

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung
des Grades eines Diplom Ingenieurs
der technischen Wissenschaften

über das Thema

Energiespeicher und deren Alterung am Beispiel von Lithium Ionen Akkumulatoren

Eingereicht bei:

O.UNIV.PROF. DR.-ING. GÜNTHER BRAUNER
Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Technische Universität Wien

Eingereicht von:

BAKK.TECHN. ANDREAS BAUER
Matr.-Nr. 0426073
Larnhaus 7, 4300 St.Valentin

Wien, am 20. Mai 2010

Danksagung

Als erstes bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung dieses Studium überhaupt erst ermöglicht haben. Weiters bedanke ich mich bei meinen Freunden und Mitbewohnern, mit denen ich während meines Studiums eine sehr schöne und aufregende Zeit verbracht habe. Zum Schluss bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft für das sehr gute Arbeitsklima und bei Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. Christoph Groß, der mir mit kritischen Fragen und guten Ideen zur Seite stand und jetzt womöglich ein paar graue Haare mehr hat.

Kurzfassung

Die Thematik der elektrischen Energiespeicher ist aktuell von wesentlicher Bedeutung. Einerseits fordert der immer höher werdende Anteil regenerativer Erzeugungsanlagen, aufgrund der hohen Erzeugungsschwankungen, Möglichkeiten zur Energiespeicherung. Andererseits wird durch die Automobilbranche und dem Übergang hin zu Elektrofahrzeugen die Speicherthematik in den Vordergrund gerückt. In diesem Zusammenhang spielt die Lebensdauer der Batterie eine große Rolle, da die Herstellung dieser Speicher zurzeit mit sehr hohen Kosten verbunden ist.

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über vorhandene Speichertechnologien und behandelt die Implementierung einer konkreten Speicherart in MATLAB Simulink. Mit diesem Modell werden verschiedene Alterungseffekte aufgezeigt, die bei ähnlichen Speichern auftreten. Ausgehend von Funktionen die ein Allgemeiner Energiespeicher hat, wird ein Batteriemodell abgeleitet und dieses mit einem Alterungsmodell erweitert. Da die zur Verfügung stehenden Alterungsdaten zyklusbasiert sind, berechnet das Modell die Alterung der Batterie indem es für jeden geleisteten Zyklus einen Alterungswert ermittelt und diesen zum aktuellen Alter addiert. Dieser Wert ist von der Stromstärke, dem Ladestand und der während des Zyklus transportierten Ladungsmenge abhängig. Einflüsse durch eine Temperaturerhöhung aufgrund des Betriebs der Batterie werden nicht simuliert. Unabhängig von der Belastung existiert eine Alterung, die linear von der Zeit abhängt und so die maximale Lebensdauer festlegt. Das Modell wird so ausgelegt, dass eine Änderung aller Parameter möglich ist. Die Simulation wird mit synthetischen Belastungsprofilen durchgeführt, um Aussagen über eine lebensdauerfreundliche Benutzung zu erhalten. Desweiteren wird die Auswirkung einer Überdimensionierung des Energiespeichers anhand dieses Modells behandelt.

Es stellt sich heraus, dass sich eine Überdimensionierung des Energiespeichers überproportional auf die Lebensdauer und somit auf den maximal möglichen Energiedurchsatz auswirkt. Bei einem zu hohen Überdimensionierungsgrad sinkt der Zugewinn an Lebenszeit, da sich bei langen Lebenszeiten der Einfluss der belastungsunabhängigen Alterung stark auswirkt und die maximale Lebenszeit nicht überschritten werden kann.

Abstract

Today more and more energy storage systems are used in combination with renewable energy systems to stabilize the energy production and in electric vehicles. In this connection the battery life is currently of great importance, since the production process of batteries is currently connected with very high costs.

This paper gives an overview of the existing storage technologies and covers the creation of an aging model for lithium ion batteries, which is implemented in MATLAB Simulink. With this model different aging-effects are shown. Based on the functions of a general energy storage system, a battery model is derived and is expanded with an aging model. Because the available aging data is based on cyclic measurements, the model calculates for each cycle a value which represents the aging of the battery during this cycle. This value depends on the current, the charge status and the amount of charge transported during the cycle. At the end of one cycle it is added to the existing age. Impacts depending on an increase in temperature based on the operation of the battery are not simulated. There is also an aging-process implemented which only depends on time, this one defines the maximum lifetime of the system. The model designed so that a change of all parameters is possible. Synthetic and real measured load profiles are applied to the model to find out what applications are lifetime-friendly. Furthermore, the model is used to find out if it is worth to oversize the battery.

It turns out that using a battery which has a higher storage capacity than actually needed has an disproportionately positive impact on the lifetime and the maximum possible energy throughput per installed storage capacity. Because there is a maximum lifetime a too high amount of storage capacity lowers the maximum energy throughput per installed storage capacity.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Energiespeicher	2
2.1	Kondensator	5
2.2	Supraleitender Magnetischer Energiespeicher	6
2.3	Schwungrad	7
2.4	Druckluftspeicher	9
2.5	Pumpspeicherkraftwerk	10
2.6	Blei Säure Batterie	11
2.7	Nickel-Metallhydrid Akkumulator	13
2.8	Li Ionen Akkumulator	15
2.9	NaS Batterie	16
2.10	ZEBRA	17
2.11	Vanadium-Redox Flow-Batterie	18
3	Modellierung	20
3.1	Allgemeiner Energiespeicher	22
3.1.1	Begrenzungen	22
3.1.2	Wirkungsgrade	23
3.1.3	Selbstentladung	24
3.2	Batteriemodell	26
3.3	Alterung beim Lithium Ionen Modell	31
3.3.1	Prinzip	31
3.3.2	Teilzyklen	32

3.3.3	Erweiterung: Ladestandsabhängigkeit	33
3.3.4	Erweiterung: Stromabhängigkeit	35
3.3.5	Erweiterung: Kalendarische Alterung	37
3.3.6	Implementierung in Matlab	37
4	Verifizierung des Lithium Ionen Modells	40
4.1	Verifizierung des Batteriemodells	40
4.2	Verifizierung des Alterungsmodells	47
4.3	Verifizierung des gesamten Modells	55
4.3.1	Sprung der Eingangsgröße	56
4.3.2	Reaktion auf nicht erlaubte Zustände	58
4.3.3	Alterung nach 3000 Zyklen	60
4.3.4	Unerwünschte Modelleffekte	61
5	Lebensdauer Simulationen mit dem Lithium Ionen Modell	67
5.1	Zyklen unterschiedlicher Leistung	67
5.2	Auswirkungen einer Überdimensionierung des Batteriespeichers	69
5.3	Elektroauto	74
6	Schlussfolgerung	76
	Abbildungsverzeichnis	78
	Literaturverzeichnis	81
A	Matlab C Datei Alterung	87
B	MATLAB Simulink Modell	89

C	Zyklen(DOD) u. IFaktor(I)	95
D	Simulationsergebnisse 1	96
E	Simulationsergebnisse 2	97
F	Simulationsergebnisse 3	98

1 Einleitung

Je größer der Anteil an erneuerbaren Energiequellen im Erzeugungsmix wird, desto fluktuierender wird die bereitgestellte Energie, da die Einspeiseleistungen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen einen starken Wechsel, in Abhängigkeit von der aktuellen Wettersituation, unterliegen. Besonders akut wird dieses Problem bei kleinen dezentralen Inselnetzen, die eventuell gar nicht an ein Versorgungsnetz angeschlossen sind und somit selbst ihren Energiehaushalt decken müssen. Sind in einer Region viele gleichartige Energiequellen an das Netz angeschlossen, kann dies bei Schwankungen der Erzeugungsleistung zu einer großen Belastung für die Übertragungsnetzte werden, wenn diese unvorhersehbare zusätzliche Leistung regional nicht benötigt wird.

Eine Möglichkeit die starken Schwankungen der erzeugten Leistung zu kompensieren, ist der Einsatz von Energiespeicher. Sie bieten die Möglichkeit je nach Bedarf Energie aufzunehmen oder abzugeben. Dadurch können Erzeugungs- und Lastspitzen abgefangen und Energieströme beeinflusst werden.

Ein heute immer wichtig werdender Aspekt ist der Einsatz von Energiespeichern in Elektrofahrzeugen. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Lebensdauer der Batterie aktuell von großer Bedeutung, da die Batterie zurzeit einen großen Teil der Herstellungskosten verursacht.

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es einerseits einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Speichertechnologien zu geben und andererseits ein Alterungs Modell für eine spezielle Speichertechnologie zu erstellen und dieses mit geeigneten Belastungsprofilen zu beaufschlagen um Aussagen über eine lebensdauerfördernde Einsatzweise zu erhalten.

2 Energiespeicher

Energiespeicher sind überall dort notwendig, wo eine erzeugte Leistung nicht unmittelbar verbraucht wird, sondern zu einem späteren Zeitpunkt benötigt wird. Da sehr viele verschiedene Technologien zur Energiespeicherung existieren, werden hier nur jene behandelt, die zur Speicherung elektrischer Energie eingesetzt werden. Auf die Möglichkeit der Speicherung von Energie in Wärmespeichern, wird an dieser Stelle hingewiesen, da sie in Folge nicht behandelt werden. Bei den meisten in dieser Arbeit vorkommenden Speichern existiert eine Vielzahl von Subtypen, die jeweils nur sehr spezielle Anwendungsgebiete haben. Dadurch entsteht eine große Vielfalt der Eigenschaften innerhalb einer Speichertechnologie. Um trotzdem die Besonderheiten einer Technologie herauszuarbeiten, werden die Subtypen oft nur erwähnt, und ein besonderer Fokus auf die eingesetzten, beziehungsweise auf mögliche zukünftige, Technologien gelegt.

Mit elektrischen Energiespeichern verbindet man heutzutage automatisch die zwei Begriffe Batterie und Akkumulator, welche beide elektrochemische Speicher beschreiben. Das Wort Akkumulator stammt vom lateinischen Wort *accumulare*, welches so viel wie anhäufen oder sammeln bedeutet. Ebenfalls aus dem Lateinischen kommt das Wort Batterie, welches in ihrer ursprünglichen Form vom Verb *battuere* stammt, dieses so viel wie schlagen bedeutet. Eine Abwandlung dieses Wortes wurde für die Bezeichnung von gleichartigen militärischen Einheiten verwendet. Da eine elektrochemische Batterie in der Regel aus mehreren gleichen Zellen aufgebaut ist, wurde dem Wort Batterie auch diese Bedeutung hinzugefügt. In dieser Arbeit werden die zwei Begriffe Akkumulator und Batterie völlig gleichwertig verwendet und stehen für eine wiederaufladbare Batterie, eine sogenannte sekundär Batterie.

In Folge werden einige Begriffe definiert, die in dem Kapitel von Bedeutung sind. Unter einem Zyklus versteht man in Bezug auf Akkumulatoren ein definiertes Laden und anschließendes Entladen des Akkumulators. Im einfachsten Fall kann ein Zyklus durch jeweils zwei Werte des SOC (state of charge) definiert werden.

Die in dieser Arbeit verwendete Definition für den Ladezustand (SOC) folgt der DIN 40 729, wo festgelegt wird: "Der Ladezustand ist definiert als das Verhältnis einer aktuellen gespeicherten Elektrizitätsmenge zu einer zugeordneten

n-stündigen Kapazität einer Batterie“[DIN85, S.9]

$$SOC = \frac{\text{verfügbare Ladung}}{\text{Nennladung}} * 100 \quad (1)$$

Wobei hier anzumerken ist, dass der Begriff Kapazität bei elektrochemischen Energiespeicher für eine Ladungsmenge (meist in Ah) steht. Die zugeordnete n-stündige Kapazität wird in Folge als Nennkapazität bezeichnet, und beschreibt jene Ladungsmenge die unter gewissen Bedingungen dem vorher aufgeladenen Speicher entnommen werden kann. Oft wird anstatt eines Ladezustands (SOC) eine Entladetiefe (DOD) angegeben. Der Wert des DOD (Depth of Discharge) berechnet sich aus $SOC + DOD = 100$ Prozent.

Bei Batterien ist die **entnehmbare Ladung** im Allgemeinen auch **vom Entladestrom abhängig** (siehe Kapitel 2.6, Peukert Effekt). Daraus ergibt sich dasselbe Problem wie bei einer Tankanzeige bei einem Auto. Aus dem aktuellen Stand kann nicht geschlossen werden ob ein Ziel erreicht werden kann, wenn die Geschwindigkeit nicht bekannt ist, mit der die Strecke bis zum Ziel bewältigt werden soll, da diese den Wirkungsgrad bestimmt. Zu beachten ist, dass der SOC eigentlich nicht direkt mit einer Energiemenge zusammenhängt, da sich die Spannung mit der entnommenen Ladung ändert, trotzdem wird dies in erster Näherung angenommen, da sich die Spannung in weiten Betriebsbereichen nicht dramatisch ändert, und dort wo dies der Fall ist, werden nur mehr kleine Ladungsmengen ausgetauscht.

Des Weiteren sei hier angemerkt, dass aus dem SOC nur geschlossen werden kann wieviel Ladung noch entnommen werden kann, nicht aber mit wieviel Ladung der Speicher noch geladen werden kann. Dies ist dadurch zu begründen, dass die aktuelle Kapazität des Speichers in der Definition laut obiger DIN nicht vorkommt, sondern die Nennkapazität. Die aktuelle Kapazität ist in der Regel kleiner als die Nennkapazität und wird zum Beispiel durch Alterungseffekte oder durch die Temperatur beeinflusst. Die Nennkapazität wird mit NC abgekürzt.

Die Lebensdauer einer Batterie wird meist mit Hilfe der Zyklenfestigkeit angegeben. Unter dieser versteht man jene Anzahl von Zyklen, ab der die Kapazität der Batterie nur mehr 80 Prozent der Nennkapazität beträgt. Die Definition, mit welchen Zyklen (bis zu welchem SOC auf- bzw. entladen wird) die Batterie beaufschlagt wird ist aber entscheidend, ebenso Nebenbedingungen, wie

zB. die Temperatur der Zellen, sind relevant und es besteht die Gefahr, dass Werte mit unterschiedlichen Ausgangssituationen verglichen werden.

Bei Batterien werden Ströme in der Regel nicht in Ampere angegeben, sondern in sogenannten C Werten (auch C Rate). Ein Strom von einem C würde bedeuten, dass ein idealer Akkumulator in einer Stunde entladen ist. Somit würde der Strom in Ampere zahlenmäßig gleich der Nennkapazität in Ah sein. Daher folgt der Zahl auch der Buchstabe C oder K, der für Capacity oder Kapazität steht. Ist der Entladestrom doppelt so groß, spricht man von einem Entladestrom von 2 C. Bei Strömen ab 1 C spricht man von Hochstromentladung.

2.1 Kondensator

Die Energiespeicherung in sogenannten Doppelschichtkondensatoren EDLC (electrochemical double layer capacitor) ermöglicht höhere Energiedichten als in herkömmlichen Elektrolytkondensatoren, trotzdem werden nur ca. 5Wh/kg erreicht[WIM09a]. Die Energiespeicherung erfolgt elektrostatisch an den Grenzflächen zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten in der sogenannten Helmholtzschicht. Bekannt sind diese Kondensatoren unter ihren Vertriebsnamen wie: Supercap, Goldcap, Ultracap usw.

EDLCs eignen sich besonders für Anwendungen mit einer hohen Zyklenzahl, geringer Energie und einer großen Leistung, was einer sehr kurzen Entladezeit entspricht. Da keine chemischen Vorgänge beim Laden oder Entladen ablaufen, ist die Lade und Entladezeit gleich groß und im Wesentlichen durch den Innenwiderstand der Kondensatoren begrenzt, welcher ca. 12mΩ für einen 100 Farad Kondensator mit einer Nennspannung von 2,5V ist [WIM09a]. Als Langzeitspeicher sind sie weniger geeignet als herkömmliche Batterien, da sie eine relativ hohe Selbstentladungsrate von 25 Prozent pro Monat besitzen [BOD05] (eine Bleibatterie hat ca. 5 Prozent/Monat[WIK09a]). Die Kondensatoren besitzen eine Lebensdauer von ca. 10 Jahren, die nicht nur stark temperaturabhängig ist, sondern auch von der im Betrieb auftretenden Spannung beeinflusst wird[WIM09b]. Wie bei den meisten Batterien ist, um eine lange Lebensdauer im Betrieb zu gewährleisten, bei Serienschaltung mehrerer Kondensatoren eine Überladungsschutzbeschaltung für jeden einzelnen Kondensator vorzusehen. Im Vergleich zu anderen Speichertechnologien sind die Kondensatoren in der Anschaffung mit ca. 26000 Euro/kWh sehr teuer (z.B: Blei-Akkumulator <200 Euro/kWh) [HUT08, S.35 u. 51].

Die im Kondensator gespeicherte Energie berechnet sich wie folgt:

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (2)$$

Aus obiger Gleichung ist zu erkennen, dass es für die gespeicherte Energiemenge keinen Unterschied macht, ob eine Serienschaltung oder eine Parallelschaltung der Kondensatoren vorliegt, solange die Spannung an den einzelnen Kondensatoren gleich ist.

2.2 Supraleitender Magnetischer Energiespeicher

Bei supraleitenden magnetischen Energiespeicher (SMES) wird die Energie im Magnetfeld, einer mit Gleichstrom durchflossenen supraleitenden Spule, gespeichert. Dazu muss die Spule unter ihre kritische Temperatur abgekühlt werden um supraleitend zu werden. Der ohmsche Widerstand der kurzgeschlossenen Spule geht gegen Null und der Strom kann beliebig lange ohne Verluste im Kreis fließen. Dazu wird zuerst ein Teilstück der supraleitenden Spule über ihre kritische Temperatur erhitzt, dadurch steigt der Widerstand in diesem Teilstück. Die zuerst kurzgeschlossene Spule ist jetzt offen und es kann mit Hilfe eines von außen eingeprägten Stroms der Speicher geladen werden. Ist die gewünschte Energiemenge gespeichert (ist die Stromstärke durch die Spule genügend groß), erfolgt eine Abkühlung des vorher erhitzten Teilstücks. Dadurch wird es wieder supraleitend. Der Strom kann in der kurzgeschlossenen Spule im Kreis fließen und dadurch das Magnetfeld beliebig lange aufrecht erhalten. Die Speicherung an sich ist sehr effizient, nennenswerte Verluste treten nur beim Laden und Entladen auf, da aber die Spule auf eine sehr tiefe Temperaturen gekühlt werden muss, werden SMES vorwiegend als Kurzzeitspeicher eingesetzt. Bei der Verwendung von sogenannten Tieftemperatursupraleitern ist zur Kühlung flüssiges Helium notwendig, was sich negativ auf den sonst sehr guten Wirkungsgrad von ca. 95 Prozent (ohne Kühlung und ohne Umrichter) auswirkt. Da bei der SMES Technologie keine beweglichen Teile eingesetzt werden, ergibt sich ein zuverlässiges Speichersystem.[WIK09b] [WIK09c] [WIK09d]

Die in der Spule gespeicherte Energie berechnet sich zu:

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (3)$$

Wobei L für die Induktivität in Henry und I für den Strom durch diese in Ampere steht. Diese Energie kann sehr schnell aus dem Speicher entnommen werden und ebenso schnell diesem wieder zugeführt werden (im Bereich von Hundertstel Sekunden). Aufgrund der hohen Investitionskosten von ca. 43000 Euro/kWh [HUT08, S.51] und des zur Kühlung benötigten Kühlmittels (Heliums) werden diese Speicher meist dort verwendet, wo eine sehr kleine Netzspannungsabweichung eine große Auswirkung hat, wie zum Beispiel bei der Herstellung von Halbleiter.

2.3 Schwungrad

Schwungradspeicher wandeln während des Ladevorgangs die elektrische Energie in Rotationsenergie um, und während des Entladevorgangs wird die gespeicherte Energie wieder zurückgewandelt.

Schwungräder werden aber nicht nur zur Energiespeicherung verwendet, sondern auch um Drehmomentenstöße auf einer Welle abzufangen, mit dem Ziel einer gleichmäßigeren Umdrehungszahl dieser zu erreichen (z.B.: Töpferscheibe). Umgekehrt kann ein Schwungrad auch dazu verwendet werden um Leistungsspitzen zu erzeugen, und zwar indem zuerst über einen längeren Zeitraum mit relativ kleiner Leistung das Schwungrad „aufgeladen“ (Umdrehungsfrequenz gesteigert) wird, und bei Bedarf eine sehr große Leistung für eine kurze Zeit entnommen wird.

In den 1950er Jahren wurde von der schweizer Maschinenfabrik Oerlikon MFO sogenannte Gyrobusse (und auch Gyrolokomotiven) hergestellt, die auch im Linienverkehr eingesetzt wurden. In diesen Fahrzeugen wurden Schwungräder als Energiespeicher eingebaut, die an elektrischen Ladestationen aufgeladen werden konnten. Sie setzten sich aber aufgrund zahlreicher technischer Probleme nicht durch.[WIK09e]

In den aktuellen Schwungradspeichern dreht sich in einem Vakuum ein permanent erregter Synchronmotor/generator oder ein Reluktanzmotor/generator der magnetisch gelagert ist (meist aktiv) und über einen Umrichter ans Netz angeschlossen ist. Vorallem die Entwicklung von Kohlefaser verstärktem Kunststoff, der reißfester als der früher verwendete Stahl ist, erlaubt höhere Drehzahlen und damit höhere Energiedichten und hat wieder neue Impulse in der Entwicklung der Schwungräder ausgelöst.

Die in einer rotierenden Masse gespeicherte Energie ist wie folgt gegeben:

$$W = \frac{J\omega^2}{2} \quad (4)$$

Wobei J das Trägheitsmoment der Masse ist und ω für die Winkelgeschwindigkeit in Radian pro Sekunde steht.

Das Trägheitsmoment eines um seine Symmetrieachse rotierenden Vollzylinders ergibt sich zu:

$$J = \frac{mr^2}{2} \quad (5)$$

Wobei m die Masse und r der Radius des Vollzylinders ist.

In Gleichung (5) eingesetzt ergibt sich:

$$W = \frac{mr^2\omega^2}{4} \quad (6)$$

An Hand der Gleichung (6) ist sehr schön zu erkennen, warum moderne Schwungradspeicher mit bis zu 52000 Umdrehungen pro Minute betrieben werden[LIE09]. Dies hat den Vorteil, dass nur eine kleine Masse und kleine Abmessungen notwendig sind, da die gespeicherte Energie quadratisch von der Umdrehungsgeschwindigkeit abhängt. Ein Schwungrad kann seine gesamte gespeicherte Energie sehr schnell abgeben. Im Fall eines Bruchs der Schwungmasse, kommt die Reißfähigkeit von kohlefaserverstärkten Kunststoff gelegen. Dieser kann so konstruiert werden, dass bei einem Unfall (Bruch des Schwungrads) die Energie auf so viele kleine Stücke aufgeteilt wird, dass diese nicht durch die Hülle treten und somit kein Risiko für die Umgebung darstellen. Eine noch nicht erwähnte Eigenschaft, die ein Schwungrad naturgemäß besitzt, ist die eines Kreisel mit den dazu gehörigen Implikationen (Kreiselgesetze) welche die Anwendungen in mobilen Geräten erschweren. Trotzdem sind sie auch für die Brems-Energiespeicherung in Fahrzeugen interessant, da sie wie Kondensatoren (EDLC) eine extrem hohe Zyklusfestigkeit aufweisen und ähnliche Energiedichten aufweisen. Als Beispiel sei hier eine Entwicklung der Firma Compact Dynamics genannt, welche ein Schwungrad als Bremsenergiespeicher für Formel 1 Rennwagen entwickelt hat[COM09].

Die heute zur Energiespeicherung eingesetzten Schwungräder sind stationäre Anlagen, welche die Vorteile dieser Speichertechnologie ausnutzen, wie zum Beispiel als Unterstützung eines Bahnnetzes um die Anfahrtsspitzen von Garnituren abzufangen. Hierbei treten relativ hohe Zyklenzahlen in Kombination mit kurzzeitigen hohen Leistungsbeanspruchungen des Speichers auf. Der Einsatz als Backupsystem, für die Zeit bis ein Dieselaggregat einsatzbereit ist, hat gegenüber einem Batteriesystem den Vorteil einer längeren Lebensdauer und Robustheit.

2.4 Druckluftspeicher

Die bis jetzt installierten Druckluftspeicher Kraftwerke (1978 Huntorf, Deutschland und 1991 McIntosh, USA) speichern Energie zu Schwachlastzeiten in Form von Druckluft in Kavernen, bei Bedarf wird diese Druckluft mit Erdgas in einer Gasturbine abgearbeitet.

Anlagen die nach diesem Prinzip arbeiten werden CAES (compressed air energy storage) genannt, die Wirkungsgrade bewegen sich im Bereich zwischen 40 und 50 Prozent (für 1kWh_{el} werden ca. $0,8\text{kWh}_{el} + 1,6\text{kWh}_{gas}$ benötigt). Ein Vorteil ist, dass mit diesen Speicher/Kraftwerken auch Erdgaslagerstätten verwendet werden, die sonst nicht wirtschaftlich genutzt werden. Daraus ergibt sich automatisch auch der Nachteil solcher Anlagen, nämlich eine Abhängigkeit von Erdgasvorkommen. Speziell in Deutschland, wo Pumpspeicherkraftwerke aufgrund der wenig vorhandenen geologischen Gegebenheiten selten errichtet werden können, sind Druckluftspeicher eine interessante Möglichkeit große Energiemengen zu speichern (einige 100MW über einige Stunden). Vor allem im Norden Deutschlands sind viele Salzstöcke vorhanden, die sich als Speicher eignen würden und somit ideal für die Kompensation der Schwankungen der Windenergie genutzt werden könnten. Ein prinzipielles Problem der CAES Technologie ist, dass die entstehende Erwärmung bei der Kompression und die Abkühlung der Luft bei der Expansion eine negative Auswirkung auf den Wirkungsgrad solcher Anlagen haben. [BIE07]

Eine logische Weiterentwicklung ist die von der EU geförderte AA-CAES Technologie (advanced adiabatic compressed air energy storage) [ALS06], wobei hier ein Wärmespeicher den eben genannten Nachteil mindert und somit Wirkungsgrade im Bereich von 70 Prozent erreicht werden sollten. Daraus ergibt sich auch der große Vorteil der AA-CAES Technologie: es ist kein Erdgas zur Erwärmung der expandierenden Luft nötig, falls der Wärmespeicher noch genügend Energie vom vorhergegangenen Kompressionsvorgang gespeichert hat.

Da die AA-CAES Technologie noch im Versuchsstadium ist und die aktuelle CAES Technologie nicht regenerativ ist, wird in dieser Arbeit nicht näher auf diese Technologie eingegangen.

2.5 Pumpspeicherkraftwerk

Pumpspeicherkraftwerke sind Wasserkraftwerke mit einer zusätzlichen Pumpe, die es ermöglicht, Wasser aus einem unteren Becken in ein, meist mehrere 100 Meter höher gelegenes Becken zu pumpen, um so Energie zu speichern und bei Bedarf wieder in elektrischen Strom zurückzuwandeln. Dies ist eine der wenigen wirtschaftlichen Möglichkeiten große elektrische Energiemengen schnell verfügbar zu speichern, falls die geologischen Gegebenheiten einen Bau zulassen. Es gibt mehrere Varianten wie ein solches Kraftwerk aufgebaut sein kann. So können die Pumpe und die Turbine aus Kostengründen ein und dasselbe mechanische Gerät sein, man spricht hier dann von PumpTurbine (zB. Francis Turbine). Eine Pumpturbine hat im Allgemeinen einen um ca. drei bis vier Prozent schlechteren Wirkungsgrad als eine getrennte Bauweise. Wenn der Generator auch als Motor betrieben wird, spricht man von einem MotorGenerator. Der Gesamtwirkungsgrad von Pumpspeicherkraftwerken liegt im Bereich von 75 bis 80 Prozent. Eine Besonderheit bei der Ausführung mit einer Turbine und einer Pumpe gegenüber der Ausführung mit einer PumpTurbine ist die Betriebsart „Hydraulischer Kurzschluss“. Hierbei wird das Wasser im Kreis gepumpt, einerseits läuft die Pumpe und pumpt Wasser vom Unterbecken zum Oberbecken und andererseits fließt Wasser vom Oberbecken durch die Turbine zum Unterbecken. Um diesen Vorgang effizienter zu gestalten, wird im Kraftwerk der Pumpenausgang mit dem Turbineneingang verbunden, sodass ein Teil des Wassers gleich innerhalb des Kraftwerks von der Pumpe zur Turbine gelangt. Der Vorteil dieses Betriebszustandes ist, dass das Kraftwerk auch im Pumpbetrieb regelfähig ist. Dies ist normalerweise nicht der Fall, da der Wirkungsgrad in der Regel sehr stark von der Leistung abhängt. Pumpturbinen werden deshalb meist mit 100 Prozent Leistung betrieben, da dort der Wirkungsgrad maximal ist. So ist es auch mit einer 100MW Pumpe möglich nur 30MW vom Netz aufzunehmen, die restlichen 70MW nimmt die Pumpe zwar auch auf, diese werden aber über die Turbine und den Generator wieder ans Netz abgegeben. Je nach Bauart dauern die Wechsel von einer Betriebsart (Stillstand, Pumpbetrieb, Turbinenbetrieb) in eine andere einige Minuten (1 bis 4 Minuten). [GIE97, S.416-507]

2.6 Blei Säure Batterie

Da die Blei Säure Batterie unter anderem auch als Autobatterie eingesetzt wird und somit eine Massenfertigung stattfindet, ist es eine sehr kostengünstige Technologie in Bezug auf die Investitionskosten (ca. 150Euro/kWh). Als negative Eigenschaften sind die sehr kurze Lebensdauer von ca. 650 Zyklen und eine kleine Energiedichte von ca. 40Wh/kg anzuführen. [HUT08, S.34, 35] Außerdem beträgt die Ladezeit ein Vielfaches der Entladezeit. Die Blei Säure Batterie arbeitet gut bei hohen Belastungen, sofern die Batterie nicht zu stark entladen wird. Eine Entladung der Zellen unter 1,8V oder eine Lagerung im entladenen Zustand führt zu irreversiblen Schäden. Die Lebensdauer ist wie bei vielen elektrochemischen Systemen sehr stark Temperaturabhängig. Im Fall der Blei Säure Batterie entspricht eine Betriebstemperaturerhöhung um 8 Grad Celsius einer Halbierung der Lebensdauer. Bei einer Serienschaltung sind die Ladezustände der einzelnen Akkumulatoren zu überwachen um eine Überladung zu verhindern. [WIK09g] [BUC05]

Es wird zwischen geschlossenen und verschlossenen Bleibatterien unterschieden. Beide Typen sind entgegen ihrer Namensgebung von der Umwelt nicht komplett abgeschottet. Im Betrieb entstehen durch die Elektrolyse von Wasser bei beiden Varianten geringe Mengen an Wasserstoff und Sauerstoff. Bei den geschlossenen Bleibatterien wird ein flüssiger Elektrolyt verwendet. Die erzeugten Gase sammeln sich oberhalb des Elektrolyten an und verlassen durch ein Ventil den Akkumulator. Dadurch sinkt der Wassergehalt des Elektrolyten. Eine regelmäßige Wartung, bei der das verloren gegangene Wasser ersetzt wird, ist daher prinzipbedingt. Bei verschlossenen Bleibatterien ist der Elektrolyt immobilisiert. Dazu wird er entweder von einem Vlies aufgesaugt, oder durch Zusätze in ein Gel umgewandelt. Bei den verschlossenen Bleiakkumulatoren wird versucht, den Wasserstoff und den Sauerstoff innerhalb des Gehäuses wieder in Wasser zurückzuführen. Da es Betriebszustände gibt, wo es zu großen Sauerstoffüberschuss kommen kann, sind hier Überdruckventile eingebaut, damit dieser entweichen kann. Die Gel Batterien weisen gegenüber den Vlies Batterien einen höheren Innenwiderstand auf. Dafür ist aber auch die Lebensdauer der Vlies Typen aber um ca. 30 Prozent kürzer.[JOS06, S.33-62]

Für stationäre Anwendungen wurden sehr langlebige Bleibatterien entwickelt. Diese weisen eine Lebensdauer von bis zu 1500 80 Prozent Zyklen auf.[HOP07]

Bei Blei Akkumulatoren tritt der Peukert Effekt besonders stark auf. Peukert

fand heraus, dass die entnehmbare Kapazität eines Blei Akkumulators stark vom Entladestrom abhängig ist. Des weiteren stellte er fest, dass zwischen dem Entladestrom (I) und der vollständigen Entladezeit (t) folgender Zusammenhang herrscht: $I^{pc}t = const$, wobei pc eine von der Technologie abhängige Konstante ist und im Bereich von eins bis 2 liegt. Eine Konstante (pc) von eins bedeutet, dass die Amplitude des Entladestroms keine Auswirkungen auf die Entladezeit hat (kein Peukert Effekt). Blei Säure Batterien haben in der Regel einen Peukertkoeffizient im Bereich von 1,3 bis 1,5. Daraus folgt, dass die Kapazität bei hohen Entladeströmen sinkt. Es wird vermutet, dass sich bei hohen Strömen die Innenwiderstände an den Grenzflächen erhöhen. Dies hätte bei gleichem Entladestrom die Auswirkung, dass die Entladeschlussspannung schon früher als erwartet erreicht wird, und somit der Batterie weniger Ladung entnommen werden kann. Die entnehmbare Kapazität wäre kleiner. Der Peukert Effekt ist zum Teil ein dynamischer Effekt. Nach einer Entladung mit einem hohen Strom kann die Batterie mit einem kleineren Entladestrom trotzdem noch weiter entladen werden. In Summe ist die entnehmbare Kapazität, bei einem anfangs hohen Entladestrom aber kleiner als die entnehmbare Kapazität bei einem konstanten kleinen Entladestrom. [DOE04]

2.7 Nickel-Metallhydrid Akkumulator

Bei diesem Speicher wird Energie in Form von Wasserstoff gespeichert. Dieser wird zwischen den zwei Elektroden ausgetauscht, wobei sich deren chemische Zusammensetzung verändert. Ist der Akku voll geladen, befindet sich der ganze Wasserstoff in der negativen Elektrode, wird er entladen wandert er über Zwischenschritte zur positiven Elektrode und wird dort wieder gebunden. Der Elektrolyt, welcher meist aus verdünnter Kalilauge besteht, ist mindestens bis -40 Grad Celsius einsatzbereit. Die chemische Reaktion beim Entladen weist einen kühlenden Effekt auf. Dadurch erwärmt sich der Akkumulator nicht so schnell und es können Ströme von bis zu 15 C geliefert werden.[SCH08a, S.11-14]

Als wichtigste Nebenreaktion ist die Sauerstoffproduktion an der positiven Elektrode zu erwähnen, da diese einen Hauptteil der Selbstentladung ausmacht. Die NiMH Akkus können für Hochleistungs- und Hochenergieanwendungen ausgelegt werden. Bei Hochleistungsanwendungen ist die entnehmbare Kapazität bis zu einem Strom von 5C nur 12 Prozent kleiner als die Nennkapazität. Der Innenwiderstand wird vom Widerstand des Elektrolyten bestimmt. Da dieser stark temperaturabhängig ist und mit sinkender Temperatur steigt, wirkt sich dieser Umstand negativ auf die entnehmbare Kapazität bei tiefen Temperaturen aus. Die Selbstentladung war bisher ein großes Problem da diese ca. 4 Prozent pro Tag betragen hat. Neuere Entwicklungen werden unter den Namen „NiMH Akku mit geringer Selbstentladung“ von vielen Herstellern angeboten[WIK09i]. Bei einer Entladetiefe von 100 Prozent DOD mit einem Entladestrom von 1C kann man eine Zyklenfestigkeit von ca. 800 Zyklen bei 25 Grad Celsius erwarten[SCH08a, S.18].

