

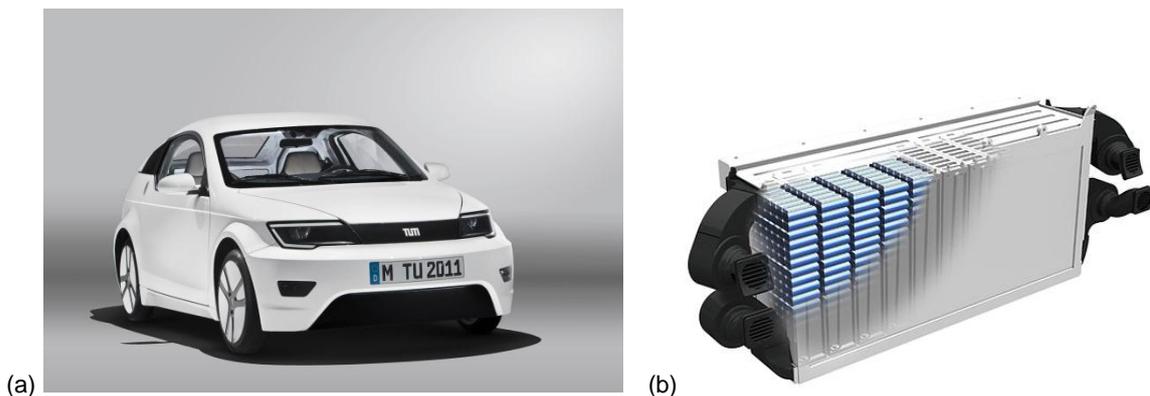
# Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen

Peter Keil, Andreas Jossen

Technische Universität München, Arcisstr. 21, 80333 München  
Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik, [www.ees.ei.tum.de](http://www.ees.ei.tum.de)  
[peter.keil@tum.de](mailto:peter.keil@tum.de)

## 1 Motivation

Lithium-Ionen-Batterien sind bereits heutzutage aus einer Vielzahl technischer Geräte nicht mehr wegzudenken. Im Bereich der mobilen Kommunikations- und Unterhaltungselektronik werden nahezu ausschließlich Lithium-Ionen-Batterien mit einer hohen Energiedichte eingesetzt. Für Elektrofahrzeuge stellt die Lithium-Ionen-Batterie aufgrund ihrer hohen Energie- und Leistungsdichte die derzeit vielversprechendste Batterietechnologie dar. Abbildung 1 zeigt den Elektrofahrzeugsprototyp MUTE der TU München und dessen Lithium-Ionen-Batteriespeicher. Dieser ist aus über 1000 Rundzellen in standardisierter 18650-Bauweise (18 mm Durchmesser, 65 mm Länge) aufgebaut [1]. Auch im Bereich der erneuerbaren Energien werden immer häufiger Lithium-Ionen-Batterien zur dezentralen Speicherung der Energie und zur Optimierung des Eigenverbrauchs angedacht.



**Abbildung 1:** (a) Elektrofahrzeug MUTE der TU München mit  
(b) Batteriespeicher aus Lithium-Ionen-Rundzellen in 18650-Bauweise [1]

Zur Auslegung der Batteriespeicher und zur Optimierung von Betriebsstrategien wird meist auf die Computersimulation zurückgegriffen. Basis der Simulation stellen hierbei geeignete Batteriemodelle dar, die die relevanten Eigenschaften mit ausreichender Genauigkeit wiedergeben. Mithilfe der Modelle können beispielsweise Rückschlüsse über die nutzbaren Energiemengen und die auftretenden thermischen Verluste bei verschiedensten Betriebsbedingungen gezogen werden. Dies ist hilfreich bei der Ermittlung des benötigten Energieinhalts und der Dimensionierung des Kühl-/Heizsystems. Bei Batteriemanagementsystemen werden Modelle als Grundlage zur Zustandsbestimmung eingesetzt, um so im Betrieb die Restreichweite oder die aktuell abrufbare Leistung vorhersagen zu können.

Im Folgenden wird das elektrische Verhalten von Lithium-Ionen-Batterien aufgezeigt, um hieraus entsprechende Modelle abzuleiten. Im Anschluss daran wird auf die Parametrierung der Modelle näher eingegangen. Abschließend werden verschiedene Simulationsergebnisse präsentiert und mit realen Messungen verglichen, um einen ersten Eindruck bezüglich erzielbarer Genauigkeiten zu vermitteln. Die gezeigten Vorgehensweisen sind prinzipiell auch auf andere Batteriespeicher, wie beispielsweise Bleibatterien oder NiMH-Batterien, übertragbar.

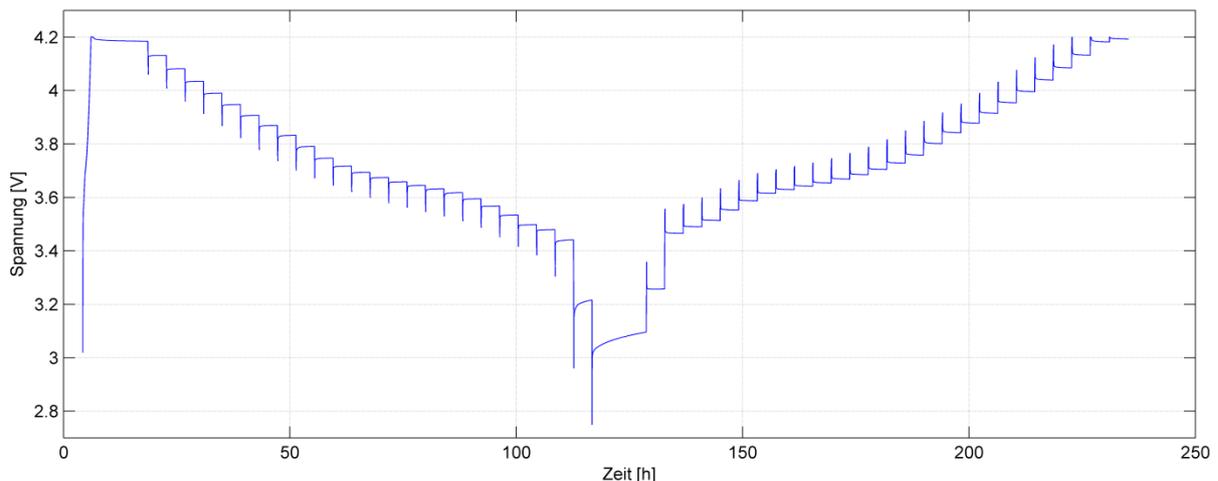
## 2 Elektrisches Verhalten von Lithium-Ionen-Batterien

Zu Beginn des Aufbaus von Simulationsmodellen muss man sich bewusst machen, welche Effekte für die konkrete Anwendung von Relevanz sind. Neben dem statischen Batterieverhalten, das durch die ladezustandsabhängige Ruhespannung bestimmt wird, sind meist auch Aspekte des dynamischen Verhaltens von Interesse. Die physikalisch-chemischen Effekte, die für die Batteriedynamik von Bedeutung sind, können mithilfe entsprechender Messtechniken wie der elektrischen Impedanzspektroskopie identifiziert werden.

