

Fuzzy-Modellierung des Ladezustandes von Bleibatterien - Entwurf und Implementierung

Steffen Kohlhaas

Diplomarbeit

Februar 2002

Betreuung:

Prof. Dr. Peter Gemmar

**Institut für Innovative Informatik-Anwendungen
I3A
Fachhochschule Trier
University of Applied Sciences**

INSTITUT FÜR INNOVATIVE INFORMATIK-ANWENDUNGEN
an der
FACHHOCHSCHULE TRIER
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Autor/en: **Steffen Kohlhaas**
Titel: **Fuzzy-Modellierung des Ladezustandes von
Bleibatterien - Entwurf und
Implementierung**
Projekt: **Angewandte Fuzzy Technologien**
Betreuung: **Prof. Dr. Peter Gemmar**
Martin Greving, Dipl.-Inform. (FH)

Februar 2002

Das Institut für Innovative Informatik-Anwendungen I3A behält sich die ausschließlichen Nutzungs- und Verwertungsrechte an dieser Arbeit vor. Diese Arbeit darf von Dritten auch in Auszügen nur mit Genehmigung des Institut für Innovative Informatik-Anwendungen verwendet, verteilt oder vervielfältigt werden.

Unterschrift des Autors

© Copyright Institut für Innovative Informatik-Anwendungen, 2002

Mein Dank gilt Prof. Dr. Gemmar für die Betreuung meiner Diplomarbeit. Besonders möchte ich mich bei Martin Greving für seine Hilfe bei der Modellerstellung sowie der schriftlichen Ausarbeitung bedanken. Dirk-Uwe Sauer vom Institut für Solare Energiesysteme danke ich für seine Ratschläge und die fachkundigen Diskussionen über Batterie-spezifische Fragen. Weiterhin gilt mein Dank Manfred Stüber für seine Hilfe bei der automatischen Optimierung von Fuzzy Systemen.

Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Fuzzy-Modelles für Bleibatterien, das im späteren Einsatz den Ladezustand einer Bleibatterie ermitteln soll. Die chemischen und physikalischen Vorgänge in einer Bleibatterie sind stark nichtlinear und hängen voneinander ab. Es ist sehr aufwändig, ein mathematisches Modell für den Ladezustand zu entwickeln. In dieser Arbeit wird untersucht, ob es möglich ist, ein Fuzzy-Modell aus vorliegenden Datenreihen einer Bleibatterie zu entwickeln. Es wird gezeigt, dass eine Modellierung des Ladezustandes mit Fuzzy-Logic einen geringen Fehler vorweisen kann.

Abstract

This work describes the development of a Fuzzy model for lead batteries, which is to determine the charge of a lead battery in the later application. The chemical and physical processes in a lead battery are strongly nonlinear and depend from each other. It is very difficult to develop a mathematical model for the charge. In this work it is examined if it is possible to develop a Fuzzy model from available data of a lead battery. It is shown that a modelling of the charge with Fuzzy Logic can show a small error.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziele und Aufgabenstellung	3
2.1	Motivation und Aufgabenstellung	3
2.1.1	Hybride Systeme	3
2.1.2	Lebensdauererhöhung von Bleibatterien	4
2.1.3	Energiemanagement	4
2.2	Ziele	5
3	Begriffe	7
4	Bestehende Verfahren zur Ladezustandsermittlung	9
4.1	Spannungsmessung	9
4.2	Säuredichtesensor	9
4.3	U-I-Kennfeld	10
4.4	Strom-Bilanzierung	12
4.4.1	Grundlagen	12
4.4.2	Bilanzierung mit Fuzzy-Korrekturglied	12
4.4.3	Probleme	13
5	Lösungsansätze für eine Ladezustandsermittlung	15
5.1	Bilanzierung mit Alterungsmodell	15
5.2	U-I-T-SOC-Kennfeld	17
5.3	Grundmodell der Ladezustandsermittlung	18
6	Fuzzy-Logic	20
6.1	Geschichte der Fuzzy-Logic	20
6.2	Grundlagen der Fuzzy-Logic	21
6.3	Fuzzy-Sets und unscharfe Beschreibung	22
6.4	Fuzzifizierung	23
6.5	Fuzzy-Inferenzschema	23
6.5.1	Regelbasis	24
6.5.2	Erfüllungsgrad	25
6.6	Defuzzifizierung	26
6.6.1	Mamdani	26
6.6.1.1	Max-Kriterium-Methode	27
6.6.1.2	Mean-of-Maxima-Methode	28
6.6.1.3	Centre-of-Gravity-Methode	28
6.6.2	Takagi-Sugeno	29

7	Fuzzy-Modelle zur Ermittlung des Ladezustandes	31
7.1	Fehler	31
7.2	Referenzdaten	33
7.2.1	Benötigte Daten für die Ladezustandsermittlung	33
7.2.2	Berechnung der SOC-Referenzdaten	33
7.2.3	Beispieldatensätze	35
7.2.4	Datenanalyse	36
7.3	Fuzzy-Systemwahl	38
7.4	Einfache Bilanzierung als Grundlage für Fuzzy-Modell	39
7.5	Fuzzy-Bilanzierung des Stromes	42
7.6	Beeinflussung der Bilanzierung durch den Ladezustand	44
7.7	Fehlerrückführung mit UI-Tupel	47
7.8	Zusammenfassung	49
8	Automatisch optimierte Systemmodelle	51
8.1	Bilanzierung mit Strom und Spannung	52
8.2	Bilanzierung mit Strom, Spannung und Temperatur	53
8.3	Fuzzy-Bilanzierung mit Rekalisierung mittels U-I-Kennfeld .	53
8.3.1	UI-Kennfeld mit zeitlich konstanten hohen Strom	54
8.3.2	Korrigierte Fuzzy-Bilanzierung	55
9	Test der entwickelten Verfahren	57
10	Zusammenfassung und Ausblick	59
A	Physikalische und chemische Grundlagen	61
A.1	Ladevorgang	61
A.2	Entladevorgang	63
A.3	Ersatzschaltbild Batterie	63
A.4	Alterungsmechanismen	64
A.4.1	Gasung	65
A.4.2	Selbstentladung	65
A.4.3	Gitterkorrosion	66
A.4.4	Sulfatierung	66
A.4.5	Abschlammung	67
A.4.6	Säureschichtung	67
A.5	Einfluss der Entladestromstärke	69
A.6	Einfluss der Temperatur	70
A.7	Tiefentladung	71
A.8	Überladung	72
	Literaturverzeichnis	74

1 Einleitung

In der heutigen Zeit wird an jedem Ort und zu jeder Zeit elektrische Energie benötigt. Die Anzahl der elektrischen Geräte steigt und die Mobilität der Menschen nimmt zu. Steht das öffentliche Stromnetz zur Verfügung, wird es auch genutzt, da es kaum eine günstigere und effektivere Energiequelle gibt.

Wenn jedoch der Einsatzort in grosser Entfernung zum öffentlichen Stromnetz liegt, muss eine teure Leitung gelegt werden. Der Aufwand hängt dann direkt von der Entfernung und der benötigten Energiemenge ab. Je weiter die Distanz zwischen Stromnetz und Verbraucher bzw. je kleiner der Strombedarf, umso mehr bietet sich eine Stromversorgung mit Batterie an. Diese Systeme nennt man Inselsysteme, weil sie ohne Anschluss an ein Stromnetz arbeiten. Hier wird elektrische Energie über einen Generator erzeugt und in Batterien gespeichert. Für die Energieerzeugung lassen sich unterschiedliche Generatoren, wie z. B. Verbrennungsmotoren mit fossilen Brennstoffen, Windkraft-, Wasserkraft- oder Photovoltaik(PV)-Generatoren verwenden. Inselsysteme mit Photovoltaik-Generatoren werden solare Inselsysteme genannt.

Bei der Ladezustandsermittlung von Bleibatterien soll ein Wert angegeben werden, der relativ angibt, wie voll bzw. leer die Batterie ist. Beispielsweise können bei einer Batterie mit einer Nennkapazität von $C_N = 100Ah$ und einem Ladezustand von 0,75 noch 75Ah entladen werden. Mit einer genauen Ermittlung des Ladezustandes kann wie in 2.1.1 beispielsweise dargestellt, bei Hybriden Systemen fossile Energie eingespart werden. Bei solaren Inselsystemen kommen fast immer Bleibatterien zum Einsatz, da die Kosten im Verhältnis zur Kapazität geringer sind als bei Batterietypen wie NickelCadmium, NickelMetallhydrid, etc. Aus diesem Grund werden in dieser Diplomarbeit ausschließlich Bleibatterien betrachtet.

Die Diplomarbeit wurde am Institut für Innovative Informatik-Anwendungen (I3A) der Fachhochschule Trier angefertigt. Zur Klärung einiger batteriespezifischer Fragen und Diskussion erster Modellansätze bestand ein Kontakt zum Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg.

Nachdem in Kapitel 2 die Ziele und die Aufgabenstellung abgegrenzt sind, führt das Kapitel 4 bereits vorhandene Verfahren zur Ladezustandsermittlung an. In Kapitel 5 werden die ersten Lösungsansätze der Ladezustandsermittlung dargestellt und das zu entwickelnde Modell festgelegt. Nach einer Darstellung der Fuzzy-Logic in Kapitel 6, wird in Kapitel 7 ein erster Modellansatz implementiert. Um ein allgemeingültiges Ergebnis zu erzielen, werden die gewonnenen Erfahrungen im 8. Kapitel in die automatisch optimierten Systemmodelle umgesetzt. Ein Test der entwickelten Modelle ist in Kapitel

9 dargestellt, darauf folgt eine Zusammenfassung in 10 und in Anhang A werden einige physikalische und chemische Grundlagen erklärt.

2 Ziele und Aufgabenstellung

Der Ladezustand einer Bleibatterie ist eine wichtige Größe bei der Steuerung von Inselsystemen. In Abschnitt 2.1 wird die Motivation zu einer genauen Erkennung des Ladezustandes dargestellt. Die bereits bestehenden Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes weisen, wie in Kapitel 4 beschrieben, häufig einen zu großen Fehler auf oder lassen sich zum Teil nicht online berechnen. Ausgehend von diesem Problem werden in Abschnitt 2.2 die Ziele der Diplomarbeit, wie z. B. Genauigkeit oder Adaptierbarkeit dargestellt.

2.1 Motivation und Aufgabenstellung

Die Aufgabe der Diplomarbeit ist es, ein Modell zu entwickeln, das in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Messgrößen Strom, Spannung und Temperatur den Ladezustand einer Bleibatterie möglichst genau berechnet. Dazu werden die Vorgehensweise zur Ermittlung des Ladezustandes beschrieben und geprüft, ob eine Ermittlung des Ladezustandes mit Hilfe der Fuzzy-Logic möglich ist. Anschließend wird der entwickelte Ansatz mit Hilfe einer Fuzzy-Entwicklungsumgebung realisiert und getestet.

Der Ladezustand wird in verschiedenen Einsatzgebieten benötigt und trägt zur Kostenreduktion von Inselsystemen oder zur Einsparung fossiler Energieträger bei. Beispiele zu diesen Einsatzgebieten sind in den Abschnitten 2.1.1 bis 2.1.3 aufgeführt. Dabei wird gezeigt, warum ein Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes einen möglichst geringen Fehler aufweisen soll.

2.1.1 Hybride Systeme

Hybride Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass die benötigte Energie einerseits aus regenerativen Energieformen gewonnen wird und andererseits aus fossilen Energieträgern elektrische Energie erzeugt werden muss. Beim Systemmanagement wird nun versucht, fossile Energieträger durch eine gute Betriebsführung zu sparen und möglichst viel der benötigten Energie aus den regenerativen Energieformen zu gewinnen. Wenn die Batterie, z.B. im Winter, nicht mehr genügend von der Sonne aufgeladen wird, muss der Generator zum Laden anlaufen. Dieser Punkt wird durch einen bestimmten Ladezustand beschrieben, der festgelegt und während des Betrieb genau festgestellt werden muss, um zum richtigen Zeitpunkt den Generator zu starten. Wenn ein zu hoher Ladezustand berechnet wird, läuft der Generator zu spät an

und die Batterie ist leer, wenn sie benötigt wird. Im Gegensatz dazu würde ein zu niedrig berechneter Ladezustand der Batterie dazu führen, dass der Generator zu früh läuft und unnötig fossile Energieträger “verbraucht”.

2.1.2 Lebensdauererhöhung von Bleibatterien

Da die Lebensdauer einer Bleibatterie nur etwa fünf bis acht Jahre beträgt, ist in einem System mit längerer Laufzeit die Bleibatterie oft der teuerste Teil und sollte deshalb mit größter Sorgfalt behandelt werden. Wartung, Pflege und Austausch kosten Personal und Material.

Einen besonderen Einfluss auf den Alterungsprozess einer Batterie und damit auf die Lebensdauer, hat die Tiefentladung (siehe Anhang A.7). Der Grund dafür ist, dass im tiefentladenen Zustand die Säuredichte sehr gering ist und die Löslichkeit des Elektrodenmaterials steigt. Hierbei werden die Alterungsmechanismen Korrosion, Sulfatierung und Kurzschlussbildung durch Entladeprodukte beschleunigt wie in Anhang A.7 beschrieben wird. Eine Bleibatterie gilt als tiefentladen, wenn der Ladezustand $< 0,5$ beträgt. Allgemein kann man sagen, je tiefer eine Bleibatterie entladen ist, desto stärker altert sie. Deswegen muss man versuchen, Tiefentladungen zu verhindern um dadurch die Lebensdauer zu verlängern. Durch die Ladezustandsermittlung kann man nun feststellen, bis zu welchem Grad eine Batterie innerhalb eines Jahreszykluses entladen wird und dementsprechend die Größe der Batterie für dieses System dimensionieren, so dass keine Tiefentladezustände mehr auftreten können. Da in den Sommermonaten ein Überangebot von Sonnenenergie vorhanden ist, sollte dieses komplett in der Batterie gespeichert werden können. Da mit der Größe der Batterie natürlich auch die Kosten steigen, sollte nach den beschriebenen Kriterien der maximalen Energiespeicherung und der Vermeidung von Tiefentladungen versucht werden, die optimale Größe der Batterie zu ermitteln. Dafür ist eine sehr genaue Ladezustandsermittlung nötig um über längere Zeit die Kosten zu senken.

