Nutzwertanalyse mit der strukturierten Aufstellung der Ausprägungsalternativen im morphologischen Kasten war es möglich, die Entscheidung auf einer breiteren Wissengrundlage aufzubauen. Dieses Vorgehen fördert die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen zu späteren Zeitpunkten im Prozess. Die Wahl der passenden Methodik wird von Beginn an stark durch das Produkt und die Zielsetzung beeinflusst. Für den Anwendungsfall der Zellkonzeption in dieser Arbeit konnten durch die genannten Methoden alle nötigen Informationen gewonnen werden.

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels angesprochen wurde, lag nicht zu jedem Zeitpunkt des Prozesses eine optimale Datengrundlage vor. Dieser Umstand findet sich allerdings auch in anderen Entwicklungsprojekten wieder. Das gewählte Vorgehen führte aber dazu, dass der Detaillierungsgrad mit zunehmendem Fortschritt des Prozesses immer weiter gesteigert werden konnte. Die Qualität der Ergebnisse richtet sich immer nach dem Zeitpunkt der prozessualen Abfolge. Die in der Arbeit erzeugten Ergebnisse, in Form der Anforderungsliste, DSM, Produktstruktur und Zellentwürfe, bilden daher an diesem Punkt des Produktentstehungsprozesses eine qualitative Grundlage zur weiteren Entwicklung der Produkte. Insbesondere bei der Anforderungsliste und der DSM handelt es sich um Momentaufnahmen, welche durch die fortlaufende Überarbeitung immer weiter an Qualität gewinnen. Innerhalb der Konstruktionsentwürfe weist die Sicherheitszelle den höchsten Qualitätsgrad auf, da sie durch ihre moderaten Veränderungen deutlich näher an den aktuellen Fertigungsverfahren orientiert ist. Die Leistungszelle ist aufgrund der innovativen Bauteilkonzepte mit dem höchsten Unsicherheitsgrad besetzt. Wichtige zu klärende Fragen richten sich in diesem Zusammenhang an die Funktionsfähigkeit des Kühlkonzepts sowie die Kosten und Fertigungstechnologien der späteren Produktion. Dazu bedarf es weiterer Detaillierung und zusätzlicher Funktionsprototypen. Außerdem lassen sich die schwerpunktmaßigen Simulationsansätze noch weiter ausbauen.

Abbildung 6.1 fasst die rückblickende Einschätzung der betrachteten Vorgehensparameter zusammen. Umsetzbarkeit und Reihenfolge der Prozessschritte waren gegeben, wenngleich die einzelnen Abschnitte noch stärker durchstrukturiert sein könnten, um eine Standardisierung der kleinsten Prozessabschnitte zu erreichen. Die angewandte Methodik lieferte die gewollten

Ergebnisse und ist zukünftig durch weitere Methoden erweiterbar. Bei der Übertragung der Methoden auf andere Produkte ist allerdings zu prüfen, ob die jeweiligen methodischen Werkzeuge in diesem Zusammenhang zielführend sind. Der Detaillierungsgrad der Ergebnisse ist durch eine höhere Informationsdichte noch steigerbar und die Divergenz in der Qualität der Ergebnisse ist darauf zurückzuführen, dass die Leistungszelle als sehr innovativer Entwurf mehr Unsicherheiten aufwirft als die Sicherheitszelle.