### 2.1 Statisches Batterieverhalten: Ruhespannung

Die Gleichgewichtsspannung einer Batterie im unbelasteten Ruhezustand hängt hauptsächlich von ihrem Ladezustand ab. Je voller die Batterie ist, desto höher liegt auch ihre Ruhespannung. Diese ist nach einer entsprechend langen Wartezeit an den Klemmen messbar, wenn alle dynamischen Reaktionen abgeklungen sind. Hierfür sind Wartezeiten von bis zu mehreren Stunden notwendig.

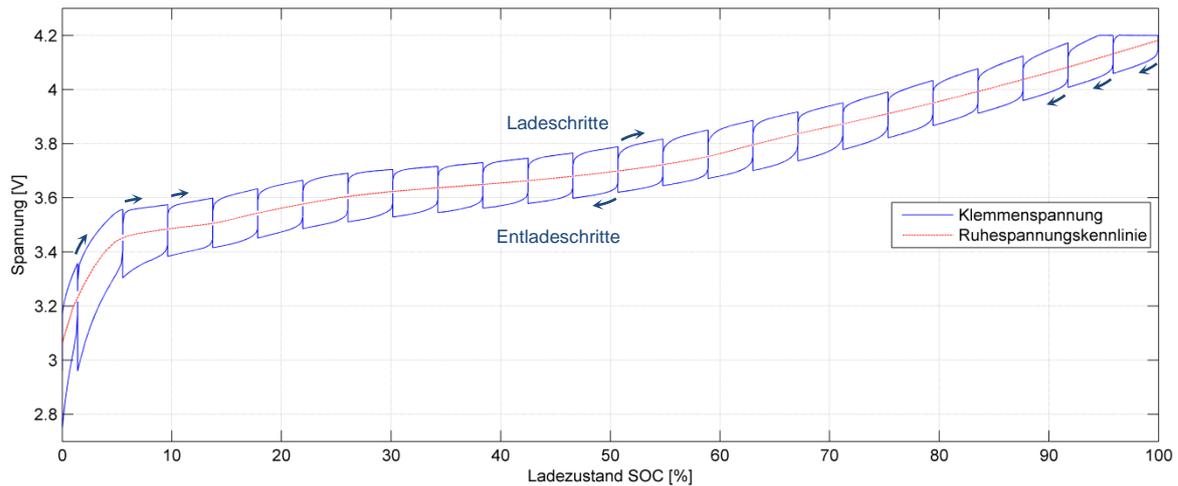
Um die Ruhespannungskennlinie einer Batterie zu erfassen, existieren zwei verschiedene Vorgehensweisen: die erste Methode stellt das schrittweise Ent- bzw. Aufladen mit mehrstündigen Pausen zwischen den einzelnen Schritten dar (siehe Abbildung 2). Die Spannungen, die sich nach jeder Wartepause einstellen, werden dann als Stützstellen für die Ruhespannungskennlinie verwendet. Je nach Anzahl der Stützstellen und Länge der Wartepausen dauert eine solche Messung mehrere Tage. Eine Ruhespannungskennlinie mit 25 Stützstellen beim Laden sowie Entladen mit einer Wartezeit von jeweils 4 Stunden dauert über  $2 \cdot 25 \cdot 4 \text{ h} = 200 \text{ h} = 8,3 \text{ Tage}$ .



**Abbildung 2: Testablauf zur Ermittlung der Ruhespannungskennlinie einer Lithium-Ionen-Batterie (Laden und Entladen in 25 Schritten mit je 4 Stunden Wartepause)**

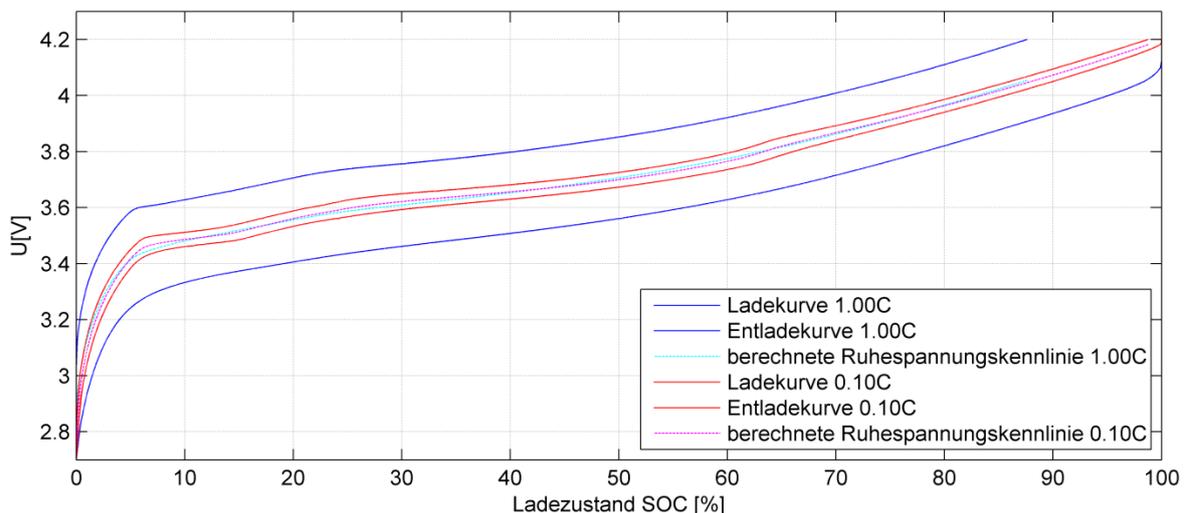
Abbildung 3 zeigt, wie sich die Klemmenspannungen bei gleichem Ladezustand zwischen Lade- und Entladerichtung während der Wartepausen annähern. Aus den zusammentreffenden Spannungen, die am Ende der Wartepause noch rund 5 bis 20 mV auseinander liegen, wird bei jedem Ladezustand der Mittelwert gebildet. Hieraus ergibt sich die Ruhespannungskennlinie.

Durch ein Reduzieren der Stützstellen und Wartepausen lässt sich die Testdauer entsprechend verkürzen. Ab Pausenzeiten von rund 1 Stunde lassen sich gute Ergebnisse erzielen. Lediglich im Bereich niedriger Ladezustände (<10%) dauert es sehr lange, bis sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Dies wird auch in Abbildung 2 deutlich, wo bei den letzten beiden Entladeschritten selbst nach einer Wartezeit von 4 Stunden die Spannung noch sichtbar ansteigt.