Beim NiMH Akku tritt der sogenannte „Lazy Effect“ oder auch „Voltage depression Effect“ auf, dieser ist mit dem Memory Effekt von NiCd Akkus eng verwandt, ist aber im Gegensatz zu letzteren reversibel. Er tritt auf, wenn der Akku mehrmals nicht vollständig entladen wird. Dabei sinkt die Zellspannung um bis zu 50mV. Wird der Akku vollständig entladen und wieder voll geladen, verschwindet dieser Effekt wieder. Es ist zu empfehlen den Akku bei starkem Teilzyklusbetrieb alle Monate einmal vollständig zu entladen und anschließend wieder voll zu laden, bei normalem Gebrauch genügt es diesen Vorgang alle 3-6 Monate zu wiederholen.

Bei der Überladung bilden sich irreversible Kristalle die den Innenwiderstand

erhöhen. Da beim Lade- bzw. Entladevorgang Wasserstoffatome ins Kristallgitter eingelagert werden ändert sich dessen Ausdehnung um bis zu 20 Prozent und es kommt zu mechanischen Spannungen, die zu sogenannten Mikrocracks führen. Mikrocracks sind kleine Risse in der Metallhydridelektrode, die die Korrosion dieser beschleunigen. Normalerweise ist die Elektrode durch das bei der Korrosion entstandene Metallhydroxid vor weiterer Korrosion geschützt. Dies geht einher mit dem Effekt, dass die Entladetiefe einen sehr großen Einfluss auf die Lebensdauer der Zelle hat. Bei 20 Prozent DOD ist die Zyklenlebensdauer ca. 20 Mal größer als bei einer Entladetiefe von 100 Prozent. [SCH08a, S.11-20]

Der ideale Temperaturbereich ist zwischen 10 und 25 Grad Celsius. Wie bei den meisten chemischen Energiespeichern halbiert sich mit einem Temperaturanstieg von 10 Grad Celsius die Lebensdauer. Eine Überladung ist auf Kosten der Lebensdauer möglich. Ladeströme kleiner als 0,1C sollten vermieden werden.[SCH08a, S.20]

2.8 Li Ionen Akkumulator

Bei einem Li Ionen Akkumulator wird die Energie mit Hilfe von Lithium Ionen gespeichert. Diese wechseln während des Lade- bzw. Entladevorgangs von einer Elektrode zur Anderen. Die Anode besteht meist aus einer porösen Schicht aus Kohlenstoff. Während des Ladevorgangs bewegen sich positiv geladene Li Ionen von der Kathode, durch den Elektrolyt, zur Anode. Dort lagern sie sich in Zwischenräume des Kohlenstoffgitters ein. Dieser Vorgang wird in der Literatur „Interkalation“ genannt. Während des Entladevorgangs lagern sich die aus der Anode kommenden positiven Ionen wieder an der Kathode ab. Die Kathode besteht aus einem Metalloxid, wie zum Beispiel $LiCoO_2$. An der Kathode findet eine chemische Reaktion statt, wobei sich die Zusammensetzung des Metalloids so ändert, dass entweder positive Lithium Ionen frei werden, oder gebunden werden.[WIK09h]

Da sich für die Herstellung eines Li Ionen Akkumulators sehr viele Materialien eignen, besteht eine große Bandbreite bei den Eigenschaften dieses Speichertyps. Außerdem existieren viele Weiterentwicklungen des Li Ionen Akkumulators. Wird anstelle des flüssigen Elektrolyten ein Polymer verwendet, spricht man von Lithium Polymer Akkumulatoren, wobei es hier wieder feinere Unterteilungen gibt. Lithium Polymer Akkumulatoren sind die typischen Handy-Akkus, da sich mit ihrem schichtweisen Aufbau viele Formen, abseits von üblichen Größen, herstellen lassen. Eine von vielen neueren Entwicklungen ist der Lithium Eisen Phosphat Akkumulator. Dieser Akkumulator erlaubt Entladeströme von bis zu 35C [A1209], im Gegensatz von ca. 1C bei normalen Li Ionen Akkumulatoren. Der Grund dafür liegt im sehr kleinen Innenwiderstand von ca. 10 mΩ [A1209] pro Zelle. Durch sehr feine Strukturen der Elektroden konnte deren Oberfläche erhöht werden, und somit ein kleiner Innenwiderstand erreicht werden. Aus diesem Grund werden solche Akkus auch Nano Akkumulatoren genannt.

Die Energiedichte liegt im Bereich von 100Wh/kg bis 200Wh/kg [VEZ09], womit dieser Speichertyp sich auch für mobile Anwendungen eignet. Wie bei vielen Batterien, wirken sich auch bei Li Ionen Akkumulatoren tiefe Zyklen überproportional stark auf die Lebensdauer aus. Lithium Ionen Akkumulatoren weisen auch eine starke kalendarische Alterung auf, die unabhängig von der Belastung ist und die Lebensdauer limitiert.

2.9 NaS Batterie

Die Natrium Schwefel Batterie hat einen festen Elektrolyten (meist Aluminiumoxid) und flüssige Elektroden (Natrium, bzw. flüssiger Schwefel). Sie muss im Betrieb auf ca. 300 bis 350 Grad Celsius gehalten werden, wobei auch eine Kühlung notwendig ist. Die Energiedichte der NaS Batterie beträgt ca. 100Wh/kg [WIK09f].

Es treten keine Nebenreaktionen auf, wodurch ein Coulomb Wirkungsgrad von 100 Prozent erzielt wird. Es tritt keine nennenswerte elektrochemische Alterung auf. Die Aufheiz- und Abkühlvorgänge führen zu mechanischen Spannungen, die zum Ausfall von Zellen führen. [AAC09] Ein solcher Ausfall macht sich in der Regel dadurch bemerkbar, dass der Innenwiderstand einer Zelle extrem hoch wird. Dies hat zur Folge, dass der ganze Strang ausfällt. Bei einer Natrium Nickel Chlorid Zelle hingegen, macht sich ein Zellausfall durch einen Kurzschluss der Zelle bemerkbar. Das führt zwar zu Ausgleichsströmen zwischen Strängen, da die Strangspannungen nicht mehr gleich sind, bedeutet in der Praxis aber nur eine kleine Beeinträchtigung des Gesamtsystems.

Die kalendarische Lebensdauer liegt im Bereich von 15 Jahren, die Lebensdauer in Anzahl der Zyklen liegt bei ca. 2500 (100 Prozent DOD) 4500 (90 Prozent DOD) und 6500 (65 Prozent DOD). [BIT05]

2.10 ZEBRA

Die Zebra-Batterie ist eine Natrium-Nickelchlorid-Hochtemperatur-Batterie, deren Arbeitstemperatur um 300 Grad Celsius liegt. Mit einem Energieinhalt von über 100 Wh/kg ist sie prinzipiell auch für den mobilen Einsatz geeignet, wofür sie auch eingesetzt wird. Für den Betrieb ist eine Temperaturregelung notwendig. Dies bedeutet, dass im Betrieb eventuell gekühlt werden muss und im Stillstand geheizt werden muss. Die Kühlung ist praktisch kein Problem, da die Zelltemperatur im Bereich von 300 Grad Celsius liegt, und somit eine große Temperaturdifferenz zur Umgebung auftritt. Die Heizphasen verschlechtern den Wirkungsgrad dramatisch, falls sich die Batterie längere Zeit im Stillstand befindet. Für einen Energiespeicher von ca. 1 kWh wird eine Heizleistung von 5 W benötigt. Die Aufwärmphase einer abgekühlten Batterie beträgt ca. 48 h. Die Leistungsabgabe hängt stark von der Temperatur der Zellen und vom Entladegrad ab. Der Innenwiderstand steigt nahezu linear von ca. 10 mΩ bei 0 Prozent DOD auf 30 mΩ bei 100 Prozent DOD. Dieser Anstieg wird größtenteils von der Nickelchloridelektrode hervorgerufen und bestimmt die Leistungsabgabe in Abhängigkeit vom DOD. Die Lebensdauer bei Zyklen mit einem DOD von 80 Prozent liegt um 1700. [SCH08a, S.21f]

Eine Besonderheit ist der Coulombwirkungsgrad von 100 Prozent, dh. dass jede gespeicherte Ladung auch wieder entnommen werden kann. [THO02] Innerhalb von 4 Jahren wurde eine Batterie mit insgesamt 3000 Nennladungen beaufschlagt. Es konnte keine Degeneration der Kapazität festgestellt werden. [THO02]

2.11 Vanadium-Redox Flow-Batterie

Eine Flow-Batterie unterscheidet sich von anderen Batterietypen durch die Verwendung von zwei Elektrolyten in denen die Energie gespeichert wird. Diese werden im Betrieb (Lade-/Entladevorgang) durch eine Umwandlungseinheit gepumpt. Dort kommt es über eine spezielle Membran zu einer reversiblen chemischen Reaktion, wobei entweder elektrische Energie zur Umwandlung benötigt wird, oder bei der Rückwärtsreaktion frei wird. Da die Elektrolyten außerhalb der Umwandlungseinheit in Tanks gespeichert werden, ergibt sich eine Unabhängigkeit von elektrischen Speichervermögen und Leistung der gesamten Anlage. Außerdem kann die Energie, die nur vom Zustand der beiden Elektrolyten abhängt, verlustlos gespeichert werden, wenn die beiden Tanks der Elektrolyten von der Umwandlungseinheit getrennt werden[SCH08b].[BOE07]

Es gibt eine Vielzahl von sogenannten Redox Reaktionen, die prinzipiell für eine Flow-Batterie in Frage kommen, die in der Praxis am häufigsten verwendeten Typen sind: Vanadium-, Polysulfid/Bromid- und die Zink/Bromid-Redox Flow-Batterie. In Folge wird als Vertreter der Flow-Batterien auf die Vanadium-Redox Flow-Batterie näher eingegangen, da diese gegenüber der Zink/Bromid Zelle eine wesentlich höhere Zyklenzahl hat und die Polysulfid/Bromid Zelle bisher noch nicht großtechnisch genutzt wird.[BOE07]

Diese Batterie wurde in den 1980er Jahren an der Australischen Universität New South Wales entwickelt. Später wurden die Patente an verschiedene Konzerne verkauft. Bei dieser Flow-Batterie wird für beide Elektrolyten Vanadium in einer sauren Lösung verwendet, einmal V^{3+}/V^{2+} und für den anderen Elektrolyten V^{5+}/V^{4+} . Daraus ergibt sich in der Praxis ein sehr großer Vorteil: es tritt keine Verunreinigung der beiden Elektrolyten durch eine ungewollte Diffusion von Ionen durch die Membran auf, da auf beiden Seiten das gleiche Element verwendet wird. Ist die Batterie vollständig geladen, so kommt im „positiven“ Elektrolyt Vanadium nur als V^{5+} und im „negativen“ Elektrolyt nur als V^{2+} vor. Ist die Batterie vollständig entladen, so kommt im „positiven“ Elektrolyt Vanadium nur als V^{4+} und gleichzeitig im „negativen“ Elektrolyt nur als V^{3+} vor.

Eigenschaften:

Diese Batterie kann vollständig entladen werden, ohne dass die Lebensdauer der Batterie darunter leidet, da nur die Oxydationsstufen der Vanadiumionen

der Elektrolyten umgewandelt werden und die Elektroden selbst an keiner chemischen Umwandlung teilnehmen und somit auch keinen Verschleiß erfahren. Der Wechsel zwischen der Betriebsart Laden und der Betriebsart Entladen erfolgt in weniger als 1/000 sec[SEI04, S.67]. Für spezielle Anwendungen wäre es auch möglich die entladenen Elektrolyten durch Aufgeladene zu ersetzen, falls eine sehr schnelle „Aufladung“ nötig ist. Die Batterie kann gleich schnell geladen wie entladen werden (im Bereich von 15 - 80 Prozent SOC)[SHA09]! Während des Lade/Entladevorgangs müssen die Pumpen in Betrieb sein. Trotzdem wird ein Wirkungsgrad von 70-80 Prozent für einen Lade- und Entladevorgang erreicht[SCH08b, S.402].

Die Lebensdauer der Batterie hängt stark von der Lebensdauer der eingesetzten Membran ab, und wird mit ca. 10 Jahren angegeben, oder etwa 10000 Zyklen. Der Elektrolyt selbst hat eine unbegrenzte Lebensdauer.[SEI04, S.67]

3 Modellierung

In diesem Kapitel wird eine konkrete Speicherart in MATLAB Simulink modelliert, um damit in Folge verschiedene Alterungseffekte zu zeigen, die bei ähnlichen Speichern auftreten. Ausgehend von Funktionen die ein Allgemeiner Energiespeicher hat, wird ein Batteriemodell abgeleitet und dieses mit einem Alterungsmodell erweitert. Da für die Lithium Ionen Technologie die Datenlage gut ist, wird diese modelliert. In der folgenden Abbildung ist der Entwicklungsprozess grafisch dargestellt.

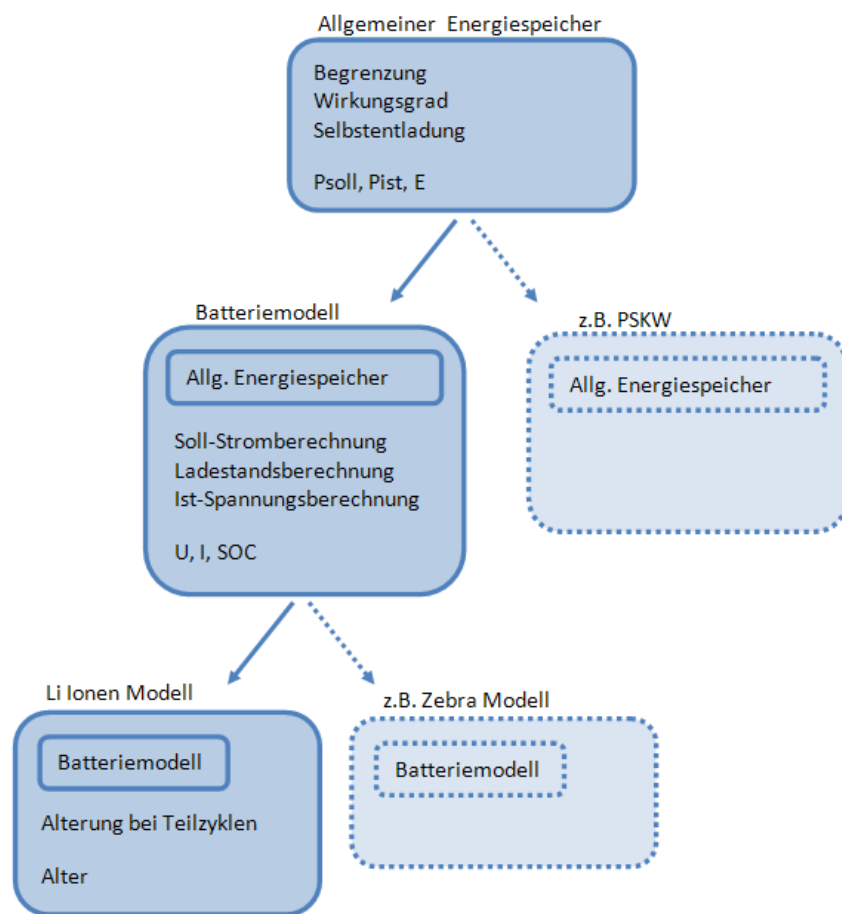


Abbildung 1: Entwicklungsprozess

Ein wichtiger Punkt eines Allgemeinen Energiespeichers ist es, dass sein Speicherinhalt in der Regel begrenzt ist und somit Vorkehrungen für die Einhaltung dieser geschaffen werden müssen. Durch Wirkungsgrad und Selbstentladung können verschiedene Technologien auf einem sehr abstrakten Level verglichen werden. Um möglichst variabel zu sein, wird in diesem Fall als Eingangsgrö-

ße eine Soll-Leistung gewählt. Wenn keine Begrenzungen verletzt sind wird als Ist-Leistung die geforderte Soll-Leistung ausgegeben. Der Energieinhalt des Speichers wird im einfachsten Fall durch Integration der Ist-Leistung berechnet. Im nächsten Schritt wird dieses allgemeine Modell verfeinert. Bei der Weiterentwicklung zum Batteriemodell wird die Soll-Leistung in die für eine Batterie wichtigen Größen I und U umgerechnet. Dazu muss die aktuelle Klemmenspannung der Batterie bekannt sein, die wiederum vom aktuellen Strom und dem Ladestand abhängt. Im konkreten Fall wird als Batteriemodell eine vom Ladestand abhängige Leerlaufspannung und ein dazu in Serie geschaltener Innenwiderstand gewählt. Um das allgemeine Modell z. B. in Richtung eines Pumpspeicherkraftwerk Modells zu verfeinern, müsste ein anderer Weg gewählt werden. Um die Alterungseffekte simulieren zu können, wird das Batteriemodell mit einem Alterungsmodell erweitert. Im speziellen wird hier eine auf Zyklen basierte Methode angewendet, da die verwendeten Daten die Alterung in Zyklen beschreiben.

In der folgenden Grafik ist die Umgebung, in der das Speichermodell verwendet wird, dargestellt. In einem ersten Block wird die Soll-Leistung generiert. Die Speicher versuchen diese zu liefern, und schicken ihre aktuelle Leistung an ein Oszilloskop, wo sie dann dem Benutzer zur Überprüfung zu Verfügung stehen.

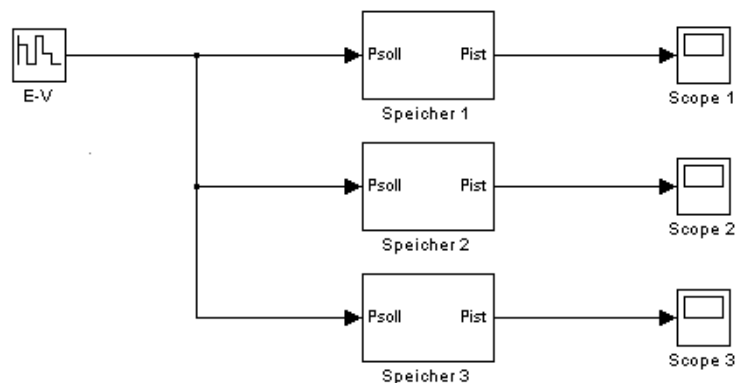


Abbildung 2: Umgebung für die Energiespeichermodelle

3.1 Allgemeiner Energiespeicher

Als Grundmodell für folgende, komplexere, Energiespeicher wird ein Modell mit der Eingangsgröße Differenzleistung (entspricht hier: Erzeugung - Verbrauch) und mit der Ausgangsgröße Leistung (positives Ausgangssignal entspricht Energiespeicherung) erstellt. Dazu werden die in den folgenden Unterkapiteln besprochene Konstrukte benutzt.

3.1.1 Begrenzungen

In Simulink ist die Erstellung von Begrenzungen einfach, es braucht nur der Begrenzungsblock eingefügt werden und es können obere und untere Grenzen definiert werden. Trotzdem gibt es einen wichtigen Aspekt, der bei Begrenzungen nie vergessen werden darf, nämlich Anti-Windup Maßnahmen einzusetzen, falls ein Integrierer involviert ist. Es ergibt sich folgende Situation: ein vorgelagerter Integrierer erzeugt ein Ausgangssignal, dass größer ist als ein erlaubter Wert. Die Begrenzung spricht an und an ihrem Ausgang erscheint der begrenzte Wert. Der Integrierer integriert weiter und der Ausgang bleibt nach der Begrenzung konstant. Stellt zum Beispiel der Ausgang des Integrierers einen Speicherinhalt dar, und die Begrenzung seine maximale Speicherkapazität, so hat dies gravierende Folgen, da der Speicherinhalt das Maximum überschreitet, am Ausgang der Begrenzung aber konstant den Maximalwert erscheint. Wird nun der Speicher entladen, verringert sich zwar der Ausgangswert des Integrierers, aber auf einem höheren Niveau als vorgesehen, da er ja vorher über die Begrenzung hinaus integriert hat. Um dies zu vermeiden müssen Steuerleitungen von der Begrenzung zum Integrierer erstellt werden, die dem Integrierer das Weiterintegrieren während eines Ansprechens der Begrenzung unterbinden. Es muss sichergestellt werden, dass sich der Integrierer wieder aus der Begrenzung bewegen kann. Eine verwendete Schaltung ist in Abbildung 3 zu sehen.

Das Eingangssignal stellt eine Leistung dar, die im Normalfall einen der zwei Multiplikatoren für die Anti-Wind-Up Maßnahme erfolgreich durchläuft um dann vom Integrator aufsummiert werden zu können. Der Integrator liefert an seinem Ausgang die im idealen Speicher enthaltene Energie. Überschreitet diese zum Beispiel die obere Schranke, wird am Ausgang von RO1 eine Null ausgegeben, dies hat zur Folge, dass für alle Leistungen größer Null, der obere

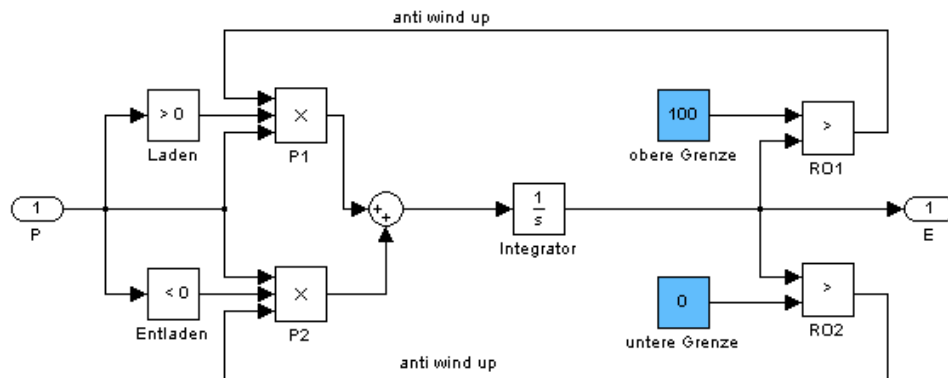


Abbildung 3: Anti-Wind-Up bei Speicherbegrenzungen

Anti-Wind-Up Multiplikator ebenfalls eine Null liefern, und somit nur noch der untere Zweig für Leistungen kleiner Null (entspricht hier Entladung) einen Zugang zum Integrierer hat. Die Untere Begrenzung arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Es hat immer nur ein Zweig Zugriff auf den Integrierer, was durch die Aufspaltung der Leistung in Lade- und Entlade- Leistung geschieht. Es wurde hier nur auf die wesentlichen Punkte der Begrenzung eingegangen. Liegt zum Beispiel eine Selbstentladung vor, dann ist diese entweder gut im Modell zu platzieren, oder sie muss auch mitberücksichtigt werden.

3.1.2 Wirkungsgrade

In Folge wird eine Schaltung erläutert, mit deren Hilfe unterschiedliche Wirkungsgrade für das Laden und das Entladen erreicht werden können. Dazu wird das Signal des Reglers auf positives oder negatives Vorzeichen untersucht und entweder der Ladezweig oder der Entladezweig aktiviert und mit dem entsprechenden Faktor multipliziert, beziehungsweise dividiert. Das Ergebnis wird anschließend dem Integrator zugeführt. Dieser stellt den eigentlichen Speicher dar und wird von vielen Teilschaltungen verwendet, welche hier aber nicht eingezeichnet sind. Dies ist auch ein kritischer Punkt, da genau darauf geachtet werden muss, dass sich die einzelnen Teilschaltungen nicht gegenseitig unerwünscht beeinflussen.

Bei dieser Variante ist zu bemerken, dass hier implizit drei verschiedene Leistungen vorkommen. Am Eingang liegt die Soll-Leistung, die von einer höheren Ebene gefordert wird, an. Die effektive Leistung ist jene, mit der sich der Speicherinhalt ändert. Die Ist-Leistung ist die resultierende nach außen hin

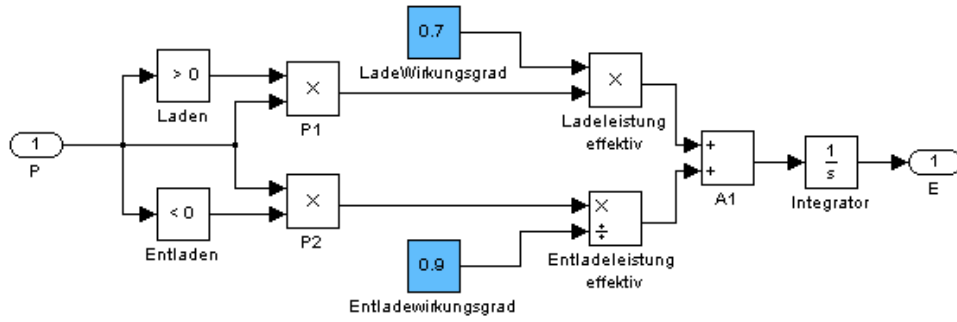


Abbildung 4: Unterschiedliche Wirkungsgrade für Laden und Entladen

aufgenommene oder abgegebene Leistung. Diese drei Leistungen sind über Begrenzungen und Verluste miteinander verknüpft.

3.1.3 Selbstentladung

Da der aktuelle Speicherinhalt mit Hilfe einer Integration der Ausgangsleistung des Speichers bestimmt wird, eignet sich diese Integration auch dazu, Verluste, die zeitlich konstant sind (zb.: Nebenaggregate), zu modellieren, indem diese einfach zur Ausgangsleistung des Speichers addiert werden. Eine Überwachung die den Fall verhindert, dass der Speicher einen negativen Energieinhalt aufweist, ist dann vorzusehen.

Wenn die Verluste in Abhängigkeit des aktuellen Speicherinhalts auftreten (zb.: in Prozent des Speicherinhalts pro Stunde), können diese ebenfalls mit einer Rückkopplung einbezogen werden, wie im Folgendem gezeigt wird. Eine zusätzliche Überwachung des Energieinhalts des Speichers ist hier nicht notwendig, da vom aktuellen Speicherinhalt nur ein Prozentsatz abgezogen wird, dh. der Speicherinhalt kann nicht unter Null sinken. Abbildung 5 zeigt die Implementierung in Matlab Simulink.

Die Schleife kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$E(t) = -k \int_0^t E(t') dt' + \int_0^t P(t') dt' + E_0 \quad (7)$$

Um das Verhalten in Bezug auf die Selbstentladung des Speichers ermitteln zu können, wird $P(t)$ gleich Null gesetzt. Ein Exponentialansatz $E(t) = A * e^{-\frac{t}{\tau}}$ liefert:

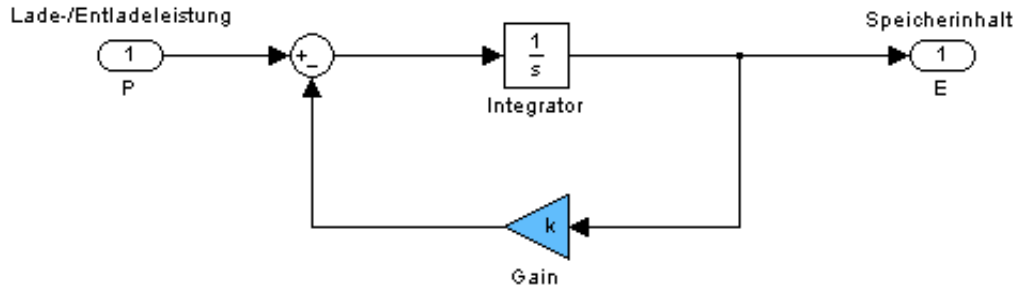


Abbildung 5: Modellierung der Speicherverluste

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = k * \tau * e^{-\frac{t}{\tau}} \rightarrow k = \frac{1}{\tau} \quad (8)$$

Da die Selbstentladung eines Speichers meist in Prozent pro Zeiteinheit und nicht mit einer Entladezeitkonstante angegeben wird folgt hier noch eine kurze Umrechnung.

Für eine Selbstentladung von x Prozent pro Stunde würde sich bei einem zum Zeitpunkt $t=0$ vollständig geladenen Speicher ergeben:

$$E(t = 0) = 1 \quad (9)$$

$$E(t = 1h) = 1 * (1 - x) = e^{-\frac{1h}{\tau}} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{-1h}{\ln(1 - x)} \rightarrow k = \frac{\ln(1 - x)}{-1h} \quad (11)$$

Zu beachten ist, dass hier τ in Stunden angegeben ist.

3.2 Batteriemodell

Dieses Modell stellt eine Erweiterung des Allgemeinen Modells (siehe Abschnitt 3.1) dar. Es beschreibt den Zusammenhang zwischen der geforderter Leistung der Batterie und den dafür notwendigen Strom durch die Batterie. Um den benötigten Strom berechnen zu können, wird die aktuelle Batteriespannung (Klemmenspannung) benötigt. Diese hängt in erster Näherung vom Ladezustand und vom Produkt des Stroms mit dem Innenwiderstand ab und wird in einen Untermodell berechnet. Die geforderte Leistung wird durch die Klemmenspannung dividiert und ergibt den geforderten Strom durch die Batterie. Folgende Grafik veranschaulicht das Prinzip des Modells. Wobei hier der graue Block „Alter“ für das Alterungsmodell steht und in diesem Unterkapitel nicht behandelt wird.

