



Alexander Fill (Autor)

Theoretische und experimentelle Untersuchungen an parallel geschalteten Batteriezellen und -strängen

Herausgeber: Prof. Dr. Kai Peter Birke

ENERGIE & NACHHALTIGKEIT
Elektromobilität & Batterietechnologie

Alexander Fill

**Theoretische und experimentelle
Untersuchungen an parallel geschalteten
Batteriezellen und -strängen**

Elektrische
Energiespeichersysteme



Nachhaltige
CO₂-Kreisläufe



Elektromobilität &
Batterietechnologie



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8495>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

Kapitel 1

Einleitung

In diesem Kapitel wird vorerst auf die Motivation der Arbeit eingegangen. Anschließend werden die Einflussgrößen auf die Stromaufteilung paralleler Zellen veranschaulicht und der Stand der Technik zusammengefasst. Abschließend wird das Ziel dieser Arbeit definiert, sowie der Aufbau und die Struktur erläutert.

1.1 Motivation

Eine der größten globalen Aufgaben derzeit stellt die Umstellung des heutigen Energiesystems von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern dar. Das Ziel muss sein die prognostizierten Folgen auf die Um- und Tierwelt sowie den Menschen selbst [1–3] in Grenzen zu halten. Durch den stetigen Anstieg des globalen Primärenergiebedarfs, unter anderem bedingt durch den wachsenden Wohlstand vieler Entwicklungsländer und die zeitliche Limitierung möglicher Maßnahmen, aufgrund verschiedener sogenannter *Kipppunkte*, entstand in den letzten Jahren ein erhöhter Druck auf die Politik und eine steigende Sensibilität dieser Thematik in der Gesellschaft. Um eine weltweite Strategie zu entwickeln und gemeinsame Ziele und Aufgaben zu definieren, tagen die führenden Nationen seit der ersten Klimakonferenz im Jahre 1995 in Berlin [4] jährlich. Ein erstes Klimaschutzabkommen wurde auf der UN-Klimakonferenz in Paris im Jahre 2015 vereinbart, mit dem wesentlichen Ziel die Erderwärmung unter $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ verglichen zum vorindustriellen Zeitalter zu halten [5]. Dieses Abkommen wurde von 180 Staaten ratifiziert, wobei die Maßnahmen zur Einhaltung der vereinbarten Ziele von den Staaten selbst individuell festgelegt wurden [6].

Die Bundesregierung hat hierfür in den letzten Jahren verschiedenste steuerliche Maßnahmen und Subventionen vereinbart, welche Unternehmen und die Bevölke-

