Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Fakultät Ingenieurwissenschaften
Studiengang Maschinenbau

Konzeption und Entwurf eines strukturellen Energiespeichers für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Engineering (M.Eng.)

vorgelegt von

Gabriel Kahlmeyer

Matrikelnummer: 79289

11.08.2023

Verantwortlicher Hochschullehrer:	Prof. Dr.-Ing. habil. Robert Böhm
Betreuer der Hochschule:	M.Sc. Davood Peyrow Hedayati

Leipzig, 11.04.2023 bis 11.08.2023

Erklärung zur Eigenleistung

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Masterarbeit selbstständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderungen entnommen wurde.

Bernterode in Heilbad Heiligenstadt, den 11.08.2023

Gabriel Kahlmeyer

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand als Abschlussarbeit während meines Maschinenbaumasterstudiums an der Professur Leichtbau mit Verbundwerkstoffen an der HTWK Leipzig.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Robert Böhm für die Bereitstellung des Themas, die Begutachtung der Arbeit und das kollegiale Arbeitsklima an seiner Professur bedanken.

Herrn M.Sc. Davood Peyrow Hedayati möchte ich als meinen wissenschaftlichen Betreuer besonderen Dank für die sehr gute Betreuung der Masterarbeit, die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die konstruktive Kritik sowie die stetige Motivation zum Thema und dem Fortgang der Arbeit aussprechen. Er hat meine wissenschaftliche Entwicklung stark geprägt.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie für die uneingeschränkte Unterstützung während des gesamten Studiums. Hierdurch wurden meine persönlichen Interessen sehr gefördert.

Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen dieser Masterarbeit.

Gabriel Kahlmeyer

Bernterode in Heilbad Heiligenstadt im August 2023

Kurzfassung

Die Energieversorgung unbemannter Flugobjekte (UAV) erfolgt gegenwärtig über Batterie-Module. Diese sind als zusätzliche Bauteile in die Struktur eingebracht. Daher erhöht sich das Gesamtgewicht der Struktur deutlich. Im Sinne der Energiespeicherung existieren verschiedene multifunktionale Konzeptansätze. Hierunter zählen strukturelle, elektrische Energiespeicherungssysteme (SEES). Bei diesen Konzepten erfolgt die Energiespeicherung in den Bauteilen bei gleichzeitiger Erfüllung struktureller Eigenschaften. Somit gelten diese als masselose Energiespeicherungssysteme. Im Rahmen dieser Thesis erfolgt eine Betrachtung verschiedener SEES. Schließlich werden strukturelle Superkondensatoren (SSC) zur Integration in ein UAV ausgewählt. Als Integrationsobjekt dient die Drohne DJI Matrice 600 Pro. Ein SSC mit besten Eigenschaften wird anhand einer systematischen Methode aus der aktuellen Literatur ermittelt. Dieser Favorit wird konzeptionell in die Drohne integriert. Diesbezüglich erfolgen verschiedene, physikalische Berechnungen zu elektrischen Eigenschaften und anliegenden Kräften, sodass Rückschlüsse zur Leistungsfähigkeit getroffen werden können. Im weiteren Verlauf wird eine Mehrkörpersimulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) am Untersuchungsobjekt durchgeführt. Mit der Kenntnis über die anliegenden Beanspruchungen erfolgt weiterführend eine detailgetreue, strukturmechanische Analyse des SSC unter Verwendung der FEM an repräsentativen Volumenelementen. Fortan wird das multiphysikalische Kopplungsphänomen im strukturellen Elektrolyten simuliert. Hierfür werden mathematische Abhängigkeiten von mechanischen Einwirkungen auf geometrisch, veränderliche Größen ermittelt. Diese werden in eine elektrochemische Simulation überführt, sodass das multiphysikalische Kopplungsphänomen berechnet wird. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Kompression des Elektrolyten negative Auswirkungen auf die elektrochemischen Eigenschaften hat. Diese Aussage beruht auf der Anwendung der Cyclovoltammetrie Methode, welche anhand geeigneter Diagramme aufgezeigt wird.

Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAV) are currently powered by batteries, which are integrated as additional components within their structure. However, the substantial weight of these batteries leads to increased energy consumption and reduced flight time. In addition to battery-based energy systems, there are alternative concepts that serve multifunctional roles. Structural electrical energy storage systems (SEES) for example carry loads and offer electrical energy storage functions at the same time. In this work, structural Supercapacitors (SSC) are selected as SEES candidates. A systematic approach is employed to integrate an SSC into the DJI Matrice 600 Pro done as an UAV use case. The efficiency of the integrated system is assessed through various physical calculations. Subsequently, a multi-body simulation using the finite element method is conducted on the chosen UAV model. Furthermore, representative volume elements are defined within the structural supercapacitor, and simulations are performed to comprehend the underlying processes. During the exploration of multiphysical coupling effects between mechanical stresses and electrochemical behaviors, certain geometric parameters are identified as influential factors. Regression analysis is employed to formulate mathematical equations representing these dependencies for simulation purposes. A multiphysical simulation is executed, considering compression as a representative load case. The results are evaluated using cyclic voltammetry. The study concludes that mechanical compression loads have an adverse effect on the electrochemical properties of the structural supercapacitor.

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis VI
Abbildungsverzeichnis XI
Tabellenverzeichnis XIV
1 Einleitung 1
2 Grundlagen 5
2.1 Strukturelle elektrische Energiespeicherungssysteme 5
2.2 Superkondensatoren – Aufbau und Funktionsweise 8
2.3 Berechnungsgrößen am strukturellen Superkondensator 14
3 Stand der Forschung 20
3.1 Literaturrecherche – Strukturelle Superkondensatoren 20
3.2 Festlegung von Parametern und Auswahl des SSC 30
4 Anwendungsfall: DJI Matrice 600 Pro 33
4.1 Produktanalyse DJI Matrice 600 Pro 33
4.2 Integration des strukturellen Superkondensators in die Struktur 35
4.3 Berechnung elektrischer Eigenschaften 37
4.4 Analyse und Berechnung der wirkenden Kräfte 41
4.5 FEM-Mehrkörpersimulation am UAV-Anwendungsfall 47
5 Strukturmechanische Simulation am SSC 60
5.1 SSC-Bereichsanalyse und Simulationsaufgabe 60
5.2 Repräsentative Volumenelemente und Einheitszelle 61
5.3 Simulation Bereich 1: Poröse Faser in der Matrix 62
5.4 Simulation Bereich 2: Fasern in der Matrix 69
5.5 Simulation Bereich 3: Poröser Elektrolyt 74
6 Multiphysikalische SSC-Simulation 80
6.1 Multiphysikalischer Kopplungseffekt 80
6.2 Analyse der geometrischen Größen Porosität und Tortuosität 82
6.3 Multiphysikalische Simulation mit COMSOL Multiphysics 90
Zusammenfassung und Ausblick 103
Literatur XV

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinisches Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	-	Materialparameter im Materialsteifigkeitstensor
A	m^2	Querschnittsfläche der Zugprobe
A_{gesamt}	m^2	Gesamtfläche
A_M	m^2	Mantelfläche eines Zylinders
A_{PK}	m^2	Fläche am Plattenkondensator
$A_{porös}$	m^2	Poröse Fläche
C	-	Materialsteifigkeitstensor
c	-	Relative Kompression
c_0	$mol.m^{-3}$	Anfangskonzentration an der Elektrode
C_{bulk}	$mol.m^{-3}$	Massenkonzentration des Reaktanten
C_{dl}	$F.m^{-2}$	Doppelschichtkapazität
C_{el}	F	Elektrische Kapazität
c_{prop}	m	Propeller Chord
C_T	-	Schubkraftkoeffizient
D	-	Materialnachgiebigkeitstensor
d	m	Durchmesser des Rotors
D_A	$m^2.s^{-1}$	Diffusionskoeffizient des Reaktanten
D_B	$m^2.s^{-1}$	Diffusionskoeffizient des Resultats
D_{bulk}	$m^2.s^{-1}$	Massenkonzentration des Reaktanten
D_{eff}	$m^2.s^{-1}$	Effektiver Diffusionskoeffizient
D_{effA}	$m^2.s^{-1}$	Effektiver Diffusionskoeffizient
$\mathbf{D}_{iso}$	-	Materialnachgiebigkeitstensor für Isotropie
$\mathbf{D}_{ortho}$	-	Materialnachgiebigkeitstensor für Orthotropie
d_{PK}	m	Plattenabstand am Plattenkondensator

$\mathbf{D}_{tr\text{-}iso}$	-	Materialnachgiebigkeitstensor für Transversalisotropie
E	Pa	Elastizitätsmodul
e_d	-	Effektiver Durchmesser
E_{kin}	J	Kinetische Energie
E_{pot}	J	Potenzielle Energie
E_{rot}	J	Rotationsenergie
$E_{vertex1}$	V	Startpotential
$E_{vertex2}$	V	Umkehrstelle Potential
F	N	Kraft
F_G	N	Gewichtskraft
F_P	N	Propellerkraft
F_T	N	Schubkraft
g	$m.s^{-2}$	Gravitationsbeschleunigung
G	Pa	Schubmodul
h	m	Höhe
h_{max}	m	Maximale Flughöhe
h_{schweb}	m	Flughöhe im Schwebezustand
I	A	Stromstärke
i_{0ref}	$A.m^{-2}$	Referenzaustauschstromdichte
J	$kg.m^{-2}$	Trägheitsmoment
k	-	Motor / Propellerkraftkonstante
K_0	-	Reaktionsrate
k_f	N.s	Koeffizient für Propellerkraft
l	m	Ausgangslänge der Zugprobe
L	m	Äußere Grenze der Diffusionsschicht
L_E	m	Euklidische Länge
L_G	m	Geodätische Länge
m	kg	Masse

m_{aktiv}	kg	Masse des aktiven Materials
n	-	Anzahl der Propeller an der Drohne
N	min^{-1}	Umdrehungen pro Minute
N_b	-	Anzahl der Rotorblätter
N_{max}	min^{-1}	Maximale Umdrehungen pro Minute
p	m	Propellersteigung
P	$W.kg^{-1}$	Leistungsdichte
Q	C	Elektrische Ladung
r	m	Radius von Drehachse bis Schwerpunkt
R	m	Propellerradius Spitze – Nabe
r	m	Radius Zylinder
R^2	-	Determinationskoeffizient
r_e	m	Elektronenradius
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
u	m	Verschiebung
V	V	Elektrische Spannung
v	$V.s^{-1}$	Voltammetrische Scannrate
v_{velo}	$m.s^{-1}$	Geschwindigkeit
X	Pa	Festigkeit

Griechisches Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\bar{C}$	$F.g^{-1}$	Spezifische Kapazität
μ	-	Reibkoeffizient
Γ	$W.kg^{-1}$	Energiedichte
ε	-	Technische Dehnung

ε_0	$A.s.V^{-1}.m^{-1}$	Elektrische Feldkonstante
ε_r	$A.s.V^{-1}.m^{-1}$	Elektrische Permeabilität
θ	°	Propellerblatt Verdrehwinkel
κ	-	Verhältnis von Porosität und Tortuosität
ν	-	Poissonzahl
ϱ	$kg.m^{-3}$	Luftdichte
σ	Pa	Spannung
τ	-	Tortuosität
φ	-	Porosität
ω	s^{-1}	Winkelgeschwindigkeit

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung	Englische Bezeichnung
ACP	ANSYS Composite Pre/Post	
CNF	Kohlenstoffnanofaser	Carbon Nanofiber
CNT	Kohlenstoffnanoröhre	Carbon Nanotube
Co_3O_4	Cobalt(II,III)-oxid	
$CoFe_2O_4$	Cobaltferrit	
EES	Elektrische Energiespeicherungssysteme	Electrical Energy Storage Systems
FE	Finite-Elemente	
FEM	Finite-Elemente-Methode	
GO	Graphenoxid	Graphene oxide
H_2SO_4	Schwefelsäure	
$MnFe_2O_4$	Manganferrit	
$NiCo_2O_4$	Nikelcobaltit	
PVA	Polyvinylalkohol	
REM	Rasterelektronenmikroskop	
rGO	Reduziertes Graphenoxid	Reduced graphene oxide
ROI	Relevanter Messbereich	Region of Interest
RVE	Repräsentatives Volumenelement	
SB	Strukturelle Batterien	Structural Batteries
SC	Superkondensator	Supercapacitor
SEES	Strukturelle elektrische Energiespeicherungssysteme	Structural Electrical Energy Storage Systems
SSC	Strukturelle Superkondensatoren	Structural Supercapacitors
UAV	Unbemannte Flugobjekte (Drohnen)	Unmanned Aerial Vehicles

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über verschiedene Arten von EES [10–13] 6
Abbildung 2: Prinzipaufbau vom SSC (Vereinfachung an Elektrodengrenze)..... 10
Abbildung 3: Detail: Funktion an den CF-Elektroden..... 11
Abbildung 4: Typen von Elektrolyt [28] 13
Abbildung 5: Systematischer Ansatz zur Auswahl eines SSC..... 20
Abbildung 6: Ragone-Plot: Energiedichte versus Leistungsdichte..... 22
Abbildung 7: Favoriten aus dem Ragone-Plot mit Prioritäten..... 24
Abbildung 8: Ashby Diagramm: Energiedichte versus Elastizitätsmodul mit Klassifizierung nach Elektrodenart..... 26
Abbildung 9: Ashby Diagramm: Energiedichte versus Festigkeit..... 28
Abbildung 10: Ashby Diagramm: Spezifische Kapazität versus Elastizitätsmodul.... 29
Abbildung 11: Ashby Diagramm: Spezifische Kapazität versus Festigkeit 30
Abbildung 12: DJI Matrice 600 Pro – Aktuelles Design..... 34
Abbildung 13: Entworfenes Bauteil für die DJI Matrice 600 Pro: Center Frame Cover 35
Abbildung 14: DJI Matrice 600 Pro - SEES Modifikation 36
Abbildung 15: Energie- und Leistungsbedarf der DJI Matrice 600 Pro Konzepte [17]40
Abbildung 16: Statisches Kräftegleichgewicht an der DJI Matrice 600 Pro..... 42
Abbildung 17: Schubkraftdiagramm der DJI Matrice 600 Pro 46
Abbildung 18: Schubkraftdiagramm der DJI Matrice 600 Pro im Detail 47
Abbildung 19: Simulationsmodell DJI Matrice 600 Pro mit Vereinfachungen 48
Abbildung 20: Schichtaufbau am SSC zur Anwendungsintegration 49
Abbildung 21: Analyseelement zur Generierung der orthotropen Materialdaten..... 50
Abbildung 22: Definierter Lagenaufbau für die Compositsimulation..... 52
Abbildung 23: Polardiagramm - Materialeigenschaften des Lagenaufbaus 52
Abbildung 24: Workflow im ANSYS FEM-Modell zur Mehrkörpersimulation..... 53
Abbildung 25: Randbedingungen and der DJI Matrice 600 Pro 54

Abbildung 26: Simulationsergebnis: Absolute Deformation 55
Abbildung 27: Simulationsergebnis: Erste Hauptspannung 56
Abbildung 28: Simulationsergebnis: Dritte Hauptspannung 56
Abbildung 29: Vektorhauptspannungen am Center Frame 57
Abbildung 30: Spannungen der Einzellagen im Upper Center Frame 58
Abbildung 31: Hauptspannungen der Einzellagen im Upper Center Frame 59
Abbildung 32: SSC-Architektur mit den Analysebereichen [53] 60
Abbildung 33: REM-Aufnahme - Kohlenstofffaser in der Matrix [55] 63
Abbildung 34: Vektorgrafik-Illustration der Faser aus der REM-Aufnahme 63
Abbildung 35: Randbedingungen am RVE-Element auf Nanoebene 65
Abbildung 36: Deformation am RVE im Lastfall 1 65
Abbildung 37: Deformation am RVE im Lastfall 2 66
Abbildung 38: Analyse der dritten Hauptspannung im Lastfall 2 66
Abbildung 39: Dritte Hauptspannung im Lastfall 1 67
Abbildung 40: Dritte Hauptspannung der Matrix mit realistisch möglicher Maximallast 68
Abbildung 41: Dehnungen an der Faser mit einer Belastung von 62,5 MPa 68
Abbildung 42: RVE-Element – Elektrodensimulation [57] 69
Abbildung 43: Randbedingungen am RVE 2 71
Abbildung 44: RVE 2 - Lastfall 3 - Absolute Verformung 72
Abbildung 45: Äquivalente elastische Dehnung der Fasern 73
Abbildung 46: Dritte Hauptspannung im höchsten Lastfall 73
Abbildung 47: REM-Aufnahme des strukturellen Elektrolyten 50MTM57 [60] 74
Abbildung 48: Illustration der REM-Aufnahme [60] für Untersuchungen 74
Abbildung 49: RVE-Elektrolyt-Plot 76
Abbildung 50: Elektrolytstruktur ohne Verformung 77
Abbildung 51: Verformungsverlauf der Struktur 78
Abbildung 52: Dritte Hauptspannung Elektrolyt RVE 79
Abbildung 53: Richtung der multiphysikalischen Kopplung 80

Abbildung 54: Beispielbild zur Analyseaufgabe 84
Abbildung 55: Definition der Tortuosität 84
Abbildung 56: Pfade des Codes links: gegen den Uhrzeigersinn und rechts: im Uhrzeigersinn 86
Abbildung 57: Ergebnis des Python Codes zur Messung der Tortuosität 87
Abbildung 58: Logik des Algorithmus zur Analyse der Tortuosität 88
Abbildung 59: Ergebnisdarstellung mit 20 Pfaden 89
Abbildung 60: RVE-Elektrolyt-Präparation zur Messung der Tortuosität 91
Abbildung 61: RVE-Elektrolyt-Simulationsergebnis bei einer aufgebrachten Verformung von 2,5 μm 91
Abbildung 62: RVE-Elektrolyt-Simulationsergebnis bei einer aufgebrachten Verschiebung von 6 μm 92
Abbildung 63: Veränderung der Porosität und Tortuosität aufgrund mechanischer Einflüsse 94
Abbildung 64: Veränderung des Faktors des effektiven Diffusionskoeffizienten durch mechanische Einwirkung 95
Abbildung 65: Veränderung der Porosität aufgrund mechanischen Einflusses 96
Abbildung 66: Veränderung der Tortuosität resultierend aus mechanischer Einwirkung 97
Abbildung 67: CV-Diagramm der mechanisch – elektrochemischen Simulation 99
Abbildung 68: Ergebnisdiagramm: Mechanische-elektrochemische Kopplung 101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Auswertungsdiagramme 21
Tabelle 2: Ragone-Plot - Top 6 Datenbeschriftung 24
Tabelle 3: Mindestanforderungen an einen SSC im Anwendungsfall 31
Tabelle 4: Eigenschaften eines geeigneten SSC 31
Tabelle 5: Masse der SEES-Bauteile 37
Tabelle 6: Mindestanforderungen an einen SEES im Vergleich 38
Tabelle 7: Input-Parameter zur Bestimmung der Schubkraft 44
Tabelle 8: Zwischenergebnisse und Endergebnis der Schubkraftermittlung 45
Tabelle 9: Lagenaufbau des SSC an der DJI Matrice 600 Pro 50
Tabelle 10: Materialdaten für die SSC-Simulation 51
Tabelle 11: Resultierende Materialdaten aus der Simulation 51
Tabelle 12: Orthotrope Materialeigenschaften der Verstärkungsschicht [47] 51
Tabelle 13: Materialdaten für die SSC-RVE-Simulation 64
Tabelle 14: Analyseergebnisse der FEM im Zuge der Elektrolytsimulation 93
Tabelle 15: Parameter der elektrochemischen Simulation 98
Tabelle 16: Ergebnisse der elektrochemischen Simulation 100

1 Einleitung

Unbemannte Flugobjekte (UAV), welche auch als Drohnen bezeichnet werden, erlangen in der Luft- und Raumfahrt immer mehr Aufmerksamkeit. Sie heben sich von herkömmlichen Technologien vor allem durch ihre verhältnismäßigen niedrigen Kosten und die gute Mobilität und Einsetzbarkeit ab. Daher erfüllen sie bereits heute wichtige Aufgaben in den verschiedensten Anwendungsgebieten. Beispiele hierfür sind Luftfotografie und Filmaufnahmen sowie Logistik- und Transportaufgaben. Auch finden UAV Anwendung in Analyse und Messaufgaben für Unwettervorhersagen, Identifizierung und Lokalisierung von Bränden, Personensuche, Unterstützung in der Landwirtschaft oder der Erstellung von geografischen Karten für schlecht erreichbares Terrain [1–3]. Die Reichweite während des Flugeinsatzes hängt bei UAV aus physikalischen Gründen maßgeblich von der Gesamtmasse ab und wird unter anderem durch die mitgeführte Antriebsenergie bestimmt [4]. In den derzeitig auf dem Markt aufzufindenden Produkten erfolgt die Bereitstellung der elektrischen Energie in der Regel über Akkumulatoren. Dabei sind diese als zusätzliche Komponenten in der Gesamtstruktur untergebracht. Die elektrischen Energiespeicher übernehmen hierbei im multifunktionalen Sinn keine weiteren Funktionen. Somit ist eine strikte Trennung zwischen der Speicherung und Bereitstellung elektrischer Energie sowie der Erfüllung von strukturmechanischen Anforderungen festzustellen. Durch eine Zusammenführung der beiden Teilsysteme gleich einer multifunktionalen und integrierenden Bauweise ergeben sich viele Vorteile für das daraus resultierende Gesamtsystem. Zur Anwendung kommen dabei vor allem Faserverbundwerkstoffe.

Seitdem Faserverbundwerkstoffe erforscht und in diversen Anwendungen integriert werden, liegt der Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt zunächst auf der Erhöhung der strukturellen Leistungsfähigkeit. Im Mittelpunkt stehen dabei Eigenschaften wie beispielweise Zug- und Druckfestigkeit oder der Widerstand gegen Delamination. In den letzten Jahren hat sich der Entwicklungstrend aus Gründen von Gewichts- oder Volumenreduktion jedoch zu multifunktionalen Strukturen entwickelt. Dabei liegt der

Fokus neben der Erfüllung struktureller Anforderungen auch in der gleichzeitigen Integration von elektrischen Energiespeicherungsfunktionen. Die konzeptionelle Idee ist, die elektrischen Energiespeicherungssysteme (EES) in Faserverbundstrukturen zu integrieren. Somit können die dabei entstehenden, multifunktionalen Systeme mindestens zwei Funktionen gleichzeitig erfüllen. Einerseits tragen sie mechanische Lasten und andererseits dienen sie als EES. Aufgrund der Verknüpfung von strukturellen Aufgaben und der Energiespeicherung können diese Materialien auch strukturelle elektrische Energiespeicherungssysteme (SEES) genannt werden. Die Zusammenführung der Funktionalitäten resultiert schließlich in einer wesentlichen Reduzierung der Masse.

Aus physikalischer Sicht hat die Masse großen Einfluss auf die Energie. In den Formeln (1) bis (3) sind grundlegende physikalischen Berechnungsgesetze der potentiellen und kinetischen Energie [5, 6], wie auch der Rotationsenergie [7], aufgeführt.

$$E_{\text{pot}} = mgh \tag{1}$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m (v_{\text{velo}})^2 \tag{2}$$

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J \omega^2 \tag{3}$$

Die Variablen m, g, h, v_{velo}, J, und ω beschreiben die Parameter Masse, Gravitationsbeschleunigung, Höhe, Geschwindigkeit, Trägheitsmoment und Winkelgeschwindigkeit. Das Trägheitsmoment kann dabei nach [7] allgemein mit nachfolgender Gleichung ermittelt werden.

$$J = \int r^2 dm \tag{4}$$

Die Variable r beschreibt in diesem Fall den radialen Abstand des Schwerpunktes zur Drehachse. Aus allen Gleichungen wird ersichtlich, dass sie von der Masse abhängig ist. Dabei ist in jedem Fall eine direkt proportionale Abhängigkeit von Energie und Masse festzustellen. Eine Reduzierung der Masse sorgt demnach in allen Fällen für einen geringeren Energiebedarf. Somit lässt sich aus physikalischer

Betrachtungsweise zu Beginn belegen, dass eine Verringerung der Masse eine Reichweitenerhöhung mit sich bringt. Dadurch ergibt sich weiterführend im UAV-Anwendungsfall der Vorteil, dass die Zykluszeiten zwischen Flugzeit und Ladevorgang verzögert werden. Aufgrund dessen verlängert sich die effektive Einsatzzeit in der Luft. Aus diesen Gründen steht das Ziel der Massenreduktion in der Luft- und Raumfahrt, und explizit im zugrunde liegenden Anwendungsfall, an zentraler Stelle.

Eine große Aufgabe in der multifunktionalen Zusammenführung von Funktionen liegt in der Erforschung von gut verträglichen Materialien, um optimale Eigenschaften in den Komponenten zu erzielen. Neben optimalen strukturmechanischen Werten müssen auch die elektrischen Merkmale überzeugen. Nicht selten bestehen Konfliktphänomene zwischen Materialeigenschaften oder Architektur. Somit gilt es im Rahmen der Forschung und Entwicklung einen geeigneten Kompromiss zu finden, welcher schließlich zu annehmbaren, resultierenden und funktionellen Eigenschaften führt. Kohlenstofffasern eignen sich beispielsweise bei SEES sehr gut für den Einsatz als strukturelles Elektrodenmaterial. Sie besitzen bekanntermaßen hervorragende mechanische Eigenschaften und sind gleichzeitig elektrisch leitfähig [8]. Somit eignen sie sich hervorragend als Bestandteil von SEES.

Im Rahmen dieser Thesis besteht die Zielsetzung einen UAV-Anwendungsfall auszuwählen und diesen mit einem SEES aus der aktuellen Forschungsliteratur auszustatten. Dabei sollen diverse Berechnungen und Simulationen im Mittelpunkt stehen. Als Ergebnis wird eine Aussage zur Umsetzbarkeit aus mechanischer und elektrischer Betrachtungsweise angestrebt. Diese wird durch die durchgeführten Berechnungen belegt. Außerdem soll das mechanisch-elektrochemische Kopplungsphänomen anhand einer multiphysikalischen Simulation an dem ausgewählten SEES untersucht werden. Dabei soll herausgefunden werden, inwiefern mechanische Belastungen Auswirkungen auf elektrische Eigenschaften haben.

Zu Beginn werden grundlegende theoretische Kenntnisse für die Bearbeitung aufgearbeitet und zusammengefasst. Im Anschluss daran erfolgt die Analyse zum Stand der

Forschung. Innerhalb dieses Abschnitts wird eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden die in der Literatur aufzufindenden SEES durch quantitative Bewertung verglichen. Daraus ergibt sich die Auswahl eines Favoriten. Weiterhin wird ein UAV-Anwendungsfall ausgewählt und analysiert. Für dieses UAV wird ein Konzept zur Integration eines ausgewählten SEES vorgestellt. Diesbezüglich erfolgen weiterführend Berechnungen zu elektrischen Eigenschaften und mechanischen Beanspruchungen. Im darauffolgenden Kapitel erfolgt eine Untersuchung zur Mechanik am SEES in definierten, detailgetreuen Funktionsbereichen mittels numerischer Simulation. Für einen mechanisch-elektrochemisch identifizierten Kopplungsbereich erfolgt abschließend eine multiphysikalische Simulationsberechnung.

2 Grundlagen

Zu Beginn dieser Thesis werden Grundlagen zu SEES erklärt und weiterhin wird der relevante Stand der Forschung ausgewertet. Dabei werden die Arten von SEES erläutert. Schließlich wird ein SEES zur Integration ausgewählt. Dessen Aufbau und Funktionsweise wird anschließend beschrieben. Ferner erfolgt eine ausgiebige Recherche bezüglich der Eigenschaften aktueller struktureller Superkondensatoren (SSC). Diese werden abschließend analysiert, sodass als Zwischenergebnis ein ausgewählter SSC vorliegt. Die Materialkombination kann im weiteren Verlauf für die Integration in einen UAV-Anwendungsfall verwendet werden.

2.1 Strukturelle elektrische Energiespeicherungssysteme

SEES werden schon seit geraumer Zeit in der Forschung untersucht. Dementsprechend existieren bereits zahlreiche Versuchsergebnisse aus Experimenten zu verschiedenen Materialkombinationen. Die elektrischen und mechanischen Eigenschaften stehen dabei im Vordergrund der Betrachtung. Die Ergebnisse werden üblicherweise in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Verschiedene SEES weisen oft charakteristische Merkmale auf. Bei den SEES wird unter anderem in strukturelle Batterien (SB) und SSC unterschieden. Der Begriff Batterie ist bei der Übersetzung von der englischen Formulierung „battery“ in die deutsche Sprache nur sehr inkonsistent zu übersetzen. Im Deutschen erfolgt eine Unterscheidung zwischen Batterie und Akkumulator. Batterien sind für den Einmalgebrauch vorgesehen, während Akkus wiederaufladbar sind. Da es sich in dieser Arbeit ausschließlich um wiederaufladbare Akkus handelt, die Veröffentlichung aktueller wissenschaftlicher Literatur in der Regel jedoch in Englisch erfolgt, wird in der gesamten Thesis ebenfalls die Formulierung Batterie verwendet. Weitere ähnliche EES zu Batterie und Superkondensator (SC), welche ebenfalls strukturelle Eigenschaften mit Elektrischen kombinieren können, sind dielektrische Kondensatoren oder auch strukturelle Brennstoffzellen. Diese sollen jedoch nicht Gegenstand dieser Abhandlung sein. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist,

beschreiben beide Arten aufgrund ihrer elektrischen Eigenschaften monofunktionale Extrema von Energie- oder Leistungsdichte [9].

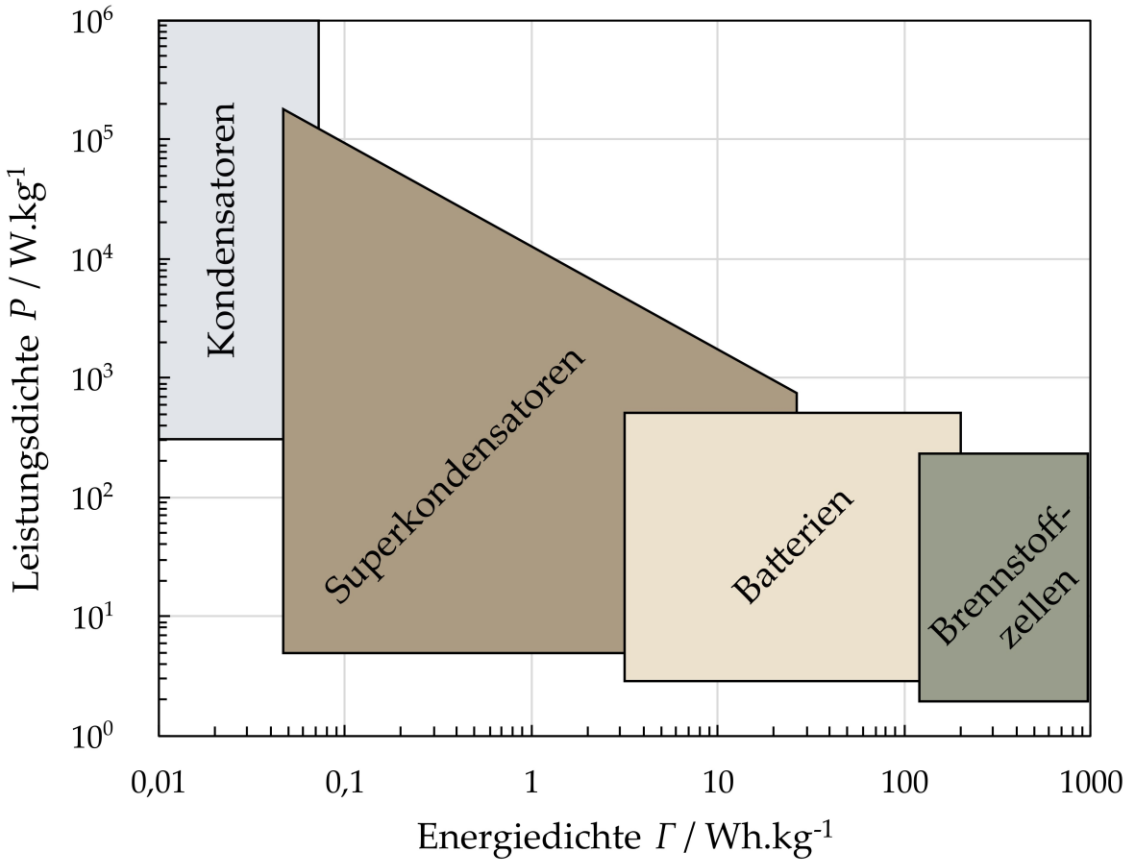

Abbildung 1: Überblick über verschiedene Arten von EES [10–13]

Da die konventionellen, dielektrischen Kondensatoren und Brennstoffzelle nach aktuellem Stand ungeeigneter für die multifunktionale Integration in eine Anwendung sind, werden nachfolgend SB und SSC als geeignetere Variante angesehen. Demnach wird bei den verbleibenden EES geprüft, welcher sich eher zur Integration in einen Anwendungsfall der Luft- und Raumfahrt anbietet. Die charakteristischen elektrischen Merkmale für die verschiedenen Arten von SB und SSC können ebenfalls sehr gut durch einen Ragone-Plot in Abbildung 1 sichtbar gemacht werden. Generell gilt im Bereich von EES, dass der Ragone-Plot eine geeignete Darstellung für die elektrische Effizienz ist. Daher dient dieser oft als erstes Bewertungskriterium. Aus Abbildung 1 geht weiterhin hervor, dass Batterien in der Regel eine gute Energiedichte, hingegen aber eine schlechte Leistungsdichte haben. SC haben im direkten Vergleich zu

SB eine bessere Leistungsdichte und eine verhältnismäßig schlechtere Energiedichte. Die Beobachtungen bezüglich der Energie- und Leistungsdichte werden unter anderem auch in dem Review-Paper von Greenhalgh et al. [14] beschrieben. Weiterführend lässt sich feststellen, dass der Stand der Forschung von SB fortgeschrittener ist, als der der SSC. Diese Aussage ist durch die Beobachtung begründet, dass derzeit vor allem Batterien kommerziell in Anwendungen genutzt und vertrieben werden. Die Unterscheidungsmerkmale der zuletzt genannten EES liegen in der Funktion und auch in den daraus resultierenden Eigenschaften. Batterien sind elektrochemische Energiespeicher. Demnach produzieren sie Energie durch die Umwandlung von chemischer Energie in elektrische. Dieser Vorgang beruht auf Redoxreaktionen [15]. Hingegen sind Kondensatoren elektrostatische Energiespeicher. Sie speichern Energie durch den Aufbau eines elektrischen Feldes. Dieses wird zwischen Schichten positiver und negativer Ladungen aufgebaut. SC beschreiben eine neue Generation von Kondensatoren, welche das Potential einer Erhöhung der Energiedichte liefern [16]. Die Gemeinsamkeit von beiden EES ist, dass bei der Entladung negative Ladungsträger (Elektronen) durch den äußeren Stromkreis zur positiven Elektrode fließen. Dort neutralisieren sich die Ladungen [15, S. 163]. Eine weitere wesentliche Unterscheidung erfolgt nach den resultierenden Eigenschaften. Neben dem bisher erläuterten funktionellen Unterschied werden deutliche charakteristische Unterschiede in den messbaren Kennwerten Leistungs- und Energiedichte deutlich. Es wurde bereits erläutert, dass SC eine hohe Leistungsdichte und verhältnismäßig geringe Energiedichte vorweisen. Die hohe Leistungsdichte führt zur kausalen Folge, dass Ladezeiten von SC im Vergleich zu SB erheblich verkürzt werden können. Peyrow Hedayati et al. [17] haben sich bereits mit der Integration von SB in einen UAV-Anwendungsfall beschäftigt. Dabei handelt es sich um das Modell Matrice 600 Pro von DJI [18]. Aufgrund der elektrochemischen Speicherung von Energie in SB, welche mittels thermodynamischer und diffusiver Phänomene gesteuert werden, treten bei der Erhöhung der Leistungsdichte erhebliche Probleme auf. Durch die sogenannte Maßstabsvergrößerung kommt es während der Lade- und Entladevorgänge zu kritischen volumetrischen Änderungen [14]. Diese

Eigenschaft wirkt sich direkt auf den Anwendungsfall aus. Außerdem besteht die Problematik, dass SB mit hoher Energiedichte sehr empfindlich gegenüber Feuchtigkeit reagieren [14]. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit gilt es weiterführend, die Optionen und Umsetzungsmöglichkeiten zu prüfen, ein gleichartiges UAV erfolgreich mit einem SSC auszustatten. Aufgrund des bekannten Kenntnisstandes und der weiteren aufgeführten Gründe fokussiert sich diese Arbeit ausschließlich auf SSC als SEES. Strukturelle Brennstoffzellen, dielektrische Kondensatoren und SB werden aufgrund der aufgeführten Argumentation nicht berücksichtigt und nicht in die Recherche eingebunden. Greenhalgh et al. [14, S. 15 f.] treffen jüngst die Aussage, dass in der kürzlichen Vergangenheit bei SSC große Entwicklungsschritte in der Komponentenentwicklung erzielt wurden. Bezüglich der Herstellung, Charakterisierung, Simulation und der Erhöhung der Skalierung wurde bisher wenig geforscht. Die Simulation ist ein schwerpunktmäßiger Gegenstand dieser Forschungsarbeit. Auf Basis der experimentell ermittelten Eigenschaften diverser SSC werden grundlegende numerische Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Bewertung der Integration eines SSC in einen Anwendungsfalls durchgeführt. Zuvor werden jedoch Aufbau und Funktion von SC erläutert.

2.2 Superkondensatoren – Aufbau und Funktionsweise

SC unterscheiden sich vom konventionellen Kondensator. Dieser gewöhnliche Kondensator besteht aus zwei elektrisch leitfähigen Elektroden, welche nicht selten metallische Platten sind. Getrennt werden diese durch ein sogenanntes Dielektrikum. Dieses ermöglicht die Ladungstrennung durch die Funktion als Isolator. Das elektrische Feld kann so aufgebaut werden. Die elektrische Kapazität C_{el} stellt dabei eine wichtige physikalische Größe als Indikator dar. Sie beschreibt die Fähigkeit eines Körpers elektrische Ladung zu speichern. Die Berechnung erfolgt mit der folgenden Gleichung.

$$C_{\mathrm{el}} = \frac{Q}{V} \tag{5}$$

Die Variable Q repräsentiert die elektrische Ladung und V die elektrische Spannung [15]. Im speziellen, aber einfachsten Anwendungsfall des Plattenkondensators, kann die Kapazität auch wie folgt ermittelt werden:

$$C_{\mathrm{PK}} = \varepsilon_0 \varepsilon_{\mathrm{r}} \frac{A_{\mathrm{PK}}}{d_{\mathrm{PK}}} \tag{6}$$

wobei ε_0, ε_{r}, A_{PK} und d_{PK} die Größen elektrische Feldkonstante, relative Permeabilität, Fläche der Platte und den Plattenabstand darstellen [12]. Durch Gleichung (6) wird deutlich, dass die Kapazität eine direkte Proportionalität zur Oberfläche und eine indirekte Proportionalität zum Plattenabstand besitzt. Diese beiden Parameter beschreiben wichtige Größen im Zuge der SSC-Betrachtung.

Zur Speicherung von größeren Mengen an elektrischer Energie eignen sich konventionelle Kondensatoren nicht. Sie können in der Regel nur wenig Energie in Höhe weniger Wh / kg speichern. Es hat sich jedoch aus diesem Bauteil eine neue technologische Generation entwickelt. Sogenannte elektrochemische Kondensatoren. Sie werden unter anderem auch als SC oder Supercaps bezeichnet [15]. Das heute weiterentwickelte Prinzip beruht auf der patentierten Erfindung von Chemiker R. A. Rightmire [19]. Solche Kondensatoren bestehen aus zwei porösen Elektroden, welche durch die Kompression von elektrisch leitfähigen Kohlenstoffpartikeln hergestellt werden können [15]. Im Grunde genommen kann bei SC in drei Gruppen unterschieden werden. Diese lauten elektrische Doppelschichtkondensatoren (EDLC), Pseudokondensatoren und deren Kombination als Hybrid-Kondensator [14]. EDLC verfügen über Kohlenstoffelektroden oder deren Derivate mit einer sehr hohen statischen Doppelschichtkapazität. Der Anteil der faradayschen Pseudokapazität ist sehr gering im Vergleich zur Gesamtkapazität. Somit beruht die Funktionsweise bei Lade- und Entladevorgängen hauptsächlich auf elektrostatischen Effekten. Bei Pseudokondensatoren kommt diese hingegen als Primärfunktion zum Einsatz. Die Kondensatorenfamilie der Pseudokondensatoren besitzt Elektroden aus Metalloxiden oder auch leitfähigen Polymeren. Der Hybridkondensator verfügt über asymmetrische Elektroden. Dabei hat eine Elektrode eine hohe Doppelschichtkapazität und die andere eine hohe

Pseudokapazität. Lithium-Ionen-Kondensatoren gehören dieser Gruppe zum Beispiel an [20]. Durch die Kombination erreichen Hybridkondensatoren in der Regel eine höhere Energiespeicherungsfähigkeit als EDLC und besitzen dennoch eine höhere Leistung als Batterien [14].

