

1 Einleitung: Kostenreduktion durch Prozessverbesserung in der Formierung

Introduction: Cost reduction through process improvement of formation

Im folgenden Kapitel werden die Ausgangssituation sowie die Problematik der zugrundeliegenden Fragestellungen dieser Arbeit dargestellt. Hierzu wird einleitend in Kapitel 1.1 die Ausgangssituation dieser wissenschaftlichen Ausarbeitung erläutert. Es wird auf die Situation der automobilen Wertschöpfungskette in Europa in den Jahren 2020 bis 2022 eingegangen. Aufbauend darauf wird in Kapitel 1.2 die vorliegende Problemstellung herausgearbeitet und dargestellt. Diese Herausforderungen dienen als Grundlage für die weiteren Untersuchungen.

Diese Arbeit ist im Rahmen des am Lehrstuhl Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen University durchgeführten Forschungsprojekts OptiZell-Form (OZF)¹ entstanden, welches die Optimierung der Formierung und Testlagerung von Lithium-Ionen-Batteriezellen zum Ziel hatte.

1.1 Ausgangssituation

Initial situation

Die Menschen des 21. Jahrhunderts stehen vor der Herausforderung, den Klimawandel, eine weltweit rasant verlaufende, anthropogene und noch nicht abgeschlossene Erwärmung der Erde, zu entschleunigen². Als Folge des Klimawandels erhöht oder vermindert sich das Auftreten bestimmter Wetterlagen, entgegen der gewöhnlichen Klimazustände der bestehenden Klimazonen. So entstehen beispielsweise Unwetterkatastrophen in Gebieten, in denen diese normalerweise nicht auftreten³. Ein wesentlicher Antrieb des Temperaturanstiegs und damit des Klimawandels ist die Strahlungsintensität der Sonne auf der Erde, welche wesentlich auf die Atmosphäre und damit die Treibhausgase – wie das Kohlenstoffdioxid (CO₂) – zurückzuführen ist⁴. Wird der Ausstoß von Treibhausgasen und insbesondere des CO₂ der letzten Jahrhunderte betrachtet, lässt sich eine Korrelation zwischen der Temperaturerhöhung und dem CO₂-Ausstoß herstellen. Es besteht der wissenschaftliche Konsens, dass durch die Emission des Treibhausgases CO₂ die Umwelt nachhaltig geschädigt wird und dieser Trend umgekehrt werden muss⁵. Dies wird auch darüber verdeutlicht, dass die Europäische Union (EU) 2019 aufgrund der Erderwärmung den Klimanotstand erklärt hat⁶. Dieser fordert, dass betroffene

¹ Förderkennzeichen: 03XP0071B.

² Vgl. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (2021): *Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6)*, S. 1ff; Vgl. IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. 5ff.

³ Vgl. IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. 1; Vgl. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (2021): *Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6)*, S. 1ff.

⁴ Vgl. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (2021): *Sechster IPCC-Sachstandsbericht (AR6)*, S. 1ff.

⁵ Vgl. Europäische Union (2021): *Klima- und energiepolitischer Rahmen bis 2030*, S. 1.

⁶ Vgl. Pascal Canfin (2019): *Europäisches Parlament ruft Klimanotstand aus*, S. 1.

Gesetzesvorschläge auf das Ziel ausgerichtet werden, die Erderwärmung auf 1,5 Grad zu begrenzen.⁷ Der europäische Grüne Deal umfasst umfangreiche Maßnahmen in allen treibhausgasemittierenden Sektoren⁸. Des Weiteren hat sich die EU im Rahmen des Pariser Klimaabkommens dazu verpflichtet, die verursachten Treibhausgasemissionen bis 2030 um 40,00 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu senken⁹. Vollständige Klimaneutralität hat sich die EU bis zum Jahr 2050 als Ziel gesetzt¹⁰. Bereits heute lassen sich extremere Wettersituationen wie Hochwasser, Dürren, Starkregen oder Hitzewellen in erhöhter Frequenz, größerem Ausmaß und dafür ungewöhnlichen Orten beobachten.

Werden die CO₂-Emissionen betrachtet, lassen sich in Deutschland ca. 20,00 % der Emissionen auf den Verkehrssektor zurückführen¹¹. Elektrifizierte und damit lokal emissionsfreie Fahrzeuge können einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Mobilität leisten und spielen somit eine zentrale Rolle bei der Entschleunigung des Klimawandels¹². Entsprechend wurden Zulassungsziele von 30 Mio. vollelektrischen Fahrzeugen im Jahr 2030 durch die EU formuliert¹³. Aktuell befindet sich die Entwicklung stark hinter den formulierten Zielen, da der Anteil der Neuzulassungen von elektrifizierten Fahrzeugen im Jahr 2021 bei ca. 15,00 % lag¹⁴.