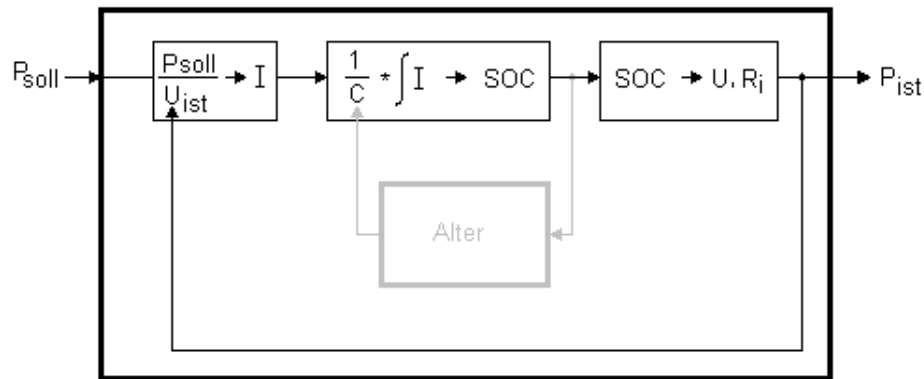


Abbildung 6: Prinzip

Die Ausführung in Matlab ist in Abbildung 7 dargestellt. Um eine bessere Lesbarkeit zu erreichen, sind in der Abbildung nur die wichtigsten Verbindungslinien eingezeichnet. Das Eingangssignal, die Soll-Leistung, wird durch einen Begrenzungsblock geführt. Aufgrund von Simulationsabbrüchen durch Matlab, bei für die Batterie zu hohen Leistungen, ist es erforderlich die Leistung schon hier zu begrenzen. Die Leistungsbegrenzung der Batterie erfolgt eigentlich in einem tiefer liegenden Teilmodell. Dort wird der Strom auf seinen maximal für die Zelle zulässigen Wert begrenzt, und somit auch automatisch die Leistung. Die Soll- und die Ist-Leistung sind in der Regel gleich groß. Unterschiede treten dann auf, wenn eine Begrenzung anspricht. Eine prinzipielle Begrenzung ist die Kapazität der Batterie. Wenn zum Beispiel die Batterie leer ist, kann sie keine Leistung mehr zur Verfügung stellen, sondern nur mehr geladen werden. Wird der Strom in den Zellen zu hoch, wird die Strombegrenzung aktiv und

es kommt ebenfalls zu einer Differenz von Soll- und Ist-Leistung.

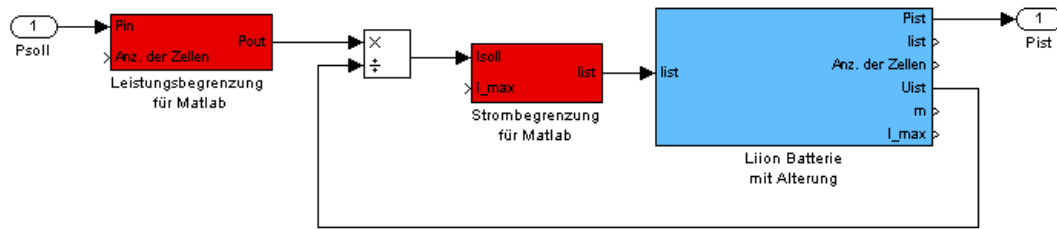


Abbildung 7: Berechnung des notwendigen Stroms

Hat das Signal den Leistungsbegrenzungsblock durchlaufen, wird der notwendige Strom durch die Batterie berechnet. Dazu wird die Soll-Leistung durch die Ist-Spannung dividiert und als Soll-Strom der nächsten Begrenzung zugeführt. Diese zweite Begrenzung verhindert einen unlösbaren Simulationsfall. Dieser tritt dann auf, wenn eine Solleistung gefordert wird, die die Batterie im Augenblick nicht liefern kann. Diese Begrenzung schränkt die Verwendbarkeit des Modells ein. Es werden die benötigten Leistungswerte nur im Bereich kleiner Ströme und hoher Spannungen zur Verfügung gestellt. Die gleichen Leistungen können theoretisch aber auch mit hohen Strömen und kleinen Spannungen erreicht werden. Prinzipiell könnte der hier besprochene Teil noch mit einem Laderegler versehen werden, um einen realitätsnahen Einsatz der Batterie zu gewährleisten. Aus Komplexitätsgründen wird dieser hier nicht modelliert.

Da ein Akkumulator im Allgemeinen aus mehreren Zellen besteht, wird im nächsten Schritt die Eingangsgröße auf die Eingangsgröße einer Zelle umgerechnet, wie in Abbildung 8 dargestellt ist. Dazu sind die Anzahl der parallelen Stränge und die Anzahl der in Serie geschalteten Zellen pro Strang notwendig. Das Verhältnis von Gesamtkapazität zu Zellkapazität ergibt die Anzahl der parallelen Stränge. Hierbei ist zu beachten, dass auch eine praktisch unmögliche Anzahl von Strängen behandelt werden kann (zb. 1,5 parallele Stränge). Das gleiche gilt auch für die Anzahl von seriellen Zellen. Das hat zur Folge, dass die Batteriespannung und die Batteriekapazität frei gewählt werden können und somit nicht vom tiefer liegenden Zellmodul abhängen. Wie in der folgenden Abbildung ersichtlich ist, wird der Soll-Strom einer Zelle entsprechend der Gesamtkapazität der Batterie und der Kapazität einer Zelle ausgerechnet. Dieser dient als Eingangssignal für die nächste Stufe des Modells, welche eine einzelne Zelle simuliert. Die Ausgangsgrößen der Zelle werden im Anschluss wieder auf die einer ganzen Batterie hochgerechnet. Anschließend

wird die aktuelle Ist-Leistung der Batterie berechnet. Die in der Abbildung eingetragene Zellspannung ist die Spannung eines ganzen Akkupacks. Dies liegt darin begründet, dass die dem Zellmodell zugrunde liegenden Daten von einem Akkupack stammen.

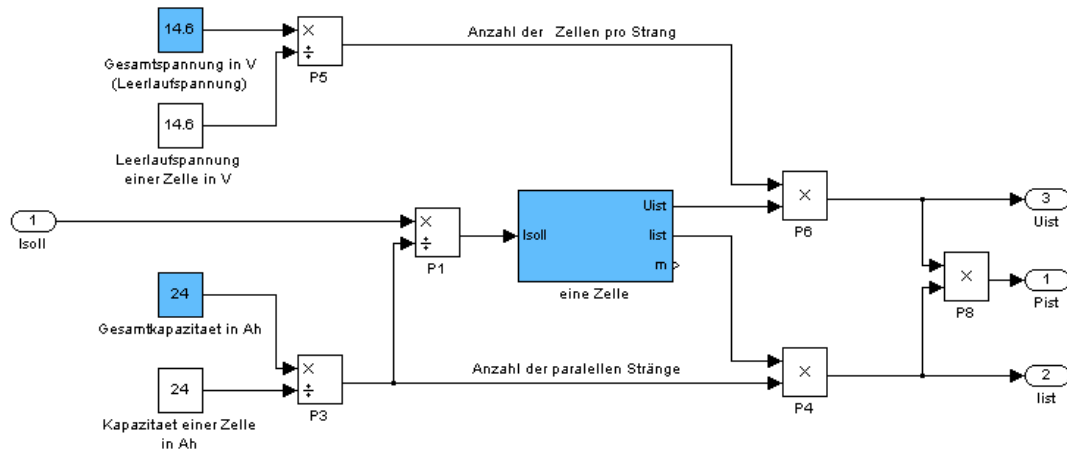


Abbildung 8: Umrechnen auf Zellgrößen

Das Modell einer Zelle besteht im Wesentlichen aus einem Integrator und aus einer Begrenzung, die verhindert, dass die Zelle über hundert Prozent SOC geladen wird, bzw. nur bis Null Prozent SOC entladen wird. Der Übersichtlichkeit wegen sind beide in einem eigenen Untermodell ausgeführt. Das Integratormodul ist über zwei Steuerleitungen („nicht voll“ und „nicht leer“) mit dem Begrenzungsmodul gekoppelt. Dadurch kann es bestimmen ob Ladeströme beziehungsweise Entladeströme zugelassen sind, um zu verhindern, dass der Integrator außerhalb seiner Grenzen arbeitet. Hat das Sromsignal das Begrenzungsmodul für den Integrator (der Integrator befindet sich innerhalb des SOC Moduls) durchlaufen, wird er zu diesem weitergeleitet.

In Abbildung 9 ist das Modell einer Zelle abgebildet. Der Soll-Strom wird durch die Begrenzungen in einen Ist-Strom übergeführt. Dieser wird vom SOC Modul integriert und in Folge damit ein neuer SOC Wert generiert. Aus dem SOC Wert wird mit Hilfe zweier Tabellen die entsprechende Leerlaufspannung und der Innenwiderstand ermittelt. Mit diesen Werten und des aktuellen Stroms wird die Batteriespannung berechnet und als Ausgangssignal zur Verfügung gestellt.

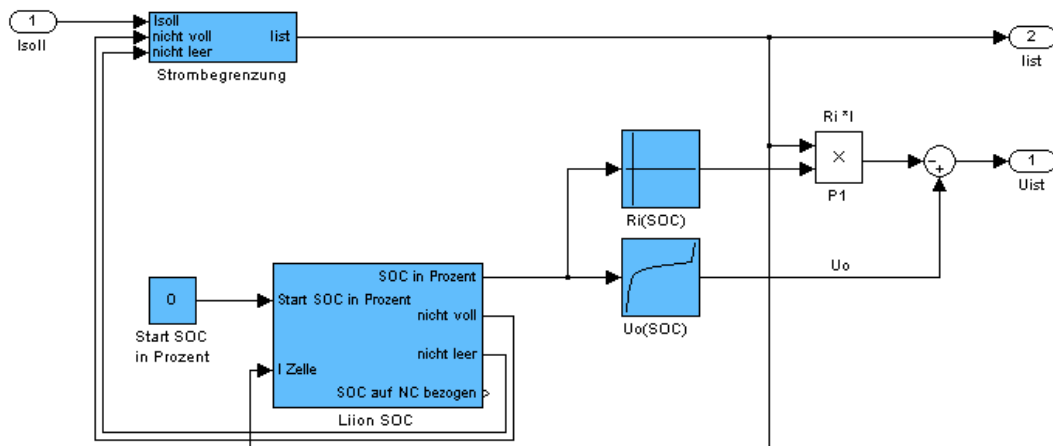


Abbildung 9: Modell einer Zelle

In Abbildung 10 ist das SOC Untermodell dargestellt. Nachdem der Strom integriert wird, wird das Ergebnis noch auf die Nennkapazität bezogen und am entsprechenden Ausgang des Integrationsmoduls als SOC NC zur Verfügung gestellt. Im Integratormodul befindet sich auch der Teil des Modells der für die Selbstentladung zuständig ist. Dieser ist so gestaltet, dass sich der Ladezustand um einen einstellbaren Wert pro Zeiteinheit verringert (in Prozent der Nennkapazität pro Monat), unabhängig von der Höhe des Ladestands (außer er ist Null, dann bleibt er auch Null). Das Ausgangssignal des Integratormoduls („SOC NC“) stellt den SOC dar, den die Zelle hätte, wenn sie Nennkapazität besitzen würde. Um den aktuellen SOC ermitteln zu können, wird dieser mit einem Alter multipliziert, da sich die Alterung durch eine Kapazitätsänderung auswirkt. Durch diese Multiplikation wird der SOC im Allgemeinen größer als der SOC NC. Der Integrator benötigt einen anti wind up Schutz. Den Schutz gegen das Entladen der Zelle unter Null Prozent SOC beherbergt der Integrator bereits. Dieser ist für den SOC NC ausgelegt. Da aber der SOC NC und der SOC bei vollständiger Entladung gleich sind, braucht der Schutz den SOC nicht überwachen. Für den Schutz gegen das Laden über 100 Prozent SOC gilt das nicht. Deswegen wird der aktuelle Wert des SOC überwacht. Solange dieser kleiner als 100 Prozent ist, darf die Zelle geladen werden. Die Implementierung in Matlab ist in der folgenden Abbildung ersichtlich. Desweiteren wurde, wie ersichtlich, eine Begrenzung des SOC auf die Werte von Null bis 100 Prozent eingefügt. Eine genaue Erklärung des Alterungsmodells befindet sich im nächsten Unterkapitel.

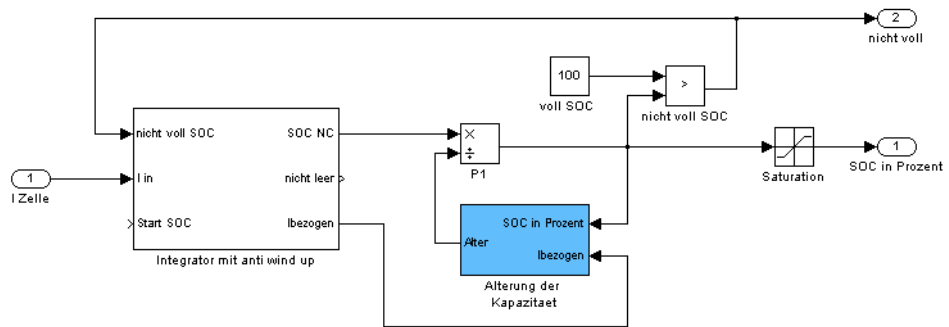


Abbildung 10: SOC Untermodell

3.3 Alterung beim Lithium Ionen Modell

In diesem Kapitel wird das Batteriemodell um ein Alterungsmodell erweitert, welches die Verringerung der Kapazität der Batterie beschreibt. Da bei den verfügbaren Daten die Alterungsvorgänge mit Hilfe von Zyklen beschrieben sind, basiert auch das in Folge vorgestellte Alterungsmodell auf Zyklen. Ein wichtiger Punkt ist, dass sich die Alterungsvorgänge mit steigender Temperatur ändern, dies wird hier nicht modelliert, da für diesen Effekt zu wenig Daten vorhanden sind.

3.3.1 Prinzip

Ist von einem Speichersystem die Zyklenfestigkeit in Abhängigkeit der Entladetiefe bekannt, so kann damit ein Alterungsmodell erstellt werden. Für jeden durchgeführten Zyklus wird ein bestimmter Wert von der zu erwartenden Lebensdauer abgezogen. Die noch verbleibende Lebensdauer ist indirekt proportional zur Alterung. Effekte die sich in Abhängigkeit von der Alterung beschreiben lassen, können somit simuliert werden[BIT04].

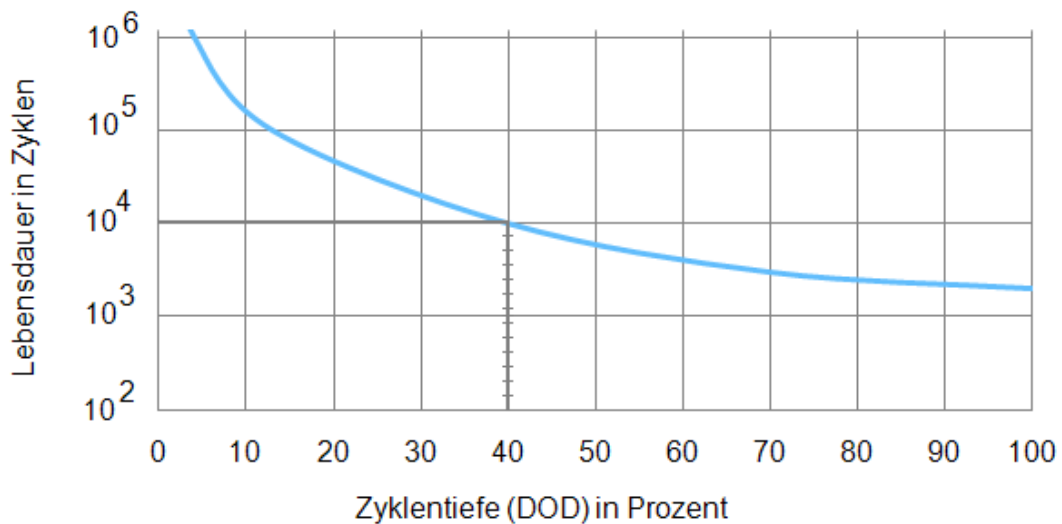


Abbildung 11: Lebensdauer in Abhängigkeit vom DOD

Ein Beispiel ist in Abbildung 11 zu sehen, wobei in dieser Grafik auch gleich das Grundprinzip eingezeichnet ist. Die Werte dieses Beispiels sind dem Datenblatt einer Lithium Batterie entnommen[SAF08], die schemenhaft wiedergegeben sind. Auf der horizontalen Achse ist der maximale Entladegrad DOD,

der während eines Zyklus (Entladen und anschließendes Laden auf den Ausgangswert) erreicht wird aufgetragen. Ein Entladegrad von 100 Prozent entspricht einer vollständigen Entladung des Speichers. Auf der vertikalen Achse ist die Anzahl der Zyklen aufgetragen, bei der der Speicher aufgrund von unterschiedlichsten Alterungsprozessen nur mehr 80 Prozent seiner Nennkapazität aufweist, welche allgemein als Lebensdauer bezeichnet wird.

Aus der Grafik kann nun abgelesen werden, dass bei Zyklen die, von einem vollständig geladenen Speicher ausgehend, bis zu einem Entladegrad von 40 Prozent DOD entladen werden, der Speicher nach 10000 solcher Zyklen nur mehr 80 Prozent seiner Nennkapazität aufweist. Hierbei sei angemerkt, dass nur 40 Prozent des Speichervolumens aktiv genützt werden. Das Grundprinzip baut darauf auf, dass nach einen solchen Zyklus noch 9999 solcher Zyklen möglich sind, bis die Lebensdauer erreicht ist. Ausgehend davon kann zb. in einem Modell die entnehmbare Kapazität verkleinert werden, im einfachsten Fall linear, bis dass nach 10000 Zyklen nur mehr 80 Prozent der Nennkapazität übrig sind. Um auch verschiedene Zyklen behandeln zu können, wird anhand der Kurve für jede Entladetiefe eines Zyklus ein Alterungswert ermittelt. Wird das Lebensdauerende mit 1 normiert, bedeutet ein 40 Prozent Zyklus eine Alterung von $1/10000$, oder ein 100 Prozent Zyklus eine Alterung von ca. $1/1000$, so können einzelne Zyklen unterschiedlicher Tiefe aufsummiert werden und es ergibt sich ein Wert, der der gesamten Alterung entspricht.

Da, wie im Folgenden zu lesen sein wird, das Grundprinzip alleine nicht ausreichend ist, sind Erweiterungen nötig, die alle nach dem gleichen Schema aufgebaut sind. Die einzelnen Alterungswerte der Zyklen werden mit einem Korrekturfaktor multipliziert, der von jeweils einer zusätzlichen Größe abhängt.

3.3.2 Teilzyklen

Da in der Regel keine ganzen Zyklen stattfinden, wird ein Zyklus in zwei Teilzyklen aufgeteilt, und zwar in einen Ladevorgang und einen Entladevorgang, wobei im einfachsten Fall der Alterungswert des ganzen Zyklus symmetrisch auf die beiden zusammengehörigen Teilzyklen aufgeteilt wird.

Die zwei Teilzyklen werden getrennt voneinander betrachtet und müssen zusammengesetzt keinen ganzen Zyklus ergeben. Auf einen Ladezyklus kann nur ein Entladezyklus folgen, und umgekehrt. Ein wesentlicher Punkt ist die De-

definition eines solchen Teilzyklus. Da während eines Teilzyklus ein gewichteter Mittelwert des Stroms gebildet wird (siehe Kapitel 3.3.6) ist es ungünstig, wenn Pausen während eines solchen Teilzyklus mitberücksichtigt werden. Diese würden den gewichteten Mittelwert verringern, obwohl nicht geladen/entladen wird. Zeiten in denen der Betrag des Stroms kleiner als 0,001 C ist, werden deshalb für die Mittelwertbildung nicht berücksichtigt, gehören aber zum jeweiligen Zyklus. Das löst das prinzipielle Problem nicht, verhindert aber, dass sehr kleine Ströme (z.B.: Messfehler, oder bei synthetischen Profilen Pausen) den Mittelwert beeinflussen. Die gewählte Definition ist jene: „Ein Lade-/Entladehalbzyklus dauert so lange bis die Amplitude des Stroms in die jeweils andere Richtung 0,001 C überschreitet.“ Das bedeutet zum Beispiel, dass der Ladehalbzyklus erst beendet ist, wenn ein Entladestrom größer als 0,001 C auftritt. Dieser Zeitpunkt ist das Ende des Ladehalbzyklus und der Startpunkt des folgenden Entladehalbzyklus.

3.3.3 Erweiterung: Ladestandsabhängigkeit

Es tritt noch ein bisher vernachlässigtes Problem auf. Solche Messdaten (Zyklenfestigkeit in Abhängigkeit von der Entladetiefe) gelten streng genommen nur, wenn der Speicher vorher voll geladen war, auf eine bestimmte Entladetiefe entladen wird und anschließend wieder voll geladen wird.

Das Prinzip der in Folge verwendeten Implementierung der Ladestandsabhängigkeit der Alterung soll nun kurz erläutert werden. Die Implementierung soll folgende Punkte erfüllen:

- für tiefe Zyklen (große Differenz zwischen Start- und Endwert des SOC's) soll das Modell eine hohe Genauigkeit aufweisen, da diese die Alterung wesentlich beeinflussen.
- das Modell soll die Alterung in Abhängigkeit von der transportierten Ladungsmenge pro Zyklus beschreiben

Eine einfache Variante wäre, die Zyklen immer so zu behandeln, als wie wenn sie von einer Vollladung ausgehend starten würden. Für diese Option spricht, dass sehr intensive Zyklen automatisch nur von einem hohen Speicherinhalt starten können, dh. bei großen Energietransfers ist der Fehler klein. Im Extremfall, bei einer Zyklientiefe von 100 Prozent DOD ist er Null, da der Speicher

nur einen 100 Prozent Zyklus durchlaufen kann, wenn er vorher voll geladen war. Ein Zyklus mit einer Zyklientiefe von 10 Prozent kann einen beliebigen Startwert größer als 90 Prozent DOD haben, also auch zB von 90 Prozent DOD auf 100 Prozent DOD entladen und wieder auf 90 Prozent DOD geladen werden. Ob dieser Zyklus für den Speicher dann ähnliche Auswirkungen auf die Lebenszeit hat ist fragwürdig. Für Anwendungen (zb. Photovoltaik mit Tagesspeicher) wo diese Fälle nicht häufig auftreten ist der Einsatz dieser Methode auf jeden Fall denkbar. Eine Untersuchung über Teilzyklen bei Lithium Ionen Batterien[KAT03] hat gezeigt, dass die längsten Lebensdauern bei Teilzyklen um den Startwert von 50 Prozent DOD liegen. Daraus kann geschlossen werden, dass das Grundmodell für Lithium Ionen Batterien die Lebensdauer eher pessimistisch abschätzt, da die zu Grunde liegenden Daten ja bei einem Startwert von 100 Prozent DOD ermittelt wurden und dort die Alterung am schnellsten fortschreitet.

Auch für diesen Fall bietet sich wieder die Möglichkeit an, die Differenz der beiden SOC's als Zyklientiefe eines imaginären Zyklus, der bei 100 Prozent SOC startet und endet anzunehmen, und den dafür berechneten Alterungswert wieder mit einem Faktor zu multiplizieren um auf ein brauchbares Ergebnis zu erhalten, falls die Daten von solchen Untersuchungen vorhanden sind.

Die zwei oben genannten Prinzipien sind in der folgenden Abbildung gegenübergestellt. Um die Situation einfacher darstellen zu können, wird hier nur eine stufenförmige Entladung betrachtet. Jede Stufe wird hier als ein eigener Teilzyklus behandelt.

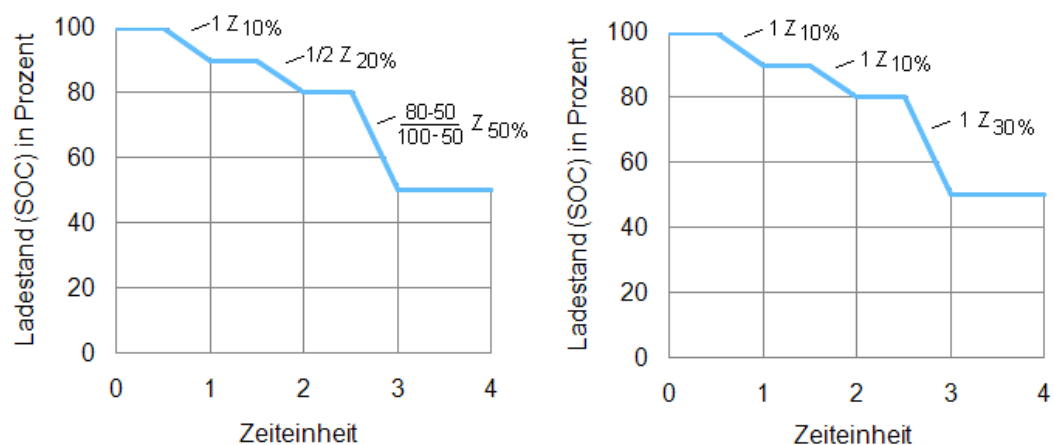


Abbildung 12: Methode 1(li) und 2(re)

Bei der linken Methode ist für die Auswahl des verwendeten Teilzyklus der

untere Wert des SOC's maßgeblich und wird dann noch zusätzlich mit einem Faktor gewichtet, der proportional der Tiefe des Zyklus bezogen auf den untern SOC ist. Das bedeutet, dass zum Beispiel für den Teilzyklus Entladen von 80 Prozent SOC auf 50 Prozent SOC, der Alterungswert eines 50 Prozent Zyklus mit dem Faktor $(80-50)/50$ gewichtet wird, um die Abhängigkeit von der transportierten Ladung zu erreichen, da ja nur ein $(80-50)/50$ tel der Ladung eines 50 Prozent Zyklus transportiert worden ist. Im Gegensatz dazu, wird bei der zweiten Methode für den selben Teilzyklus der Alterungswert eines 30 Prozentzyklus ausgewählt, darin ist automatisch auch die Abhängigkeit von der Ladungsmenge enthalten, da ein 30 Prozentzyklus von 100 Prozent SOC bis 70 Prozent SOC verläuft und somit 30 Prozent der Nennkapazität (NC in Ah) an Ladung umgesetzt wird. Eine Abhängigkeit vom Ladezustand ist aber nicht gegeben, die Auswahl erfolgt nur aufgrund der Differenz und müsste mit einem weiteren Faktor berücksichtigt werden.

Beide Methoden liefern für Zyklen die bei 100 Prozent SOC starten das gleiche Ergebnis, außerdem nähern sich die Ergebnisse der beiden Varianten, je größer die Differenz zwischen dem Start SOC und dem End SOC's ist.

Bei Zyklen mit einer kleinen Differenz zwischen Start und End SOC, die bei niedrigen Ladezuständen gefahren werden, sind die Alterungsauswirkungen der ersten Methode größer als die der Zweiten. Als Beispiel sei in Folge ein Zyklus von 10 Prozent SOC auf 0 Prozent SOC erläutert. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass bei vielen chemischen Energiespeichern in der Regel $1/10$ des Alterungswerts eines 100 Prozentzyklus größer ist als der Alterungswert eines 10 Prozentzyklus. In Folge wird die erste Variante implementiert.

3.3.4 Erweiterung: Stromabhängigkeit

Da die Messdaten mit einem bestimmten konstanten Ladestrom bzw. Entladestrom ermittelt wurden (solange es das verwendete Ladeverfahren zulässt), gilt das Grundmodell auch nur für diese Ströme. Damit es für andere Ströme ebenfalls brauchbare Ergebnisse liefert, muss die Stromstärke auch in die Alterung mit einbezogen werden, welches wiederum dadurch geschieht, dass die einzelnen Alterungswerte neuerlich mit einem Faktor multipliziert werden, der dies berücksichtigt. Diese Erweiterung erfordert natürlich schon weitaus mehr Information, als jene, die zur Implementierung des Grundmodells nötig ist, nämlich die genaue Kenntnis über das Alterungsverhalten in Abhängigkeit

des Lade- bzw. des Entladestroms. Im Folgenden ist eine Beispielgrafik für eine solche Messung dargestellt. Die horizontale Achse stellt die absolvierten Zyklen des Speichers dar, auf der vertikalen Achse ist die maximal entnehmbare Kapazität dargestellt. Für verschiedene Stromstärken werden die Kurven eingezeichnet. Meist wird der Ladestrom für alle Kurven gleich gehalten und es wird nur der Entladestrom variiert. Abbildung 13 basiert auf den Untersuchungen von Soo Seok Choi und Hong S. Lim über Alterungseffekte von Li Ionen Akkumulatoren [SOO02].

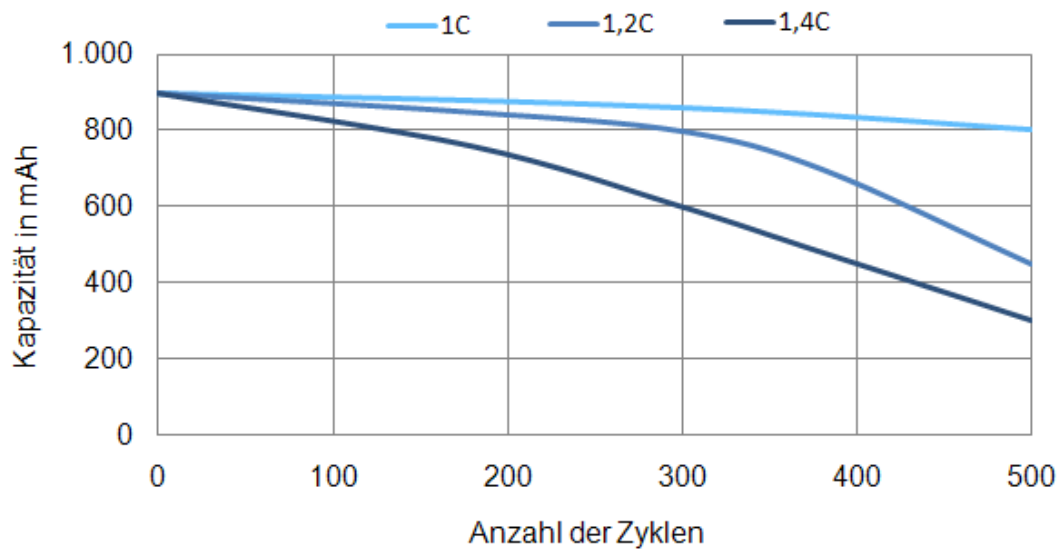


Abbildung 13: Lebensdauer in Abhängigkeit vom Ladestrom

Unter anderem haben sie bei ihren Forschungen auch die Unterscheidung zwischen Ladestrom und Entladestrom herausgearbeitet, und feststellen können, dass ein hoher Ladestrom eine größere Auswirkung auf die Alterung bewirkt als ein hoher Entladestrom. Abbildung 13 zeigt die jeweils entnommene Ladung für verschieden Ladeströme in Abhängigkeit der geleisteten Zyklen. Da die ermittelten Kennlinien bis zu jenen Punkten, wo nur mehr 80 Prozent der Nennkapazität entnommen werden kann, fast linear verlaufen, wird dies in einer ersten Näherung auch angenommen. Somit müssen nur die einzelnen Schnittpunkte der Kurven mit einer horizontalen Geraden, die bei 80 Prozent der Nennkapazität verläuft, ermittelt werden und die abgelesenen Zyklen mit einer Bezugszykluszahl in Relation gebracht werden um die Gewichtungsfaktoren zu erhalten. Die Bezugszykluszahl wird in erster Linie durch die erweiterten Angaben (bei welchem Lade/Entladestrom die Zykluslebensdauer ermittelt wurde) der Messdaten des Grundprinzips bestimmt, da die beiden Messungen

aufeinander abgestimmt werden müssen, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erhalten.

Aufgrund der langen Messdauern ist die Datenlage für solche Zusammenhänge sehr gering. Um zum Beispiel einen 1Ah Akku mit 1000 1C Zyklen messen zu können, sind mindestens ca. 100 Tage notwendig. Es gilt: bei 1C ca: $1h * 1,5 * 1000$ für das Laden + $1h * 1000h$ für das Entladen = 2500h = 104 Tage, hierbei sein noch angemerkt, dass 1C Zyklen schon in den Hochstrombereich fallen, dh. es ist eine eher optimistische Abschätzung. Ein weiterer Effekt ist, dass ein Akkumulator nur einmal verwendet werden kann. Aus den vorhandenen Daten konnte ermittelt werden, dass die Alterung (im Punkt wo nur mehr 80 Prozent der Nennkapazität vorhanden ist) schneller als quadratisch mit der Stromstärke zunimmt. Dies erfolgte durch Vergleich der drei Schnittpunkte der Kapazitätskurven in Abbildung 13 mit der Horizontalen bei 80 Prozent NC.

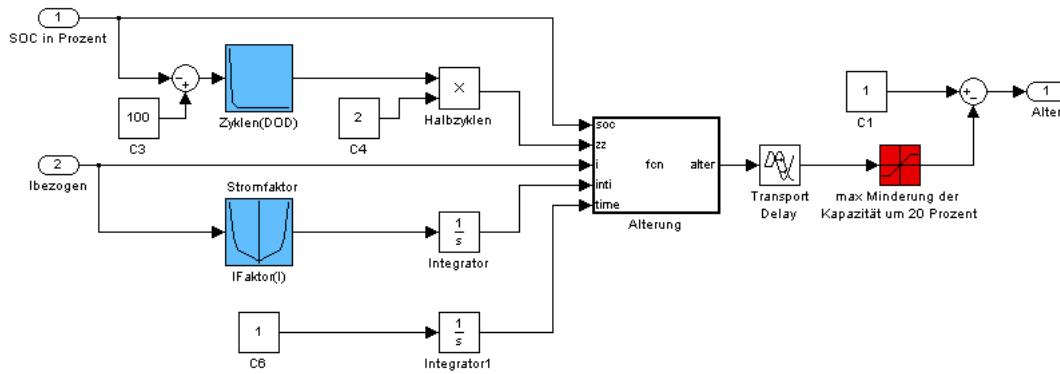
3.3.5 Erweiterung: Kalendarische Alterung

Bei Lithium Ionen Batterien tritt auch eine von der Belastung unabhängige Alterung auf. In diesem Modell wird der Verlauf der kalendarischen Alterung linear angenommen. Dazu wird mit Hilfe eines Integrators die vergangene Zeit gemessen und entsprechend der kalendarischen Lebensdauer gewichtet. Dieser Wert wird zu dem Alterungswert, der aufgrund der Belastung der Batterie auftritt, addiert. Der Benutzer kann somit die maximale Lebensdauer des Batteriesystems einstellen.