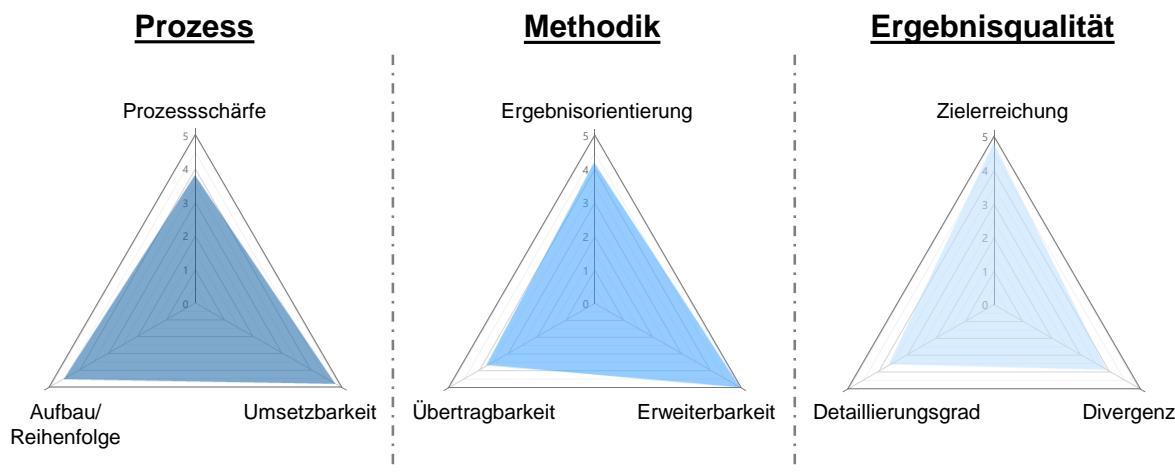


Abbildung 6.1: Rückblickende Einschätzung der Vorgehensparameter

Durch die Ergebnisse dieser Arbeit war es möglich, die gestellte Forschungsfrage nach einem Konzeptansatz zur konstruktiven Auslegung von Lithium-Ionen-Rundzellen zu beantworten. Mithilfe des erarbeiteten Konzepts ließen sich drei Konstruktionsentwürfe von Lithium-Ionen-Rundzellen entwickeln, welche schlussendlich in die Randbedingungen der Sicherheit, Energie und Leistung eingegliedert wurden. Durch die Verbesserungsansätze der vorangegangenen Absätze besteht die Möglichkeit, den gewählten Ansatz weiter zu optimieren.

6.3 Forschungsbedarf und Ausblick

Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept zur Ausarbeitung von Konstruktionsentwürfen in der Batteriezellenentwicklung ist auf die frühe Phase der Produktentwicklung eingegrenzt. Demzufolge bedient es nur einen Teil des gesamten Produktentstehungsprozesses. Die kausale Prozessabfolge sieht nach weiterer Detaillierung der Konstruktionsmodelle eine Dokumentation der finalen Produktspezifikationen vor, welche von der Produktionsplanung gefolgt wird. Das angewandte Konzept kann dabei in mehreren Iterationen durchlaufen werden, um die Ergebnisqualität weiter zu steigern. Auch eine Übertragung der Konzeptidee auf andere Produkte ist denkbar, da ein allgemeiner Prozessablauf angewandt wurde und die verwendeten methodischen Ansätze nicht zellspezifischer Natur waren. Es gilt dabei allerdings zu beachten, dass für abweichende Produktarten andere methodische Vorgehensweisen zielführender sein könnten.

Da es sich bei der Lithium-Ionen-Batterietechnologie für Elektrofahrzeuge um ein junges Forschungsfeld handelt, werden die Innovationssprünge, getrieben durch Forschungs- und Ent-

wicklungsabteilung der Fahrzeughersteller und ihrer Zulieferer, noch weiter an Fahrt aufnehmen. Verbesserungen im Bereich der Zellchemie werden Auswirkungen auf den Aufbau und die Struktur aller Zellbauteile haben. Die Tendenz zu immer größeren Energie- und Leistungsanforderungen lässt die Zelle in ihrer Dimensionierung immer mehr wachsen. Dadurch gewinnen Sicherheitsaspekte mehr Bedeutung und der Bedarf zur Kühlung der Zelle steigert sich ebenfalls. Deshalb sollten zukünftige Forschungsbestrebungen und Konzeptansätze die Sicherheitsmerkmale der Bauteile für die Gesamtzelle weiter untersuchen und verbessern. Durch konstruktive Veränderungen und Materialsubstitutionen bestehen in diesem Forschungsfeld noch deutliche Potentiale. Auch im Bereich der Zellkühlung lassen sich Konzepte aus anderen Bereichen in die Batterietechnik der Rundzellen übertragen, wie es in dieser Arbeit mit der Idee der Ableiterkühlung geschehen ist, welche bereits bei anderen Zelltypen in wissenschaftlichen Untersuchungen zum Einsatz kommt.