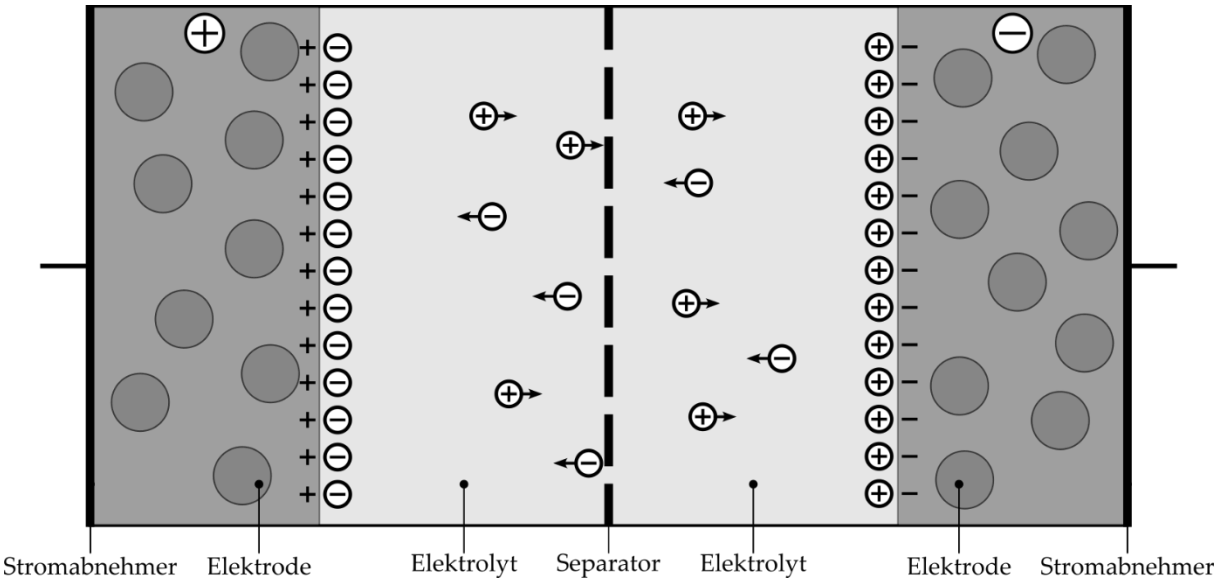

Abbildung 2: Prinzipaufbau vom SSC (Vereinfachung an Elektrodengrenze)

SC besitzen als EDLC grundlegend einen charakteristischen Aufbau. Dieser ist in Abbildung 2 dargestellt. Sie verfügen über zwei Elektroden. Um die positive Elektrode von der Negativen zu trennen und damit einen elektrischen Kurzschluss zu vermeiden, befindet sich ein Separator in der Mitte. Neben dem elektrischen Nutzen soll dieser ferner, im Sinne der Multifunktionalität, als SEES eine positive strukturmechanische Auswirkung auf den Verbund haben. Der Separator besteht aufgrund der isolierenden Wirkung oft aus einer Glasfasermatte oder Polypropylen [21, 22]. Der beschriebene Laminataufbau wird abschließend mit einem multifunktionalen Matrixmaterial infiltriert. Dieses wird Elektrolyt genannt. Das Elektrolyt ermöglicht in diesem Fall einerseits die Ionenbewegung für den Lade- und Entladeprozess und spielt andererseits eine wichtige Rolle für die mechanische Belastbarkeit [8]. An das Matrixmaterial werden seitens der mechanischen Aufgabe nach Böhm [23] folgende Anforderungen gestellt:

- Hohe mechanische Festigkeit
- Hohe thermische Beständigkeit
- Geringe Wasseraufnahme
- Niedrige Viskosität
- Gutes Benetzungsvermögen zur Verstärkungsfaser
- Gute Haftung an Glas- und Kohlenstofffasern
- Niedrige Dichte
- Bruchdehnung größer als die der Verstärkungsfaser
- Niedrige Schwindung

Durch die Erfüllung aller aufgeführten Eigenschaften kann ein multifunktionaler Laminataufbau erzeugt werden, welcher Ausblick auf die angestrebten und geforderten elektrischen und strukturmechanischen Anforderungen hervorruft.

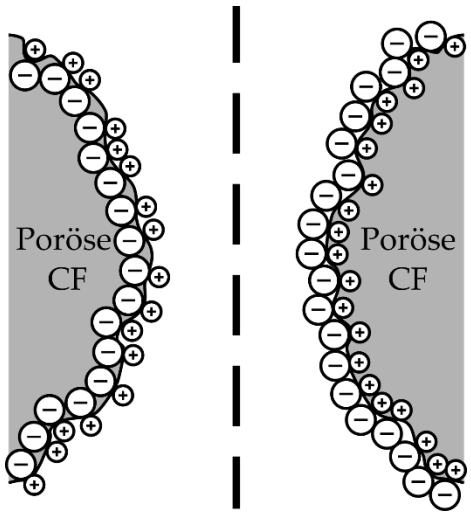

Abbildung 3: Detail: Funktion an den CF-Elektroden

Beim Ladevorgang sollen geladene Ionen an der Elektrodenoberfläche gespeichert werden, siehe Abbildung 3. Die Elektrodenoberfläche ist dabei porös. Somit können sich mehr Ladungsträger in Form einer Schicht ansammeln. Beim Entladen wandern diese, wie in Abbildung 2 dargestellt, zurück. Der Ladevorgang funktioniert durch das Anlegen einer Spannung. Dadurch wird eine Polarisation an der Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt hervorgerufen. Somit wandern positiv geladene Ionen im Elektrolyt zur Oberfläche der Kathode und negativ geladene Ionen zur Oberfläche

der Anode [12]. Als Effekt entsteht aus dem SC praktisch ein doppelter Kondensator, welcher dabei in Serie geschaltet ist [24].

SC haben, wie bereits erwähnt, den Vorteil einer verhältnismäßig hohen Leistungsdichte. Dadurch lassen sie sich schnell laden und entladen. Die Lebensdauer erstreckt sich aufgrund der Funktionsweise über 500.000 Ladezyklen [25]. Im Gegensatz zu Batterien haben diese zusätzlich ein exzellentes Tieftemperaturverhalten. Demgegenüber stehen Nachteile wie beispielsweise die niedrige Energiedichte, eine schnellere Selbstentladung und erhöhte Kosten [20].

Die Elektrode wird bei SSC oft auf Kohlenstoffbasis hergestellt. Dabei ist eine möglichst große Oberfläche wichtig, damit sich viele Ionen an der Elektrode sammeln können [14]. Dies wirkt sich in Analogie zum Prinzip der Oberflächenvergrößerung positiv auf die elektrischen Eigenschaften aus. Der Kohlenstoff ist in verschiedenen Arten aufzufinden. Unter anderem wird er in Form von Kohlenstoffnanofasern (CNF) oder Kohlenstoffnanoröhren (CNT) eingesetzt. Auch nutzt man ihn in der Modifikation als Graphenoxid (GO). Dieses ist ein chemischer Verbund aus Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff [26]. Bei dem GO wird versucht den Sauerstoffgehalt niedrig zu halten. Die daraus entstehende chemische Zusammensetzung wird auch reduziertes Graphenoxid (rGO) genannt. Alle Vorkommensarten des Kohlenstoffs haben verschiedene Eigenschaften. Ein wesentliches Ziel ist jedoch stets eine hohe Oberfläche der Elektrode zu erhalten. Neben den genannten kohlenstoffbasierten Elektroden gibt es auch Vertreter, welche nicht auf Kohlenstoff beruhen. Ein Beispiel sind Aramidnanofasern [14]. Die Elektrode sollte unabhängig vom Material im Allgemeinen eine hohe elektrische Konduktivität, eine große elektrochemische aktive Oberfläche, hohe elektrochemische und thermische Stabilität und eine große Oberflächenbenetzbarkeit vorweisen [27].

Der Elektrolyt spielt ebenfalls eine sehr wichtige Rolle im SC. Es hat wesentlichen Einfluss während der Lade- und Entladevorgänge, da es die Ionenbewegung zwischen den entgegengesetzt geladenen Elektroden ermöglicht [28]. Aufgrund dieser

wichtigen Aufgabe gibt es eine Vielzahl von Elektrolyttypen. Diese sind in Abbildung 4 dargestellt.

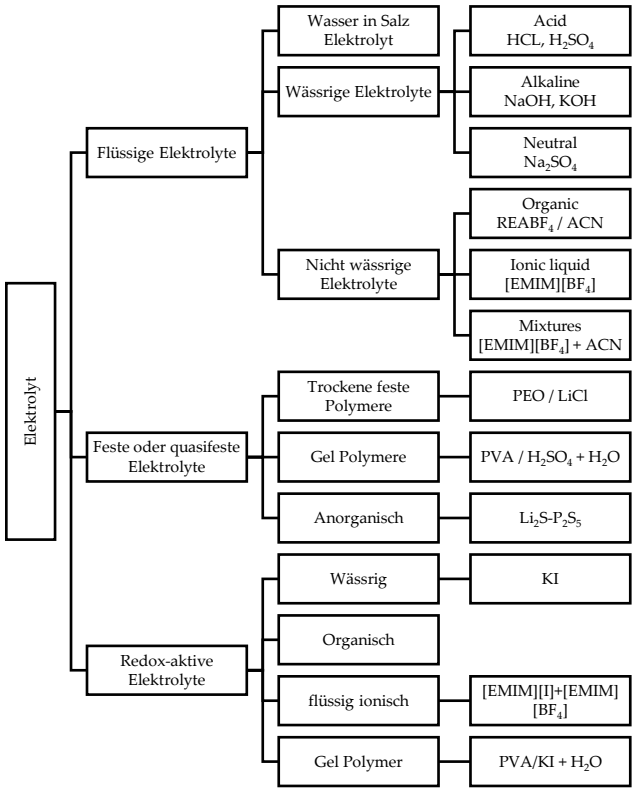

Abbildung 4: Typen von Elektrolyt [28]

Die Auswahl des Elektrolyten gilt nach Pal et al. [28] als wesentliche Einflussgröße, um einen sicheren SC mit sehr guten Eigenschaften zu erhalten. Das Ziel alle Anforderungen perfekt zu erfüllen, konnte jedoch bis heute nicht erreicht werden. Ein Beispiel beschreibt der Einsatz eines Festkörperelektrolyt anstelle eines flüssigen Elektrolyten oder Polymerelektrolyten Durch das Festkörperelektrolyt könnte die mechanische Festigkeit wesentlich erhöht werden. In diesem Fall erhöht sich ebenfalls die Einsatztemperatur. Weiterhin würde man eine unipolare Leitfähigkeit des Elektrolyten erreichen. Auch könnte dieser Typ die Dichtheitsprobleme des flüssigen Elektrolyten lösen. Demgegenüber steht jedoch, dass die Festkörperelektrolyte hingegen über eine schlechtere Ionenleitfähigkeit verfügen [29]. Daraus folgen schlechtere, elektrische Eigenschaften. Somit sieht man, dass ein geeigneter Elektrolyt gefunden und ausgewählt werden muss, welches ein Optimum aus allen Anforderungen darstellt. Die Einflüsse und Auswirkungen sind offensichtlich komplexer Natur. Somit gestaltet sich die

Auswahl einer guten Elektroden-Elektrolytkombination als äußerst schwierig. Dies begründet auch die derzeitig stark ausgeprägte Forschung in diesem Gebiet der Komponentenentwicklung.

2.3 Berechnungsgrößen am strukturellen Superkondensator

Bisher wurden Aufbau und Funktionsweise am SC vorgestellt. Im weiteren Verlauf soll sich der Inhalt dieser Thesis in Richtung der SSC orientieren. Diese stellen erst die multifunktionale Schnittstelle von mechanischen und elektrischen Eigenschaften dar. Dabei werden nun die bedeutsamsten Berechnungsgrößen vorgestellt. Diese beziehen sich auf die charakteristischen Eigenschaften des SSC und werden meist im Experiment ermittelt. Somit gehen Berechnung und Simulation immer mit diesen einher, da die nachfolgenden physikalischen Größen als Materialdaten zugrunde liegen. Zu Beginn werden die wesentlichen elektrischen und mechanischen Kennzahlen erläutert, welche im weiteren Verlauf von Interesse für die Berechnung und Bewertung von SSC-Materialkombination sind. Diese dienen später als quantitative Entscheidungsgrundlage zur Auswahl eines geeigneten SEES. Weiterhin dienen diese als Grundlage für die Materialdaten in der Finite-Elemente-(FE)-Simulation.

2.3.1 Elektrische Größen

Eine wesentliche Größe als elektrochemische Kennzahl ist die spezifische Kapazität. Diese beschreibt wie im Kapitel 2.2 erwähnt, die Fähigkeit elektrische Ladung zu speichern. Zur Ermittlung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine Option ist die Berechnung mit Hilfe der Cyclovoltammetrie-(CV)-Vorgehensweise. Diese Methode wird in der Elektrochemie häufig angewendet. Dabei wird für verschiedene Spannungen die aktuelle Stromstärke gemessen und durch ein Stromstärke-Spannungsdiagramm ausgewertet. Die spezifische Kapazität $\bar{C}$ wird durch die Fläche zwischen dem resultierenden Graph abgebildet. Somit ergibt sich eine Berechnungskonvention [30, 31].

$$\bar{C} = \frac{1}{2m_{\text{aktiv}} \cdot v \cdot \Delta \text{V}} \int_{V_0}^{V} I(V)\, dV \tag{7}$$

In dieser Gleichung beschreibt m_{aktiv} die Masse des aktiven Materials an der Elektrode, v die voltammetrische Scanrate und ΔV das Spannungsintervall. Das Integral ist der Ausdruck für die Fläche zwischen dem Graphen der Stromstärke I im CV-Diagramm. Mit dieser Größe kann die Energiedichte Γ ermittelt werden. Diese Größe wird auch spezifische Energie genannt und beschreibt einen wichtigen Indikator zur Bewertung von EES. Es erfolgt eine Unterscheidung in die Arten gravimetrisch und volumetrisch. Die gravimetrische Energiedichte bezieht sich immer auf die Masse des Systems. Hingegen stellt die volumetrische Energiedichte den Bezug zum Volumen her. In der Luft- und Raumfahrt zählt die Gewichtsreduktion zu einer der am stärksten gewichteten Anforderungen [32]. Aus diesem Grund bezieht sich der Begriff der Energiedichte nachfolgend stets auf die gravimetrische Energiedichte. Sie gibt an, wie viel Energie gespeichert ist und kann wie folgt ermittelt werden [30, 33]:

$$\Gamma = \frac{1}{2}\bar{C}(\Delta \mathrm{V})^2 \tag{8}$$

Durch die Energiedichte wird das Verhältnis von gespeicherter Energie pro Masse angegeben. Derzeitig ist nicht exakt festgelegt, ob die Masse der Elektrode oder die Gesamtmasse des Systems als Relation zu verwenden ist. Demnach findet man in unterschiedlicher Literatur auch unterschiedliche Referenzen. Dies führt schließlich dazu, dass die direkte Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Forschungsarbeiten erschwert wird. Die mitgeführte, gespeicherte Energie soll möglichst hoch sein. Dadurch wird eine maximale Flugzeit erzielt. Um ein minimales Gewicht der Struktur zu erreichen, muss die Masse dementsprechend niedrig sein. Somit ergibt sich eine möglichst hohe Energiedichte als Zielsetzung.

In Verbindung mit der Leistungsdichte P können die Ragone-Plots erstellt werden. Die Leistungsdichte, oder spezifische Leistung, gibt an, wie viel Leistung pro Masseneinheit aus dem Energiespeicher entnommen werden kann [34]. Dabei beschreibt die Leistung die Möglichkeit zur Umsetzung der Energie pro Zeit. Somit resultiert nachfolgender Ausdruck zur Ermittlung der Leistungsdichte [33]. Darin gibt die Variable t die Zeit an.

$$\mathrm{P} = \frac{\Gamma}{t} \tag{9}$$

2.3.2 Mechanische Größen

Zur Bewertung der strukturmechanischen Eigenschaften werden standardgemäß Elastizitätsmoduln aus Zug, Druck oder Biegeversuchen und die dazugehörigen Festigkeiten verwendet. Diese Größen zählen aus Sicht der Struktur- und Werkstoffmechanik zu den bedeutendsten Kriterien im Zuge der Bewertungsaufgabe.

Nach der Kontinuumsmechanik benötigt man je nach Anwendungsfall unterschiedlich viele Materialparameter für Elastizitäts- oder Nachgiebigkeitsmatrix. Dieser Tensor stellt die Verknüpfung von Spannungen σ und Dehnungen ε dar. Für ein anisotropes lineares Material gilt beispielsweise nachfolgende Abhängigkeit.

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = \boldsymbol{C}_{ijkl}\boldsymbol{\varepsilon}_{kl} \tag{10}$$

Dabei beschreibt $\boldsymbol{C}$ den Materialsteifigkeitstensor. Dieser wird auch Elastizitätstensor genannt. Ausgeschrieben bedeutet die Formulierung:

$$\begin{pmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{33}\\ \sigma_{12}\\ \sigma_{23}\\ \sigma_{31}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26}\\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36}\\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46}\\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56}\\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\varepsilon_{11}\\ \varepsilon_{22}\\ \varepsilon_{33}\\ 2\varepsilon_{12}\\ 2\varepsilon_{23}\\ 2\varepsilon_{31}\end{pmatrix} \tag{11}$$

Aufgrund der Konvention

$$a_{ij} = a_{ji} \tag{12}$$

ergeben sich 21 unabhängige Materialparameter, welche im Experiment ermittelt werden müssen. Die Umsetzung ist mit viel Aufwand verbunden [35]. Dementsprechend gibt es im Rahmen der Elastizitätstheorie Annahmen und Vereinfachungen. Sie lauten unter anderem: Isotropie, transversale Isotropie oder Orthotropie. Diese Typen sind wichtig für die durchzuführenden FE-Simulationen.

Orthotropie beschreibt ein Materialverhalten mit drei aufeinander senkrecht stehenden Symmetrieebenen. In diesem Fall wird der Nachgiebigkeitstensor, wie in Gleichung (13) abgebildet, befüllt.

$$\boldsymbol{D}_{\text{ortho}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} \end{pmatrix} \tag{13}$$

Somit sind für die Beschreibung von orthotropem Materialverhalten folgende Parameter von Bedeutung:

- Elastizitätsmoduln E_1, E_2 und E_3
- Poissonzahl ν_{12}, ν_{13} und ν_{23}
- Schubmoduln G_{12}, G_{13} und G_{23}

In Summe werden demnach neun unabhängige Materialparameter verlangt, welche im Experiment ermittelt werden müssen.

Eine weitere Vereinfachung beschreibt die Transversalisotropie. Bei dieser besteht Materialsymmetrie zu einer Ebene. Somit ändern sich die Materialeigenschaften nicht, wenn das Materialkoordinatensystem um die Normale der Symmetrieebene rotiert wird. Im folgenden Fall wird Symmetrie zur x-y-Ebene abgebildet. Die Normale liegt also in z-Richtung. Somit ist E_3 das Elastizitätsmodul in Normalenrichtung und E_1 das Elastizitätsmodul tangential zur Symmetrieebene. Querkontraktion für Normalenrichtung und tangentialer Richtung sind ν_{13} und ν_{12}. Weiterhin beschreibt G_{13} das Schubmodul bei Schubdeformation in Normalenrichtung. Demnach ergeben sich allgemein gehalten immer fünf unabhängige Materialparameter.

$$\boldsymbol{D}_{\text{tr-iso}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{\sqrt{E_1 E_3}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{\sqrt{E_1 E_3}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{\sqrt{E_1 E_3}} & -\frac{\nu_{13}}{\sqrt{E_1 E_3}} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{12})}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} \end{pmatrix} \tag{14}$$

Die einfachste Annahme ist lineare Isotopie. Dort verfügt das Material über gleiche Eigenschaften in alle Richtungen. Dadurch kann das Materialverhalten mittels zwei Parameter beschrieben werden. Diese lauten Elastizitätsmodul und Poissonzahl ν. Die Nachgiebigkeitsmatrix sieht dabei wie folgt aus.

$$\boldsymbol{D}_{\text{iso}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu)}{E} \end{pmatrix} \tag{15}$$

Demnach reichen bei der Beschreibung des linear elastischen Materialverhaltens mit Hilfe isotroper Annahmen zwei Materialparameter aus [36].

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls erfolgt über das Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus Experimenten. Die Kenngröße der Materialsteifigkeit beschreibt mechanische Eigenschaften des Materials. Dabei können beispielsweise Zug-, Druck- oder Biegeversuche durchgeführt werden. Bei diesen Versuchen wird die aufgebrachte Kraft F und die daraus resultierende Verschiebung u gemessen und ausgewertet. Aus den

Messgrößen können dann Spannung und technische Dehnung ermittelt werden. Die Gleichungen zur Auswertung werden exemplarisch am Zugversuch abgebildet:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{16}$$

$$\varepsilon = \frac{u}{l} \tag{17}$$

Die Variable A beschreibt die Querschnittsfläche der Zugprobe und l die Ausgangslänge vor der Kraftaufbringung. Im Versuch entsteht ein materialcharakteristischer Graph. Dieser hat bei kleinen Dehnungen oft einen nahezu linearen Anstieg. Der Anstieg wird durch die Größe Elastizitätsmodul dargestellt und kann mit nachfolgender Gleichung ermittelt werden.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{18}$$

In Abhängigkeit zu den anliegenden Lastfällen können diese Materialparameter in der später folgenden Simulation als Grundlage für die Modellbildung eingesetzt werden.

Somit wurde auch die Abhängigkeit von Spannung und technische Dehnung durch die Formulierung der Kontinuumsmechanik kurz erläutert. Zu erwähnen sei, dass diese Erläuterung nicht vollständig ist. Es existieren weitere Fälle, welche jedoch für die Anwendung im Rahmen dieser Thesis nicht relevant sind.

3 Stand der Forschung

Nachdem nun grundlegendes Wissen für SEES zusammengefasst und kurz erläutert wurde, wird nachfolgend der aktuelle Stand der Forschung bezüglich SSC dargestellt. Dies erfolgt mittels einer Literaturrecherche, in welcher diverse experimentelle Kennwerte gesammelt werden.

3.1 Literaturrecherche – Strukturelle Superkondensatoren

Im ersten Schritt gilt es einen geeigneten SEES mithilfe der wesentlichen Indikatoren ausfindig zu machen. Dabei liegt der Fokus auf SSC. Als Methode wird ein systematischer Ansatz durchgeführt, siehe Abbildung 5. Die gesichtete Literatur wird auf experimentell ermittelte Materialdaten untersucht. Diese Daten werden in Form einer Tabelle zusammengefasst. Nachdem die Daten aufbereitet sind, können damit diverse Diagramme erstellt werden. Weiterhin ergibt sich die Möglichkeit die Daten nach definierten Werten zu filtern und somit einen SSC-Favoriten ausfindig zu machen. Dieser bietet sich im weiteren Verlauf als Kandidat für den Einsatz im Anwendungsfall an.

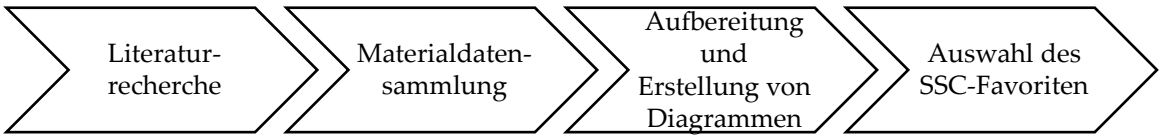

Abbildung 5: Systematischer Ansatz zur Auswahl eines SSC

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde eine Datensammlung über 182 Einträge aus 93 verschiedenen Quellen erstellt. Gesammelt wurden folgende experimentelle Daten: Elektrodenmaterial, Elektrolyt, Separator, spezifische Kapazität, Energiedichte, Leistungsdichte, Zug-, Druck-, oder Biegemodul und Festigkeit. Dabei konnten nicht für jede Kombination alle Einträge recherchiert werden. Grund hierfür ist, dass nicht in jeder Publikation alle Kenngrößen im Versuch ermittelt werden. Üblicherweise beschränken sich die Untersuchungen lediglich auf die relevanten Kenngrößen für die jeweilige Veröffentlichung. Der Fokus der Recherchearbeit lag vor allem auf SSC-Experimenten der jüngsten Vergangenheit. Dort ist die Wahrscheinlichkeit aufgrund

neuer Erkenntnisse und stetiger Weiterentwicklung am höchsten, gut funktionierende Materialkombinationen zu finden. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass es zum jetzigen Zeitpunkt ein noch besserer SSC existiert, welcher nicht in der Sammlung enthalten ist. Aufgrund der zahlreichen Einträge in der Datensammlung, wird die Datenlage zur weiteren Bearbeitung und Analyse als ausreichend befunden. Die Anzahl der Daten bildet den aktuellen Stand der Forschung gut ab. Um die Daten übersichtlich auszuwerten, wird auf die Darstellung mittels Punktdiagramme zurückgegriffen. Dabei werden die verschiedenen Eigenschaften nach Tabelle 1 gegenübergestellt.

Tabelle 1: Übersicht über die Auswertungsdiagramme

Nummer	Abszisse	Ordinate
1	Energiedichte	Leistungsdichte
2	Energiedichte	Elastizitätsmodul
3	Energiedichte	Festigkeit
4	Elastizitätsmodul	Spezifische Kapazität
5	Festigkeit	Spezifische Kapazität

Das Diagramm, welches die Abhängigkeit von Energie- und Leistungsdichte darstellt, hat einen besonderen Stellenwert für den Vergleich von EES und wird Ragone-Plot genannt [37].

3.1.1 Ragone-Plot – Energiedichte versus Leistungsdichte

Der Ragone-Plot wird für den Vergleich von elektrischen Energiespeichergeräten genutzt. Dabei wird die Energiespeicherungsdichte (in der Einheit Wh / kg) gegenüber der Leistungsdichte (in der Einheit W / kg) aufgetragen. Die Einteilung beider Achsen erfolgt dabei logarithmisch [37, 38]. Zusätzlich können noch sogenannte Isokurven dargestellt werden. Sie beschreiben das Verhältnis von Energiedichte und Leistungsdichte und zeigen dabei die Zeit an, welche das Gerät mit den eingestellten Parametern betrieben werden kann [39].

Im dargestellten Diagramm werden die SSC zunächst in zwei Hauptgruppen unterteilt. Alle gesichteten EES wurden in diese eingeteilt. Einerseits gibt es die Elektroden, welche lediglich auf Kohlenstoff basieren und auf der anderen Seite wird in sogenannte funktionalisierte Elektroden eingeteilt. Diese bestehen, wie Gruppe 1, ebenfalls auf Kohlenstoffbasis, haben aber noch zusätzliche Bestandteile. Beispiele hierfür sind: Beschichtungen mit $MnFe_2O_4$, $NiCo_2O_4$ oder $CoFe_2O_4$. Durch den Überzug werden in der Regel bessere Eigenschaften erzielt. Die Auswirkungen sind sehr komplex. Beispielsweise sorgt eine Nickelbeschichtung für bessere eine Biegesteifigkeit [40].

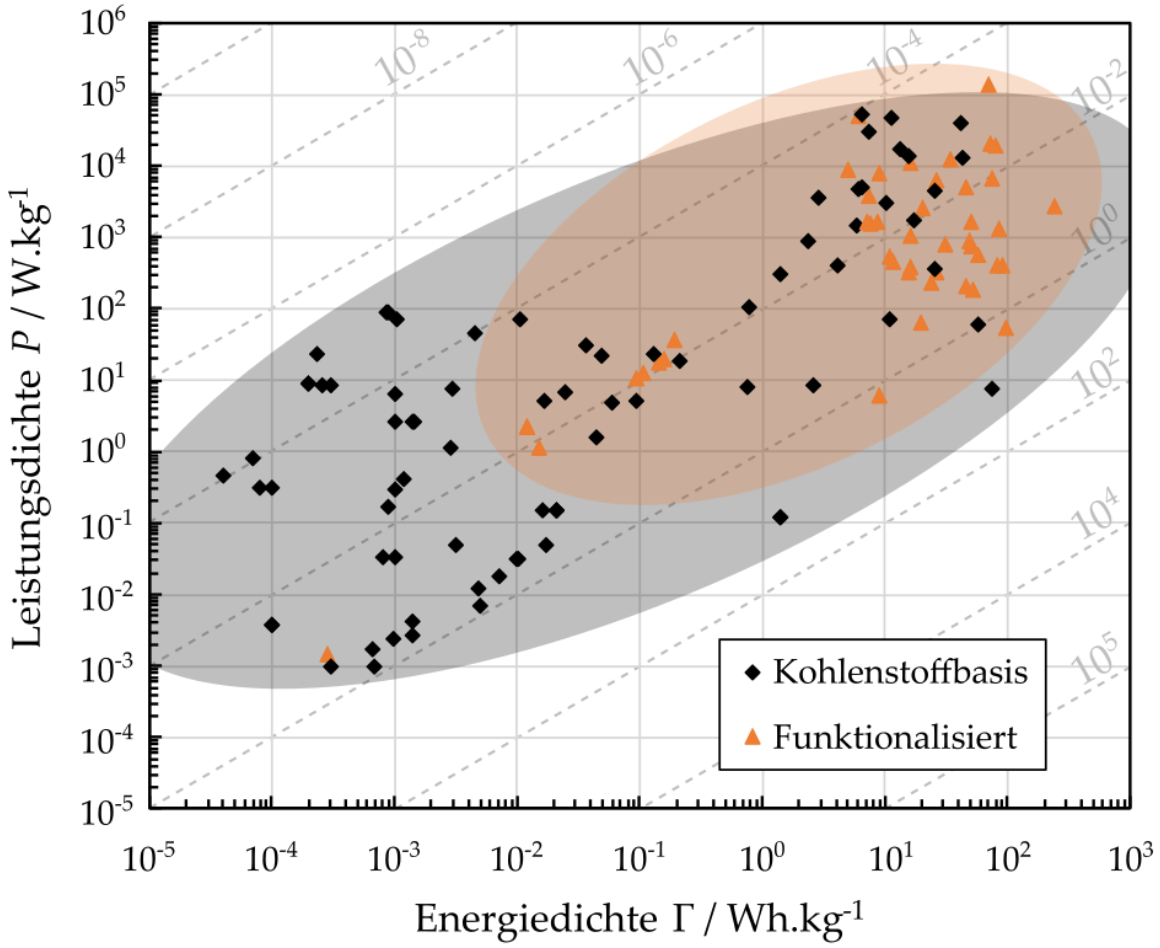

Abbildung 6: Ragone-Plot: Energiedichte versus Leistungsdichte

Die erste Gruppe wird im Diagramm mit schwarzen Rauten dargestellt und die zweite funktionalisierte Gruppe durch orange Dreiecke. Diese Darstellungskonvention wird

in allen nachfolgenden Abbildungen in Bezug auf die Analyse des Standes der Forschung angewendet.

Auf den ersten Blick bestätigt sich die Annahme, dass die Eigenschaften durch die Funktionalisierung besser sind als die der rein kohlenstoffbasierten Elektroden. Aufgrund der Diagramm Darstellung beschränkt sich diese Aussage jedoch auf die elektrochemischen Eigenschaften Energie- und Leistungsdichte. Die Daten erstrecken sich über einen Bereich von 0 bis 240 Wh / kg bei der Energiedichte und einer Leistungsdichte im Intervall von 0 bis 136.000 W / kg. Dabei lassen sich zwei Hauptbereiche mit erhöhter Vorkommens-Dichte lokalisieren. Ein Bereich befindet sich im unteren Areal der beiden Vergleichskriterien und ist demnach aus Sicht der elektrischen Merkmale relativ unattraktiv für die weitere Betrachtung. Der zweite Bereich befindet sich bei einer Energiedichte größer als 1 Wh / kg und einer Leistungsdichte von ungefähr über 5 W / kg. Diesen Bereich gilt es folglich näher zu Betrachten. Neben den benannten elektrischen Eigenschaften müssen aber auch weitere Eigenschaften berücksichtigt werden. Daher werden nachfolgend zunächst alle Diagramme nach Tabelle 1 vorgestellt und analysiert. Im Anschluss darauf besteht die Zielsetzung, Mindestwerte für die Indikatoren festzulegen. Somit kann die Materialkollektion auf die besten SSC reduziert werden und die Auswahl wird anhand einer quantitativen Vorgehensweise umgesetzt. Bei dieser Vorgehensweise werden alle Parameter berücksichtigt. Zunächst sollen die Top-Favoriten aus elektrochemischer Sicht anhand des Ragone-Plots visualisiert werden. Diese werden in der Abbildung 7 einzeln dargestellt.

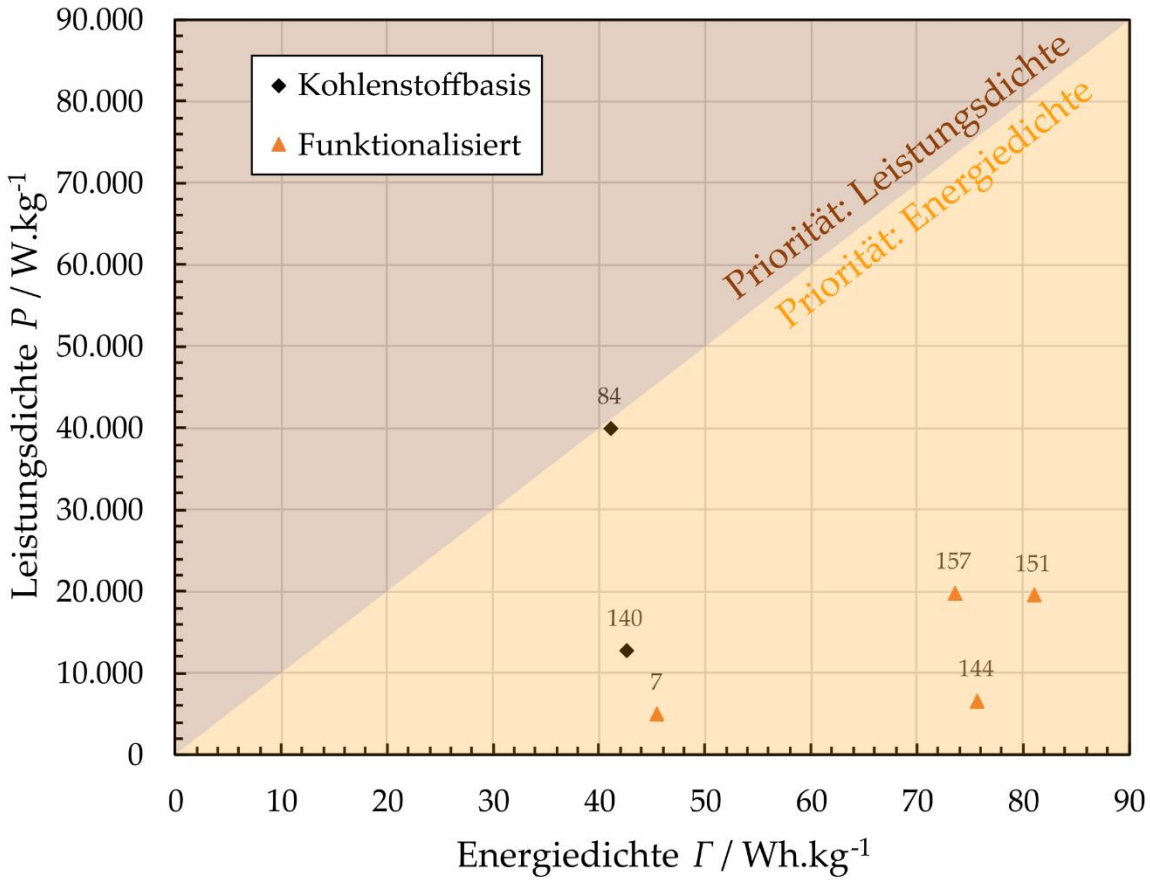

Abbildung 7: Favoriten aus dem Ragone-Plot mit Prioritäten

Die SSC-Kombinationen wurden gefiltert. Von beiden Vergleichskriterien wurden die Top 20 Kandidaten in Betracht gezogen. Durch die Filterung verbleiben schließlich die besten sechs SSC. Deren Material kann in Tabelle 2 eingesehen werden.

Tabelle 2: Ragone-Plot - Top 6 Datenbeschriftung

Nummer	Elektrode	Elektrolyt
7	Co_3O_4 beschichtete Kohlenstoffnanofasern mit Stickstoff	PVA / 3 M H_2SO_4 Gel
84	CNT / Papier	[EMIM][TFSI]-silica
140	Carbon Nano-Onion	3 M KOH
144	$MnFe_2O_4$-$ZnFe_2O_4$ / Graphen	KOH
151	$NiMoO_4$ / Graphen Nanosheets / Nanofasern	2 M LiOH
157	MoS_2 – Graphen	1 M Na_2SO_4

Im Diagrammbereich kann in zwei Gebiete unterschieden werden. Die Trennung erfolgt anhand einer linearen Funktion mit nachfolgender Vorschrift.

$$P(\Gamma) = 100\ \Gamma \tag{19}$$

Der Bereich oberhalb der diagonal verlaufenden Trennlinie kann als Prioritätsbereich Leistungsdichte und der unterhalb als Prioritätsbereich der Energiedichte bezeichnet werden. Demnach kann schnell eingesehen werden, welcher SSC bessere Eigenschaften der beiden Indikatoren aufweist.

Im Allgemeinen lässt sich feststellen, dass aufgrund der vorhanden Datenlage SSC mit einer Energiedichte von über 20 Wh / kg und einer Leistungsdichte größer 1000 W / kg als verhältnismäßig gut erachtet werden können.

3.1.2 Ashby-Diagramm - Energiedichte versus Elastizitätsmodul

Um den Bezug von elektrochemischen Eigenschaften mit mechanischen Merkmalen zu koppeln, wird weiterhin ein Vergleich von Energiedichte mit dem Elastizitätsmodul grafisch abgebildet. Relevante Formeln für diese Kopplung sind in den Gleichungen (16) bis (18) abgebildet. Das Elastizitätsmodul ist nach Gleichung (18) direkt proportional gegenüber der Spannung. Demnach bedeutet ein hohes Elastizitätsmodul auch bessere mechanische Eigenschaften, da sich der Anstieg des Graphen vergrößert. Somit werden SSC mit einem hohen Elastizitätsmodul favorisiert.

In Abbildung 8 ist die Abszisse ist logarithmisch dargestellt. Hingegen ist die Ordinate in regulärer kartesischer Achseneinteilung eingeteilt. Bei beiden Merkmalen erstrecken sich die SSC-Eigenschaften über einen großen Bereich. Die funktionalisierte Gruppe befindet sich überwiegend im höheren Bereich von Energiedichte und Elastizitätsmodul. Dabei sind die Eigenschaften gegenüber ausgeglichen und die SSC liegen auf einer Linie. Bei den rein kohlenstoffbasierten SSC gibt es sowohl Vertreter, welche sehr gute mechanische Eigenschaften vorweisen, dabei hingegen aber eine sehr schlechte Energiedichte haben oder eine gute Energiedichte und dafür jedoch ein schlechtes Elastizitätsmodul. Im Allgemeinen gilt es gut verträgliche

Materialkombinationen zu finden. Greenhalgh et al. [14] berichten beispielsweise, dass Carbongewebe mit Carbon Aerogel gewissen Synergien zwischen mechanischen und elektrochemischen Eigenschaften zeigen. Somit zeigt sich noch einmal die schon öfters genannte Forschungsaufgabe in der Komponentenentwicklung. Es gilt einen guten Kompromiss für beide Indikatoren zu finden. Allgemein ist weiterhin zu sehen, dass die funktionalisierten SSC nicht wesentlich bessere Eigenschaften haben als die rein Kohlenstoffbasierten.

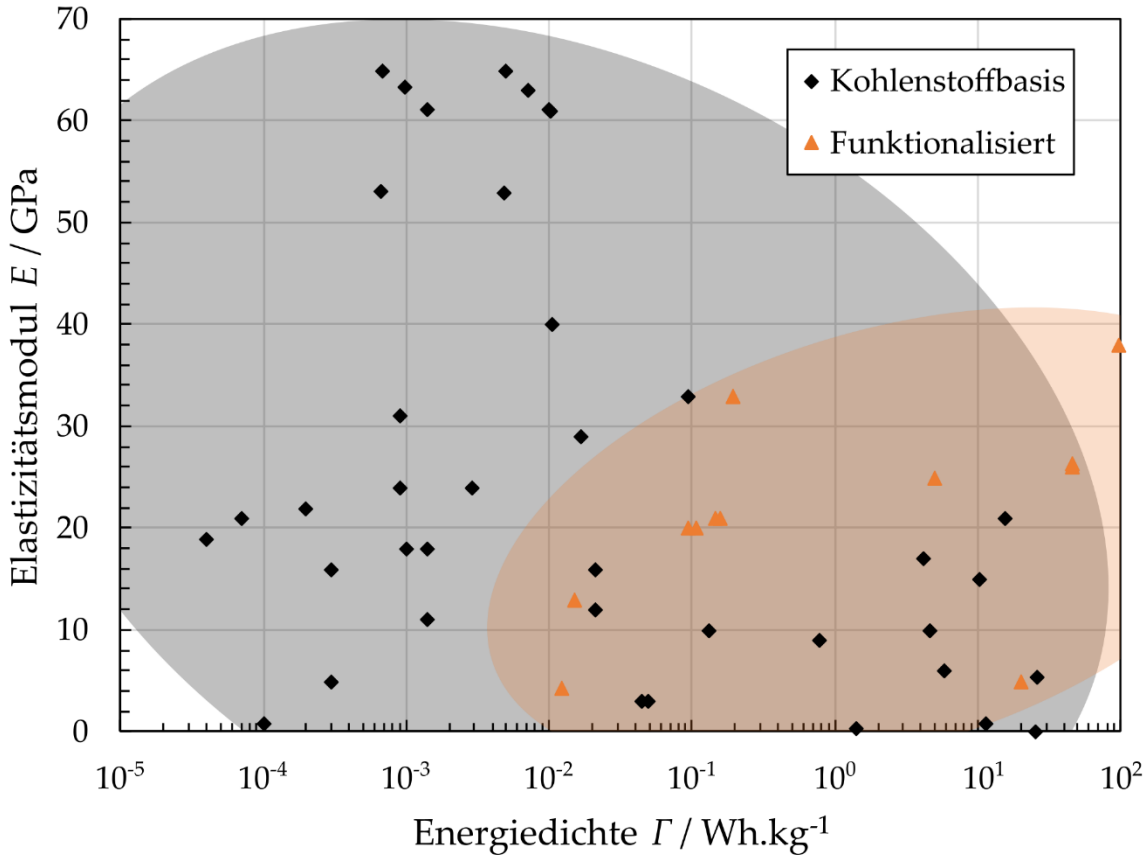

Abbildung 8: Ashby Diagramm: Energiedichte versus Elastizitätsmodul mit Klassifizierung nach Elektrodenart

Als guten quantifizierten Wert für das Elastizitätsmodul wird nach dieser Analyse der Wert 20 GPa ausgewählt. Dieser spiegelt sich auch durch andere Quellen wider [17, 41]. Im weiteren Verlauf gilt es die Belastungsfälle für den Anwendungsfall zu ermitteln. Anschließend kann die strukturmechanische Bewertung gegenüber

Bauteilversagen durchgeführt werden. Dabei wird sich zeigen, ob sich dieser zunächst subjektiv festgelegte Wert bewährt.