2.1.3 Energiemanagement

Ein Energiemanagement hat zur Aufgabe, die zur Verfügung stehende Energie optimal auf die vorhandenen Verbraucher zu verteilen. Grundlage für ein solches System ist die Erkenntnis, dass Geräte eine unterschiedliche Notwendigkeit aufweisen. So ist es zum Beispiel beim Einsatz eines Kühlschranks wichtig, dass er 24 Stunden am Tag durchläuft, im Gegensatz dazu kann ein Wäschetrockner so lange abgeschaltet werden, bis wieder genug Energie zur Verfügung steht. Je nach vorhandener Energiemenge können so mit dem

Energiemanagementsystem Verbraucher nach einer vorgegebenen Prioritätsliste abgeschaltet werden, um Verbraucher mit einer höheren Priorität sicher versorgen zu können.

Eingangsgröße für ein solches Energiemanagementsystem ist bei solaren Inselnssystemen der Ladezustand des Energiespeichers. Je genauer dieser Ladezustand ermittelt werden kann, desto genauer und effektiver kann das Energiemanagementsystem arbeiten.

2.2 Ziele

Die bereits bestehenden Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes weisen wie in Kapitel 4 beschrieben einen zu großen maximalen absoluten Fehler auf. Um ein gutes Verfahren zur Ermittlung des Ladezustandes zu erreichen, muss der maximale absolute Fehler verringert werden und laut [7] unter zehn Prozent liegen.

Zu den weiteren Zielen zählen neben der Lösung des Problems der Ladezustandsermittlung und der Fehlerverringern auch die Erfüllung bestimmter praxisorientierter Bedingungen.

- Das erstellte Modell soll allgemeingültig sein, d. h. es sollte möglichst schnell an verschiedene Batterietypen angepasst werden können.
- Nach Vorlage der Daten über einen kleinen Zeitraum soll die gesamte Lebensdauer der Batterie modelliert werden.
- Um den Einsatz auf einem Microcontroller zu ermöglichen, muss der Rechenaufwand und die Programmgröße im Rahmen des Einsatzgebietes gehalten werden.
- Die Berechnung des Ladezustandes muss online möglich sein und nicht erst nach Betrachtung einer gesamten Zeitreihe.
- Auf der Grundlage der physikalischen und chemischen Prozesse einer Batterie sollte die Regelbasis interpretiert werden können.
- Ein genereller Ansatz sollte für eine automatische Modellerstellung erstellt werden, damit eine gute Adaptierbarkeit gewährleistet ist.

Im Gegensatz zu den bereits anführten ist es kein Ziel, die Erkennung des Vollzustandes der Batterie zu erreichen, denn dieses kann leicht mit einfachen

Mitteln erreicht werden. Zu diesem Zweck wird ein Spannungswert festgelegt, bei dem die Batterie voll ist. Dieser Spannungswert muss temperaturkorrigiert sein, d. h. in Abhängigkeit der vorherrschenden Temperatur muss eine bestimmte Spannung erreicht werden und eine gewisse Zeit andauern.

3 Begriffe

In [12] befindet sich eine Auflistung der wichtigsten Begriffe und Abkürzungen, die in Bezug auf die Ladezustandsermittlung benötigt werden. In Tabelle 1 und 2 sind alle für dieses Dokument vorkommenden Bezeichnungen aufgeführt, wobei die Vorzeichen der Ladungsbilanz aus [12] negiert sind, damit bei der Ladungsbilanzierung ein positiver Strom eine Verringerung des SOC bewirkt wie später in Abschnitt 7.2.1 definiert wird.

Bezeichnung [Einheit]	Formelzeichen	Definition
Nennkapazität[Ah]	C_N (C_{10})	Herstellerangabe über die Kapazität des Akkus, der über 10 Stunden bis zu einer definierten Entladeschlussspannung entladen wurde (capacity)
aktuelle Kapazität[Ah]	C_m	Kapazitätstest über 10 Stunden bis 1,8V/Zelle, ausgehend von einem Vollladezustand zu einem späteren Zeitpunkt als der Inbetriebnahme
nutzbare Kapazität[Ah]	C_P	Entnehmbare Ladungsmenge, zwischen dem im Betrieb erreichbaren obersten Ladezustand und dem im Betrieb definierten Entladeschluss
Entnehmbare Ladung[Ah]	Q_r	Zu beliebigen Zeitpunkt entnehmbare Ladungsmenge mit Konstantstrom (remaining capacity)
Ladungsbilanz[Ah]	Q_b	Hinzugefügte Ladungsmenge seit letzter Vollladung

Tabelle 1: Batteriespezifische Begriffe und Abkürzungen [12] Teil 1

Bezeichnung [Einheit]	Formelzeichen	Definition
Entladegrad []	DOD	Verhältnis aus Ladungsbilanz und Nennkapazität; $Entladegrad = \frac{-Ladungsbilanz}{Nennkapazitaet}$ (depth of discharge)
Ladegrad[]	SOC	$Ladegrad = \frac{Nennkapazitaet + Ladungsbilanz}{Nennkapazitaet}$ (state of charge)
Ladezustand []	SOC_r	$Ladezustand = \frac{aktuelleKapazitaet + Ladungsbilanz}{aktuelleKapazitaet}$
Betriebsladezustand[]	SOC_p	$Betriebsladezustand = \frac{nutzbareKapazitaet + Ladungsbilanz}{nutzbareKapazitaet}$
Vollladezustand[]	$FULL$	Bei konstanter Ladespannung keine Änderung des Stroms während der letzten 2 Stunden
Alterungsgrad[]	SOH	$Alterungsgrad = \frac{aktuelleKapazitaet}{Nennkapazitaet}$; Nach Definition ist das Ende der Lebensdauer einer Batterie erreicht, wenn $SOH \leq 0,8$ (state of health)

Tabelle 2: Batteriespezifische Begriffe und Abkürzungen [12] Teil 2

4 Bestehende Verfahren zur Ladezustandsermittlung

Die Ladezustandsermittlung wurde bereits nach mehreren verschiedenen Strategien gelöst. Deren Vorgehensweise sowie die Vor- und Nachteile dieser Verfahren werden in diesem Kapitel grundlegend vorgestellt.

4.1 Spannungsmessung

Die technisch am einfachsten zu realisierende Möglichkeit der Ladezustandsermittlung ist die Messung der Spannung. Die Ruhespannung ist die Spannung, die sich nach einer Einschwingzeit von mehreren Stunden einstellt. Sie ändert sich zwischen Entladezustand und geladenem Zustand um 100mV pro Zelle [4] und kann daher als Maß für den Ladezustand betrachtet werden. Problematisch ist dabei die Dauer der Einschwingzeit der Spannung, denn erst nach mehreren Stunden ist die Ruhespannung proportional zum Ladezustand [12]. Im solartypischen Einsatz mit ständig wechselnden Strömen und nur kurzen Pausen ist diese Art der SOC-Ermittlung ungeeignet, da der maximale absolute Fehler bis 100% betragen kann [12, Seite 214]. Die Elektrolytschichtung, Alterung, Strom und Temperatur haben einen weiteren Einfluss auf die Klemmenspannung, so dass die Spannungsmessung als Methode zur Ermittlung des Ladezustandes ausscheidet.

4.2 Säuredichtesensor

Die Säuredichte ist neben der Ruhespannung eine weitere Messgröße zur direkten Ermittlung des Ladezustandes. Da der Elektrolyt nicht nur als Ionenleiter dient, sondern auch an den chemischen Vorgängen teilnimmt, ändert sich dessen Zusammensetzung beim Laden bzw. Entladen. Der dadurch hervorgerufene Dichteunterschied kann gemessen werden und gibt Aufschluss über den Ladezustand der Batterie. Die Dichte verläuft linear in Abhängigkeit zum Ladezustand und die Differenz von entladenen bis geladenen Zustand beträgt beispielsweise bei einer Vb 625 von Varta 0,026 g/cm³ [4].

Die Messung der Dichte kann direkt mit einem Dichtesensor erfolgen oder indirekt über die Messung einer weiteren Elektrolyteigenschaft. Dazu

bieten sich die Eigenschaften Ionenkonzentration, Leitfähigkeit, Brechungsindex, Viskosität, Dielektrizitätskonstante oder Schallgeschwindigkeit an.

Ein Problem der Säuredichtemessung sind die lokal unterschiedlichen Dichtegrade innerhalb der Batterie. Aufgrund der in A.4.6 beschriebenen Säureschichtung ist die Dichte der Säure im unteren Bereich der Batterie geringer als im oberen Bereich. Um diese Differenz auszugleichen bzw. zu mitteln, sollten an verschiedenen Stellen Sensoren eingebaut werden. Da ein Sensor und der Einbau eines solchen sehr teuer ist, ist diese Variante nur bei großen Batterieanlagen zu rechtfertigen, weil sonst die Sensorkosten die Kosten der Batterie übersteigen.

Die unterschiedlichen Dichtegrade lassen sich auch mit anderen Methoden verringern. Wie in A.4.6 beschrieben, lassen sich Gasung oder eine Umwälzpumpe zur Vermischung des Elektrolytes nutzen. Die Gasung hat allerdings den Nebeneffekt, dass die gebildeten Gasblasen am Säuredichtesensor haften können. Dadurch entsteht bei den störanfälligen Sensoren ein großer Messfehler. Der Einsatz einer Umwälzpumpe hat zur Folge, dass ein zu wartendes Teil in die Batterie eingebaut werden muss. Außerdem kostet der Betrieb der Pumpe Energie, die der Batterie verloren geht.

Die Säuredichtemessung ist ein sehr genaues Verfahren zur Ladezustandsermittlung, allerdings ist sie sehr aufwändig und für kleinere Anwendungen nicht geeignet.

4.3 U-I-Kennfeld

Bei dieser einfachen Art der Ladezustandsermittlung wird nach dem Messen der Spannung und des Stromes der Ladezustand an einer Kennlinie abgelesen. Hierbei unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Verfahren.

Beim aktiven Verfahren wird eine Batterie mit einer definierten Stromstärke belastet. Aus der dann anliegenden Spannung wird der Ladezustand abgeleitet.

Beim passiven Verfahren wird während der Laufzeit des Systems aus jedem Tupel (Spannung, Strom) der Ladezustand ermittelt. Dazu hat die Firma Steca ein einfaches Kennlinienmodell entwickelt [12], das bereits über hundertausendmal verkauft und eingesetzt wurde. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass es nur mit den wenigen Steca-Batterie-Typen funktioniert (100 bis 150 Ah) und der maximale absolute Fehler F_{maxAbs} bis 40% beträgt. Nach der Verbesserung dieses Verfahrens mit Unterstützung vom Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) wurde F_{maxAbs} auf 30% verbessert. Dieses

verbesserte Verfahren ist nun auch für andere Batterietypen anwendbar.

Das besondere an dieser Ladezustandsermittlung ist, dass keine Kapazitätsangabe nötig ist, und dass es für alle Batteriegrößen gleich funktioniert. Wie später in Abschnitt 4.4 beschrieben, ist der Nachteil der bilanzierenden Verfahren eine Aufsummierung der Fehler und dem daraus resultierenden Drift. Dieses Verhalten kann bei den Strom-Spannungs-Kennlinien nicht auftreten, da der Ladezustand immer jeweils aus den aktuellen physikalischen Größen berechnet wird und keine Vergangenheit berücksichtigt wird. Aus diesem Grund muss die Strommessung auch nicht mit sehr genauen Messgeräten erfolgen, sondern es können günstigere Ampere-, Voltmeter und Temperaturmesser eingesetzt werden. Ausserdem ist der Anspruch an die Rechenleistung mit den Strom-Spannung-Kennlinien nicht sehr groß. Deshalb kann diese Art der Ladezustandsermittlung bereits in kleinen Laderegler zum Einsatz kommen.

Der Grund für den bereits beschriebenen Fehler F_{maxAbs} von 30% ist die Trägheit der Batterie. Wenn man sich vorstellt, dass anfangs die Batterie in Ruhe ist und danach mit einem sehr hohen Strom belastet wird, dauert es sehr lange, bis sich die Spannung proportional zum Ladezustand einstellt. Beim Messen des Wertepaares (Strom, Spannung) in der Zeit bis sich die Batterie eingependelt hat, liegt bei hohem Strom eine hohe Spannung vor und daraus wird auf einen zu hohen Ladezustand geschlossen. Deshalb muss, bevor der Ladezustand ermittelt werden kann, eine längere Zeit ein konstanter Strom geflossen sein. Bei Anwendungen mit längeren Intervallen bei gleichem Strom ist eine Strom-Spannungs-Kennlinie ein gutes Ladezustandsermittlungsverfahren, jedoch nicht bei Beispielen mit stark wechselnden Strömen.

Eine weitere Verbesserung des Steca-Modells ist unter Berücksichtigung anderer physikalischer Größen zu erwarten. Neben der Spannung und des Stromes spielt die Temperatur eine große Rolle für den Ladezustand einer Batterie. Mit der Temperatur kann man das Kennlinienfeld um eine weitere Größe erweitern und in Abhängigkeit von Strom, Spannung und Temperatur den Ladezustand ermitteln. Auch die Alterung könnte in dieses Modell mit einfließen. Mit einer Modellierung der im Anhang A beschriebenen Mechanismen ist eine weitere Optimierung des Strom-Spannung-Kennlinien-Modells möglich.

4.4 Strom-Bilanzierung

Bei der Überlegung nach einem Ladezustandermittlungsverfahren denkt man in erster Linie zuerst an eine Bilanzierung des fließenden Stromes. Dabei stellt man sich die Batterie als Black-Box vor mit den Eingangsgrößen Ladestrom, Entladestrom und der Ausgangsgröße Ladezustand. Bei bekanntem Anfangsladezustand muss man nur noch die Entladungs-/Ladungsmenge aufaddieren und erhält somit den gerade herrschenden Ladezustand.