VI Literaturverzeichnis

Austin Mier, F; Hargather, M. J; Ferreira, S. R. (Vent Mechanism Flow Parameters in 18650 Cells):

Experimental Quantification of Vent Mechanism Flow Parameters in 18650 Format Lithium Ion Batteries. In: Journal of Fluids Engineering, Jg. 141, 2019, Nr. 6, S. 178

Brand, M. (FEM-Praxis mit SolidWorks):

FEM-Praxis mit SolidWorks Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016

Browning, T. R. (Design Structure Matrix Extensions and Innovations):

Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities. In: IEEE Trans. Eng. Manage., Jg. 63, 2016, Nr. 1, S. 27–52

Ciez, R. E; Whitacre, J. F. (Comparison between cylindrical and prismatic li-ion cells):

Comparison between cylindrical and prismatic lithium-ion cell costs using a process based cost model. In: Journal of Power Sources, Jg. 340, 2017, S. 273–281

Clavier, C; Gaj, K. (Cryptographic hardware and embedded systems analysis):

Cryptographic hardware and embedded systems - CHES 2009. 11th international workshop, Lausanne, Switzerland, September 6-9, 2009 proceedings (LNCS sub-library, 5747). Berlin: Springer, 2009

Ehrlenspiel, K; Meerkamm, H. (Integrierte Produktentwicklung):

Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 5., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource] Aufl. München: Hanser, 2013

Etacheri, V; Marom, R; Elazari, R; Salitra, G; Aurbach, D. (Challenges in the development of Li-ion batteries):

Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review. In: Energy Environ. Sci., Jg. 4, 2011, Nr. 9, S. 3243

Feldhusen, J; Grote, K.-H. (Konstruktionslehre):

Pahl/Beitz Konstruktionslehre Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013

Felkai, R; Beiderwieden, A. (Projektmanagement für technische Projekte):

Projektmanagement für technische Projekte. Ein prozessorientierter Leitfaden für die Praxis, 1. Aufl. Aufl. s.l.: Vieweg+Teubner (GWV), 2011

Finegan, D. P; Darcy, E; Keyser, M; Tjaden, B; Heenan, T. M. M; Jervis, R; Bailey, J. J; Malik, R; Vo, N. T; Magdysyuk, O. V; Atwood, R; Drakopoulos, M; DiMichiel, M; Rack, A; Hinds, G; Brett, D. J. L; Shearing, P. R. (Characterising thermal runaway within li-ion cells):

Characterising thermal runaway within lithium-ion cells by inducing and monitoring internal short circuits. In: Energy Environ. Sci., Jg. 10, 2017, Nr. 6, S. 1377–1388

Finegan, D. P; Darcy, E; Keyser, M; Tjaden, B; Heenan, T. M. M; Jervis, R; Bailey, J. J; Vo, N. T; Magdysyuk, O. V; Drakopoulos, M; Di Michiel, M; Rack, A; Hinds, G; Brett, D. J. L; Shearing, P. R. (Cause of Rupture of Li-Ion Batteries):

Identifying the Cause of Rupture of Li-Ion Batteries during Thermal Runaway. In: Advanced science (Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany), Jg. 5, 2018, Nr. 1, S. 1700369

Garche, J; Brandt, K. (Hrsg.) (Electrochemical Power Sources):

Electrochemical power sources. Fundamentals, systems, and applications: Li-battery safety, Amsterdam, Oxford, Cambridge, MA: Elsevier, 2019

Guo, M; White, R. E. (Mathematical model for a spirally-wound lithium-ion cell):

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

Hoffmann, C.-A. (Methodik zur Steuerung modularer Produktbaukästen):

Methodik zur Steuerung modularer Produktbaukästen Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018

Hunt, I. A; Zhao, Y; Patel, Y; Offer, J. (Surface Cooling Compared to Tab Cooling):

Surface Cooling Causes Accelerated Degradation Compared to Tab Cooling for Lithium-Ion Pouch Cells. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 163, 2016, Nr. 9, A1846-A1852

Jakoby, W. (Projektmanagement für Ingenieure):

Projektmanagement für Ingenieure Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019

Johnson Matthey Battery Systems (Our Guide to Batteries):