3.3.6 Implementierung in Matlab

Das Alterungsmodell wird in das Batteriemodell eingebettet und beschreibt die Verkleinerung der Kapazität der Zelle. Die wesentlichen Komponenten sind in folgender Abbildung ersichtlich. Nicht dargestellt ist die zeitabhängige Alterung, sie wird zur zyklenabhängigen Alterung addiert und stellt eine von der Belastung der Batterie unabhängige Alterung dar. Sie wird so eingestellt, dass eine Batterie nach 20 Jahren nur mehr 80 Prozent der Nennkapazität aufweist (aus [SAF08], lifetime at 20 °C perm).

Hinter dem Funktionsblock „Alterung“ verbirgt sich eine C Datei, dass die Alterung nach dem in diesem Kapitel vorgestellten Prinzipien berechnet (siehe



Abbildungung 14: Alterungsmodell

Anhang). Dazu wird aus dem Verlauf des SOC's der aktuelle Teilzyklus ermittelt. Ist dieser abgeschlossen, wird der Alterungswert für diesen ermittelt. Für den Alterungswert eines Teilzyklus werden drei Faktoren berechnet, die multiplikativ miteinander verknüpft sind. Der erste Faktor wird aus der Zyklenzahl, die am Eingang „zz“ anliegt berechnet. Der zweite Faktor wird aus dem Start und End SOC des Halbzyklus berechnet und ist proportional zum Ladungstransport durch die Batterie während eines Halbzyklus. Der dritte Faktor entspricht einem gewichteten Mittelwert der Stromamplitude. Dieser wird dadurch erreicht, dass dem aktuellen Strom je nach Amplitude ein Gewichtungswert zugewiesen wird und anschließend ein Mittelwert über den Halbzyklus berechnet wird. Hierbei ist zu beachten, dass dem Strom der Gewichtungsfaktor vor der Mittelwertbildung zugeordnet wird. Es wird nicht dem Strommittelwert ein Gewichtungsfaktor zugeordnet. Da die Zuordnung von Strom und Gewichtungsfaktor nicht linear ist (hier quadratisch) macht das einen Unterschied. Um die Mittelwertbildung durchführen zu können, wird die Zeitdauer des Halbzyklus berechnet. Dazu wird ein Halbzyklus als Zeitdauer zwischen zwei Strom-Richtungswechsel definiert. Ein Ladezyklus beginnt immer mit einem Strom kleiner Null und endet beim nächsten folgenden Strom größer Null (positiver Stromfluss bedeutet hier Entladen). In der Implementierung zur Messung der Zeitdauer wird nicht Null als Grenze herangezogen, sondern der Bereich zwischen ± 0.001 C. Dies geschieht deswegen, da sonst Zyklen mit langen Pausen den gewichteten Strommittelwert verringern würden. Das wird im Allgemeinen dadurch nicht verhindert, für den Fall von Pausen mit $I = 0$ aber schon. Darauf ist bei der Auswahl (bzw. bei der Auswertung) von synthetischen Soll-Leistungsprofilen zu achten. Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, wird die Zeit mit Hilfe eines Integrators ermittelt. Prinzipiell besteht hier und bei der Berechnung des gewichteten Strommittelwerts bei sehr lan-

gen Simulationszeiträumen die Gefahr eines Überlaufs des Integrators. Ist der Alterungswert für den aktuellen Halbzyklus abgeschlossen, wird dieser zum vorhandenen Alter addiert und am Ausgang „alter“ ausgegeben.

Ein „Transport Delay“ Block verzögert die endgültige Rückgabe des Alters. Die Verzögerungszeit hat keine wesentlichen Auswirkungen auf das Modell, da die Alterung in vielen kleinen Schritten und über lange Zeiträume erfolgt. Bei genauer Betrachtung der Ausgangsspannung und des SOC werden diese aber bemerkbar. Die Verzögerungszeit ist erforderlich, da Matlab sonst eine sogenannte „algebraische Schleife“ nicht lösen kann. Durch die Verzögerungszeit wird diese Schleife geöffnet. Das erfolgt dadurch, dass zu jedem Zeitpunkt der Wert am Ausgang des Alterungsblocks schon feststeht. Es ist der Wert, der schon zum aktuellen Zeitpunkt minus Verzögerungszeit berechnet wurde.

Die vorher angesprochenen Auswirkungen auf die Ausgangsspannung und auf den SOC sind darin begründet, dass im Moment der Alterung der SOC sprunghaft steigt. Das geschieht dadurch, dass der Integratorwert (SOC NC) plötzlich nicht mehr durch die alte Kapazität normiert wird, sondern durch eine neue, kleinere. Idealerweise könnte der Integratorinhalt genau um einen so großen Betrag verringert werden, dass der SOC konstant bleibt. Dies wurde hier aber nicht implementiert, da es sich nur um kleine Effekte handelt. Durch den Anstieg des SOC, steigt in der Regel auch die Leerlaufspannung der Batterie, was einen ungewollten Energiegewinn nach sich zieht, der aber sehr gering ist.

Die anschließende Begrenzung und Subtraktion stellt sicher, dass nur Werte zwischen 1 und 0,8 weiterverarbeitet werden. Das ist der Bereich, für den dieses Modell ausgelegt ist. Bei Alterungseffekten größer als 20 Prozent der Nennkapazität treten sehr starke Nichtlinearitäten auf.

Die Werte der in Abbildung 14 verwendeten Tabellen (Zyklen(DOD) und IFaktor(I)) sind im Anhang C angefügt.

4 Verifizierung des Lithium Ionen Modells

In Folge wird zuerst das Batteriemodell (ohne Alterung) auf seine Funktion getestet. In einem zweiten Schritt wird dann die Implementierung der Alterung getestet.

Es werden in diesem Kapitel auch einige Spezialfälle durchbesprochen. Eine genaue Analyse der Ergebnisse zeigt, wie diese zustande kommen. Die aufgetretenen Fehler bei der Implementierung werden hier nicht diskutiert, in besonderen Fällen werden sie aber erwähnt.

Die Testumgebung umfasst im Wesentlichen eine Excel Tabelle die von Matlab in den Workspace eingelesen wird und einen Funktionsblock („Repeating Sequence Stair“) der aus diesen Daten eine Stufenfunktion zusammenstellt. Da die Daten in der Excel Tabelle auf eins normiert sind, werden sie noch mit einem Faktor multipliziert, der die maximal geforderte Leistung (+/-) bestimmt. Anschließend wird das Soll-Leistungsprofil der Batterie zugeführt. Mit Hilfe von zwei Scope Blöcken wird der Verlauf der wichtigen Größen für den Benutzer sichtbar gemacht.

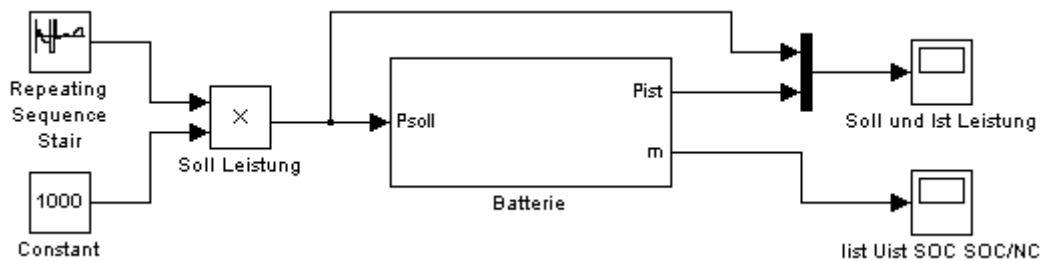


Abbildung 15: Testumgebung

4.1 Verifizierung des Batteriemodells

Um nur die Auswirkungen des Batteriemodells testen zu können, wird das Alterungsmodell durch eine Konstante ersetzt. Diese wird auf eins gesetzt, was keiner Alterung entspricht. Desweiteren werden der Innenwiderstand und die Leerlaufspannung unabhängig vom SOC eingestellt, also als konstant angenommen. Die Einstellungen für eine Zelle werden anhand eines praktisch Beispiels durchgeführt und sind einem Datenblatt entnommen: $NC = 24Ah$, $I_{max_{30s}} = 80 A$, $R_i = 22m \Omega$, $U_o = 13,8V$ (siehe [VAL09]) Die Leistungsbegrenzung am

Eingang des Batteriemoduls wird auf $80\text{A} * 14,6\text{V} = 1168\text{W}$ pro Zelle eingestellt. Die Stufendauer für den „Repeating Sequence Stair“ Block wird auf 1200 sec eingestellt. In 1080 Sekunden sollte die Batterie bei 80A vollständig geladen/entladen sein. Dies stellt zwar einen nicht realistischen Betrieb dar, da laut Datenblatt nur ein Dauerstrom von 30A erlaubt ist, dafür wird auch die Leistungsbegrenzung in derselben Simulation mitgetestet. Der Start SOC Wert wird auf Null gesetzt.

Das Testsignal springt bei $t = 1200$ Sekunden von Null auf -10kW und bleibt auf diesem Niveau, welches über der maximalen Lade-Leistung der Batterie ist. Wie in der Abbildung 16 dargestellt, stellt sich ein Ist-Strom von -75,54A ein. Ein maximaler Ladevorgang sollte in diesem Beispiel aber mit -80,00 Ampere erfolgen, da dies der eingestellte Wert der Strombegrenzung ist. Warum dieser Wert nicht erreicht wird, wird in Folge erläutert. Mit der Soll-Leistung von 10kW und der aktuellen Batteriespannung (kurz nach dem Sprung) wird ein Sollstrom berechnet. Die Batteriespannung ist über den Innenwiderstand vom aktuellen Ist-Strom abhängig. Die sich einstellende Batteriespannung beträgt 15,6V ($= 13,8\text{V} + 0,022\Omega * 75,54\text{A}$). Die daraus resultierende Leistung der Batterie ergibt sich zu -1167,9W, was der Leistungsbegrenzung entspricht, die hier $\pm 1168\text{W}$ beträgt. Diese Leistungsbegrenzung basiert auf der Entladeleistung, im zu Grunde liegenden Datenblatt ist ein „Standard Ladestrom“ von 12A und eine Ladespannung von 14,6V angegeben. Beides wurde hier nicht implementiert. Wie in der Abbildung erkennbar, springt die Batteriespannung nach erfolgter Ladung, wieder auf ihre Leerlaufspannung zurück. Der Spannungsanstieg ist durch den Strom und den Innenwiderstand begründet, ist der Ladestrom Null, ist auch keine zusätzliche Spannung an den Klemmen der Batterie vorhanden. Die Zeitdauer der Ladung kann unter anderem Anhand des Verlaufs des SOC's ermittelt werden. Wie ersichtlich, beginnt dieser ab $t = 1200$ Sekunden zu steigen und erreicht seinen höchst möglichen Wert bei $t = 2343,56$ Sekunden. Dies entspricht einer Ladezeit von 1143,56 Sekunden. Die der Batterie zugeführte Ladung ist somit $75,54\text{ A} * 1143,56\text{ Sekunden}$, was 24Ah entspricht.

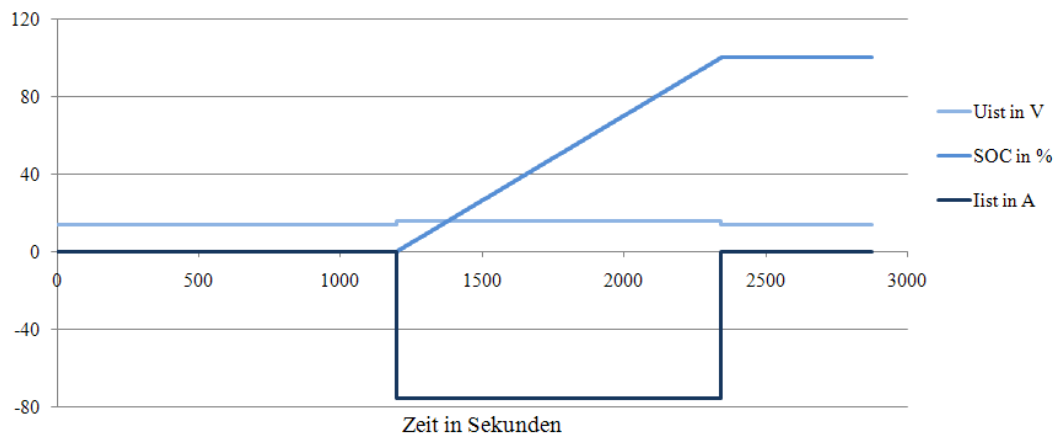


Abbildung 16: Sprung von Leerlauf auf Laden (a)

Ein weiterer Effekt, der bei den Testdurchläufen aufgetreten ist, wird in Folge behandelt. Abbildung 17 zeigt unter anderem den Verlauf von Isoll. Isoll ist die Vorgabe an das tiefer liegende Batteriemodell, das, soweit es möglich ist, diesen Strom auch als Iist zulässt. Der Sprung bei $t = 1200$ Sekunden ist durch den Sprung von Psoll initiiert. Der berechnete Soll-Strom ist -75,54A. Er sollte aber 725 Ampere ($10\text{kW}/13,8\text{V}$) sein um die gewünschte Leistung von der Batterie erhalten zu können. Da der -10kW Sprung der Solleistung schon bei der ersten Leistungsbegrenzung auf -1168W reduziert wird, erreicht dieser das eigentliche Batteriemodell nicht mit voller Amplitude. Die Folge ist ein Isoll mit -75,54A, der gleich dem Iist ist, da keine weiteren Beschränkungen im Batteriemodell auftreten.

Der Sprung des Isoll Verlaufs zum Zeitpunkt $t = 2343$ Sekunden auf -84,64A ist ebenfalls interessant, da er nicht zu erwarten war. Er passiert zu einem Zeitpunkt, wo Iist im gleichen Moment Null wird. Das ist auch die Ursache für diesen Sprung. Dadurch, dass der Ist Strom Null wird, sinkt die Batteriespannung wieder auf ihre Leerlaufspannung. Das Ergebnis der Division Solleistung durch aktuelle Batteriespannung wird betragsmäßig größer und damit auch der Betrag von Isoll. Dies hat aber keinerlei Einfluss auf irgendein anderes Signal, da zu diesem Zeitpunkt die Batterie schon voll geladen ist, und daher keinen Ladestrom mehr zulässt.

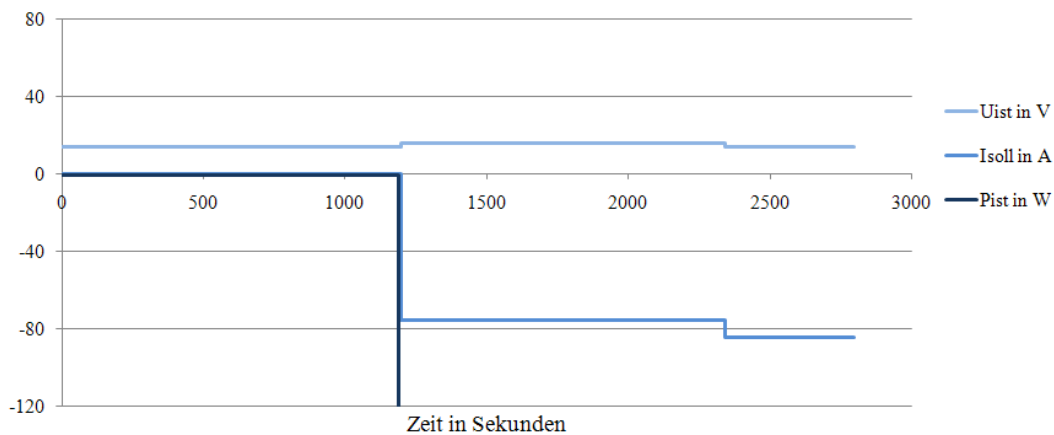


Abbildung 17: Sprung von Leerlauf auf Laden (b)

Da in diesem Modell keine Ladung verloren gehen kann, muss die der Batterie entnommene Ladung gleich groß sein, wie die zuvor Zugeführte. Die folgende Abbildung zeigt einen Ladevorgang, eine Pause und einen anschließenden Entladevorgang. Der Ladevorgang ist gleich dem vorher besprochenen. Der Entladevorgang unterscheidet sich wesentlich vom Ladevorgang. Die Batteriespannung sinkt aufgrund des Innenwiderstandes und des Stroms. Sie ergibt sich zu $13,8\text{V} - 80\text{A} \cdot 0,022\Omega = 12,04\text{V}$. Dies ist der selbe Effekt wie vorherhin, wirkt hier aber genau umgekehrt als beim Ladevorgang. Beide Male wirkt sich der Innenwiderstand nachteilig aus. Beim Laden wird eine höhere Spannung benötigt, beim Entladen wird die von der Batterie zur Verfügung gestellte Spannung verringert. Auffällig ist die Unterschiedliche Dauer des Lade und des Entladevorgangs. Die ist darin begründet, dass die Lade- und die Entladeströme unterschiedlich groß sind. Die Amplitude des Ladestroms wurde vorher schon erläutert (siehe Text zu Abb. 16). Die Amplitude des Entladestroms beträgt hier 80A. Hier spricht nicht die Leistungsbegrenzung an, da die Leistung $80\text{A} \cdot 12,04\text{V} = 963\text{W}$ beträgt, was unter 1168W ist. Dafür spricht aber die Strombegrenzung an, und beschränkt den Strom auf 80A. Dies führt bei gleicher Ladungsmenge zu einer kürzeren Entladezeit. Die Ladezeit ist 1143,56 Sekunden bei -75,54A und die Entladezeit beträgt 1080 Sekunden (7080 - 6000) bei 80A. Die Ladungsmengen sind beim Ladevorgang 24Ah und beim Entladevorgang $80\text{A} \cdot 1080\text{ Sekunden} = 24\text{Ah}$. Es geht keine Ladung verloren.

Wirkungsrad Berechnung, bei konstanter Leerlaufspannung und konstantem Innenwiderstand: Ladevorgang: $75,54\text{A} \cdot 1143,56\text{sec} \cdot 15,46\text{V} = 370,97\text{Wh}$; Entladevorgang: $80\text{A} \cdot 1080\text{sec} \cdot 12,04\text{V} = 288,96\text{Wh}$; Daraus folgt, dass der Wir-

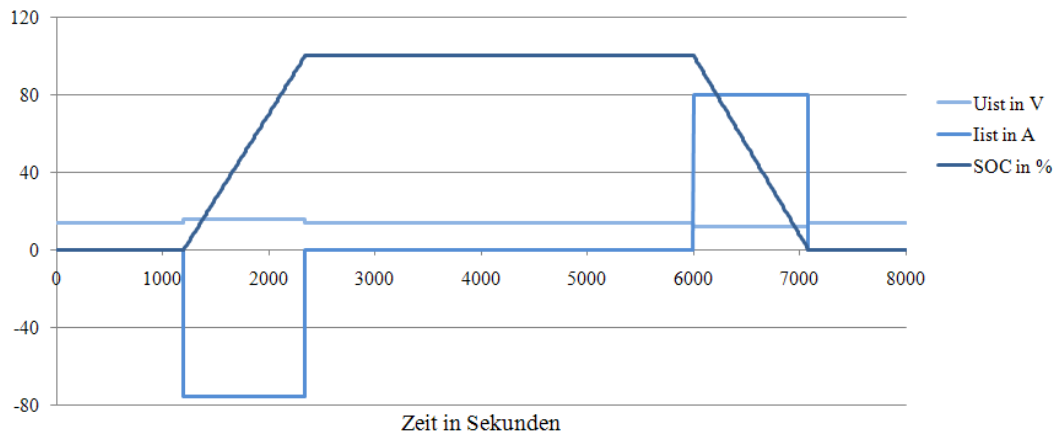


Abbildung 18: Laden und Entladen

kungsgrad (Round trip efficiency) bei 78 Prozent liegt. Die Verluste werden in diesem Beispiel am Innenwiderstand in Wärme umgewandelt. Hierbei ist anzumerken, dass in diesem Beispiel die Verluste für längere Lade/Entlade-Zeiten, mit entsprechend kleinerem Strom, kleiner werden. Im gleichen Ausmaß wie sich der Strom verkleinert, verlängern sich die Zeiten. Der Spannungsabfall am Innenwiderstand wird aber aufgrund des kleineren Stroms auch kleiner, was zu kleineren Verlusten führt. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass die Verluste quadratisch von Strom (bzw. von den Zeitdauern) abhängen.

Ist der Innenwiderstand vom SOC abhängig, ergibt sich ein anderes Verhalten der Batteriespannung während eines Ladevorgangs. Für die folgende Abbildung wurde ein linear steigender Innenwiderstand angenommen (bei 0 Prozent SOC $0,022\Omega$ und bei 100 Prozent SOC $0,044\Omega$). Die Grafik zeigt einen vollständigen Lade und Entladevorgang. Mit steigendem SOC, steigt in diesem Fall der Innenwiderstand und bei eingprägtem Strom dadurch auch die Batteriespannung. Interessant ist hierbei, dass beim Ladevorgang der Ist-Strom mit steigender Batteriespannung kleiner wird. Da in diesem Beispiel die Leistungsbegrenzung aktiv wird, muss der Strom kleiner werden, wenn die Batteriespannung steigt, sonst würde mehr Leistung aufgenommen als vorgesehen. Beim Entladevorgang bleibt der Strom konstant, da hier die Strombegrenzung wirkt. Die von der Batterie zur Verfügung gestellte Leistung ist in jedem Zeitpunkt noch unterhalb der Schranke (Maximum bei $t=7080$ Sekunden, mit $12V * 80A = 960W$).

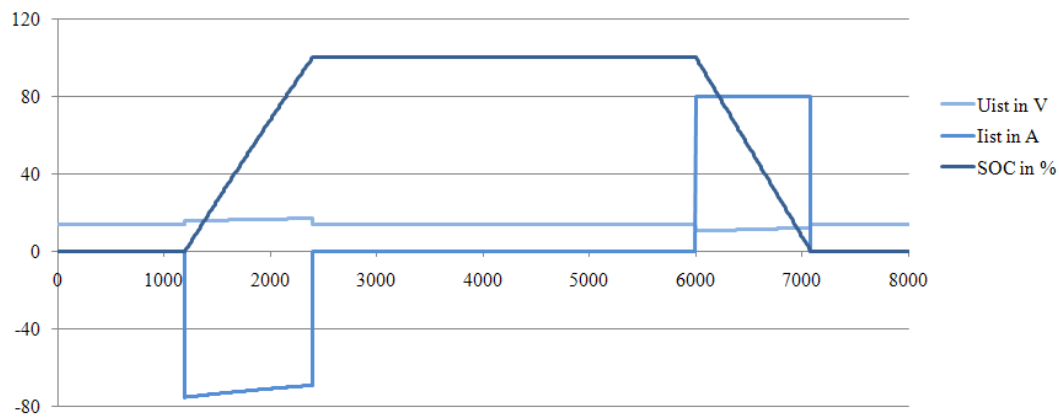


Abbildung 19: Laden und Entladen mit SOC abhängigen R_i

Ist die Leerlaufspannung vom Ladezustand abhängig, hat dies ebenfalls Auswirkungen auf das Verhalten der Batterie. Da das im Allgemeinen so ist, wird in diesem Beispiel die Leerlaufkennlinie der am Anfang beschriebenen Batterie verwendet (siehe [VAL09]). Sie wurde aus der Entladekurve für 0,5 C mit der Annahme eines konstanten Innenwiderstands extrahiert und in der folgenden Abbildung dargestellt.

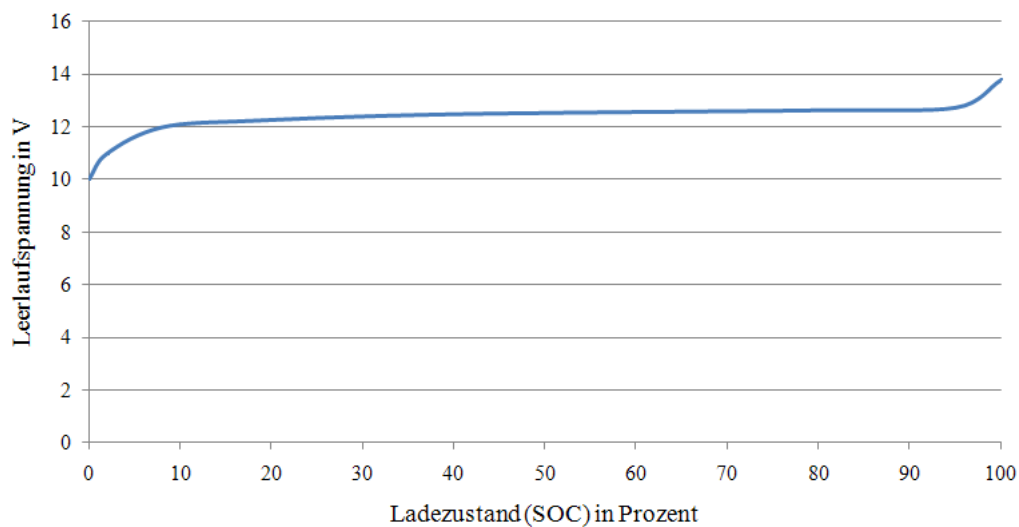


Abbildung 20: Leerlaufspannung in Abhängigkeit vom SOC

Die Leerlaufspannung ist, wie in der Grafik ersichtlich, in weiten Bereichen annähernd konstant. Für Abschätzungen ist es daher möglich mit einer konstanten Batteriespannung zu rechnen. Bei niedrigen Ladezuständen sinkt die Leerlaufspannung. Da laut Datenblatt eine untere Spannung von 10V angegeben wird, ist dies automatisch der Null Prozent SOC Wert. Eine weitere

Entladung ist theoretisch möglich, führt aber zu irreparablen Schäden. Das gleiche gilt auch für die obere Grenze.

Für die folgende Simulation wird der Innenwiderstand wieder als konstant ($0,022\Omega$) angenommen. Mit Hilfe des Leerlaufspannungsdiagramms und dem Innenwiderstand wird die Batterie modelliert. Dies sind jene Daten, die in der Regel für die meisten Batterien zur Verfügung stehen. Solange der Peukert Effekt nicht zu stark auftritt, ist dies eine gute Näherung. Der Peukert Effekt beschreibt die Abhängigkeit der entnehmbaren Ladung von der Stromstärke. Je kleiner die Stromstärke, desto größer ist die Ladungsmenge die der Batterie entnommen werden kann. Er tritt bei den meisten Batterien auf, und ist bei Blei Batterien sehr ausgeprägt (siehe Kapitel 2.6). Deshalb wird bei der Nennkapazität (Nominal Capacity, NC) auch immer der Entladestrom mit angegeben. Dieser ist bei Lithium Ionen Batterien meist $C/5$, und ist in den entsprechenden Normen geregelt. Das Ergebnis der Simulation ist in den folgenden zwei Abbildungen zu sehen. Wie erwartet spiegelt sich die vorher besprochene Leerlaufspannungskennlinie in den Simulationsergebnissen wieder.

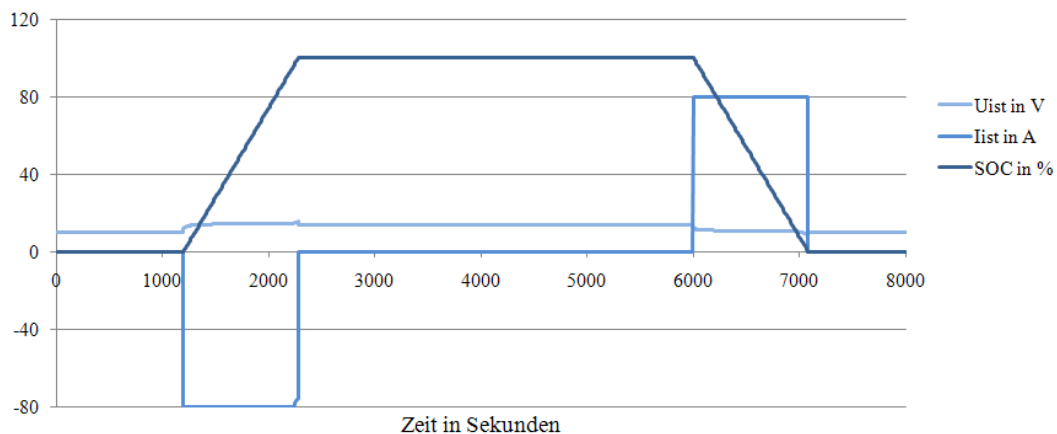


Abbildung 21: Laden und Entladen mit SOC abhängiger Leerlaufspannung

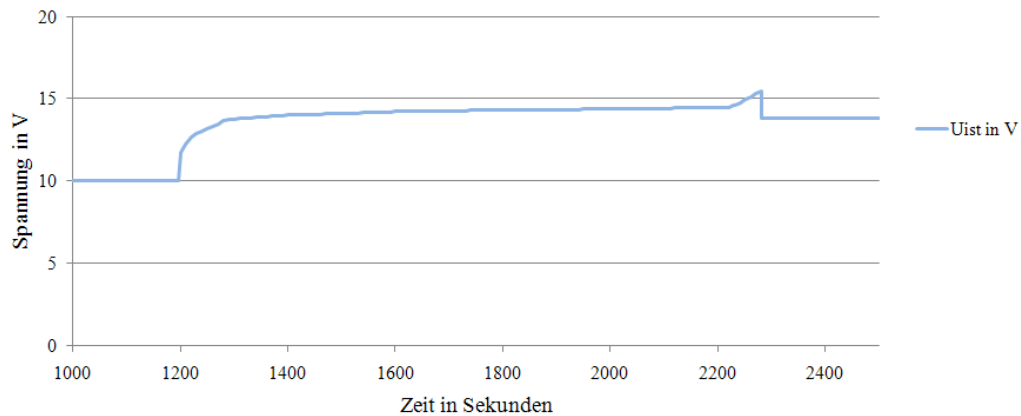


Abbildung 22: Laden mit SOC abhängiger Leerlaufspannung

4.2 Verifizierung des Alterungsmodells

Um die Alterung zu testen, wird das Batteriemodell auf seine einfachste Form gebracht. Innenwiderstand und Leerlaufspannung werden wieder als konstant angenommen ($0,022\Omega$ und $13,8V$). Sonst wird in einem ersten Schritt nichts verändert. Das Ergebnis des Alterungsmodells hat keine Auswirkung auf die Batterie. Das Alterungsmodell berechnet zwar ein „Alter“, dem Batteriemodell wird aber unabhängig davon mit Hilfe einer Konstanten ein Alterungswert eingestellt. Es existiert hier kein Zusammenhang zwischen dem Alter, mit dem das Batteriemodell rechnet und dem berechneten Alter des Alterungsmodells.

Um zu überprüfen ob die Teilzyklen richtig erkannt werden, wird einem Lade-Teilzyklus ein Alterungswert zugewiesen (hier $0,0100$). Einem Entlade-Teilzyklus wird ein anderer Alterungswert zugeordnet (hier $0,0201$). Es hat sich herausgestellt, dass es sinnvoll ist, die zwei Werte so zu wählen, dass wenn unvorhergesehen mehrere gleiche Teilzyklen auftreten, überprüft werden kann, um welche es sich gehandelt hat. Dies ist hier der Fall, solange nicht 100 Entladezyklen auftreten. In der folgenden Abbildung wurden die Achsen nicht beschriftet, da es nur auf die Nulldurchgänge des Stroms und die Stufenhöhe der Alterungssprünge ankommt. Außerdem wurde die Amplitude der beiden Verläufe so skaliert, dass sie in ein gemeinsames Bild passen.