4.4.1 Grundlagen

Als Grundlage zur Berechnung des Ladezustandes dient die einfache Bilanzierung des Stromes. Dabei ergibt sich die Ladungsbilanz Q_b aus dem Integral des Stromes über die Zeit.

$$Q_b = \int_t I dt \quad (1)$$

Die Ladungsbilanz gibt darüber Auskunft, welche Ladungsmenge der Batterie entnommen oder hinzugefügt wurde. Für diese Diplomarbeit wird festgelegt, dass ein negativer Strom einem Entladestrom und ein positiver Strom einem Ladestrom entspricht. Dabei ergibt die Entladung eine negative und die Ladung eine positive Ladungsbilanz.

Wie in Tabelle 2 beschrieben, berechnet sich der Ladezustand zu

$$SOC_r = \frac{\text{aktuelle Kapazitaet} + \text{Ladungsbilanz}}{\text{aktuelle Kapazitaet}}. \quad (2)$$

Zur Berechnung der Ladungsbilanz ergibt sich bei einem Messintervall Δt_i die Formel

$$Q_{b_i} = \sum_{i=1}^n I_i \cdot \Delta t_i. \quad (3)$$

Mit der aktuellen Kapazität der Batterie wird dann der aktuelle Ladezustand mit

$$SOC_{r_i} = \frac{C_m + Q_{b_i}}{C_m} \quad (4)$$

berechnet.

4.4.2 Bilanzierung mit Fuzzy-Korrekturglied

Ein Ansatz der Ladezustandsermittlung mit Fuzzy-Technologie wurde bereits in [6] erarbeitet. Dabei wird die Ermittlung des Ladezustandes in erster

Linie durch Bilanzierung des Stromes realisiert. Um den in 4.4.3 beschriebenen Drift des Ladezustandes zu verhindern, wurde der ermittelte Ladezustand korrigiert. Dazu musste erkannt werden, wann der ermittelte Ladezustand zu weit vom wirklichen Ladezustand entfernt ist. Hierbei wurde der Ladezustand mit dem Ergebnis von Experten verglichen. Das Expertenwissen wurde in Regeln festgehalten, in denen aus Strom, Spannung und Temperatur der Ladezustand definiert wurde. Neben diesem numerischen Wert wurde außerdem der Bereich angegeben, in dem sich der Ladezustand befinden kann.

Mit Hilfe dieser Regelbasis wurde mit Fuzzy-Logic aus den gerade herrschenden Größen eine obere und untere Grenze des Ladezustandes angegeben. Im Einsatz wurden die Zeitintervalle auf 30 Minuten umgerechnet. Am Ende wurde zudem eine Kontrolle durchgeführt, ob korrigiert werden musste oder nicht. Wenn eine Korrektur nötig war, wurde der Ladezustand in das richtige Intervall gesetzt. Der dadurch entstandene Sprung wurde durch ein Dämpfungsglied verkleinert.

4.4.3 Probleme

Der Nachteil der Strom-Bilanzierung ist ein immer auftretender Drift, der durch Messfehler verursacht wird. Dieser zeitliche Fehleranstieg F_{difAbs} setzt sich solange fort, bis ein definierter Punkt in der Ladezustandskurve erreicht wird, bei dem der Ladezustand wieder rekaliibriert werden kann. Dazu bietet sich der Zustand der vollgeladenen Batterie an, weil dieser gut erkannt werden kann und keine Schäden hervorruft. Wie in Anhang A.7 beschrieben, ist eine Tiefentladung dagegen sehr schädlich für die Batterie und kann so nicht zur Rekaliibration genutzt werden.

Bei solartypischen Anwendungen wird der Vollladezustand allerdings in den Wintermonaten nur selten oder gar nicht erreicht. Dadurch ergibt sich ein langer Zeitraum, bei dem sich der berechnete immer weiter vom realen Ladezustand entfernt. Hier muss man dann auf weitere Größen zurückgreifen, z. B. Alter, Spannung, Temperatur, etc., um den Ladezustand unabhängig von der Bilanzierung zu bestimmen, um somit einen Drift zu unterbinden.

Ein weiteres Problem sind die Kosten für die Strommessung. Um den sich immer wieder aufaddierenden Fehler zu verringern, muss das Amperemeter sehr genau sein. Bei kleinen Systemen lohnt sich diese teure Messung des Stromes nicht, weil sonst die Kosten für die Ladezustandsermittlung unverhältnismäßig hoch sind. Bei großen Systemen ist also für die Bilanzierung ein präziser Strommesser erforderlich, wobei trotzdem mit kleinem Fehler ein Drift verursacht wird. Zudem spielen sich in der Batterie weitere Vorgänge ab, die die Bilanzierung verschlechtern. Dazu zählen Wärmeverluste,

Alterung und weitere in Kapitel A beschriebenen Abläufe. Diese müssen modelliert werden, um die zugrunde gelegte Strom-Bilanzierung zu korrigieren.

Man könnte sich vorstellen, dass bei den verschiedenen Fehlern die auftreten, sich im Mittel wieder der richtige Wert ergibt. Wenn sich die Fehler ausgleichen würden, dann müsste man keine Korrektur entwickeln. Das hat sich allerdings nicht bestätigt. Der Grund liegt darin, dass die Messgeräte oder Bilanzierungsmodelle mit jeder Berechnung des Folgeladezustandes immer wieder einen Fehler in die gleiche Richtung erzeugen. Also ist auch keine automatische Kalibrierung zu erwarten.

5 Lösungsansätze für eine Ladezustandsermittlung

Nach der Beurteilung der bereits bestehenden Verfahren zur Ladezustandsermittlung in Kapitel 4 wurden die ersten Ansätze zur Ladezustandsermittlung erarbeitet. Dabei sollte die im Kapitel 6 vorgestellte Fuzzy-Technologie in die Lösungsansätze mit einfließen, um eine spätere Implementation zu erleichtern. Im Wesentlichen bildeten sich bei diesen ersten Entwürfen die in Abschnitt 5.1 dargestellte Bilanzierung mit Alterungsbestimmung und das in Abschnitt 5.2 beschriebene U-I-SOC-Kennfeld heraus, die als Grundlage zur Diskussion [7] dienen sollten. Die aus diesem Gespräch gewonnenen Erkenntnisse sind in das Modell in 5.3 eingeflossen, das daraufhin entwickelt wurde.

5.1 Bilanzierung mit Alterungsmodell

Der Ladezustand ist in 4.4.1 definiert als die relative Summe zwischen der nutzbaren Kapazität C_m und der Ladungsbilanz Q_b

$$SOC_r = \frac{C_m + Q_b}{C_m}. \quad (5)$$

Ausgehend von dieser Formel wurde ein Lösungsansatz für eine Bilanzierung mit einem korrigierenden Alterungsmodell entwickelt. Es wurde angenommen, dass sich die Alterung auf die nutzbare Kapazität auswirkt und damit die Berechnung des Ladezustandes verfälscht.

Grundlage dieses Modells ist eine in Abschnitt 4.4 beschriebene Bilanzierung des Stromes, die im rechten Teil der Abbildung 1 zu erkennen ist. Dabei wird jeweils die aktuelle Ladungsbilanz Q_b^t aus dem aktuellen Strom I^t und der zurückgeführten Ladungsbilanz Q_b^{t-1} berechnet.

Die in Anhang A beschriebenen Alterungsmechanismen und sonstigen Einflüsse auf die Kapazität C_m werden im Kapazitätberechnungsglied berücksichtigt. Dort geht eine SOC-Mittelung ein, die angibt, wie tief die Batterie im Schnitt entladen gewesen ist um einen niedrigen SOC mit einer Kapazitätsminderung gleichzusetzen, wie in Anhang A.7 beschrieben. Der Eingangswert T^t enthält die gerade aktuelle Temperatur, um den Zusammenhang 'geringe Temperatur' bewirkt 'geringe Kapazität' (siehe Anhang A.6) berücksichtigen zu können. Auch die Zeit ist eine Eingangsgröße der

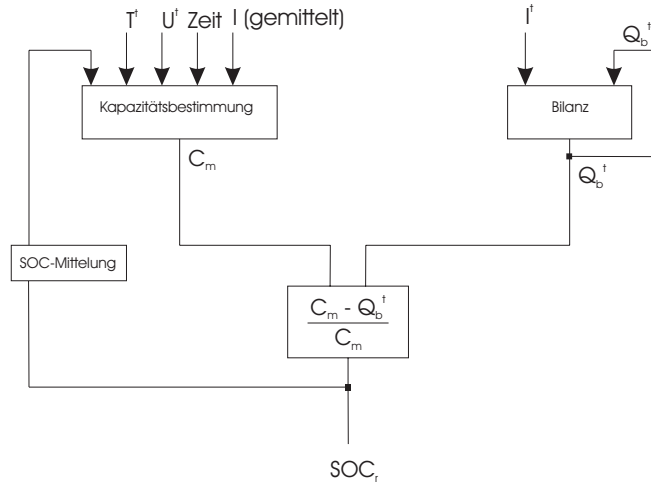


Abbildung 1: Korrigierte Bilanzierung durch Ermittlung der aktuellen Kapazität

Kapazitätsbestimmung, mit der eine Alterung in Abhängigkeit von der Betriebsdauer bestimmt wird. Als letztes geht der gemittelte Strom ein, damit ein hoher Lade-/Entladestrom für eine Kapazitätsminderung verantwortlich ist.

Nach Berechnung der Zwischengrößen C_m und Q_b^t wird der Ladezustand mit

$$SOC_r^t = \frac{C_m - Q_b^t}{C_m} \quad (6)$$

ermittelt.

Ziel dieser Modellierung ist es, aus den vorliegenden Testdatensätzen mit SOC_r und Q_b^t aus der Strombilanzierung die Zwischengröße C_m zu bestimmen. Die zur Verfügung stehenden Daten des *Stromes*, *Spannung*, *Temperatur*, *Alter* und *Ladezustand* sollten eine Abhängigkeit mit C_m zeigen, die mit Fuzzy-Technologie zu modellieren ist.

Die Vorteile dieses Ansatzes sind zum einen die Trennung der Ladezustandsermittlung in zwei Teile und damit die Möglichkeit der Betrachtung von einzelnen und einfacheren Mechanismen und zum anderen die Modellierung von elektrochemischen Vorgängen, die in Anhang A beschrieben werden.

Dieses Modell hat eine besondere Art der Rekalibrierung der nutzbaren Kapazität C_p . Wenn ein Vollladezustand erkannt wird, dann kann die nutzbare Kapazität C_p auf die aktuelle Kapazität C_m gesetzt werden. So wird später nicht mehr der Ladezustand, sondern der Ladegrad innerhalb der aktuellen Kapazität berechnet.

Der Fehler der Ladezustandsermittlung wird nur gering durch die Alterung einer Batterie hervorgerufen [7] und entsteht hauptsächlich durch die Fehler der Messgeräte. Der Analog-Digitalwandler erzeugt einen weiteren Fehleranstieg und die inneren Verluste durch Gasung bewirken eine Verfälschung der Bilanzierung. Damit kann die Zwischengröße C_m nicht aus den Testdaten (siehe 7.2) ermittelt werden und dieser Modellansatz wird nicht weiter verfolgt.

5.2 U-I-T-SOC-Kennfeld

Aufbauend auf dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen U-I-Kennfeld sollen mit dem in Abbildung 2 gezeigten Modell neben Strom und Spannung die Größen Temperatur, Zeit und SOC_r^{t-1} berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass der alte Ladezustand SOC_r^{t-1} nicht in Form einer Bilanzierung wie in Abschnitt 5.1 eingeht, sondern nur einen Einfluss auf Alterungsmechanismen hat. Auch hier soll die Zeit die Betriebsdauer der Batterie bedeuten, d. h. umso höher das Alter, desto geringer ist der berechnete Ladezustand.

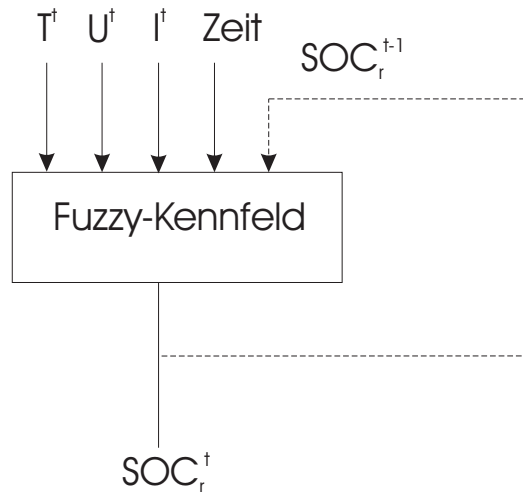


Abbildung 2: U-I-T-SOC-Kennfeld

Die Vorteile dieses Verfahrens sind, dass der Strom nicht über die Zeit bilanziert wird und es so nicht zum Fehlerdrift kommt. Außerdem ist eine rechnerunterstützte Modell-Adaption mit den vorliegenden Testdaten möglich und somit wird erwartet, dass sich für verschiedene Batterietypen leicht

ein Modell erstellen lässt. Durch die Hinzunahme der Größen Temperatur, Zeit und SOC_r^{t-1} wird angenommen, dass das vorhandene Verfahren des reinen U-I-Kennfeldes weiterhin verbessert wird.