3.1.3 Ashby-Diagramm – Energiedichte versus Festigkeit

Da das Elastizitätsmodul nur im linearen Bereich des Materials gültig ist, wird die Energiedichte nachfolgend noch gegenüber der Festigkeit ausgewertet. Die mechanische Beanspruchbarkeit bis zum Versagensstatus, welche in Folge von Belastungen auftritt, wird Festigkeit genannt. Diese kann, wie das Elastizitätsmodul auch, im Experiment ermittelt. Man unterscheidet dabei in verschiedene Typen. Die Streckgrenze beschreibt den Punkt, an dem die linearen Materialeigenschaften in die Plastizität übergehen. Der Punkt, an dem Einschnürung am Querschnitt einsetzt, wird durch die Zugfestigkeit beschrieben. Zuletzt gibt es noch die Bruchfestigkeit. Bei dieser erfolgt der Bruch. Für diese Auswertung bietet sich die Streckgrenze an. Üblicherweise erfolgt die Dimensionierung von Bauteilen gegenüber diesem Wert.

Dem Diagramm in Abbildung 9 lässt sich entnehmen, dass nur wenige SSC eine Festigkeit im höheren Wertebereich aufweisen. Im Bereich höherer Energiedichte vernimmt man zunächst einige SSC mit geringer Festigkeit. Es gibt aber auch Vertreter, welche über der Marke von 100 MPa liegen. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass die Streckgrenze über 70 MPa liegen sollte. Oberhalb dieses Wertes existieren noch genügend SSC-Kombinationen mit annehmbarer Energiedichte. Ferner sollte die Festigkeit generell für Anwendungen im UAV-Sektor ausreichen.

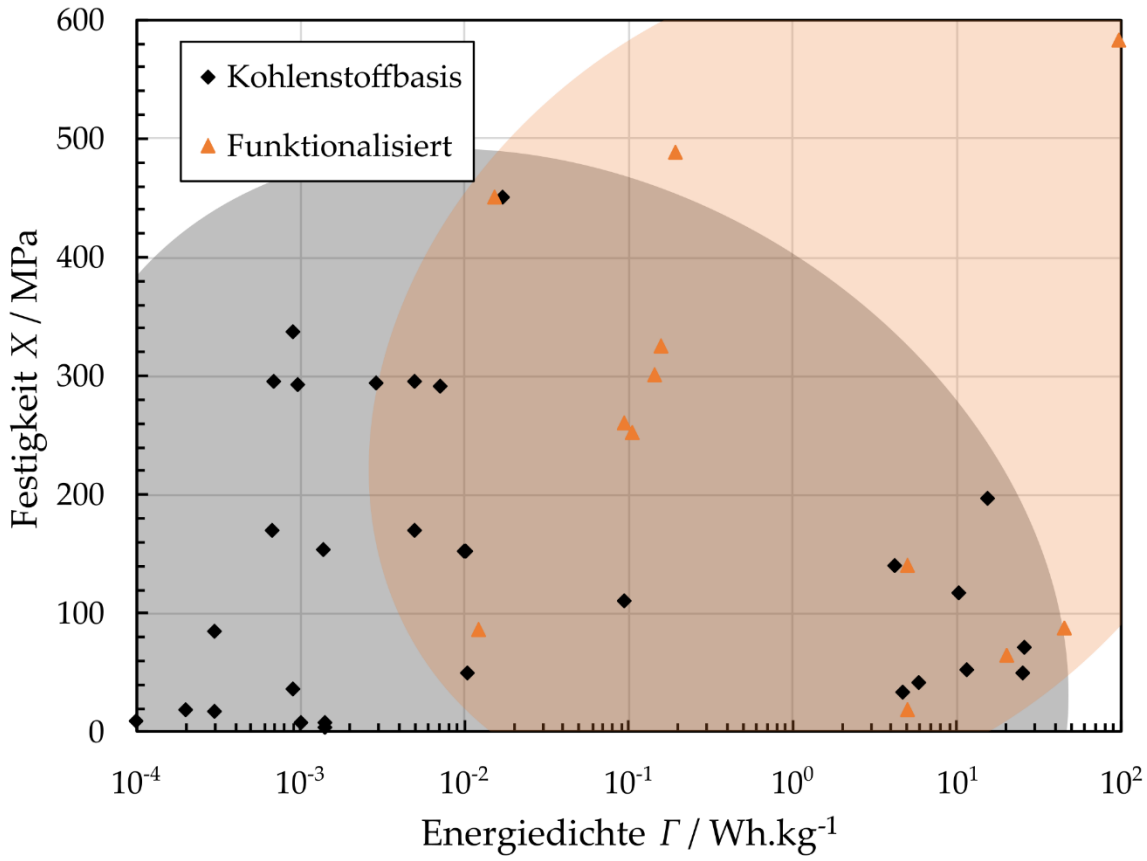

Abbildung 9: Ashby Diagramm: Energiedichte versus Festigkeit

3.1.4 Ashby-Diagramm - Spezifische Kapazität versus Elastizitätsmodul

Das Ashby-Diagramm, in dem die spezifische Kapazität gegenüber dem Elastizitätsmodul abgebildet wird, steht im physikalischen Zusammenhang mit dem in Kapitel 3.1.2 vorgestellten Plot von Energiedichte gegenüber dem Elastizitätsmodul. Die physikalische Begründung belegt Gleichung (8). Die Energie wird aus der Kapazität berechnet und ist bereits durch die Verwendung der spezifischen Kapazität mit der Masse relativiert. Demnach sind die dort getroffenen Aussagen gegenüber dem Elastizitätsmodul auch hier gültig.

Trotz des physikalischen Zusammenhanges unterscheidet sich das Diagramm in Abbildung 8 von dem in Abbildung 10. Die Begründung hierfür liegt vermutlich in der angelegten Spannung. Diese wird bei der spezifischen Energie mit verrechnet, hingegen bei der spezifischen Kapazität aber nicht.

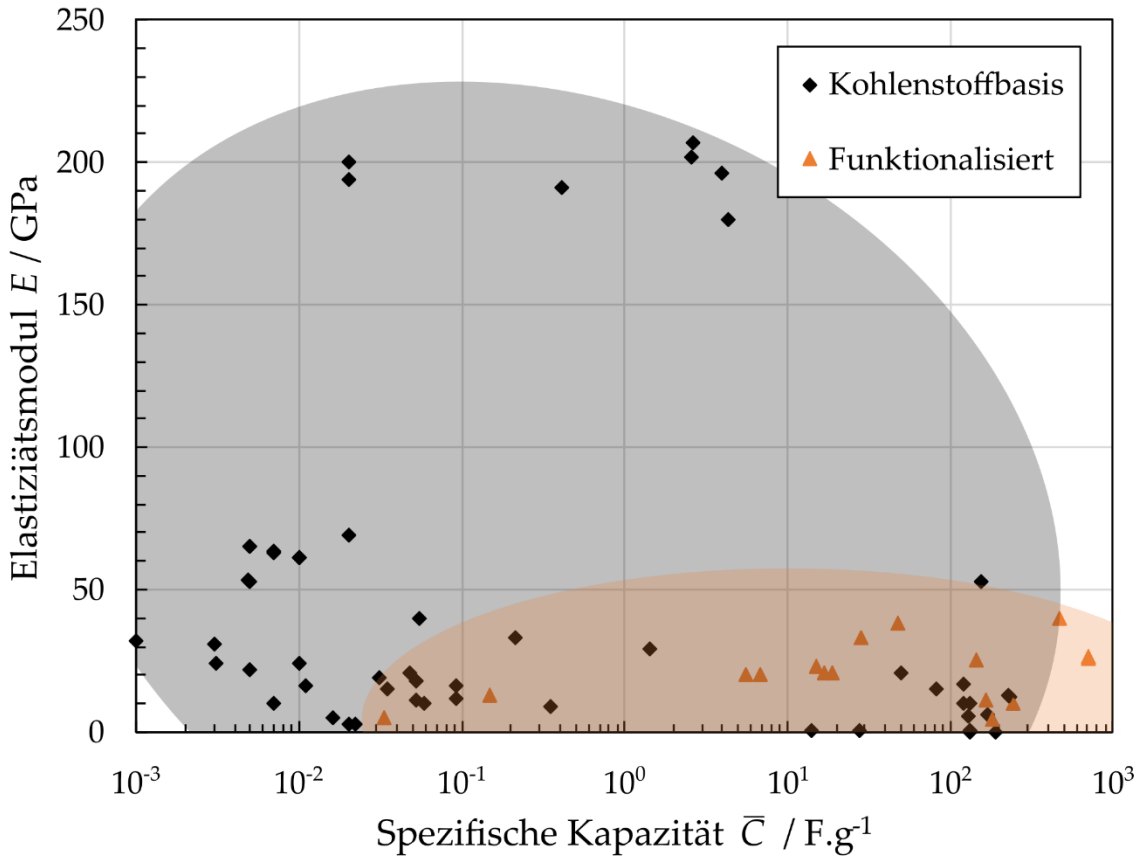

Abbildung 10: Ashby Diagramm: Spezifische Kapazität versus Elastizitätsmodul

Im Ashby Plot von spezifischer Kapazität und Elastizitätsmodul wird ersichtlich, dass sich ein Großteil der Daten im unteren Bereich des Elastizitätsmoduls über den vollständig dargestellten Bereich der spezifischen Kapazität vollstreckt. Die Einteilung der Achse von spezifischer Kapazität erfolgt dabei logarithmisch. Auch hier zeigt sich, dass nur wenige Vertreter in dem höheren Diagrammbereich beider Indikatoren vertreten sind.

3.1.5 Ashby-Diagramm – Spezifische Kapazität versus Festigkeit

Als letztes Diagramm wird die spezifische Kapazität über der Festigkeit abgebildet. Dieses Diagramm hat gewisse Vakanzen mit der Darstellung in Abbildung 9. Die Begründung hierfür entspricht in diesem Fall, wie auch im Vorangegangenen, in der physikalischen Abhängigkeit von spezifischer Kapazität und Energie. Demnach ist auch hier ein Unterschied zwischen beiden Plots zu erkennen.

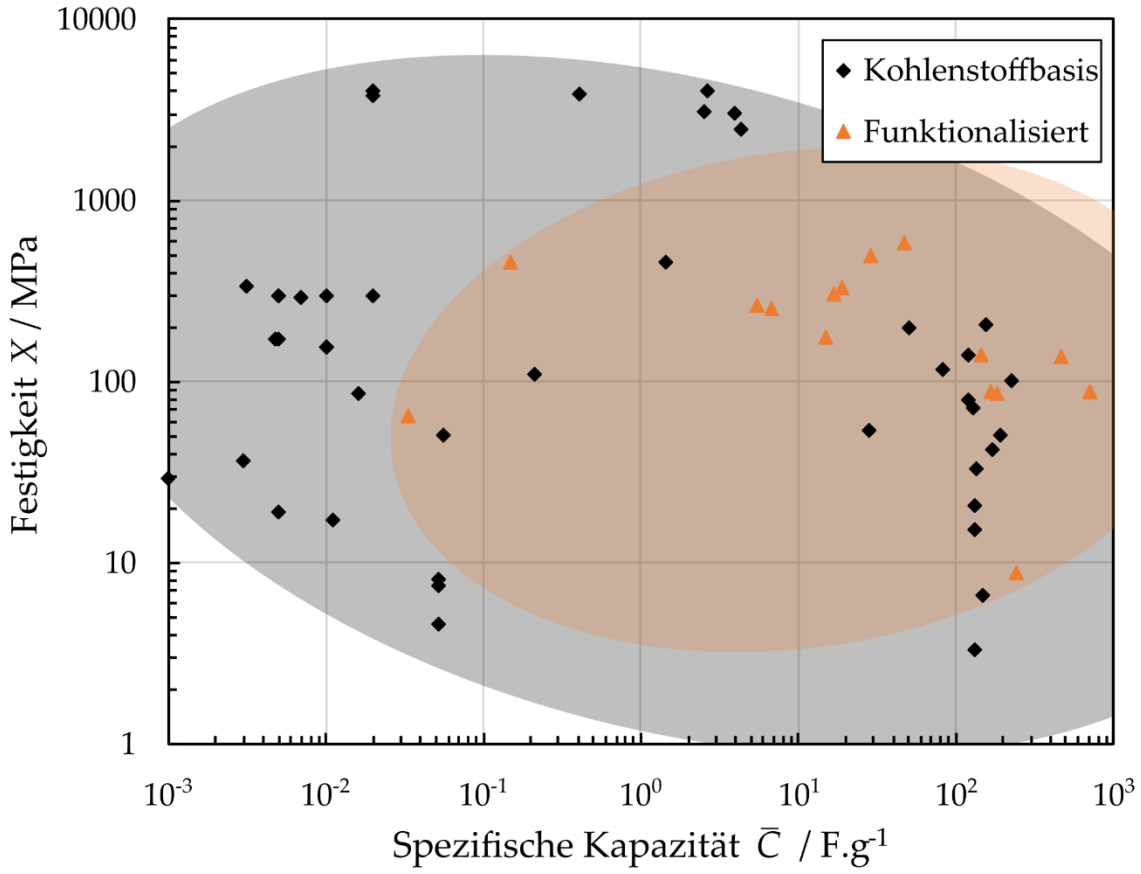

Abbildung 11: Ashby Diagramm: Spezifische Kapazität versus Festigkeit

Die spezifische Kapazität wird logarithmisch dargestellt. In diesem Fall wurde aufgrund der besseren Sichtbarkeit auch die Festigkeit logarithmisch abgebildet. Durch diese Abweichung ist ein direkter Vergleich zu Abbildung 9 zwar nicht möglich, dieser ist jedoch im vorliegenden Fall auch nicht von Bedeutung. Die Abhängigkeit und der Unterschied der Diagramme wurden bereits in Kapitel 3.1.4 analysiert.

Im vorliegenden Diagramm sieht die Datenlage gut aus. Es gibt viele Vertreter, welche sich im oberen Bereich der beiden Kriterien befinden. Das bedeutet es gibt viele SSC, welche eine hohe Festigkeit bei einer relativ großen spezifischen Kapazität haben. Solche Vertreter bieten sich für den multifunktionalen Einsatz als SEES an.

3.2 Festlegung von Parametern und Auswahl des SSC

Die gesamte Datenlage ist nun anhand ausgewählter Kennwerte visuell dargestellt und ausgewertet. Nun erfolgt die Auswahl eines Favoriten zur weiteren Bearbeitung.

Durch die Erstellung und Analyse des Ragone-Plots und der Ashby Diagramme kann ein gutes Gefühl für die Auswahl einer geeigneten SSC-Kombination entwickelt werden. Die für gut befundenen Werte können in Tabelle 3 als Mindestanforderungen eingesehen werden.

Tabelle 3: Mindestanforderungen an einen SSC im Anwendungsfall

Physikalische Größe	Wert
Energiedichte	20 Wh / kg
Leistungsdichte	1000 W / kg
Elastizitätsmodul	20 GPa
Festigkeit	75 MPa

Als Ergebnis dieses Filters verbleibt exakt ein SSC. Dieser Kandidat verfügt über hervorragende Eigenschaften. Es handelt sich um den Eintrag Nummer 7. Die Daten stammen von Amiri et al. [31]. Der SSC gehört der funktionalisierten Elektrodengruppierung auf Kohlenstoffbasis an. Die Elektrode besteht dabei aus Co_3O_4-beschichteten, mit Stickstoff versehenen CNF. Als Elektrolyt kommt Polyvinylalkohol (PVA) mit 3M Schwefelsäure (H_2SO_4) Gel zum Einsatz. Die Materialeigenschaften werden in Tabelle 4 abgebildet. Vor allem die Energiedichte erzielt hervorragende Werte. Parallel hierzu weist der ermittelte SSC zufriedenstellenden mechanischen Kennwerte auf.

Tabelle 4: Eigenschaften eines geeigneten SSC

Elektrochemie:			Mechanik:	
Spez. Kapazität	Energiedichte	Leistungsdichte	Elastizitätsmodul	Festigkeit
713,9 F / g	45,4 Wh / kg	5000 W / kg	26 GPa	87 MPa

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des Favoriten wird teilweise durch objektive Entscheidungen beeinflusst. Vor allem die Definition der Mindestanforderungen wird nur geringfügig anhand subjektiver Entscheidungen getroffen. Dennoch wird das

Vorgehen mittels des Abgleiches aller Daten in Form von Diagrammen für gut befunden. Wirtschaftliche Einflüsse werden bewusst nicht mit betrachtet. Die Komponentenentwicklung der SSC befindet sich noch im Stadium der Forschung. Die fortlaufend notwendigen Aufgaben zur Entwicklung eines Produktes mit Serienreife sollen gesondert betrachtet werden. Diese Aufgabe ist nicht Bestandteil der Thesis. Der ausgewählte SSC soll als Komponente zur weiteren konzeptionellen Bearbeitung verwendet werden. Die zugrunde liegenden Materialdaten werden dabei als Basis der FEM-Berechnungen im Anwendungsfall verwendet.

4 Anwendungsfall: DJI Matrice 600 Pro

Im Folgenden gilt es einen Anwendungsfall auszuwählen, in welchen der SEES integriert wird. Dabei besteht prinzipiell die Zielsetzung bestehende Eigenschaften mindestens zu halten oder zu verbessern. Die Wahl fällt auf ein UAV. Aufgrund vorhergehender Forschungsarbeit von Peyrow Hedayati et al. [17] empfiehlt es sich, dasselbe Modell zu wählen. Somit kann eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse beim Einsatz von SB gegenüber SSC erzielt werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit die Effizienz beider SEES-Typen nach aktuellem Stand der Forschung und Technik gegeneinander abzuwägen. Für die Integration gibt es verschiedene Stufen. Es kann eine vollständige Bereitstellung der Energie durch den SEES erfolgen oder auch eine Hybrid-Variante. Bei dieser werden zum Teil Batterien eingesetzt und zusätzlich erfolgt die Integration des SEES in potenzielle Bauteile. Demnach gilt es nachfolgend, die Möglichkeiten zu prüfen, um den ausgewählten Kandidaten Matrice 600 Pro mit dem in Kapitel 3.2 gewählten SEES auszustatten. Hierfür wird das Produkt eingangs analysiert und fortlaufend für den SSC angepasst.

4.1 Produktanalyse DJI Matrice 600 Pro

Zu Beginn besteht die Aufgabe die CAD-Daten der Drohne zu beschaffen. Diese werden seitens des Herstellers DJI bereitgestellt [18]. Im Modell sind die Propeller nicht enthalten. Aus diesem Grund werden sie eigenständig für Darstellungszwecke designt. Die digitalen Daten wurden weiterhin aufbereitet. Hierzu zählt unter anderem die Zuweisung der jeweiligen Materialdaten. Relevant dabei sind vor allem die Dichte und die Materialtextur. Mit Hilfe der Dichte kann das CAD-Programm die jeweiligen Bauteilmassen ermitteln. Dies bietet die Möglichkeit diverse Masseabschätzungen durchzuführen. Um graphische Renderings zu erstellen, ist es ebenfalls von Bedeutung die entsprechenden Texturen aufzubringen.

Als CAD-Software wird CATIA V5-6R2020 eingesetzt. Innerhalb dieses Programms gibt es die Funktion Renderings zu erstellen. Nachdem das Modell vorbereitet und die

Belichtung eingestellt ist, kann das digitale Bild generiert werden. Hierfür werden im Voraus verschiedene Kamerapositionen definiert. Dazu zählen unter anderem eine Vorderansicht, isometrische Ansicht und eine Ansicht von oben. Diese Renderings werden im Anschluss mit der Software Inkscape als Vektorgrafik grafisch aufbereitet. Als Zwischenergebnis ist der aktuelle Stand des Produktes in Abbildung 12 dargestellt.

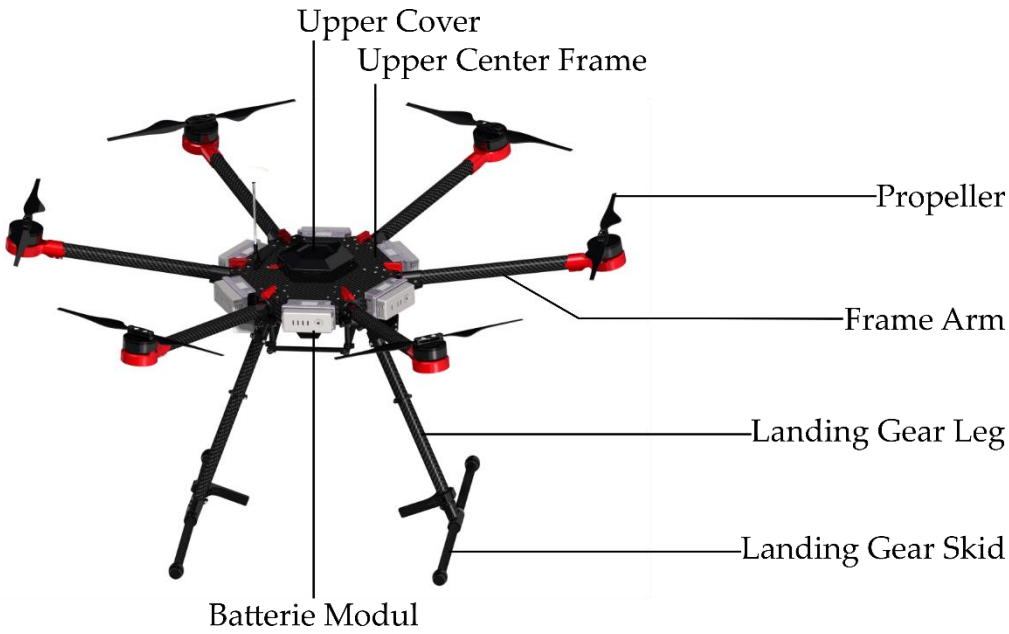

Abbildung 12: DJI Matrice 600 Pro – Aktuelles Design

In der Abbildung sind die bedeutsamen Bauteile benannt, welche eine Rolle zur Integration des SEES spielen. Hierzu zählen das „Upper Cover“, „Center Frame“, „Frame Arm“, „Landing Gear Leg“ und „Landing Gear Skid“. Diese Bauteile werden aktuell aus einem Kohlenstofffaserverbundkunststoff hergestellt. Grund hierfür ist vor allem der Leichtbaufaktor bei gleichzeitiger struktureller Festigkeit. Bei diesen Bauteilen ergibt sich die Möglichkeit sie durch einen SEES zu ersetzen.

Derzeitig werden in dem Produkt sechs Batterien verbaut. Dabei handelt es sich um den Typ TB47S [18]. Diese sind zwischen oberen und unterem Center Frame platziert. Sie versorgen das UAV mit elektrischer Energie. Aufgrund der langen Ladezeiten, welche durch die Leistungsdichte bedingt sind, sind die Batterien austauschbar. Somit kann das UAV bei niedrigem Batteriestand gelandet, die leeren Batterien durch volle

ersetzt und anschließend die Mission fortgesetzt werden. Mit einer ausreichenden Anzahl von Batterien kann der Einsatz mit nur kurzen Unterbrechungen andauernd durchgeführt werden.

4.2 Integration des strukturellen Superkondensators in die Struktur

Zunächst besteht aufgrund der in den Formeln (1) bis (4) geschilderten Massenproblematik die Zielsetzung, vollständig auf die konventionellen Batterien zu verzichten. Daher werden diese vollständig aus der Gesamtstruktur entfernt. Stattdessen soll die Energiebereitstellung vollständig über masselose SSC erfolgen. Dadurch ergibt sich eine wesentliche Gewichtsreduktion von über 37,5 Prozent. In diesem Zuge wird ein neues Teil entworfen, welches die Stelle der Batterien einnimmt. Hierzu gibt es folgende Rahmenbedingungen. Das Teil soll den Innenraum des Center Frames schließen. Weiterhin muss das Teil mechanische Lasten übertragen. Im Sinne der Multifunktionalität soll es weiterhin SEES implementierbar sein. In Hinblick auf den SEES empfiehlt sich ein Laminataufbau. Das zusätzliche Bauteil wird in Abbildung 13 gezeigt. Integriert in der Gesamtstruktur ist dieses in Abbildung 14 zu sehen.

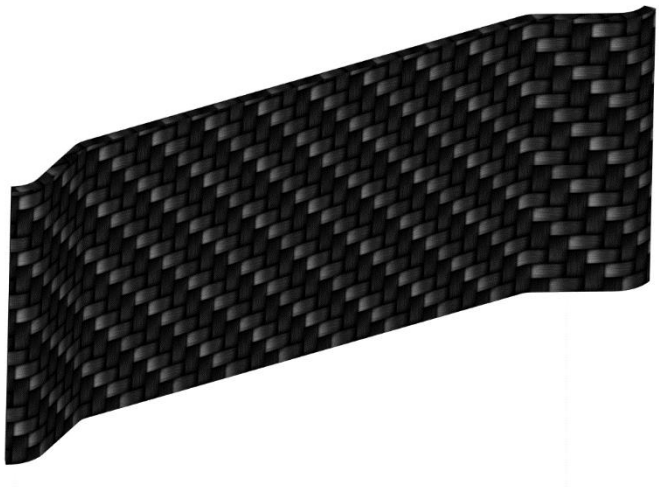

Abbildung 13: Entworfenes Bauteil für die DJI Matrice 600 Pro: Center Frame Cover

Im Vergleich zu Abbildung 12 ist eine Änderung an den Batterien zu vernehmen. Diese wurden durch die geformte CF-Platte ersetzt. Die Bauteile sollen als SEES fungieren. Somit resultieren nachfolgende Bauteile zur Integration eines SSC:

- Upper Center Frame
- Lower Center Frame
- Center Frame Cover
- Frame Arm
- Landing Gear Leg
- Landing Gear Skid
- Landing Gear Tube – Fixation
- Landing Gear Tube - Applikation

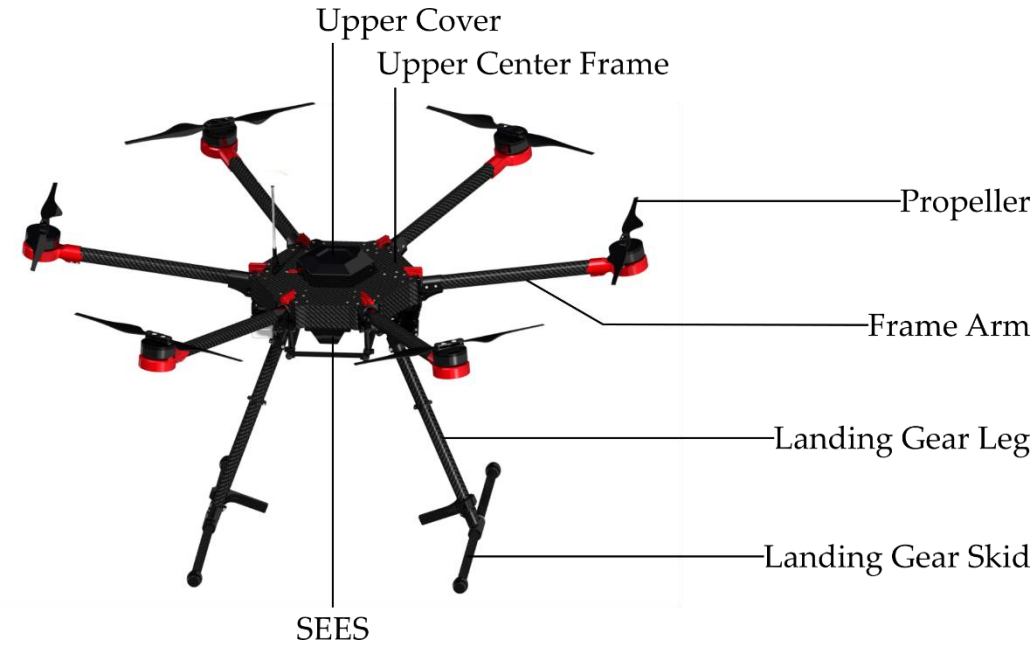

Abbildung 14: DJI Matrice 600 Pro - SEES Modifikation

Die Bauteile Landing Gear Tube – Fixation und Landing Gear Tube – Application befinden sich unterhalb des Lower Center Frames als horizontale Rohre. Sie sind zur Anbringung des Landegestells, wie auch der Anbauteile vorgesehen. Ein Beispiel ist die Applikation einer Kamera.

Diese Bauteile werden in einen SEES umfunktioniert. Demnach müssen sie sowohl strukturelle als auch elektrische Anforderungen erfüllen. Letztere wurden bereits durch Kapitel 3 ausführlich behandelt. Demzufolge soll als Basis der in Kapitel 3.2 ausgewählte SSC genutzt werden.

4.3 Berechnung elektrischer Eigenschaften

Die für die elektrochemische Berechnung relevanten Bauteilmassen der SEES-Bauteile werden in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Masse der SEES-Bauteile

Bauteil	Masse einzeln (kg)	Anzahl	Masse resultierend (kg)
Upper Center Frame	0,158	1	0,158
Lower Center Frame	0,144	1	0,144
Center Frame Cover	0,018	6	0,108
Frame Arm	0,037	6	0,222
Landing Gear Leg	0,051	2	0,102
Landing Gear Skid	0,044	2	0,088
Landing Gear Applikation Rail	0,012	2	0,024
Landing Gear Rail	0,017	2	0,034

In Summe ergeben sich aus den resultierenden Massen eine nutzbare SEES-Masse von 0,88 kg. Durch die Verwendung der Formeln (8) und (9) kann auf die absolute Energie und Leistung geschlussfolgert werden. Ergebnis ist, dass eine theoretisch absolute Energie von 39,95 Wh bei einer maximalen Leistung von 4400 W erwartet werden kann. Demgegenüber steht eine maximale Energie von 599,4 Wh im aktuellen Produkt. Diese setzt sich aus der angegebenen Energie von 99,9 Wh pro TB47S Batterie zusammen [18]. Bei Batterien wird mit der totalen effektiven Energie gerechnet. Diese entspricht 70 Prozent der maximalen Energie [17]. Grund hierfür ist, dass Batterien nur zu 50 bis 80 Prozent entladen werden können. Ansonsten erhöht sich das Risiko für eine erhebliche Lebensdauerverkürzung stark. SC können aufgrund der Elektrostatik über die vollen 100 Prozent entladen werden [42]. Folglich ergibt sich für das aktuelle Konzept von DJI eine totale effektive Energie von 419,6 Wh und für das konzeptionelle Design 39,95 Wh.

Im direkten Vergleich ist zu erkennen, dass die Energie des SEES-Designs lediglich 9,52 Prozent vom aktuellen Produkt entspricht. Insofern bestätigt sich zunächst noch einmal am Anwendungsbeispiel, dass SC in der Regel über schlechtere Merkmale, bezogen auf die speicherbare Energie, verfügen. Diese ist nicht zufriedenstellend. Eine solche Erkenntnis wurde auch bei anderen Anwendungsintegrationen ähnlicher SEES gewonnen.

Ishfaq et al. [43] haben sich mit dem CityAirbus beschäftigt. In dieses Lufttaxi mit vier Sitzen soll ein SEES integriert werden. Die beiden Forschungsaufgaben sind vergleichbar. Beide Anwendungen beschäftigen sich mit der Luftfahrt. Im Fall des UAV handelt es sich um unbemannte Flüge. Bei dem Lufttaxi hingegen ist eine Personenbeförderung vorgesehen. Daraus resultieren aus technischer Sicht höhere Anforderungen aufgrund erhöhter mechanischer Beanspruchungen. Die Drohnen befördern in der Regel Kameras, welche deutlich leichter sind als ausgewachsene Personen. Für das Lufttaxi wurden folgende Werte rechnerisch ermittelt, welche notwendig sind, um die Performance des aktuellen Standes zu erzielen.

Tabelle 6: Mindestanforderungen an einen SEES im Vergleich

Eigenschaft	Mindestwert CityAirbus [43]	Werte des ausgewählten SSC
Elastizitätsmodul	54 GPa	26 GPa
Festigkeit	203 MPa	87 MPa
Energiedichte	74 Wh / kg	45,4 Wh / kg
Leistungsdichte	376 W / kg	5000 W / kg

Der Anwendungsfall eines Lufttaxis weicht vom Anwendungsfalls des UAV leicht ab. Vor allem bei den mechanischen Eigenschaften wird von höheren Beanspruchungen bei bemannten Flügen ausgegangen. Somit sind die Abweichungen in diesen Kennwerten tolerierbar. Bei den elektrochemischen Eigenschaften würde der ausgewählte SSC die Anforderungen der Leistungsdichte erfüllen. Im direkten Vergleich der

Energiedichte zeigt sich, dass diese nach aktuellem Stand noch nicht ausreicht. Demnach gibt es nun verschiedene Möglichkeiten für die weitere Vorgehensweise.

Die der Berechnung zugrundeliegenden Bauteilmassen sind abhängig von der Dicke des Aufbaus. Insofern hat der Lagenaufbau mit der Schichtdicke der einzelnen Lagen einen relevanten Einfluss auf diese theoretische Berechnung der Energie. Gegebenenfalls ist es möglich, die Dicke der Bauteile entsprechend zu optimieren. Somit wird die Strukturmechanik entlastet und die elektrischen Eigenschaften verbessert. Hierbei gilt jedoch die Komponentenarchitektur und die damit verbundene Funktionalität zu berücksichtigen. Andererseits gibt es den Lösungsansatz einer Hybridvariante. Bei dieser würden beispielsweise fünf konventionelle Batterien im Produkt verbleiben und die restliche Energie durch den masselose SEES bereitgestellt werden. In diesem Fall bietet sich der SSC aufgrund seiner hohen Leistungsdichte dafür an, viel Energie im Peak bereitzustellen und eine schnellere Wiederaufladbarkeit zu gewährleisten. Der Vorteil ist, dass die Masse bei ähnlicher Energiespeicherfähigkeit verringert wird. Als Nachteil lässt sich benennen, dass nicht die maximal mögliche Gewichtsreduzierung erzielt wird.

An dieser Stelle soll der Einfluss der Masse auf die benötigte Energie erfolgen. Aus dieser Überlegung ergibt sich auch die Einsatzzeit beziehungsweise Flugzeit. Eine Batterie hat eine Masse von 595 Gramm. Demnach gehen die sechs Batterien mit 3,57 kg in die Gesamtstruktur ein. Es ergibt sich eine Masse von 9,5 kg für die Matrice 600 Pro mit TB47S Batterien und 5,93 kg ohne Batterien [18]. Als Schlussfolgerung wird für den Fall ohne TB47S Batterien auch weniger Energie benötigt. Dieser Fall wurde eingangs physikalisch begründet. Nachfolgend soll dieser Einfluss visuell für die explizite Anwendung dargestellt werden.

In Abbildung 15 wird der berechnete Energie- und Leistungsbedarf beider Konzepte dargestellt. Die Darstellung verläuft über die Einsatzzeit bis 420 Sekunden. Abgebildet werden Energie und Leistungsbedarf vom aktuellen Produkt und dem konzeptionellen Design. Im Vergleich beider Kriterien lässt sich zunächst feststellen, dass der

Bedarf des aktuellen Produktes stets höher ist als der des SEES-Designs. Dieser Fakt ist auf die Massereduktion zurückzuführen.

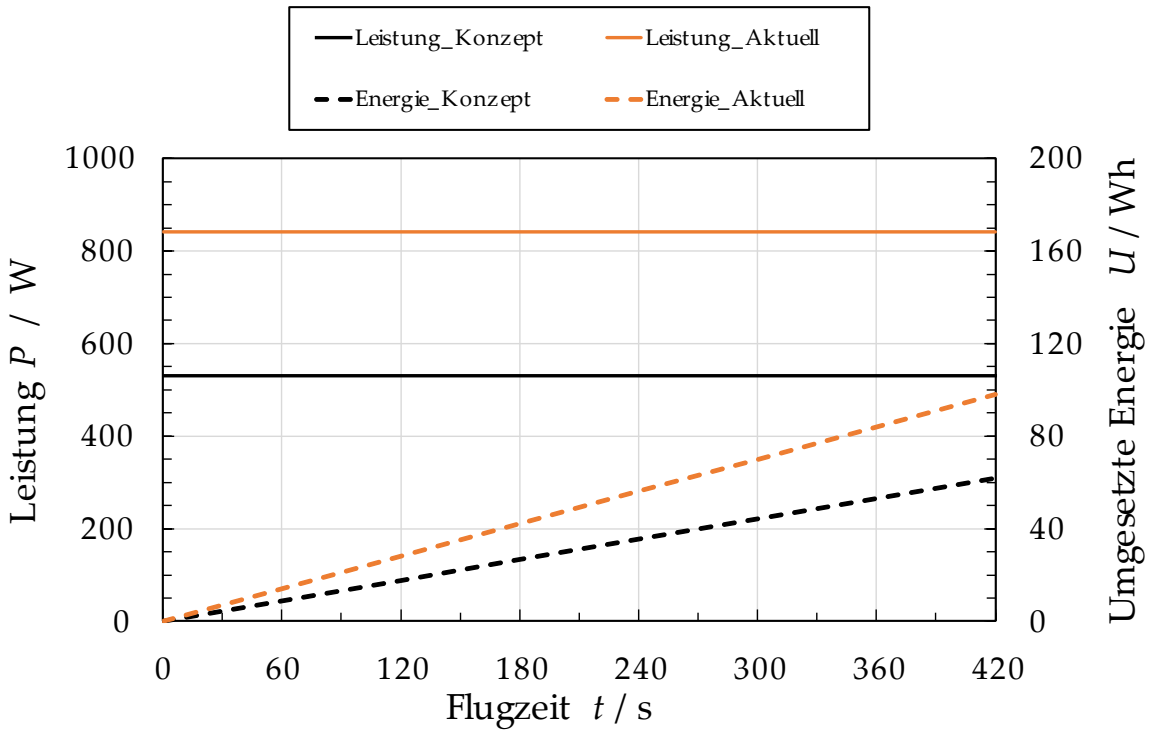

Abbildung 15: Energie- und Leistungsbedarf der DJI Matrice 600 Pro Konzepte [17]

Ausgehend von einer Energie mit 39,95 Wh im SEES-Konzept lässt sich dem Diagramm entnehmen, dass die mitgeführte Energie für eine Einsatzzeit von ungefähr 270 Sekunden ausgelegt ist. Diese wird als gering bewertet und ist nicht praktikabel und zufriedenstellend. Im Vergleich hierzu wird eine Flugzeit von ungefähr 16 Minuten für die Matrice 600 Pro durch den Hersteller angegeben [18]. Aufgrund der kurzen Ladezeiten würde im SSC-Konzept lediglich ein kleiner Radius um die Ladestation abgeflogen werden können. Weitere Entfernungen sind in dieser Variante nicht vorstellbar. Um nun einen vorteilhaften Nutzen aus der Integration des SEES zu ziehen, ergibt sich die Erkenntnis, dass die alleinige Integration vom SSC nicht ausreichend ist. Deswegen empfiehlt sich äußerstenfalls eine Kombination aus beiden Konzepten als Hybrid-Variante.

Im weiteren Verlauf wird dennoch die Funktion des vorgestellten vollintegrierten SEES-Konzeptes in der Simulation untersucht. Auch wenn die elektrischen

Eigenschaften zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht zufriedenstellend sind, besteht die Möglichkeit, dass durch eine optimierte Geometrie oder einen anderen SSC bessere Merkmale erzielt werden. Gegebenenfalls besteht auch Interesse an einer Anwendung für einen kleinen Suchbereich, welcher durch dieses UAV abgebildet wird. Aufgrund der hohen Leistungsdichte kann das UAV in kürzester Zeit wieder aufgeladen werden. Beispielsweise lässt sich die Aufladung durch einen kurzen Kontakt an einer mobilen Basisladestation realisieren. Weiterhin könnten die Ergebnisse dieser Arbeit mit weiterentwickelten SSC zu einem späteren Zeitpunkt wiederverwendet werden. Insoweit erfolgen im weiteren Verlauf Entwurf, Berechnung und Analyse der multifunktionalen Struktur bei vollständigem Verzicht auf die Batterien. Der Fokus orientiert sich an dem zugrundeliegendem masselosen SSC. Durch den später zu definierenden Lagenaufbau können sich die bisher vorgestellten elektrischen Merkmale noch geringfügig ändern. Aufgrund von nicht vorliegenden Daten müssen gegebenenfalls vergleichbare Materialien für die Berechnung angenommen werden. Diesbezüglich erfolgt ein expliziter Hinweis an gegebenen Stellen.