**Abbildung 3: Klemmenspannungsverlauf über dem Ladezustand während der Lade- und Entladeschritte sowie der Ruhepausen (vertikale Abschnitte) und die resultierende Ruhespannungskennlinie**

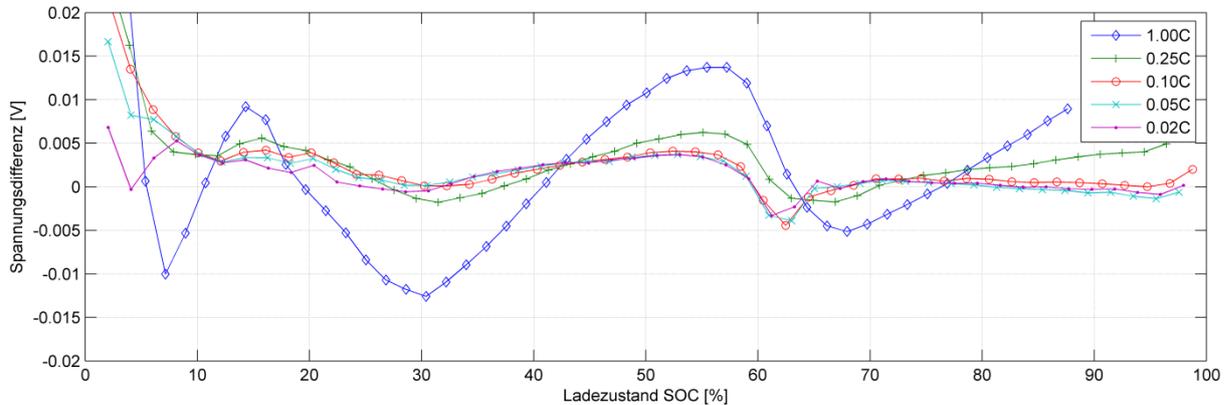
Bei der zweiten Methode zur Erfassung der Ruhespannungskennlinie werden die Spannungsverläufe einer Konstantstrom-Ladung und -Entladung mit gleicher Stromstärke gemittelt. Abbildung 4 zeigt dies für zwei verschiedene Stromstärken. Im Bereich der Batterietechnik werden Stromstärken häufig als C-Rate angegeben. Hierbei wird die Stromstärke auf die Nennkapazität der Batterie bezogen. 1 C-Rate entspricht der Stromstärke, die sich ergibt, wenn die Nennkapazität durch 1 Stunde geteilt wird (beispielsweise 2 A bei einer 2 Ah-Batterie). Die resultierenden Kennlinien bei den betrachteten Strömen decken sich weitgehend. Lediglich im Bereich niedriger Ladezustände (<10%) sind gewisse Abweichungen zu erkennen. Hier erfolgt bei höheren Strömen ein stärkeres Absinken des Spannungsmittelwerts und somit der abgeleiteten Ruhespannungskennlinie.



**Abbildung 4: Bestimmung der Ruhespannungskennlinie gemäß Methode 2**

Wählt man eine sehr niedrige Stromstärke für die Lade- und Entladevorgänge, so liegt die daraus resultierende Ruhespannungskennlinie sehr nahe an der Kennlinie nach Methode 1. Dies zeigt der Vergleich in Abbildung 5. Hierfür wurden aus Lade- und Entladekurven bei verschiedenen Stromstärken Ruhespannungskennlinien gemäß Methode 2 bestimmt und mit der obigen Kennlinie nach Methode 1 verglichen. Bei Stromstärken bis maximal 0,1 C decken sich bei der

hier betrachteten Batterie die Kennlinien sehr gut mit der obigen Referenzkennlinie (Abbildung 3). Lediglich in sehr niedrigen Ladezustandsbereichen (<5%) vergrößern sich die Abweichungen deutlich. Abweichungen unterhalb von  $\pm 5$  mV sind hierbei als vernachlässigbar zu betrachten, da aufgrund von leichten Hystereseeffekten bei der Ruhespannung von Lithium-Ionen-Batterien keine belastbaren Aussagen zur Ruhespannung gemacht werden können, die exakter sind als dieser Genauigkeitsbereich.



**Abbildung 5: Abweichung von Ruhespannungskennlinien, die nach Methode 2 bei unterschiedlichen Strömen bestimmt wurden, zur Referenzkennlinie nach Methode 1 (siehe Abbildung 3)**

Die Bestimmung der Ruhespannungskennlinie kann somit nach beiden Methoden mit einer sinnvollen Genauigkeit bestimmt werden. Bei Batterieanwendungen mit langen Ruhephasen oder mit vorwiegend geringer Belastung bietet sich Methode 1 oder Methode 2 mit einer sehr niedrigen Stromstärke an. Bei Simulationsanwendungen mit kontinuierlicher Belastung zeigt Methode 2 Vorteile, da sie die leichten Spannungsplateaus herausgefiltert werden und die Ruhespannungskennlinie einen früheren Spannungseinbruch bei niedrigen Ladezuständen wiedergibt.

## 2.2 Dynamisches Verhalten: Identifikation mittels Impedanzspektroskopie

Zur Identifikation des dynamischen Verhaltens von Lithium-Ionen-Batterien bietet sich das Verfahren der *elektrischen Impedanzspektroskopie* (EIS) an. Hierbei wird die Batterie mit einem in der Regel sinusförmigen Anregungssignal belastet und die daraus resultierende Systemantwort gemessen. Man unterscheidet zwischen der *galvanostatischen Impedanzspektroskopie*, bei der ein Strom aufgeprägt wird und die resultierende Spannungsantwort gemessen wird, und der *potentiostatischen Impedanzspektroskopie*, bei der ein Spannungssignal vorgegeben wird und die resultierende Stromantwort erfasst wird. Bei der galvanostatischen Impedanzspektroskopie wird der sinusförmige Strom (Effektivwert  $I_{ac}$ ) häufig mit verschiedenen großen Gleichströmen ( $I_{dc}$ ) überlagert, um das elektrochemische Batterieverhalten bei unterschiedlichen Strombelastungen erfassen zu können. [2]

Voraussetzung für die Anwendung der Impedanzspektroskopie ist, dass es sich bei dem untersuchten System um ein lineares, zeitinvariantes System handelt. Batterien weisen generell ein über den Ladezustand hinweg höchst nichtlineares Verhalten auf. Daher ist bei der Anwendung der Impedanzspektroskopie zu beachten, dass sich während der Messungen der Ladezustand nicht zu stark verändert, damit eine ausreichende Linearität um den aktuellen Arbeitspunkt gewährleistet ist.

Aus dem Zusammenhang zwischen Spannungs- und Stromsignal wird dann die entsprechende Impedanz bestimmt:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{\hat{U} \cdot \sin(\omega t)}{\hat{I} \cdot \sin(\omega t + \varphi)}$$

Die Impedanz spiegelt Amplitudenverstärkung und Phasenverschiebung wider. Sie wird bei verschiedenen Frequenzen, ausgehend von mehreren Kilohertz bis hinab in den Millihertz-Bereich ermittelt, um so das Impedanzspektrum der Batterie zu erfassen. Abbildung 6 zeigt ein charakteristisches Impedanzspektrum einer Lithium-Ionen-Batterie, welches vom qualitativen Verlauf relativ unabhängig von Bauform und Kapazität der Batterie ist. Änderungen des Batterieverhaltens infolge der Temperatur (T), des Ladezustands (*State of Charge*, SOC) oder der Strombelastung ( $I_{dc}$ ) spiegeln sich in entsprechend veränderten Impedanzkurven wider (s.a. Kapitel 3.2).