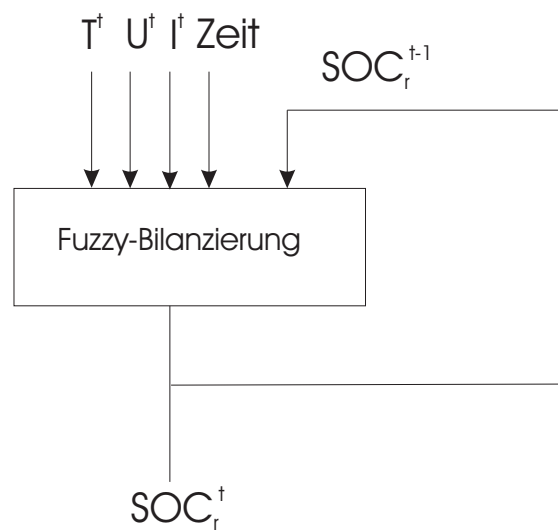
Gegen dieses Verfahren sprechen die in 4.3 beschriebenen Probleme eines U-I-Kennfeldes. Bei wechselnden Strömen ist dieser Ansatz nicht möglich, weil die chemischen Prozesse sehr langsam ablaufen und es somit sehr lange dauert, bis sich eine konstante Spannung einstellt.

5.3 Grundmodell der Ladezustandsermittlung

Nachdem in Abschnitt 5.1 ein Modell mit grundlegender Bilanzierung und in 5.2 eine auf dem UI-Kennfeld basierende Ladezustandsermittlung dargestellt wurde, sollte nun die Entscheidung über die Entwicklung des Grundmodells fallen.

Die Anwendung eines Kennfeldes bietet sich beim Einsatz der Fuzzy-Technologie an, da die nichtlinearen Bereiche des Kennfeldes mit der Fuzzy-Technologie gut modelliert werden können. Da allerdings bei den solartypischen Einsatzgebieten immer ein wechselnder Strom vorliegt, und somit große Fehler nicht vermieden werden können, scheidet das erweiterte UI-Kennfeld als Grundlage zur Modellentwicklung aus.

Da die Zwischengröße C_m , wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, nicht berechnet werden kann, wird der Lösungsansatz aus 5.1 modifiziert. Basierend auf einer implizierten Bilanzierung sollen die Größen *Strom*, *Spannung*, *Temperatur*, *Ladezustand* und *Alter* berücksichtigt werden. Daraus folgt das in Abbildung 3 dargestellte Modell mit dem Ladezustand SOC, der für die Bilanzierung zurückgeführt wird im Gegensatz zum Modell in Abbildung 2, mit einer Berücksichtigung des SOC für Alterungsmechanismen.

**Abbildung 3: Grundmodell für Implementation**

6 Fuzzy-Logic

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Fuzzy-Logic erklärt, mit der die Ladezustandsermittlung gelöst werden soll. Nachdem kurz die Geschichte in Abschnitt 6.1 dargestellt wird, sind die grundlegenden Elemente der Fuzzy-Logic in Abschnitt 6.2 enthalten. Der Begriff des Fuzzy-Sets ist in 6.3 beschrieben und die Vorgänge Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung folgen in den Abschnitten 6.4, 6.5 und 6.6. Diese Komponenten bilden zusammen das Fuzzy-System, in dem zwischen den einzelnen Teilen kommuniziert wird. Bei der Anwendung der Fuzzy-Logic für ein bestimmtes Aufgabengebiet wurde dieses Hilfsmittel als Fuzzy-Technologie bezeichnet.

6.1 Geschichte der Fuzzy-Logic

Der Grundstein der Fuzzy-Technologie wurde 1965 vom Systemtheoretiker und Elektronikprofessor Lotfi Zadeh gelegt. Er beschrieb die sprachliche ungenaue Information als Fuzzy-Set, das näher in Abschnitt 6.3 beschrieben ist. Ziel der Erfassung dieser Information ist eine Weiterverwendung in Algorithmen.

Bis 1974 wurde der Fuzzy-Logic nahezu keine Aufmerksamkeit geschenkt [1]. Die ersten Erfolge wurden bei der Regelung eines Dampferzeugers in einem Kraftwerk erzielt, wobei dieser Vorgang nichtlinear und komplex ist. Außerdem fließen in diese Regelung mehrere Messgrößen ein und so konnte keine mathematische Lösung gefunden werden. Nach der Bekanntgabe der guten Ergebnisse dieser Regelung wurde die Fuzzy-Logic auch zur Lösung anderer Probleme in Betracht gezogen. Jedoch wegen des unschönen Namens der "unscharfen Logik" und dem ungewohnten Denken mit nicht binären Werten, wurde die Verbreitung der neuen Technik gehemmt. Oft wurde der Einsatz eines Fuzzy-Reglers bewusst verschwiegen oder umbenannt.

Nachdem Mamdani 1974 erste technische Erfolge bei der Regelung mit einem Fuzzy-Regler vorweisen konnte, wurde langsam die Fuzzy-Technologie eingesetzt. Zuerst in Europa und den USA, danach auch in Japan. Der Fuzzy-Logic wurde immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt, und ab 1989 wurde die Fuzzy-Technik auch in alltägliche Geräte eingebaut.

6.2 Grundlagen der Fuzzy-Logic

Ein beispielhaftes Fuzzy-Modell mit Eingangsgrößen für die Berechnung des Ladezustandes einer Bleibatterie ist in Abbildung 4 abgebildet. Unterhalb der waagerechten Linie ist die technische Umgebung des Fuzzy-Modells dargestellt, das die in Anhang A beschriebenen chemischen und physikalischen Vorgänge in der Regelbasis enthält. In diesem Modell sind die Beispiele Temperatur und Entladestrom angegeben, die in das Modell eingehen. Als Ergebnis resultiert nach Anwendung des Modells ein numerischer Wert, der Auskunft über die noch verfügbare Kapazität der Bleibatterie gibt.

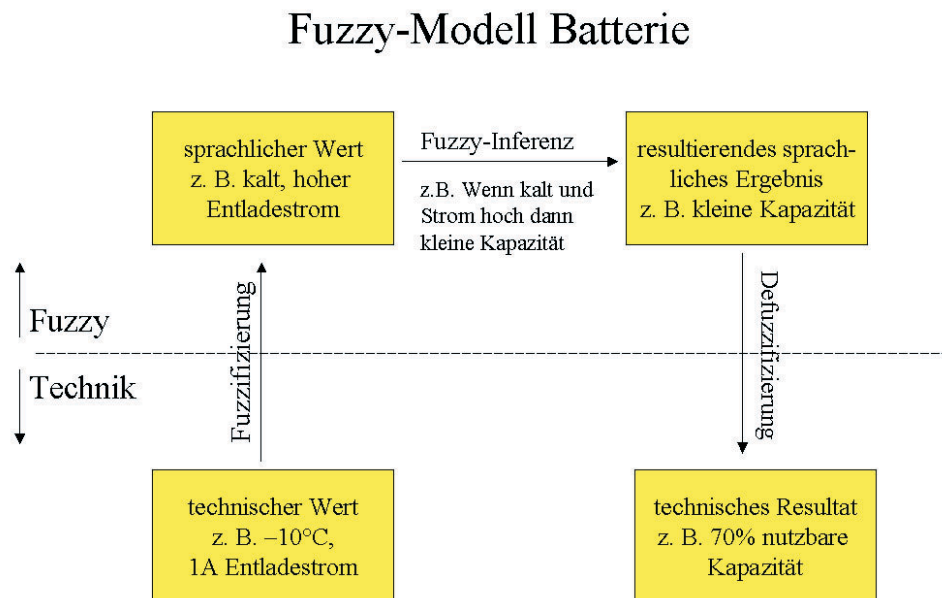


Abbildung 4: Vorgehensweise bei der Berechnung eines Wertes mit Fuzzy-Technologie

Im oberen Teil ist der Fuzzy-Ablauf abgebildet. Der Übergang von einem numerischen Wert in einen sprachlichen Wert wird als Fuzzifizierung bezeichnet. In der Fuzzy-Inferenz sind Regeln definiert, mit denen ein resultierendes sprachliches Ergebnis ausgegeben wird. Anschließend wird während der Defuzzifizierung, d. h. beim Übergang von der Fuzzy-Technologie zur technischen Ebene, aus dem sprachlichen Wert ein numerisches Resultat gewonnen.

6.3 Fuzzy-Sets und unscharfe Beschreibung

In der technischen Welt trifft man sehr oft auf Eigenschaften, die nur unscharf beschrieben werden können. Bei der Temperatur kann z. B. keine Grenze angegeben werden, ab der die Temperatur “kalt” oder “warm” ist. Eine scharfe Grenze, z. B. 15°C hat zur Folge, dass man $15,0001^{\circ}\text{C}$ als “warm” bezeichnet. Das nur geringe Absinken der Temperatur auf $14,9999^{\circ}\text{C}$ bewirkt die Aussage, dass es “kalt” ist. Diese geringe Differenz kann vom Menschen nicht gefühlt werden. Vielmehr gibt es einen fließenden Übergang von etwa 10°C bis 20°C .

Zur Modellierung dieses fließenden Überganges wurde der Begriff des Fuzzy-Set eingeführt. Damit beschreibt man die Zugehörigkeit eines physikalischen Wertes zu einem linguistischen Term. Der Name dieses Termes “kalt” beschreibt im Beispiel den Temperaturbereich von -10°C bis 20°C und “warm” ist für das Intervall von 10°C bis 35°C definiert. In der Regelbasis (siehe 6.5.1) wird auf diesen Wert über die Variable Temperatur zugegriffen.

In Abbildung 5 ist das Fuzzy-Set kalt dargestellt mit einem maximalen Zugehörigkeitsgrad von 1 bei der Temperatur 10°C und nimmt linear zu den beiden Grenzen -10°C und 20°C ab. Die Temperatur wird auf der Abszisse aufgetragen im Bereich von -20 bis 40°C und die Ordinate gibt den Zugehörigkeitsgrad von null bis eins an. Der Zugehörigkeitsgrad gibt an, wie stark ein physikalischer Wert zu einem linguistischen Term zutrifft.

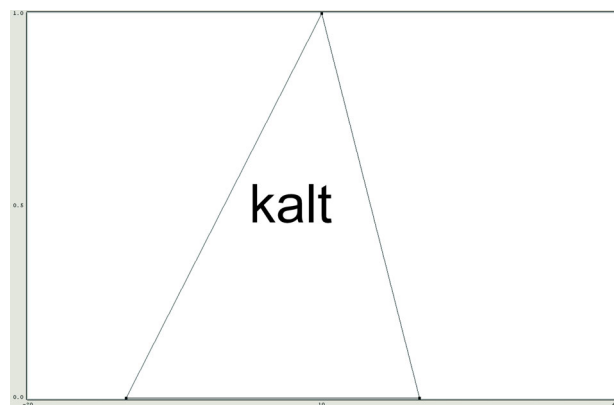


Abbildung 5: Fuzzy-Set kalt (Abszisse: Temperatur, Ordinate: Erfüllungsgrad)

Um die Temperatur in der Regelbasis interpretieren zu können, muss der gesamte Temperaturbereich in Abschnitte aufgeteilt werden. Bei einer Partitionierung der Temperatur in vier Teile haben die Fuzzy-Sets z. B. folgende Namen: sehr_kalt, kalt, warm, sehr_warm. Ein fließender Übergang wird erzielt, wenn die Fuzzy-Sets sich überlappen. In Abbildung 6 wird am Beispiel

der Variable Temperatur eine Einteilung der Fuzzy-Sets gezeigt.

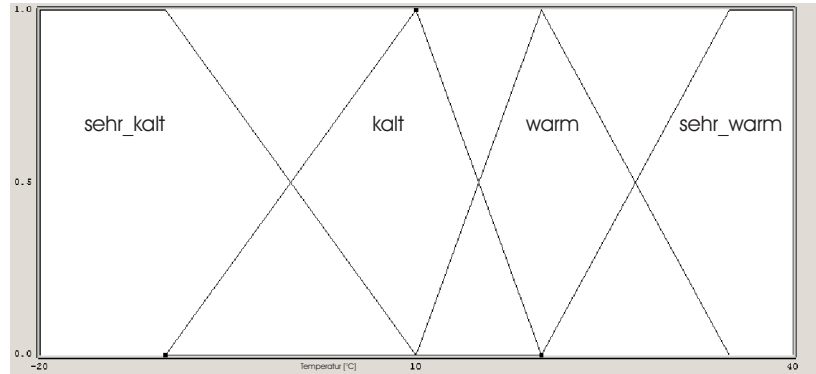


Abbildung 6: Beispielhafte Aufteilung der Temperatur in 4 Fuzzy-Sets (Abszisse: Temperatur, Ordinate: Erfüllungsgrad)

6.4 Fuzzifizierung

Mit Hilfe der in Abschnitt 6.3 beschriebenen Fuzzy-Sets wird eine Fuzzifizierung der Eingangsgrößen bewirkt. Dazu wird, wie in Abbildung 7 dargestellt, der aufgetretene Temperaturwert auf der Abszisse aufgetragen und eine senkrechte Linie nach oben gezogen. Der Schnittpunkt dieser Linie mit den Fuzzy-Sets gibt an, welche Sets für diesen physikalischen Wert zutreffen. Die Höhe des Schnittpunktes zeigt den Zugehörigkeitsgrad der Fuzzy-Sets an.

Im Beispiel trifft bei einer Temperatur von -5°C das Fuzzy-Set "sehr_kalt" mit 0,75 und "kalt" mit 0,25 zu (siehe Abbildung 7).