Bei Betrachtung des Verkehrssektors gibt es verschiedene Ansätze zur Dekarbonisierung der Mobilität, welche einen wesentlichen Faktor darstellen, um die beschlossenen Klimaziele zu erreichen. Sowohl rein elektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) und hybride Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor als auch Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle benötigen einen elektrochemischen Energiespeicher. Hybride Fahrzeuge werden in Mikro-, Mild-, Voll- und Plug-in-Hybride sowie Hybride mit Range Extender unterteilt. Folgend werden sie unter dem Plug-in-Hybrid-Fahrzeug (PHEV) oder dem Hybrid-Fahrzeug (HEV) zusammengefasst. Bei allen Ansätzen spielt die elektrochemische Speicherung der Energie eine wesentliche Rolle¹⁵.

Bezogen auf die Antriebsarten der elektrifizierten Fahrzeuge werden bis 2030 für BEV Batteriegrößen von ca. 53 kWh pro Fahrzeug, für PHEV von ca. 12 kWh pro Fahrzeug und für HEV von ca. 0,7 kWh erwartet¹⁶. Wird dem gegenüber die notwendige Elektrifizierung des Mobilitätssektors, angekündigt durch die Bundesregierung, sowie die von verschiedenen Studien prognostizierte Elektrifizierung gestellt, kann der wachsende Bedarf an Batteriekapazität

⁷ Vgl. Pascal Canfin (2019): *Europäisches Parlament ruft Klimanotstand aus*, S. 1.

⁸ Vgl. Europäische Kommission (2019): *Der europäische Grüne Deal*, S. 2f.

⁹ Vgl. Europäische Kommission (2019): *Der europäische Grüne Deal*, S. 2f.

¹⁰ Vgl. Europäische Union (2018): *Reduktion von CO₂-Emissionen: EU-Klimaziele und Maßnahmen*, S. 1; Vgl. Europäische Union (2018): *Die Antworten der EU auf den Klimawandel*, S. 1.

¹¹ Vgl. Schiffer (2021): *Treibhausgasneutralität 2045/2050: Verschärfung der nationalen und der europäischen Klimaziele*, S. 641.

¹² Vgl. Umweltbundesamt (2021): *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland seit 1990 nach Kategorien der UNFCCC-Berichterstattung*, S. 1; Vgl. Europäische Union (2019): *CO₂-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten (Infografik)*, S. 1.

¹³ Vgl. Europäische Kommission (2020): *Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität: Den Verkehr in Europa auf Zukunftskurs bringen*, S. 3.

¹⁴ Vgl. Europäische Kommission (2019): *European Alternative Fuels Observatory*, S. 1.

¹⁵ Vgl. Kampker et al. (2021): *Metaanalyse zur Marktentwicklung elektrifizierter Fahrzeuge*, S. 60ff.

¹⁶ Interne Studie basierend auf externen Studien sowie vergangenen und zukünftigen Fahrzeugankündigungen.

durch Batterieproduktionen abgeschätzt werden. ROLAND BERGER erwartet in Europa eine Elektrifizierung von mindestens 50,00 % bis 2030 und damit, basierend auf den erwarteten Neuzulassungen für den Bereich der xEV pro Jahr, eine jährliche Batteriekapazität von mindestens 2.833 GWh weltweit. BENCHMARK MATERIALS erwartet in dem *Lithium Ion Battery Megafactory Assessment* vom Juli 2021 weltweit eine jährlich produzierte Lithium-Ionen-Batteriekapazität von 4.100,1 GWh. MCKINSEY geht von einem jährlichen Gesamtumsatz von 5 bis 7 Billionen Euro für die Maschinenbauindustrie bis 2025 aus¹⁷.

Die enorm anwachsende Nachfrage nach Produktionskapazitäten sowie die angekündigten Batterieproduktionen gilt es flächendeckend zu adressieren, um den Wandel hin zu einer lokal emissionsfreien Mobilität zu ermöglichen. Hierbei stehen die Batterieproduzenten zum einen vor der großen Herausforderung, den enorm steigenden Bedarf zu adressieren, und zum anderen, dem enorm wachsenden Preisdruck durch verschiedene, neu auf den Markt drängende Akteure standzuhalten.

1.2 Problemstellung

Problem statement

Bezogen auf die Ausgangssituation und die damit verbundenen Entwicklungen ergeben sich verschiedene Herausforderungen und Problemstellungen für die unterschiedlichen Akteure in der Wertschöpfungskette, die es zu adressieren gilt, um eine Durchdringung der elektrifizierten Mobilität als Teillösung einer nachhaltigen und emissionsfreien Mobilität zu ermöglichen. Im Folgenden sollen die wesentlichen Herausforderungen eingeordnet sowie die für diese Arbeit relevanten Problemstellungen herausgearbeitet werden. Um eine schnelle und nachhaltige Durchdringung einer emissionsfreien Mobilität und damit auch der Elektromobilität zu gewährleisten, besteht die Herausforderung, darin neben den Klimazielen auch die Kundenanforderungen zu adressieren. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, die Hemmnisse der Konsumenten zu analysieren und zu verstehen. Hierbei lassen sich im Wesentlichen drei Herausforderungen identifizieren: die Anschaffungskosten, die Verfügbarkeit der Batteriezellen und die Nachhaltigkeit der Batterieproduktion.