rung zu umweltfreundlicheren Produkten und Verhalten lenken sollen. Unter anderem wurden der Ausstieg aus der Kohleenergie bis zum Jahre 2038 [7], Emissionsstrafen für Automobilhersteller von 95 €/gCO₂ ab einem Flottenverbrauch von 95 gCO₂/km [8], eine Förderung des Ausbaus der Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge mit einem Etat von 30 Mio. € [9, 10], Subventionen für elektrifizierte Autos mit bis zu 9 000 € [9–11], eine CO₂-Bepreisung im Verkehrs- und Wärmesektor von 25 €/tCO₂ [9], eine Förderung energetischer Sanierungen und ein erstes Klimapaket beschlossen [9]. Auswirkungen zeigen sich zum Beispiel im Anstieg der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung von 18 TWh (1990) auf 225 TWh (2018)¹ und an der stetig ansteigenden Anzahl an Neuzulassungen rein elektrischer Fahrzeuge von 1 931 (2006) auf 136 617 (2020) in Deutschland [12, 13]. Diese Beschlüsse und ähnliche Vorgaben wichtiger Exportländer, vor allem in China und den USA, zwingen deutsche Automobilbauer ihr Produktportfolio und ihren Absatz auf Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben umzustrukturieren. Dies spiegelt sich unter anderem in Aussagen und Maßnahmen der Daimler AG wider: bis 2050 CO₂ neutrale Unternehmensstruktur, ab dem Jahre 2039 keine weitere Produktion konventioneller Fahrzeuge (Diesel und Benzin), Marktart EQC im Jahre 2019 und die Ankündigung weiterer elektrifizierter Modelle in den nächsten Jahren [14]. Zum anderen zeigt sich dies im Erfolg des Autoherstellers Teslas mit einer stetig steigenden Produktion und der Einstufung als aktuell wertvollstes Automobilunternehmen, gemessen an der Marktkapitalisierung (Stand: 07.07.2020) [15]. Ebenfalls wechselt der größte Automobilbauer Volkswagen (VW) seine Strategie, mit einem Etat von 30 Mrd. € in den nächsten Jahren [16], wird der Konzern auf den Absatz batterieelektrischer Fahrzeuge ausgerichtet. Dabei deutet sich ein klarer Trend zur Elektromobilität mit Batterietechnik an. Technologien, wie die Brennstoffzelle oder die Entwicklung synthetischer Kraftstoffe, werden im Wandlungsprozess der Mobilität vorerst eine untergeordnete, wenn nicht sogar keine Rolle spielen. Die Umstellung von fossilen Kraftstoffe zu elektrochemischen Energiespeichern hat aktuell für den Verbraucher zwei signifikante Nachteile: geringe Reichweite und Ladezeit bzw. -möglichkeit. Neben einer zufriedenstellenden Umsetzung dieser Punkte müssen für eine hohe Produktakzeptanz und erfolgreiche Marktabtastung auch Anforderungen bezüglich Lebensdauer, Kosten und Sicherheit gewährleistet werden. Aus diesem Grund entstanden und bestehen derzeit vielseitige Forschungs- und Entwicklungsfelder in der Batterietechnik.

¹Dies entspricht in etwa 46 % der gesamten Stromerzeugung in Deutschland.

Eine Möglichkeit zur Einhaltung und Erreichung dieser Anforderungen ist die Wahl der Zellgröße (geometrisch und energetisch), sowie des Zellformats. Durch die Festlegung der Zelle resultiert die Verschaltung der Batterie, bedingt durch den geforderten Energieinhalt. Der Energieinhalt kann über das Produkt der Batteriespannung U_{Batt} und der Kapazität C_{Batt} bestimmt werden. Diese beiden Größen hängen maßgeblich von der Zellverschaltung und der Zellauswahl ab

$$U_{\text{Batt}} = s \cdot U_{\text{Zelle}}, \quad (1.1)$$

$$C_{\text{Batt}} = p \cdot C_{\text{Zelle}}, \quad (1.2)$$

mit der Anzahl an seriell s und parallel p geschalteten Zellen, sowie der Spannung U_{Zelle} und der Kapazität C_{Zelle} der einzelnen Zellen. Herstellerübergreifend hat sich eine Spannungslage der Batterie von $U_{\text{Batt}} \approx 400$ V etabliert, wodurch ebenfalls die Anzahl seriell geschalteter Zellen mit $s \approx 100$ festgelegt ist². Aus diesem Grund zeigen die Wettbewerber grundsätzlich zwei unterschiedliche Strategien zur Erreichung des Energieinhalts: Zum einen, kleine Zellen ($C_{\text{Zelle}} < 5$ Ah) mit einer hohen Anzahl parallel geschalteter Zellen, wie z.B. Tesla Modell S (74p96s)³ und Modell 3 (46p108s) [17–19]. Zum anderen, große Zellen ($C_{\text{Zelle}} > 30$ Ah) mit einer geringen Anzahl an parallelen Zellen, z.B. VW eGolf (3p88s), Nissan Leaf (2p96s), BAIC EU260 (3p90s), Renault Zoe (2p96s), Audi etron (4p108s) und Mercedes EQC (2p96s2P)⁴ [17, 19]. Die Hersteller setzten überwiegend auf beide Verschaltungsarten.