Das Ende des ersten Teilzyklus wird erkannt, wenn der Strom erstmals positiv wird. Die Sprunghöhe entspricht die eines Ladezyklus. Dies deckt sich mit dem aufgezeichneten Stromfluss. Ein negativer Stromfluss bedeutet, dass die Batterie geladen wird. Das Ende des Ladezyklus wird richtig erkannt. Das Ende eines Ladezyklus ist der Anfang eines Entladezyklus. Auch hier stimmen

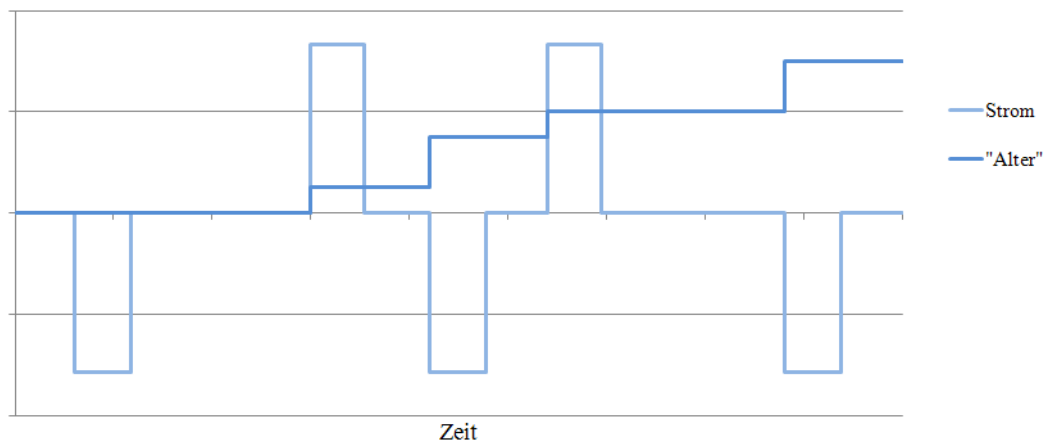


Abbildung 23: Testen der Zyklenerkennung

der Zeitpunkt und die Sprunghöhe (ca. doppelt so groß wie beim Ladezyklus) mit den erwarteten Werten überein. Sobald der Strom wieder negativ wird, ist der Entladezyklus abgeschlossen.

Im nächsten Schritt wird getestet, ob die Stromabhängigkeit richtig implementiert wurde. Dazu wird mit der Stromfaktor Tabelle (siehe Abbildung 14) eine lineare Abhängigkeit von Amplitude und Alterung simuliert (doppelte Stromstärke bedeutet hier doppelte Alterung). Der Alterungswert eines Halbzyklus entspricht dem Mittelwert des gewichteten Stroms. Die Batterie wird einmal mit einem Strom von 1C geladen und entladen, und einmal mit einem Strom von 2C. Da das gesamte Modell durch eine Soll-Leistung gesteuert wird, ist die Vorgabe einer Stromstärke von außen nicht möglich. Um Ströme von genau 1C und 2C zu erreichen, wird eine zu große Leistung gefordert, sodass eine Strombegrenzung anspricht. Diese wird mit 1C beziehungsweise mit 2C implementiert. Des Weiteren wurde der ladestandsabhängige Teil der Alterung deaktiviert, um zu verhindern, dass sich die unterschiedlichen Ladezustände auch noch auf die Alterung auswirken. Die beiden Effekte würden sich überlagern und eine Überprüfung des Ergebnisses erschweren.

In Abbildung 24 sind zwei Alterungsverläufe für verschiedene Ströme schematisch dargestellt. Die beiden Alterungsverläufe sind im gleichen Maßstab eingezeichnet. Auffällig ist, dass die Sprunghöhen während eines Alterungsverlaufs unterschiedlich sind. Die Sprunghöhe ist der Mittelwert des Stroms über den aktuell beendeten Zyklus. Somit fließt die Dauer eines Zyklus linear in den Alterungswert ein. Ein Zyklus, der eine Pause (Zeitpunkte wo der Strom = Null ist) hat, besitzt somit automatisch einen kleineren Alterungswert als

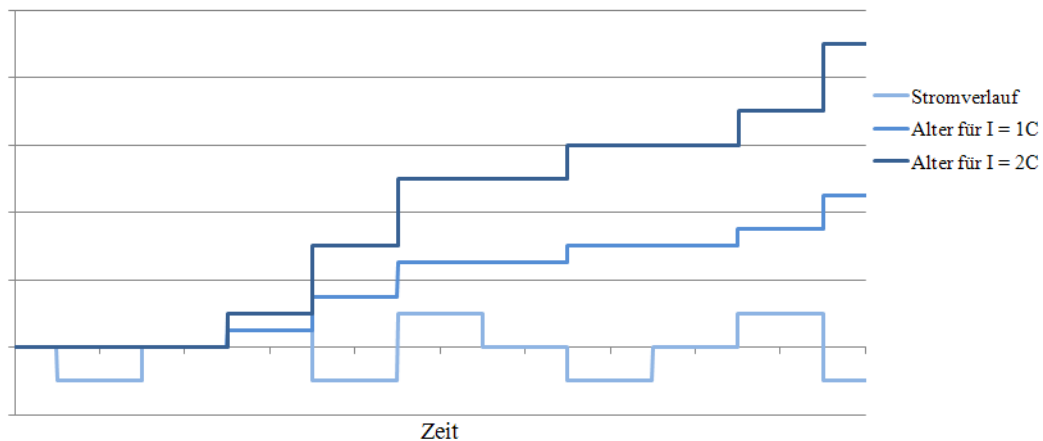


Abbildung 24: Testen des Stromfaktors

ein Zyklus, bei dem die ganze Zeit ein Strom fließt. Um dies zu verhindern, werden in Folge nur mehr Ströme größer als 0,001 C zur Mittelwertbildung herangezogen. Wie erwartet, sind die Sprunghöhen beim Alterungsverlauf für einen Strom von 2C doppelt so groß, wie die für einen Strom von 1C.

Ein weiterer Effekt ist die ladestandsabhängige Alterung. Diese wird implizit durch den Zusammenhang zwischen der Zyklientiefe und den maximal möglichen Zyklen (bei dieser Zyklientiefe) beschrieben. Im Modell wird dieser Zusammenhang in einer Tabelle gespeichert (siehe Abbildung 14). Zur Berechnung des Alterungsbeitrags wird vom aktuell beendeten Halbzyklus die Anzahl der Zyklen ermittelt, die beim niedrigsten SOC Wert maximal möglich sind. Diese Anzahl von maximal möglichen Zyklen spiegelt aber den Fall wieder, dass der Speicher immer wieder voll geladen wird und anschließend bis zu dem bestimmten SOC Wert entladen wird. Ein Halbzyklus muss aber nicht zwingend bei einem vollen Speicher beginnen (oder enden). Deshalb wird der Alterungswert noch mit dem Verhältnis von der umgesetzten Ladungsmenge zu der Ladungsmenge, mit der die Werte der Tabelle ermittelt wurden, gewichtet. Somit ist einerseits eine ladestandsabhängige Alterung implementiert und andererseits auch implizit eine ladungsabhängige Alterung. Dies entspricht der Implementierung der linken Variante in Abbildung 12.

In einem ersten Schritt wird getestet, ob für verschiedene Zyklientiefen die richtige Anzahl von möglichen Zyklen berechnet werden. Dazu wird für Zyklen, die tiefer als 50 Prozent entladen, willkürlich eine maximal mögliche Anzahl von 1000 Zyklen eingestellt, für Zyklen die weniger tief entladen 10000. Der Ladungsabhängige Teil der Berechnung wird nicht deaktiviert. Die Beispiele

werden so gewählt, dass dieser Teil keinen Einfluss haben sollte. Es werden die Zyklen immer bei vollem Speicher gestartet (Entladehalbzyklus), beziehungsweise beendet (Ladehalbzyklus). Das sind die Bedingungen, bei denen die Werte für die Tabelle ermittelt wurden, also ist zu erwarten, dass die berechneten Alterungswerte auch gleich groß sind. Der erwartete Alterungswert ist für einen Halbzyklus entweder $\frac{1}{2 \cdot 1000}$ oder $\frac{1}{2 \cdot 10000}$. Da die Werte der Tabelle für Zyklen angegeben sind, und hier aber Halbzyklen betrachtet werden, tritt hier der Faktor 2 auf. Dies ist eine Vereinfachung und beruht auf der Annahme, dass der Ladevorgang und der Entladevorgang die gleichen Auswirkungen auf die Alterung haben. Diese Annahme stimmt im Allgemeinen nicht (siehe zB: [SOO02]), sie wird aber im Modell durch stromrichtungsabhängige Stromfaktoren modelliert.

Das Ergebnis dieser Simulation ist in folgender Abbildung dargestellt. Nach beenden des ersten Ladevorgangs wird der Alterungswert für diesen berechnet. Wie auch in der Abbildung ersichtlich, beträgt dieser $0,5 \cdot 10^{-3}$. Das entspricht genau dem erwarteten Wert für einen Zyklus, der tiefer als 50 Prozent SOC ist. Das „Alter“, oder der Alterungsfaktor hat keine Einheit, sondern ist jener Faktor mit dem die Nennkapazität verkleinert wird. Mit einem Alterungsfaktor, der kleiner als 1 ist, ergibt sich eine Kapazität der Batterie von $\frac{NC}{0,8 \cdot (1 - \text{Alterungsfaktor})}$. Der zweite Halbzyklus ist ein Entladevorgang von 100 Prozent SOC auf 80 Prozent SOC. Auch hier ist der erwartete und der simulierte Sprung gleich groß ($0,05 \cdot 10^{-3}$).



Abbildung 25: Testen der Alterungsfunktion für verschiedene Zyklentiefen

Da bei der vorherigen Simulation, bei jedem Halbzyklus 100 Prozent SOC erreicht wurden, vereinfachte sich die Berechnung des Alterungswertes. Jetzt werden die Zyklen so gewählt, dass sich die Berechnung nicht vereinfacht. Ausgehend von 60 Prozent SOC findet ein Entladevorgang statt, der bei 32 Prozent SOC in einen anschließenden Ladevorgang übergeht. Der erwartete Alterungs-

wert ergibt sich zu $\frac{1}{2 \cdot 1000} \frac{60-32}{100-32} = 206 \cdot 10^{-6}$. Wie in der folgenden Abbildung ersichtlich, liefert das Modell auch diesen Wert. Der anschließende Ladevorgang endet bei 55 Prozent SOC. Damit ergibt sich ein erwarteter Sprung der Alterung von $\frac{1}{2 \cdot 1000} \frac{55-32}{100-32} = 169 \cdot 10^{-6}$, welcher auch in der Simulation auftritt.

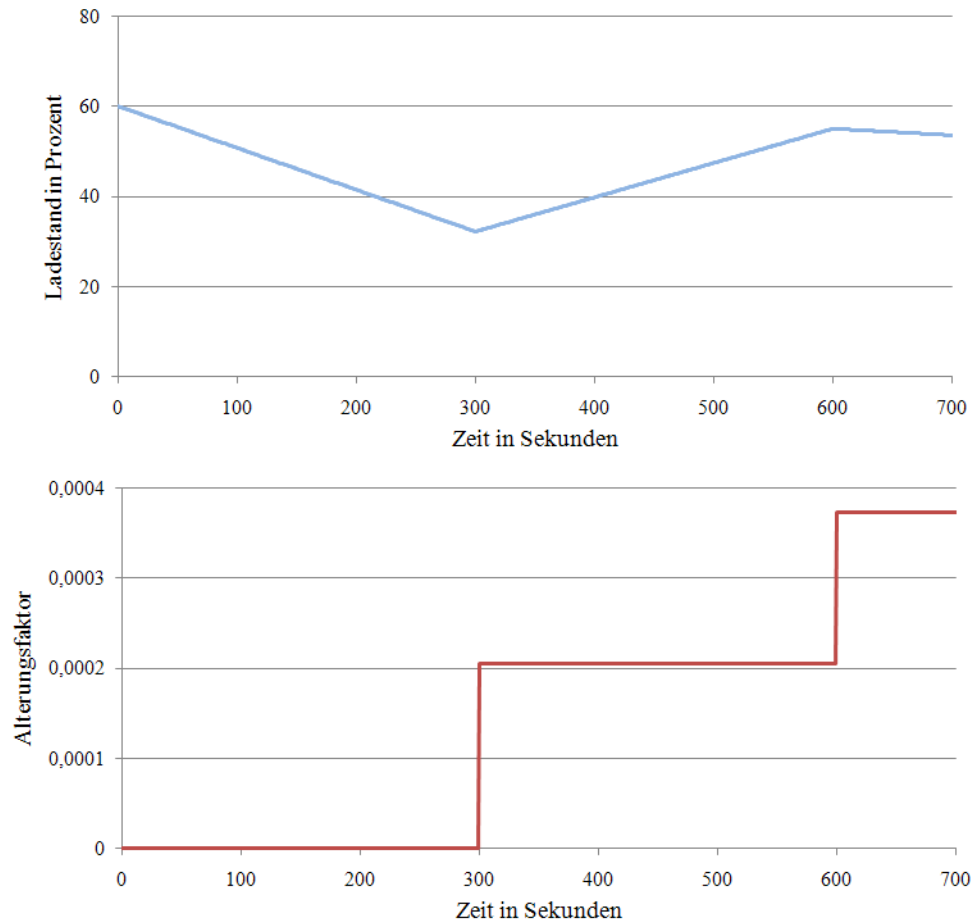


Abbildung 26: Testen der Alterungsfunktion

Die einzelnen Alterungsfaktoren wurden jeweils einzeln getestet. In Folge wird das Alterungsmodell als Ganzes getestet. Um nachvollziehbare Ergebnisse zu erhalten, wird die Amplitude des Lade und Entladestrom konstant gehalten (1C). Dies ermöglicht eine einfache Berechnung des gewichteten Mittelwerts. Ansonsten werden die Tabellen auf realistische Werte eingestellt (die aber aus verschiedenen Datenblättern stammen). Die genauen Werte werden bei der folgenden „händischen“ Berechnung sichtbar.

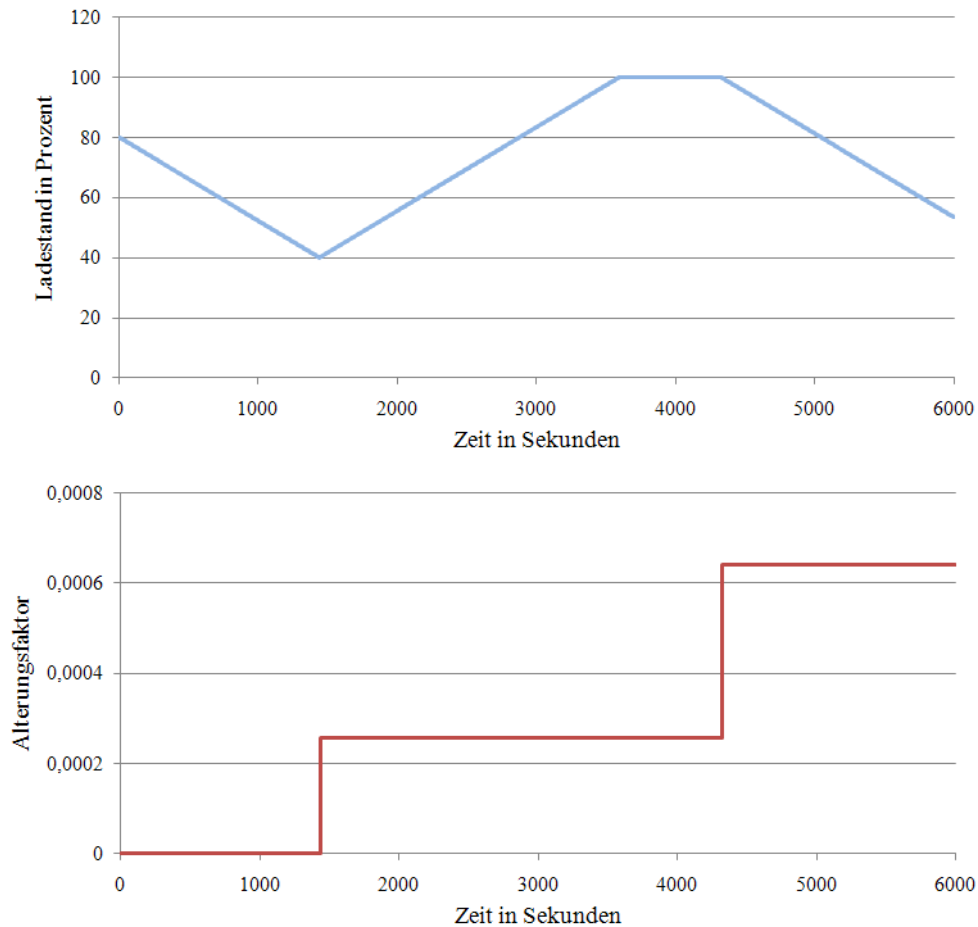


Abbildung 27: Testen der gesamten Alterungsfunktion

Als erstes wird die Batterie von 80 auf 40 Prozent SOC entladen. Für eine Amplitude des Stroms von 1C wird ein Stromfaktor von 5 aus der Tabelle entnommen. Das bedeutet, dass die Batterie mit einem Strom von 1C fünf mal so schnell altert als im Datenblatt angegeben. Der tiefste in diesem Halbzyklus erreichte SOC Wert ist hier 40 Prozent. Die maximale Zyklenlebensdauer für Zyklen von 100 Prozent SOC bis 40 Prozent SOC beträgt bei dieser Implementierung 6500. Da hier nur ein halber Zyklus betrachtet wird, ergeben sich 13000 Halbzyklen. In diesem Fall wird nicht von 100 Prozent auf 40 Prozent

SOC entladen, sondern von 80 Prozent SOC auf 40 Prozent. Deshalb wird der Alterungswert mit dem Verhältnis des Ladungsdurchsatzes und der Ladungsmenge mit der die Tabelle erstellt wurde gewichtet. Es ergibt sich ein Gesamtfaktor von $5 * \frac{1}{13000} * \frac{80-40}{100-40} = 256 * 10^{-6}$. Das bedeutet, dass nach 3900 ($= \frac{1}{256 * 10^{-6}}$) solcher Halbzyklen die Batterie ihr Lebensende erreicht hat, also nur mehr 80 Prozent ihrer Nennkapazität aufweist. Die händische Berechnung und das Ergebnis der Simulation stimmen überein.

Der zweite Halbzyklus ist ein Ladevorgang von 40 Prozent SOC auf 100 Prozent SOC. Der Stromfaktor ist wie vorhin 5, da der Mittelwert des Stroms ebenfalls 1C ist. Der Mittelwert wird dadurch berechnet, dass der gewichtete Strom integriert wird und durch die Dauer des Halbzyklus dividiert wird. Da ein Ladehalbzyklus aber erst abgeschlossen ist, wenn wieder entladen wird, wird nur jene Zeit für die Mittelwertberechnung herangezogen, bei der der Betrag des Stroms größer als 0.001 C ist. Damit wird verhindert, dass lange „Pausen“ den Strommittelwert senken. Es ergibt sich ein Gesamtfaktor von $5 * \frac{1}{13000} * \frac{100-40}{100-40} = 386 * 10^{-6}$. Dieser stimmt mit der Simulation überein (die Sprunghöhe des zweiten Sprungs ist $386 * 10^{-6}$).

Bis jetzt hatte das berechnete Alter keinen Einfluss auf das Batteriemodell. Im nächsten Schritt wird die Entkoppelung der beiden Modelle aufgelöst.

4.3 Verifizierung des gesamten Modells

In diesem Abschnitt wird überprüft, ob das Zusammenspiel der beiden Teilmodelle so funktioniert, wie angenommen.

Das Ergebnis des Alterungsmodells wird jetzt dem Batteriemodell zugeführt. Im Wesentlichen bedeutet dies, dass der SOC NC jetzt mit einem Faktor multipliziert wird, der dem Alter entspricht. Dadurch wird es notwendig zwischen zwei verschiedenen Ladezuständen zu unterscheiden. Der Ladezustand, der die Leerlaufspannung bestimmt, wird weiterhin als SOC bezeichnet. Dieser ist auf die aktuelle Kapazität der Batterie bezogen. Als SOC NC wird der SOC Wert bezeichnet, der sich ergibt, wenn als Bezugskapazität die Nennkapazität gewählt wird. Die Leerlaufspannung wird wieder in Abhängigkeit vom SOC Wert eingestellt.

4.3.1 Sprung der Eingangsgröße

Die Eingangsgröße ist jene Leistung, welche die Batterie liefern soll. Der Soll-Leistungs-Sprung ist so ausgelegt, dass die Batterie die benötigte Leistung so lange zur Verfügung stellen kann, bis sie leer ist. In diesem Fall wird angenommen, dass die Batterie zum Startzeitpunkt voll ist. Desweiteren ist noch keine Alterung aufgetreten, das bedeutet es gibt nur einen SOC. Die Auswirkungen eines Sprungs der Soll-Leistung sind in der folgenden Abbildung dargestellt, und entsprechen genau den Erwartungen.

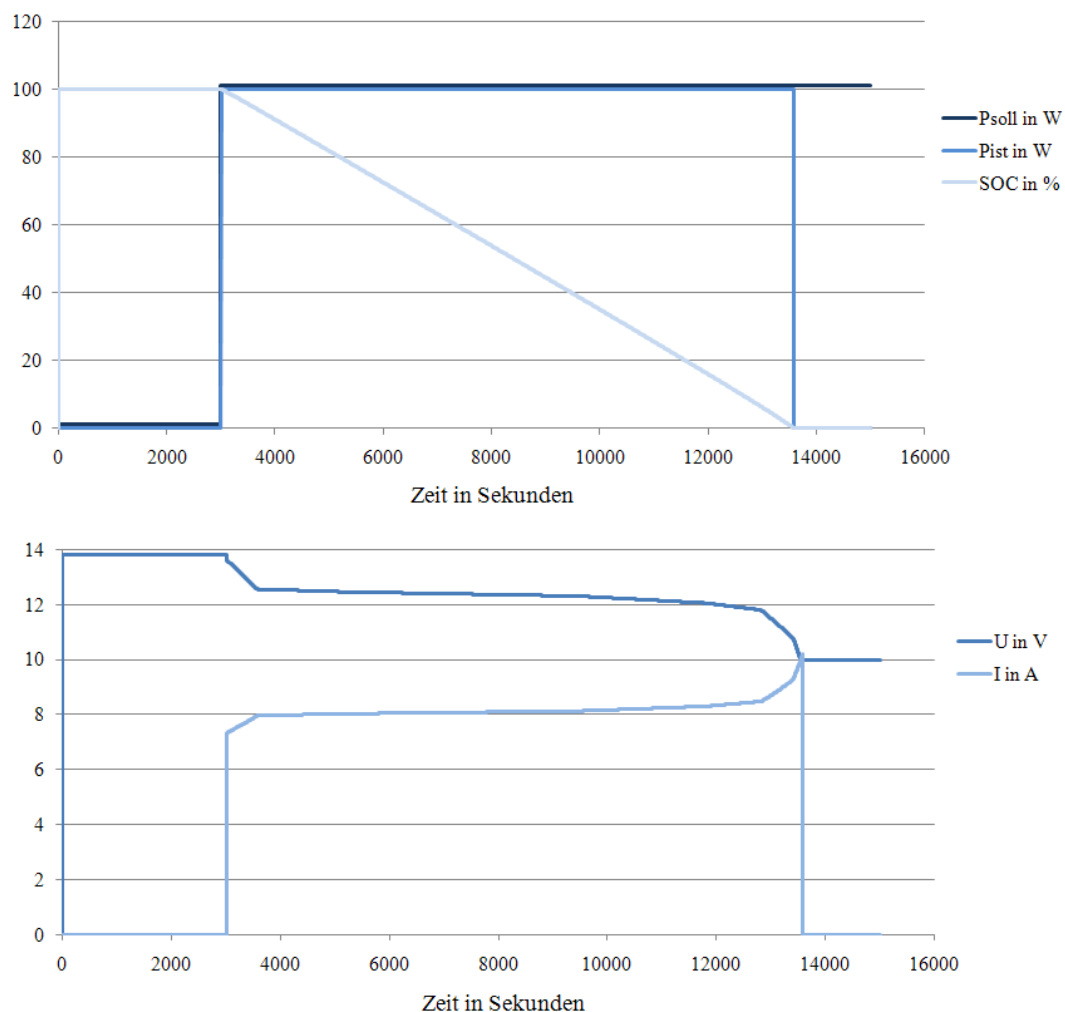


Abbildung 28: positiver Sprung der Soll-Leistung

Bis zum Zeitpunkt 3000 Sekunden ist die Soll-Leistung und die vom Modell berechnete Ist-Leistung konstant Null. Danach springt die Soll-Leistung auf 100W und die Batterieleistung folgt diesem Sprung ohne Zeitverzögerung. Als Auswirkung des Stroms durch die Batterie sinkt in diesem Augenblick die

Batteriespannung um den Betrag Innenwiderstand mal Strom. Aufgrund der Entleerung der Batterie beginnt der SOC zu sinken. Dies bewirkt ein Sinken der Leerlaufspannung und damit auch der Batteriespannung. Die eckige Form des Stromverlaufs und der Batteriespannung am Beginn des Entladevorgangs sind auf die etwas grobe Abbildung der Leerlaufkennlinie im Modell zurückzuführen. Zum Zeitpunkt 13600 Sekunden ist die Batterie leer. Soll- und Ist-Leistung sind nicht mehr gleich, da die Batterie keine Leistung mehr liefern kann, sondern nur mehr geladen werden kann. Der Fall, dass die Batterie geladen wird, ist in folgender Abbildung zu sehen. Auch hier erfüllt das Modell die Erwartungen.

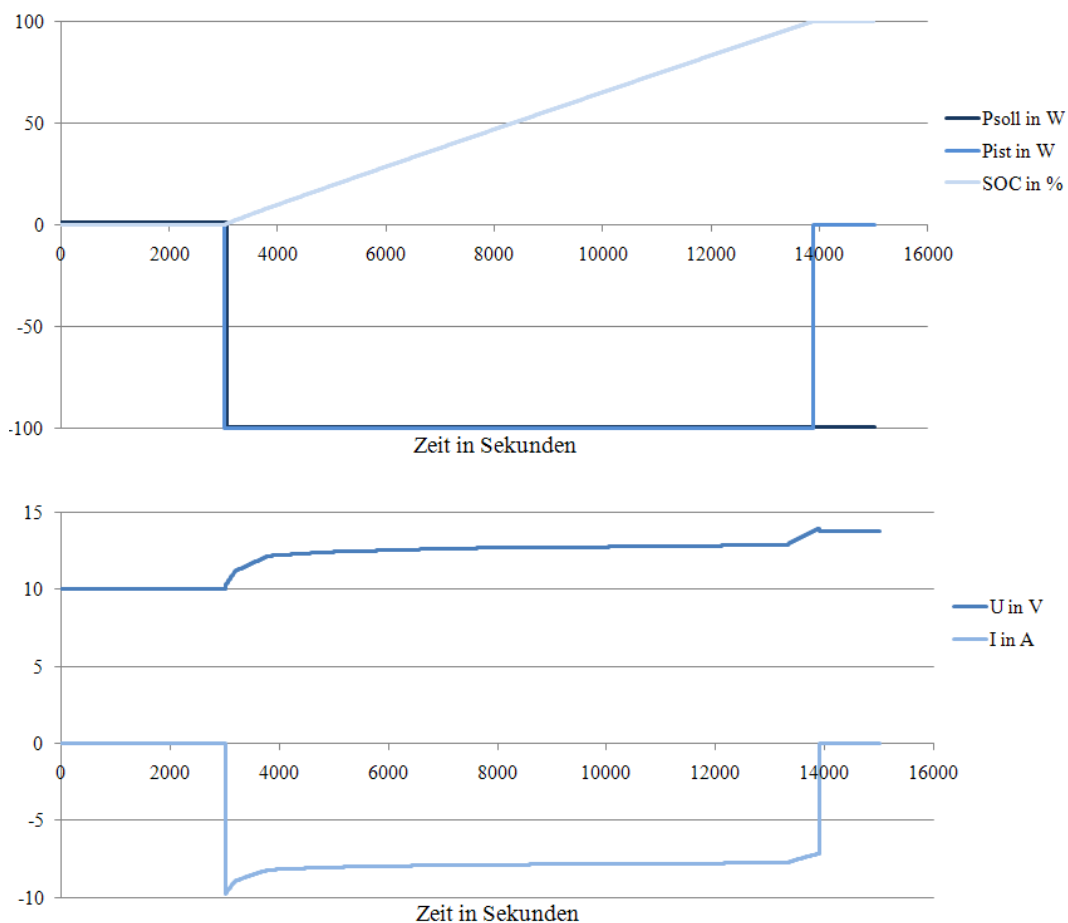


Abbildung 29: negativer Sprung der Soll-Leistung

Es treten wieder die gleichen Effekte auf wie bei der Entladung. Interessant ist die unterschiedliche Zeitdauer des Ladevorgangs und des Entladevorgangs. Deren Ursache liegt darin begründet, dass beim Ladevorgang ein kleinerer Strom ausreicht um die geforderte Leistung zu erhalten als beim Entladevorgang. Beim Entladevorgang wird die Batteriespannung aufgrund des Spannungsab-

falls am Innenwiderstand kleiner. Um an den Klemmen aber die gleiche Leistung (Betrag) zu erhalten, wie beim Ladevorgang, muss der Strom größer sein. Dies führt automatisch zu einer kürzeren Zeitdauer.

4.3.2 Reaktion auf nicht erlaubte Zustände

Wenn eine Batterie leer ist, kann sie nicht mehr entladen werden, auch wenn eine Soll-Leistung von der Batterie gefordert wird. In den folgenden Abbildungen sind die Resultate auf solche nicht durchführbaren Soll-Leistungssprünge zu sehen.

Das Modell wird mit einer Soll-Leistung beaufschlagt, die eine Entladung der Batterie fordert. Der Startwert des SOC's wird auf 0 Prozent eingestellt. Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 30 dargestellt.

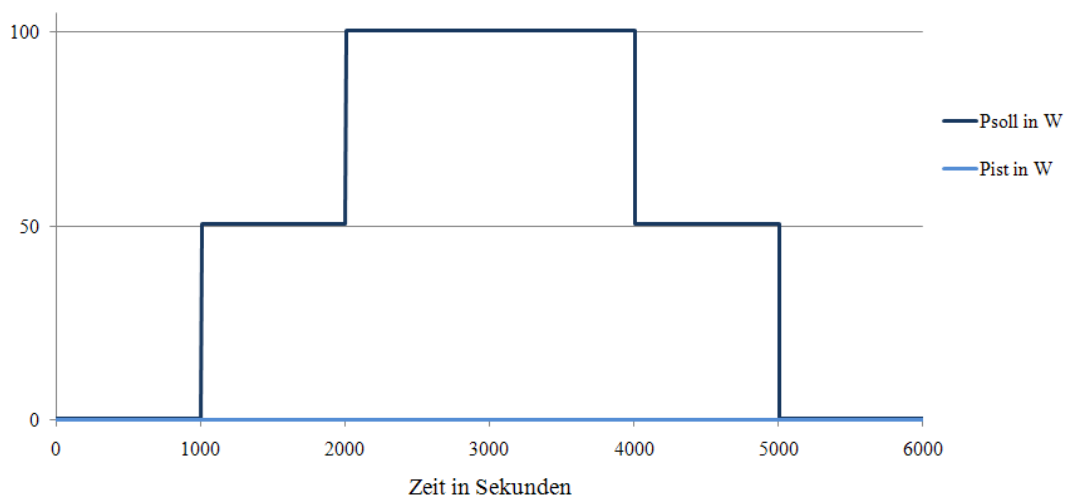


Abbildung 30: Reaktion auf „unerlaubtes“ Entladen

Die Soll-Leistung springt stufenförmig auf 100W und wieder auf 0W zurück. Die Ist-Leistung bleibt, wie gewünscht, konstant auf Null Watt. Das bedeutet automatisch, dass der Strom ebenso konstant Null ist, da die Batteriespannung immer größer 0V sein muss (der Fall, dass sich im Betrieb eine Batteriespannung von 0V einstellt, ist mit diesem Modell nicht simulierbar, siehe Kapitel 3.2, „Strombegrenzung für Matlab“). Wenn der Strom konstant Null ist, folgt daraus, dass sich auch der SOC und damit auch die Leerlaufspannung nicht ändern. Die Verläufe des SOC's und des Stroms entsprechen einer Geraden und sind hier nicht extra dargestellt. In der folgenden Abbildung ist der Fall für

ein unerlaubtes Laden dargestellt. Der Startwert des SOC's wird auf 100 Prozent eingestellt. Der Soll-Leistungssprung ist diesmal stufenförmig von 0W auf -100W und wieder zurück auf 0W. Dieser Verlauf entspricht einem Ladevorgang. Auch in diesem Fall liefert die Simulation das richtige Ergebnis, nämlich eine Ist-Leistung konstant Null.