4.4 Analyse und Berechnung der wirkenden Kräfte

Für die strukturmechanische Berechnung sind die wirkenden Kräfte von Bedeutung. Diese werden zuvor analysiert. Im Lastfall: „Schweben“ wirkt einerseits die Gewichtskraft und dem entgegengesetzt die Schubkraft der Propeller. Einflüsse aus Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Wind, werden vernachlässigt. Entsprechend ergibt sich das statisch-mechanische Modell, siehe Abbildung 16.

Die Gewichtskraft kann mit Hilfe des CAD-Modells oder durch Herstellerangaben aus einem technischen Datenblatt ermittelt werden. Die Schubkraft muss berechnet werden. Hierfür gibt es zwei grundlegende Ansätze. Zum einen kann die Kraft durch statisches Gleichgewicht errechnet werden und zum anderen kann eine Berechnungsvorgehensweise aus der Literatur genutzt werden.

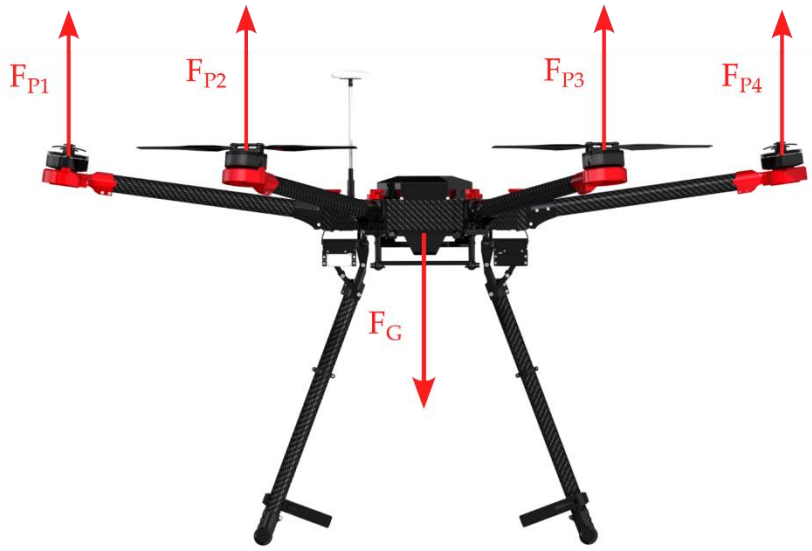

Abbildung 16: Statisches Kräftegleichgewicht an der DJI Matrice 600 Pro

Statische Berechnung

Zu Beginn erfolgt die statische Berechnung. Die wirkenden Kräfte lauten Gewichtskraft F_G und Schubkraft F_T. Die Schubkraft setzt sich aus den Einzelkomponenten $F_{P,i}$ der Propeller zusammen. Beide Kräfte lassen sich mit folgender Konvention über die Gewichtskraft F_G bestimmen.

$$F_{\mathrm{G}} = mg \tag{20}$$

$$F_{\mathrm{T}} = \sum_{i=1}^{n} F_{\mathrm{P,i}} \tag{21}$$

Dabei repräsentiert n die Anzahl der Propeller. Aufgrund der Annahme, dass jeder Propeller die gleiche Schubkraft F_{P} hat, vereinfacht sich die Formel:

$$F_{\mathrm{T}} = 6F_{\mathrm{P}} \tag{22}$$

Dies gilt als Annahme, da in der Realität aufgrund von Unterschieden der Luftdichte, Wind oder weiteren Einflüssen stets abweichende Kräfte wirken, welche schließlich durch die Regelung ausgeglichen werden.

Bei statischem Gleichgewicht müssen sich alle Kräfte in Summe aufheben. Hiernach gilt nachfolgende Beschreibung für die Kräfte in der vertikalen Richtung F_{y}.

$$\sum F_{\mathrm{y}} = 0\colon\ 6F_{\mathrm{P}} - F_{\mathrm{G}} = 0 \tag{23}$$

Somit gilt:

$$F_{\mathrm{P}} = \frac{1}{6}F_{\mathrm{G}} = \frac{1}{6}mg \tag{24}$$

Als Masse wird der kritische Fall eingesetzt. Dieser entspricht nach dem technischen Datenblatt maximal 15,5 kg [18]. Seitens des Herstellers wird diese demnach als maximale Masse inklusive aller Anbauteile empfohlen. Entsprechend ergibt sich eine Propellerkraft F_{P} von 25,34 N.

Mathematisches Modell nach Gupta und Abdallah

Als zweite Möglichkeit existiert ein mathematisches Modell, welches von Gupta und Abdallah [44] entwickelt und experimentell verifiziert wurde. Dieses bietet die Möglichkeit die Schubkraft eines Propellers durch geometrische Größen zu berechnen. Die Schubkraft des Propellers errechnet sich in dieser Überlegung mit:

$$F_{\mathrm{P}} = k_f \omega^2 \tag{25}$$

Hierbei beschreibt ω die Winkelgeschwindigkeit des Propellers und k_f wird beschrieben definiert durch:

$$k_{\mathrm{f}} = \frac{1}{6}\rho\pi R^4 e_{\mathrm{d}}^4 C_{\mathrm{T}} \tag{26}$$

Dieser Parameter ist abhängig von der Luftdichte ρ, Propellerradius von Spitze bis Nabe R, effektiver Durchmesser e_{d} und Schubkraft Koeffizient C_{T}. Der effektive Durchmesser ist ein Tabellenwert. Er ergibt sich aus dem Verhältnis von Propellersteigung und Durchmesser.

Der Schubkraftkoeffizient lässt sich mit nachfolgender Konvention bestimmten.

$$C_{\mathrm{T}} = \frac{4}{3}k\theta[1-(1-e_{\mathrm{d}})^3] - k\left(\sqrt{k(1+k)} - \sqrt{k}\right)[1-(1-e_{\mathrm{d}})^2] \tag{27}$$

Der Parameter k ist dabei wie folgt definiert:

$$k = N_{\mathrm{b}}c/4R \tag{28}$$

Er beschreibt den Term mit der Anzahl der Rotorblätter N_b und dem Propeller-Chord c. Weiterhin wird der Propellerblatt-Verdrehwinkel θ zur Ermittlung des Schubkraftkoeffizienten benötigt. Dieser setzt sich wie folgt aus den Parametern der Propellersteigung p und dem Durchmesser des Rotors d zusammen.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi d}\right) \tag{29}$$

Für die Berechnung wurden nachfolgende Werte eingesetzt.

Tabelle 7: Input-Parameter zur Bestimmung der Schubkraft

Parameter	Wert	Bezeichnung
ϱ	1,16 kg/m³	Luftdichte in 120 m Höhe
R	0,2667 m	Rotor Radius Nabe – Spitze
d	0,5334 m	Durchmesser Rotor
p	0,178 m	Propellersteigung
θ	10°*	Propellerblatt Verdrehwinkel
N_b	2	Anzahl Propellerblätter
c_{prop}	0,03 m*	Propeller-Chord
N	1250 1/min*	Umdrehungen pro Minute
N_{max}	6000 1/min	Maximale Umdrehungen pro Minute
h_{max}	2500 m	Maximale Flughöhe
h_{schweb}	120 m	Flughöhe im Schwebzustand

Unter Verwendung der Werte aus Tabelle 7 ergeben sich die in Tabelle 8 aufgeführten Zwischenergebnisse, wie auch das Endergebnis als Propellerkraft.

Somit ergibt sich schlussendlich eine Propellerkraft von 27,04 N. Zu erwähnen sei, dass die Daten bezüglich der Propellergeometrie nicht vollständig vorlagen. Teilweise mussten Annahmen getroffen werden. Hierunter zählen die Werte des Propeller-Verdrehwinkels, dem Propeller-Chord und der Propellerdrehzahl in einer Flughöhe von 120 m. Diese sind in der Tabelle durch einen Stern gekennzeichnet.

Im Sinne einer Fehlerbetrachtung wurde ein Schubkraftdiagramm erstellt. Dieses kann in Abbildung 17 eingesehen werden. Die Grenzen auf der Abszisse orientieren sich an der maximalen Propellerdrehzahl. Dem Diagramm lässt sich entnehmen, dass die maximal erzeugte Schubkraft ungefähr 3700 N beträgt. Dieser ist eine maximale Flughöhe von 6000 m zugeordnet.

Tabelle 8: Zwischenergebnisse und Endergebnis der Schubkraftermittlung

Parameter	Wert	Bezeichnung
p/d	0,334	p/d Verhältnis
e_d	0,91	Effektiver Durchmesser
k	0,056	Motor / Propeller Kraftkonstante
C_T	0,749	Schubkraft-Koeffizient
ω	130,9 1/s	Propeller Winkelgeschwindigkeit
k_f	0,001578 N s	Koeffizient für Propellerkraft
F_P	27,04 N	Propellerkraft

Im Detail ist der Verlauf dieser Kurve noch einmal in Abbildung 18 abgebildet. In diesem Diagramm beschränkt sich der ausgewertete Bereich auf den Drehzahlbereich von 800 bis 1600 Umdrehungen pro Minute. In dieser Darstellung ist noch einmal deutlich zu sehen, dass die Kraft der statischen Abschätzung bei einer Drehzahl von ungefähr 1250 Umdrehungen pro Minute am nächsten kommt.

Die verbleibenden Parameter konnten nur anhand von Abbildungen [18] geschätzt werden. Aufgrund der nahezu übereinstimmenden Werte mit der statischen Berechnung wird die Berechnung über geometrische Daten zunächst für in Ordnung befunden.

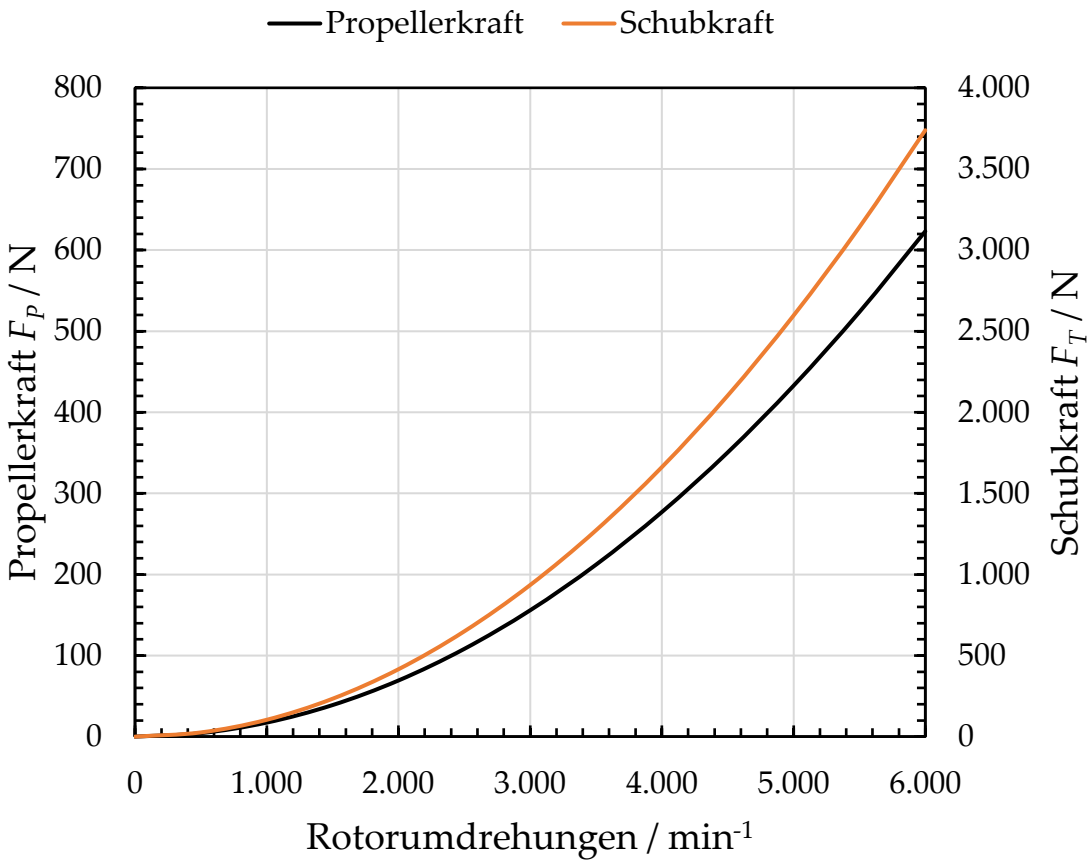

Abbildung 17: Schubkraftdiagramm der DJI Matrice 600 Pro

Im Allgemeinen lässt sich jedoch feststellen, dass in der Ermittlung nach Gupta und Abdallah einige Ungenauigkeiten vorzufinden sind. Diese liegen einerseits im mathematischen Modell selbst und auf der anderen Seite in Annahmen aufgrund fehlender Daten. Theoretisch betrachtet beschreibt das Ergebnis der statischen Betrachtung somit die genauere Vorgehensweise. Folglich wird der Wert von 25,34 N für die folgenden Betrachtungen zugrunde gelegt.

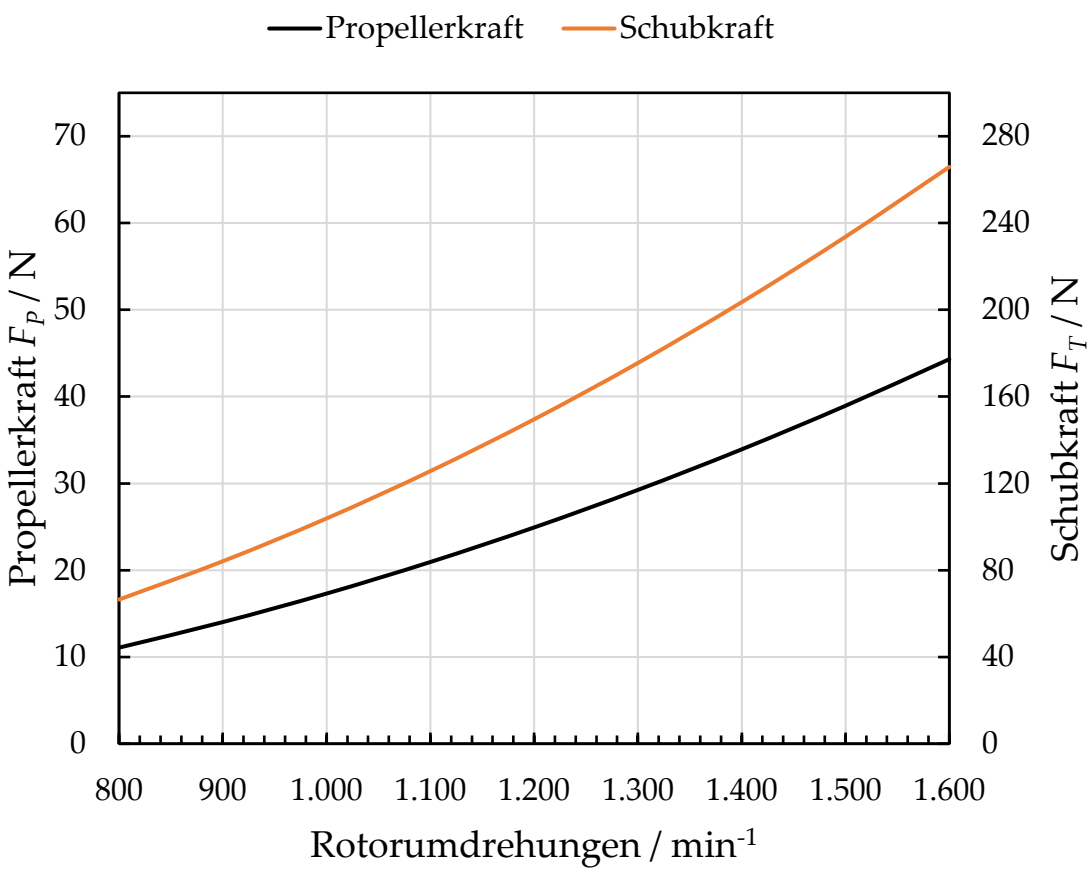

Abbildung 18: Schubkraftdiagramm der DJI Matrice 600 Pro im Detail

4.5 FEM-Mehrkörpersimulation am UAV-Anwendungsfall

Bisher wurde die vorliegende Belastung an der DJI Matrice 600 Pro im Schwebezustand ermittelt. Mittels dieser Kraft soll nachfolgend eine Mehrkörpersimulation durchgeführt werden. Dabei besteht die Zielsetzung die vorliegenden Spannungen zu analysieren und die Festigkeit der neuen Struktur sicherzustellen.

4.5.1 Modellbildung

Als Basis des Simulationsmodells dienen die von DJI bereitgestellten CAD-Daten [18]. Diesbezüglich werden im ersten Schritt Vereinfachungen in der Geometrie eingeführt. Das Konzeptdesign unterscheidet sich nur in den Faserverbundbauteilen vom Originalprodukt. Einerseits findet eine Anpassung im Lagenaufbau der Faserverbundstruktur statt und auf der anderen Seite wurden die Center Frame Cover als neue Bauteile in die Baugruppe eingefügt. Da die restlichen Bauteile im Originalzustand

übernommen werden, erfolgt für diese keine Analyse. Stattdessen werden die Geometrien vereinfacht und als Starrkörper angenommen. Somit erfolgt die Lastübertragung realitätsnah. In Abbildung 19 ist die Geometrie des Simulationsmodells dargestellt.

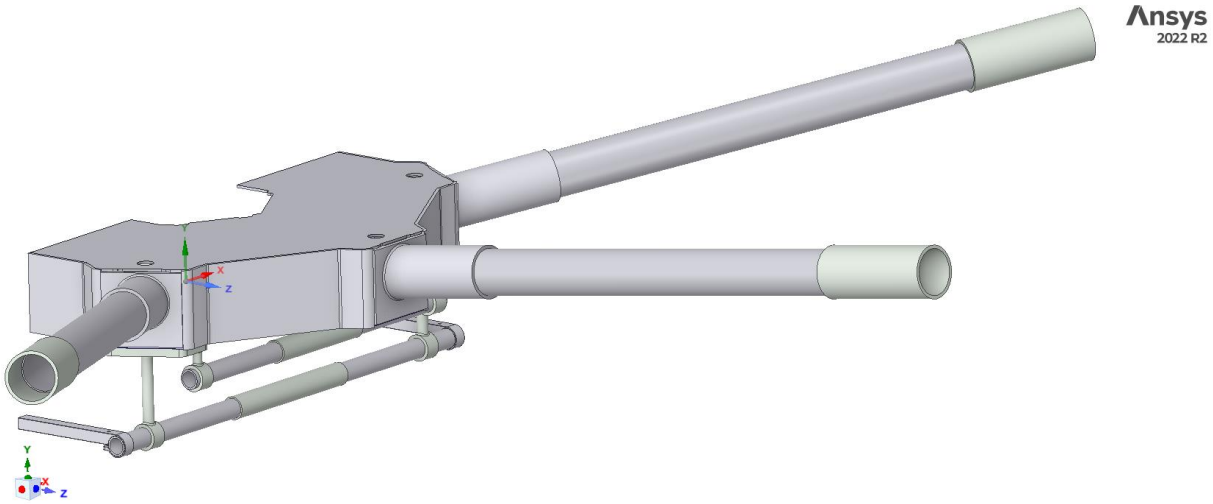

Abbildung 19: Simulationsmodell DJI Matrice 600 Pro mit Vereinfachungen

Zu sehen ist, dass das Modell an der Symmetrieebene geschnitten wurde. Durch die Aufbringung entsprechender Randbedingungen resultieren gleiche Ergebnisse bei signifikanter Einsparung von Rechenzeit. Neben den Vereinfachungen durch die Starrkörper zur Lastübertragung wurden weiterhin Starrkörper zur Aufbringung der Randbedingungen eingebracht. Diese sind jeweils am äußeren Ende des Frame Arm und in der Mitte der horizontalen Rohre mit den Bezeichnungen Application Tube und Landing Gear Tube zu finden.

4.5.2 Lagenaufbau der Bauteile

Der Lagenaufbau orientiert sich an der Dicke des Originalmodells. Dort werden in der Regel 1 bis 1,5 mm dicke Bauteile verbaut. Aufgrund der Aufgabe den SSC in der Struktur unterzubringen, erfolgt ein entsprechender Lagenaufbau. In der Mitte befindet sich der Separator. Dieser wird beidseitig von der Elektrode im Elektrolyt umgeben. An der Außenseite wird schließlich eine strukturelle Verstärkungsschicht aufgebracht.

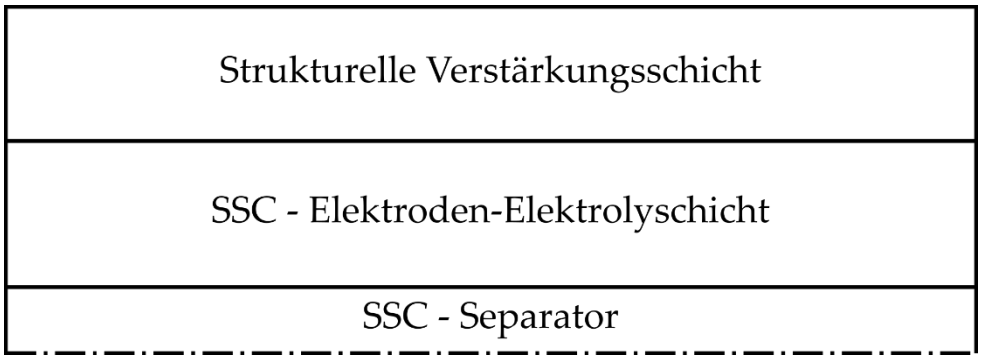

Abbildung 20: Schichtaufbau am SSC zur Anwendungsintegration

Bezüglich dieses Lagenaufbaus müssen zunächst Dicken der einzelnen Schichten festgelegt werden. Hierzu wurden in der Literatur von Amiri et al. [31] keine expliziten Angaben zum entworfenen SSC gemacht. Daher müssen andere Quellen zu Hilfe gezogen werden. Die Recherche ergibt einerseits, dass die Dicke des Separators möglichst gering sein sollte. Diese Aussage deckt sich auch mit dem Zusammenhang in Formel (6). Hiernach wird eine höhere Kapazität erzielt, wenn der Separator dünner wird. Somit wird nach Carlson und Asp [45] eine Dicke von 50 µm für den Separator festgelegt. In dieser Konfiguration sind die Eigenschaften im Analysefall optimal. Weiterhin wird eine Recherche zur Dicke der Elektrode durchgeführt. Hierbei liefern die Erkenntnisse von Pokhriyal et al. [46] gute Anhaltswerte. Diese beschreiben zwei Zustände. Einerseits eine Elektrodenschichtdicke von 0,3 mm und anderseits die doppelte Dicke mit 0,6 mm. Dabei erzielt die dickere Elektrode eine bessere Kapazität. Im Modell der Matrice 600 wird zunächst mit einer maximalen Bauteilstärke von 1,5 mm gearbeitet. Demnach empfiehlt sich die Verwendung der dünneren Elektrode mit 0,3 mm Dicke. Die Elektrodenschichtdicke und der Separator bestimmen somit die verbleibende Schichtdicke für die strukturelle Verstärkungsschicht. Der Lagenaufbau wird in Tabelle 9 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 9: Lagenaufbau des SSC an der DJI Matrice 600 Pro

Nummer	Schicht	Dicke
1	Strukturelle Verstärkung	425 µm
2	Elektrode	300 µm
3	Separator	50 µm
4	Elektrode	300 µm
5	Strukturelle Verstärkung	425 µm

Diese Struktur wird an allen Faserverbundbauteilen übernommen. Bei dem Frame Arm erfolgt eine Anpassung des Aufbaus. Dort ist der Durchmesser wesentlich größer im Vergleich zu den anderen Rohren. Somit wird eine doppelte Verstärkungsschicht verbaut.

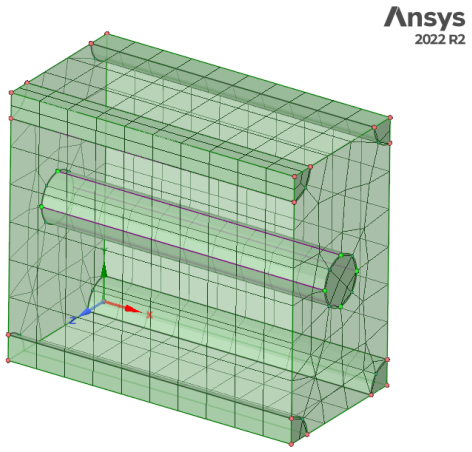

Abbildung 21: Analyseelement zur Generierung der orthotropen Materialdaten

Die Werkstoffeigenschaften des SSC von Amiri et al. [31] wurden mit einem E-Modul von 26 GPa bei einer Festigkeit von 87 MPa angegeben. Dabei bezieht sich das Elastizitätsmodul auf das Verhalten in Faserrichtung. Bei dem SSC handelt es sich jedoch um ein orthotropes Material. Somit sind die angegebenen Materialparameter nach Kapitel 2.3.2 nicht ausreichend. Um alle Materialparameter in Erfahrung zu bringen, wurde die Durchführung einer FE-Simulation gewählt. Mit Hilfe des Material Designers in ANSYS können somit Rückschlüsse auf die unbekannten Parameter getroffen

werden. Bei dieser wurden die Materialeigenschaften aus Tabelle 10 für Faser und Matrix eingesetzt. Dabei wurde ein unidirektionaler Aufbau der Struktur, analog zu Abbildung 21, gewählt.

Tabelle 10: Materialdaten für die SSC-Simulation

Bereich	Material	E-Modul	Poissonzahl	Quelle
Faser	Carbonfaser	230 / 23 / 23 GPa	0,2 / 0,4 / 0,2	[47]
Matrix	PVA	3860 MPa	0,4498	[48, 49]

Aus diesen Materialien wurden mithilfe der Simulation nachfolgende Materialdaten berechnet. Dabei wurde der Faservolumenanteil in Iterationen so lange optimiert, bis die gegebenen 26 GPa als Elastizitätsmodul bestmöglich angenähert wurden. Der Separator ist in diesen Eigenschaften zur Vereinfachung mit enthalten. Die Daten wurden mit einem finalen Faservolumenanteil von 10 Prozent erreicht.

Tabelle 11: Resultierende Materialdaten aus der Simulation

Elastizitätsmodul	Schubmodul	Poissonzahl
E_1 = 26,49 GPa	G_{12} = 1,55 GPa	ν_{12} = 0,424
E_2 = 5,32 GPa	G_{23} = 1,54 GPa	ν_{13} = 0,424
E_3 = 5,32 GPa	G_{31} = 1,55 GPa	ν_{23} = 0,734

Als strukturelle Verstärkungsschicht wird ein Kohlenstofffasergewebe [47] verwendet. Dessen orthotrope Eigenschaften werden in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Orthotrope Materialeigenschaften der Verstärkungsschicht [47]

Elastizitätsmodul	Schubmodul	Poissonzahl
E_1 = 123,3 GPa	G_{12} = 5,00 GPa	ν_{12} = 0,27
E_2 = 7,78 GPa	G_{23} = 3,08 GPa	ν_{13} = 0,27
E_3 = 7,78 GPa	G_{31} = 5,00 GPa	ν_{23} = 0,42

Die ermittelten Materialdaten des SSC sind, wie auch in Abbildung 21 zu sehen ist, für einen unidirektional Faseraufbau vorgesehen. Für den SSC wird ein bidirektionaler Aufbau angestrebt. Daher wird die SSC-Schicht in vier Teile geteilt, deren Winkel bezüglich der Faseranordnung entsprechend angepasst werden. Die obere und untere Schicht wird im Winkel von 0° und die beiden mittleren Schichten im Winkel von 90° platziert. Somit werden ähnliche Eigenschaften erzielt. Dadurch resultiert der finale Lagenaufbau, welcher im Symmetrieschnitt nachfolgend zu sehen ist.

Abbildung 22: Definierter Lagenaufbau für die Compositsimulation

Aus diesem Lagenaufbau resultieren mesomechanische Werkstoffeigenschaften, welche anhand eines Polardiagrammes dargestellt werden können. Dabei überlagern sich die Graphen von E_1 und E_2 aufgrund des bidirektionalen Verhaltens zweier unidirektionaler Schichten mit dem Winkel von 90°.

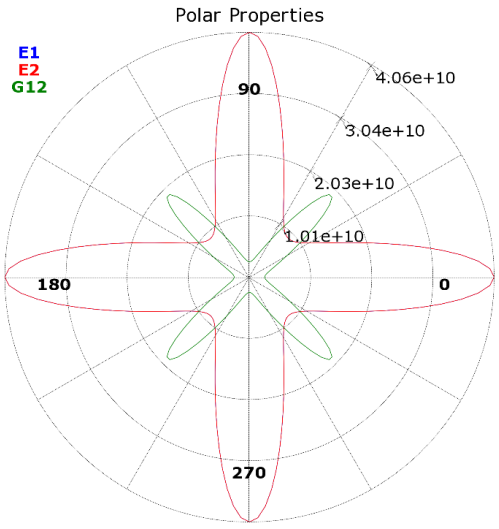

Abbildung 23: Polardiagramm - Materialeigenschaften des Lagenaufbaus

4.5.3 Simulationsprozess im FE-Programm ANSYS

Zur Analyse wurde ein Workflow in ANSYS Workbench erstellt. Dieser ist in Abbildung 24 illustriert.

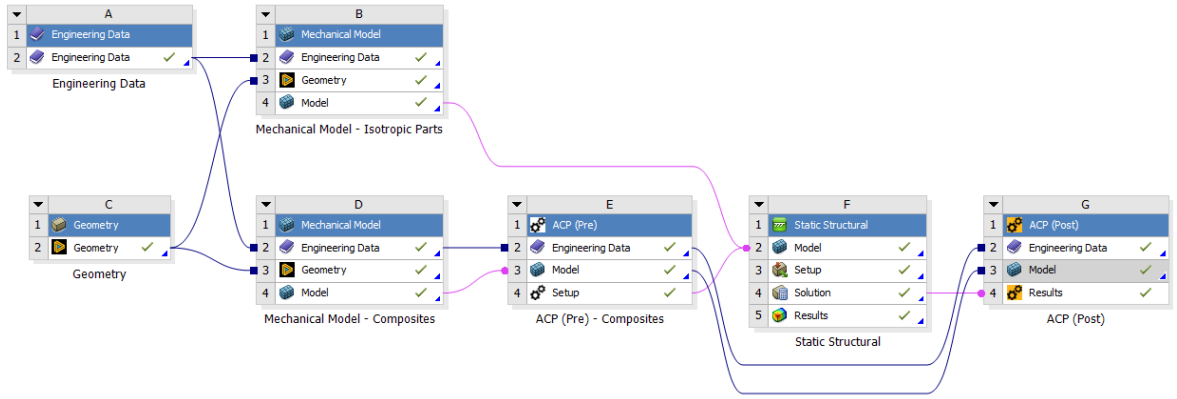

Abbildung 24: Workflow im ANSYS FEM-Modell zur Mehrkörpersimulation

Ausgehend von den Materialdaten im Modul A und der Geometrie in C erfolgt die Vernetzung von allen Bauteilen in den Abschnitten B und D. Dabei erfolgt eine Differenzierung zwischen isotropen Bauteilen und orthotropen Bauteilen mit Lagenstruktur. Nach der Vernetzung erfolgt der Lagenaufbau letzterer im ANSYS Composite Pre/Post (ACP) Modul E. Dort werden die Lagen mit allen Koordinatensystemen und Faserorientierungen für die einzelnen Bauteile definiert. Als Ergebnis wird ein Volumenmodell an die statisch mechanische Analyse im Modul F übergeben. In dieses werden außerdem die vernetzten isotropen Festkörper aus B importiert. In der statisch-mechanischen Analyse werden anschließend alle Randbedingungen aufgebracht. Abschließend erfolgt noch ein detailliertes Postprocessing der Einzelschichten im ACP (Post).

4.5.4 Definition der Lastfälle

Am Modell wird ein einziger Lastfall untersucht. Wie bereits im Kapitel 4.4 geschildert, wird vom Schwebezustand auf der Stelle in einer Höhe von 120 m über der Stadt Leipzig ausgegangen. Als Vergleich dient der geodätischen Referenzpunkt in einer

Höhe von 116,4 m über der Normalhöhe Null [50]. Es wird Windstille angenommen. Weitere Einflüsse werden ausgeschlossen.

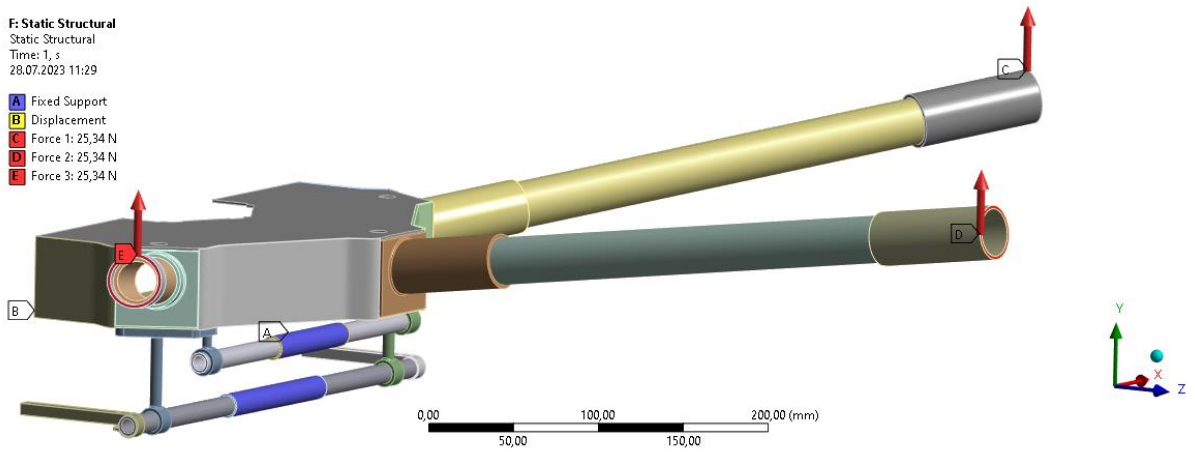

Abbildung 25: Randbedingungen and der DJI Matrice 600 Pro

Über die Kontaktkörper am Frame Arm wird jeweils die berechnete Propellerkraft in Höhe von 25,34 N aufgebracht. Somit existieren im Modell drei Kraftrandbedingungen. Über die Starrkörper an den horizontalen Rohren unterhalb des Lower Center Frame wird die Fixierung aufgebracht. An diesen beiden Teilen werden die Applikationen, wie auch das Landegestell, montiert. Demnach erfolgt auch hier die Lastübertragung von Anbauteilen. Die Verschiebungen werden an den Fixierungskörpern in allen Freiheitsgraden gesperrt. Des Weiteren wird die Verschiebung der Schnittfläche in der Symmetrieebene in der orthogonalen Verschiebungskomponente gesperrt. Der gesamte Aufbau mit aufgebrachten Randbedingungen ist in Abbildung 25 dargestellt.

4.5.5 Festigkeitsbewertung

Die Festigkeitsbewertung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird das Gesamtmodell betrachtet. Anschließend soll ein Bereich ausgewählt werden, welcher durch ein auszuwählendes Bauteil repräsentiert wird. Diese Belastung wird weiterführend untersucht.

Gesamtmodell

Zunächst erfolgte die Analyse des gesamten Modells. Es zeigt sich, dass die maximale Verformung in dem Frame Arm stattfindet. Dort beträgt diese ungefähr 0,52 mm.

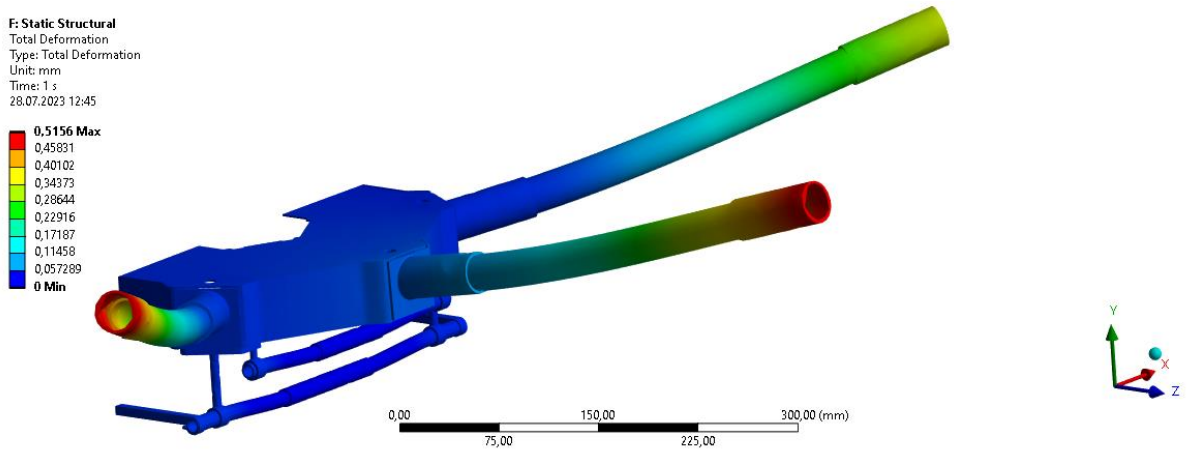

Abbildung 26: Simulationsergebnis: Absolute Deformation

In der Regel werden bei der Festigkeitsbewertung von Faserverbundwerkstoffen Festigkeitskriterien wie beispielsweise Puck, Cuntze oder Tsai-Wu verwendet. Aufgrund der gering anliegenden Spannung wird jedoch auf das konventionelle Verfahren nach Rankine zurückgegriffen. Dieses Verfahren ist nicht vollständig akkurat. Es ist jedoch notwendig, da keine orthotropen Festigkeitswerte für die jeweiligen Materialien vorliegen. Diese müssten im Experiment ermittelt werden. Die Möglichkeit hierfür besteht aktuell nicht. Die Materialien versagen spröde. In diesem Fall bestätigt sich die Wahl zur Anwendung der Hauptnormalspannungshypothese nach Rankine an. Nach dieser führt die betragsmäßig größte Hauptspannung zur Schädigung [51]. Es gilt die Konvention der Kontinuumsmechanik. Diese besagt, dass die Hauptspannungen der Größe nach, beginnend mit der größten Zugspannung, geordnet werden. Somit ist das Minimum der dritten Hauptspannung in diesem Fall die größte Druckspannung. Die maximalen Zug- und Druckspannungen ergeben sich im vorliegenden Fall zu 13,6 MPa und -21,5 MPa.

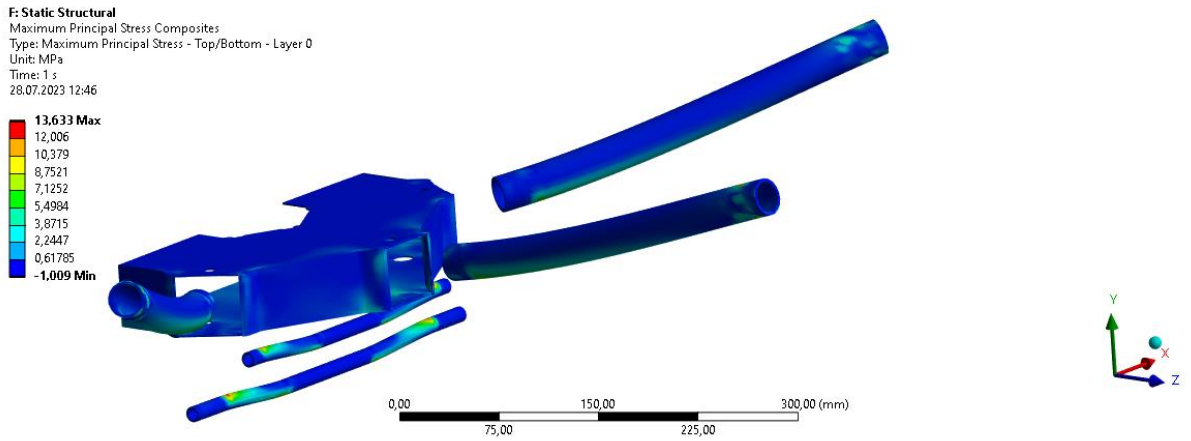

Abbildung 27: Simulationsergebnis: Erste Hauptspannung

Anhand der vorliegenden Spannungen kann festgestellt werden, dass diese deutlich unter der Zugfestigkeit von PVA liegt. Da PVA als Matrixmaterial der Werkstoff mit der geringsten Festigkeit ist und zusätzlich die Matrix der strukturellen Verstärkung einen Großteil der Spannungen trägt, wird der Lastfall als nicht kritisch eingeschätzt. Somit wird kein Bauteilversagen erwartet. Diese Feststellung stimmt auch mit dem aktuellen Produkt im Feld überein. Es wurden nur geringfügige Änderungen am Aufbau der Faserverbundstruktur durchgeführt.