Aufgrund der parallelen Verschaltung kann eine inhomogene Strombelastung der Zellen entstehen, welche ebenfalls Auswirkungen auf das thermische und das Alterungsverhalten der Zellen haben kann. Zur Gewährleistung der Garantiansprüche und erwarteten Lebensdauer der Batterie, müssen die Zellen in einem definierten Betriebsfenster gehalten werden. Um dies sicherzustellen, muss aufgrund der inhomogenen elektrischen und thermischen Belastung der Zellen, die Batterieleistung reduziert werden, abhängig von der höchst-belasteten Zelle. Die technische Herausforderung besteht dabei in der Abschätzung bzw. der Berechnung des Zellstroms, da dieser aus Platz- und Kostengründen nicht gemessen werden kann. Die Güte dieser Abschätzung hat hierdurch einen direkten Einfluss auf die Leistung, Lebensdauer, Reichweite und Ladezeit der Batterie.

²Eine Verschiebung der Spannungslage auf $U_{\text{Batt}} \approx 800$ V ist für die nächsten Fahrzeug Generationen möglich, als Vorreiter ist hier der Porsche Taycan zu nennen.

³Die Abkürzung *xpys* beschreibt eine Topologie mit x parallel und y seriell geschalteten Zellen.

⁴Die Abkürzung 2P beschreibt die parallele Verschaltung zweier Stränge der Topologie *xpys*.

1.2 Einflussfaktoren auf die Stromaufteilung

Um auf die Struktur und die Ziele dieser Arbeit, sowie den Stand der Technik eingehen zu können, wird in diesem Abschnitt zusammenfassend auf die verschiedenen Ursachen und Einflussfaktoren der Stromaufteilung innerhalb paralleler Lithium-Ionen Zellen eingegangen. Die hier kurzgefassten und vorweggenommenen Zusammenhänge werden ausführlich in den nachfolgenden Kapitel beschrieben.

Unter den vereinfachten Annahmen eines identischen elektrischen und thermischen Verhaltens der Zellen, sowie keinem Einfluss der Batteriearchitektur und Umgebung, ergibt sich eine homogene Stromverteilung zwischen den Zellen. Für reale Systeme wird diese Idealisierung jedoch auf unterschiedlichen Ebenen gebrochen. Die Lithium-Ionen Zellen unterliegen Herstellungstoleranzen, welche zum einen zu initialen Unterschieden von Zellparametern, wie dem Zellwiderstand und der Zellkapazität führen. Zum anderen wirken sich diese Fertigungstoleranzen auf das Degradationsverhalten der Zellen aus. Dadurch kann es im Laufe des Batteriebetriebs zu steigenden Parameterunterschieden zwischen den Zellen kommen, obgleich die Zellen homogen belastet wurden.

Neben diesen durch die Zellfertigung verursachten Unterschieden wirkt sich die Systemarchitektur der Batterie, als auch Toleranzen in der Batteriefertigung auf die einzelnen Zellen aus. Auf das elektrische Verhalten der Zellen wirken sich hierbei vor allem Schweißtoleranzen der elektrischen Zellkontaktierung aus, welche zu Abweichungen des Kontaktwiderstands der Zellen führen. Ebenso ist die Position der Zelle von Relevanz, abhängig von dieser, können sich Kontaktwiderstände überlagern. Durch fertigungsbedingte Unterschiede verschiedener Parameter, wie der Verteilung der Wärmeleitpaste, des Luftspalts zur Kühlung und der Position der Zelle im Modul, können Abweichungen hinsichtlich des thermischen Verhaltens der Zellen entstehen.