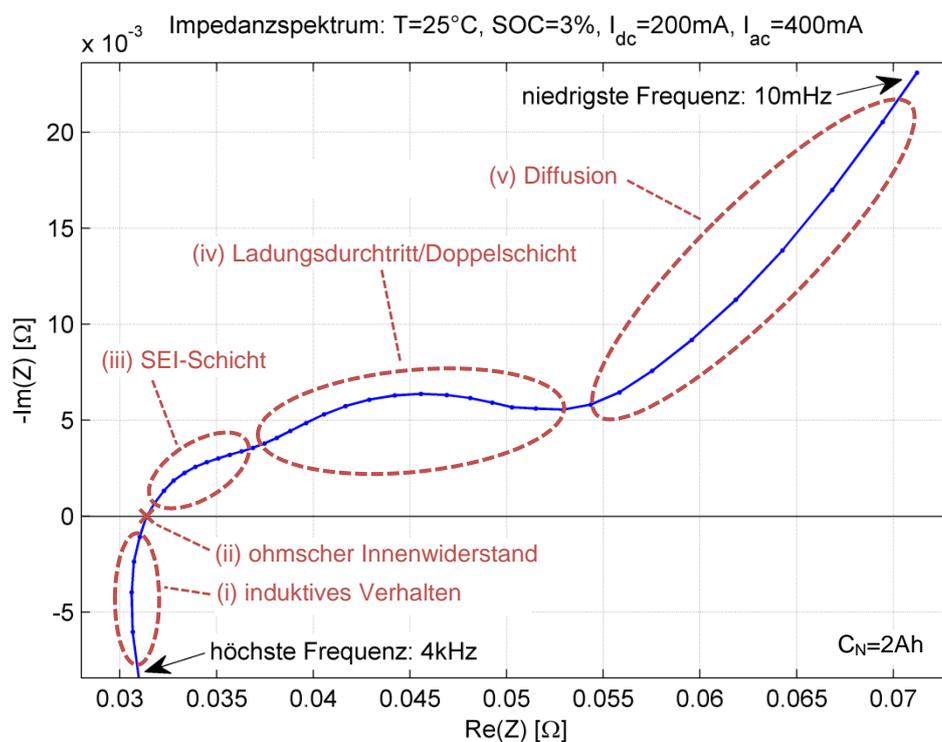


Abbildung 6: Charakteristische Bereiche im Impedanzspektrum einer Lithium-Ionen-Batterie

In dem oben gezeigten Spektrum (Abbildung 6) können die einzelnen physikalischen und elektrochemischen Effekte bei einer Lithium-Ionen-Batterie identifiziert werden. Der linke, vertikale Abschnitt im negativen Bereich (i) kennzeichnet induktives Verhalten bei hohen Frequenzen. Der Schnittpunkt der Kurve mit der x-Achse (ii) entspricht dem rein ohmschen Innenwiderstand der Batterie. Die Frequenz dieses Schnittpunkts liegt in der kHz-Größenordnung und kann je nach Zeldesign und verwendeten Elektrodenmaterialien stark variieren. Im Anschluss an den Innenwiderstand zeigt sich ein erster Kreisbogen (iii), der die Effekte der *Solid Electrolyte Interface* (SEI)-Passivierungsschicht an der Anode wiedergibt, gefolgt von einem zweiten Halbkreisbogen (iv), der die Auswirkungen von Ladungsdurchtritt und Doppelschichtkapazität darstellt. Im Bereich niedriger Frequenzen ist eine 45°-Halbgerade (v) erkennbar, die ein Kennzeichen für diffusives Verhalten darstellt. [3],[4]

### 3 Elektrische Batteriemodelle

Ziel der Modellierung ist es, eine möglichst effiziente Nachbildung des realen Systems zu erreichen, die alle relevanten Effekte ausreichend genau wiedergibt. Die in der Literatur bekannten Modellansätze lassen sich prinzipiell in drei Überkategorien einteilen:

#### 1. Mehrdimensionale physikalisch-chemisch motivierte Modelle

Bei dieser Modellart wird versucht, die Struktur der einzelnen Materialien im Inneren der Batterie möglichst genau nachzubilden und mittels mehrerer gekoppelter Differentialgleichungen Potential- und Diffusionsgradienten in verschiedenen Raumrichtungen möglichst genau wiederzugeben. Abbildung 7 zeigt, wie hierzu die porösen Elektrodenmaterialien beispielsweise mittels eines Kugelmodells nachgebildet werden. Für dieses werden in radialer Kugelrichtung und in die Dickenrichtungen  $\delta_{\pm}$  Konzentrations- und Potentialgradienten berechnet [6]. Die höchst aufwendigen Modellierungsansätze können in der Praxis ihr Potential nur selten ausspielen, da die zahlreichen Parameter, wie beispielsweise Diffusionskoeffizienten der einzelnen Materialien und deren Abhängigkeiten von Temperatur und Alterung extrem schwer zu ermitteln sind.

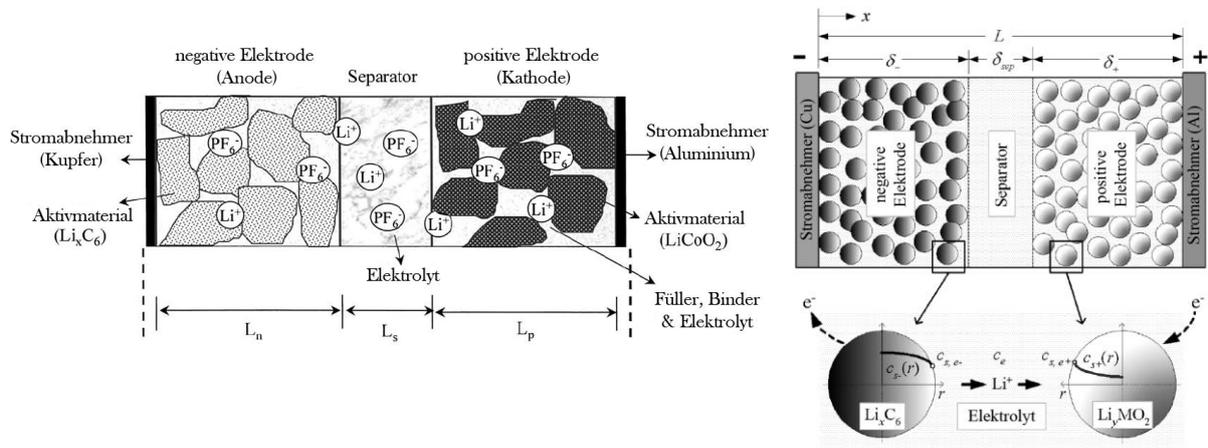


Abbildung 7: links: schematischer Aufbau der porösen Elektrodenmaterialien einer Li-Ion-Batterie nach [5] rechts: modelltechnische Nachbildung für mehrdimensionale Potentialgradienten nach [6]

#### 2. Elektrische Ersatzschaltkreise

Bei dieser Modellkategorie wird das elektrische Verhalten durch einfache Bauteile, wie Spannungsquellen, Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten nachgebildet. Vorteil dieser Modellierungsart ist ihre hohe Flexibilität. Diese ermöglicht eine einfache Anpassung der Modellkomplexität an die Anforderungen der jeweiligen Anwendung. Detaillierte Modelle erzielen eine präzise Nachbildung der einzelnen in Abschnitt 2.2 dargestellten elektrochemischen Effekte, während stark vereinfachte Modelle mit nur wenigen Widerständen und Kapazitäten zu einer äußerst schnellen Berechnung führen. Dies kann in komplexen Systemen, wie einer Gesamtfahrzeugsimulation oft wichtiger sein als die hochaufgelöste Nachbildung der Batteriedynamik.