6.5 Fuzzy-Inferenzschema

Im Inferenzschema wird angegeben, wie die Eingangswerte einer WENN-DANN-Regel verknüpft werden. Zur besseren Darstellung der unterschiedlichen Regeln in der Regelbasis wird eine weitere Eingangsgröße, der Strom, eingeführt. Zur Vereinfachung des Beispiels wird der Strom nur in die Fuzzy-Sets positiv und negativ aufgeteilt, deren Bereich sich von sich von -10 bis 10

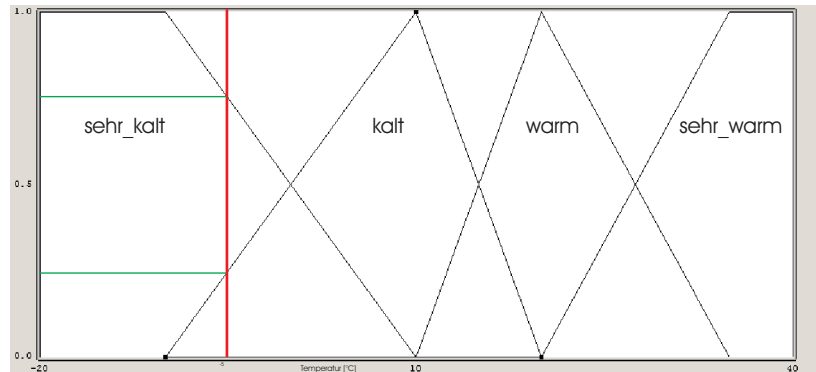


Abbildung 7: Zugehörigkeitsgrad der Sets sehr_kalt und kalt, bei einer Beispieltemperatur von -5°C (Abszisse: Temperatur, Ordinate: Erfüllungsgrad)

A erstreckt. Die sich daraus ergebende Regelstruktur wird in 6.5.1 dargestellt und die Berechnung des Erfüllungsgrades folgt in 6.5.2 .

6.5.1 Regelbasis

Zur Beschreibung des Systemverhaltens wird eine Regelbasis angegeben, bei denen in diesem Beispiel der Ausgabewert SOC_Zunahme die Werte positiv_gross, positiv, negativ und negativ_gross annehmen kann:

1. WENN Strom=positiv UND Temperatur=sehr_warm
DANN SOC_Zunahme = *positiv_gross*
2. WENN Strom=positiv UND Temperatur=warm
DANN SOC_Zunahme = *positiv_gross*
3. WENN Strom=positiv UND Temperatur=kalt
DANN SOC_Zunahme = *positiv*
4. WENN Strom=positiv UND Temperatur=sehr_kalt
DANN SOC_Zunahme = *positiv*
5. WENN Strom=negativ UND Temperatur=sehr_warm
DANN SOC_Zunahme = *negativ*
6. etc.

Im folgenden wird der Wenn-Teil einer Regel als Prämisse und der Dann-Teil als Konklusion bezeichnet. In Abbildung 8 ist die Regelbasis in Form einer

Kennfläche dargestellt. Auf der Abszisse ist die Temperatur im Bereich von -20 bis 40°C und auf der Ordinate der Strom von -10 bis 10 A aufgetragen. Die sich aus dem Tupel (Strom, Temperatur) ergebende SOC_Zunahme kann auf der z-Achse im Bereich von $-0,1$ bis $0,1$ abgelesen werden.

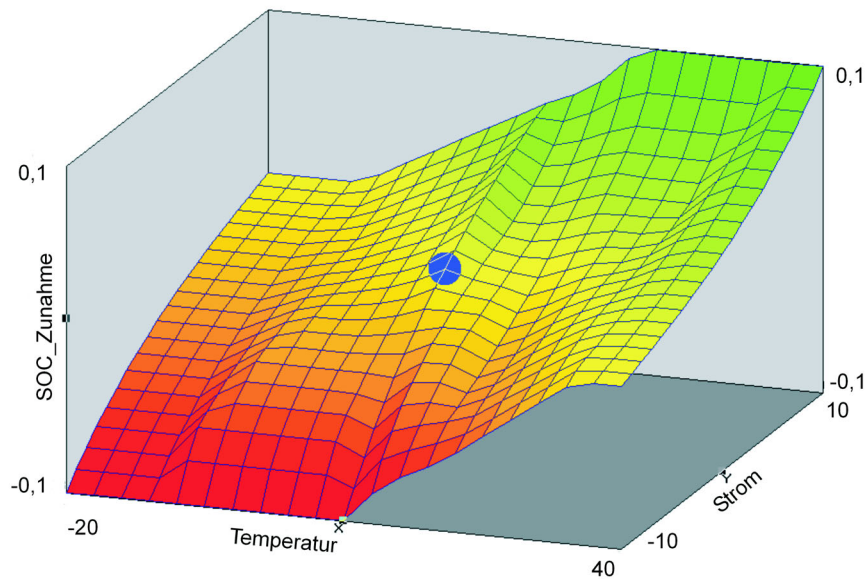


Abbildung 8: Kennfläche der Eingangsgrößen Temperatur, Strom und der Ausgangsgröße SOC_Zunahme

6.5.2 Erfüllungsgrad

Der Erfüllungsgrad gibt den Wert an, mit dem eine WENN-DANN-Regeln zutrifft. Wie bereits in Abbildung 7 beschrieben, bewirkt der Beispielswert von -5°C den Zugehörigkeitsgrad $0,75$ des Fuzzy-Sets *sehr_kalt* und $0,25$ bei *kalt*. Bei einem angenommenen Strom von 8A wird das Fuzzy-Set positiv mit $0,9$ und das Fuzzy-Set negativ mit $0,1$ getroffen. Daraufhin müssen folgende Prämissen berücksichtigt werden:

1. Regel: WENN Strom=positiv UND Temperatur=sehr_kalt
2. Regel: WENN Strom=positiv UND Temperatur=kalt
3. Regel: WENN Strom=negativ UND Temperatur=sehr_kalt
4. Regel: WENN Strom=negativ UND Temperatur=kalt

Um den Erfüllungsgrad einer Regel zu ermitteln, wird der MIN-Operator auf die einzelnen Erfüllungsgrade der Eingangswerte angewendet. In Regel Nr.1 ist der Erfüllungsgrad für Strom=pos 0,9 , und der Erfüllungsgrad für Temperatur=sehr_kalt trifft mit 0,75 zu. Nach Anwendung des MIN-Operators auf $\text{MIN}(0,9; 0,75)$ wird 0,75 als Ergebnis für die erste Regel ausgegeben.

Regel Nr.2 erreicht nach dem selben Verfahren 0,25 , Regel Nr.3 wird mit 0,1 erfüllt und Regel Nr.4 erzielt ebenso 0,1 Erfüllungsgrad.

6.6 Defuzzifizierung

Ziel der Defuzzifizierung ist das Berechnen des numerischen Wertes, der in der technischen Umgebung mit der Fuzzy-Logic erzielt werden soll. Dazu können die verschiedenen Verfahren nach Mamdani aus Abschnitt 6.6.1 oder das Takagi-Sugeno Prinzip (siehe 6.6.2) angewendet werden.

6.6.1 Mamdani

Bei der Defuzzifizierung mit Hilfe einer Ergebnisfläche, werden für jeden Konklusionswert ein Fuzzy-Set angelegt. Im Beispiel sind für SOC_Zunahme negativ_gross, negativ, null, positiv, positiv_gross angegeben wie in Abbildung 9 zu sehen ist. Diese linguistischen Werte werden je nach Prämisse in die Konklusion eingesetzt.

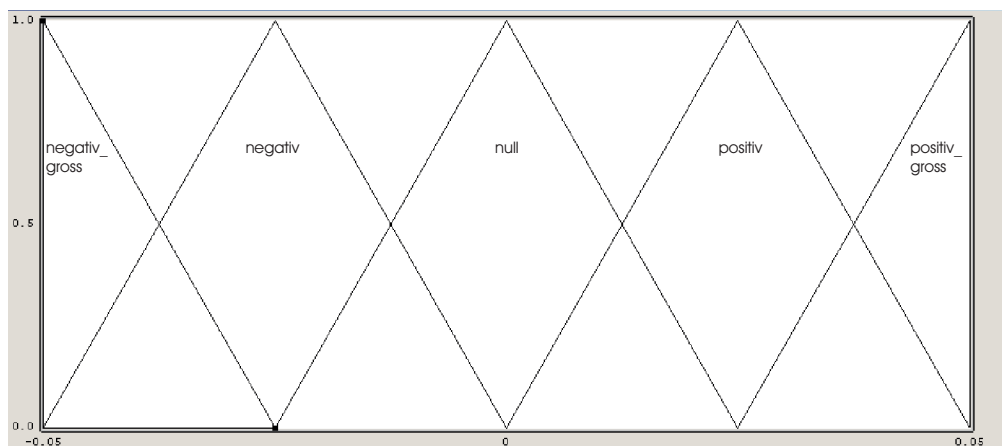


Abbildung 9: Fuzzy-Sets des Ergebniswertes SOC_Zunahme

Zur Ermittlung des numerischen Wertes müssen die verschiedenen Ergebnis-Fuzzy-Sets verknüpft werden. Da nicht jede Regel gleich stark zutrifft, müssen die einzelnen Ergebnisse gewichtet werden. Diese Gewichtung wird gewährleistet, indem das resultierende Fuzzy-Set auf der Höhe des Erfüllungsgrades der Regel abgeschnitten wird. In Abbildung 10 ist die 4. Regel mit Ergebnis SOC_Zunahme=negativ und abgeschnitten auf Erfüllungsgrad 0,1 dargestellt.

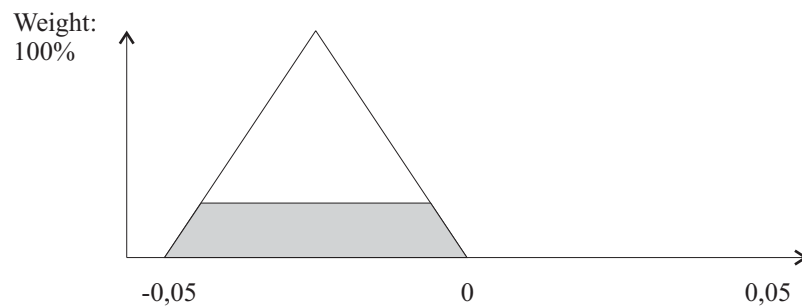


Abbildung 10: Abgeschnittenes Fuzzy-Set (schraffiert)

Nachdem die Ergebnis-Sets auf die Höhe des Erfüllungsgrades abgeschnitten wurden, werden diese Flächen übereinandergelegt und gemäß Abbildung 11 mit dem MAX-Operator verknüpft.

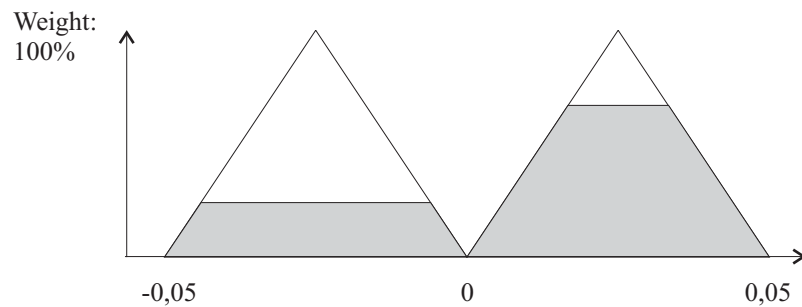


Abbildung 11: Mit Max-Operator verknüpfte Ergebnis-Sets zur Ermittlung der Ergebnisfläche (schraffiert)

Zur Ermittlung des Wertes aus der resultierenden Gesamtfläche gibt es mehrere Strategien. Im folgenden werden die Max-Kriterium-, Mean-of-Maxima- und Centre-of-Gravitiy-Methode dargestellt.

6.6.1.1 Max-Kriterium-Methode

In der Ergebnisfläche werden die Werte gesucht, die dem Maximum des Erfüllungsgrades der Fläche entsprechen. Im Beispiel in Abbildung 12 wird

deutlich, dass mehrere mögliche Ergebnisse im Intervall von 0,018 bis 0,032 gewählt werden können.

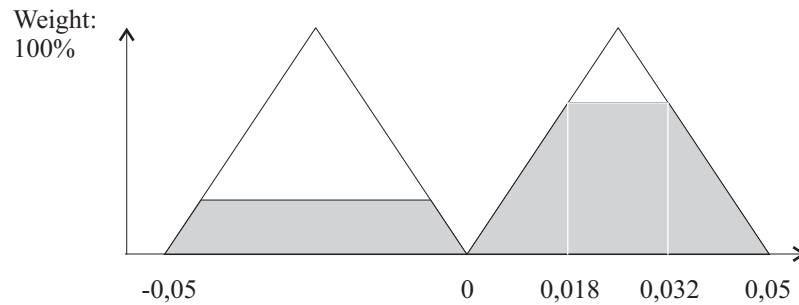


Abbildung 12: Max-Methode

6.6.1.2 Mean-of-Maxima-Methode

Bei der Mean-of-Maxima-Methode (siehe Abbildung 13) wird nach Ermittlung des Bereiches der Maxima die Mitte dieses Bereiches gesucht. Nachteil ist allerdings ein sprunghaftes Verhalten, da, nachdem der größte Erfüllungsgrad von einem Fuzzy-Set zu einem anderen wechselt, der Ausgangswert sich in kurzer Zeit stark ändert.

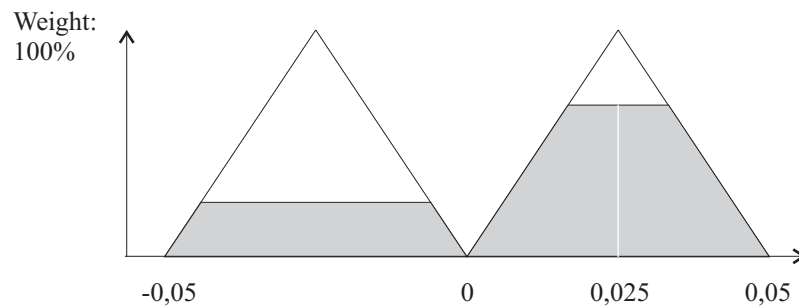


Abbildung 13: Mean-of-Max-Methode

6.6.1.3 Centre-of-Gravity-Methode

Die Centre-of-Gravity-Methode, auch Schwerpunktmethode genannt, ist die am häufigsten verwendete Art der Defuzzifizierung [5], bei der der Schwerpunkt über die gesamte Fläche gebildet (siehe Abbildung 14) und der Abszissenwert als Ergebnis zurückgegeben wird.