Bedingt durch die genannten Unterschiede entsteht eine inhomogene Stromaufteilung zwischen den parallelen Zellen. Dieser Stromunterschied wirkt sich elektrisch sowie thermisch auf die einzelnen Zellen und somit auf die Stromaufteilung selbst aus. Zum einen entsteht ein Ladezustandsunterschied zwischen den Zellen, welcher sich durch die Ladungsabhängigkeit der Leerlaufspannung (engl. *Open Circuit Voltage*, OCV) und des Zellwiderstands auf die Stromaufteilung auswirkt. Die abfallende Verlustleistung korreliert ebenfalls mit dem Zellstrom, weshalb die Stromaufteilung zu Temperaturunterschieden zwischen den Zellen führen kann. Durch die Temperaturabhängigkeit der OCV und des Zellwiderstands entsteht ebenfalls eine Rück-

kopplung auf die Stromaufteilung. Diese beiden Effekte wirken innerhalb kurzer Zeit $t < 5$ min und bestimmen die Dynamik der Stromaufteilung. Langfristig kann die inhomogene elektrische und thermische Belastung der Zellen zu einem unterschiedlichen Degradationsverhalten der einzelnen Zellen führen. Dabei können initiale Zellunterschiede im Laufe des Betriebs sinken oder zunehmen und damit einen positiven sowie negativen Einfluss auf die Stromaufteilung haben. Die beschriebenen Effekte sind in Abbildung 1.1 zusammenfassend veranschaulicht.

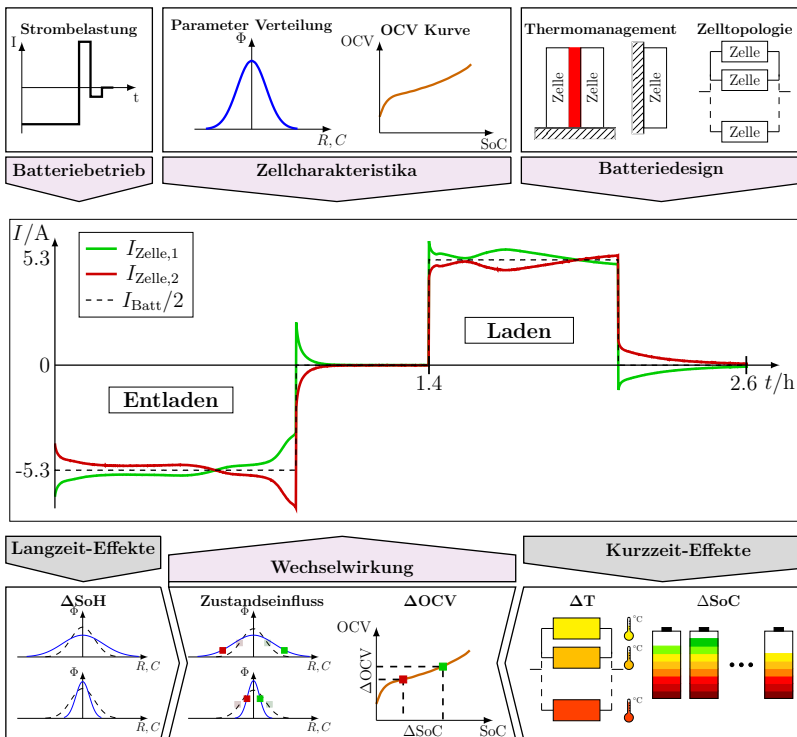


Abbildung 1.1: Einflussgrößen auf die Stromaufteilung parallel geschalteter Lithium-Ionen Zellen und die Wechselwirkungen der Stromaufteilung selbst.

1.3 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden die experimentellen und theoretischen Erkenntnisse der Literatur diskutiert. Zur Übersicht wurden die Publikationen in einzelne Teilbereiche untergliedern, wohl wissend, dass sich einige Bereiche nicht trennen lassen.