#### 3. Mathematische Black-Box-Modelle

Hierunter fallen alle Ansätze an mathematischen Modellen, die sich nicht an den physikalisch-chemischen Funktionsprinzipien orientieren, sondern lediglich mathematische Ansätze darstellen, die Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen eines Batteriespeichers entsprechend empirischer Erkenntnissen geeignet miteinander verknüpfen. Hierunter fallen analytische Klemmenspannungsmodelle aber auch aufwendigere Ansätze wie stochastische Batteriemodelle, Neuronale Netze oder Fuzzy-Logic, denen anhand von aufgezeichneten Messdaten, Batterieverhaltensweisen antrainiert werden.

### 3.1 Batteriemodelle basierend auf elektrischen Ersatzschaltkreisen

Im Bereich des Ingenieurwesens werden bevorzugt Modelle der Kategorie „elektrische Ersatzschaltkreise“ verwendet. Bei diesen Batteriemodellen wird in der Regel eine Spannungsquelle, die die Ruhespannung der Batterie wiedergibt, mit Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten kombiniert, die zusätzlich das dynamische Batterieverhalten nachbilden. Die Ladezustandsänderung wird über eine Ladungsbilanzierung durchgeführt, bei der die fließenden Ströme über der Zeit auf-integriert werden. Abbildung 8 zeigt eine Auswahl verschieden komplexer Modelle, die sich deutlich hinsichtlich ihrer Genauigkeit und ihres Berechnungsaufwandes unterscheiden.

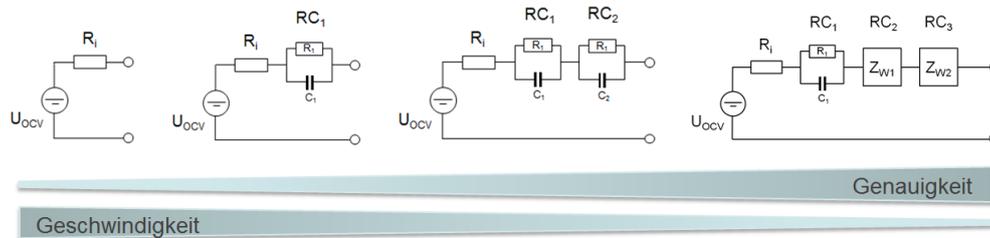


Abbildung 8: Übersicht über Modellvarianten mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad

Zur Nachbildung des dynamischen Verhaltens müssen meist nur wenige Standardelemente kombiniert werden. Abbildung 9 zeigt den Impedanzverlauf für die im Bereich der Batteriemodellierung gängigsten Elemente zum Aufbau der Ersatzschaltkreise wie Induktivitäten, Widerstände und Kapazitäten. Das RC-Glied besitzt als Sprungantwort ein exponentielles Verhalten (PT1-Glied). Die beiden Warburg-Impedanzen bilden endliche Diffusionsstrecken entsprechend der Fick'schen Gesetze nach. Sie unterscheiden sich in der Randbedingung am Ende der Diffusionsstrecke. Mit einem idealen Reservoir bleibt der Wert am Ende der Diffusionsstrecke stets konstant, bei einer undurchlässigen Wand werden alle zufließenden Ladungen innerhalb der Diffusionsstrecke gespeichert und beim Entladen wieder abgegeben. Wird die Ruhespannung der Batterie über eine ladezustandsabhängige Spannungsquelle realisiert, so findet die Warburg-Impedanz mit einem idealen Reservoir Verwendung, da nur hier die Diffusionsüberspannung des Warburg-Elements nach Ende des Stromflusses wieder vollständig abklingt.

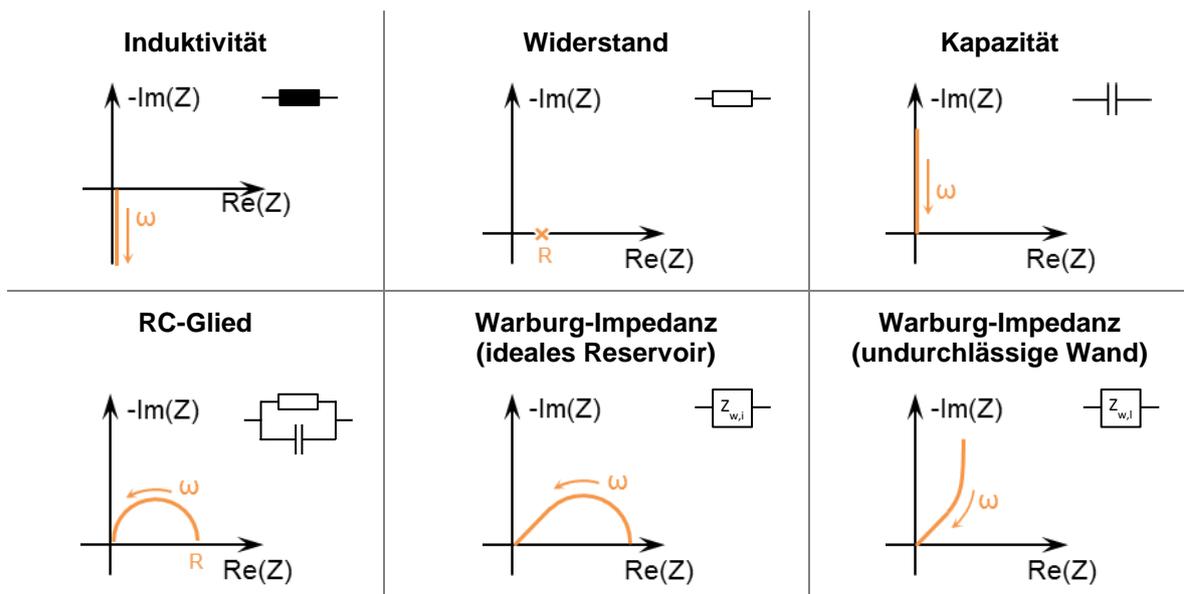


Abbildung 9: Impedanzverläufe verschiedener Standardelemente zum Aufbau von Batteriemodellen

Anhand der auftretenden Verluste an den Widerständen des Batteriemodells ( $P_v = R \cdot I^2$ ) lässt sich die in der Batterie entstehende Verlustwärme bestimmen. Dies kann für die Auslegung geeigneter Kühlsysteme genutzt werden.

### 3.2 Abhängigkeit der einzelnen Batterieeffekte von den Betriebsbedingungen

Nachdem die einzelnen Effekte durch geeignete Modellstrukturen mit der benötigten Genauigkeit nachgebildet sind, gilt es Abhängigkeiten der modellierten Effekte näher zu betrachten. Die Abhängigkeit der Batteriedynamik von Temperatur, Ladezustand und Stromstärke fällt grundsätzlich höchst nichtlinear aus.