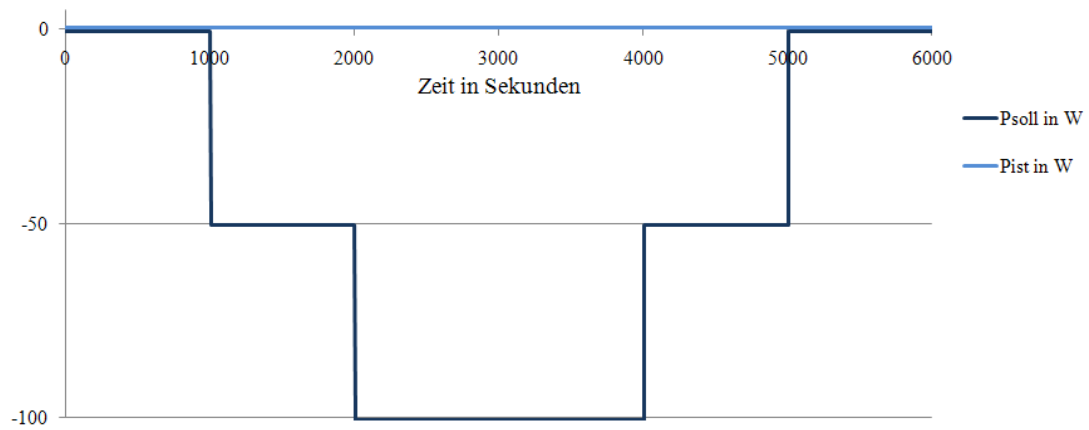


Abbildung 31: Reaktion auf „unerlaubtes“ Laden

4.3.3 Alterung nach 3000 Zyklen

Bis jetzt wurde das gesamte Modell nur auf kurzfristige Fehler getestet. Nun folgt eine Überprüfung die auch die Auswirkung der Alterung testet. Die Einstellungen des Modells sind so gewählt, dass die Batterie nach 3000 Zyklen (80 Prozent Entladetiefe bei einem Lade-/Entladestrom von C/5) ihr Lebensdauerende mit 80 Prozent der Nennkapazität erreicht. Dazu wird eine „genaue“ Simulation (maximale Schrittweite 1 Sekunde) über einen Simulationszeitraum von $108 \cdot 10^6$ Sekunden (ca 3,5 Jahre) gestartet und die letzten Zyklen dargestellt und überprüft.

In Abbildung 32 ist das Simulationsergebnis für den 3000sten Zyklus dargestellt. Die Zeitangabe in der Abbildung entspricht nicht der Simulationszeit, da diese aufgrund ihrer Größe nicht sinnvoll darstellbar ist. Der in der Abbildung gewählte Nullpunkt entspricht der 107970006sten Sekunde der Simulation (ein Zyklus dauert 36000 Sekunden). Am Verlauf des SOC's ist zu erkennen, dass sich dieser wie gewünscht zwischen 100 Prozent und 20 Prozent bewegt. Mit den Werten des SOC NC zu den Zeitpunkten, wo der SOC 100 Prozent beträgt, kann direkt auf den Kapazitätsrückgang geschlossen werden. In diesem Fall beträgt zum Zeitpunkt 25000 der SOC NC 80,0033 Prozent. Das bedeutet, dass die Kapazität der Batterie zu diesem Zeitpunkt nur mehr 80,0033 Prozent der Nennkapazität besitzt, also ihr Lebensende erreicht hat. Das Modell arbeitet auch hier wie gewünscht.

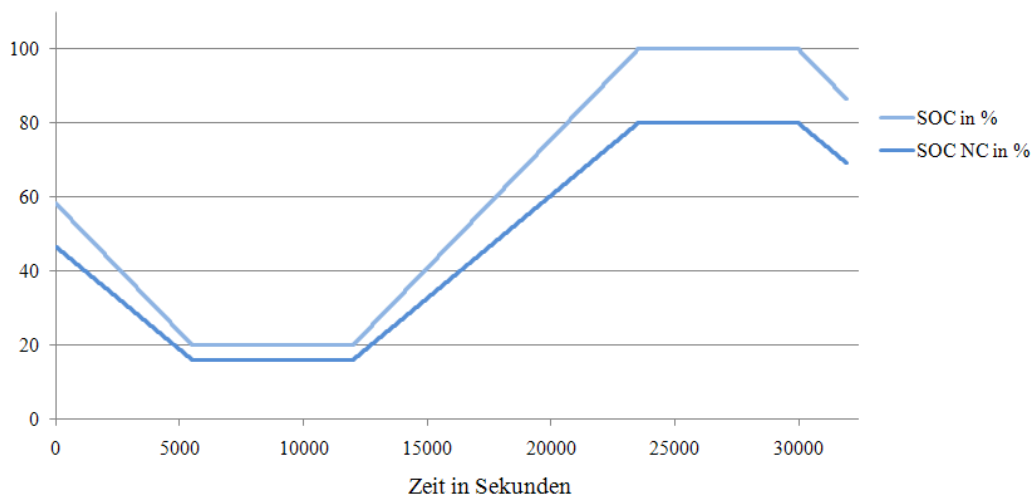


Abbildung 32: der 3000ste Zyklus

4.3.4 Unerwünschte Modelleffekte

Beim Testen des gesamten Modells treten zwei Effekte auf, die nicht beabsichtigt waren. Beide haben die selbe Ursache und werden in Folge beschrieben. Die Alterung der Batterie ändert sich sprunghaft mit dem Beenden eines Halbzyklus. Dadurch ändert sich auch der aktuelle Wert des SOC's abrupt. Da die Höhe der Leerlaufspannung im Allgemeinen vom SOC abhängt, ändert sich auch diese in gleicher Weise. Dadurch kommt es zu unerwünschten Sprüngen bei der Batteriespannung und beim SOC Verlauf.

Der zweite Effekt basiert darauf, dass der SOC Wert größer als 100 Prozent wird, was eigentlich in diesem Modell nicht vorgesehen ist. Am Ausgang des SOC Untermodells erscheinen aufgrund der Begrenzung nur SOC Werte von 0 bis 100 Prozent. Vor der Begrenzung tritt aber in bestimmten Fällen ein Wert größer 100 Prozent auf. Dies ist genau dann der Fall, wenn die Batterie voll geladen wird und im Anschluss die Kapazität aufgrund des neuen Alters verkleinert wird. Dadurch steigt der SOC auf über 100 Prozent. Das bedeutet, dass mehr Ladung in der Batterie gespeichert ist als erlaubt. In der Simulation macht sich dieser Effekt dadurch bemerkbar, dass der SOC Wert auf 100 Prozent bleibt, obwohl die Batterie entladen wird. Dies ist solange der Fall, bis der SOC Wert vor der Begrenzung kleiner als 100 Prozent ist. Dann sinkt auch der SOC Wert wieder. Es kommt zu einer scheinbaren Verzögerung des Sinkens des SOC Werts in Bezug auf den Entladestrom. Diese Zeit ist aber in der Regel sehr klein gegenüber der Zeit des Halbzyklus und vom Entladestrom abhängig. Würde die Batterie bei einem Halbzyklus von Nennkapazität auf 80 Prozent der Nennkapazität altern, wären 20 Prozent der Nennkapazität zu viel in der „gealterten“ Batterie gespeichert. Nach der Alterung würde sich ein Ladezustand von 125 Prozent ergeben ($100 * \frac{NC}{NC*0,8}$). Da eine Batterie aber nicht mit einem Halbzyklus ihr Lebensende erreicht, ergeben sich scheinbare Verzögerungen im Bereich von Sekunden. Bei einer Zyklenfestigkeit von 1000 Zyklen bei einem Entladestrom von 1C ergeben sich zum Beispiel $\frac{0,25*NC}{1C} * 3600 * \frac{1}{2*1000} = 0,45$ Sekunden. Im Vergleich zu einer gesamten Entladezeit von 3600 Sekunden ist das eine Ungenauigkeit von 0,125 Promille. Ein interessanter Aspekt ist hier aber auch, dass durch die Verkleinerung der Kapazität der Batterie Energie zugeführt wird. Da die in der Batterie zu viel gespeicherte Ladungsmenge bei 100 Prozent SOC wieder entladen wird, ist die dazugehörige Leerlaufspannung die von 100 Prozent SOC. Dies hat zur Folge, dass der Batterie mehr Energie entnommen werden kann als zugeführt

wurde. Beim Aufladen wurde die Ladung bei einer niedrigeren Spannung zugeführt, beim Entladen aber bei einer höheren Spannung entnommen. Dieser Effekt hängt stark mit der Leerlaufkennlinie der Batterie zusammen. Für eine vom SOC unabhängige Leerlaufspannung ist die zugeführte Energie und die entnehmbare Energie gleich. Bei den hier besprochenen Effekten wird der Einfluss des Innenwiderstands nicht behandelt. In der folgenden Abbildung ist ein Simulationsbeispiel dargestellt.

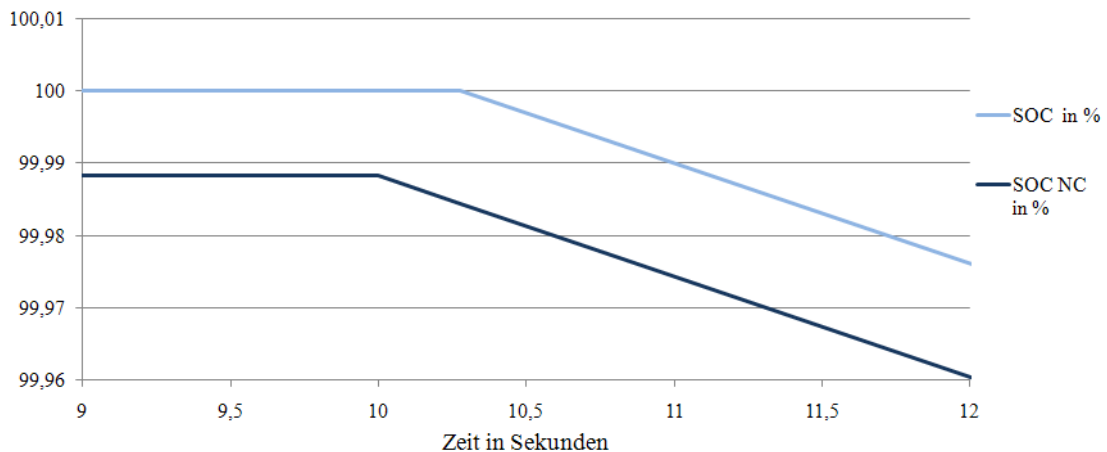


Abbildung 33: verzögerte Reaktion des SOC Verlaufs

In diesem Fall ist der Speicher schon von Beginn an gealtert. Dieser Sachverhalt ist dadurch ersichtlich, dass der SOC und der SOC NC nicht gleich sind. Ab dem Zeitpunkt 10 Sekunden wird der Speicher entladen. Wie vorher besprochen, beginnt der SOC NC sofort zu sinken, da er direkt proportional zum Stromintegral ist. Der SOC hingegen verweilt solange auf 100 Prozent, bis die durch die Alterung plötzlich entstandene, jetzt überschüssige Ladung abgegeben ist.

Da das Alter der Batterie um eine Sekunde verzögert am Ausgang ausgegeben wird, sollte der SOC Wert genau eine Sekunde nach dem Ende eines Halbzyklus einen kleinen Sprung aufweisen. Die Verzögerung kann im Prinzip beliebig klein gewählt werden (siehe Kapitel 3.3.6). Abhängig von den gewählten Zeitdauern der Simulation (min/max step size) werden diese kleinen Sprünge sichtbar oder nicht. Wird die maximale Schrittweite kleiner als die eingestellte Verzögerungszeit des Alters eingestellt, entspricht das Simulationsergebnis den Erwartungen. Allerdings erfordert dies eine sehr lange Rechenzeit. In folgendem Beispiel ist die maximale step size mit 0,1 Sekunden eingestellt.

Zum Zeitpunkt 4000 Sekunden beginnt der Entladevorgang, der zuvor auf 83,15

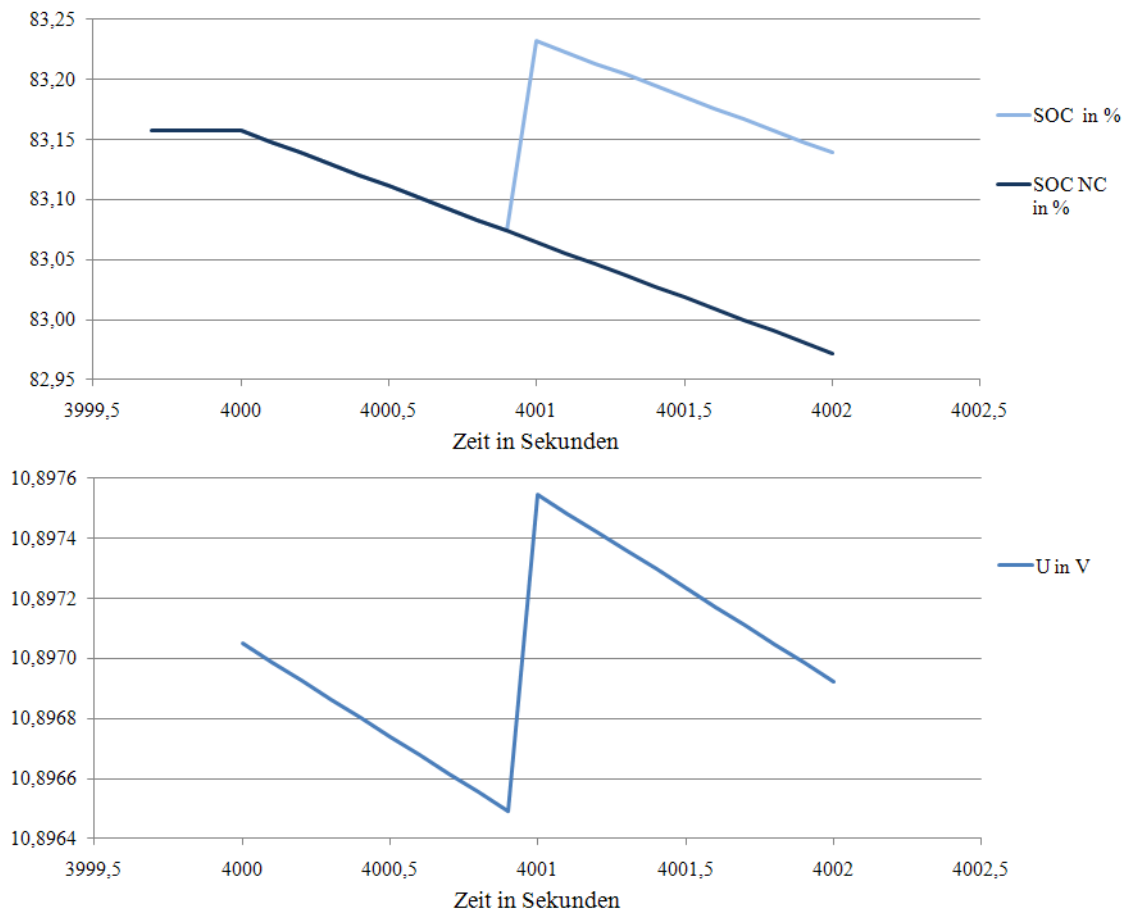


Abbildung 34: Sprung im SOC und Spannungs Verlauf

Prozent SOC geladenen Batterie. Zu diesem Zeitpunkt ist auch der vorhergegangene Halbzyklus beendet, welcher ein Ladevorgang war. Genau eine Sekunde später wird aufgrund der Alterung der Batterie durch den vorangegangenen Ladevorgang die Kapazität verkleinert. Dadurch steigt bei gleichbleibender Ladung der SOC sprunghaft. In Abbildung 34 beginnt der SOC Verlauf schon 0,1 Sekunden zu früh zu steigen. Dies ist auf die Maximale Stepsize von 0,1 Sekunden zurückzuführen. Zwischen zwei Berechnungsschritten wird hier linear interpoliert. Der Sprung des SOC schlägt sich auf den Verlauf der Leerlaufspannung nieder, und somit auch auf die Batteriespannung. Da die Leerlaufspannung im Bereich von 80 Prozent SOC relativ unabhängig vom SOC ist, fällt der Sprung der Batteriespannung sehr klein aus. Der fallende Trend der Batteriespannung in Abbildung 34 basiert darauf, dass die Batterie entladen wird. Dadurch sinkt der SOC und damit auch die Leerlaufspannung.

Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, müssen jene Tabellen die die Al-

terung beschreiben aufeinander abgestimmt werden. Die ist im Allgemeinen sehr schwierig, da in der Regel bei den in den Datenblättern aufgelisteten Werten nicht alle notwendigen Parameter angegeben sind. Für die folgenden Simulationen wird für die Alterung in Abhängigkeit von der Zyklientiefe die Kurve aus dem Datenblatt [SAF08] für ein Lithium Ionen System verwendet. Da im Datenblatt keine Angaben über die Stromstärke zu finden sind, wird angenommen, dass diese $C/5$ ist. Für die Auswirkungen hoher Ströme auf die Lebensdauer wird die Publikation [SOO02](Bild auf Seite 134 oben) verwendet. Für Ströme kleiner $1C$ wird die Alterung linear mit der Stromstärke angenommen. In Folge wird getestet, ob sich das Modell so verhält, wie es die implementierten Kennlinien vorgeben.

Bei einem Lade- und Entladestrom von $C/5$ und einer Entladetiefe von 100 Prozent SOC sollte das Modell bei 1500 Zyklen das Lebensende erreichen. Bei einer Entladetiefe von 80 Prozent SOC, sollten 3000 Zyklen erreichbar sein.

Da im oben genannten Datenblatt die Entladetiefe bei 80 Prozent endet, könnte es sein, dass damit Zyklen gemeint sind, die die Batterie mit jeweils 80 Prozent der Nennkapazität belasten, oder Zyklen die jeweils bei 80 Prozent Entladetiefe (auf die aktuelle Batteriekapazität bezogen) enden. Wenn im Datenblatt weitere Werte größer als 80 Prozent angegeben sein würden, müsste es sich auf jeden Fall um den aktuellen SOC Wert handeln. Dies folgt daraus, dass es sonst nicht möglich wäre die Messreihe durchzuführen ohne die Batterie zu überladen. In Folge wird angenommen dass es sich um den aktuellen DOD Wert handelt, also um 80 Prozent der aktuellen Kapazität. Die Zyklenzahl für volle Zyklen wird aus dem Datenblatt [SAF08] auf 1500 extrapoliert, und im Modell eingestellt. Das Modell wird mit 1500 vollen Zyklen beaufschlagt und liefert beim letzten Zyklus die geforderten 80 Prozent Nennkapazität. Als nächstes wird die Alterung für 80 Prozent Zyklen getestet. Dafür wird im Modell eine kleine Änderung vorgenommen, sodass es möglich ist, eine untere Schwelle für die Entladung festzulegen, die über Null Prozent SOC ist. Auch für diesen Fall stimmt das Ergebnis mit den Erwartungen überein (Lebensende bei 3000 Zyklen). Der hier simulierte Zeitraum beträgt $108 \cdot 10^6$ Sekunden (ca. 3,5 Jahre). Je nach Genauigkeit und Einstellungen der Simulation dauert ein Durchlauf von 4 Minuten bis 18 Stunden (nach oben offen). Die übrigen Fälle werden nicht extra überprüft, da die Simulationszeit bis zum Lebensende für kleine Zyklientiefen stark steigt und vom Modell nur andere Werte aus einer Tabelle ausgelesen werden.

Wird die maximale Schrittweite sehr groß gewählt (hier zum Beispiel 1000 Sekunden), werden die Sprungstellen der Signale oft nicht richtig erkannt. Die Auswirkungen sind in folgender Abbildung zu erkennen. Es werden an Stelle von Sprüngen teilweise Rampen berechnet. Das ist am Beispiel des Stromverlaufs gut zu erkennen. Dieser sollte in dem behandelten Fall rechteckig sein. Das Simulationsergebnis zeigt aber einen teilweise rampenförmigen Verlauf. Die Alterung der Batterie stimmt trotzdem mit dem erwarteten Ergebnis überein. Desweiteren ist die Abweichung der Alterung zwischen einem „genauen“ Simulationsdurchlauf (maximale „step size“ 1 Sekunde) und einem „Ungenauen“ (maximale „step size“ 1000 Sekunden) sehr gering (nach $100 \cdot 10^6$ Sekunden ist sie kleiner als 1 Promille). Warum dies so ist, konnte nicht ermittelt werden. In den hier behandelten Fällen sinkt die Rechenzeit linear beim Erhöhen der maximalen Stepsize. Deshalb ist auch die Simulation mit großen Schrittweiten interessant, um einen Überblick über die zu erwartenden Ergebnisse zu erhalten.

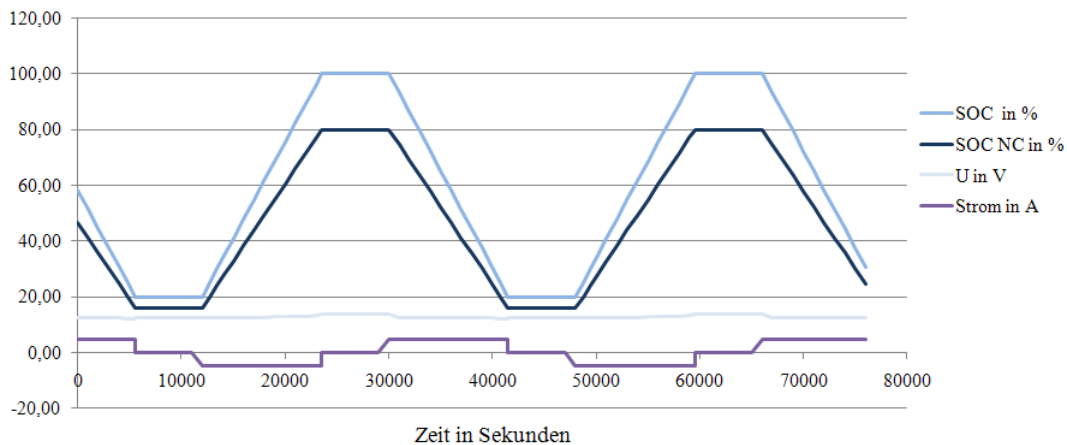


Abbildung 35: Auswirkungen einer zu großen Schrittweite

Wird die Verzögerungszeit beim Alterungsmodell kleiner als die maximale Schrittweite eingestellt, kommt es zu unerwünschten Modellergebnissen bei Sprungstellen. In der folgenden Abbildung ist so eine Situation dargestellt. Die Eingestellte maximale Schrittweite beträgt 1000 Sekunden, die Verzögerungszeit beim Alterungsmodell 1 Sekunde. Bei der Berechnung des Stromverlaufs treten offensichtlich Fehler auf. Der Stromverlauf weist Anstelle von Sprüngen Sägezahnverläufe auf. Auch hier sollte der Strom rechteckförmig verlaufen.

Die Verzögerungszeit der Alterungsfunktion hat auf das kurzzeitige Verhalten der Batterie so gut wie keinen Einfluss, da die Änderungen des Alters sehr klein sind. Deshalb wird sie in Folge auf 10000 Sekunden gesetzt, um solche Fälle zu vermeiden.

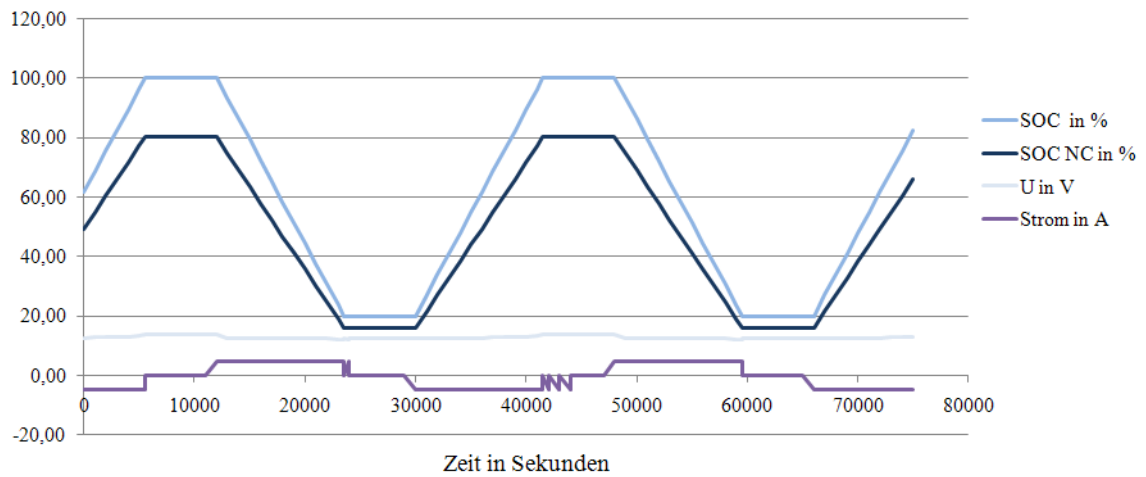


Abbildung 36: Auswirkungen einer zu kleinen Verzögerungszeit

5 Lebensdauer Simulationen mit dem Lithium Ionen Modell

In diesem Kapitel werden verschiedene Effekte in Zusammenhang mit der Alterung von Lithium Ionen Batterien behandelt. Dazu wird das im vorigen Kapitel beschriebene und getestete Modell verwendet. Die meisten der Effekte treten nicht nur bei Lithium Ionen Akkumulatoren auf, sondern auch bei anderen chemischen Energiespeichern. Der Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften der Batterie wird nicht simuliert.

Falls nicht explizit erwähnt, beträgt der Lade und Entladestrom $C/5$ und die Zyklientiefe 80 Prozent, die Kapazität der Batterie 24Ah und die Nennspannung ca. 12,4V. Die folgenden Simulationsergebnisse sind mit den hier angeführten Einstellungen für das Lösungsverfahren in Matlab Simulink erstellt worden: Solver Options = Variable Step; Solver = ode45 (Dormand-Prince); Max step size = 1000 oder 1; Min step size = 0.0001; Initial step size = auto; Relative tolerance = 0.001; Absolute tolerance = auto; Shape preservation = Disable all; Number of consecutive min steps = 1; Tasking and sample time options: Higher priority value indicates higher task priority = on; Zero-crossing control = Use local settings; Time tolerance = $10 \cdot 128 \text{eps}$; Algorithm = Adaptive; Signal threshold = auto; Number of consecutive zero crossings = 1000;

5.1 Zyklen unterschiedlicher Leistung

In diesem Abschnitt wird untersucht wie sich Zyklen mit unterschiedlicher Leistung, aber mit gleicher Energie, auf die Alterung der Batterie auswirken. Die Entladehalbzyklen starten bei 100 Prozent SOC. Es wird mit einer konstanten Leistung jeweils solange entladen, bis der Batterie 150Wh (ca. die Hälfte der Nennenergie) entnommen worden sind. Beim anschließenden Ladevorgang wird die Batterie mit einer im Betrag gleich großen Leistung solange geladen, bis sie wieder voll ist. Bei dieser Simulation ist zu beachten, dass die Zyklen unterschiedliche Zeitdauern aufweisen, ein Zyklus mit 100W dauert ca. halb so lange wie ein Zyklus mit 200W. Eine Aufbereitung der Ergebnisse ist in Abbildung 37 dargestellt. Auf der horizontalen Achse ist die Leistung normiert auf 300W aufgetragen. Auf der vertikalen Achse sind die, für die jeweilige Leistung, erreichten Zyklen angegeben. Sie sind auf 1324 Zyklen normiert. Zusätzlich ist

bei einigen Werten die Lebensdauer in Jahren angegeben. Die resultierende Kurve spiegelt die Lebensdauer in Zyklen für verschiedene Leistungen wieder.

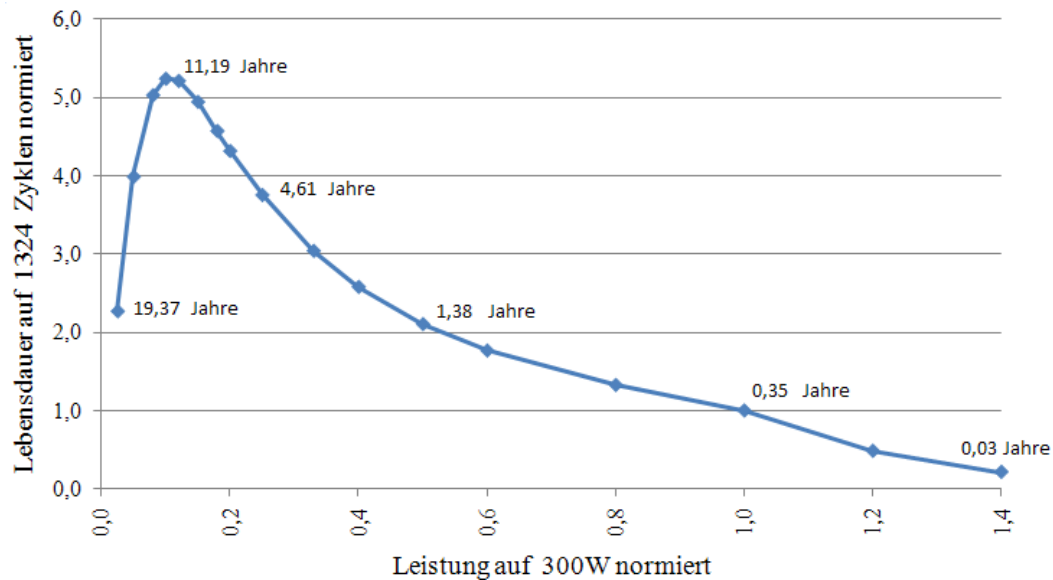


Abbildung 37: Lebensdauer in Abhängigkeit von der Leistung

Für sehr kleine Leistungen in Relation zum Bezugsfall wirkt sich die zeitabhängige Alterung, die unabhängig von der Belastung ist, stark aus. Aufgrund der kleinen Leistung der Zyklen, dauern die Zyklen lange und haben aufgrund des kleinen Stroms auch eine kleine Auswirkung auf das Alter. Da das maximale Alter in diesem Fall mit 20 Jahren angenommen ist, ist beim ersten hier eingezeichneten Wert (19,35 Jahren) die Alterung aufgrund der Belastung durch die Zyklen vernachlässigbar. Steigt die Leistung der Zyklen, steigt auch die Anzahl der Zyklen, die bis zum Lebensende erreicht werden, da die einzelnen Zyklen kürzer sind. Dies erfolgt so lange, bis sich die Alterung aufgrund der Belastung durch den größer werdenden Strom auswirkt und die erreichte Zyklenzahl wieder sinkt. In diesem Fall wird die erreichte Anzahl der Zyklen bis zum Lebensende maximal. Für größere Leistungen steigt der Strom weiter an und der Anteil an der Alterung aufgrund der Belastung durch die Zyklen steigt, und senkt damit die erreichbaren Zyklenzahlen. Die Summe, der in der Batterie gespeicherten (und wieder entnommenen) Energie ist in erster Näherung bei allen Zyklen gleich (da die Verluste unterschiedlich sind, ergeben sich kleine Abweichungen). Damit entspricht auch der Punkt mit der höchsten Zy-

klenzahl ($5,25 * 1324 \approx 6944$ Zyklen) jenem Betriebspunkt ($0,1 * 300 = 30\text{W}$), bei dem über die gesamte Lebenszeit (bei 30W 11,25 Jahre) die meiste Energie gespeichert/entnommen wird. Die Simulationsergebnisse sind im Anhang D aufgelistet.

5.2 Auswirkungen einer Überdimensionierung des Batteriespeichers

Hier wird angenommen, dass ein Batteriespeicher zyklisch geladen und entladen wird. Die Lade- und Entladeleistung ist gleich groß (100W). Die Entladezeitdauer ist konstant (hier 8560 Sekunden). Der Ladevorgang der Batterie dauert so lange, bis die Batterie wieder voll ist. Die Leistung wird so gewählt, dass der Lade-/Entladestrom für den ersten Fall ca. $C/3$ (hier 8A) groß ist. Die Energiemenge eines Entladevorgangs beträgt 80 Prozent der Nennenergie der Batterie (hier ca. 300Wh). Für den zweiten Fall wird die Kapazität der Batterie doppelt so groß gewählt. Dies geschieht dadurch, dass im Modell eine doppelt so große Batteriekapazität eingestellt wird. Die Lade-/Entladeleistung und die Energie bleiben aber gleich.

Bei diesem Beispiel ist zu beachten, dass der Ladestrom und der Entladestrom unterschiedlich groß sind. Wie groß diese genau sind, hängt von der jeweiligen Batteriespannung ab. Diese ist wiederum vom SOC abhängig, der sich durch die Alterung bedingt ändert.

Erster Fall: nach 1305 Zyklen ist die Lebensdauer der Batterie erreicht (ab ca. 1265 Zyklen kann die Entladezeit nicht mehr erreicht werden, da aufgrund des Leistungsabfalls am Innenwiderstand ein größerer Strom fließt als in der obigen Überschlagsrechnung angenommen, dieser Umstand wird aber nicht näher beachtet, da sich die daraus ergebenden Unstimmigkeiten nur auf die letzten 40 Zyklen auswirken)

Zweiter Fall: nach 8056 Zyklen ist die Lebensdauer der Batterie erreicht, das entspricht ca. der sechsfachen Lebensdauer des ersten Falls.

Es folgt eine grobe Abschätzung ob das Ergebnis der Simulation plausibel ist. Die Lebensdauer für $C/5$ Zyklen mit 80 Prozent Entladetiefe wird mit 3000 Zyklen angenommen (siehe Abbildung 11), für kleine Ströme wird die Auswirkung der Alterung linear interpoliert, damit folgen $3000 * \frac{3}{5} = 1800$

Zyklen für die obere Grenze des ersten Falls. Mit einer maximalen Lebensdauer von 20 Jahren (in diesem Fall sind das 26315 Zyklen) hat die zeitabhängige Alterung einen Anteil von ca. 7 Prozent ($\frac{1800}{26315} = 0,068$) an der gesamten Alterung und wird vernachlässigt.