Für eine inhomogene Aufteilung des Stroms sind Unterschiede hinsichtlich des elektrischen und thermischen Verhaltens der parallelen Zellen notwendig. Diese können, wie bereits diskutiert, durch Herstellungstoleranzen in der Zellproduktion und der Batteriefertigung hervorgerufen werden. Die Auswirkungen dieser Parameterschwankungen wurden teilweise isoliert, aber auch überlagert betrachtet.

1.3.1 Zellunterschiede

Herstellungstoleranzen Die Auswirkungen von Herstellungstoleranzen auf Zelleigenschaften wurden in zahlreichen Publikationen untersucht [20–37]. Die meisten Untersuchungen konzentrierten sich auf die Verteilungen des Zellwiderstands und der Zellkapazität, zwei wesentliche Einflussparameter auf die Stromaufteilung paralleler Zellen. Einige Publikationen wiesen zudem die Varianz anderer Zellgrößen, wie der Zellmasse [20, 26, 28], der Zelldicke [35], sowie der Porosität und der Dicke der Elektroden [35] nach. In [21–23, 25, 26, 32, 33] wurden die Verteilungen des Zellwiderstands und der Zellkapazität mit Stückzahlen von $n > 100$ untersucht. Unbelastete Zellen zeigten Verteilungen auf, welche ausreichend gut über eine Gaußverteilung approximiert werden können [22, 23, 25, 27, 32]. Die Vermutung der Normalverteilung der Parameter wurde mit Hilfe statistischer Methoden, Lilliefort Test und z -Test in [22] und dem Kolmogorov-Smirnov Test in [27], bestätigt. Zudem wurde durch eine Korrelationsanalyse die Unabhängigkeit der Zellparameter nachgewiesen [22, 27, 32, 33].

In allen Publikationen weist der Zellwiderstand einen deutlich höheren Variationskoeffizienten $\kappa = \sigma \cdot \mu^{-1}$ im Vergleich zur Zellkapazität auf. Die Abweichungen variieren in den Publikationen von der zwei- [32] bis 35-fachen [26] normierten Standardabweichung κ des Zellwiderstands, verglichen mit den Werten der Zellkapazität. Für die Zellkapazität resultierten Abweichungen von $\kappa_C = 0.16 \%$ [26] bis $\kappa_C = 1.3 \%$ [37], mit entsprechenden Werten des Zellwiderstands von $\kappa_R = 0.73 \%$ [32] bis $\kappa_R = 5.66 \%$ [37]. Dies spiegeln auch Rückmeldungen der Zellhersteller auf Anforderungen seitens der Automobilhersteller wider, welche geringere Toleranzen für die Zellkapazität zusagen.

Zellmessungen mit bereits betriebenen Zellen führten zu einer Verschiebung der Verteilung, zu einer Weibulverteilung [22, 34] und einer leicht negativen Korrelation zwischen den Zellparametern [22]. Zudem wiesen die belasteten Zellen eine höhere normierte Standardabweichung beider Parameter auf [22, 24, 28, 34]. Dabei zeigte die Standardabweichung der Zellkapazität einen wesentlich höheren Anstieg im Vergleich zum Zellwiderstand, mit $\kappa_{C,\text{rel}} = \kappa_{C,\text{EoL}}/\kappa_{C,\text{BoL}} = 3$ [34], $\kappa_{C,\text{rel}} = 7$ [28] und $\kappa_{C,\text{rel}} = 10$ [24], sowie den entsprechenden Werten des Zellwiderstands mit $\kappa_{R,\text{rel}} = 1.6$ [34] und $\kappa_{R,\text{rel}} = 1.4$ [28].

Messungen mit unterschiedlichen Zellformaten, Rundzellen [21, 23, 27, 28, 38] und Pouch [22, 39], sowie mit unterschiedlichen Kathodenmaterialien, Li(NiCoMn)O₂ (NCM) [23, 34], Eisenphosphat (LFP) [31–33, 40, 41], Li(NiCoAl)O₂ (NCA) [22], LiCoO₂ (LCO) [29] und LiMnO₂ (LMO) [22] lieferten vergleichbare Verteilungen der Zellparameter. Ebenso ergaben sich ähnliche Verteilungen bei Untersuchungen mit unterschiedlichen Zellgrößen von $C_{\text{Zelle}} < 2.5$ Ah [22] bis $C_{\text{Zelle}} > 50$ Ah [22].