Vorteil ist der fließende Übergang zwischen den Ergebnisgrößen. Nachteil ist die aufwändige Berechnung des Schwerpunktes aus der Ergebnisfläche,

besonders bei Echtzeitanwendungen. Sie erfolgt nach Formel 7, bei der $\mu(x)$ den y-Achsenabschnitt, also den Erfüllungsgrad, darstellt:

$$x_{res} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx} \quad (7)$$

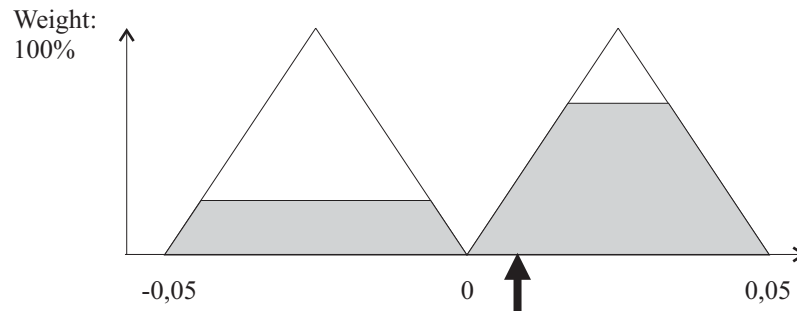


Abbildung 14: Ermittlung des Ergebnisses mit der Schwerpunktmethode

6.6.2 Takagi-Sugeno

Bei Takagi-Sugeno wird das Ergebnis nicht mit Hilfe einer zusammengesetzten Fläche, sondern mit Formeln berechnet. In der Prämisse stehen wie beim Mamdani-Regler die Eingangswerte, nach denen die Regeln feuern wenn alle Werte größer als Null sind. In der Konklusion wird für jede Regel i ein Wert y_i berechnet, der sich aus einer Konstanten und der Addition der Eingangswerte mit Faktor ergibt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Eingangswerte nicht vollständig in der Konklusion und auch nicht in der Prämisse vorkommen müssen. Das gezeigte Beispiel muss für einen Takagi-Sugeno-Regler in der Konklusion wie folgt angepasst werden:

1. Regel: WENN Strom=positiv UND Temperatur=sehr_kalt
DANN $SOC_Zunahme_1 = a_1 \cdot Strom + b_1 \cdot Temperatur + c_1$
2. Regel: WENN Strom=positiv UND Temperatur=kalt
DANN $SOC_Zunahme_2 = a_2 \cdot Strom + b_2 \cdot Temperatur + c_2$
3. Regel: WENN Strom=negativ UND Temperatur=sehr_kalt
DANN $SOC_Zunahme_3 = a_3 \cdot Strom + b_3 \cdot Temperatur + c_3$
4. Regel: WENN Strom=negativ UND Temperatur=kalt
DANN $SOC_Zunahme_4 = a_4 \cdot Strom + b_4 \cdot Temperatur + c_4$

Zur Ermittlung des Erfüllungsgrades μ_i einer Regel werden die Erfüllungsgrade der Eingangsgrößen mit UND verknüpft. Dazu werden bei Takagi und Sugeno die Werte, mit denen die Eingangsgrößen für das jeweilige Fuzzy-Set zutreffen, multipliziert. Das Gesamtergebnis μ_{res} wird aus den Teilergebnissen u_i (d. h. $SOC_Zunahme_i$) von den verschiedenen Regeln mit Formel 8 berechnet.

$$\mu_{res} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (8)$$

7 Fuzzy-Modelle zur Ermittlung des Ladezustandes

Die Ermittlung des Ladezustandes sollte nun durch Implementation des Modells in Abschnitt 5.3 durchgeführt werden. Als Grundlage für die Erstellung eines Batterie-Modells dienen die in Anhang A dargestellten chemischen und physikalischen Vorgänge. Die in Abschnitt 6.2 beschriebene Fuzzy-Technologie dient als Werkzeug, um die nichtlinearen Prozesse abzubilden. Ausserdem soll bei diesem Modell versucht werden, die verschiedenen Verfahren aus Kapitel 4 zusammenzufügen und die jeweiligen Vorteile zu nutzen. Nachdem ein Grundgerüst mit guten Ergebnissen entwickelt wurde, sollte dieses Modell mit Hilfe einer automatischen Optimierung in Kapitel 8 verbessert werden.

Zu Beginn dieses Kapitels, werden in 7.1 die Kriterium zur Beurteilung einer Ladezustandsermittlung, die verschiedenen Fehlerarten, aufgeführt und erklärt. Eine weitere Grundlage zur Erstellung des Modells sind die Referenzdaten, die in Abschnitt 7.2 beschrieben werden. Die Entscheidung, welches der in Kapitel 6 dargestellten Fuzzy-Systeme als Werkzeug genommen wird, fällt in Abschnitt 7.3.

Die Ladezustandsermittlung mit einfacher Bilanzierung wird grundlegend in Abschnitt 7.4 erklärt, in dem die Herleitung der mathematischen Formel aufgeführt ist. Daraufhin folgt in 7.5 ein erster Ansatz der Fehlerkorrektur, bei der in Abhängigkeit des fließenden Stromes ein kleiner Wert subtrahiert wird. Der bei den physikalisch-chemischen Vorgängen beschriebene Einfluss des Ladezustandes wird im darauffolgenden Modell in Abschnitt 7.6 implementiert. Im nächsten Schritt (siehe Abschnitt 7.7) wurde ein unterschiedliches Driftverhalten bei verschiedenen Strom-Spannungs-Tupeln über den Jahresverlauf erkannt und genutzt, um den maximalen absoluten Fehler zu verkleinern. Den Abschluss der ersten Systemmodell-Entwicklung bildet eine Beurteilung dieser Verfahren in Abschnitt 7.8.

7.1 Fehler

Zur Beurteilung eines Verfahrens zur Ladezustandsermittlung sind unterschiedliche Fehlerarten zu berücksichtigen und werden in Tabelle 3 aufgeführt. Alle Fehler basieren auf dem Fehler F , der mit der Differenz aus Ist-

und Soll-Wert des Ladezustandes berechnet wird. Für die Beurteilung eines Ladezustandermittlungsverfahrens sind die Fehler F_{maxAbs} , $F_{mittlAbs}$ und $F_{mittlQuad}$ von Bedeutung. Der maximale absolute Fehler F_{maxAbs} gibt an, wie groß der größte Abstand des Soll- vom Ist-Wert über das betrachtete Intervall gewesen ist. Verfahren, bei denen nur kurzzeitig ein großer absoluter Fehler F_{abs} auftritt, aber deren mittlerer absoluter Fehler $F_{mittlAbs}$ über einen Abschnitt hinweg klein ist, sind unter Umständen besser, wenn die Ausreisser zu vernachlässigen sind. Wenn große Ausreisser eine große Auswirkung haben sollen, aber auch eine Mittlung der gesamten Fehler geschehen soll, dann bietet sich der mittlere quadratische Fehler $F_{mittlQuad}$ an, der beide Kriterien berücksichtigt. Aufgrund dieser Eigenschaft sollte das entwickelte Ladezustandermittlungsverfahren einen möglichst geringen quadratischen Fehler $F_{mittlQuad}$ aufweisen, allerdings sollte es auch, laut [7], einen maximalen Fehler F_{max} von zehn Prozent nicht übersteigen.

Abk.	Bezeichnung	Formel
F	aktueller Fehler	$SOC_{Soll} - SOC_{Ist}$
F_{abs}	absoluter Fehler	$abs(SOC_{Soll} - SOC_{Ist})$
F_{max}	maximaler Fehler	$max(F_0, \dots, F_n)$
F_{min}	minimaler Fehler	$min(F_0, \dots, F_n)$
F_{maxAbs}	maximaler absoluter Fehler	$max(abs(SOC_{Soll_0} - SOC_{Ist_0}), \dots, abs(SOC_{Soll_n} - SOC_{Ist_n}))$
F_{minAbs}	minimaler absoluter Fehler	$min(abs(SOC_{Soll_0} - SOC_{Ist_0}), \dots, abs(SOC_{Soll_n} - SOC_{Ist_n}))$
F_{quad}	quadratischer Fehler	$(SOC_{Soll} - SOC_{Ist})^2$
$F_{mittlAbs}$	mittlerer absoluter Fehler	$\frac{\sum abs(F_n)}{n}$
$F_{mittlQuad}$	mittlerer quadratischer Fehler	$\frac{\sum F_n^2}{n}$
F_{dif}	Fehleranstieg	$\frac{dF}{dt}$
F_{difAbs}	absoluter Fehleranstieg	$\frac{dF_{abs}}{dt}$

Tabelle 3: Beschreibung der verschiedenen Fehlerarten

7.2 Referenzdaten

Zur Entwicklung eines Modells und zur Interpretation der Ergebnisse werden Testdaten benötigt. Die für diese Diplomarbeit zur Verfügung stehenden Daten sind auf einer CD-ROM der Institute “Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme”, “Institut für Solare Energieversorgungstechnik” und “Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung” mit dem Namen “Referenzdaten zur Ladezustandsbestimmung in PV-Anlagen” enthalten. Nachdem ein Systemmodell erstellt wurde, muss anhand der Testdaten geprüft werden, ob das Ergebnis des implementierten Verfahrens das gewünschte Ziel erreicht.

7.2.1 Benötigte Daten für die Ladezustandsermittlung

Um die Prozesse einer Batterie erkennen zu können, werden mehrere Eingangsdaten der Batterie benötigt. Für die Strombilanzierung muss bei konstantem Zeitintervall der jeweils gemittelte Strom I sehr genau gemessen werden. Des weiteren ist die Spannung wichtig, wenn z. B. ein UI-Kennfeld zum Einsatz kommt. Wie in Anhang A beschrieben wird, haben die Temperatur und der Ladezustand direkt oder indirekt mit dem Prozess der Alterung Einfluss auf den Ladezustand. Durch Aufaddieren der Dauer der Zeitintervalle lässt sich das Alter der Batterie feststellen. Dieses kann für eine allgemeine Alterung als Eingangsgröße berücksichtigt werden.

Die in Abschnitt 7.2 erwähnte CD-ROM enthält für jede vermessene Batterie eine Textdatei mit einer Semikolon-Separierten Liste und dem berechneten SOC wie in Abschnitt 7.2.2 beschrieben. Das Vorzeichen des Stromes ist so definiert, dass ein positiver Strom ein Ladestrom bedeutet und so eine SOC-Erhöhung bewirkt.

7.2.2 Berechnung der SOC-Referenzdaten

In der Dokumentation [9] wird die Berechnung des SOC mit Verlustansatz über Gasungsstrom und Rekalibrierung wie folgt beschrieben.

Als Eingangsgröße der SOC-Berechnung werden die Größen Strom, Spannung und Temperatur gewählt. Um den Ladezustand zu ermitteln, wurde im ersten Schritt der Strom mit Verlustansatz bilanziert und im zweiten Schritt nach Rekalibrierungspunkten gesucht. Der Verlustansatz beruht auf der Berechnung des Gasungsstromes I_{G0} in Abhängigkeit von Spannung und Temperatur. Dieser Gasungsstrom wird bei der Bilanzierung vom Hauptstrom abgezogen. Die Bestimmung eines Rekalibrierungspunktes wurde ausschließlich bei Erkennen einer Vollladung realisiert. Eine Vollladung ist gegeben

wenn:

1. die Spannung mindestens eine Stunde über einem festgelegten Spannungswert U_0 , der temperaturkorrigiert ist, liegt;
2. der Gradient des Stromabfalls sich unterhalb eines festgelegten Wertes befindet;
3. der Strom nicht zu sehr um den aktuellen Gasungsstrom schwankt.

Im dritten Schritt wurde aufgrund der Differenz des berechneten Ladezustandes und des erkannten Vollzustandes die Berechnung zwischen zwei Rekalibrierungspunkten angepasst. Die Differenz der beiden Ladezustände wird auf den Fehlerstrom I_{error} umgerechnet, der alle Verluste enthält. Der Gasungsstrom wird korrigiert ($I_{G0} - I_{error}$) und beinhaltet die entstandenen Verluste innerhalb dieser Zeitspanne. Danach wird der Ladezustand dieses Intervalles mit dem korrigierten normierten Gasungsstrom neu berechnet.

Mit diesem Verfahren wird der absolute Fehler der SOC-Berechnung aufgrund eines Driftes wesentlich verringert. Da der Zeitbereich von einer Vollladung bis zur Nächsten berechnet wird und danach der Wert zurückkorrigiert wird, ist der maximale Abstand bis zum nächsten Fixpunkt halbiert.

Wenn, wie in dieser Diplomarbeit, ein neu entwickeltes Ladezustandsermittlungsverfahren entwickelt wird, kann das Ergebnis gut mit diesen Referenzdaten verglichen werden, da die Referenzdaten immer besser als die neu berechneten Daten sind. Der Grund liegt in der Online-Berechnung, die nur auf zurückliegende Daten zugreifen kann und nicht die Möglichkeit hat, in die Zukunft zu schauen wie bei der Bestimmung der Referenzdaten.

Die in Abschnitt 7.2.1 beschriebenen Daten enthalten für jeden Datensatz einen Gütegrad. Dieser Qualitätswert ist wichtig für die Erstellung von Algorithmen, damit nur Daten höchster Güte verwendet werden und somit die SOC-Berechnung nicht verfälscht wird. Der optimale Wert eins wird vergeben, wenn der berechnete Wert zwischen zwei eng zusammenliegenden Referenzen liegt. Außerdem darf keine Datenlücke den Datensatz unterbrechen. Für den Fall, dass sich ein Datensatz zwischen einer Rekalibrierung und einer Lücke befindet, kann ein Drift zur Datenlücke auftreten. Deshalb wird dem Zeitraum zwischen Rekalibrierung und Lücke der Qualitätswert zwei zugeteilt. Der Bereich zwischen Lücke und Rekalibrierung erhält den Qualitätswert drei. Bei Gütegrad vier liegt der berechnete SOC zwischen zwei Lücken, so dass der mögliche absolute Fehler sehr hoch ist.