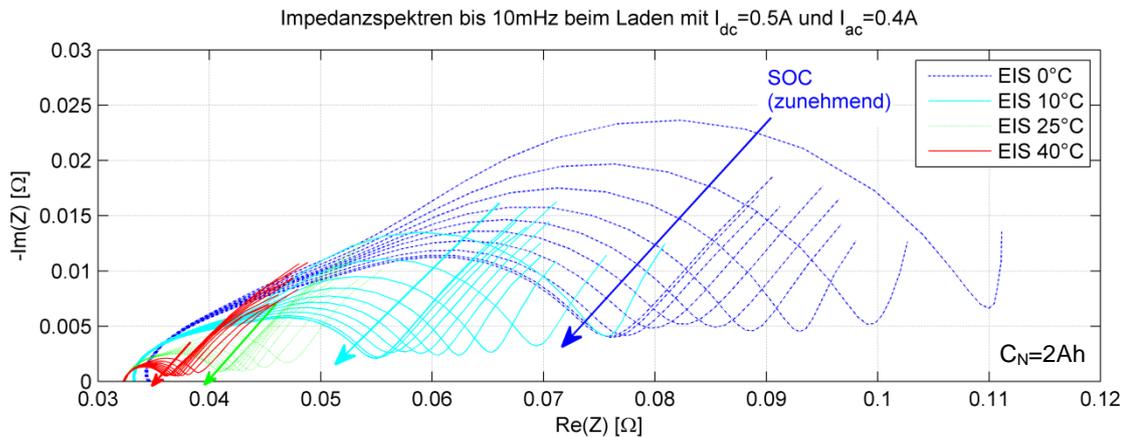


Abbildung 10: Abhängigkeit des dynamischen Batterieverhaltens von Temperatur und Ladezustand (SOC)

Abbildung 10 veranschaulicht, dass der ohmsche Innenwiderstand und der erste Kreisbogen (SEI-Schicht) keine Abhängigkeit vom Ladezustand zeigen und sich nur mit der Temperatur ändern. Bei niedrigeren Temperaturen steigen die Batteriewiderstände an. Der zweite Halbkreisbogen weist sehr deutliche Abhängigkeiten vom Ladezustand und der Temperatur auf. Bei niedrigen Ladezuständen fällt der Halbkreisbogen durchgehend größer aus als bei hohen Ladezuständen. Bei tiefen Temperaturen wächst der Halbkreisbogen deutlich an und auch die Ladezustandsabhängigkeit fällt noch deutlicher aus. Über die Diffusionsvorgänge lässt sich wenig aussagen, da die entsprechenden Geradenabschnitte im Impedanzspektrum bei Messungen bis 10 mHz nur sehr kurz ausfallen.

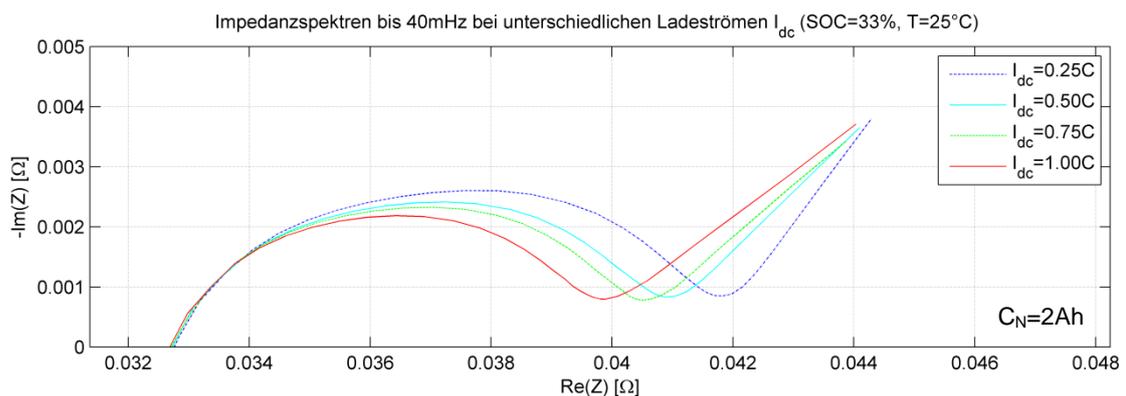


Abbildung 11: Abhängigkeit des Impedanzverlaufs von der Stromstärke des überlagerten Gleichstroms  $I_{dc}$

Der Einfluss der Stromstärke auf den Impedanzverlauf wird in Abbildung 10 deutlich. Innenwiderstand und erster Halbkreis zeigen keine Stromabhängigkeit. Auch bei dieser Gegenüberstellung verschiedener Impedanzspektren zeigen sich Unterschiede beim zweiten Halbkreisbogen für Ladungsdurchtritt und Doppelschicht. Es bestätigt sich der sogenannte *Butler-Volmer*-Zusammenhang [4], der besagt, dass bei kleineren Stromstärken die Widerstände höher ausfallen als bei größeren Strömen.

## 4 Modellparametrierung

Die einzelnen Komponenten der Ersatzschaltkreises müssen entsprechend der benötigten Temperatur-, Ladezustands- und Stromabhängigkeiten parametrierung werden.

Die Ruhespannungskennlinie wird in der Regel als ladezustandsabhängiges Tabellenwerk im Modell hinterlegt, aus dem die Ruhespannung entsprechend des aktuellen Ladezustands mittels Interpolation bestimmt wird. Die beiden möglichen Verfahren zur Bestimmung der Ruhespannungskennlinie wurden bereits in Kapitel 2.1 beschrieben.

Für die Parametrierung der dynamischen Batterieeffekte müssen ebenfalls geeignete Tabellenwerke oder Approximationsfunktionen (z.B. Polynome) ermittelt werden, die die relevanten Abhängigkeiten beinhalten. Zur deren Erfassung eignen sich je nach verfügbarer Messtechnik, maximaler Zeitdauer und Anforderungen an die Genauigkeit verschiedene Parametrierungsmethoden:

### 1. Impedanzspektroskopie

Die Erfassung der Batterieparameter mittels elektrischer Impedanzspektroskopie (vgl. Kapitel 2.2) stellt die aufwendigste Parametrierungsvariante dar, da die Messungen vergleichsweise lange dauern und die Messtechnik teuer ist. Sie eignet sich insbesondere zur Erfassung der hochdynamischen Vorgänge im Bereich der SEI-Passivierungsschicht sowie des Ladungsdurchtritts und der Doppelschichtkapazität. Diffusionseffekte lassen sich mit dieser Messmethode aufgrund der benötigten tiefen Frequenzen unterhalb von 1 mHz und der damit verbundenen enormen Zeitdauer nur schwer erfassen.

### 2. Parametrierung mittels Strompulsen

Die zweite gängige Variante zur Parametrierung der Batteriedynamik ist die Auswertung der Spannungsantworten infolge von Strompulsen. Aus dem Aufklingen und Abklingen der Überspannungen infolge der verschiedenen dynamischen Effekte lassen sich die entsprechenden Widerstandswerte und Zeitkonstanten der RC-Glieder bestimmen. Dies funktioniert prinzipiell bei hohen wie auch bei niedrigen Frequenzen. Lediglich bei den Effekten mit sehr kurzen Zeitkonstanten (beispielsweise SEI-Schicht) treten Limitierungen auf, wenn die Messtechnik die Spannungsantwort nicht mit einer ausreichend hohen Samplingrate im Kilohertz-Bereich aufzeichnen kann. Abbildung 12 zeigt einen Ausschnitt des Strom- und Spannungsverlaufs einer solchen Parametrierungsmessreihe, bei der die Pulsdauern im zweistelligen Sekundenbereich liegen. Die Ruhepausen zwischen einzelnen Strompulsen besitzen meist eine Dauer von mehreren Minuten bis hin zu einer Stunde.