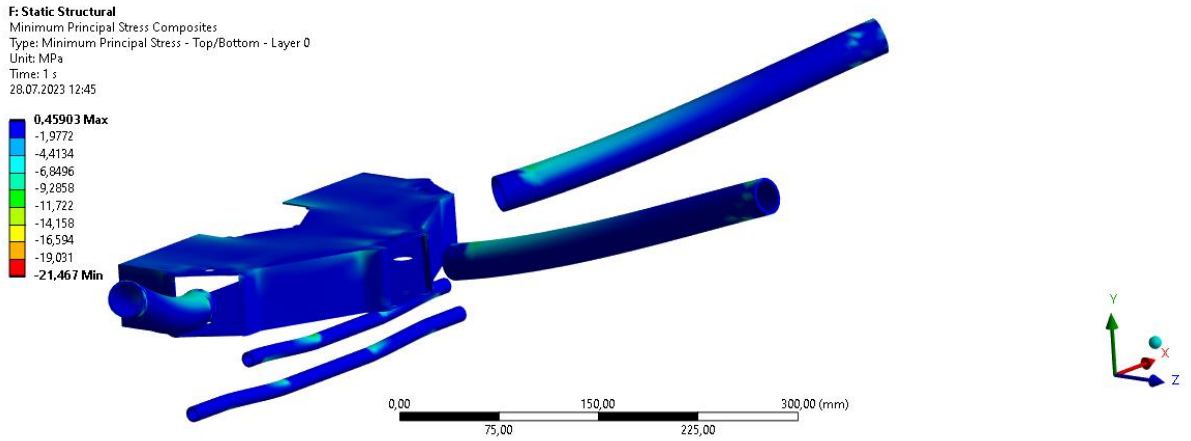

Abbildung 28: Simulationsergebnis: Dritte Hauptspannung

Weiterhin soll das Verhalten des SSC im Detail untersucht werden. Hierfür erfolgt die Auswahl eines bestimmten Belastungsfalles. Dabei werden zunächst die beiden Center Frame Bauteile näher betrachtet.

Center Frame Struktur

Bei der Analyse der priorisierten Hauptspannungen am Lower und Upper Center Frame wird auffällig, dass am Upper Center Frame vorrangig Druckhauptspannungen und am Lower Center Frame überwiegend Zughauptspannungen anliegen.

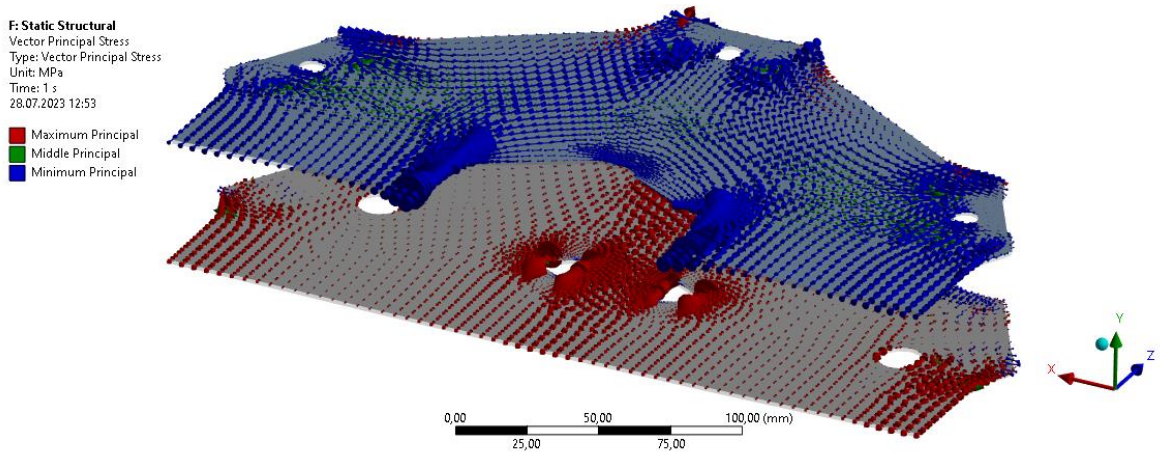

Abbildung 29: Vektorhauptspannungen am Center Frame

Aufgrund der Komplexität der Baugruppe erfolgt weiterhin eine Auswahl der Last für die weitere Analyse. Demnach werden im Zuge dieser Thesis die Druckspannungen als Analyselastfall ausgewählt. Die nachfolgenden Inhalte sollen sich ausschließlich auf Kompression beziehen. Aus diesem Grund wird der Upper Center Frame noch einmal im Detail untersucht.

Im Rahmen dieser Betrachtung werden einerseits die Spannungen in den drei Raumrichtungen und auf der anderen Seite die drei Hauptspannungen in den einzelnen Schichten begutachtet. Vor allem die Spannung σ_3 gibt Einsicht auf die Spannungen in der nicht verstärkten Schicht. In diese Richtung sind keine Fasern orientiert.

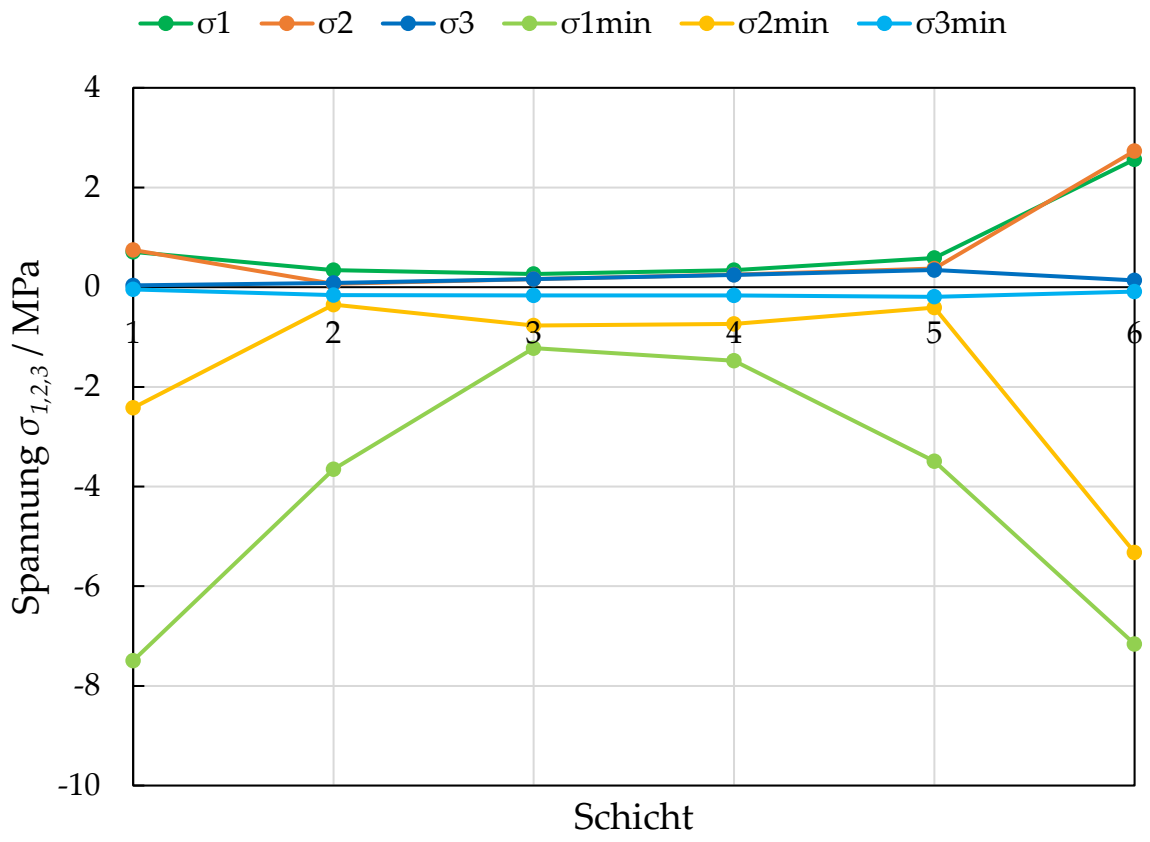

Abbildung 30: Spannungen der Einzellagen im Upper Center Frame

Anhand des Diagrammes in Abbildung 30 lässt sich zunächst feststellen, dass die Zugspannungen sehr gering sind. Dies ist in der Bauteilauswahl mit dem Fokus auf die Kompression begründet. Lediglich in der sechsten Schicht können höhere Zugspannungen in die Richtungen 1 und 2 vernommen werden. Diese Schicht beschreibt die äußere Verstärkungsschicht. Deren Spannungswerte sind jedoch äußerst gering. Diese werden im Lower Center Frame aufgrund der Belastung deutlich höher. Des Weiteren lässt sich dieser Abbildung entnehmen, dass deutlich höhere Druckspannungen vorliegen. Diese existieren überwiegend in den Faserorientierungsrichtungen 1 und 2. In der dritten Raumrichtungen sind diese äußerst gering. Die Spannungen sind in den zwei Verstärkungsschichten maximal. Dort liegen Werte in Höhe von ungefähr 7,5 MPa vor. Diese Spannungen können aufgrund der Faserorientierung mit CF unbedenklich getragen werden. Die Schichten 2 bis 5 beschreiben den SSC. Dort liegen

geringere Spannungen an, welche ebenfalls als nicht bedenklich erachtet werden können.

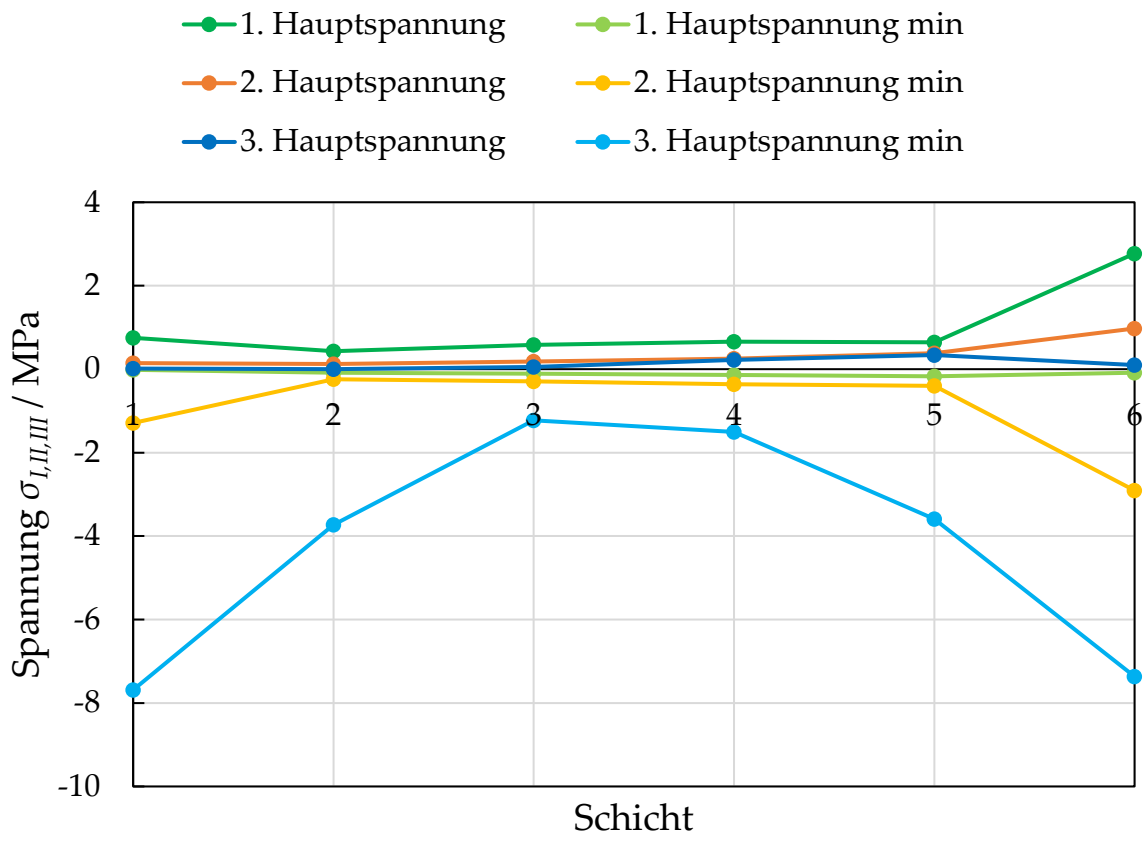

Abbildung 31: Hauptspannungen der Einzellagen im Upper Center Frame

Zusätzlich werden die Hauptspannungen ermittelt. Diese beschreiben die Extremwerte des Spannungstensors. In diesem Fall ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Spannungslinien. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Spannungstensor kaum in Richtung der Hauptrichtungen gedreht werden muss. Der Verlauf der dritten Hauptspannung gleicht dem der Spannung σ_1. Bei den anderen beiden Eigenwerten des Spannungstensors liegen geringfügige Abweichungen vor.

Abschließend lässt sich feststellen, dass die vorliegenden Spannungen als nicht kritisch erachtet werden können. Aus diesem Grund ist die Annahme der Hauptspannungshypothese nach Rankine durchaus vertretbar. Im Falle von höheren Spannungen würde sich in dem Bauteil eine exakte Betrachtung mit geeigneten Faserbruchkriterien anbieten. Hierfür wird in der Regel das Cuntze oder Puck-Kriterium favorisiert.

5 Strukturmechanische Simulation am SSC

In diesem Kapitel erfolgt die detaillierte Betrachtung ausgewählter Bereiche am SSC. Nachdem die Funktion noch einmal näher beleuchtet wird, werden drei Bereiche identifiziert, welche fortlaufend FE-Simulationen unterzogen werden.

5.1 SSC-Bereichsanalyse und Simulationsaufgabe

Die Energiefreisetzung erfolgt beim SSC über Ionenbewegungen. Beim Anlegen einer Spannung sammeln sich an beiden Elektroden Ionen mit umgekehrter Polarisation. Sie bilden eine Zone von unbeweglichen Ladungsträgern, deren Schichtdicke nur wenige Moleküle beträgt. Diese Schicht wird Helmholzschicht genannt [52]. Für den Entladevorgang wandern Ionen zur Elektrodenoberfläche und neutralisieren sich dort mit einer entgegengesetzt polarisierten Ladung.

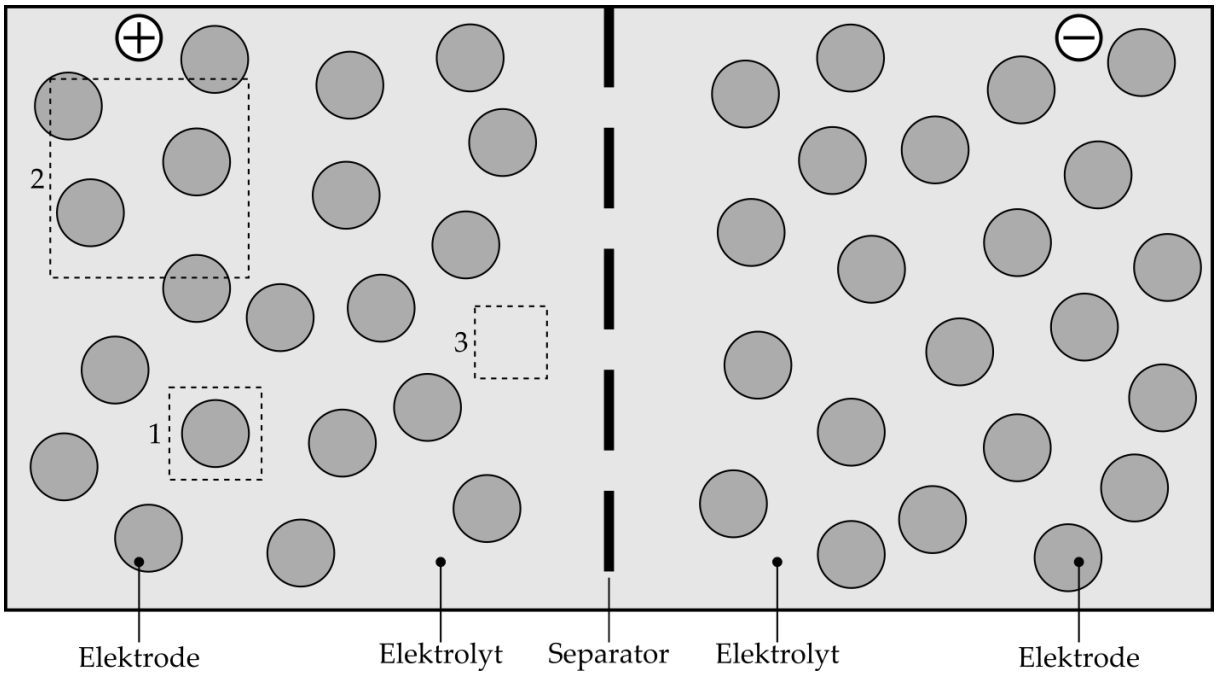

Abbildung 32: SSC-Architektur mit den Analysebereichen [53]

In Abbildung 32 ist eine Symbolskizze eines SSC abgebildet. Zu sehen sind die beiden entgegengesetzt geladenen Elektroden, welche durch die Separatorschicht getrennt werden. Die Kohlenstofffaser agiert als Elektrode und ist im Elektrolyten eingebettet. In der Mitte befindet sich der Separator.

Um den Kopplungsmechanismus von mechanischen Einflüssen auf elektrochemische Eigenschaften zu verstehen, erfolgen Simulationen mit repräsentativen Volumenelementen (RVE) in verschiedenen Bereichen. Dafür werden drei Bereiche vorgesehen, welche in Abbildung 32 durch gestrichelte Rechtecke gekennzeichnet sind. Die Bereiche wurden einseitig gekennzeichnet. Aufgrund der Symmetrie von Kathode und Anode ist es jedoch irrelevant, auf welcher Seite die Analyse erfolgt. Die Ergebnisse repräsentieren beide Bereiche. Zunächst erfolgt eine Deformationsanalyse auf Nanoebene durch Kompression an einer in der Matrix eingebetteten Elektrodenfaser. Weiterhin wird das Verhalten mehrerer Fasern in der Matrix auf Mikroebene untersucht. Abschließend erfolgt die detailgetreue nanomechanische Untersuchung des porösen Elektrolyten. Dieses besteht sowohl aus festem Material als auch aus einem konduktiven flüssigem Anteil. In Kapitel 2.2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass laut aktueller Literatur das Elektrolyt einen wesentlichen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften hat. Daher wird dieses in diesem Zuge explizit betrachtet. In allen Bereichen wird eine Kompressionssimulation durchgeführt. In Kapitel 4.5 wird zwar ersichtlich, dass neben der Kompression auch andere Spannungen eine wesentliche Rolle spielen. Für diese Untersuchungen wurde jedoch die Kompression in Dickenrichtung ausgewählt. In diesem Belastungsfall werden die meisten Änderungen bezüglich mechanischer und elektrischer Eigenschaften erwartet. Gegebenenfalls empfiehlt es sich zukünftig das Verhalten in der orthogonalen Richtung oder bei anderen Spannungsarten ebenfalls zu untersuchen.

5.2 Repräsentative Volumenelemente und Einheitszelle

Bei makroskopisch komplexen Modellen können Vereinfachungen in der Modellierung umgesetzt werden. Hierfür werden oft RVE oder Einheitszellen verwendet. Wenn sich ein Körper makroskopisch homogen verhält, sind dessen Eigenschaften ortsunabhängig. Daraus entwickelt sich die Annahme, dass die Inhomogenitäten auf mikroskopischer Ebene statistisch gleichmäßig über den gesamten Körper verteilt sein müssen. Demnach muss ein entnommener Probekörper, unabhängig von dessen

Entnahmeort, das gleiche Materialverhalten vorweisen. Somit kann im Umkehrschluss eine Analyse an einem repräsentativen mikroskopisch kleinen Element durchgeführt werden. Hierfür muss dieser Bereich lediglich groß genug gewählt werden, sodass eine ausreichende Anzahl statistisch verteilter Inhomogenitäten enthalten ist. Dann ist das Ergebnis der Volumenmittelung der Mikroeigenschaften unabhängig vom Ort und der Form des gewählten Ausschnitts. Parallel hierzu darf der Ausschnitt nicht zu groß werden. Er muss in der Gesamtstruktur als Punkt betrachtet werden können. Liegen diese Bedingungen vor, spricht man von einem RVE [54].

Sind die Inhomogenitäten nicht statistisch oder zufällig verteilt, sondern stattdessen periodisch im Körper angeordnet, reicht bereits die Betrachtung einer Periode des Verteilungsmusters aus, um ein RVE zu erzeugen. In diesem Fall spricht man von einer Einheitszelle [54]. Diese definitionsgemäße Unterscheidung wird im Rahmen dieser Thesis begrifflich nicht explizit unterschieden.

5.3 Simulation Bereich 1: Poröse Faser in der Matrix

Im ersten Bereich erfolgt die Analyse einer einzelnen Faser. Dabei soll das Verformungsverhalten der porösen Struktur untersucht werden. Dieses setzt sich aus dem festen Material des Elektrolyten und der Carbonfaserstruktur der Elektrode zusammen. Hierbei ist seitens der Funktion wichtig zu sagen, dass innerhalb der Fasern kein Ionenfluss stattfindet. Die Ionen wandern zur Elektrodenoberfläche und neutralisieren sich dort mit entgegengesetzt polarisierten Ladungsträgern. Demnach können hierbei auch keine Vor- und Nachteile innerhalb der Faser resultieren.

Betrachtet man nun eine einzelne Faser in der Kunststoffmatrix, können bei der Kompression Poren oder die Geometrie der Faser verformt werden. Die Analyse erfolgt anhand eines RVEs. Für eine realistische Betrachtung dient eine Rasterelektronenmikroskop-(REM)-Aufnahme [55] als Grundlage. Dies ist in Abbildung 33 dargestellt.

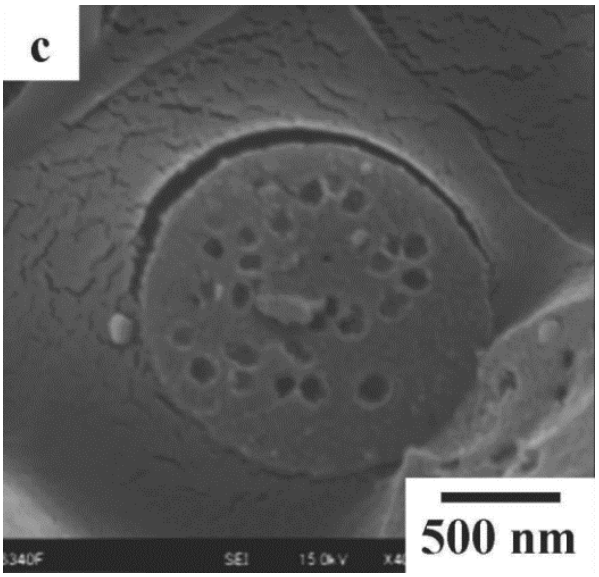

Abbildung 33: REM-Aufnahme - Kohlenstofffaser in der Matrix [55]

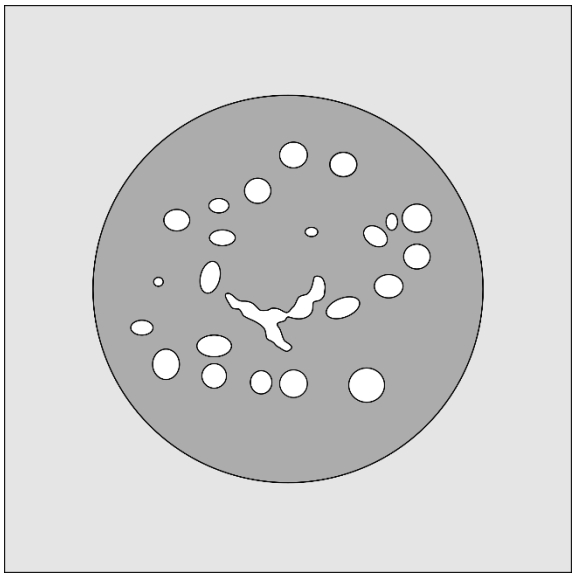

Abbildung 34: Vektorgrafik-Illustration der Faser aus der REM-Aufnahme

Die Aufnahme wurde mittels Inkscape als Vektorgrafik illustriert, siehe Abbildung 34, und anschließend zur Modellbildung zugrunde gelegt. Um diese Darstellung in ein Simulationsmodell zu überführen, wird zunächst ein CAD-Modell in CATIA generiert. Dafür wird die Funktion Skizzen-Tracer verwendet. Innerhalb dieser kann ein Bild importiert und ein Maßstab definiert werden. Über dieses Bild können dann die geometrischen Elemente rekonstruiert werden. Bei der Geometrieerstellung tritt das Problem auf, dass die Dimension für das CAD-Programm offensichtlich zu klein ist. Demnach können die geometrischen Elemente nicht detailgetreu platziert werden. Aus diesem Grund erfolgt eine geometrische Skalierung. Diese muss später bei der aufgebrachten Kraft berücksichtigt werden. Daher empfiehlt es sich mit Druckrandbedingungen zu arbeiten. Somit werden vergleichbare Ergebnisse sichergestellt.

Als Ergebnis entsteht eine Baugruppe mit zweidimensionaler Geometrie. Diese wird weiterhin in ANSYS Workbench überführt. In ANSYS erfolgt die mechanische Simulation unter Verwendung der FEM. Hierfür wird als Abstraktion das zweidimensionale Modell als RVE zugrunde gelegt. Aus mechanischer Sicht wird die Vereinfachung des ebenen Spannungszustandes angewendet. Somit gibt es keine Spannungen in z-Richtung. Die z-Richtung ist in diesem Fall als Dimension orthogonal zur Fläche

definiert. Weiterhin wird die horizontale Richtung durch die x-Koordinate und die vertikale Richtung durch die y-Koordinate gekennzeichnet. Im Gegenzug zur Vereinfachung der Spannung sind in der dritten Dimension Verzerrungen zu erwarten.

Tabelle 13: Materialdaten für die SSC-RVE-Simulation

Bereich	Material	E-Modul	Poissonzahl	Quelle
Faser	Carbonfaser	23 GPa	0,2	[47]
Matrix	PVA	3860 MPa	0,4498	[48, 49]

Die eingestellten Materialdaten können in Tabelle 13 eingesehen werden. Die Carbonfaser müsste im dreidimensionalen Fall mindestens mittels transversaler Isotropie modelliert werden. Aufgrund der angewendeten zweidimensionalen Abstraktion mit dem ebenen Spannungszustand können die Materialdaten jedoch gleich eines isotropen Materials definiert werden, solange das Koordinatensystem dementsprechend übereinstimmt. Dieser Fall trifft hier zu.

Als Randbedingungen zur Fixierung werden an der unteren Kante alle Freiheitsgrade gesperrt und seitlich nur die Bewegung in horizontaler Richtung. Als Ziel gilt es eine große Verformung aufzubringen und das Deformationsverhalten der beiden Materialien zu analysieren. Zwischen den beiden Materialien wird ein Reibkoeffizient μ von 0,65 [56] im Rahmen der Kontaktrandbedingung aufgebracht. Hierfür wird zunächst die Einstellung zur geometrisch-nichtlinearen Berechnung vorgenommen und dementsprechend optimiert. Die Belastung erfolgt durch eine Druckrandbedingung an der Oberkante. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die geometrische Skalierung bei der Auswertung von Dehnungen und Spannungen fortlaufend nicht berücksichtigt werden muss. Nachfolgend werden die aufgebrachten Randbedingungen noch einmal visuell dargestellt.

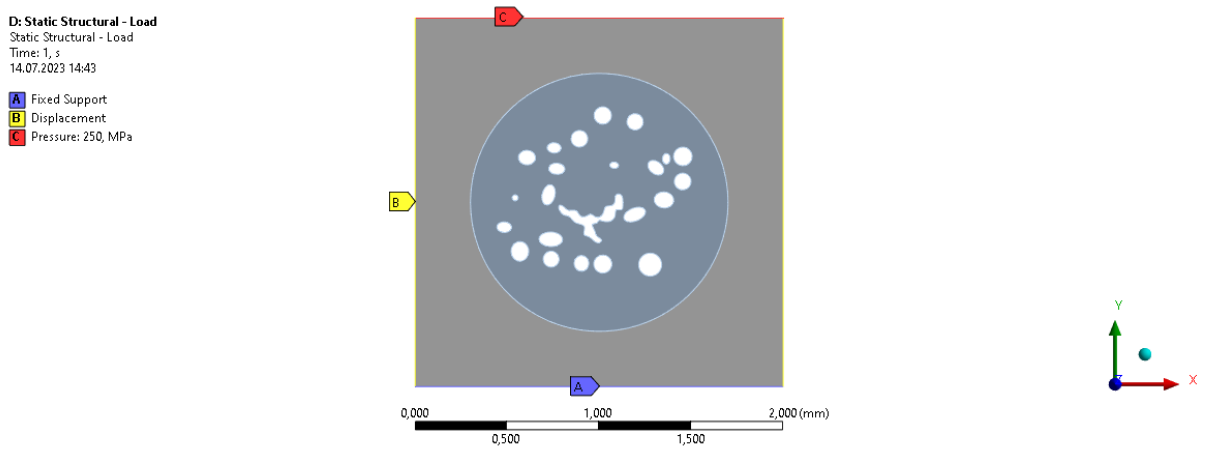

Abbildung 35: Randbedingungen am RVE-Element auf Nanoebene

Im ersten Schritt erfolgt die Untersuchung mit einem Druck von 250 MPa. Dieser wird weiterführend durch Iterationen angepasst, um weitere Erkenntnisse zum Materialverhalten zu gewinnen. Einerseits gilt es die reale, maximal mögliche Verformung des Elementes in Erfahrung zu bringen und auf der anderen Seite besteht die Fragestellung, wann es zu einer potenziellen Porenschließung im Inneren kommt.

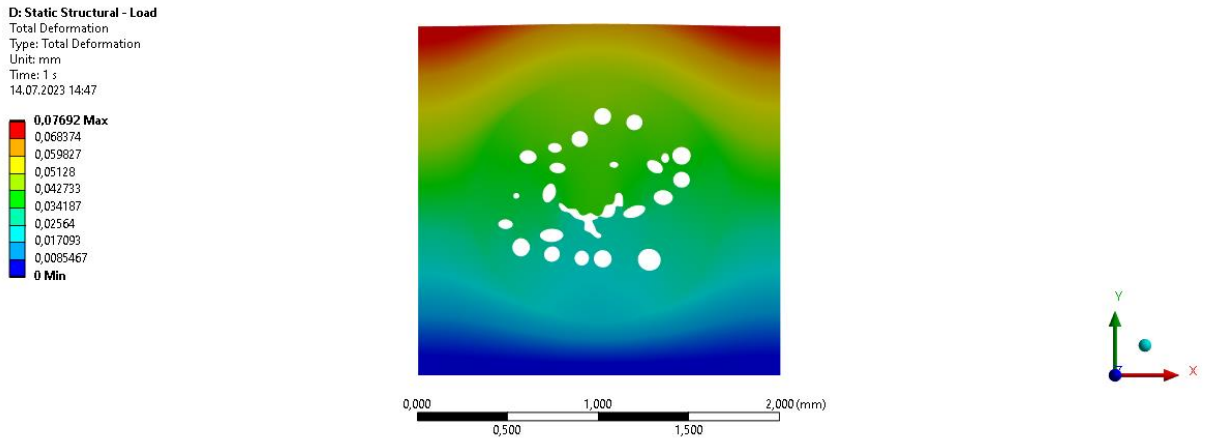

Abbildung 36: Deformation am RVE im Lastfall 1

Im ersten Lastfall wird ein Druck von 250 MPa auf der Oberkante aufgebracht. Als erste Beobachtung ist in Abbildung 36 zu sehen, dass es nicht zu der besagten Porenschließung im Inneren kommt. Somit rechtfertigt sich die Erhöhung des Druckes, um herauszufinden wann dieser Fall eintreten würde. In Abbildung 37 ist deutlich zu sehen, dass dieser Fall mit höherer Belastung eintritt. Bei einem Druck von 600 MPa ist der Kontakt zwischen beiden Oberflächen der größten Pore zu erkennen.

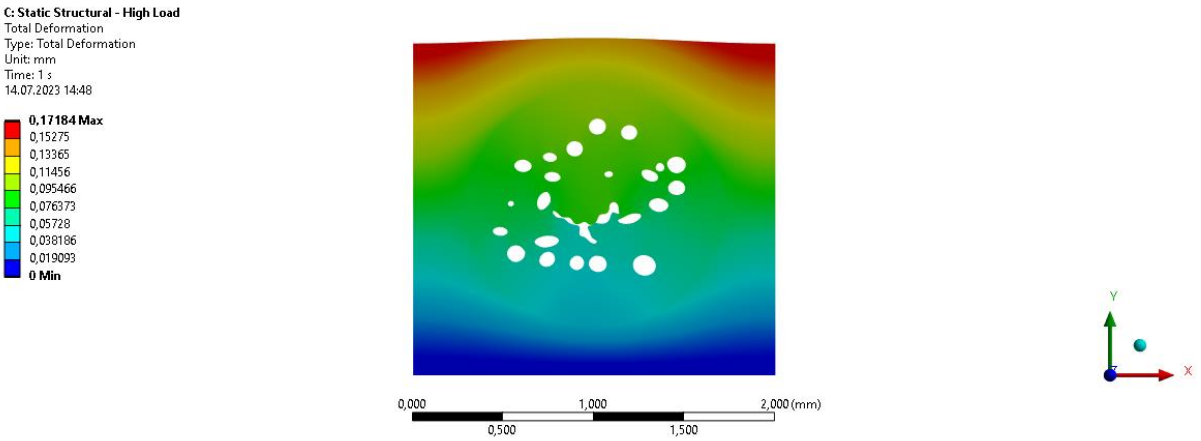

Abbildung 37: Deformation am RVE im Lastfall 2

In diesem Belastungsfall ergeben sich sehr hohe Spannungen in der Matrix. Für das Material ist ein sprödes Versagen bekannt. Daher wird auch die Hauptnormalspannungshypothese nach Rankine angewendet. Dabei ist das Minimum der dritten Hauptspannung im vorliegenden Fall die größte Druckspannung. Als Beispiel wird diese in Form der dritten Hauptspannung in Abbildung 38 dargestellt. Wie in der Abbildung zu sehen ist, ergeben sich Druckspannungen von 689 MPa im unteren Bereich der Faser. Dementgegen beträgt die Festigkeit von PVA 78 MPa [48]. In diesem Datenblatt wird lediglich die Zugfestigkeit bei Bruch angegeben. Üblicherweise ist die Druckfestigkeit bei Materialien höher als die Zugfestigkeit. Da die Daten jedoch nicht vorliegen wird gegenüber der Zugfestigkeit referenziert. Demgemäß ergibt sich gegebenenfalls in der Realität eine bessere Sicherheit als in der simulativen Berechnung.

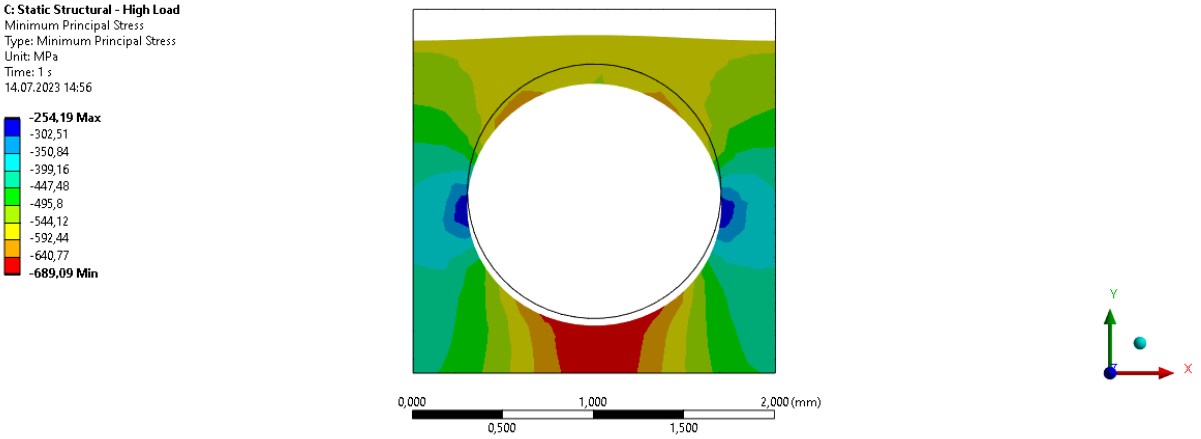

Abbildung 38: Analyse der dritten Hauptspannung im Lastfall 2

Im direkten Vergleich von maximaler Druckspannung und der Druckfestigkeit ist deutlich zu sehen, dass das Material der Belastung nicht standhalten kann.

Da das Matrixmaterial dem hohen Druck nicht standhält wurde in Iterationen die maximal ertragbare Belastung ermittelt. In dem zuerst beschriebenen Lastfall mit einem Druck von 250 MPa ergeben sich Spannungen in Höhe von 304 MPa. Diese sind in Abbildung 39 grafisch dargestellt. Die Bereiche erhöhter Druckspannungen sind analog der in Abbildung 38 analysierten Belastungsfalles. Dieser Belastungsfall ist ebenfalls zu hoch.

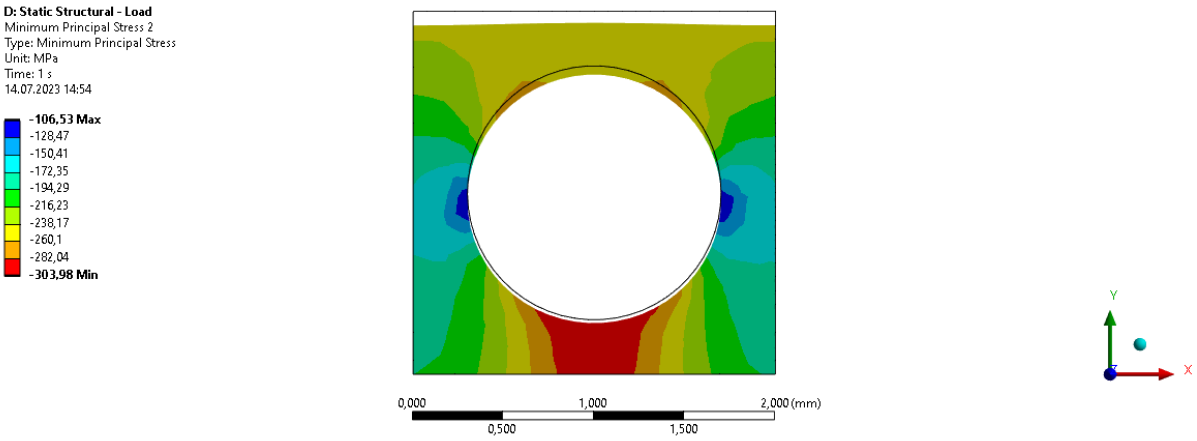

Abbildung 39: Dritte Hauptspannung im Lastfall 1

Als letzten Lastfall wurde der Druck in Iterationen soweit verringert, dass die Festigkeit von 78 MPa [48] eingehalten werden konnte. Dieser Fall tritt bei einer Belastung mit 62,5 MPa ein. Dadurch resultieren Druckspannungen von 77,7 MPa in der Struktur. Somit wird eine Auslastung von 0,996 erreicht.

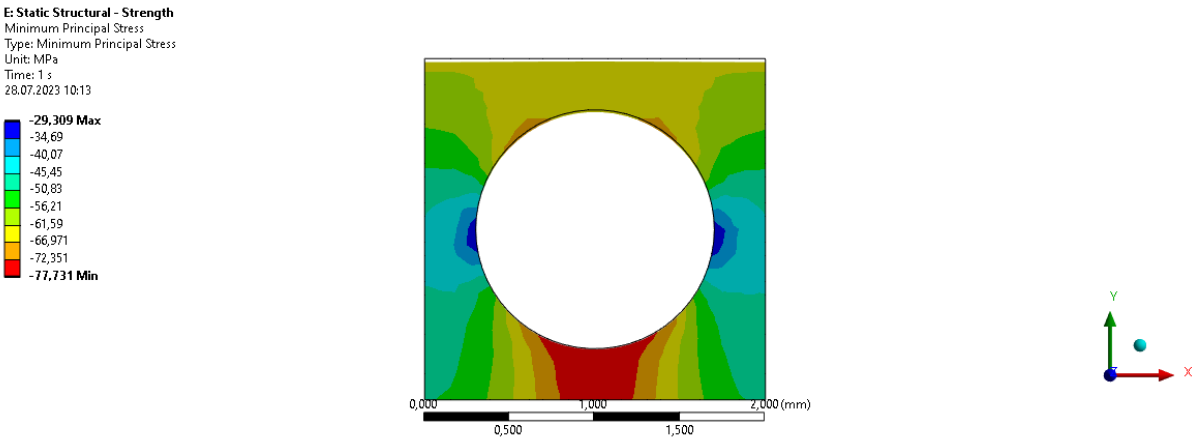

Abbildung 40: Dritte Hauptspannung der Matrix mit realistisch möglicher Maximallast

Dabei erfährt die Faser kaum eine Verformung. Diese Aussage wird durch nachfolgende Abbildung verdeutlicht, in welcher die Dehnung der Faser inklusive des Rahmens des unverformten Modells dargestellt ist. Die Konturen überdecken sich nahezu vollständig. Die Außenkontur ändert sich kaum und im Inneren der Pore sind gewissen Verschiebungen zu vernehmen. Von diesen werden jedoch keine wesentlichen funktionellen Auswirkungen erwartet.