Für den zweiten Fall ist aufgrund der doppelten Kapazität der bezogene Strom $C/6$ und die minimale Entladetiefe 40 Prozent. Für eine Entladetiefe von 40 Prozent folgen aus Abbildung 11 10000 Zyklen. Damit ergeben sich unter Berücksichtigung des kleineren Stroms $10000 * \frac{6}{5} = 12000$ Zyklen als obere Grenze. Die zeitabhängige Alterung kann bei dieser Abschätzung nicht vernachlässigt werden, da sie einen Anteil von ca. 50 Prozent an der gesamten Alterung hat ($\frac{12000}{26315} = 0,46$). Daraus ergibt sich eine Zyklenzahl von ca. 6000 (12000 - 6000). Das Simulationsergebnis liegt mit 8056 Zyklen deutlich über der Abschätzung. Dies lässt sich durch die sehr grobe Abschätzung der zeitabhängigen Alterung erklären, die hier ja eigentlich den Fall für 12000 Zyklen abschätzt und nicht den Fall für 6000 Zyklen.

Für die deutlich höhere Lebensdauer des zweiten Falls sind im Wesentlichen drei verschiedene Effekte verantwortlich. Der erste Effekt ist der, dass die Strombelastung der einzelnen Zellen bei einer Verdoppelung der Kapazität halbiert wird. Dieser Effekt wirkt sich vor allem bei hohen Stromstärken aus, da für große Ströme (hier 1C) die Alterung quadratisch mit der Stromstärke zunimmt (siehe Abbildung 13 im Kapitel 3.3.4), für Ströme kleiner 1C ist die Alterung linear angenähert.

Der zweite Effekt beruht darauf, dass im zweiten Fall die Batterie nur halb so tief entladen wird, wie im ersten Fall. Dies führt ebenfalls zu einer wesentlich längeren Lebensdauer (siehe Abbildung 11 im Kapitel 3.3.1)

Der dritte Effekt ist von prinzipieller Natur und hat positive und negative Auswirkungen auf die Lebensdauer. Er basiert darauf, dass sich bei einer Verdoppelung der Kapazität der Innenwiderstand der Batterie halbiert. Daraus ergibt sich eine viermal kleinere Verlustleistung. Das führt zu kürzeren Ladezeiten. Es wird mit einem kleineren Strom entladen, aber trotzdem die gleiche Leistung an den Klemmen geliefert, da die Klemmenspannung größer ist. Daraus folgt auch eine geringere Entladetiefe. Interessant ist in diesem Beispiel, dass der Ladestrom größer wird, was sich negativ auf die Lebensdauer auswirkt. Dies ist auf den kleineren Innenwiderstand bei gleich großer Ladeleistung zurückzuführen. Dazu folgt eine kurze Erklärung: Eine Batterie mit 10V Leerlaufspan-

nung und einem Innenwiderstand von 0Ω wird mit $100W$ geladen. Es muss ein Strom von $10A$ fließen ($\frac{100W}{10V} = 10A$, positiver Stromfluss bedeutet hier, dass die Batterie Leistung aufnimmt). Jetzt wird der Innenwiderstand auf 1Ω erhöht, die Ladeleistung soll weiterhin $100W$ betragen. Für den Ladevorgang gilt $P = R \cdot I^2 + U_o \cdot I$, die Werte eingesetzt ergibt sich $100W = 1\Omega \cdot I^2 + 10V \cdot I$, die Lösung der quadratischen Gleichung ist $+6,18A$ (und $-16,18A$). Es müssen also nur $6,18A$ fließen um an den Klemmen $100W$ zu erhalten. In diesem Beispiel ist der Ladestrom immer kleiner als der Entladestrom (außer $R_i = 0$, dann sind sie gleich). Dadurch wirkt sich bei einer Verkleinerung des Innenwiderstands der negative Effekt des höheren Ladestroms weniger stark aus als der positive Effekt der Verkleinerung des Entladestroms.

In Abbildung 38 sind die Simulationsergebnisse für verschieden große Batteriesysteme grafisch dargestellt. Sie zeigt die Lebensdauer in Abhängigkeit von der eingesetzten Kapazität der Batterie für den in diesem Unterkapitel behandelten Zyklus. Im Anhang sind die detaillierten Simulationsergebnisse aufgelistet (siehe Anhang E).

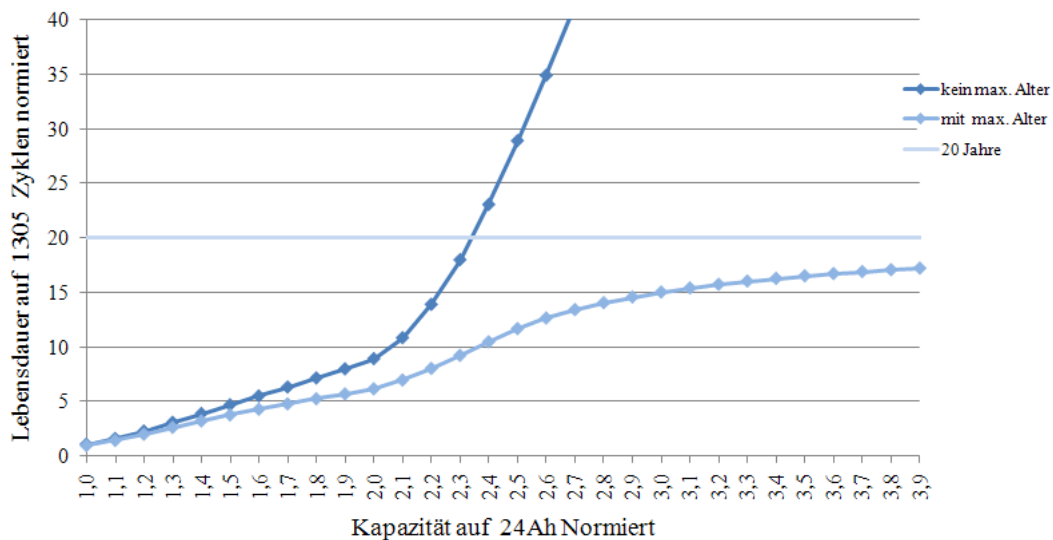


Abbildung 38: Lebensdauer in Abhängigkeit von der Kapazität

Die dunklere Kurve (ohne max. Alter) zeigt die Lebensdauer von unterschiedlich großen Batteriesystemen für den oben besprochenen Zyklus, ohne eine zeitabhängige Alterung zu berücksichtigen. Die erreichte Lebensdauer ist auf der vertikalen Achse aufgetragen. Nach oben hin gibt es für diese Kurve keine Begrenzung. Das bedeutet, dass bei jeder Vergrößerung der Batterie auch die Lebensdauer steigt, und zwar überproportional. Der starke Knick ist durch

die etwas grobe Modellierung des Zusammenhangs von Zyklenlebensdauer und Zyklientiefe zu Begründen. Er tritt bei einer doppelt so großen Kapazität auf, was in diesem Fall ungefähr einer Entladetiefe von 40 Prozent entspricht. Ein Stützpunkt der Modellierung des Zusammenhangs von Zyklen und Entladetiefe liegt genau bei Zyklen von 40 Prozent (siehe Anhang C). Da zwischen den Stützpunkten linear interpoliert wird, und der Zusammenhang aber exponentiell verläuft, kommt es zu diesem Knick. Die Lebensdauer steigt mit größer werdender Kapazität sehr schnell an, sodass bald Zyklenzahlen erreicht werden, die weit über dem Stand der Technik liegen. Deshalb ist bei der zweiten Kurve (mit max. Alter) die Lebensdauer eines Batteriesystems mit 20 Jahren angenommen (gilt für 20 Grad Celsius, aus [SAF08]), welche auch erreicht wird, wenn die Batterie nicht belastet wird. Diese Kurve ist für alle Fälle nach oben beschränkt. Für kleine Batteriesysteme verläuft sie ähnlich wie die Kurve ohne zeitabhängige Alterung. In diesem Bereich altert die Batterie sehr schnell und erreicht ihr Lebensende schon weit vor dem Maximalwert. Dadurch wirkt sich auch die zeitabhängige Alterung nur gering auf die Lebensdauer aus, und die beiden Kurven verlaufen in diesem Abschnitt ähnlich. Mit steigender Überdimensionierung und damit auch längerer Lebensdauer nähert sich die Kurve dem Maximalwert von 20 Jahren, da der Einfluss der Alterung aufgrund der Zyklen immer weiter abnimmt. Die normierte Lebensdauer deckt sich zufällig auch mit der Zeitdauer von einem Jahr (1305 Zyklen entsprechen ca. einem Jahr). Deshalb liegt die eingezeichnete Schranke für 20 Jahre auch auf Höhe der 20fachen Lebensdauer in Bezug auf den ersten Fall.

Diese Simulation zeigt, dass die Lebensdauer einer Li-Ionen-Batterie von drei wesentlichen Aspekten abhängt, nämlich von der Stromstärke, der Entladetiefe und der kalendarischen Lebensdauer. Es kann durchaus sinnvoll sein ein Batteriesystem überzudimensionieren um eine längere Lebensdauer zu erreichen. Bei einer Überdimensionierung sinken die effektiven Energie- und Leistungsdichten, da die vorhandenen Reserven nicht ausgenutzt werden. In diesem Fall wird durch Verdoppelung der Kapazität eine achtfache Lebensdauer erreicht. Eine sechsfache Lebensdauer entspricht hier auch einer sechsfachen Energiemenge die gespeichert und wieder abgerufen wird. Hierbei ist noch zu bemerken, dass die Lebensdauer auch noch durch weitere, hier nicht behandelte Faktoren begrenzt wird. Immerhin ist die Lebensdauer im zweiten Fall mindestens 6 Jahre (die Zeit die 8056 Zyklen benötigen). Die der Simulation zugrunde liegenden Daten beruhen auf Temperaturen um 20 Grad Celsius. Der Effekt der Lebensdauerer Verlängerung durch Überdimensionierung der Kapazität kann auch

einfach dadurch erreicht werden, dass die Nennkapazität einer Batterie kleiner angegeben wird als sie ist. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass der Akkumulator trotzdem bis an seine Grenzen geladen wird, die bezogene Stromstärke ist aber kleiner.

Eine weitere Auswertung der Ergebnisse ist in Abbildung 39 dargestellt. Hier wird auf die Fragestellung eingegangen, wie sich die Überdimensionierung auf die Ausnutzung der installierten Kapazität auswirkt. Auf der vertikalen Achse sind die erreichten Zyklen pro installierter Kapazität aufgetragen. Da der Energieinhalt der Zyklen immer gleich bleibt entspricht dieser Wert der über die Lebenszeit aufgenommenen/abgegebenen Energie pro installierter Kapazität.

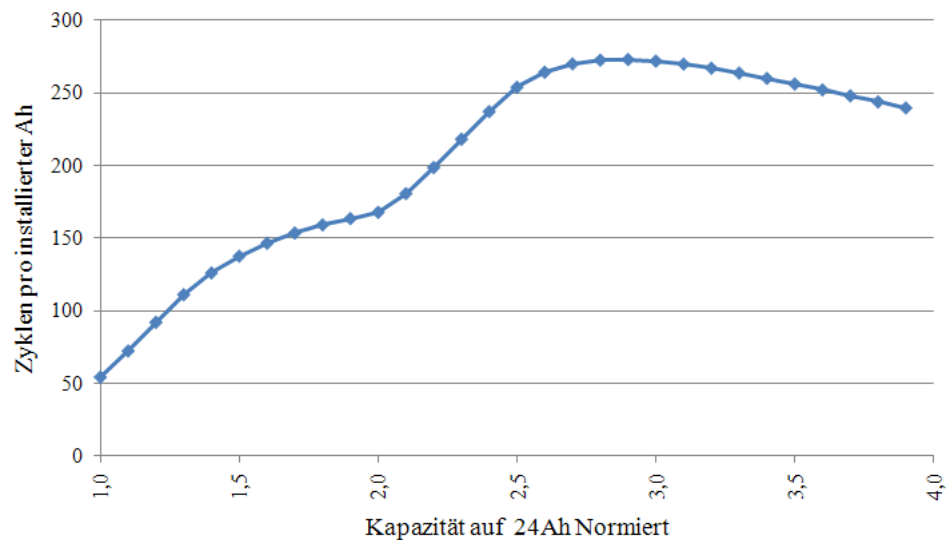


Abbildung 39: Durchsatz in Abhängigkeit von der Kapazität

Die Kurve ergibt sich aus der Division der Lebensdauerkurve (aus Abbildung 38) mit der jeweils installierten Kapazität. Am Beginn steigt die Ausnutzung der installierten Kapazität linear an. Durch die verlängerte Lebensdauer wird der Einfluss der kalendarischen Alterung stärker und schwächt diesen Anstieg ab. Der starke Knick bei der zweifachen installierten Kapazität ist durch die etwas grobe Modellierung des Zusammenhangs von Zyklen und Entladetiefe bedingt (siehe Text zu Abbildung 38). Die Grafik zeigt, dass der über die Lebensdauer erreichte Durchsatz an Energie durch eine Überdimensionierung verbessert werden kann. Eine Verbesserung tritt so lange ein, bis der Einfluss der kalendarischen Alterung zu groß wird, dh. bei einer zu großen Überdimensionierung sinkt die über die Lebenszeit aufgenommene/abgegebene Energie pro installierter Kapazität wieder.

5.3 Elektroauto

Als Ausgangspunkt für diese Simulation dient ein reales Lastprofil, das während einer Messung im Projekt VLOTTE an einem Elektroauto aufgetreten ist. Die dort verwendete Batterie ist eine ZEBRA Batterie (Natrium Nickelchlorid Hochtemperatur Batterie) mit einer Nennenergie von ca. 28kWh und einer Batteriespannung im Bereich von 400V. Mit dem Fahrzeug wurde in der Umgebung von Feldkirch während einer 1,75stündigen Fahrt eine hügelige Strecke von ca. 100km zurückgelegt. Danach erfolgte eine Wiederaufladung der Batterie über mehrere Stunden (ca. 10 Stunden).

Das sich aus dieser Beanspruchung ergebende Leistungsprofil wird dem Lithium Ionen Modell zugeführt. In Abbildung 40 ist der SOC Verlauf (in Prozent) und der Stromverlauf (in Ampere) aufgezeichnet, die vom Lithium Ionen Modell für die 1,75stündige Fahrt berechnet werden. Während der hier nicht dargestellten Ladephase wird die Batterie langsam wieder voll aufgeladen.

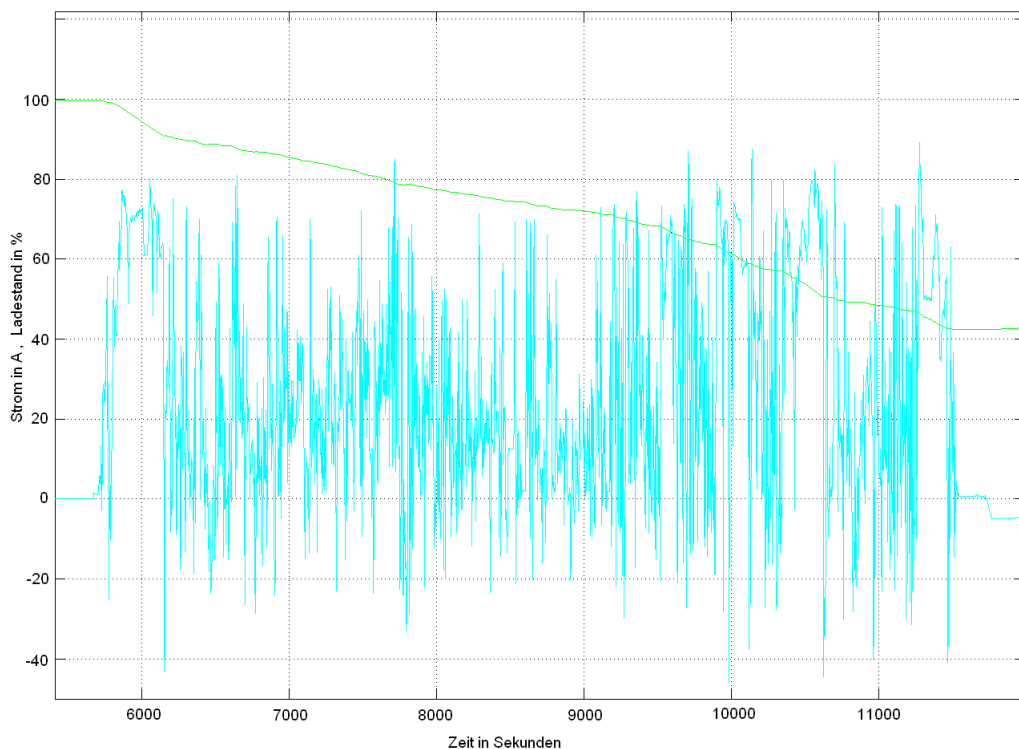


Abbildung 40: Belastungsprofil

Bei der Annahme, dass pro Tag nur ein solcher Zyklus stattfindet, bestimmt die im Modell eingestellte kalendarische Alterung die Lebensdauer signifikant. Dies hat mehrere Gründe. Der Ladevorgang erfolgt mit einem sehr kleinen

Strom, sodass sich der Ladevorgang nicht wesentlich auf die Alterung auswirkt. Während der Fahrt beträgt der maximal auftretende Strom ca. 1,2C (90A). In weiten Bereichen pendelt der Betrag des Stroms aber um ca. 0,5C (40A), was sich positiv auf die Lebensdauer auswirkt, und somit nur einen kleinen Einfluss auf das Alter hat. Je größer die kalendarische Lebensdauer eingestellt wird, desto größer wird der Einfluss der belastungsabhängigen Alterung. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 41 dargestellt, die detaillierten Simulationsergebnisse sind im Anhang F aufgelistet. Auf der horizontalen Achse ist jene Zeit aufgetragen, bei der die Batterie aufgrund ihrer kalendarischen Alterung nur mehr 80 Prozent der Nennkapazität besitzt, also die maximal mögliche Lebensdauer. Dies ist der Parameter, der bei den einzelnen Simulationendurchläufen variiert wird. Auf der vertikalen Achse ist die erreichte Lebenszeit aufgetragen. Zusätzlich zu den Simulationsergebnissen ist auch die bei der jeweils eingestellten kalendarischen Alterung maximal mögliche Lebensdauer aufgetragen.

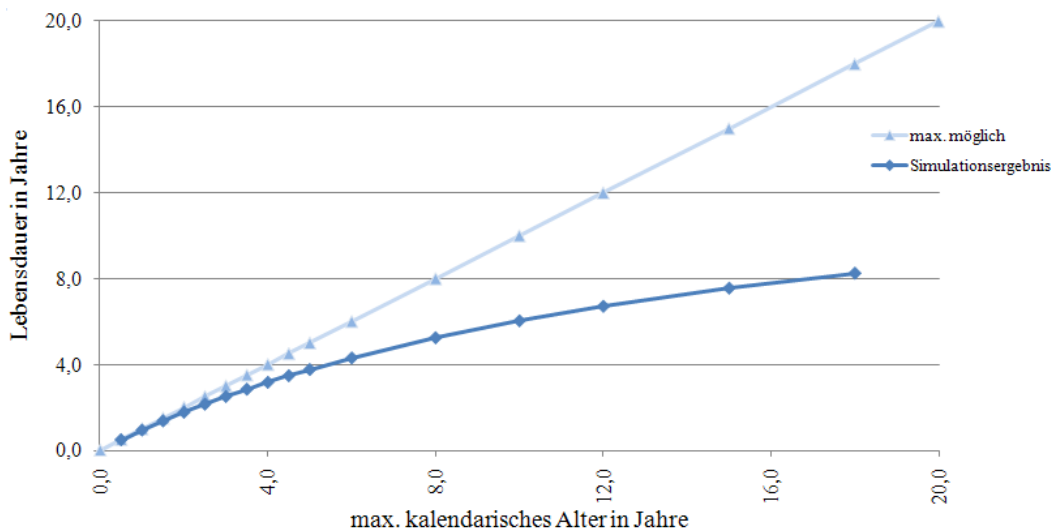


Abbildung 41: Alterung des Elektrofahrzeugs

Da bei diesem Beispiel die Belastung der Batterie gering ist, ist für relativ kleine Werte der kalendarischen Alterung, das erreichte Alter Großteils von dieser bestimmt. Mit zunehmender kalendarischer Alterung steigt der Einfluss der belastungsabhängigen Alterung.

6 Schlussfolgerung

Zur Speicherung elektrischer Energie existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Technologien. Das Anwendungsgebiet reicht von kurzfristiger (zb. Kondensator, Schwungmasse) bis hin zu saisonaler Speicherung (Pumpspeicherkraftwerke). Werden die verschiedenen Typen genauer betrachtet, ändern sich nicht nur deren Parameter. Jede Technologie besitzt zusätzlich ihre speziellen Effekte. Bei Blei-Säure Batterien tritt zum Beispiel der Peukert Effekt stark auf. Bei Pumpspeicherkraftwerken sind es Totzeiten beim Ändern der Betriebsart. Trotzdem ist es möglich die Kernfunktion in einem, für alle Speicher gleichem, (individuell erweiterbarem) Grundmodell abzubilden.

Im Zuge der Recherche über die verschiedenen Energiespeicher stellte sich heraus, dass im Bereich der Akkumulatoren die Alterungsangaben in Zyklen ausgedrückt werden. Dies erleichtert den Vergleich zwischen verschiedenen Typen. Jedoch muss darauf geachtet werden, unter welchen Nebenbedingungen die Werte ermittelt wurden. Als wichtige Einflussfaktoren sind hier die Zyklientiefe, Stromstärke beim Lade-/Entladevorgang und die Temperatur genannt.

Die erzielbare Lebensdauer von Lithium Ionenbatterien hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Lade-/Entladestrom
- Entladetiefe
- Temperatur
- Kalendarische Alterung

Um die betriebsbedingten Alterungseinflüsse möglichst gering zu halten, empfiehlt es sich, sowohl den Lade-/Entladestrom als auch die Entladetiefe klein zu wählen. Hohe Temperaturen wirken sich negativ auf die Alterung aus. Jedoch ist die Temperaturverteilung innerhalb der Batterie nicht homogen. Daher wäre selbst für eine grobe Abschätzung des Temperatureinflusses ein eigenes Modell nötig. In der hier durchgeführten Simulation wurde dies nicht umgesetzt und die Temperatur als konstant angenommen. Zusätzlich zu den betriebsbedingten Alterungseinflüssen tritt unabhängig davon die kalendarische Alterung auf.

Die Simulation zeigt, dass sich ein Wiederaufladen zwischen verhältnismäßig geringen Entladevorgängen im Vergleich zu einem anschließenden vollständigen Ladevorgang vorteilhaft auf die Lebensdauer auswirkt. Der Einfluss von mehreren kleinen Entladungen ist geringer als jener eines einzelnen vollständigen Entladevorgangs.

Im Kapitel 5.2 wurde die Lebensdauer eines hinsichtlich der Leistung und der Kapazität ausreichend dimensionierten Lithium Ionenbatteriespeichers simuliert. Bei der Auslegung wurde berücksichtigt, dass die empfohlenen Leistungsgrenzen mit Sicherheit nicht erreicht werden und die Kapazität des Speichers ausgenutzt wird. Durch Variation der Kapazität wurde untersucht, ob die über die gesamte Lebensdauer transportierte Energie im Vergleich zum Referenzfall gesteigert werden kann.

Es zeigte sich, dass sich anfänglich eine Vergrößerung der Kapazität überproportional auf die Lebensdauer auswirkt und einen positiven Einfluss auf die gesamte umgewälzte Energie aufweist. Dies ist sowohl durch den auf die Kapazität bezogenen kleineren Strom als auch durch die geringere Entladetiefe begründet. Der Effekt der kalendarischen Alterung kann nicht verhindert werden. Wird nun die, über die Lebensdauer umgewälzte, Energie auf die verwendete Kapazität bezogen, so führt die Überdimensionierung ab einem gewissen Punkt zu einer Verringerung der Ausnutzung der installierten Kapazität.

Das Optimum befindet sich in jenem Bereich, in dem der negative Einfluss der kalendarischen Alterung von der überproportionalen Abnahme der betriebsbedingten Alterung mit der Kapazität kompensiert wird.

Abbildungsverzeichnis

1	Entwicklungsprozess	20
2	Umgebung für die Energiespeichermodelle	21
3	Anti-Wind-Up bei Speicherbegrenzungen	23
4	Unterschiedliche Wirkungsgrade für Laden und Entladen	24
5	Modellierung der Speicherverluste	25
6	Prinzip	26
7	Berechnung des notwendigen Stroms	27
8	Umrechnen auf Zellgrößen	28
9	Modell einer Zelle	29
10	SOC Untermodell	30
11	Lebensdauer in Abhängigkeit vom DOD	31
12	Methode 1(li) und 2(re)	34
13	Lebensdauer in Abhängigkeit vom Ladestrom	36
14	Alterungsmodell	38
15	Testumgebung	40
16	Sprung von Leerlauf auf Laden (a)	42
17	Sprung von Leerlauf auf Laden (b)	43
18	Laden und Entladen	44
19	Laden und Entladen mit SOC abhängigen R_i	45
20	Leerlaufspannung in Abhängigkeit vom SOC	45
21	Laden und Entladen mit SOC abhängiger Leerlaufspannung	46
22	Laden mit SOC abhängiger Leerlaufspannung	47
23	Testen der Zyklerkennung	48

24	Testen des Stromfaktors	49
25	Testen der Alterungsfunktion für verschiedene Zyklentiefen . . .	51
26	Testen der Alterungsfunktion	52
27	Testen der gesamten Alterungsfunktion	53
28	positiver Sprung der Soll-Leistung	56
29	negativer Sprung der Soll-Leistung	57
30	Reaktion auf „unerlaubtes“ Entladen	58
31	Reaktion auf „unerlaubtes“ Laden	59
32	der 3000ste Zyklus	60
33	verzögerte Reaktion des SOC Verlaufs	62
34	Sprung im SOC und Spannungs Verlauf	63
35	Auswirkungen einer zu großen Schrittweite	65
36	Auswirkungen einer zu kleinen Verzögerungszeit	66
37	Lebensdauer in Abhängigkeit von der Leistung	68
38	Lebensdauer in Abhängigkeit von der Kapazität	71
39	Durchsatz in Abhängigkeit von der Kapazität	73
40	Belastungsprofil	74
41	Alterung des Elektrofahrzeugs	75
42	1 Umgebung	89
43	2 Batterie	89
44	3 Liion mit Alterung	89
45	3.1 Leistungsbegrenzung für Matlab	90
46	3.2 Strombegrenzung für Matlab	90
47	3.3 Liion Batterie mit Alterung	90

48	3.3.2 von Batterie auf Zelle	90
49	3.3.1 eine Liion Zelle	91
50	3.3.1.1 Strombegrenzung	91
51	3.3.1.1.1 Sättigung	91
52	3.3.1.2 Strombegrenzung für Matlab	92
53	3.3.1.3 Liion SOC	92
54	3.3.1.3.1 Integrator	93
55	3.3.1.3.2 Alterung	94
56	Werte der Tabellen: Zyklen(DOD) u. IFaktor(I)	95
57	Lebensdauer in Abhängigkeit von der Leistung	96
58	Lebensdauer in Abhängigkeit von der Kapazität	97
59	Lebensdauer in Abhängigkeit von der kalendarischen Alterung .	98

Literaturverzeichnis

- [A1209] A123 Systems: High Power Lithium Ion ANR26650M1A Datasheet
Download von http://a123systems.textdriven.com/product/pdf/1/ANR26650M1A_Datasheet_APRIL_2009.pdf
am 20.01.2010
- [AAC09] Hochtemperatur Batterien
siehe <http://www.isea.rwth-aachen.de/eess/technology/high-temperature>
am 21.01.2010
- [ALS06] MC GUIRE, Patrick: ALSTOM POWER LTD: Advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES)
siehe http://cordis.europa.eu/fetch?CALLER=NEW_PROJECT_TM&ACTION=D&DOC=1&CAT=PROJ&QUERY=0121f2b74689:d07f:237bd3cd&RCN=67580
am 18.06.2009
- [BIE07] BINE Informationsdienst - Energieforschung für die Praxis: Druckluft- Speicherkraftwerke
Download von <http://www.bine.info/hauptnavigation/publikationen/projektinfos/publikation/druckluftspeicher-kraftwerke/?subpageof=&artikel=277>
am 18.06.2009
- [BIT04] Bitsche Otmar; Spier Bernd; Ashtiani Cyrus; Lagerstrom Rick: Verfahren zur Ermittlung der Alterung einer Batterie
Download von <http://www.freepatentsonline.com/EP1450173.html>
am 27.08.2009
- [BIT05] Bito Akihiro: Overview of the Sodium-Sulfur Battery for the IEEE Stationary Battery Committee
Download von <http://ieeexplore.ieee.org/>
am 09.06.2009
- [BOD05] Bodach Mirko ; Mehlich Heiko: Zuverlässigkeitsaspekte bei der Anwendung von Supercaps, Technische Universität Chemnitz, IEEE Chapter Meeting Chemnitz, 11.-12.Mai 2005

- [BOE07] Pedra de Boer, Jillis Raadschelders: Flow Batteries, KEMA June 2007
Download von http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/164
am 25.05.2009
- [BUC05] Buchmann Isidor: Battery University
Download von <http://www.batteryuniversity.com/partone-6-german.htm>
am 08.07.2009
- [COM09] Compact Dynamics: DYNASTORE F1
Download von http://www.compact-dynamics.de/fileadmin/daten/Leistungsspektrum/DYNASTORE/DYNASTORE_F1_Rennsport_KERS_090408.pdf
am 16.04.2009
- [DEE06] Deepti D.Jaya; Ramanarayanan V.: State of Charge of Lead Acid Battery, Proceedings of India International Conference on Power Electronics 2006, Electrical Engineering Indian institute of science Bangalore, India
Download von <http://ieeexplore.ieee.org/>
am 10.06.2009
- [DIN85] DIN 40 729 Galvanische Sekundärelemente Grundbegriffe
- [ELE09] Electricitystorage.org: Redox Flow Battery
Download von http://electricity.ehclients.com/images/uploads/photo_vrb_1large.jpg
am 25.05.2009
- [DOE04] Doerffel Dennis; Suleiman Abu Sharkh: A critical review of using Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries, Journal of Power Sources 155 (2006) 395 - 400
Download von <http://www.sciencedirect.com/>
am 19.02.2010
- [GIE97] Giesecke Jürgen; Mosonyi Emil: Wasserkraftanlagen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997 ISBN 3-540-60993-8

- [HOP07] Hoppecke: OPzS Datenblatt
Download von <http://www.hoppecke.com/>
am 09.11.2009

- [HUT08] Hutholm Christian: Energy Storage Systems For Renewable Energy Sources, Master's thesis, Vienna University of Technologie, 2008

- [JOS06] Jossen Andreas, Weydanz Wolfgang: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, 1. Auflage Januar 2006, Ubooks Verlag, Ham-meler Landstraße 14, 86356 Neusäß, www.batteriebuch.de ISBN 3-937536-01-9

- [KAT03] Kato Ken; Negishi Akira; Nozaki Ken; Tsuda Izumi; Takano Kiyonami: PSOC cycle testing method for lithium-ion secondary batteries; Journal of Power Sources 117 2003 118-123
Download von <http://www.sciencedirect.com/>
am 27.08.2009

- [LIE09] Liebert Corporation (An Emerson Network Power Company): Liebert FS flywheel
Download von http://www.liebert.com/product_pages/ProductDocumentation.aspx?id=59&hz=60#Technical%20Documentation
am 16.04.2009

- [SAF08] Saft Industrial Battery Group: Intensium Flex, High Energy/Medium Power/High Power, rack-mount lithium-ion battery systems
Download von http://www.saftbatteries.com/doc/Documents/stationary/Cube782/IntFLEX_0708.ce3d756b-b571-4cf3-a952-ad069f830ed1.pdf
am 20.08.2009

- [SCH08a] Schuster Andreas: Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen, Diplomarbeit, TU Wien 2008

- [SCH08b] Schreiber Martha: Third International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2008) 24.-25.11.2008 Berlin

- [SEI04] Gonzalez Adolfo; Brian O Gallachoir; McKeogh Eamon; Lynch Kevin: Sustainable Energy Ireland: Study of Electricity Storage

- Technologies and Their Potential to Address Wind Energy Intermittency in Ireland
Download von <http://www.sei.ie/uploadedfiles/FundedProgrammes/REHC03001FinalReport.pdf>
am 26.05.2009
- [SHA09] Sharman Hugh: Denmark & Energy Storage, incoteco
Download von <http://www.leonardo-energy.org/Files/denmarkvrb.pdf>
am 25.05.2009
- [SOO02] Soo Seok Choi; Hong S. Lim: Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂; Corporate R&D Center, Samsung SDI Co. Ltd., Giheung 449-902, South Korea; Journal of Power Sources 111 (2002) 130- 136
Download von <http://www.sciencedirect.com/>
am 18.08.2009
- [TAS08] Hydro Tasmania: King Island „Towards sustainable, renewable energy future“
Download von http://www.hydro.com.au/documents/Energy/King_Island_Renewable_Energy_PK_2008.pdf
am 26.05.2009
- [THO02] Thompson Robert W.; Tilley Roger: ADVANTAGES OF ZEBRA HIGH TEMPERATURE BATTERIES FOR MILITARY HYBRID APPLICATIONS
Download von http://www.cebi.de/easyCMS/FileManager/Files/MES-DEA/articles/AECV_Paper
am 27.08.2009
- [USB09] U.S Battery Manufacturing Co.: Expected Cycle Life vs. DOD
Download von http://www.usbattery.com/usb_images/cycle_life.xls.pdf
am 20.08.2009
- [VAL09] Valence Technology: Datasheet RT Battery Module
Download von <http://www.valence.com/>
am 05.11.2009