7.2.3 Beispieldatensätze

Auf der in Abschnitt 7.2.2 beschriebenen CD sind die in Tabelle 4 aufgeführten Batterien von Photo-Voltaik-Anlagen(PV) vermessen worden. Dabei unterscheidet sich die Bauart im Elektrolyt mit Gel oder Flüssigelektrolyt. Außerdem kann die Batterie eine Umwälzpumpe enthalten wenn Flüssigelektrolyt vorliegt. Die geschlossene Bauweise wird bei Bleibatterien mit flüssigem Elektrolyt, d. h. Schwefelsäure, angewendet. Für lageunabhängige Batterien wurde die verschlossene Bleibatterie entwickelt. Diese enthält anstelle von flüssiger Schwefelsäure ein Vlies oder Gel, in dem der Elektrolyt enthalten ist. Ein weiterer Grund für die Anwendung des verschlossenen Batterietypes ist die Wartungsfreiheit, denn es muss kein Wasser nachgefüllt werden.

Bezeichnung	Symbol	Bauart	U	C	Klasse
Kleinsystem Solarhaus Freiburg	KS	Gel, Gitterplatten	24 V	34 Ah	1
Solarstrassenleuchte Freiburg	SL	geschlossen	12 V	80 Ah	1
PV-Hybridsystem Brunnenbach	BBA	geschlossen, Elektrolytumwälzung	216 V	600 Ah	2
PV-Hybridsystem	es_2	Gel, Gitterplatten	48 V	155 Ah	2 (3)
PV-Zyklen-simulation Prüfbat A	PA	geschlossen, Elektrolytumwälzung	12 V	215 Ah	3
PV-Zyklen-simulation Prüfbat C	PC	Gel, verschlossen	12 V	230 Ah	3
PV-Wind-Diesel Hybridsystem Terschelling	TE	geschlossen, Elektrolytumwälzung	360 V	381 Ah	4

Tabelle 4: Eigenschaften der vorliegenden Beispielformen

Die Betriebsbedingungen von solaren Inseln sind sehr unterschiedlich, womit eine Klassifizierung des Einsatzgebietes der Batterie nötig wurde. In Klasse eins sind die Lastströme relativ klein und es wird oft ein Vollladezustand erreicht. An diesen Anlagen sind typischerweise keine Dieselgeneratoren angeschlossen, da die Batterie vollständig mit solarer Energie geladen wird. Bei Systemklasse zwei sind die Ströme auch noch gering, aber um auszuschließen, dass die Batterie in den Tiefentladezustand gerät, wird ein Generator

benötigt. Auch bei Klasse drei und vier sind in das System Dieselgeneratoren integriert, jedoch findet man bei Systemklasse drei mittlere Ströme und Systemklasse vier ist im hohen Strombereich anzusehen. Je höher die Klasse, desto weniger wird der Strombedarf durch solare Energie gedeckt. Neben dem beschriebenen Merkmal der Entladetiefe hat die Anzahl der Lastzyklen einen weiteren Einfluss auf die Klassifizierung. So ist in Klasse eins die Anzahl der Lastzyklen sehr gering bis zu den meisten Lastzyklen in Klasse vier.

7.2.4 Datenanalyse

Für die ersten Modellansätze wurde die Solarstrassenleuchte Freiburg (siehe Tabelle 4) gewählt, weil diese sich in der einfachen Systemklasse eins befindet, in der die Ströme sehr gering ausfallen und ein gleichmäßiger Tagesverlauf zu beobachten ist. Die Eigenschaften der Batterie (Füssigelektrolyt, keine Umwälzpumpe) sind von den Alterungsmechanismen am besten bekannt gewesen, womit eine gute Modellierung auf der Basis von den in Anhang A beschriebenen Vorgängen erwartet werden konnte. Der Jahresverlauf des Ladezustandes ist in Abbildung 15 dargestellt und im Bereich von null bis eins der Ordinate aufgetragen.

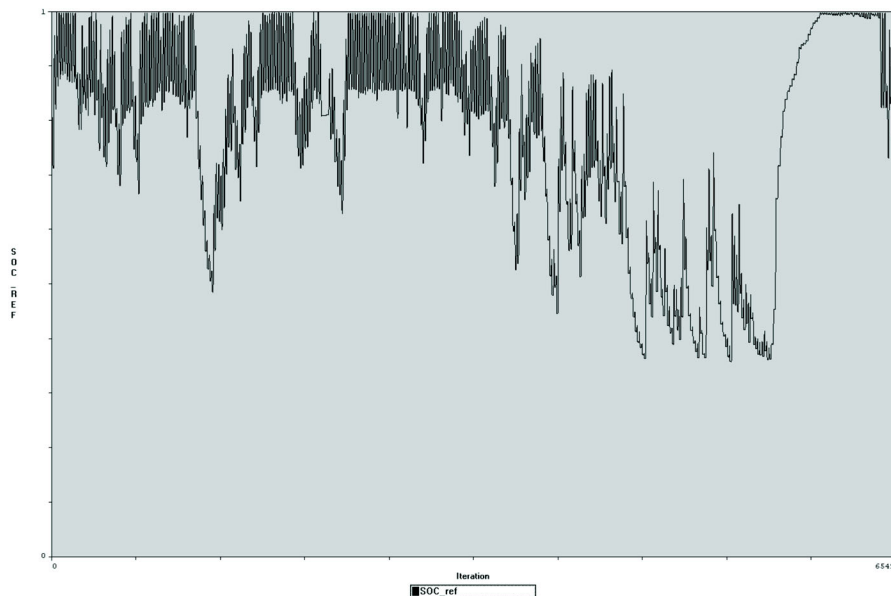


Abbildung 15: Jahresverlauf des SOC einer Solarstraßenleuchte in Freiburg

Die Solarleuchte wurde im Zeitraum vom 07.03.96 bis 06.03.97 vermessen und beinhaltet eine Lücke vom 02.07.96 bis 05.07.96. In dieser Zeit wurde der Strom auf null gesetzt und der SOC konstant gehalten. Gegen Ende des

Datensatzes(ab 11.1.97) wurde kein Strom mehr entladen, weil die Lampe defekt gewesen ist. Insgesamt liegen für dieses Beispiel über den gesamten Jahresverlauf 52373 Datensätze vor. Da im verwendeten Fuzzy-Tool SieFuzzy der Siemens AG nur 16000 Datensätze verarbeitet werden können, wurde die Eingangsdatei in vier Quartale aufgeteilt. In den ersten zwei Quartalen (März, April, Mai, Juni, Juli, August) ist der solare Deckungsgrad sehr hoch, d. h. es kommt oft zur Vollladung. Erst im dritten Quartal(September, Oktober, November) kommt keine Rekalibrierung aufgrund eines Vollladezustandes vor. Auch Dezember und Januar liegen in einer sonnenarmen Zeit und es wird kein SOC von eins erreicht. Im Februar dieses vierten Quartales findet dann wieder eine Rekalibrierung statt.

Um eine bessere Beurteilung der vorhandenen Daten zu ermöglichen, ist in Abbildung 16 ein Histogramm der in Abbildung 15 dargestellten Ladezustände der Solarleuchte dargestellt. Dabei ist der Ladezustand in Prozent auf der Abszisse und die Häufigkeit der Ladezustände auf der Ordinate aufgetragen. Auffallend ist der SOC-Bereich von 0 bis 35, denn die Batterie befindet sich nie innerhalb dieses Bereiches. Der Grund dafür ist, dass die Batterie wieder aufgeladen wird, bevor sie in diesen Bereich gelangt. Selbst im Winter werden diese Regionen nicht erreicht. Der besonders starke Anstieg des Histogramms im Bereich von 100 zeigt, dass der Vollladezustand oft erreicht wird und wie in der Dokumentation zu der Solarleuchte beschrieben, ein Ladezustand von größer als eins auf eins zurückgesetzt wird. Die zweite Häufung in diesem Histogramm ist mit dem Tageszyklus der Batterie zu erklären, denn zuerst dauert über den Tag ein längerer Ladezyklus an, weil die Sonne scheint und keine Last anliegt. Dabei wird die Batterie bis 100 geladen und aufgrund der Beschränkung in diesem Zustand gehalten. Danach kommt es zum Entladezyklus bei dem in der Nacht mit konstanten Strom bis auf einen Ladezustand von 86 wird. Morgens verbleibt die Solarleuchte längere Zeit in diesem Zustand, da kein Strom geladen wird weil die Sonne noch nicht hoch genug steht, aber die Lampe aufgrund der Helligkeit ausgeschaltet wird.

Generell ist die Verteilung der Ladezustände im Bereich von 35 bis 100 Prozent relativ gleich, womit eine gute Modellierung dieses Bereiches zu erwarten ist da überall Testdaten zur Verfügung stehen. Dieses betrifft vor allem die in Kapitel 8 beschriebene automatische Optimierung.

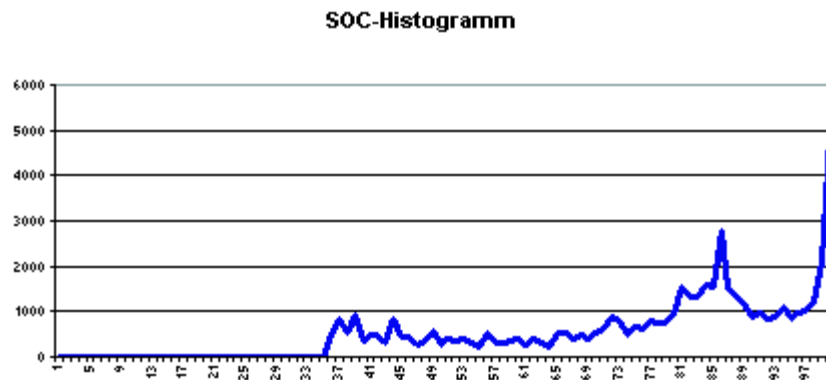


Abbildung 16: Histogramm der Ladezustände der Solarleuchte

7.3 Fuzzy-Systemwahl

Die Bestimmung des optimalen Fuzzy-Systemes für die Aufgabenstellung soll die folgende Diskussion bestimmen. Zur Auswahl stehen erstens die Variante nach Mamdani mit den verschiedenen Verfahren für die Berechnung des Wertes aus der Ergebnisfläche. Da der Bereich des SOC von null bis eins fließend ist, bietet sich nur die Schwerpunktmethode an. Zweitens ist die Berechnung des SOC mit dem System nach Takagi-Sugeno möglich.

Bei Mamdani und auch bei Takagi-Sugeno werden die Eingangsdaten gleichermaßen in Fuzzy-Sets aufgeteilt. Dieser Punkt hat also keinen Einfluss auf die Entscheidung für die Systemwahl. Auch der Aufbau der Prämisse “WENN Strom=positiv UND Temperatur=warm“ ist bei Takagi-Sugeno und Mamdani gleich. Nur die Form der Konklusion und die Berechnung des Ergebniswertes haben eine andere Struktur. Während bei Mamdani die Fuzzy-Sets der Ergebnisgröße festgelegt werden müssen und eine Defuzzifizierung stattfinden muss, wird bei Takagi-Sugeno das Ergebnis aus einer Linearkombination der feuernenden Regeln berechnet und es ist keine Defuzzifizierung erforderlich.

Für die Festlegung der Ergebnis-Sets nach Mamdani gibt es keine Anhaltspunkte, also müssten diese willkürlich verteilt werden. Eine gleichmäßige Verteilung der Fuzzy-Sets ist in diesem Fall für die ersten Versuche die sinnvollste Alternative, allerdings kann diese Eigenschaft weder positiv noch negativ für Mamdani gewertet werden.

Beim Takagi-Sugeno-System muss für jede Regel der Faktor der vorkommenden Eingangswerte in der Konklusion ermittelt werden. Bei drei Eingangswerten mit einer Aufteilung in jeweils drei Fuzzy-Sets kann sich eine Regelbasis mit $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ Regeln ergeben. Wenn alle Eingangswerte in der

Konklusion auftreten und zudem auch ein konstanter Faktor in jeder Regel vorkommt, dann müssen $27 \cdot (3 + 1) = 108$ Werte berechnet werden. Dieser Aufwand ist sehr hoch, jedoch ist dieses System sehr flexibel, weil zusätzlich innerhalb einer Regel der Ausgabewert in Abhängigkeit der Eingangswerte eingestellt werden kann. Die Berechnung dieser Werte mit einer automatischen Optimierung wird in Kapitel 8 dargestellt.

Die Struktur des Takagi-Sugeno-Systems lässt sich sehr gut auf eine SOC-Berechnung mit Ladungsbilanzierung anwenden. Dabei kann man als Faktor für den SOC^{t-1} als Eingangsgröße etwa eins einstellen und damit direkt eine Bilanzierung modellieren. In Abhängigkeit von den weiteren Eingangswerten, z. B. Spannung, Temperatur, usw. kann man diesen Wert leicht variieren um verschiedene chemische Vorgänge zu berücksichtigen. Aufgrund dieser Vorteile wird das Takagi-Sugeno-System als Grundlage dieser Diplomarbeit gewählt. Die Modellierung der Bleibatterie wird mit dem Fuzzy-Tool SieFuzzy implementiert, mit dem schnell das Systemverhalten getestet und interpretiert werden kann.

7.4 Einfache Bilanzierung als Grundlage für Fuzzy-Modell

Die in Abschnitt 4.4 grundlegend dargestellte Bilanzierung wird nun in SieFuzzy implementiert. Auf Abbildung 17 sind die verschiedenen SieFuzzy-Elemente zu sehen mit einem Quadrat als Eingangsglied auf der linken Seite.