Our Guide to Batteries. <http://www.jmbatterysystems.com/JMBS/media/JMBS/Documents/JMBS-23946-Battery-Guide-Update-August-2015-Web.pdf>. Ab-ruf 16.06.2020

Jörg Feldhusen, B. G. (Product Lifecycle Management):

Product Lifecycle Management für die Praxis Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008

Kampker, A. (Elektromobilproduktion):

Elektromobilproduktion Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014

Kampker, A; Deutskens, C; Heimes, H; Ordung, M; Haunreiter, A. (Using E-mobility as an Enabler for a Fast and Lean Product Development):

Using E-mobility as an Enabler for a Fast and Lean Product Development to Optimize the Return of Engineering with the Example of Lithium-ion Battery. In: Procedia CIRP, Jg. 50, 2016, S. 166–172

Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Elektromobilität):

Elektromobilität Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018

Kenney, B; Darcovich, K; MacNeil, D. D; Davidson, I. J. (Modelling on lithium-ion battery modules):

Modelling the impact of variations in electrode manufacturing on lithium-ion battery modules. In: Journal of Power Sources, Jg. 213, 2012, S. 391–401

Klein, B. (Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau):

FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

Korthauer, R. (Hrsg.) (Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications):

Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018

Lao, L; Su, Y; Zhang, Q; Wu, S. (Thermal Runaway Induced Casing Rupture):

Thermal Runaway Induced Casing Rupture: Formation Mechanism and Effect on Propagation in Cylindrical Lithium Ion Battery Module. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 167, 2020, Nr. 9, S. 90519

Lindemann, U. (Methodische Entwicklung technischer Produkte):

Methodische Entwicklung technischer Produkte Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009

Linke, P; Weidermann, F. (Einführung in die Konstruktionsmethodik):

Einführung in die Konstruktionsmethodik. In: Böge, A; Böge, W. (Hrsg.): *Handbuch Maschinenbau* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 715–735

Lu, L; Han, X; Li, J; Hua, J; Ouyang, M. (issues for li-ion battery management in electric vehicles):

A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. In: Journal of Power Sources, Jg. 226, 2013, S. 272–288

Mahmoudzadeh Andwari, A; Pesiridis, A; Rajoo, S; Martinez-Botas, R; Esfahanian, V. (Battery Electric Vehicle Technology):

A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 78, 2017, S. 414–430

Naefe, P; Luderich, J. (Konstruktionsmethodik für die Praxis):

Konstruktionsmethodik für die Praxis Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016

Nikhil, P. G; Premalatha, M. (Performance enhancement of solar module by cooling):

Performance enhancement of solar module by cooling: An experimental investigation. In: International Journal of Energy and Environment 2012, Nr. 3, S. 73–82

Otto; Wood (Reverse Engineering and Redesign Methodology):

Product Evolution: A Reverse Engineering and Redesign Methodology. In: Research in Engineering Design 1998, Nr. 10

Pfrang, A; Kersys, A; Kriston, A; Sauer, D. U; Rahe, C; Käbitz, S; Figgemeier, E.

(Cause of Mechanical Failure in Li-Ion Batteries):

Geometrical Inhomogeneities as Cause of Mechanical Failure in Commercial 18650 Lithium Ion Cells. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 166, 2019, Nr. 15, A3745-A3752

Piller, F. T; Waranger, D. (Modularisierung in der Automobilindustrie):

Modularisierung in der Automobilindustrie. Neue Formen und Prinzipien ; Modular

Sourcing, Plattformkonzept und Fertigungssegmentierung als Mittel des Komplexitätsmanagements (Berichte aus der Betriebswirtschaft), Als Ms. gedr Aufl. Aachen: Shaker, 1999

Pistoia, G. (Hrsg.) (Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications):

Lithium-Ion Batteries. Advances and Applications, First edition Aufl., Amsterdam: Elsevier, 2014

Pistoia, G; Liaw, B. (Behaviour of Lithium-Ion Batteries in EV):

Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Cham: Springer International Publishing, 2018

Ponn, J; Lindemann, U. (Konzeptentwicklung technischer Produkte):

Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011

Quinn, J. B; Waldmann, T; Richter, K; Kasper, M; Wohlfahrt-Mehrens, M. (Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells):