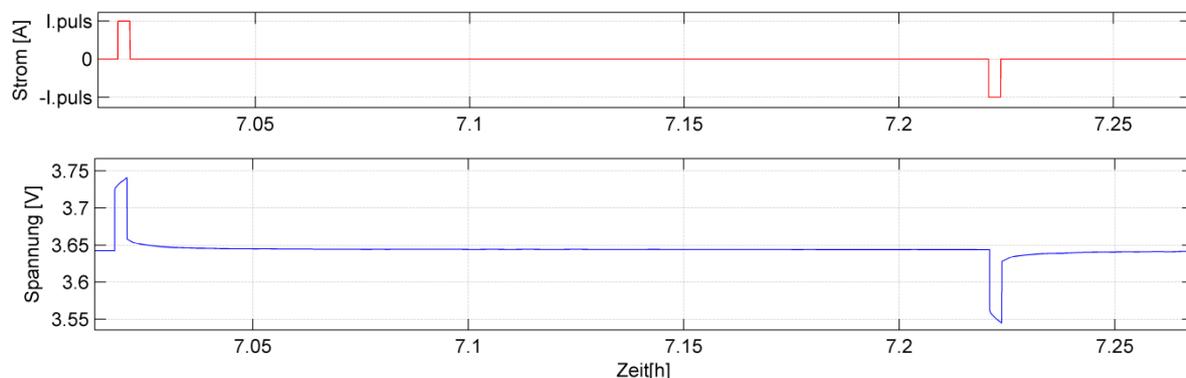


Abbildung 12: Auszug aus einer Messreihe zur Parametrierung mittels Strompulsen

Die Strompulse werden dann, ebenso wie die Impedanzspektroskopie, bei unterschiedlichen Ladezuständen, Temperaturen und Stromstärken durchlaufen, um die relevanten Abhängigkeiten erfassen zu können.

Bei beiden vorgestellten Parametrierungsmethoden erfolgt die eigentliche Identifikation der Modellparameter durch einen Optimierungsprozess. Hierbei wird ein nichtlinearer Optimierungsalgorithmus eingesetzt. Ausgehend von einem Satz an Startwerten werden die Parameter solange variiert, bis das Ergebnis des Simulationsmodells bestmöglich mit den realen Messdaten übereinstimmt.

Beim Einsatz von MATLAB bietet sich hierzu die `lsqnonlin`-Funktion an, die sowohl anhand analytischer Modelle als auch mittels Simulink-Modellen eine Parameteridentifikation durchführen kann. Gut gewählte Startwerte und normierte Parametrierungsvariablen in ähnlichen Größenordnungen sind bei den meisten Optimierungsverfahren entscheidend dafür, dass auch wirklich die bestmögliche Lösung gefunden wird und nicht nur ein lokales Nebenoptimum erreicht wird.

### 3. Konstantstromkurven

Eine einfache Methode zur Parametrierung von Batteriemodellen, bei denen es nicht auf höchste Genauigkeit ankommt, ist die Verwendung von Konstantstromkurven. Teilt man die Spannungsdifferenz zwischen der Lade- und Entladekurve gleicher Stromstärke durch das Doppelte des Strombetrags, so ergibt sich der Gesamtwiderstand in Abhängigkeit des Ladezustands. Der Gesamtwiderstand stellt die Summe aller Einzelwiderstände von SEI-Schicht, Ladungsdurchtritt und Diffusion im eingeschwungenen Zustand dar. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse einer solchen Auswertung. Führt man diese für verschiedene Stromstärken durch, erhält man auch hier die in Kapitel 3.2 erwähnte Butler-Volmer-Charakteristik.

Diese Parametrierungsmethode ist außerdem die einzig mögliche, wenn zu einer Batterie nur die Lade- und Entladekurven des Herstellerdatenblatts vorliegen und keine eigenen Messungen durchgeführt werden können. Liegen im Datenblatt nur Entladekurven vor, so müssen aus der Differenz verschiedener Entladekurven entsprechende Widerstände abgeschätzt werden.