- [VEZ09] Vezzini Andrea: Lithiumionen-Batterien als Speicher für Elektrofahrzeuge, Bulletin SEV/AES 3/2009
Download von http://labs.hti.bfh.ch/fileadmin/user_upload/lab12/papers/2009-03-09_SEV_Bulletin_Lithiumionen-Batterien_als_Speicher_fuer_Ektrofahrzeuge_Teil_1.pdf
am 20.01.2010
- [WIK09a] Wikipedia: Akkumulator
Download von <http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator>
am 04.11.2009
- [WIK09b] Wikipedia: Supraleiter
Download von <http://de.wikipedia.org/wiki/Supraleiter>
am 02.11.2009
- [WIK09c] Wikipedia: Supraleitender Magnetischer Energiespeicher
Download von http://de.wikipedia.org/wiki/Supraleitender_Magnetischer_Energiespeicher
am 02.11.2009
- [WIK09d] Wikipedia: Superconducting magnetic energy storage
Download von http://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_magnetic_energy_storage
am 04.11.2009
- [WIK09e] Wikipedia: Gyrobus
Download von <http://de.wikipedia.org/wiki/Gyrobus>
am 04.11.2009
- [WIK09f] Wikipedia: Natrium Schwefel Zelle
Download von <http://de.wikipedia.org/wiki/Natrium-Schwefel-Zelle>
am 08.07.2009
- [WIK09g] Wikipedia: Bleiakkumulator
Download von <http://de.wikipedia.org/wiki/Bleiakkumulator>
am 08.07.2009
- [WIK09h] Wikipedia: Lithium Ion Battery
Download von http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery
11.11.2009

- [WIK09i] Wikipedia: NiMH mit geringer Selbstentladung
Download von http://de.wikipedia.org/wiki/NiMH_mit_geringer_Selbstentladung
am 11.11.2009
- [WIM09a] WIMA: Datasheet Supercap R
Download von http://www.wima.de/DE/supercap_r_1.htm
am 02.11.2009
- [WIM09b] WIMA: Anwendung von WIMA Doppelschicht-Kondensatoren
Download von http://www.wima.de/DE/supercap_applic.htm
am 02.11.2009

A Matlab C Datei Alterung

```
function [alter, zyklen] = fcn(soc,zz,i,inti,time)
% soc = aktueller SOC in Prozent
% zz = Anzahl der Zyklen(für den aktuellen SOC) bis nur mehr 80% der NC zur Verfügung stehen
% i = aktueller Strom durch die eine Zelle auf NC bezogen, i>0 = entladen...
% inti = gewichtetes Integral des Strombetrags
% time = Zeit ohne Strompausen
% alter = 0...1 0 = neu, 1 = nur mehr 80%NC

% diese Funktion unterteilt in Lade- und Entladezyklen
% berechnet für den vergangenen Zyklus die verbrauchte Lebensdauer
% gibt die verbrauchten Lebensdauer aus (von 0 bis 1(1 entspricht 80%NC))
% zaehlt die Zyklen

persistent aktzyklus; % noch nicht entschieden(0), Lade(1)oder entlade(2) halbzyklus
persistent last_soc; % Anfangswert des Halbzyklus
persistent last_zz; % Zyklenzahl bei Anfangs SOC des Halbzyklus
persistent gesamalter; % von 0 bis 1, entspricht alter
persistent last_inti; % Anfangswert des gewichteten Stromintegrals
persistent last_time; % Anfangswert des Zeitintegrals, entspricht der Anfangszeit
persistent zykluszaehler; % zaehlt die Zyklen, 1 Halbzyklus = + 0.5

if isempty(aktzyklus) % wenn die Variablen noch nicht existieren...
    aktzyklus=0; % 0 = aktueller Halbzyklus muss erst herausgefunden werden
end
if isempty(last_soc)
    last_soc=soc;
end
if isempty(last_zz)
    last_zz=zz;
end
if isempty(gesamalter)
    gesamalter=0;
end
if isempty(last_inti)
    last_inti=inti;
end
if isempty(last_time)
    last_time=time;
end
if isempty(zykluszaehler)
    zykluszaehler=0;
end

if aktzyklus == 0 % falls noch nicht bekannt: herausfinden ob Lade- oder Entladezyklus
    if i < 0 % strom < 0 ist laden
        aktzyklus = 1; % aktueller Zyklus ist Ladezyklus
    end
    if i > 0 % entladen
        aktzyklus = 2; % aktueller Zyklus ist ein Entladezyklus
    end
    last_zz = zz; % Anfangswerte für Lade oder Entladezyklus speichern
    last_soc = soc;
    gesamalter = 0.0; % mehrmaliger Aufruf bei Start, bis i != 0
    last_inti = inti;
    last_time = time;
end

if aktzyklus == 1 % aktueller Zyklus = Ladezyklus
    % warten auf Ende des Ladezyklus
    if i > 0.001 % Ende des Ladezyklus

        %gesamalter = gesamalter + 0.0100; % nur zum testen, ob Zyklen erkannt werden

        % if (time - last_time) > 0 % nur zum testen, ob Stromfaktor richtig berechnet wird
        % gesamalter = gesamalter + (last_inti - inti)/(last_time -time);
        % else
        % end

        % if (last_zz ~= 0) && (last_soc ~= 100) % nur zum testen, ob Teilzyklen richtig berechnet werden
        % gesamalter = gesamalter + ( (1/last_zz)*abs((soc-last_soc))/(100- last_soc));
        % else
        % end
    end
end
```

```

% Berechnung von: alter = alter + aktueller Zykluswert*Teilzyklus*Stromfaktor
if (last_zz ~= 0) && (last_soc ~= 100) && ((time - last_time) > 0)
    gesamalter = gesamalter + ( ((1/last_zz)*abs((soc-last_soc))/(100- last_soc)))*((last_inti - inti)/(last_time -time)) );
    zykluszaehler = zykluszaehler + 0.5;
else
    end

    last_zz = zz;                % Anfangswerte für Entladezyklus speichern
    last_soc = soc;
    last_inti = inti;
    last_time = time;
    aktzyklus = 2;                % Umschalten auf Entladezyklus
else
    end

else
    % aktueller Zyklus = Entladezyklus
    % warten auf Ende des Entladezyklus
    if i < -0.001                % Ende des Entladezyklus

        %gesamalter = gesamalter + 0.0201;    % nur zum testen, ob Zyklen erkannt werden

        % if (time - last_time) > 0            % nur zum testen, ob Stromfaktor richtig berechnet wird
        % gesamalter = gesamalter + (last_inti - inti)/(last_time -time);
        % else
        % end

        % if (zz ~= 0) && (soc ~= 100)            % nur zum testen, ob Teilzyklen richtig berechnet werden
        % gesamalter = gesamalter + ( (1/zz)*abs((last_soc - soc))/(100 - soc));
        % else
        % end

% Berechnung von: alter = alter + aktueller Zykluswert*Teilzyklus*Stromfaktor
if (zz ~= 0) && (soc ~= 100) && ((time - last_time) > 0 )
    gesamalter = gesamalter + ( ((1/zz)*abs((last_soc - soc))/(100 - soc)))*((last_inti - inti)/(last_time -time)) );
    zykluszaehler = zykluszaehler + 0.5;
else
    end

    last_zz = zz;                % Anfangswerte für Ladezyklus speichern
    last_soc = soc;
    last_inti = inti;
    last_time = time;
    aktzyklus = 1;                % Umschalten auf Ladezyklus
else
    end

end

zyklen = zykluszaehler;        % Ausgabe der Zyklenanzahl
alter = gesamalter;            % Ausgabe des Alters

```

B MATLAB Simulink Modell

Auf den folgenden Seiten ist das gesamte MATLAB Simulink Modell dargestellt. Die MATLAB C Datei, in der das Alter berechnet wird befindet sich in Anhang A.

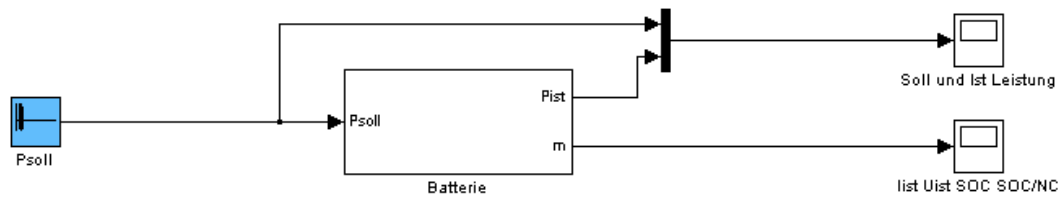


Abbildung 42: 1 Umgebung

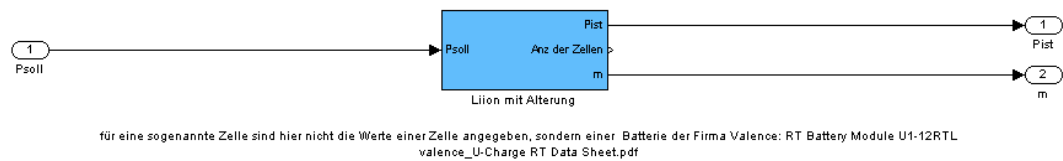


Abbildung 43: 2 Batterie

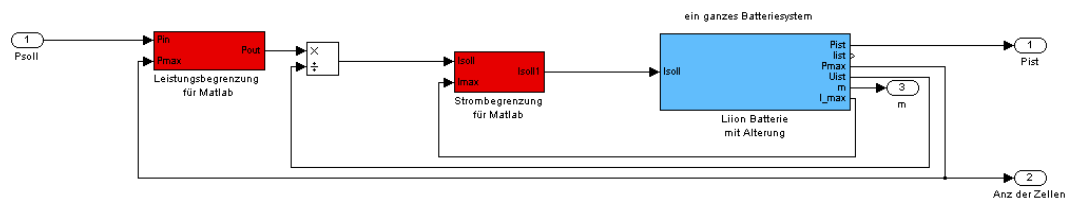


Abbildung 44: 3 Lion mit Alterung

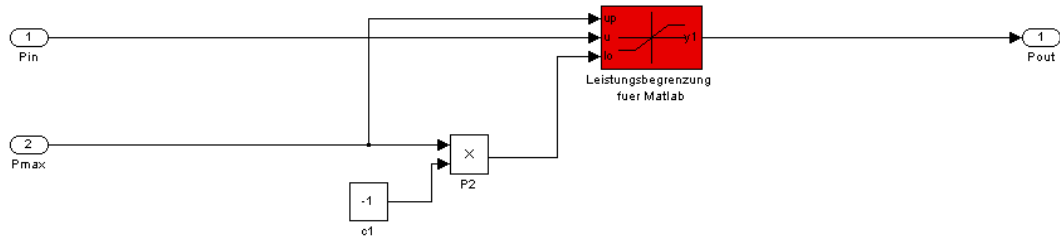


Abbildung 45: 3.1 Leistungsbegrenzung für Matlab

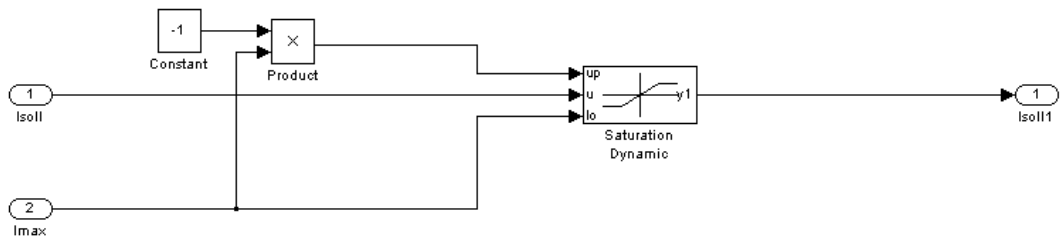


Abbildung 46: 3.2 Strombegrenzung für Matlab

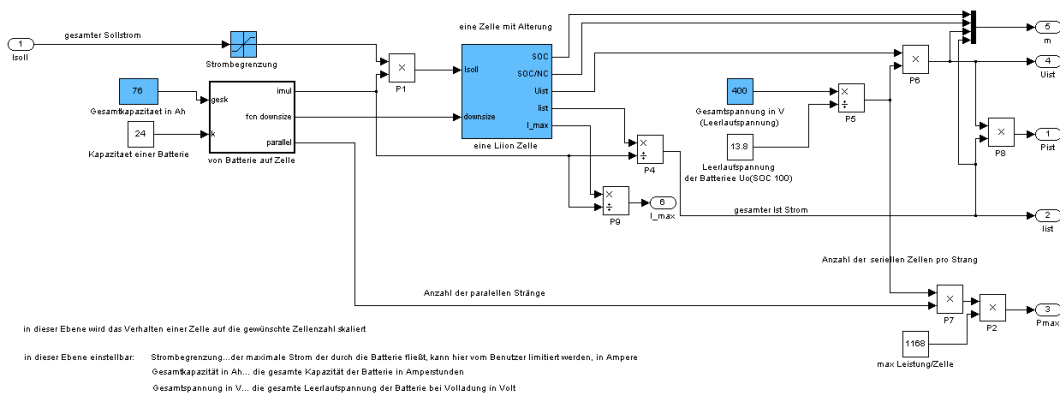


Abbildung 47: 3.3 Li-ion Batterie mit Alterung

```
function [imul,downsize,parallel] = fcn(gesk,k)
% ermöglicht die Simulation von Batterien, die kleiner sind als
% eine Zelle
parallel = gesk/k;

if parallel < 1.0 % simulierte Batterie ist kleiner als eine Zelle
    imul = 1.0; % der gesamte Strom fließt durch eine Zelle
    downsize = k/gesk; % die Kapazität einer Zelle wird verkleinert
                    % der Ri vergrößert, der imax verkleinert
else
    imul = k/gesk; % simulierte Batterie ist groesser als eine Zelle
    downsize = 1.0; % der gesamte Strom wird auf mehrere Zellen aufgeteilt
end
```

Abbildung 48: 3.3.2 von Batterie auf Zelle

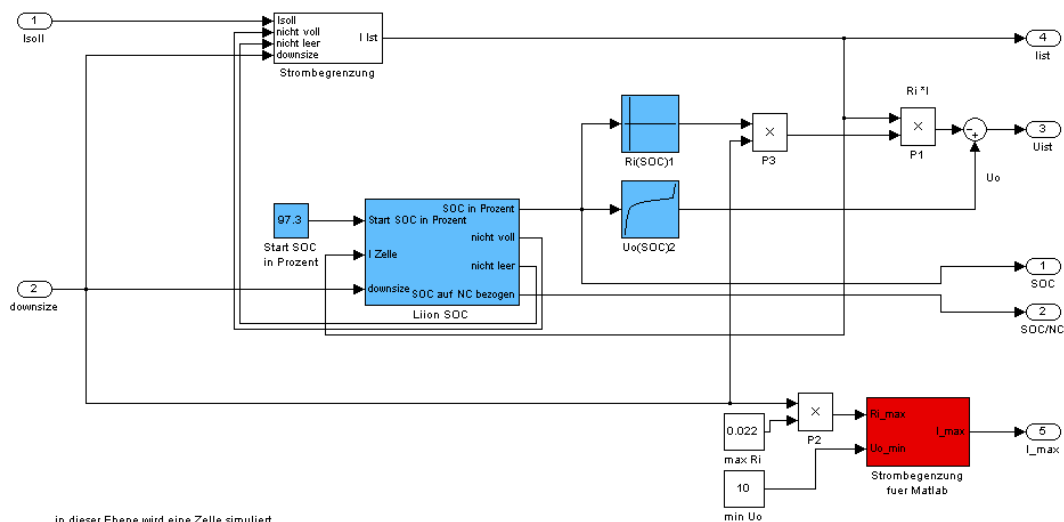


Abbildung 49: 3.3.1 eine Liion Zelle

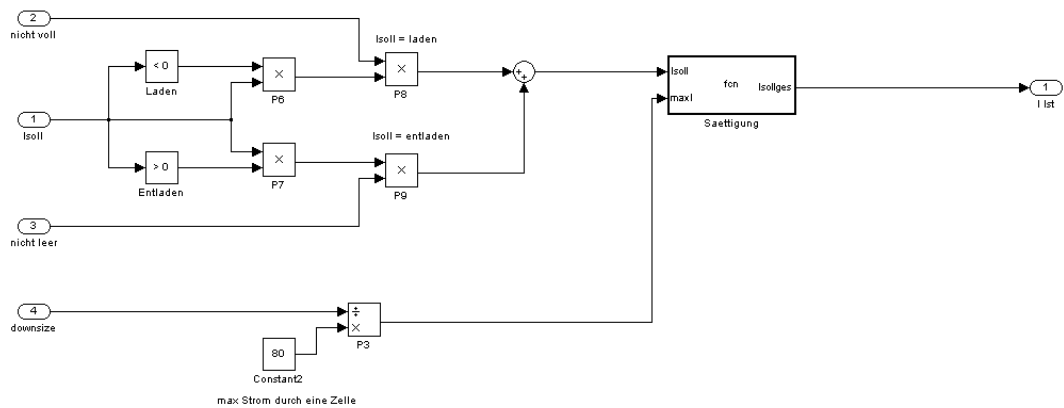


Abbildung 50: 3.3.1.1 Strombegrenzung

```
function Isollges = fcn(Isoll, maxI)
% variable Begrenzung, die Isollges auf die Werte +/- maxI begrenzt

if Isoll >= 0
    if Isoll >= maxI
        Isollges = maxI;
    else
        Isollges = Isoll;
    end
else
    if Isoll <= (maxI * -1.0)
        Isollges = (-1.0 * maxI);
    else
        Isollges = Isoll;
    end
end
```

Abbildung 51: 3.3.1.1.1 Sättigung

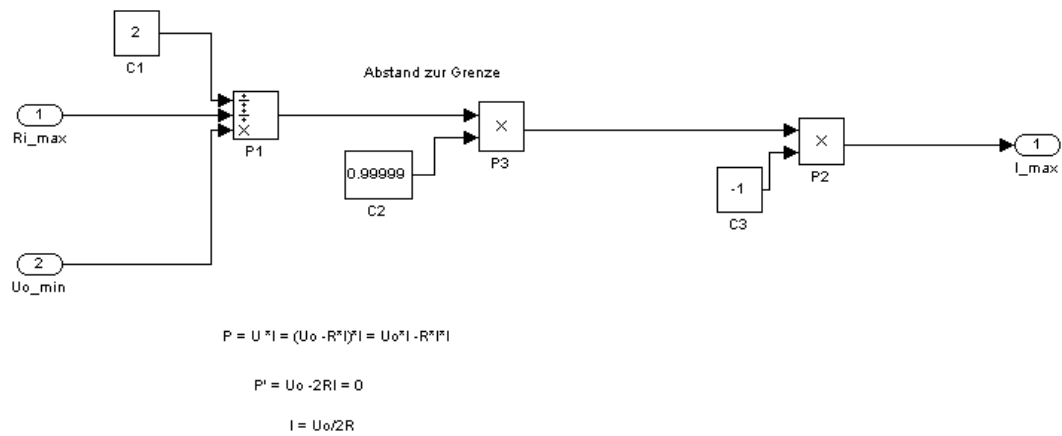
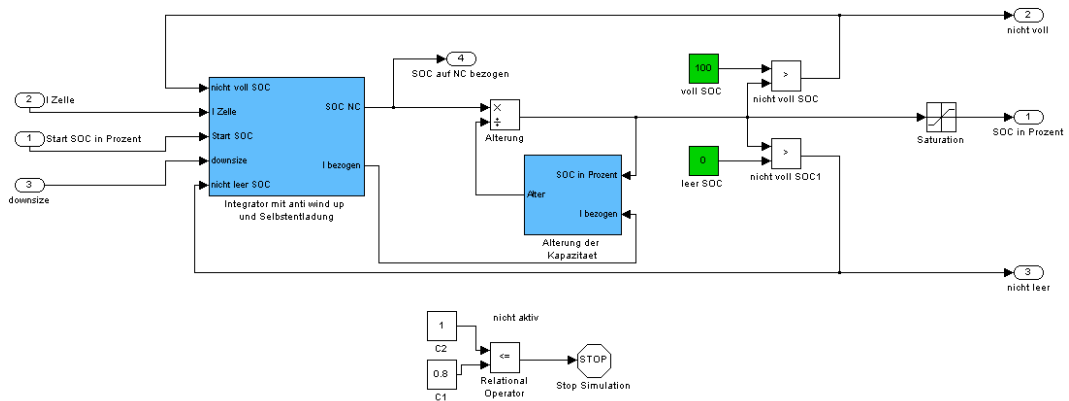
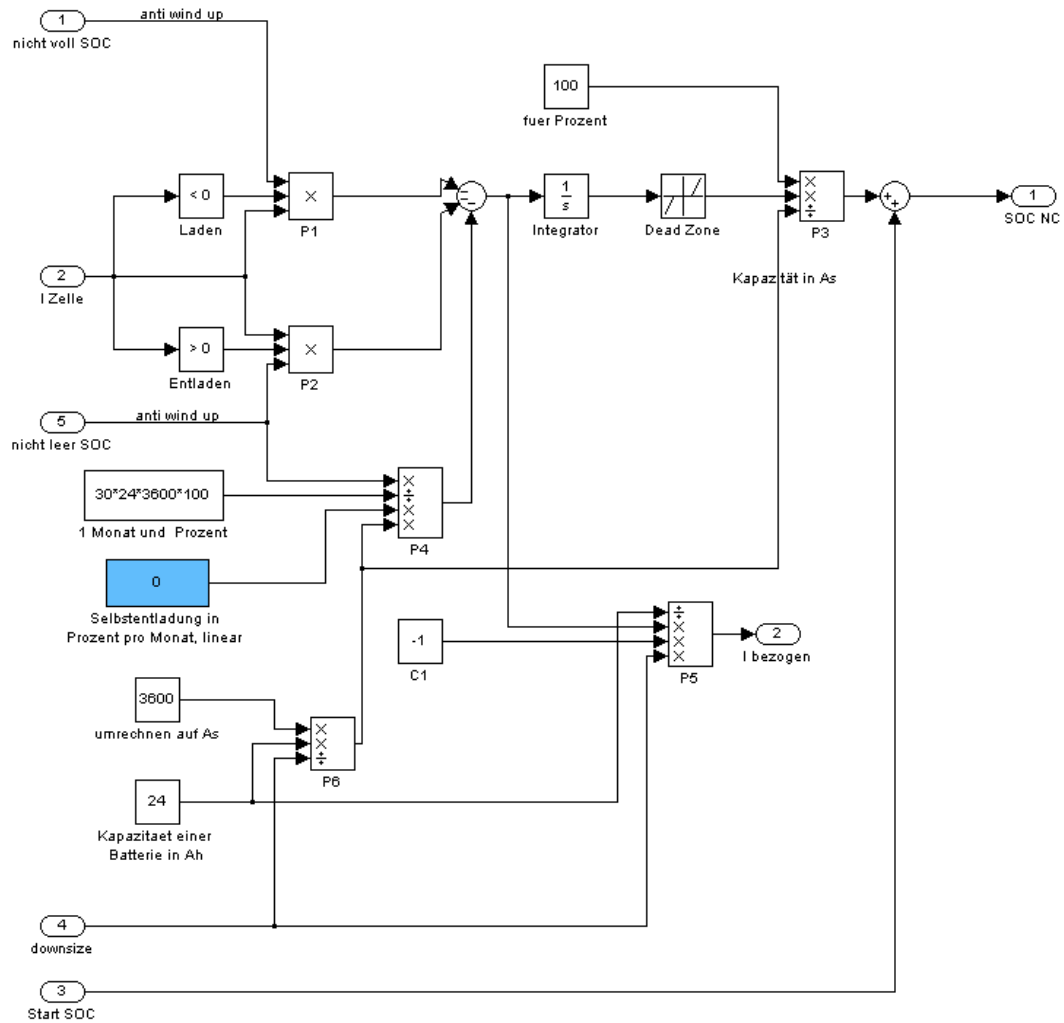


Abbildung 52: 3.3.1.2 Strombegrenzung für Matlab



In dieser Ebene wird der SOC NC mit dem Alter multipliziert und daraus der SOC berechnet, weiterhin werden die obere und die untere Grenze für den SOC überwacht, falls sie verletzt sind, wird der Integrator Block gesperrt falls benötigt, können hier die obere und die untere Grenze des Integrators verändert werden

Abbildung 53: 3.3.1.3 Li-ion SOC

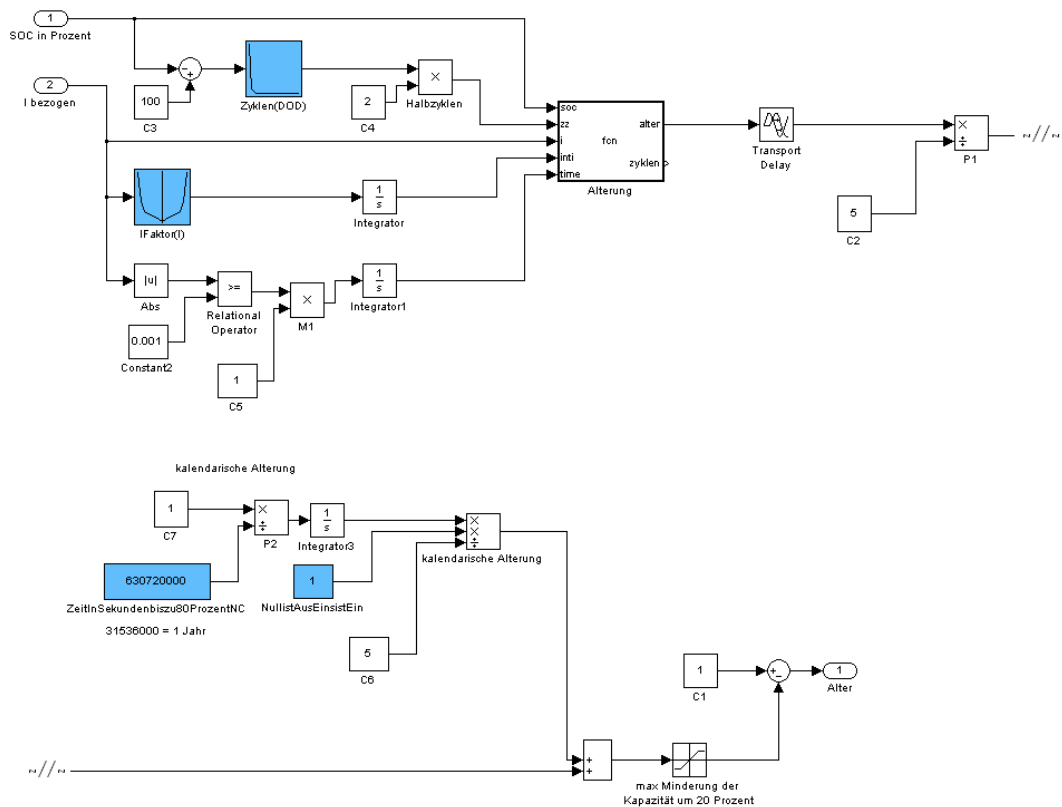


in dieser Ebene wird der durch die Zelle fließende Strom integriert und somit der SOC NC berechnet, weiters wird die Selbstentladung berechnet

in dieser Ebene ist die Selbstentladung pro Monat in Prozent der NC einstellbar

positiver I Zelle = Strom fließt aus der Batterie hinaus

Abbildung 54: 3.3.1.3.1 Integrator



In dieser Ebene wird ein Alterungswert zwischen 1 und 0,8 berechnet, wobei 1 einer neuen Zelle entspricht und 0,8 einer Zelle entspricht die nur mehr 80 Prozent der Nennkapazität besitzt.

In dieser Ebene ist einstellbar: Zyklus(DOD)...der Zusammenhang von Zyklentiefe und maximal möglicher Zyklen bis zum Lebensende, muss mit IFaktor(DOD) abgeglichen werden
 IFaktor()...die unterschiedliche Gewichtung der Stromstärke auf das Alter in Bezug zum Referenzpunkt, muss mit Zyklus(DOD) abgeglichen werden
 ZeitInSekundenbiszu80ProzentNC...kalendarische Alterung in Sekunden bis nur mehr 80 Prozent der Nennkapazität verwendbar sind
 NullistAusEinsistEin...Ein/Aus Schalter für die kalendarische Alterung... 1 = Ein, 0 = Aus

Abbildung 55: 3.3.1.3.2 Alterung

C Zyklen(DOD) u. IFaktor(I)

Zyklen(DOD)		IFaktor(I)	
Input	Output	Input	Output
0	10000000	-1,4	25
4	1000000	-1,2	10
13	100000	-1	5
20	65000	-0,2	1
40	10000	-0,01	0
80	3000	0	0
100	1500	0,01	0
		0,2	1
		1	5
		1,2	10
		1,4	25

Abbildung 56: Werte der Tabellen: Zyklen(DOD) u. IFaktor(I)

Die Werte der Zyklen(DOD) Tabelle basieren auf den Werten der in [SAF08] dargestellten Lebensdauerkurve, wobei die Anfangs und Endwerte extrapoliert sind. Die Werte der Tabelle IFaktor(I) basieren zum einen Teil auf Untersuchungen von [SOO02], und sind für Ströme kleiner 1C linear bis Null interpoliert. Diese zwei Tabellen sind aufeinander abgestimmt, sodass die im Datenblatt [SAF08] angegebene Lebensdauer für 80 Prozent Zyklen erreicht wird (unter der Annahme, dass der Strom 1/5 C ist).

D Simulationsergebnisse 1

Zyklen mit Unterschiedlicher Leistung bei gleicher Energie					
Abschätzung			Simulation		
Strom	Leistung	Ladedauer	Zyklen	Anteil der zyklenabh.	ges. Zeit
in C	in W	in sec		Alterung in %	in Jahre
0,025	7,44	72581	3006	3,14	19,37
0,050	14,88	36290	5285	14,85	17,03
0,080	23,81	22681	6667	32,86	13,43
0,100	29,76	18145	6945	44,05	11,19
0,120	35,71	15121	6909	53,61	9,28
0,150	44,64	12097	6553	64,80	7,04
0,180	53,57	10081	6061	72,88	5,42
0,200	59,52	9073	5721	76,96	4,61
0,250	74,40	7258	4976	83,96	3,21
0,330	98,21	5499	4030	90,14	1,97
0,400	119,04	4536	3420	93,10	1,38
0,500	148,80	3629	2788	95,47	0,90
0,600	178,56	3024	2341	96,81	0,63
0,800	238,08	2268	1757	98,19	0,35
1,000	297,60	1815	1324	98,81	0,21
1,200	357,12	1512	642	99,36	0,09
1,400	416,64	1296	284	99,18	0,03

Abbildung 57: Lebensdauer in Abhängigkeit von der Leistung

E Simulationsergebnisse 2

mit zeitabhängiger Alterung			ohne
Kapazität	Lebensende	Zyklen/Kapazität	Lebensende
in Ah	in Zyklen	in Zyklen/Ah	in Zyklen
24,0	1305	54	1376
26,4	1912	72	2068
28,8	2654	92	2964
31,2	3468	111	4007
33,6	4237	126	5063
36,0	4955	138	6117
38,4	5628	147	7170
40,8	6266	154	8236
43,2	6877	159	9320
45,6	7455	163	10412
48,0	8056	168	11632
50,4	9106	181	14144
52,8	10488	199	18134
55,2	12039	218	23486
57,6	13657	237	30099
60,0	15229	254	37743
62,4	16488	264	45571
64,8	17492	270	
67,2	18313	273	
69,6	18997	273	
72,0	19576	272	
74,4	20072	270	
76,8	20503	267	
79,2	20881	264	
81,6	21215	260	
84,0	21511	256	
86,4	21777	252	
88,8	22017	248	
91,2	22234	244	
93,6	22432	240	

Abbildung 58: Lebensdauer in Abhängigkeit von der Kapazität

F Simulationsergebnisse 3

Elektroauto		
Parameter	Simulationsergebnis	
kalendarische Alterung	Lebensdauer	Anteil der kalendarischen
in Jahre	in Jahre	Alterung in Prozent
0,50	0,48	96,80
1,00	0,94	93,79
1,50	1,36	90,97
2,00	1,77	88,33
2,50	2,15	85,82
3,00	2,50	83,48
3,50	2,84	81,24
4,00	3,16	79,12
4,50	3,47	77,12
5,00	3,76	75,21
6,00	4,30	71,67
8,00	5,24	65,52
10,00	6,03	60,33
12,00	6,71	55,91
15,00	7,56	50,39
18,00	8,26	45,85

Abbildung 59: Lebensdauer in Abhängigkeit von der kalendarischen Alterung