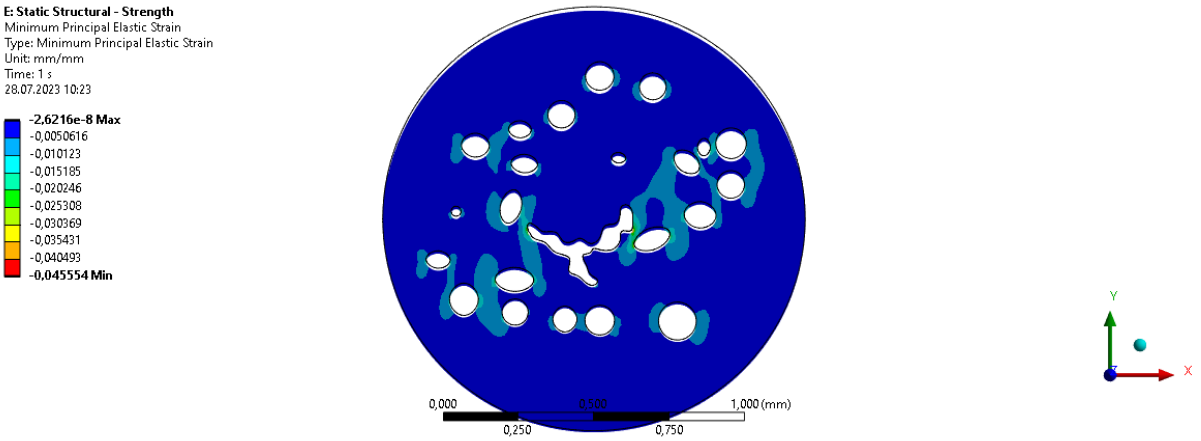

Abbildung 41: Dehnungen an der Faser mit einer Belastung von 62,5 MPa

Somit wird abschließend für diesen Bereich festgestellt, dass das Matrixmaterial die Verformungen überwiegend aufnimmt. Die Kräfte werden in dieser Belastungsrichtung kaum durch die Faser absorbiert. Hierfür ist eine Belastung in Faserrichtung notwendig. Diese sollte nach den Gestaltungsregeln für Faserverbundbauteile generell

erzielt werden. Im Allgemeinen hält der Verbund in dieser Richtung nur sehr geringen Kräften stand. Im analysierten Fall tritt zusammengefasst eine Schädigung ab einer Druckbelastung von über 62,5 MPa ein.

5.4 Simulation Bereich 2: Fasern in der Matrix

Als zweiten Analysebereich wurde das Deformationsverhalten der im Elektrolyten eingebetteten Fasern ausgewählt. Dieses entspricht der Analyse aus dem ersten Bereich in einer höheren Größenordnung. Verformungen der Elektrode könnte zu funktionsändernden Effekten führen. Für die Modellbildung gilt es zunächst ein RVE-Element zu entwerfen. Hierfür ist die Generierung mittels einer zufälligen Verteilung von Fasern in einer 50 x 50 µm Matrix angedacht. Um dieses Modell zu entwerfen, wird ein MATLAB-Code verwendet [57]. Dieser wendet die Monte-Carlo-Methode an, welche auch als Mehrfachwahrscheinlichkeitssimulation bezeichnet wird. Die Methode beschreibt ein mathematisches Verfahren, dass zur Schätzung der möglichen Ergebnisse eines ungewissen Ereignisses verwendet wird [58]. Der Faserdurchmesser wird mit 7 µm festgelegt. Das aus diesem Algorithmus resultierende RVE-Element ist in Abbildung 42 dargestellt.

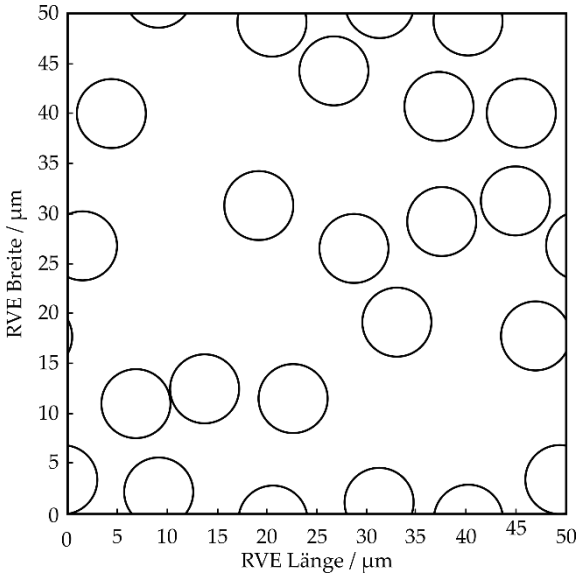

Abbildung 42: RVE-Element – Elektrodensimulation [57]

Die Vorgehensweise der Modellbildung wird analog der vorhergehenden RVE-Simulation durchgeführt. Der Unterschied ist, dass das Modell von der Nanoebene in die Mikroebene erweitert wurde. Das neue Modell setzt sich somit aus mehreren der Nano-RVE mit einer zufällig angeordneter Faserstruktur zusammen. Daher können die Materialdaten der Tabelle 10 ebenso eingesetzt werden. Der Reibkoeffizient entspricht ebenfalls dem Wert 0,65.

Das RVE-Element wird über Verschiebungsrandbedingungen an den Rändern fixiert. Die vertikale Verschiebungskomponente bleibt am linken und rechten Rand frei. Hierbei gilt zu erwähnen, dass aus Gründen der Vereinfachung keine periodischen Randbedingungen aufgebracht wurden. Dies gilt es bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Demnach haben die Randbedingungen möglicherweise Einfluss auf die Ergebnisse in den Randbereichen. Die Analyse erfolgt mit einem nichtlinearen Lösungsverfahren. Aus Sicht des Anwendungsfalles ist es schwer, einen Belastungsfall in der Dickenrichtung ausfindig zu machen. Generell besteht die Zielsetzung die Fasern in Belastungsrichtung zu legen. Somit ist es ein teilweise widersprüchlich, den Belastungsfall in der vorliegenden Dickenrichtung zu überprüfen. In diesem Fall trägt die Matrix die Last ohne Unterstützung durch die Fasern. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieser Fall aufgrund der strukturellen und elektrischen Funktion auftreten wird. Somit ist dieser Belastungsfall kritisch und wird dennoch betrachtet. Um einen Wert als Belastung zu erhalten, könnte eine statische Berechnung zur Generierung von Werten durchgeführt werden. Hierbei würde die Propellerschubkraft als Grundlage dienen. Dieser Belastungsfall würde jedoch im Idealfall über die Fasern getragen werden. Für optimale strukturelle Eigenschaften erfolgt die Orientierung dieser in Richtung der größten Spannungen. Somit würden sehr hohe unrealistische Belastungsfälle resultieren. Aus diesem Grund wurden drei Belastungsfälle festgelegt. Im skalierten RVE wird mit Kräften in Höhe von 100 N, 275 N und 450 N belastet. Diese entsprechen einer Druckrandbedingung von 400 MPa, 1100 MPa und 1800 MPa. Somit wird ein breites Belastungsspektrum abgedeckt. Die Belastung

erfolgt im Simulationsmodell über einen starren Kontaktkörper. Durch diesen wird sichergestellt, dass die Verformung an der Oberkante homogen aufgetragen wird. Das vollständige Modell des Präprozessors wird nachfolgend abgebildet. Es ist um den Faktor 10 skaliert.

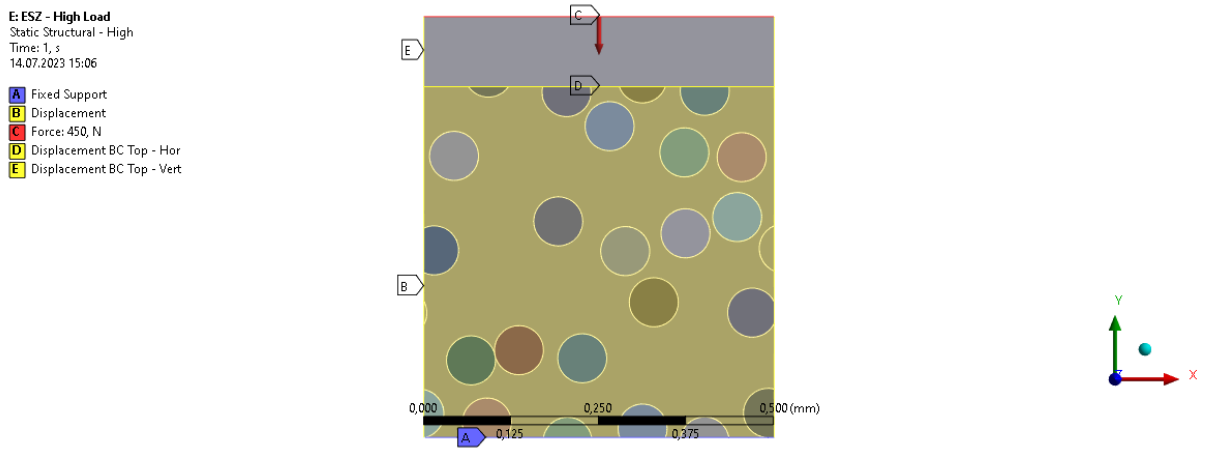

Abbildung 43: Randbedingungen am RVE 2

Als Ergebnis lassen sich verschiedene Phänomene feststellen. Aufgrund des spröden Werkstoffverhaltens sind keine bleibenden Verformungen zu erwarten. Lediglich die elastischen Bereiche im Bereich von Raumtemperatur sind von Relevanz. Demnach wird auch nach der Hauptnormalspannungshypothese nach Rankine die betragsmäßig größte Spannung als Bewertungskriterium zur Schadensvorhersage verwendet [51]. Diese ist im vorliegenden Fall die dritte Hauptspannung. Bevor diese im Detail untersucht werden, wird in der nachfolgenden Abbildung zunächst die Deformation des Lastfalles 1800 MPa dargestellt.

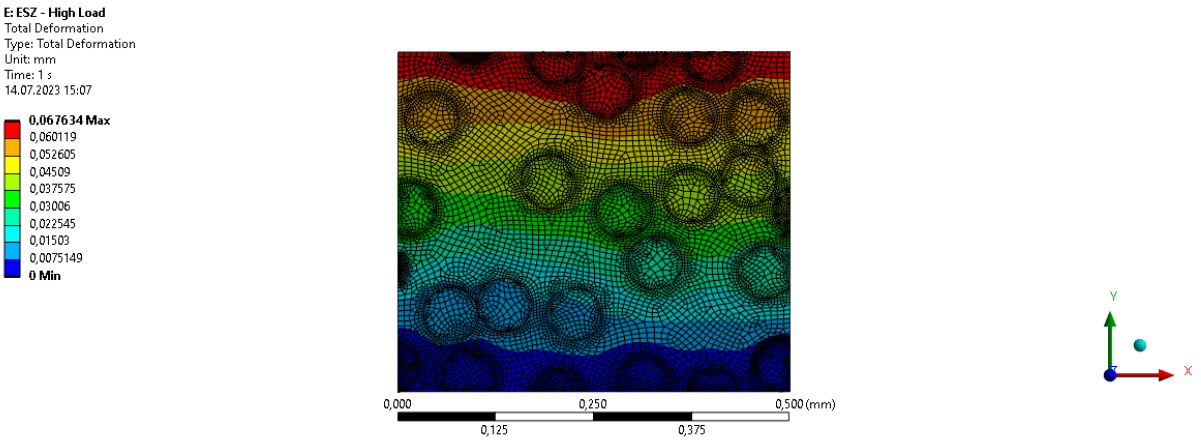

Abbildung 44: RVE 2 - Lastfall 3 - Absolute Verformung

Anhand der maximalen Verschiebung von 0,068 mm lässt sich eine Kompression von 13,5 Prozent berechnen. Diese relative Kompression ergibt sich für die anderen beiden Lastfälle zu 3,1 Prozent und 8,3 Prozent. In Abbildung 44 zeigt sich, dass trotz der großen Verformung kaum Deformationen in den Fasern auftreten. Dieser Fall wird auch durch Abbildung 45 bestätigt. Die Fasern verändern ihre Position, erfahren aber nur sehr geringe Dehnungen. Die im Plot angezeigte maximale Dehnung von 23,2 Prozent ist auf Singularitäten zurückzuführen. Sie resultieren aus der Geometrie und den Randbedingungen. Die Bereiche, an denen diese auftreten, sind jedoch zur Bewertung des Gesamtverhaltens nicht von absoluter Relevanz. Es ist bekannt, dass die Randbedingungen teilweise wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Demnach verfälschen sie oft die Simulationsergebnisse. Nach der Definition von Hill müssen RVE unabhängig von den Randbedingungen sein. Dies kann beispielsweise durch die Größe des RVE erreicht werden [59]. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Ergebnisse am Rand nicht mit auszuwerten und stattdessen die Ergebnisse im mittleren Bereich fokussiert zu analysieren. Vor allem in diesem Areal ist die geringe Dehnung im Bereich von ungefähr 1,8 bis 4,2 Prozent zu erkennen.

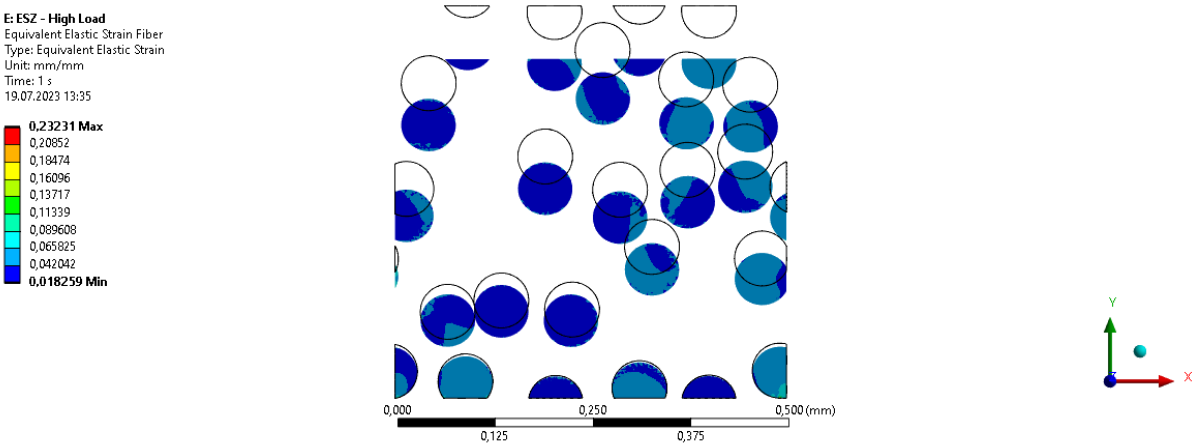

Abbildung 45: Äquivalente elastische Dehnung der Fasern

Da nur sehr geringe geometrische Änderungen in den Fasern stattfinden, wird die Beanspruchung überprüft. Möglicherweise ergibt sich das Potential die Belastung zu erhöhen.

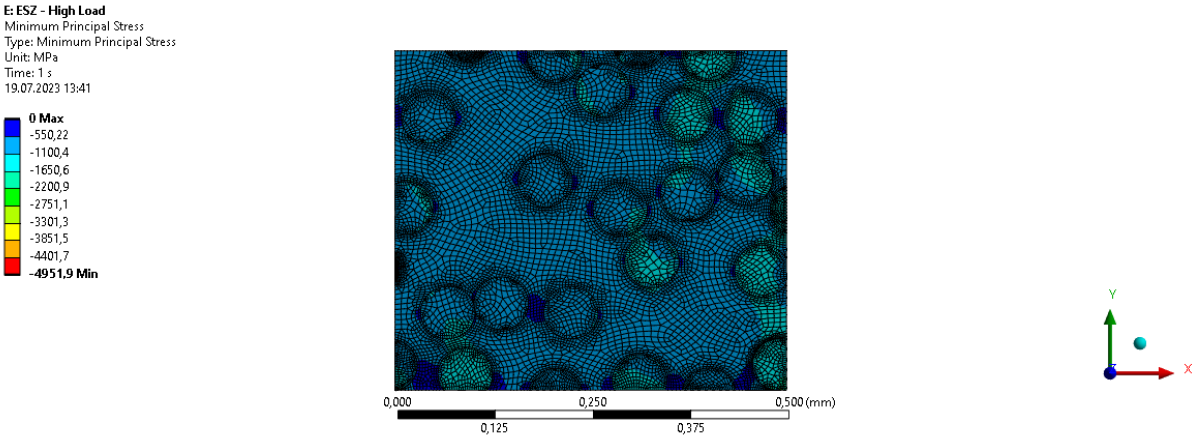

Abbildung 46: Dritte Hauptspannung im höchsten Lastfall

Anhand des am stärksten belasteten Lastfalls ist zu sehen, dass die Spannungen sehr hoch sind. Teilweise ist dies wieder auf Singularitäten zurückzuführen. Dennoch gehen die realistischen Spannungen bis in die Bereiche von ungefähr 1600 MPa. Diese führen in der Matrix zum Bruch.

Abschließend lässt sich feststellen, dass aufgrund der Belastung der Gesamtstruktur in Dickenrichtung keine relevanten geometrischen Änderungen in den Fasern hervorgerufen werden können. Es besteht die Vermutung, dass eine geometrische Änderung

überwiegend durch das poröse Elektrolyt bestimmt wird. Daher wird dieser Bereich im Detail untersucht.

5.5 Simulation Bereich 3: Poröser Elektrolyt

Der dritte Bereich fokussiert sich auf den porösen Elektrolyten. Um eine Ionendiffusion stattfinden zu lassen und parallel strukturmechanischen Anforderungen gerecht zu werden, besteht die Matrix aus einem festen und flüssigen Anteil. Der flüssige Anteil ist dabei das Elektrolyt, welches die Ionendiffusion ermöglicht. Im Falle des in Kapitel 3.2 ausgewählten SSC ist PVA als fester Bestandteil und H_2SO_4 als Flüssigkeit vertreten. Das PVA übernimmt die mechanischen Anforderungen und das H_2SO_4 befindet sich in den Poren und ermöglicht die Ionendiffusion. Im Falle einer Kompression ist zu erwarten, dass geometrische Änderungen in den Poren stattfinden. Somit ist eine Änderung der geometrischen Größen Porosität und Tortuosität zu erwarten. Um den Umfang und dessen Ausmaß zu untersuchen wird in diesem Bereich eine RVE-Analyse durchgeführt.

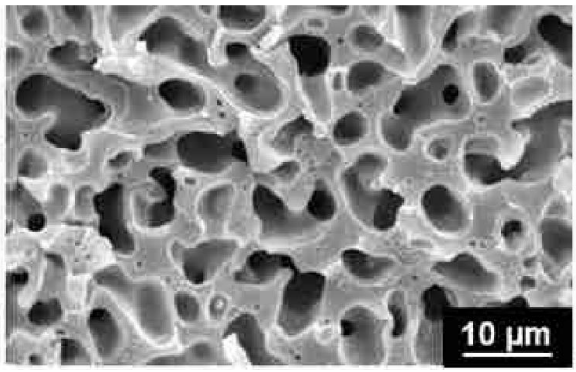

Abbildung 47: REM-Aufnahme des strukturellen Elektrolyten 50MTM57 [60]

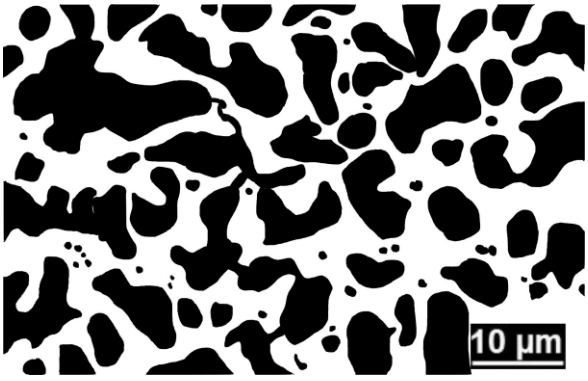

Abbildung 48: Illustration der REM-Aufnahme [60] für Untersuchungen

Als Grundlage zur Modellbildung wird eine REM-Aufnahme verwendet. Dabei musste auf eine Abbildung aus der Veröffentlichung von Shirshova et al. [60] zurückgegriffen werden. In dieser ist die Struktur des Epoxidharzes 2,3M_50MTM57 dargestellt. Für das ausgewählte Material als Kombination von PVA und H_2SO_4 liegen zum

aktuellen Zeitpunkt keine realitätsgetreuen Aufnahmen vor. Somit muss diese Grundlage zur Modellbildung zunächst ausreichen.

Die REM-Aufnahme ist in Abbildung 47 dargestellt. Diese wurde für die Analyse der Ionendiffusion und der strukturmechanischen Modellbildung als Vektorgrafik illustriert. Somit sind die Grenzen deutlicher in Abbildung 48 erkennbar.

Aufgrund der Komplexität und dem daraus resultierenden numerischen Aufwand wurde schließlich von einer Modellbildung mittels REM-Aufnahme als Grundlage abgesehen. Stattdessen erfolgt die Generierung eines RVE-Elementes mit Hilfe eines MATLAB Codes zur Vereinfachung. Anstelle der komplexen Porenstruktur wird eine Vereinfachung durch Kreise als geometrische Grundelemente gewählt. Die entstehende Struktur soll die REM-Aufnahme als Vereinfachung repräsentieren. Dieses Vorgehen wird bei porösen Materialien des Öfteren umgesetzt [61–63]. Der Porendurchmesser und deren Position generiert sich im Code zufällig. Bei der Modellbildung wurde das RVE auf quadratische Abmessungen mit einer Seitenlänge von 60 μm, in Analogie zum Modell aus Abbildung 47, skaliert. Um einen Ionenfluss zwischen positiver und negativer Elektrode zu gewährleisten, muss ein Weg durch die Poren zwischen diesen beiden Elektroden möglich sein. Daher wurde bei dem ausgewählten Modell darauf geachtet, dass diese Anforderung erfüllt wird. Somit resultiert das in Abbildung 49 dargestellte Modell.

In Abbildung 49 ist ein Pfad in der Mitte des RVEs durch das weiß dargestellte Elektrolyt zu erkennen. Somit ist der Ionenfluss gewährleistet und die Funktion als SSC sichergestellt. Bezüglich der Ionendiffusion ist zu erwähnen, dass ein zweidimensionales Modell nicht vollständig der Realität entspricht. In der Praxis liegt eine dreidimensionale Struktur vor. In dieser existiert eine Vielzahl von Wegen. Ionen wandern nicht ausschließlich in einer Ebene durch den Körper, sondern können sich auch in der dritten Raumrichtung bewegen und dort mögliche Pfade ablaufen, um zum Ziel zu gelangen. Demnach gilt es für die Abstraktion einen Fall zu finden, welcher diese Möglichkeit abbildet. Somit ist festzustellen, dass in der Realität durchaus der Fall

vorkommt und Ionen in einer Ebene wandern. Es ist jedoch nicht realitätsgetreu, dass ein gesamter Pfad in der kürzesten Ebene zwischen zwei Elektroden vorhanden ist. Um diesen Fall im Gesamten abzubilden, ist ein dreidimensionales Modell notwendig. Für die Untersuchung des Verhaltens der Struktur hingegen ist eine zweidimensionale RVE-Abstraktion vollkommen ausreichend. Die Begründung hierfür liegt in dem kleinen Analysebereich. Pfade dieser Art sind in der Realität möglich.

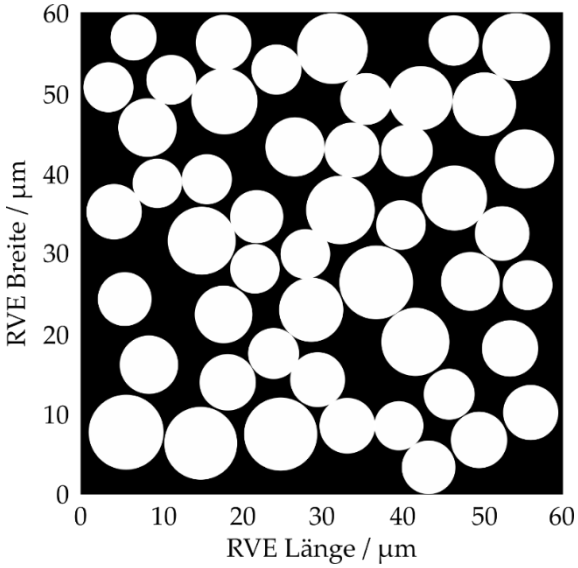

Abbildung 49: RVE-Elektrolyt-Plot

Somit wird nachfolgend die strukturmechanische Simulation mit der FEM durchgeführt. Entgegen den bisherigen Simulationen wird in diesem Fall das kommerzielle Programm COMSOL Multiphysics anstelle von ANSYS eingesetzt. Diese Software ist zur Simulation verschiedener physikalischer Phänomene unter Verwendung von Differentialgleichungen geeignet. Dabei liegt die Spezialisierung auf der Kopplung dieser Simulationen als multiphysikalische Berechnung. Im folgenden Kapitel soll die multiphysikalische Kopplung von Strukturmechanik und den elektrochemischen Eigenschaften untersucht werden. Dafür wird später dieses Modell weiterverwendet.

Im Rahmen der Simulation wurden die Randbedingungen analog der üblichen Vorgehensweise bei der RVE-Modellierung gesetzt. Im Zuge der Belastung erfolgt eine Verschiebungsrandbedingung an der oberen Kante. Diese beträgt 6 µm. Dieser Wert entspricht einer relativen Kompression von 10 Prozent. Ab dieser kritischen

Verformung kann weiterhin kein durchgängiger Ionendiffusionspfad mehr lokalisiert werden. Im Rahmen der Simulation wurde auf die Kontaktdefinition zwischen den Poren verzichtet. Auf der einen Seite reduziert sich der numerische Berechnungsaufwand deutlich, da anstelle einer nichtlinearen Berechnung ein lineares Vorgehen angewendet werden kann. Auf der anderen Seite ist für die Analyse derzeitig nur relevant, wann es zur Porenschließung kommt. Die Materialverformung durch den Kontakt liefert dabei keine weiteren Informationen.

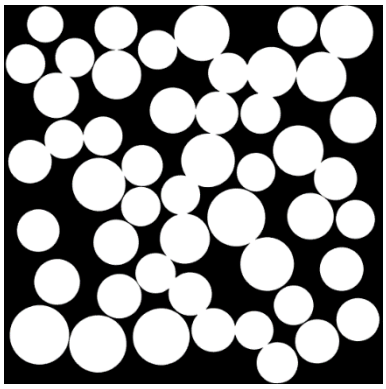

Abbildung 50: Elektrolytstruktur ohne Verformung

Als Ergebnis resultiert ein deformiertes Modell. Wie bereits erwähnt, wurde die Verschiebungsrandbedingung mit 6 μm als kritischen Wert ausfindig gemacht. Um das Verhalten dieser Struktur während der Belastung sichtbar zu machen, wurde die Verschiebung im Intervall von 0 bis 6 μm variiert. Als Ergebnis zeigt sich ein Verlauf in Abbildung 51.

Anhand der Abbildung liegt die Vermutung nahe, dass sich Porosität und Tortuosität des Ionendiffusionspfades ändern. Somit wird an dieser Stelle eine mechanisch-elektrochemische Kopplung vermutet. Diese wird im Detail untersucht. Zuvor wird jedoch noch geprüft, ob das Material in diesen Lastfällen geschädigt wird.

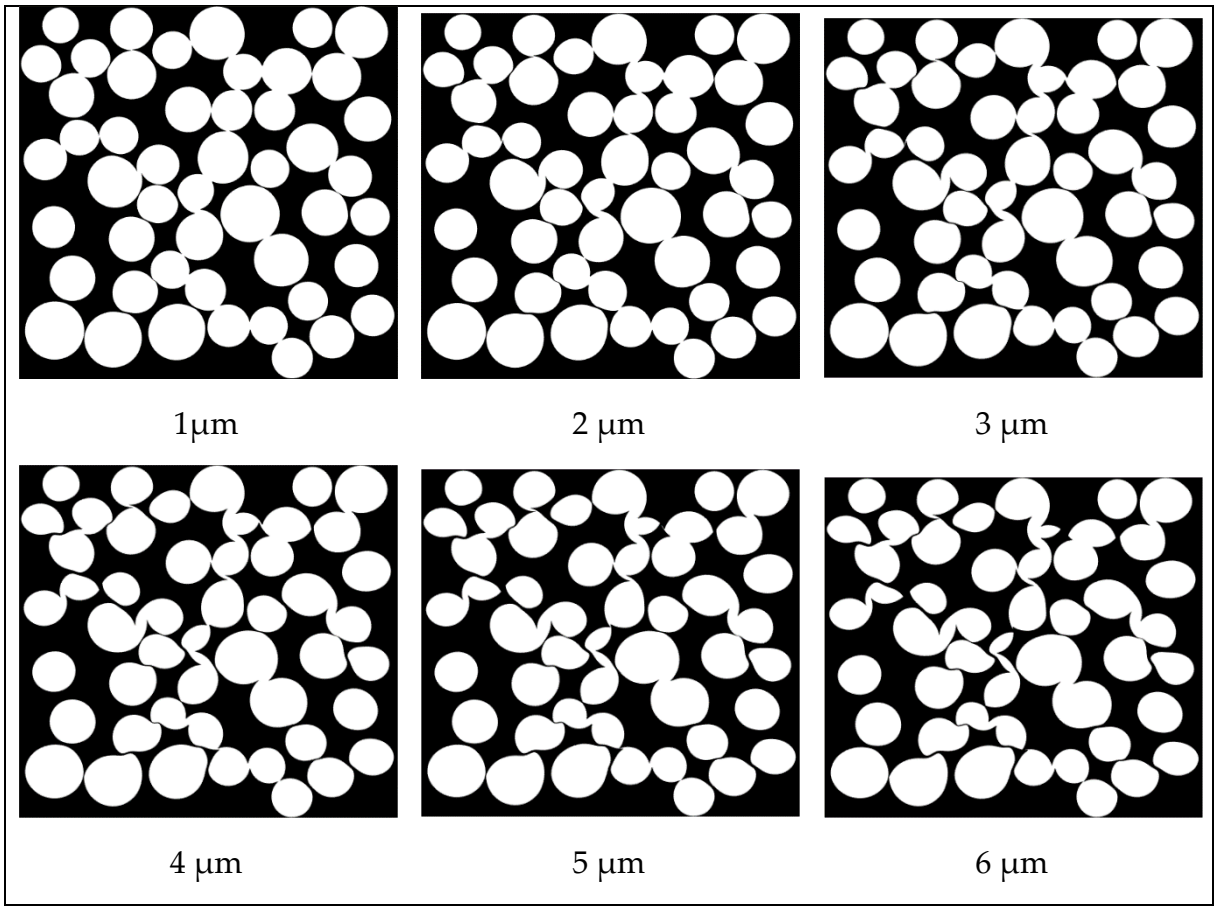

Abbildung 51: Verformungsverlauf der Struktur

In der Darstellung der Abbildung 52 wird die dritte Hauptspannung dargestellt. Diese beschreibt wie in den vorherigen Beispielen die kritische Spannung im Sinne der Schädigungshypothese nach Rankine. Die maximale Druckspannung entspricht 2210 MPa. Diesen Spannungen würde das PVA nicht aushalten. Im oberen linken Bereich ist zu erkennen, dass die maximale Spannung an einem kleinen Steg, nahe der Randbedingung zu sehen ist. Somit könnten diese Werte aufgrund der Randbedingung verfälscht werden. Im mittleren Bereich sind die Spannungen deutlich geringer. Hier kommt es lediglich vereinzelt zur Schädigung. Diese Nano- beziehungsweise Mikrobrüche können in der Gesamtstruktur vernachlässigt werden. Im gesamten RVE wird die Last im Allgemeinen ertragen. Somit kann mit der Verschiebung und relativen Kompression von 10 Prozent weitergearbeitet werden.

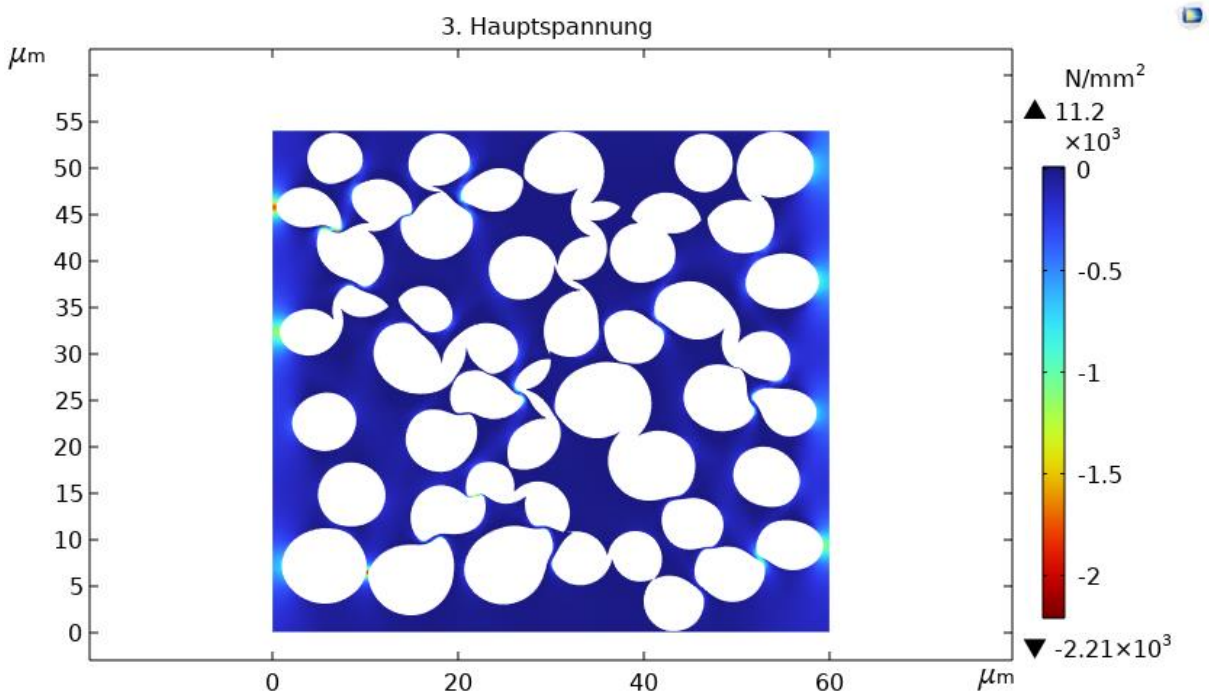

Abbildung 52: Dritte Hauptspannung Elektrolyt RVE

Aus diesem Grund wird nachfolgend die mechanisch-elektrochemische-Kopplung am SC untersucht.

6 Multiphysikalische SSC-Simulation

In der Regel erfolgt eine getrennte Betrachtung von mechanischen und elektrochemischen Eigenschaften eines SSC. In dieser Abhandlung gilt die Zielsetzung beide physikalische Phänomene innerhalb einer Simulation zu koppeln. Hierfür ist die Verwendung des kommerziellen FE-Programms COMSOL Multiphysics [64] vorgesehen, dessen Hauptfunktionalität in der multiphysikalischen Simulation liegt. Zunächst müssen jedoch die relevanten Kopplungsparameter analysiert werden.

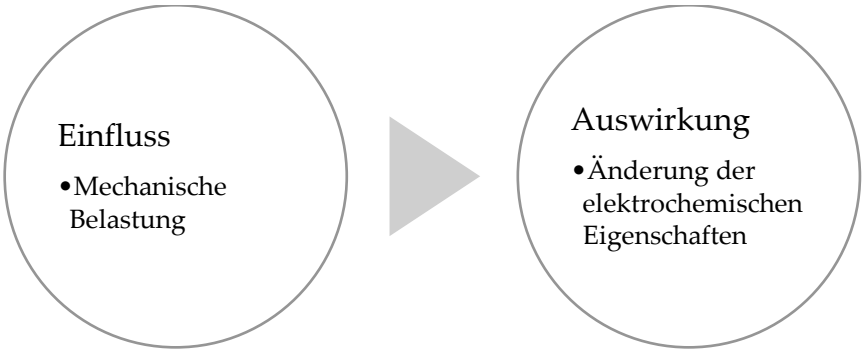

Abbildung 53: Richtung der multiphysikalischen Kopplung

6.1 Multiphysikalischer Kopplungseffekt

Ausgehend von einer mechanischen Belastung werden Änderungen der elektrochemischen Eigenschaften erwartet, siehe Abbildung 53. Somit werden zunächst relevante Gleichungen für mechanische und elektrochemische Berechnungen vorgestellt. Mit diesen erfolgt weiterführend eine Analyse gekoppelter Parameter.

Die Vorgehensweise der strukturmechanischen FEM wird der nachfolgenden Betrachtung zugrunde gelegt. Wie im Kapitel 2.3.2 bereits ausführlich beschrieben, erfolgt die Kopplung von Spannung und Dehnung unter Verwendung verschiedener Steifigkeits- oder Nachgiebigkeitsmatrizen. Durch diese werden die Materialparameter zugewiesen. Die Berechnung der Gesamtdehnung erfolgt durch Addition aus elastischer und nichtelastischer Dehnung $\varepsilon_{\mathrm{el}}$ und $\varepsilon_{\mathrm{inel}}$.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\mathrm{el}} + \varepsilon_{\mathrm{inel}} \tag{30}$$

Im Anwendungsfall ist aufgrund der Werkstoffeigenschaften vor allem die lineare Dehnung von Relevanz. Diese wird auch im weiteren Verlauf ausschließlich berücksichtigt. Plastische Verformungen werden bei dem vorhandenen spröden Material nicht erwartet.

Die elastische Dehnung wird durch das Hook´sche Gesetz, siehe Formel (31), ermittelt. Die Ermittlung erfolgt durch die jeweiligen Verschiebungen u.

$$\varepsilon_{el} = \frac{1}{2}[(\nabla u)^T + \nabla u] \tag{31}$$

Durch beide vorgestellten Parameter kann die Spannung berechnet werden.

$$\sigma_{\mathrm{el}} = \frac{C(E, \nu, G)}{\varepsilon_{\mathrm{el}}(u)} \tag{32}$$

Damit kann das Gleichungssystem aufgestellt werden.

$$0 = \nabla \cdot \sigma + F_{\mathrm{V}} \tag{33}$$

Die Volumenkräfte werden durch den Parameter F_{V} berücksichtigt. Die bisherigen Gleichungen beziehen sich auf die strukturmechanische Berechnung.

Im Falle der elektrochemischen Berechnung am SC ist überwiegend die Nernst-Planck-Gleichung relevant. Diese beschreibt die Bewegung von Ionen unter Berücksichtigung des elektrischen Feldes.

$$\frac{\partial c_{\mathrm{l}}}{\partial x} = \nabla.\left[D_{\mathrm{i}}\left(\nabla c_{\mathrm{i}} + c_{\mathrm{i}}\frac{z_{\mathrm{i}}F}{RT}\nabla E\right)\right] \tag{34}$$

Dabei wird der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} mit nachfolgender Konvention berechnet.

$$D_{\mathrm{eff}} = \frac{\varphi}{\tau}D_{\mathrm{bulk}} = \kappa D_{\mathrm{bulk}} \tag{35}$$

Demnach gehen die geometrischen Größen Porosität φ und Tortuosität τ in die Berechnung ein. Sie können als Variable κ zu einem Term zusammengefasst werden. Aufgrund von Deformationen strukturmechanischer Natur erfahren sie potenzielle Änderungen. Daher lässt sich eine Beeinflussung von beiden physikalischen

Betrachtungsweisen feststellen. Demnach werden vor allem diese Parameter für die mechanisch-elektrochemische Kopplung identifiziert.

6.2 Analyse der geometrischen Größen Porosität und Tortuosität

Als Ergebnis aus der bisherigen Betrachtung resultiert die Erkenntnis, dass die geometrischen Größen Porosität und Tortuosität wichtige Kennzahlen bezüglich des multiphysikalischen Kopplungsphänomens darstellen. Das bedeutet, dass sie den entscheidenden Übergang von mechanischen Einflüssen auf elektrochemische Eigenschaften verknüpfen. Somit gilt es diese zu ermitteln.

Porosität

Die Porosität gibt im zweidimensionalen Fall den flächenmäßigen Anteil von Poren $A_{\text{porös}}$ gegenüber der Gesamtstruktur A_{gesamt} an. Somit kann sie mit Formel (36) berechnet werden.

$$\varphi = \frac{A_{\text{porös}}}{A_{\text{gesamt}}} \tag{36}$$

Die Analyse fokussiert sich auf zweidimensionale RVE-Simulationen. Dementsprechend bieten sich verschiedene Möglichkeiten zur Messung der Porosität an. Eine Möglichkeit ist es, dass Bildbearbeitungs- und Bildverarbeitungsprogramm ImageJ [65] zu verwenden. Das Java-Programm wird in der Praxis häufig im Rahmen wissenschaftlicher Bildanalyse eingesetzt. Demnach bietet es sich für die Analyse der Porosität im vorliegenden Fall an. Dabei wird nachfolgende Vorgehensweise umgesetzt.

Nachdem das Bild in das Programm importiert ist, kann ein Maßstab definiert werden. Auf diesen wird die gesamte Vermessung referenziert. Dabei kann auch eine Einheit angegeben werden. Das Programm verrechnet die Anzahl der Pixel über die angegebene Länge, sodass sich eine Referenzmaßstab in der Form: Pixel pro Längeneinheit ergibt. Im Anschluss erfolgt die Präparation der Messung. Hierfür werden die zu messenden Bereiche unter Verwendung des Tools: „Wand (tracing) tool“ ausgewählt.