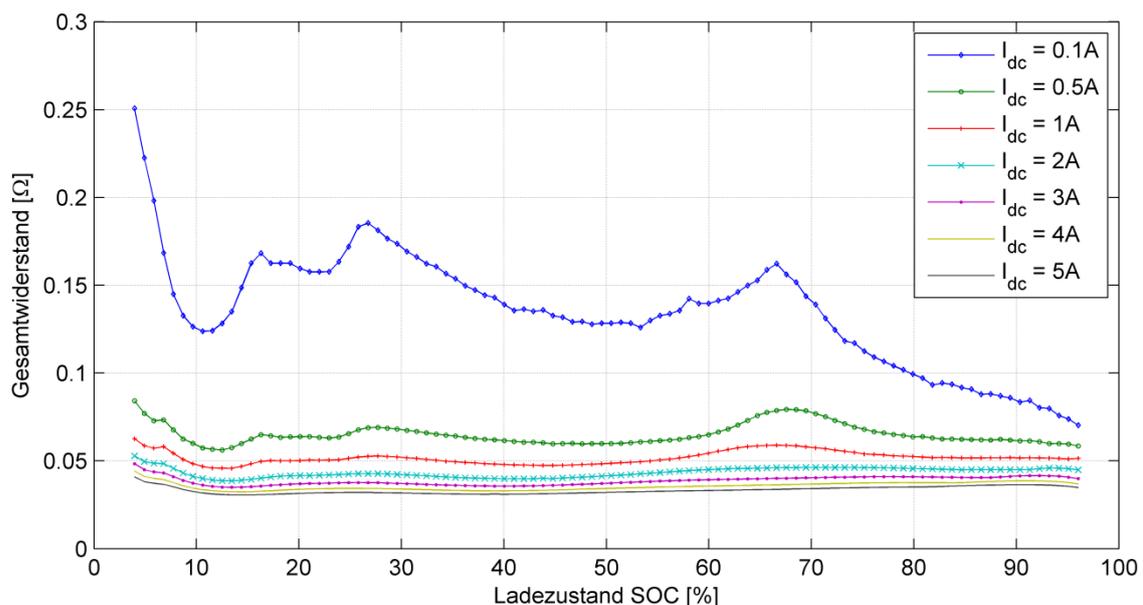


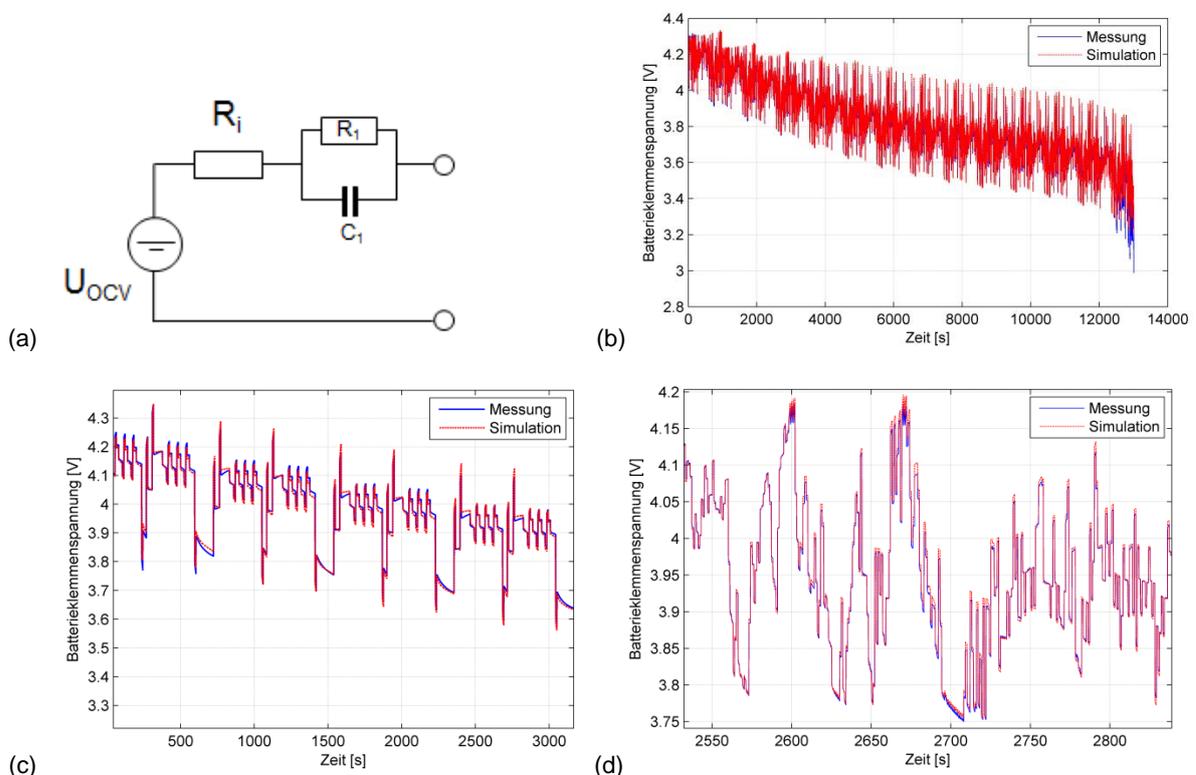
Abbildung 13: Gesamtwiderstandsverläufe bei verschiedenen Stromstärken  $I_{dc}$ , berechnet aus dem jeweiligen Paar aus Konstantstrom-Ladekurve und -Entladekurve bei Raumtemperatur

## 5 Validierung

Zur Validierung der Batteriemodelle werden Ergebnisse der Batteriesimulation mit realen Messdaten verglichen. Hierbei müssen andere Datensätze verwendet werden als zur Parametrierung eingesetzt wurden.

Im folgenden Beispiel wird ein Modell betrachtet, das sich aus einer ladezustandsabhängigen Spannungsquelle, einem Widerstand und einem RC-Glied zusammensetzt (Abbildung 14a). Die Parametrierung erfolgte mittels Konstantstromkurven zur Bestimmung der Gesamtwiderstände und Strompulsen zur Parametrierung des RC-Glieds, das hauptsächlich Diffusionseffekte wiedergibt. Die Parameter wurden dabei stromabhängig in Wertetabellen abgelegt. Die Ladezustands- und Temperaturabhängigkeit der Parameter konnte bei der hier betrachteten Anwendung vernachlässigt werden.

Mit diesem Modell wurde ein Fahrzyklusprofil durchlaufen (Abbildung 14b und d) sowie ein synthetisches Lastprofil, das einer Norm zur Vermessung Batteriespeichern für Elektrofahrzeuge abgeleitet ist (Abbildung 14c). Es zeigen sich durchgehend sehr gute Übereinstimmungen zwischen den gemessenen und simulierten Spannungsverläufen. Auch die Gesamtreichweite stimmt gut überein (siehe Abbildung 14b). Trotz des vergleichsweise einfach aufgebauten und parametrierten Batteriemodells bleibt der durchschnittliche Fehler unterhalb von 2% bezogen auf den Arbeitshub der Batteriespannung von 1,3 V, der rund einem Drittel der Gesamtbatteriespannung von 4,2 V entspricht. Lediglich im Bereich sehr niedriger Ladezustände (SOC < 5%) treten Spannungsabweichungen bis zu 10% auf. Diese lassen sich aber bei Bedarf durch eine ladezustandsabhängige Parametrierung problemlos verringern.



**Abbildung 14: Vorstellung einer Validierungsbeispiels: (a) verwendetes Batteriemodell (b) Spannungsverlauf infolge eines Lastprofils entsprechend eines PKW-Fahrzyklus (c) Ausschnitt aus einem synthetischen Lastprofil für Elektrofahrzeugbatterien (d) Ausschnitt aus der Fahrzyklus-Simulation aus Abbildung (b)**

Das gezeigte Modell ist somit für den hier betrachteten Anwendungszweck gut geeignet. Abweichungen treten hauptsächlich im Bereich des sehr hochfrequenten Verhaltens auf, da dieses nicht durch zusätzliche RC-Glieder nachgebildet wurde. Zu beachten ist, dass die gezeigten hohen Genauigkeiten nur solange erzielt werden können, solange sich die Zelle in ihren Eigenschaften nicht nennenswert verändert. Altert die Batterie, so ist eine entsprechende Anpassung der Parameter notwendig.

## 6 Ausblick

Die vorgestellten elektrischen Modelle lassen sich äußerst flexibel für eine Vielzahl von Simulationsanwendungen einsetzen und können so die Prozesse im Bereich der Batteriespeicherentwicklung sinnvoll unterstützen. Um mithilfe der Simulation noch genauere Aussagen zu ganzen Batteriesystemen treffen zu können, werden die elektrischen Modellansätze mit thermischen Batteriemodellen und Alterungsmodellen gekoppelt. Mehrdimensionale thermische Modelle, basierend auf der Finite Differenzen- oder Finite-Elemente-Methode dienen dazu, Wechselwirkungen zwischen Batterietemperaturen und elektrischem Verhalten genauer nachzubilden. Dies hilft beispielsweise dabei, Kühlsysteme besser abzustimmen und die Betriebsstrategien der Batteriespeicher effizienter zu gestalten. Eine homogenere Temperaturverteilung innerhalb eines Batteriepacks fördert zudem die gleichmäßige Alterung der verbauten Einzelzellen. Mit zunehmender Alterung nimmt die Kapazität der Batterien ab und erhöhen sich die Widerstände. Alterungsmodelle, die meist aus empirischen Alterungsuntersuchungen abgeleitet werden, sorgen dafür, dass die Batteriesimulation für unterschiedlich stark gealterte Batterien aussagekräftige Ergebnisse liefern kann.

## Quellenverzeichnis

- [1] Dokumentation zum Elektrofahrzeug MUTE der TU München: [www.mute-automobile.de](http://www.mute-automobile.de)
- [2] Buller, S.: Impedance-Based Simulation Models for Energy Storage Devices in Advanced Automotive Power Systems, Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2003
- [3] Gerschler, J. B. et. al.: High-spatial impedance-based modeling of electrical and thermal behavior of lithium-ion batteries, Electric Vehicle Symposium 23, Anaheim, 2007
- [4] Jossen, A.; Weydanz, W.: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Ubooks, Neusäß, 2006
- [5] Gomadam, P. M. et al.: Mathematical modeling of lithium-ion and nickel battery systems, in: Journal of Power Sources 110 (2002), S. 267-284
- [6] Smith, K.: Control oriented 1D electrochemical model of lithium ion battery, in: Energy Conversion and Management 48 (2007), S. 2565-2578/