Eines der wesentlichen Hemmnisse stellen die Anschaffungskosten der elektrifizierten Fahrzeuge dar¹⁸. Bei Betrachtung der Herstellungskosten eines Elektrofahrzeugs wird deutlich, dass ca. 40,00 % der Kosten durch die Batterie sowie ca. 70,00 % dieser Batteriekosten durch die Batteriezellen hervorgerufen werden¹⁹. Es wird deutlich, dass die Batteriezelle einen wesentlichen Kostenanteil an den Herstellungskosten der Elektroautos ausmacht und somit einen wesentlichen Kostenhebel darstellt. Die Herstellungskosten der Batteriezelle werden wesentlich durch die Materialkosten beeinflusst, doch auch die Fertigungskosten haben einen nicht vernachlässigbaren Anteil²⁰. Bei Betrachtung der Kosten für Batteriezellen in den vergange-

¹⁷ Vgl. Fleischmann et al. (2022): *Unlocking the growth opportunity in battery manufacturing equipment*, S. 2.

¹⁸ Vgl. Bühler (2020): *Mobility Studie 2020*, S. 69.

¹⁹ Vgl. König et al. (2021): *An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles*, S. 2.

²⁰ Vgl. Bernhard et al. (2020): *Rising opportunities for battery equipment manufacturers*, S. 6.

nen Jahren wird deutlich, dass diese stetig gesunken sind²¹. Gerade in der jüngeren Zeit sind die Kosten der Materialien aber aufgrund der geografischen und politischen Konflikte sowie der starken Nachfrage gestiegen und damit auch die Kosten der Batteriezellen²². Neben den Materialkosten, die mit produktionstechnischen Anpassungen nur schwer beeinflusst werden können, bedarf es einer Untersuchung der Kostenfaktoren einer Lithium-Ionen-Batterie und der Potentiale einer möglichen Kostenreduktion im Bereich der Batteriezellproduktion.

Abgesehen von den Kosten wird bei Betrachtung des Marktes deutlich, dass die stetig wachsende Nachfrage nach Batteriezellen eine geänderte Marktsituation hervorgerufen hat. Zunächst waren elektrifizierte Fahrzeuge Nischenprodukte. Damit war ebenso die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien gering und der Preisdruck von den automobilen Original Equipment Manufacturers (OEM) auf die Batteriezellhersteller war sehr hoch. Infolge der starken Entwicklung in Richtung Elektromobilität ist die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batteriezellen enorm gestiegen und damit der bestehende Preisdruck in der Herausforderung gemündet, die hohe Nachfrage zu adressieren. Es ist notwendig, den Output bestehender Batteriezellproduktionen nachhaltig zu steigern sowie den Output neuer Produktionsstätten dahingehend zu optimieren. Die Elektromobilproduktion wird in den Medien für ihre schlechte Ressourcenschonung kritisiert. Diese Umstände bei der Produktion lassen sich zum Teil anhand von wissenschaftlichen Veröffentlichungen bestätigen. Bei Betrachtung der vollständigen Wertschöpfungskette wird deutlich, dass das Elektroauto bezogen auf den kumulierten CO₂ Ausstoß klimaneutraler als bestehende Lösungen ist. Trotzdem ist es notwendig, die gesamte Wertschöpfungskette ressourcenschonender zu gestalten und den Ausschuss sowie den Energieverbrauch in der Produktion von Batteriezellen zu reduzieren.

Die vorliegende Arbeit fokussiert die Fertigung der Batteriezellen als Teilziel dieses Gesamtansatzes und stellt eine Teillösung der Gesamtproblemstellung dar. Um die notwendigen Potentiale zu identifizieren, bedarf es einer detaillierten Betrachtung der Batteriezellproduktion. Hierbei wird deutlich, dass insbesondere die Formierung ein wesentliches Bottleneck in Bezug auf die Prozesszeit und damit auch hinsichtlich der notwendigen Fläche und Anlagenkosten darstellt. Die Formierung ist ein Teilprozessschritt der Batteriezellproduktion, in der die Batteriezelle zum ersten Mal elektrisch geladen wird und damit eine Aktivierung innerhalb der Batteriezelle stattfindet. Es besteht ein hoher Energieverbrauch aufgrund der elektrischen Beladungs- und Entladungsprozesse. Eine Betrachtung der Kennwerte folgt in Kapitel 2.4.

Die Beschreibung des Stand der Technik inklusive des notwendigen Grundwissens (Kapitel 2.1, 2.2 und 2.3), der Herleitung des Praxisdefizits (Kapitel 2.4) sowie des Theoriedefizits (Kapitel 2.5) erfolgt in Kapitel 2. Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 3 die Zielsetzung und Vorgehensweise inklusive der forschungstheoretischen Herangehensweise.

²¹ Vgl. Henze (2020): *Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh*, S. 1.

²² Vgl. Sauer (2022): *Die Kosten für die Batterieproduktion werden wohl eher steigen als sinken*.