Dass Programm wählt dabei alle direkt angrenzenden Pixel gleicher Farbe aus. Der definierte Bereich wird dann an den „ROI-Manager“ übergeben. Dieser Vorgang muss an allen auszuwertenden Poren durchgeführt werden. Am Ende werden alle definierten Bereiche ausgewählt und gemessen. Das Ergebnis kann im Anschluss ausgewertet.

Der Vorteil dieser Methode ist die einfache Zugänglichkeit und Durchführbarkeit. Als Nachteil lässt sich nennen, dass der gesamte Prozess sehr zeitaufwändig ist. Das manuelle Auswählen der Poren kann je nach Abbildung viel Zeit in Anspruch nehmen. Außerdem muss die gesamte Auswertung eigenständig in einem weiteren Programm, wie beispielsweise Microsoft Excel, erfolgen. Daher rentiert sich, ab einer gewissen Anzahl an Analyseaufgaben und bei steigender Komplexität der Abbildung, die Erstellung eines Algorithmus. Dieser soll die Aufgabe automatisiert abarbeiten.

Im Folgenden wird die Entwicklung eines Python-Skriptes vorgestellt, welches die Pixel einer vordefinierten Farbe automatisch zählt und diese anschließend in das Verhältnis zur Gesamtanzahl setzt. Somit erfolgt eine direkte Ausgabe der Porosität. Der Algorithmus fängt im oberen linken Pixel des Bildes an und prüft die Farbe. Als Konvention wird nachfolgend davon ausgegangen, dass Poren in weiß dargestellt werden. Als Beispiel dient Abbildung 54 als Grundlage zur weiteren Beschreibung.

Entspricht die Farbe dem RGB-Farbcode (255, 255, 255), wird die Variable Pixelzähler um den Wert 1 erhöht. Ansonsten passiert nichts. Im weiteren Verlauf läuft der Algorithmus alle Pixel in x-Richtung ab. Sobald die Reihe vervollständigt ist, wird die y-Richtung um einen Pixel erhöht. Somit kann am Schluss die Anzahl der Gesamtpixel aus der Multiplikation von Breite und Höhe ermittelt werden. Die Variable Pixelzähler bildet die poröse Fläche ab. Somit kann die Porosität mit Python nach Formel (36) berechnet und anschließend ausgegeben werden. Damit erfolgt die Vermessung automatisch und effizient. Als Konvention gilt, dass die zu vermessende poröse Fläche weiß sein muss. Der Farbcode lautet in RGB-Angabe: (255, 255, 255) beziehungsweise (#ffffff) als Hex-Code.

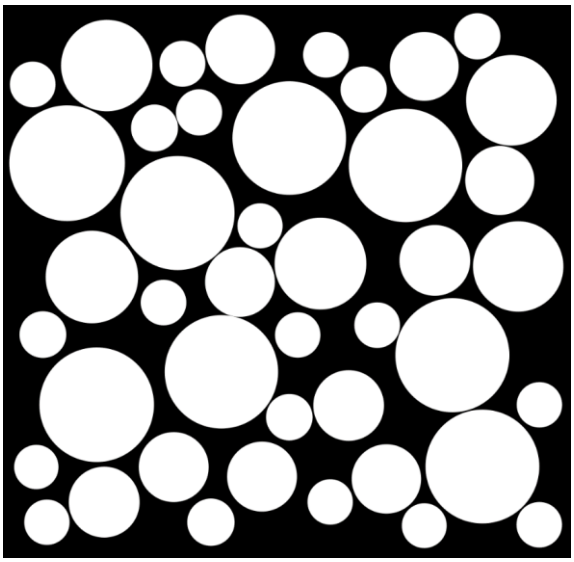

Abbildung 54: Beispielbild zur Analyseaufgabe

Tortuosität

Nachdem die Porosität analysiert werden kann, gilt es sich mit der Tortuosität auseinanderzusetzen.

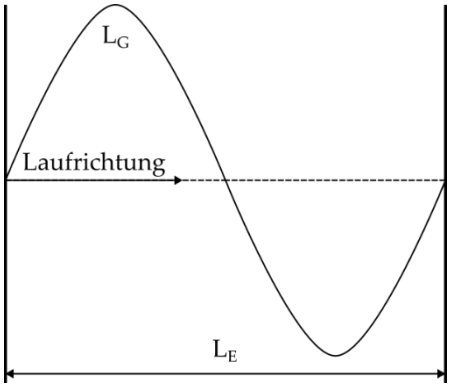

Abbildung 55: Definition der Tortuosität

Die Tortuosität ist, wie die Porosität auch, ein Parameter zur Beschreibung poröser Materialien. Sie gibt das Verhältnis vom durchlaufenen Weg mit Hindernissen im Vergleich zum kürzesten Weg an. Abbildung 55 veranschaulicht den Sachverhalt. Der kürzeste Weg wird als euklidische Länge L_E und die Strecke mit Umwegen als geodätische Länge L_G bezeichnet. Die Tortuosität berechnet sich nach Roque und Costa [66] wie folgt.

$$\tau = \frac{L_{\mathrm{G}}}{L_{\mathrm{E}}} \tag{37}$$

Für die Ermittlung der Tortuosität wurden verschiedene Möglichkeiten erwogen. Einerseits kann die Tortuosität manuell mittels ImageJ gemessen werden. Dafür müssen diverse Verläufe eingezeichnet und vermessen werden. Die Vorgehensweise gleicht der der Porositätsmessung. Auch besteht die Möglichkeit ein Plug-In von Roque und Costa [66] zu implementieren. Weiterhin wurde der „BruggemanEstimator“ von der ETH Zürich [67, 68] entwickelt und zur Benutzung veröffentlicht. Letzterer umfasst ein Wolfram Mathematica Skript als Open Source Code, welcher zur Analyse von REM-Bildern im Anwendungsfall von porösen Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien entwickelt wurde. Für diese soll die Tortuosität ermittelt werden [68]. Der Vorteil ist, dass die Tortuosität auch für dreidimensionale Anwendungen ermittelt werden kann. Da die Bildpräparation jedoch sehr zeitaufwändig ist, wird von der Nutzung dieser Methode zunächst abgesehen. Auch gilt der Unterschied, dass im hiesigen Fall Bilder aus FEM-Simulationen zugrunde liegen.

Diese können grafisch einfacher aufbereitet werden. Die anderen zwei Methoden wurden ebenfalls als zu aufwändig zur häufigen Wiederholung erachtet. Vor allem der Fakt, dass die Tortuosität die kürzeste Verbindung von zwei Bereichen definiert, impliziert vielfache Messungen an unterschiedlichen Stellen eines Bildes. Somit wurde auch in diesem Fall ein Algorithmus in Python entwickelt, welcher die Analyse der Tortuosität übernimmt.

Die Analyseaufgabe der Tortuosität ist sichtlich komplexer als die der Porosität. Somit bietet es sich an zu Beginn eine Logik zu erarbeiten, welche die Funktionsweise des Algorithmus beschreibt. Der konzeptionelle Ansatz ist, dass der Algorithmus in einem oberen Punkt des Bildes startet und von dort aus geradlinig nach unten läuft. Dabei geht er von Pixel zu Pixel vor und prüft jeweils die Farbe. Sobald er dabei ein Hindernis erkennt, muss er dieses umlaufen. Als Konvention gilt, dass der Bewegungsbereich schwarz sein muss. Der Farbcode lautet (#000000) in Hex-Code Angabe. Demnach resultiert auch, dass für Hindernisse alle anderen Farben geeignet sind. Jeder Pixel, der

nicht dem Farbcode entspricht, wird als Pore gewertet. Dabei bietet es sich aufgrund des Kontrastes jedoch an, weiße Poren zu verwenden. Sobald der Algorithmus auf eine Pore stößt, wechselt er die Bewegungsrichtung. Dabei erfolgt eine Differenzierung in zwei Richtungen. Ein Pfad sucht die Pore gegen den Uhrzeigersinn ab und der andere Pfad in Richtung des Uhrzeigersinns. Dieses Muster ist in Abbildung 56 dargestellt. Als Grundlage dient das Testmuster aus Abbildung 54. Nach dem Umlaufen der Pore ist es das Ziel auf die geradlinige Achse zurückzukehren.

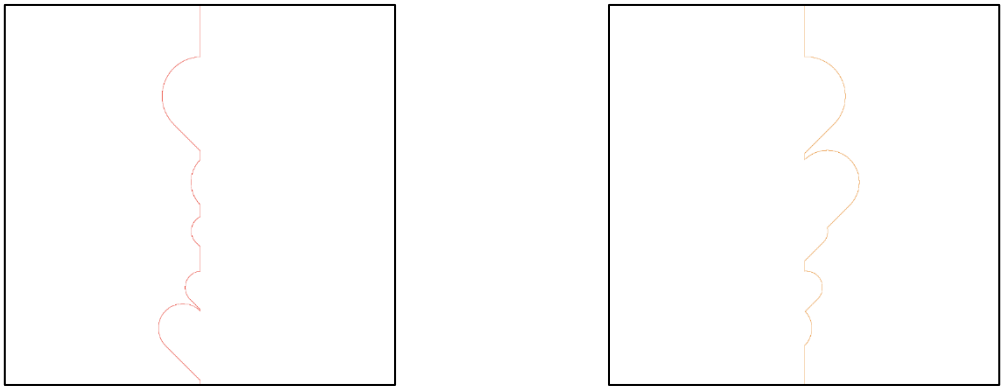

Abbildung 56: Pfade des Codes links: gegen den Uhrzeigersinn und rechts: im Uhrzeigersinn

Als abschließendes Ergebnis werden die generierten Bilder, wie in Abbildung 57 dargestellt, überlagert. Als Hintergrund wird dabei das Ausgangsbild verwendet. Auf dieses werden die generierten Pfadplots überlagert, sodass das Ergebnis abschließend visuell kontrolliert und nachvollzogen werden kann.

Für das Umlaufen müssen alle Eventualitäten definiert sein. Die dementsprechende Logik kann in Abbildung 58 eingesehen werden. Als Priorität gilt der Weg nach unten. Ansonsten läuft der Algorithmus je nach Vorgehen gegen oder im Uhrzeigersinn nach links oder rechts. Sobald er das Hindernis horizontal weiter umlaufen kann und sobald er wieder nach unten kann, tut er dies. Für den Fall, dass der Algorithmus den untersten Punkt der Pore erreicht hat, kehrt er im 45° Winkel zurück auf die geradlinige Achse. Somit wurde versucht die Ionenbewegung realitätsgetreu nachzubilden.

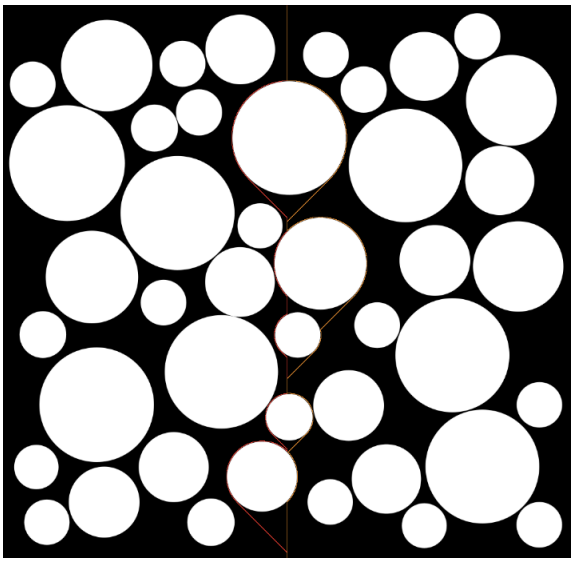

Abbildung 57: Ergebnis des Python Codes zur Messung der Tortuosität

Die Logik wurde bei einem potenziellen Fall sehr komplex. Dieser wird anhand der Laufrichtung gegen den Uhrzeigersinn erläutert. Sobald der Algorithmus die Richtung: „diagonal oben rechts“ ablaufen müsste, kam es zu einer komplexen Beschreibung der Möglichkeiten. Diese wurde vermieden. Stattdessen läuft der Algorithmus in einem solchen Fall gerade nach oben, bis er wieder auf Material stößt. Den Weg zählt er dabei nicht. Der Start- und Endpunkt wird dabei jeweils in einer Variable gespeichert. Von oben ausgehend, wird die Laufrichtung übergangsweise von „gegen den Uhrzeigersinn“ zu „im Uhrzeigersinn“ geändert. Die Pore wird dabei so lange umlaufen, bis der untere Ausgangspunkt erreicht wird. Sobald dies der Fall ist, springt er wieder zurück auf den oberen Punkt. Anschließend wird die übliche Vorgehensweise fortgesetzt. Sobald die Höhe des Bildes erreicht wird, wurde die geodätische Länge der Abbildung an dieser Achse vollständig abgelaufen. Somit wird die Messung beendet und die Tortuosität kann nach Formel (36) berechnet werden. In jeder Iteration wird die aktuell kleinste Tortuosität mit der neu ermittelten Tortuosität abgeglichen. Im Falle einer kleineren Tortuosität wird diese in der Variable gespeichert.

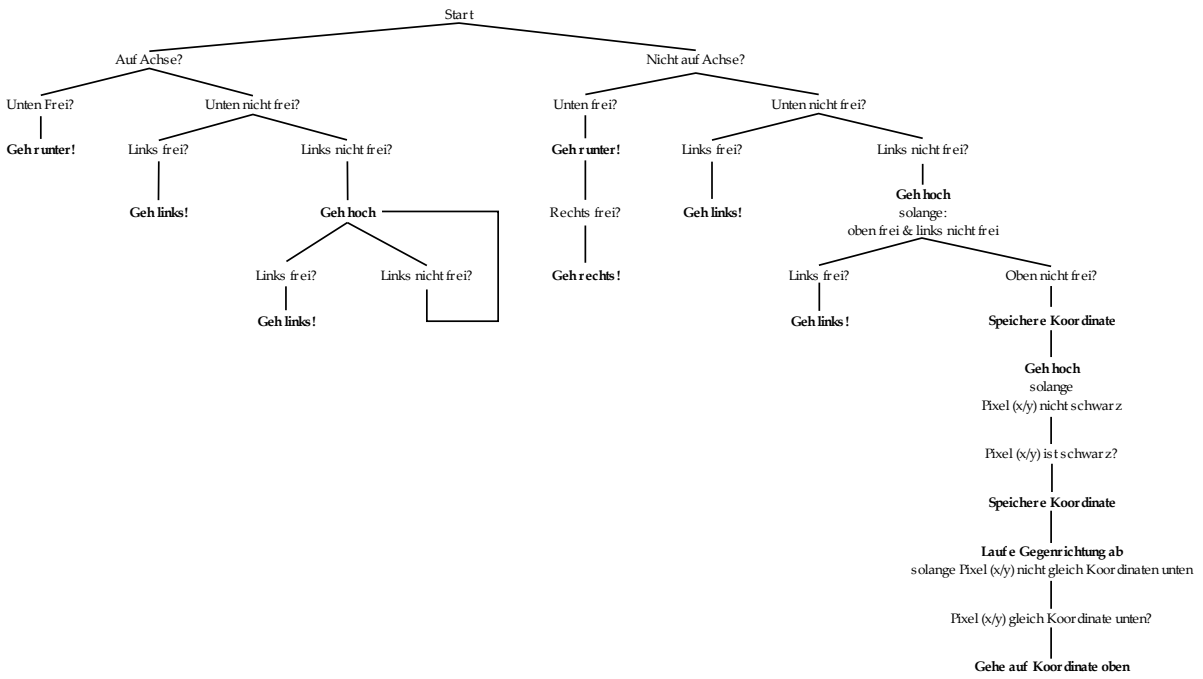

Abbildung 58: Logik des Algorithmus zur Analyse der Tortuosität

Bei der Messung der Tortuosität ist der Startpunkt je nach Abbildung relevant. Daher ist eine mehrfache Analyse auf unterschiedlichen Achsen unumgänglich, um ein sicheres, vergleichbares und reproduzierbares Ergebnis zu generieren. Aus diesem Grund wurde die Funktion implementiert, die Anzahl der abzulaufenden Pfade einzustellen. Die Pfade werden dabei über die gesamte Bildbreite gleichmäßig verteilt. Zur Darstellung wurden beispielsweise 20 Pfade ausgewählt und ausgewertet. Das Ergebnis kann in Abbildung 59 betrachtet werden. Die Auswahl des Bildes erfolgt durch die Pfadeingabe zum Speicherort. Um die Messung nachzuvollziehen, werden die gemessenen Pfade abschließend grafisch dargestellt. Beide Laufrichtungs-Vorgehensweisen werden dargestellt, wie auch die vollständige Überlagerung von Analysebild und der abgesuchten Pfade.

Als Grenze gilt zu erwähnen, dass die ermittelte Tortuosität nur eine Annäherung ist. In bestimmten Fällen beschreibt die Vorgehensweise mit der Laufrichtung links und rechts nicht vollständig den kürzesten Weg. In diesem Fall würde die Laufrichtung je nach Pore unregelmäßig wechseln. Dieser Fall ist nicht im Algorithmus abgebildet. Aufgrund der einstellbaren Pfade wird dieses Defizit jedoch über die Anzahl der

Messungen ausgeglichen. Somit erhält man über die Häufigkeit der Versuche ein gutes Ergebnis. Weiterhin beschreibt die Rückstellung auf die geradlinige Achse im 45° Winkel nicht die realitätsgetreue Flugbahn von Ionen. Diese ist unter anderem abhängig von der Geschwindigkeit. Als Flugbahn wird hier eher eine Parabel vermutet. Hier wird eine vereinfachende Annahme getroffen.

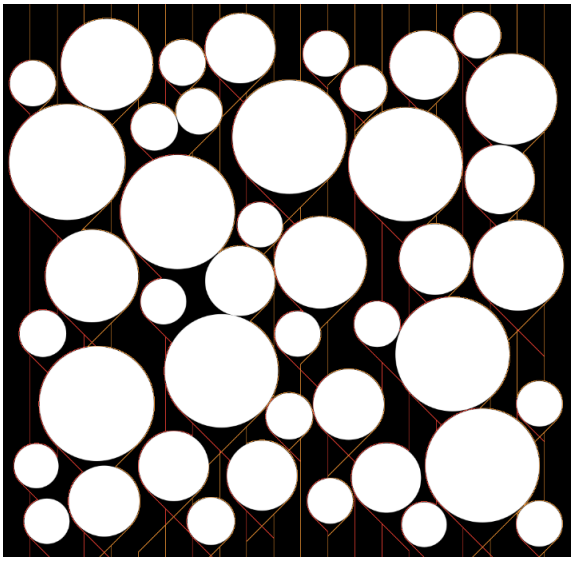

Abbildung 59: Ergebnisdarstellung mit 20 Pfaden

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass ein Programm entwickelt wurde, welches Porosität und Tortuosität von zweidimensionalen Abbildungen in kürzester Zeit automatisch ermittelt. Beide Methoden wurden anhand von verschiedenen Testfällen während der Entwicklung erprobt. Die Ergebnisse werden für gut befunden, weshalb die Methode in der folgenden Analyse eingesetzt werden kann. Abweichungen befinden sich im tolerierbaren Bereich. Als Einschränkung ist zusätzlich festzustellen, dass lediglich Messungen zur Tortuosität an bestimmten Bildern vorgenommen werden können. Das Programm ist nicht dafür vorgesehen eine Art Labyrinth zu lösen. Demnach muss ein Weg im und gegen den Uhrzeigersinn um die Poren existieren. Sollte dies nicht der Fall sein, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. In diesem Fall sollte weiterhin geprüft werden, ob es dennoch einen potenziellen Weg gibt. Die Fehlermeldung bedeutet nicht zwangsläufig, dass keine Ionendiffusion stattfinden kann.

6.3 Multiphysikalische Simulation mit COMSOL Multiphysics

Im Rahmen der multiphysikalischen Simulation soll das Kopplungsphänomen von mechanischen Einwirkungen auf elektrochemische Eigenschaften untersucht werden. Im Anwendungsfall eines SSC in einer Drohne kann durch diesen Effekt unter Umständen eine relevante Auswirkung auf die elektrochemischen Eigenschaften resultieren. Als Simulationsumgebung wird COMSOL Multiphysics ausgewählt. Diese FE-Software wird explizit für die multiphysikalische Simulation entwickelt. Dabei können verschiedenen physikalische Phänomene miteinander gekoppelt werden. Ein Anwendungsbeispiel seitens des Entwicklers ist die thermische Modellierung einer zylindrischen Lithium-Ionen-Batterie [69]. Hier wird die in der Batterie entstehende Wärme inklusive einer Luftkühlung simuliert.

In der folgenden Berechnung ist eine Kopplung zwischen den Modulen „Solid Mechanics“ und dem in dem „Electrochemistry“ enthaltenen „Electroanalysis“ Modul vorgesehen. Diese physikalische Kopplung ist bisher noch nicht implementiert, sodass eine manuelle Auswertung notwendig wird. Daher wird folgende Vorgehensweise angestrebt:

- Analyse unter mechanischen Einflüssen
- Auswertung der Ergebnisse mit Diagrammen
- Mathematische Formulierung des Zusammenhangs durch Regressionsanalyse
- Elektrochemische Simulation mit den integrierten Funktionen

Mit dieser Vorgehensweise können Änderungen der elektrochemischen Eigenschaften durch mechanische Einflüsse lokalisiert werden. Als Einschränkung gilt, dass die Änderungen auf das Modell mit den zugehörigen Materialdaten bezogen sind und sich nur auf das Intervall der mechanischen Analyse beziehen. Beispielsweise darf die ermittelte Funktion nur im Bereich des zugrundeliegenden Intervalls verwendet werden.

6.3.1 Analyse der mechanischen Einflüsse

Als Grundlage für die multiphysikalische Simulation dient das Simulationsmodell aus Kapitel 5.5. Die dort generierten Daten werden weiterführend analysiert. Dabei ist vor allem die Änderung von Porosität und Tortuosität relevant. Daher werden diese beiden Parameter zunächst im unverformten Zustand vermessen. Zur Messung der Porosität konnte der entwickelte Python-Code eingesetzt werden. Im Falle der Tortuosität war dies nicht möglich. Der vorliegende Fall weicht vom ursprünglichen Entwicklungsziel des Codes ab. Zuvor gab es mehrere Möglichkeiten eine Barriere zu umlaufen. Im derzeitigen Fall wird ein bestimmter Weg gesucht. Dieser beschreibt, wie zuletzt in Kapitel 6.2 angesprochen, die Lösung eines Labyrinthes. Aus diesem Grund gelangt der entwickelte „Links-Rechts-Algorithmus“ nicht mehr zum Ziel.

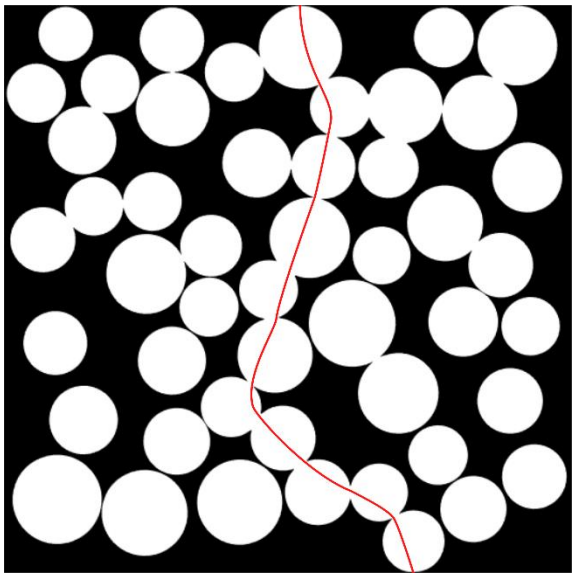

Abbildung 60: RVE-Elektrolyt-Präparation zur Messung der Tortuosität

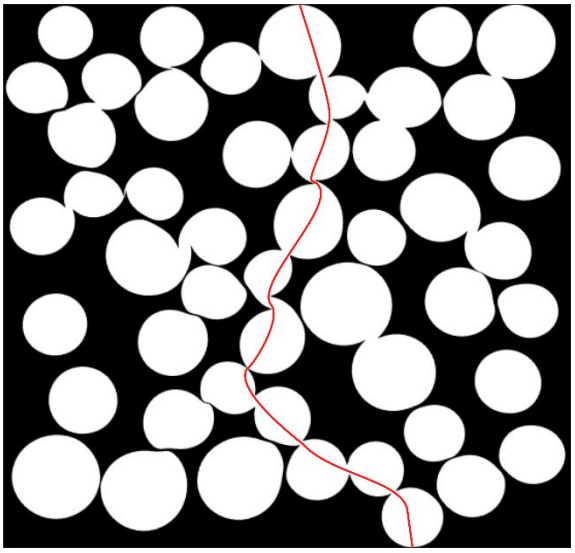

Abbildung 61: RVE-Elektrolyt-Simulationsergebnis bei einer aufgebrachten Verformung von 2,5 µm

Im vorliegenden Untersuchungsfall besteht die Charakteristik, dass in der Regel nur ein Pfad vorhanden ist und untersucht wird. Demnach entfällt die Komplexität zur Ermittlung der Tortuosität über mehrere Messungen und es kann auf die manuelle Methode zurückgegriffen werden. Somit erfolgt die Messung der Tortuosität unter Verwendung des Bildverarbeitungsprogrammes ImageJ. Dabei wird zunächst der

Pfad in das Bild eingezeichnet, siehe Abbildung 60, und anschließend manuell durch Bildverarbeitung vermessen. Als Ergebnis folgt eine Porosität von 52,14 % und eine Tortuosität von 1,213 im unverformten Zustand.

Durch eine FEM-Simulation wurde das Modell weiterhin verformt. Dabei kann eine Schließung des Pfades ab einer aufgebrachten Verschiebung von ungefähr 2,5 µm vermutet werden. Diese Verformung entspricht einer geringen relativen Kompression von ungefähr 4 Prozent. Dieser Wert wird für sehr gering befunden. Aus diesem Grund wird das Modell bis zu einer relativen Kompression von 10 Prozent verformt. Bis dahin konnte ein Ionenpfad als Annahme festgelegt werden. Dieses Vorgehen muss aufgrund des Simulationsmodell in der zweidimensionalen Abstraktion mit geometrischer Vereinfachung durchgeführt werden. Ein dreidimensionales realitätsgetreueres Modell würde eine höhere Genauigkeit mit sich bringen. Bei diesem Modell wäre die Auswertung der geometrischen Parameter jedoch auch wesentlich komplexer. Daher ist die Annahme unumgänglich.

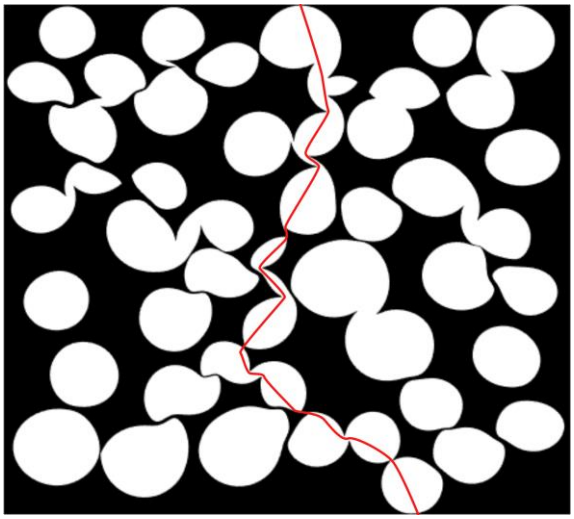

Abbildung 62: RVE-Elektrolyt-Simulationsergebnis bei einer aufgebrachten Verschiebung von 6 µm

Bei größeren Verschiebungen über 6 µm wird angenommen, dass kein Ionenfluss mehr gewährleistet wird. Demnach wurde eine Schrittweite von 0,5 µm im Intervall von 0 bis 2,5 µm zur Simulation gewählt. Weiterführend wurde die Schrittweite zur

Analyse auf 1 µm erhöht. Für diese Fälle wurde das FE-Modell gelöst und anschließend ausgewertet. Die Fälle von 0 µm, 2,5 µm und 6 µm Verschiebung sind in Abbildung 60, Abbildung 61 und Abbildung 62 dargestellt. Die dazugehörigen Analyseergebnisse werden in Tabelle 14 abgebildet.

Tabelle 14: Analyseergebnisse der FEM im Zuge der Elektrolytsimulation

Aufgebrachte Verformung	Relative Kompression	Porosität	Tortuosität	Faktor effektiver Diffusionskoeffizient
0,0 µm	0,000 %	52,14 %	1,2130	0,4299
0,5 µm	0,833 %	52,00 %	1,2159	0,4277
1,0 µm	1,667 %	51,55 %	1,2182	0,4232
1,5 µm	2,500 %	51,18 %	1,2357	0,4142
2,0 µm	3,330 %	50,78 %	1,2390	0,4098
2,5 µm	4,170 %	50,25 %	1,2664	0,3968
3 µm	5,000 %	49,24 %	1,2443	0,3957
4 µm	6,667 %	48,38 %	1,2828	0,3772
5 µm	8,333 %	47,40 %	1,3080	0,3624
6 µm	10,000 %	46,37 %	1,3473	0,3442

Im untersuchten Intervall ist eine Verringerung der Porosität und eine Erhöhung der Tortuosität zu vernehmen. Bei einer Dehnung von ungefähr 4 Prozent verringert sich die Porosität um 1,89 Prozent. Die Tortuosität erhöht sich in diesem Bereich um 0,0534. Somit ist bei kleinen Verformungen bereits eine Änderung festzustellen, welche wesentliche Einflüsse auf die elektrochemischen Eigenschaften haben könnte.

6.3.2 Mathematische Formulierung durch Regressionsanalyse

Das Modell wurde bereits in Kapitel 5.5 mechanisch verformt. Somit dienen die Ergebnisse aus Tabelle 14 und Abbildung 51 als Grundlage für die weitere Analyse. Da die geometrischen Größen Porosität und Tortuosität als Kopplungsparameter identifiziert wurden, ist deren Veränderung von expliziter Bedeutung. Diese ist einerseits in

Abbildung 63 abgebildet. Die Porosität nimmt im Allgemeinen ab, während die Tortuosität zunimmt. Die Punkte wurden durch Interpolation miteinander verbunden. Diese Darstellung wurde aufgrund der durchzuführenden Regression gewählt. Für die Bereiche ohne Punkte liegen jedoch keine Messungen vor.

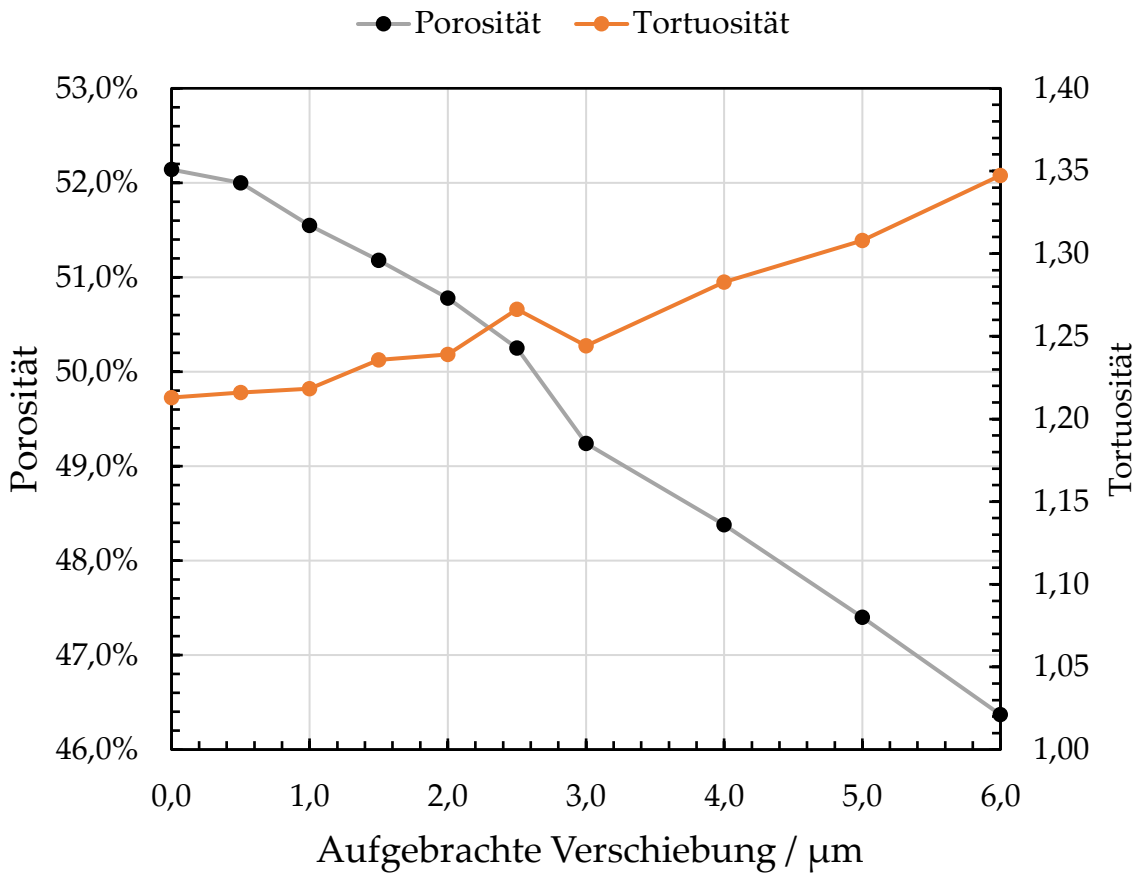

Abbildung 63: Veränderung der Porosität und Tortuosität aufgrund mechanischer Einflüsse

Die weiteren Diagramme werden fortlaufend im Detail analysiert. Hierfür werden Funktionen für die Parameter κ, φ und τ mittels Regression ermittelt. Abbildung 64 zeigt die Veränderung des Faktors zur Ermittlung des effektiven Diffusionskoeffizienten. Abgebildet wird der Term von κ, welcher aus Formel (35) stammt. Demnach fließt die Variable D_{bulk} nicht mit in den Verlauf ein.

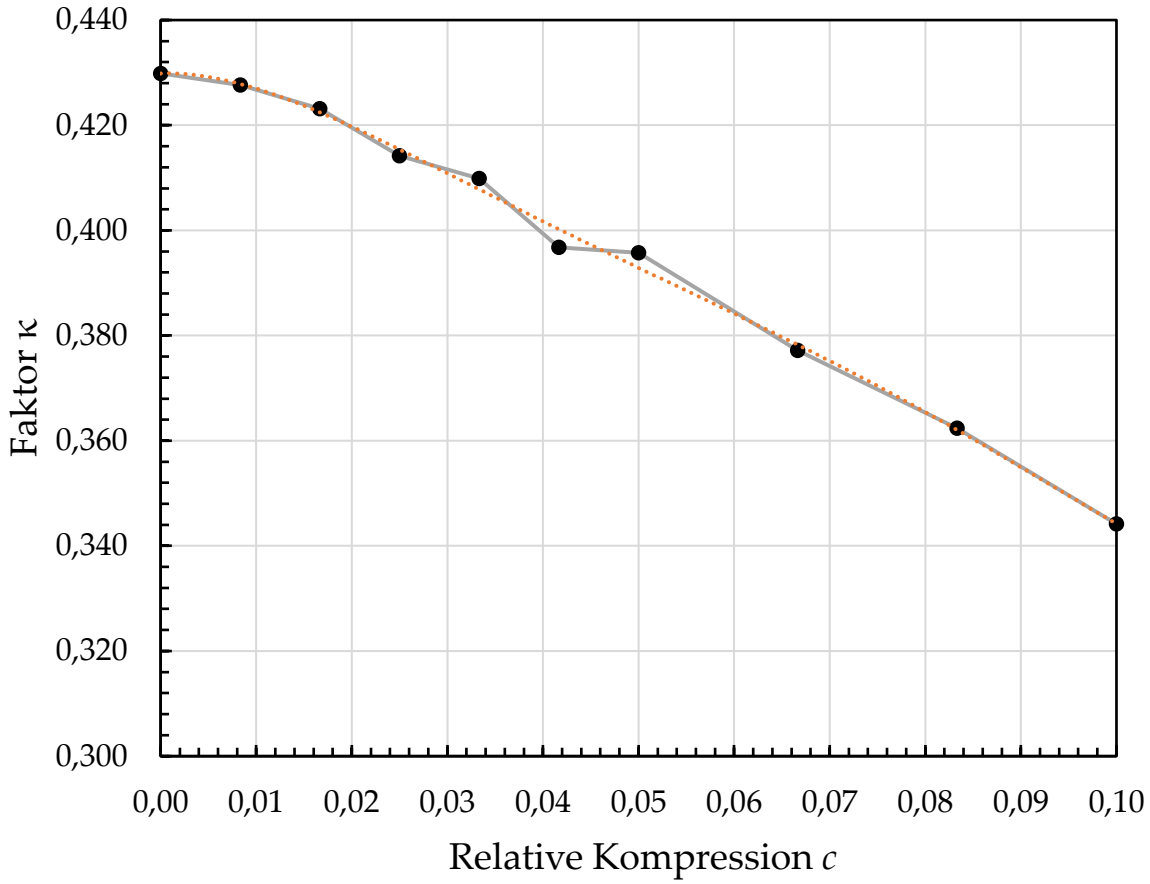

Abbildung 64: Veränderung des Faktors des effektiven Diffusionskoeffizienten durch mechanische Einwirkung

Anhand der gemessenen Datenpunkte lässt sich deutlich feststellen, dass der Faktor im Intervall von 0 bis ungefähr 10 Prozent relativer Kompression deutlich abnimmt. Durch diese Punkte wird eine Funktion mittels Regression rekonstruiert. Diese ist ebenfalls in der Abbildung zu sehen. Dabei erzielte ein Polynom fünften Grades beste Ergebnisse. Der Determinationskoeffizient R^2 ergibt sich dabei zu 0,996. Dieser Wert ist eine statistische Kennzahl zur Beurteilung der Anpassungsgüte einer Regression. Bei einem Wert von 1 werden optimale Ergebnisse erzielt [70]. Die dazugehörige Funktion lautet:

$$\kappa = 26446c^5 - 7882{,}5c^4 + 855{,}63c^3 - 42{,}321c^2 + 0{,}0573c + 0{,}4299 \qquad (38)$$

Diese ermittelte Funktion beschreibt den vorliegenden Sachverhalt sehr gut und ist dafür vorgesehen in COMSOL an der entsprechenden Stelle eingepflegt zu werden.

Weiterhin wird das Verfahren der Regression auch für die Porosität und Tortuosität durchgeführt. Diese beiden Funktionen werden aktuell zwar nicht explizit benötigt, können aber zukünftig dennoch von Nutzen werden. Im Falle der Porosität lieferte ein Polynom sechsten Grades optimale Ergebnisse. Die ermittelte Funktion verfügt über einen Determinationskoeffizienten von 0,9973. Der Ausdruck der Funktion lautet:

$$\varphi = 220322c^6 - 98076c^5 + 14412c^4 - 828{,}06c^3 + 12{,}461c12 - 0{,}3528c + 0{,}5216 \quad (39)$$

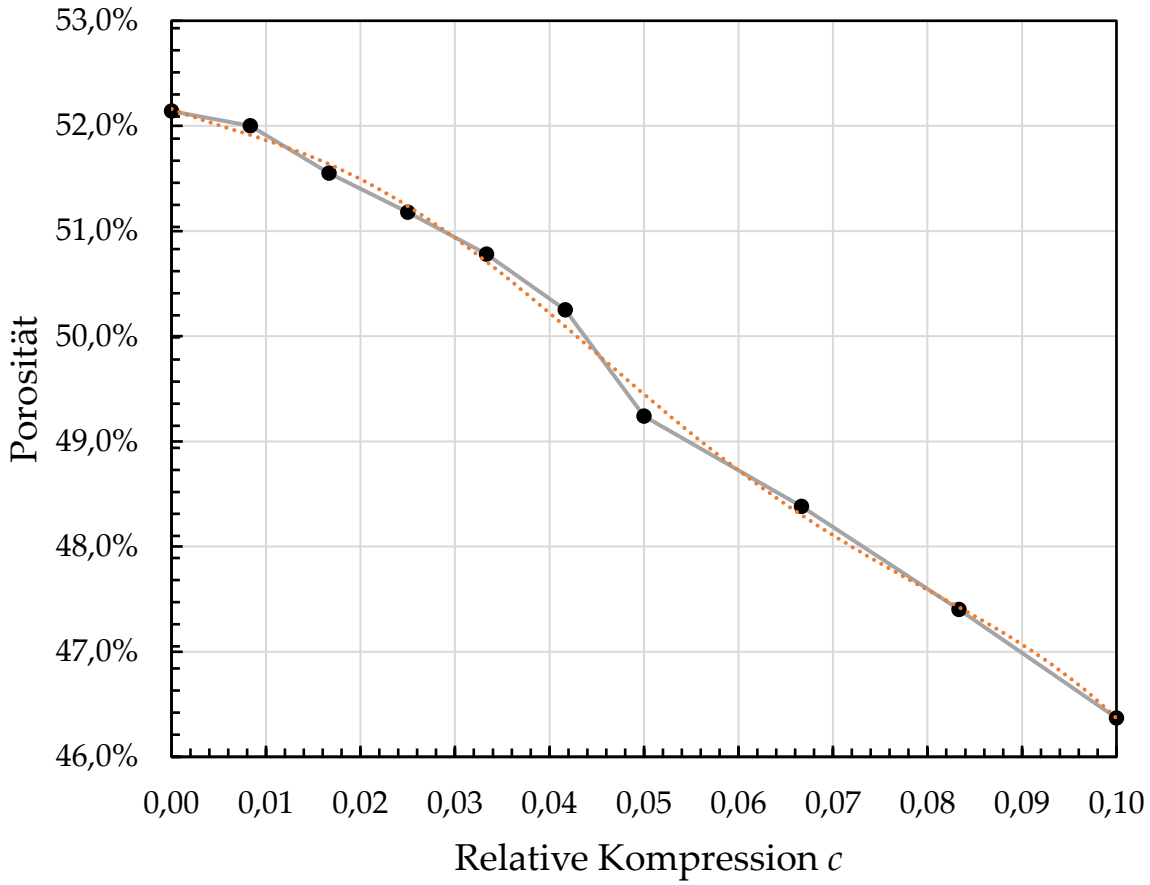

Abbildung 65: Veränderung der Porosität aufgrund mechanischen Einflusses

Außerdem wurde auch eine Funktion für die Tortuosität ermittelt. Diese lautet:

$$\tau = 3 \cdot 10^6 c^6 - 10^6 c^5 + 136708c^4 - 8380{,}7c^3 + 240{,}6c^2 - 1{,}7093c + 1{,}2139 \quad (40)$$

Diese Funktion wird durch ein Polynom dritten Grades beschrieben und hat einen Determinationskoeffizienten von 0,9714. Im Allgemeinen ist die Fehlerrate der Messergebnisse bei der Tortuosität vermutlich am höchsten. Einerseits muss der

Bewegungspfad der Ionen händisch eingezeichnet werden und auf der anderen Seite können auch abweichende Ergebnisse bei der Vermessung dieser erwartet werden. Im Allgemeinen lässt sich jedoch ein eindeutiger Trend erkennen. Die Tortuosität nimmt mit steigender Dehnung auch in wachsenden Schritten zu. Wie bereits erwähnt, wurde das Modell so lange ausgewertet, bis der Pfad geschlossen ist. Im Anschluss ist in dem Modell keine Tortuosität mehr messbar. Dies ist im Simulationsmodell begründet.