Batteriearchitektur Die Batteriearchitektur hat sowohl einen elektrischen als auch einen thermischen Einfluss auf die Zellen. Unterschiede im elektrischen Verhalten können vor allem durch Toleranzen der Zellkontaktierung hervorgerufen werden. Thermische Auswirkungen haben unter anderem die Position der Zelle im Modul, die Kühlstrategie und Toleranzen der thermischen Zellkontaktierung.

- **Kontaktwiderstand:**

Verschiedene Einflussgrößen und Toleranzen des Übergangswiderstands der Zellkontaktierung wurden in [18, 42–44] untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Kontaktierungsmethoden betrachtet: Verpressung [42, 43], verschiedene Schweißarten [44] und Lötverbindungen [18]. Für die Zellkontaktierung in Traktionsbatterien werden überwiegend Schweißverbindungen genutzt, weshalb die Erkenntnisse der Pressverbindung vor allem für Versuche im Labor von Interesse sind, um die Einflussfaktoren auf die Messergebnisse gering zu halten. Experimentelle Daten in [42, 43] wiesen einen Einfluss des Anpressdrucks, der Struktur der Oberfläche (Rauheit) und der Anpressfläche auf den Übergangswiderstand auf. Brand et al. [43] zeigte zudem Abweichungen des Kontaktwiderstands von $\Delta R_{\text{Druck}} = 7\%$ im 90 % Konfidenzintervall experimentell auf. Der Widerstand von Laser-, Punkt- und Ultraschallschweißungen konnte vor allem durch die Anzahl der Schweißpunkte beziehungsweise Erhöhung der Schweißfläche reduziert werden [44]. Dabei ergaben sich Widerstände von $R_{\text{Punkt}} \approx 0.175$ m Ω , $R_{\text{Ultraschall}} \approx 0.25$ m Ω

und $R_{\text{Laser}} \approx 0.15 \text{ m}\Omega$ mit entsprechenden Differenzen von $\Delta R_{\text{Punkt}} \approx 9 \%$, $\Delta R_{\text{Ultraschall}} \approx 25 \%$ und $\Delta R_{\text{Laser}} \approx 12 \%$ im 90 % Konfidenzintervall [18, 22, 44]. Zudem können sich, je nach Batteriearchitektur und Topologie, die Kontaktwiderstände einzelner Zellen überlagern. Dabei sollte in Betracht gezogen werden, dass durch eine steigende Anzahl an parallelen Zellen einer vergleichbaren Batterie, die Kapazität und damit der Widerstand der Zellen linear abfällt, beziehungsweise ansteigt.

- **Kühlung und Kühlstrategie:**

Eine inhomogene Kühlung der Zellen kann aufgrund der hohen Sensitivität des Zellwiderstands mit der Temperatur, vor allem im unterem Temperaturbereich $T < 0 \text{ }^\circ\text{C}$, einen signifikanten Einfluss auf das elektrische Verhalten der Zellen haben. Temperaturgradienten ausgehend vom Rand in die Mitte der Batterie, wurden experimentell [45] und mit Hilfe von Simulationen [46–50] belegt. Der maximale Temperaturunterschied zwischen den Zellen reichte in den unterschiedlichen Publikationen von $0.5 \leq \Delta T \leq 1 \text{ }^\circ\text{C}$ [51] bis $5 \leq \Delta T \leq 8 \text{ }^\circ\text{C}$ [46–49]. Die hohen Abweichungen werden durch die Betrachtung unterschiedlicher Betriebspunkte und Kühlstrategien hervorgerufen.