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

Ramadesigan, V; Northrop, P. W. C; De, S; Santhanagopalan, S; Braatz, R. D; Subramanian, V. R. (Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries):

Modeling and Simulation of Lithium-Ion Batteries from a Systems Engineering Perspective. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 159, 2012, Nr. 3, R31-R45

Saw, L. H; Ye, Y; Tay, A. A.O. (Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles):

Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. In: Journal of Cleaner Production, Jg. 113, 2016, S. 1032–1045

Schwarze, R. (CFD-Modellierung: Anwendung von Strömungsprozessen):

CFD-Modellierung Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013

Stiny, L. (Passive elektronische Bauelemente):

Passive elektronische Bauelemente Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019

Sturm, J; Frank, A; Rheinfeld, A; Erhard, S. V; Jossen, A. (Impact of Cell Design on Charging of Li-Ion Cells):

Impact of Electrode and Cell Design on Fast Charging Capabilities of Cylindrical Lithium-Ion Batteries. In: J. Electrochem. Soc. 2020

VDI (VDI-Richtlinie 2221):

VDI-Richtlinie 2221: Entwicklung technischer Produkte und Systeme Modell der Produktentwicklung, 2019

Wagner, M. (Lineare und nichtlineare FEM: Umformsimulationen):

Lineare und nichtlineare FEM Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017

Waldmann, T; Gorse, S; Samtleben, T; Schneider, G; Knoblauch, V; Wohlfahrt-Mehrens, M. (Mechanical Aging Mechanism in Li-Ion Batteries):

A Mechanical Aging Mechanism in Lithium-Ion Batteries. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 161, 2014, Nr. 10, A1742-A1747

Wang, M; Beeh, E; Höfer, A; Friedrich, H. (Function Integration for Lightweight Chassis Based on DSM):

Function Integration for Lightweight Chassis Based on Axiomatic Design and Design Structure Matrix. In: Int.J Automot. Technol., Jg. 19, 2018, Nr. 6, S. 969–979

Wang, Y; Han, Z; Shi, J. One cell Lithium-ion battery protection IC:

One cell Lithium-ion battery protection IC: 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2014 IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 09.06.2014 - 11.06.2014: IEEE 2014 - 2014, S. 1427–1432

Warner, J. (The handbook of lithium-ion battery pack design):

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

Wendt, J. F; Anderson, J. D. (Computational Fluid Dynamics):

Computational fluid dynamics. An introduction, 3rd ed. Aufl. Berlin, London: Springer, 2008

Wierzbicki, T; Sahraei, E. (Properties for the jellyroll of cylindrical Lithium-ion cells):

Homogenized mechanical properties for the jellyroll of cylindrical Lithium-ion cells. In: Journal of Power Sources, Jg. 241, 2013, S. 467–476

Yao, X.-Y; Pecht, M. G. (Tab Design and Failures in Cylindrical Li-ion Batteries):

Tab Design and Failures in Cylindrical Li-ion Batteries. In: IEEE Access, Jg. 7, 2019, S. 24082–24095

Yao, X.-Y; Saxena, S; Su, L; Pecht, M. G. (Tab Burrs in Li-Ion Batteries):

The Explosive Nature of Tab Burrs in Li-Ion Batteries. In: IEEE Access, Jg. 7, 2019, S. 45978–45982

Yue Ma, Ho Teng, Marina Thelliez (Modeling of a Li-Ion Battery):

Electro-Thermal Modeling of a Lithium-ion Battery System. In: SAE International Journal of Engines, Jg. 3, 2010, S. 306–317

Zhao, Y; Patel, Y; Zhang, T; Offer, G. J. (Modeling the Effects of Thermal Gradients on Li-Ion Cells):

Modeling the Effects of Thermal Gradients Induced by Tab and Surface Cooling on Lithium Ion Cell Performance. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 165, 2018, Nr. 13, A3169-A3178

Zhu, J; Zhang, X; Sahraei, E; Wierzbicki, T. (Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells):

Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells under axial compression. In: Journal of Power Sources, Jg. 336, 2016, S. 332–340

VII Anhang

Abbildung VII.1: Beziehungsmatrix (DSM) der Bauteile einer Lithium-Ionen-Rundzelle