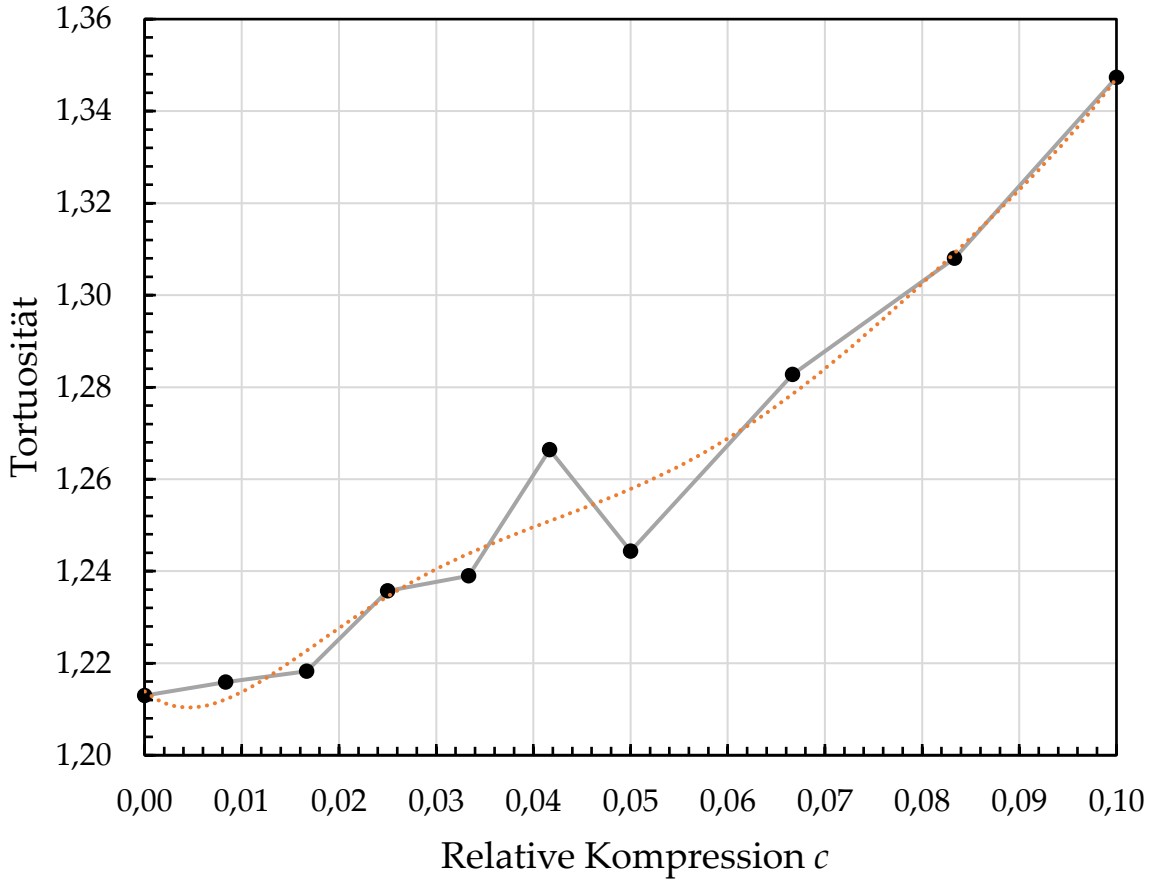

Abbildung 66: Veränderung der Tortuosität resultierend aus mechanischer Einwirkung

Somit konnten für alle relevanten Parameter Funktionen ermittelt werden. Für die weitere Simulation der Elektrochemie wird vorrangig die Formel des Faktors für κ verwendet.

6.3.3 Elektrochemische Simulation in COMSOL Multiphysics

Zur Generierung von CV-Diagrammen wurde ein elektrochemisches Simulationsmodell in der COMSOL Umgebung erstellt. Dafür wurden zahlreiche Parameter definiert, welche in Tabelle 15 dargestellt sind. Durch die Beschränkung auf den Elektrolyten ist im nachfolgenden Fall kein expliziter Bezug zu SSC mehr vorzufinden. Die Ergebnisse der Simulation können demnach auch in SB angewendet werden. Dort ist die Elektrolytstruktur vergleichbar.

Tabelle 15: Parameter der elektrochemischen Simulation

Parameter	Wert	Beschreibung
V	1 V/s	Voltammetrische Scanrate
C_{bulk}	1050 mol/m³	Massenkonzentration des Reaktanten
D_A	1E-09 m²/s	Diffusionskoeffizient des Reaktanten
D_B	1E-09 m²/s	Diffusionskoeffizient Resultat
K_0	1E+10	Reaktionsrate
r_e	0,01 m	Elektrodenradius
i_{0ref}	9,6485E+10 A/m²	Referenzaustauschstromdichte
C_{dl}	0,2 F/m²	Doppelschichtkapazität
T	298,15 K	Temperatur
$E_{vertex1}$	-0,4 V	Startpotential
$E_{vertex2}$	0,4 V	Umkehrstelle Potential
c	0 – 0,1	Relative Kompression

Mit diesen Parametern und der Implementierung der Abhängigkeit durch die mechanische Einwirkung können die CV-Diagramme berechnet werden. Dabei wurde der Parameter zur Verschiebung analog Tabelle 14 verändert. Als Simulationsmodell wird ein eindimensionales Modell erstellt. Die entsprechende Linie geht über eine Länge L. Sie ergibt sich aus der Multiplikation des Faktors D_A mit der für den Koeffizienten κ ermittelten Formel.

$$L = \kappa \cdot D_{\mathrm{A}} \tag{41}$$

Als Ergebnis resultiert aus der Simulation der Elektroanalyse nachfolgendes CV-Diagramm.

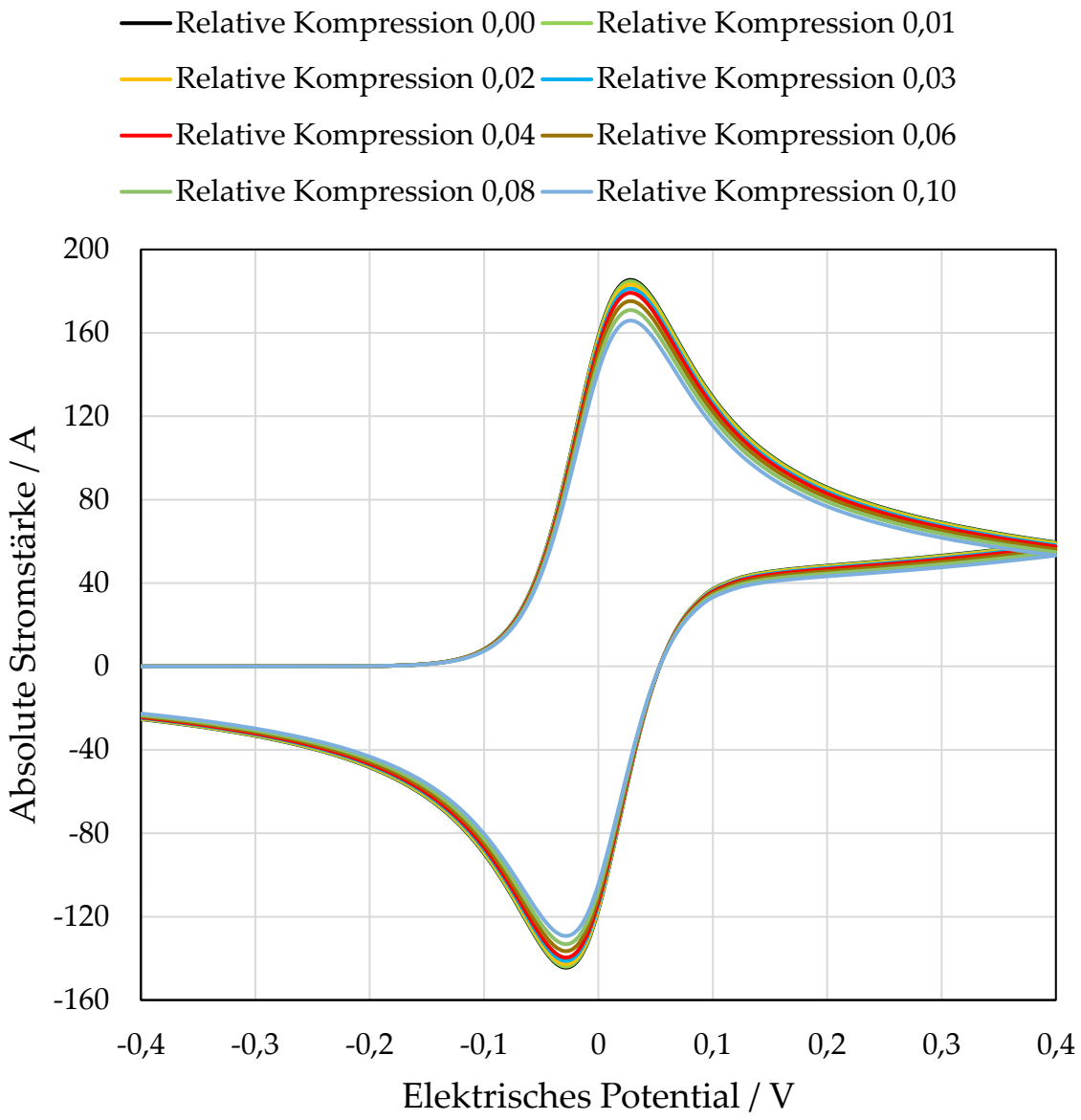

Abbildung 67: CV-Diagramm der mechanisch – elektrochemischen Simulation

In den Formeln (7) und (8) wurde die Berechnung von spezifischer Kapazität und Energiedichte vorgestellt. Diese soll nun am vorliegenden Fall angewendet werden.

Die Fläche zwischen den Kurven wird zur Ermittlung der spezifischen Kapazität verwendet. In der Mathematik entspricht die Fläche dem Integral. Da diese Funktion

nicht bekannt ist, wurde das Analyse- und Darstellungsprogramm OriginPro verwendet. Diese Software verfügt über die Funktion, die Fläche zwischen zwei Daten zu ermitteln. Die Messdaten sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Um nun die spezifische Kapazität nach Formel (7) zu berechnen werden noch die Scanrate $v = 0{,}001\ V/s$, das Potentialintervall $\Delta V = 0{,}8\ V$ und die aktive Masse der Elektrode benötigt. Die Masse wurde über das elektrochemische Simulationsmodell zu $m = 13{,}82\ g$ rechnerisch ermittelt. Somit sind alle Werte zur Berechnung der spezifischen Kapazität vorhanden. Nach der Gleichung (8) kann anschließend die spezifische Energie berechnet werden. Alle Daten sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Ergebnisse der elektrochemischen Simulation

Relative Kompression	Fläche im CV-Diagramm	Spezifische Kapazität ($F.g^{-1}$)	Energiedichte ($Wh.kg^{-1}$)
0,00	59,91509973	2709,62	240,86
0,01	59,71404572	2700,53	240,05
0,02	59,20611800	2677,56	238,00
0,03	58,57526474	2649,03	235,47
0,04	57,92148505	2619,46	232,84
0,06	56,64137364	2561,57	227,69
0,08	55,24567193	2498,45	222,08
0,10	53,61614516	2424,75	215,53

Diese Daten können abschließend noch einmal in Form eines Diagramms angezeigt werden. Dadurch wird eine bessere Analyse erzielt. In Abbildung 68 wird das Verhalten der spezifischen Kapazität und der Energiedichte über der relativen Kompression dargestellt.

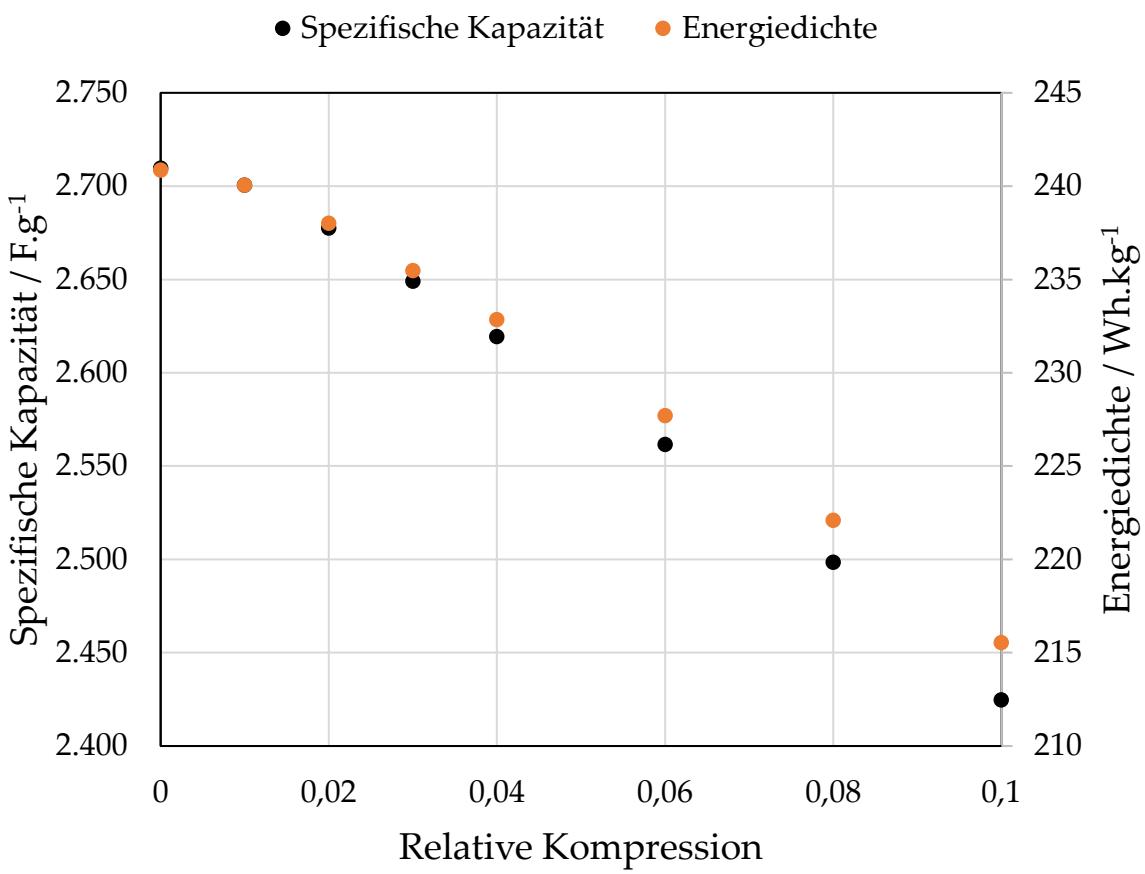

Abbildung 68: Ergebnisdiagramm: Mechanische-elektrochemische Kopplung

Den berechneten Daten zur spezifischen Kapazität ist zu entnehmen, dass der elektrochemische Wert mit steigender Kompression abnimmt. Die Aussage bezieht sich auf das ausgewertete Intervall von 0 bis 10 Prozent relativer Kompression. Ein ähnliches Verhalten ist bei der Energiedichte festzustellen.

Aus der Darstellung lässt sich schlussfolgern, dass sich die elektrochemischen Eigenschaften aufgrund von mechanischer Kompression des Elektrolyten verschlechtern. Demnach wird Kompression auch als negativen Einfluss für die elektrischen Eigenschaften bewertet. Im Anwendungsfall bedeutet es, dass bei einer aus mechanischer Sicht grenzwertig ausgelegten Struktur die schlechteste zu erwartende elektrochemische Leistungsfähigkeit vorliegt. Somit empfiehlt es sich gegebenenfalls das Überdimensionieren der Struktur in Druckbereichen. Daher wird eine geringfügige Massenerhöhung für einen Erhalt der optimalen elektrochemischen Funktion toleriert. Dieses

Vorgehen muss je nach Anwendungsfall spezifisch entschieden werten. Die resultierende Erkenntnis beziehen sich ausschließlich auf den Lastfall Druck in Kompressionsrichtung. Dabei ist die Gültigkeit auf das gegebene Intervall der Kompression beschränkt. Aussagen hierüberhinaus können nicht getroffen werden.

Bei einem idealen SC entspricht das CV-Diagramm normalerweise der Form eines Rechtecks [25]. Dies ist in dieser Analyse nicht aufgetreten. Hierfür kann es verschiedene Ursachen gegeben. Einerseits liegt es nahe, dass die Simulationsergebnisse nicht der notwendigen Genauigkeit entsprechen. Möglicherweise wurden unzulässige Annahmen getroffen. Auf der anderen Seite gibt es aber auch die Vermutung, dass das Ergebnis auf den Simulationsbereich zurückzuführen ist. Ausschließlich das Elektrolyt wurde in die Auswertung einbezogen. Dieses bildet vermutlich nicht alle Vorgänge im SSC vollständig ab. Somit liegt auch hier eine mögliche Ursache. Dennoch kann mit diesen Ergebnissen weiterführend gearbeitet werden. Es ergibt sich die Erkenntnis, dass mechanische Druckbeanspruchungen und Verformungen dieser Art in schlechteren elektrochemischen Eigenschaften münden.

Zusammenfassung und Ausblick

Nachdem die Grundlagen zu SEES geklärt wurden, wurde im Rahmen dieser Thesis SSC als strukturelle Energiespeicher ausgewählt. Hierzu erfolgte eine Aufarbeitung des aktuellen Standes der Forschung. Als Ergebnis dieser umfassenden Recherchearbeit resultiert ein ausgewählter SSC, welcher konzeptionell in einen UAV-Anwendungsfall integriert wird. Hierbei wurde das Modell DJI Matrice 600 Pro ausgewählt. Für diese Drohne existiert bereits der Versuch diese mit einer SB auszustatten. Daher wurden die resultierenden elektrischen Kennwerte des Konzeptentwurfes auf der Basis von physikalischen Grundlagen berechnet. Somit konnte eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider SEES-Varianten erreicht werden. Als Ergebnis zeigt sich, dass die Eigenschaften des ausgewählten SSC derzeitig noch nicht genügen. Als Lösungsvorschlag wurde ein Hybridkonzept vorgestellt. Für Anwendungen mit kleinen Flugbereichen und kurzer Flugdauer wurde das vorgestellte vollintegrierte, masselose SEES-Konzept für die weitere Analyse ausgewählt. Im weiteren Verlauf orientieren sich die Inhalte der Arbeit überwiegend in den Aufgaben der numerischen Simulation. Einerseits erfolgte eine Mehrkörpersimulation am Modell von DJI. Aus dieser Simulation gehen die anliegenden Spannungen hervor. Mit diesen Erkenntnissen wurde weiterhin die Funktionsweise des SSC im Detail simuliert. Hierbei wurden drei Bereiche am SSC im Mikro- beziehungsweise Nanobereich lokalisiert. An diesen wurde zunächst das strukturmechanische Verhalten untersucht. Dabei galt das Ziel, Ursachen für einen multiphysikalischen Zusammenhang von mechanischen Einwirkungen auf elektrochemische Auswirkungen herauszufinden. Diese wurde anhand der Ergebnisse überwiegend im Elektrolyten vermutet. Nachdem diese Hypothese anhand von physikalischen Zusammenhängen bestätigt wurde, wurde eine multiphysikalische Simulation durchgeführt. Da die angewendete FE-Software ein solches Kopplungsphänomen zum Zeitpunkt der Untersuchung noch nicht implementiert hat, wurde ein manuelles Vorgehen umgesetzt. Die geometrischen, ursächlichen Größen wurden unter Betrachtung der strukturmechanischen Einwirkung vermessen und in Diagrammen

dargestellt. Unter Verwendung dieser wurden mathematische Zusammenhänge mit Hilfe des Regressionsverfahrens ermittelt. Diese Zusammenhänge konnten wiederum in die elektrochemische Simulation eingepflegt werden. Dadurch konnte das Kopplungsphänomen in einem Auswertungsbereich der relativen Kompression von 0 bis 10 Prozent dargestellt werden. Für die Darstellung wurde das Verfahren der Cyclovoltammetrie angewendet. Im dazugehörigen CV-Diagramm zeigte sich eine Änderung der elektrochemischen Eigenschaften. Es wurde festgestellt, dass die mechanischen Auswirkungen negative Folgen auf die elektrochemischen Eigenschaften haben. Dabei ist der direkte Bezug zum SSC jedoch nicht mehr vollständig gegeben. Aufgrund der expliziten Auswertung des Elektrolyten gilt die Analyse allgemein für verschiedene SEES. Dies zeigt sich auch an der Form des CV-Diagrammes. Bei SC wird ein rechteckähnlicher Sachverhalt erwartet. Das resultierende Ergebnis weicht hiervon ab. Demnach ergibt sich eine Abhängigkeit von spezifischer Kapazität und Energiedichte zur relativen Kompression als Ergebnis.

Zukünftig gilt es, die numerisch ermittelten Ergebnisse zu validieren. Die Validierung wurde anhand der Rapid Prototyping Methode angestrebt. Aufgrund von Herausforderungen in der Herstellung mittels 3D-Druckverfahren konnten diese jedoch aus zeitlichen Gründen nicht durchgeführt werden. Somit bietet es sich an diese fundierte Methode im nächsten Schritt umzusetzen.

Weiterhin könnte die multiphysikalische Abhängigkeit von Zugbelastungen in Dickenrichtung untersucht werden. Möglicherweise zeigen sich hier positive Effekte. Auch empfiehlt es sich generell weitere Kopplungsursachen für beide Belastungsformen aufzusuchen. Somit könnte der Unterschied zur Form des CV-Graphen belegt werden.

Mit weiteren Fortschritten in der Komponentenentwicklung von SSC wird dem vorgestellten Konzept durchaus Potenzial zugeordnet. Sobald praktikable, elektrische Kennzahlen angenommen werden können, empfiehlt es sich die Integration eines SSC umzusetzen. Aufgrund der hohen Leistungsdichte können gute

Alleinstellungsmerkmale im UAV erzielt werden. Hierfür sollte das Design für die Multifunktionalität optimiert werden. Dadurch können noch bessere Eigenschaften erreicht werden. Außerdem sollten parallel hierzu Konzepte für Herstellung und Recycling entworfen werden. Vor allem im Fachgebiet des Recyclings von Faserverbundwerkstoffen liegt derzeitig ein großer Forschungsschwerpunkt.

Mit den Ergebnissen dieser zukünftigen Aufgaben kann ein UAV resultieren, welches vollständig durch multifunktionale masselose SEES betrieben wird. Durch dieses Konzept können wesentliche, energetische Einsparungen aufgrund der Massereduktion erreicht werden. Zeitgleich bieten die SC den Vorteil der schnellen Wiederaufladbarkeit durch das elektrostatische Funktionsprinzip. Somit werden bedeutende Entwicklungsfortschritte im Bereich der UAV erwartet. Diese können auch in andere Anwendungen und Branchen übertragen werden.

Literatur

[1] Insider Intelligence, „Drone technology uses and applications for commercial, industrial and military drones in 2021 and the future," *Insider Inc.*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.businessinsider.com/drone-technology-uses-applications

[2] Challenge Works. „Drone use case briefs: Use case pack." https://www.science-practice.com/teams/good-problems/projects/flying-high/flying-high-use-case-pack.pdf (Zugriff am: 27. Mai 2023).

[3] C. Yinka-Banjo und O. Ajayi, „Sky-Farmers: Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Agriculture," in *Autonomous Vehicles*, G. Dekoulis, Hg., [Erscheinungsort nicht ermittelbar]: IntechOpen, 2020.

[4] Vision Aerial. „Factors that Impact Drone Flight Times." https://visionaerial.com/factors-that-impact-drone-flight-times/ (Zugriff am: 27. Mai 2023).

[5] Anne Marie Helmenstine. „Potential Energy Definition and Formula." https://www.thoughtco.com/definition-of-potential-energy-604611 (Zugriff am: 11. Juni 2023).

[6] B. Hartmann und B. Priemer, „Teaching kinetic energy as an observable quantity," *Phys. Educ.*, Jg. 54, Nr. 4, S. 45003, 2019, doi: 10.1088/1361-6552/ab1353.

[7] Joachim Herz Stiftung. „Drehbewegungen / Rotationsenergie: Grundwissen." https://www.leifiphysik.de/mechanik/drehbewegungen/grundwissen/rotationsenergie#:~:text=F%C3%BCr%20die%20Rotationsenergie%20gilt%20E,K%C3%B6rper%20und%20seiner%20Rotationsachse%20ab. (Zugriff am: 28. Mai 2023).

[8] L. E. Asp und E. S. Greenhalgh, „Structural power composites," *Composites Science and Technology*, Jg. 101, S. 41–61, 2014. doi: 10.1016/j.compscitech.2014.06.020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353814002218

[9] Y. Xu, W. Lu, G. Xu und T.-W. Chou, „Structural supercapacitor composites: A review," *Composites Science and Technology*, Jg. 204, S. 108636, 2021. doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108636. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353820324301

[10] A. M. Navarro-Suárez und M. S. P. Shaffer, „Designing Structural Electrochemical Energy Storage Systems: A Perspective on the Role of Device Chemistry," *Frontiers in chemistry*, Early Access. doi: 10.3389/fchem.2021.810781.

[11] T. Christen und M. W. Carlen, „Theory of Ragone plots," *Journal of Power Sources*, Jg. 91, Nr. 2, S. 210–216, 2000. doi: 10.1016/S0378-7753(00)00474-2. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775300004742

[12] R. Kötz und M. Carlen, „Principles and applications of electrochemical capacitors," *Electrochimica Acta*, Jg. 45, Nr. 15, S. 2483–2498, 2000. doi: 10.1016/S0013-4686(00)00354-6. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468600003546

[13] F. Han *et al.*, „Dielectric capacitors with three-dimensional nanoscale interdigital electrodes for energy storage," *Science advances*, Early Access. doi: 10.1126/sciadv.1500605.

[14] E. S. Greenhalgh, S. Nguyen, M. Valkova, N. Shirshova, M. S. Shaffer und A. Kucernak, „A critical review of structural supercapacitors and outlook on future research challenges," *Composites Science and Technology*, Jg. 235, S. 109968, 2023. doi: 10.1016/j.compscitech.2023.109968. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353823000611

[15] L. F. Trueb und P. Rüetschi, *Batterien und Akkumulatoren: Mobile Energiequellen für heute und morgen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.

[16] S. Zhang und N. Pan, „Supercapacitors Performance Evaluation," *Adv. Energy Mater.*, Jg. 5, Nr. 6, S. 1401401, 2015, doi: 10.1002/aenm.201401401.

[17] D. Peyrow Hedayati, M. Kucher, H. Biggs und R. Böhm, „Application of Structural Energy Storage Devices in Aerial Monitoring Systems: A Conceptual

Design Study," in Befast, Northern Ireland, B. G. Falzon und C. McCarthy, Hg., 2023.

[18] DJI. „MATRICE 600 PRO: Unkomplizierte Professionalität." https://www.dji.com/de/matrice600-pro/info#downloads (Zugriff am: 25. April 2023).

[19] R. A. Rightmire, "Electrical Energy Storage Appartus," US3288641A, 3,288,641. [Online]. Verfügbar unter: https://patentimages.storage.googleapis.com/6e/10/29/29fa91d3d0f8c4/US3288641.pdf

[20] Greenhouse Media GmbH. „So funktionieren Super- und Ultrakondensatoren als Stromspeicher." https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/oekostrom/energiespeicher/superkondensator (Zugriff am: 8. Juni 2023).

[21] M. F. Pernice *et al.,* „Mechanical, electrochemical and multifunctional performance of a CFRP/carbon aerogel structural supercapacitor and its corresponding monofunctional equivalents," *Multifunct. Mater.*, Jg. 5, Nr. 2, S. 25002, 2022, doi: 10.1088/2399-7532/ac65c8.

[22] J. F. Snyder, E. B. Gienger und E. D. Wetzel, „Performance metrics for structural composites with electrochemical multifunctionality," *Journal of Composite Materials*, Jg. 49, Nr. 15, S. 1835–1848, 2015, doi: 10.1177/0021998314568167.

[23] R. Böhm, „Teil 3 / Polymerwerkstoffe," in *Vorlesung: Polymerwerkstoffe und Faserverstärkte Kunststoffe*.

[24] N. C. Abeykoon, „SUPERCAPACITOR ELECTRODE MATERIALS FROM HIGHLY POROUS CARBON NANOFIBERS WITH TAILORED PORE DISTRIBUTIONS," Dissertation, University of Texas at Dallas, University of Texas at Dallas, Dallas, 2017.

[25] J. Sung und C. Shin, „Recent Studies on Supercapacitors with Next-Generation Structures," *Micromachines*, Early Access. doi: 10.3390/mi11121125.

[26] D. G. Papageorgiou, I. A. Kinloch und R. J. Young, „Graphene/elastomer nanocomposites," *Carbon*, Jg. 95, S. 460–484, 2015. doi: 10.1016/j.carbon.2015.08.055. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000862231530172X

[27] K. C. S. Lakshmi und B. Vedhanarayanan, „High-Performance Supercapacitors: A Comprehensive Review on Paradigm Shift of Conventional Energy Storage Devices," *Batteries*, Jg. 9, Nr. 4, S. 202, 2023, doi: 10.3390/batteries9040202.

[28] B. Pal, S. Yang, S. Ramesh, V. Thangadurai und R. Jose, „Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review," *Nanoscale advances*, Early Access. doi: 10.1039/c9na00374f.

[29] A. S. Ulihin, Y. Mateyshina und N. F. Uvarov, „All-solid-state asymmetric supercapacitors with solid composite electrolytes," *Solid State Ionics*, Jg. 251, S. 62–65, 2013, doi: 10.1016/j.ssi.2013.03.014.

[30] S. Sharma und P. Chand, „Supercapacitor and electrochemical techniques: A brief review," *Results in Chemistry*, Jg. 5, S. 100885, 2023, doi: 10.1016/j.rechem.2023.100885.

[31] A. Amiri, K. Bashandeh, M. Naraghi und A. A. Polycarpou, „All-solid-state supercapacitors based on yarns of Co3O4-anchored porous carbon nanofibers," *Chemical Engineering Journal*, Jg. 409, S. 128124, 2021. doi: 10.1016/j.cej.2020.128124. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894720342406

[32] L. Zhu, N. Li und P. Childs, „Light-weighting in aerospace component and system design," *Propulsion and Power Research*, Jg. 7, Nr. 2, S. 103–119, 2018. doi: 10.1016/j.jppr.2018.04.001. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212540X18300191

[33] Z. Zhai *et al.*, „Multi-dimensional materials with layered structures for supercapacitors: Advanced synthesis, supercapacitor performance and functional mechanism," *Nano Energy*, Jg. 78, S. 105193, 2020. doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105193. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520307710

[34] Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (KLiB). „Leistungsdichte." https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/leistungsdichte/ (Zugriff am: 23. Mai 2023).

[35] A. Bucher, „Vorlesungsskript," in *Materialtheorie*.

[36] R. Schneider, „Analyse kontinuumsmechanischer, anisotroper Materialparameter mikrostrukturierter Volumina mit Hilfe direkter mechanischer Simulation," Dissertation, Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/8769/1/Dissertation_Ralf_Schneider.pdf

[37] P. Kosky, R. Balmer, W. Keat und G. Wise, „Chapter 17 - Electrochemical Engineering," in *Exploring Engineering (Fifth Edition)*, P. Kosky, R. Balmer, W. Keat und G. Wise, Hg., Academic Press, 2021, S. 383–403. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012815073300017X

[38] S. Aderyani, „Computational Modeling of Structural Energy Storage," Dissertation, Cullen College of Engineering, University of Houston, Houston, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.proquest.com/openview/d45eb2a02ddfc0b87347dbc7555efbac/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y

[39] J. Shepard. „How to read battery discharge curves." Battery Power Tips. https://www.batterypowertips.com/how-to-read-battery-discharge-curves-faq/ (Zugriff am: 30. Mai 2023).

[40] K. Zhong, J. Zhou, C. Zhao, K. Yun und L. Qi, „The effect of nickel coating on the mechanical properties and failure modes of continuous carbon fiber reinforced aluminum matrix composites," *Journal of Alloys and Compounds*, Jg. 904, S. 164134, 2022. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.164134. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838822005254

[41] S. Duan *et al.*, „Three-dimensional reconstruction and computational analysis of a structural battery composite electrolyte," *Commun Mater*, Jg. 4, Nr. 1, 2023, doi: 10.1038/s43246-023-00377-0.

[42] V. Oliveto, „Analysis of the properties of supercapacitors and possible applications for the technology: Honors Theses," 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://digitalworks.union.edu/theses/1621

[43] A. Ishfaq *et al.*, „Multifunctional design, feasibility and requirements for structural power composites in future electric air taxis," *Journal of Composite Materials*, Jg. 57, Nr. 4, S. 817–827, 2022, doi: 10.1177/00219983221132621.

[44] G. Gupta und S. Abdallah, „Propeller Force-Constant Modeling for Multirotor UAVs from Experimental Estimation of Inflow Velocity," *International Journal of Aerospace Engineering*, Jg. 2018, S. 1–10, 2018, doi: 10.1155/2018/9632942.

[45] T. Carlson und L. E. Asp, „Structural carbon fibre composite/PET capacitors – Effects of dielectric separator thickness," *Composites Part B: Engineering*, Jg. 49, S. 16–21, 2013. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.01.009. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813000152

[46] A. Pokhriyal, R. M. González-Gil, L. N. Bengoa und P. Gómez-Romero, „Nanostructured Thick Electrode Strategies toward Enhanced Electrode-Electrolyte Interfaces," *Materials (Basel, Switzerland)*, Early Access. doi: 10.3390/ma16093439.

[47] Ansys, Inc., *Ansys | Engineering-Simulationssoftware* (2023). Zugriff am: 27. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ansys.com/de-de/products/materials/materials-data-for-simulation

[48] Ultimaker, „Technical data sheet: Ultimaker PVA," Zugriff am: 14. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.farnell.com/datasheets/2310523.pdf

[49] F. Chen, D.-J. Kang und J.-H. Park, „New measurement method of Poisson's ratio of PVA hydrogels using an optical flow analysis for a digital imaging system," *Meas. Sci. Technol.*, Jg. 24, Nr. 5, S. 55602, 2013, doi: 10.1088/0957-0233/24/5/055602.

[50] Stadt Leipzig. „Geodätischer Referenzpunkt in Leipzig." https://www.leipzig.de/bauen-und-wohnen/bauen/georeferenzpunkt (Zugriff am: 28. Juli 2023).

[51] ingenieurkurse.de. „Technische Mechanik 2: Elastostatik: Hauptnormalspannungshypothese." https://www.ingenieurkurse.de/technische-mechanik-elastostatik/festigkeitshypothesen/hauptnormalspannungshypothese.html (Zugriff am: 18. Juli 2023).

[52] Capcomp GmbH. „Wie funktioniert ein Doppelschichtkondensator?" https://capcomp.de/de/ultracap-wissen/doppelschichtkondensator-funktion (Zugriff am: 22. Juni 2023).

[53] D. Carlstedt, K. Runesson, F. Larsson, J. Xu und L. E. Asp, „Electro-chemo-mechanically coupled computational modelling of structural batteries," *Multifunct. Mater.*, Jg. 3, Nr. 4, S. 45002, 2020, doi: 10.1088/2399-7532/abc60d.

[54] M. Müller, „Mehrskalenmodellierung mit minimalen RVE-Randbedingungen und Anwendung auf Balken und Platten," Dissertation, Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2022. [Online]. Verfügbar unter: http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/20891/

[55] S. Nagamine, T. Matsumoto, Y. Hikima und M. Ohshima, „Fabrication of porous carbon nanofibers by phosphate-assisted carbonization of electrospun poly(vinyl alcohol) nanofibers," *Materials Research Bulletin*, Jg. 79, S. 8–13, 2016. doi: 10.1016/j.materresbull.2016.01.009. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025540816300095

[56] J. Schön, „Coefficient of friction and wear of a carbon fiber epoxy matrix composite," *Wear*, Jg. 257, Nr. 3, S. 395–407, 2004. doi: 10.1016/j.wear.2004.01.008. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164804000134

[57] Okereke, Kucher und Peyrow Hedayati, „Generation of randomly positioned fibres in a 2D quadrilateral representative volume element (RVE) via Monte Carlo Approach in MATLAB,"

[58] IBM. „Was ist die Monte-Carlo-Simulation?" https://www.ibm.com/de-de/topics/monte-carlo-simulation#:~:text=Die%20Monte%2DCarlo%2DSimulation%2C,eines%20ungewissen%20Ereignisses%20verwendet%20wird. (Zugriff am: 7. Juli 2023).

[59] K. Breuer und M. Stommel, „RVE modelling of short fiber reinforced thermoplastics with discrete fiber orientation and fiber length distribution," *SN Appl. Sci.*, Jg. 2, Nr. 1, 2020, doi: 10.1007/s42452-019-1890-5.

[60] N. Shirshova *et al.*, „Composition as a Means To Control Morphology and Properties of Epoxy Based Dual-Phase Structural Electrolytes," *J. Phys. Chem. C*, Jg. 118, Nr. 49, S. 28377–28387, 2014, doi: 10.1021/jp507952b.

[61] S. Muñoz, S. M. Castillo und Y. Torres, „Different models for simulation of mechanical behaviour of porous materials," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Jg. 80, S. 88–96, 2018. doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.01.026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751616118300390

[62] R. Nakka, D. Harursampath, M. Pathan und S. A. Ponnusami, „A computationally efficient approach for generating RVEs of various inclusion/fibre shapes," *Composite Structures*, Jg. 291, S. 115560, 2022. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115560. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822322003452

[63] G. Liu, R. Guo, K. Zhao und R. Wang, „Monte Carlo Simulation for Exploring Mechanical Properties of Porous Materials Based on Scaled Boundary Finite Element Method," *Applied Sciences*, Jg. 12, Nr. 2, S. 575, 2022, doi: 10.3390/app12020575.

[64] COMSOL. „COMSOL Multiphysics® Simulation Software: Understand, Predict, and Optimize Real-World Designs, Devices, and Processes with Simulation." https://www.comsol.com/comsol-multiphysics (Zugriff am: 21. Juni 2023).

[65] T. Ferreira und W. Rasband. „ImageJ User Guide: IJ 1.46r." https://imagej.net/ij/docs/guide/user-guide.pdf (Zugriff am: 19. Juni 2023).

[66] W. L. Roque und R. R. Costa, „A plugin for computing the pore/grain network tortuosity of a porous medium from 2D/3D MicroCT image," *Applied Computing and Geosciences*, Jg. 5, S. 100019, 2020. doi: 10.1016/j.acags.2020.100019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259019742030001X

[67] V. Wood. „BruggemanEstimator: BruggemanEstimator – Open Source Code for Estimating the Tortuosity Estimation of Lithium Ion Battery Porous Electrodes

from SEM images." https://made.ee.ethz.ch/research/open-source-data-and-software/bruggemanestimator.html (Zugriff am: 19. Juni 2023).

[68] M. Ebner und V. Wood, „Tool for Tortuosity Estimation in Lithium Ion Battery Porous Electrodes," *J. Electrochem. Soc.*, Jg. 162, Nr. 2, A3064-A3070, 2015, doi: 10.1149/2.0111502jes.

[69] COMSOL Multiphysics. „Thermal Modeling of a Cylindrical Lithium-Ion Battery in 3D: Applicatio ID: 10224." https://www.comsol.de/model/thermal-modeling-of-a-cylindrical-lithium-ion-battery-in-3d-10224 (Zugriff am: 11. Juli 2023).

[70] Dorsch. „Determinationskoeffizient." https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/determinationskoeffizient (Zugriff am: 11. Juli 2023).