In anderen Artikeln wurden vergleichbare Mess- [52–55] und Simulationsergebnisse [56–59] hinsichtlich der Temperaturverteilung innerhalb einer Lithium-Ionen Zelle ermittelt. In [55, 57, 58] konnten Temperaturgradienten in Längsrichtung der Zelle (Format: Pouch, Hardcase) experimentell und durch Simulationen nachgewiesen werden. Die experimentellen Daten zeigten einen steigenden Temperaturgradienten in Richtung der Zelleiter. Dies wird durch die Zunahme der Stromdichte in den Kollektoren nahe der Ableiter begründet. Die maximalen Temperaturunterschiede reichten von $\Delta T \approx 3 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $\Delta T \approx 8 \text{ }^\circ\text{C}$ [55], abhängig des betrachteten Betriebspunkts und der Konfiguration der Ableiter. Bolsinger et al. [52] und Fleckenstein et al. [53] konnten zudem steigende Temperaturgradienten - ausgehend von der Zelloberfläche ins Zellinnere - experimentell nachweisen, mit einem maximalen Temperaturunterschied von $\Delta T \approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Da diese Rahmenbedingungen einer parallelen Verschaltung von Zellen nahe kommt, sind die gewonnenen Erkenntnisse besonders interessant, möglicherweise übertragbar und vice versa.

1.3.2 Auswirkungen auf die Stromaufteilung

Zellcharakteristika Auswirkungen der dargelegten Herstellungstoleranzen auf die Stromaufteilung wurden unter anderem in [21, 23, 31, 33, 38, 40, 60–64] untersucht. Brand et al. [23] zeigte mit Hilfe vereinfachter Modellannahmen⁵, dass die initiale Stromaufteilung mit dem reziproken Widerstandsverhältnis der parallelen Zellen korreliert. Zudem strebt die Stromaufteilung zu einer homogenen Entladerate bzw. Laderate und korreliert deshalb mit dem Kapazitätsverhältnis der Zellen. Diese Stromaufteilung wird durch einen Unterschied der OCV zwischen den parallelen Zellen hervorgerufen. Untersuchungen mit zwei parallelen Zellen bestätigten die theoretischen Erkenntnisse, mit einer initialen Verteilung entsprechend der Zellwiderstände und ein Zusammenlaufen der Ströme hin zu gleichen Laderaten. Der SoC- und OCV-Unterschied zwischen den Zellen wurde durch das Auftreten von sogenannten *Ausgleichsströmen* während einer Lastunterbrechung nach einer vorherigen Belastung der Zellen experimentell nachgewiesen.

Die gleichen theoretischen Überlegungen hinsichtlich der initialen Stromaufteilung wurden bereits in [65] getroffen. Zudem wurde durch Messungen der Stromaufteilung zwischen drei parallelen Strängen mit signifikanten Kapazitätsunterschieden, $C_{\text{Strang},1} = 4 \cdot C_{\text{Strang},3}$ mit der Kapazität des 1. Batteriestranges $C_{\text{Strang},1}$ und des 3. $C_{\text{Strang},3}$, die Korrelation der Stromaufteilung mit dem Kapazitätsverhältnis nachgewiesen. Die Theorien aus [23, 65] werden durch ähnliche experimentelle Ergebnisse [21, 31, 33, 38, 40, 60, 61, 63] und Simulationen [62, 64] anderer Arbeiten bestätigt. Diese Messungen lieferten ein weiteres Charakteristikum der Stromaufteilung, gegeben durch die Schneidung der Zellströme bei einem Ladezustand von $\text{SoC} \approx 0.5$ bis $\text{SoC} \approx 0.8$ unter konstantem Entladestrom. Anschließend divergierten die Zellströme mit einer höheren Belastung der Zelle mit dem initial höheren Widerstand. Dieser Stromverlauf ist bedingt durch den starken Abfall der Spannung im unteren SoC-Bereich, wodurch die Annahmen von Brand et al. [23] mit einer linearen Abhängigkeit der OCV mit dem SoC ihre Gültigkeit verliert.

Vergleichbare Ergebnisse für Entladungen mit konstanter Strombelastung lieferten Messungen unabhängig des Zellformats: Pouch [39, 63] und Rundzelle [23, 31, 40, 66], der Kathodenzusammensetzung: LFP [31, 40, 66], NCA [40], NCM [23, 66], der Zellgröße: $C_{\text{Zelle}} \approx 1.4 \text{ Ah}$ [66], $C_{\text{Zelle}} \approx 60 \text{ Ah}$ [63], sowie der Zelltopologie: 2p [21, 23, 31, 39, 63], 3p [39, 40], 4p [38, 39], > 4p [66–70].

⁵Die Vereinfachungen werden in Kap. 4 beschrieben und sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Batteriebetrieb In den meisten Publikationen wurde die Stromaufteilung unter konstanter Belastung untersucht. Überwiegend wurde das Entladeverhalten bei moderaten Temperaturen von $T = 25\text{ °C}$ und Strömen $I = 1C$ betrachtet. Messungen und Simulationen zeigten den bereits diskutierten typischen Verlauf, unabhängig von der Zelltopologie, der Zellgröße und der Zellchemie. Es besteht die Fragestellung, in wieweit dieser typische Verlauf durch einen Wechsel der Strombelastung, unterschiedlichen Stromstärken und Ladungsdurchsätzen, verändert beziehungsweise beeinflusst wird. Die Wirkung der Strombelastung wird nachfolgend in zwei Bereiche unterteilt: Belastungen mit konstantem Batteriestrom und Belastungen mit dynamischem Batteriestrom.

- **Konstante Strombelastung:**

Der Einfluss der C-Rate auf diesen Verlauf wurde experimentell in [40, 66, 68–71] untersucht. Die unterschiedlichen Publikationen lieferten vergleichbare Messergebnisse, mit einer meist von der Stromhöhe unbeeinflussten initialen Stromaufteilung [40, 66, 68–70]. Lediglich Messungen von Diao et al. [40] mit drei parallelen NCA Zellen resultierten in einem Anstieg der initialen Verteilung mit steigender C-Rate. Artikel-übergreifend wurde eine Korrelation der Dynamik der Stromaufteilung mit der Höhe der Strombelastung festgestellt. Geringere Strombelastungen (sinkende C-Rate) bewirkten eine signifikante Zunahme der Dynamik des Zellstroms. Dies verdeutlichte sich durch die Anzahl der Kreuzungen n_{Kreuz} beziehungsweise Wendepunkte der Zellströme. Einen deutlichen Anstieg der Kreuzungen von $n_{\text{Kreuz}} = 1$ auf $n_{\text{Kreuz}} = 5$ bei einer Reduzierung der C-Rate von $I_{\text{Batt}} = 1C$ auf $I_{\text{Batt}} = 0.25C$ zeigten Messungen von Liu et al. [68] mit sechs parallelen NCM-LCO Zellen auf. Zudem verschob sich die letzte Kreuzung der Ströme tendenziell zu geringeren Ladezuständen mit steigender Strombelastung. Der charakteristische Stromunterschied am Ende der Entladung stieg bis zu einer C-Rate von $I_{\text{Batt}} \approx 1C$ an und verringerte sich mit einer weiteren Steigerung der C-Rate. Dies ist bedingt durch das frühere Erreichen der unteren Spannungsgrenze.

Experimente bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen in [66, 70] zeigten vergleichbare Auswirkungen der Zelltemperatur. Eine Reduktion der Zell- beziehungsweise Umgebungstemperatur lieferte ähnliche Auswirkungen auf die Stromaufteilung wie eine Erhöhung der Strombelastung. Eine steigende Zelltemperatur führte dabei zu einem signifikanten Anstieg der Dynamik der Zellströme.