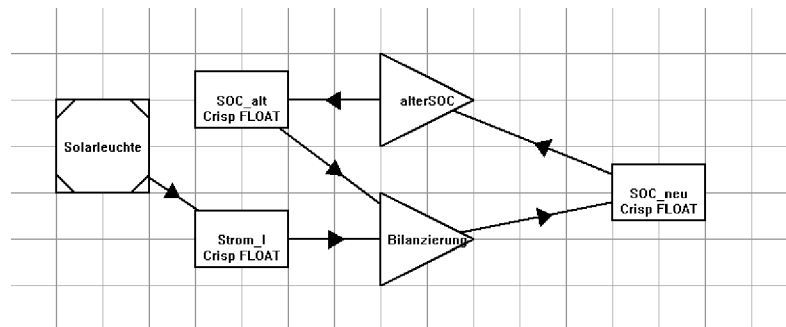


Abbildung 17: einfache Bilanzierung

Der Name “Solarleuchte” deutet bereits an, dass hier die Datei angegeben wird, die den Datensatz des Stromes der Solarleuchte, der über ein Jahr im zehn Minuten Abstand gemessen wurde, beinhaltet. Diese Werte gehen in das Rechteck “Strom_I” ein, das eine Variable darstellt. Aus dem Wert

“Strom_I” und dem alten Ladezustand “SOC_alt” wird mit dem Berechnungsglied “Bilanzierung” in Form eines Dreiecks der aktuelle Ladezustand ermittelt. Dieser Wert heisst “SOC_neu” und berechnet sich nach folgender Formel, die in “Bilanzierung” enthalten ist.

$$SOC_neu = SOC_alt + \frac{Strom_I}{Intervallquotient} \quad (9)$$

Der Intervallquotient ist eine Konstante und wird für jede Batterie aus Kapazität und Zeitintervall berechnet. Im Beispiel der Solarleuchte beträgt die Nennkapazität der Batterie $C_N = 80Ah$ und das Zeitintervall beträgt zehn Minuten. Es wird angenommen, dass die nutzbare Kapazität $C_m = C_N = 80Ah$ beträgt. Damit ergibt sich für jeden Intervallschritt t :

$$SOC^t = \frac{C_m + Q^t}{C_m} \quad (10)$$

Der Folgeschritt $t + 1$ wird berechnet mit

$$SOC^{t+1} = \frac{C_m + Q^{t+1}}{C_m}. \quad (11)$$

Bei Zeitintervallen von zehn Minuten lässt sich die Ladungsbilanz Q^{t+1} mit der Ladungsbilanz des vorhergehenden Schrittes Q^t und dem geflossenen Strom über dieses Intervall ermitteln:

$$Q^{t+1} = Q + I \cdot 10min \quad (12)$$

Nach Einsetzen der Formel (12) in (11) berechnet sich der neue Ladezustand SOC_neu mit

$$SOC^{t+1} = \frac{C_m + Q^t + I \cdot 10min}{C_m} \quad (13)$$

und der Bruch wird in zwei Teile aufgeteilt.

$$SOC^{t+1} = \frac{C_m + Q^t}{C_m} + \frac{I \cdot 10min}{C_m} \quad (14)$$

Mit der eingesetzten Kapazität $C_m = 80Ah = 4800Amin$ der Solarleuchte ergibt sich nach dem Kürzen

$$SOC^{t+1} = \frac{C_m + Q^t}{C_m} + \frac{I}{480A}. \quad (15)$$

Hierbei ist der linke Teil der Summe der alte Ladezustand SOC_alt und der rechte Teil beschreibt die Änderung des Ladezustandes in Abhängigkeit

vom Strom I. Die oben beschriebene Konstante Intervallquotient wird hiermit auf 480 [A] festgelegt.

Die Rückführung des “SOC_{alt}” aus dem letzten Berechnungsschritt wird in der Graphik mit dem Weiterleitungsmodul “alterSOC” gewährleistet, in dem die einfache Zuweisung $SOC_{alt} = SOC_{neu}$ enthalten ist.

Da bei diesem Modell der einfachen Bilanzierung keine Fehlerkorrektur enthalten ist, kommt es verstärkt zum Drift des berechneten Ladezustandes. Der absolute Fehler steigt mit der Zeit an und liegt wenn keine Rekalibrierung möglich ist bereits nach drei Monaten über $F_{abs} > 0,1$ (siehe Abbildung 18). Der maximale absolute Fehler des Beispiels “Solarleuchte” liegt bei $F_{maxAbs} = 0,16$ über ein gesamtes Jahr. Auch die in Tabelle 3 beschriebenen Fehler $F_{mittlAbs} = 0,0456$ und $F_{mittlQuad} = 0,00475$ sind mit der einfachen Bilanzierung sehr hoch.

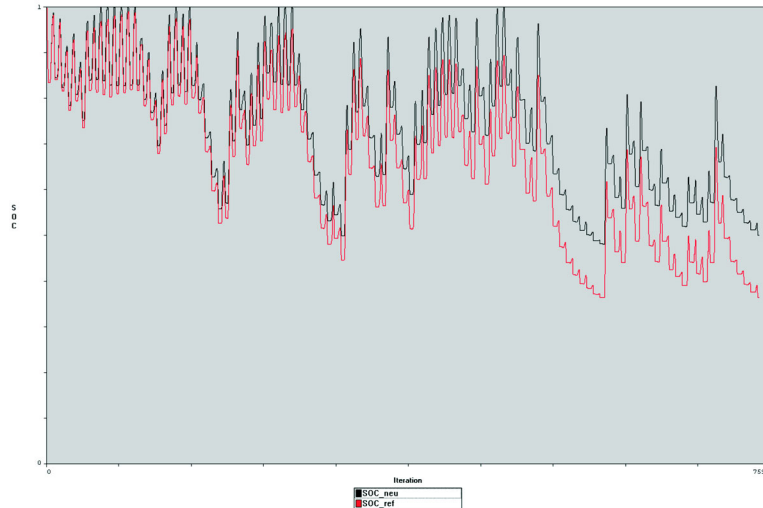


Abbildung 18: Drift beim berechneten SOC-Verlauf von 3 Monaten (Sept., Okt., Nov.)

Zur Verringerung von F_{maxAbs} sind weitere Maßnahmen erforderlich, die die Vorgänge in der Batterie berücksichtigen. Aufbauend auf der einfachen Bilanzierung ist in den weiteren Kapiteln eine Fehlerkorrektur der Bilanzierung beschrieben, mit der der Ladezustand berechnet werden kann.

7.5 Fuzzy-Bilanzierung des Stromes

Bei der Fuzzy-Bilanzierung soll mit Hilfe einer Regelbasis in Abhängigkeit des Stromes der Ladezustand mit Bilanzierung berechnet werden. Dazu wurde im ersten Ansatz die Abhängigkeit des Fehlers, also der Differenz von berechnetem zu vorliegenden SOC, und dem Strom betrachtet. Dabei ist besonders interessant, in welchen Bereichen der absolute Fehler stark ansteigt und in welchen kein Anstieg zu verzeichnen ist. Im vorliegenden Beispiel der Solarleuchte hat sich für diese Überlegung ein Tageszyklus angeboten, da es dort jeweils für den Tag und die Nacht einen ansteigenden und einen abfallenden Bereich des Stromes gibt. In Abbildung 19 sieht man einen Tagesverlauf mit SOC_neu, dem neu berechneten Ladezustand und SOC_ref, dem Referenzladezustand. Darunter befindet sich der Strom mit anfangs langer Zeit, in der kein Stromfluss vorhanden ist. Danach wird von der Solarzelle Energie geliefert und die Stromstärke steigt. Gegen Abend sinkt der Strom wieder und bleibt konstant bis die Lampe eingeschaltet wird. Dann wird der Wert negativ aufgrund der Entladung und ändert sich nicht bis kein Strom mehr entnommen wird.

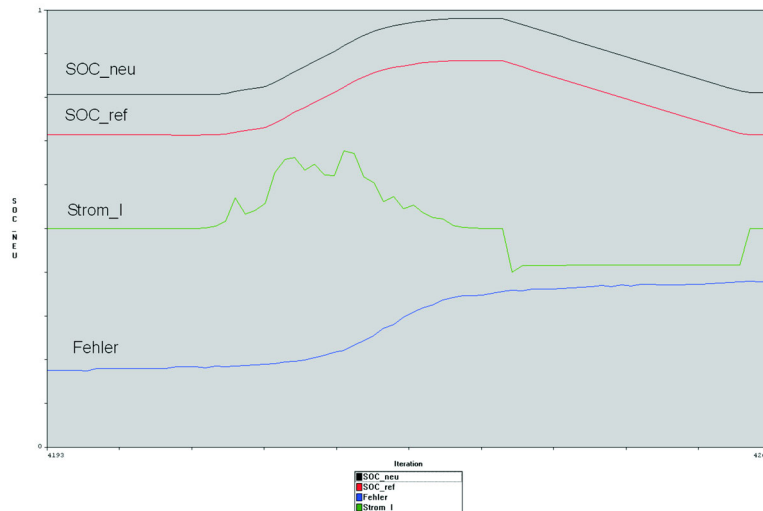


Abbildung 19: Tagesverlauf des SOC, Strom und absoluter Fehler

Der stärkste Fehleranstieg F_{dif} kann im Bereich von kleinen bis mittleren Ladeströmen verzeichnet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Steigung der Fehlerkurve sind verschiedene Stromzustände modelliert worden, in denen der SOC unterschiedlich berechnet wird.

Die verschiedenen Zustände werden durch die Fuzzy-Sets für den Strom

posGross, positiv, umNull, negativ und negGross beschrieben und in der Eingangsgröße Strom_I aufgenommen. Die unregelmäßige Aufteilung der Fuzzy Sets ist in Abbildung 20 gezeigt und mit den verschiedenen Strombereichen von -3 A Entladestrom bis Ladestrom 6 A begründet.

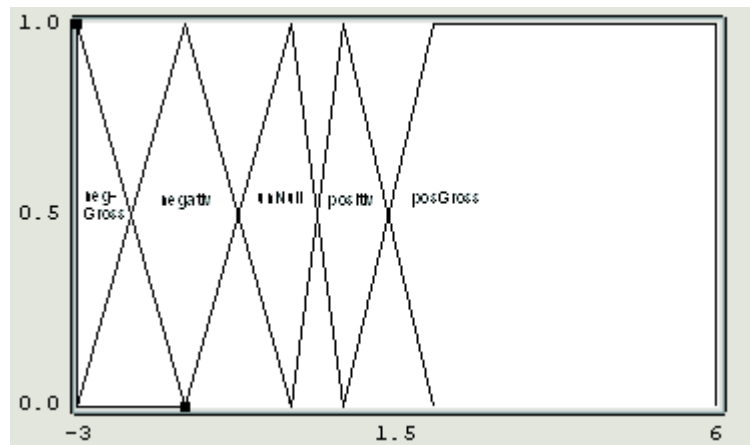


Abbildung 20: Aufteilung der Fuzzy-Sets der Eingangsgröße Strom (Abszisse: Strom, Ordinate: Erfüllungsgrad)

Das Element “Strom_I” geht in die neu eingebaute Regelbasis “Bilanz” ein, die das Berechnungsmodul “Bilanzierung” aus Kapitel 7.4 ersetzt. Damit ergibt sich das leicht geänderte Modell wie in Abbildung 21 dargestellt.

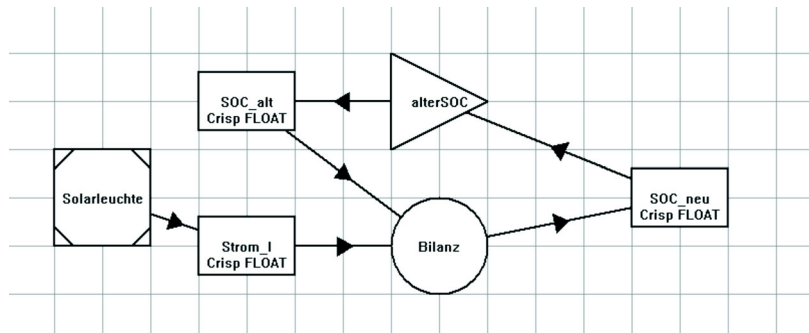


Abbildung 21: Regelbasis mit Faktoren für Angleich an Referenzkurve

Mittels der Fehlerkurve wurden die Faktoren des Stromes auf den geringsten Fehleranstieg eingestellt. Damit ergab sich folgende Regelbasis, in der die einfache Bilanzierung mit $(SOC_alt + (Strom_I / Intervallquotient))$ enthalten ist:

RULE Rule1

```

IF Strom_I IS posGross THEN
    SOC_neu = (SOC_alt + (Strom_I / Intervallquotient))
              - (Strom_I * 0,000003)
END

RULE Rule2
IF Strom_I IS positiv THEN
    SOC_neu = (SOC_alt + (Strom_I / Intervallquotient))
              - (Strom_I * 0,00005)
END

```

Die Regeln “Rule3” bis “Rule5” mit Strom umNull, negativ und negGross enthielten lediglich die Bilanzierung

$$SOC_neu = SOC_alt + \frac{Strom_I}{Intervallquotient} \quad (16)$$

denn dort musste die Kurve nicht korrigiert werden. Mit dieser Regelbasis lag der maximale absolute Fehler F_{maxAbs} in der ersten Jahreshälfte unter 9,3%, da dort oft der SOC auf eins begrenzt wurde, jedoch stieg er gegen Ende des Jahres bis auf 12%. Der mittlere quadratische Fehler $F_{mittlQuad}$ betrug 4,58 % und ist somit besser als die einfache Bilanzierung, jedoch wurde in diesem Modell der mittlere absolute Fehler $F_{mittlAbs}$ mit 5,17 % schlechter.

7.6 Beeinflussung der Bilanzierung durch den Ladezustand

Um den Fehler F_{maxAbs} des aufgestellten Algorithmuses weiterhin zu verkleinern, wurden weitere Abhängigkeiten des Fehlerverlaufes von den eingehenden Größen untersucht. Dabei sind die in Anhang A beschriebenen Vorgänge weiterhin von Bedeutung um die implementierten Abhängigkeiten zu interpretieren.

In Abbildung 22 ist der Verlauf des Fehlers F über den Jahreszyklus zu sehen, wobei lediglich der Ladezustand im Bereich von 0 bis 1 und der Fehler von -0,15 bis 0,15 dargestellt ist. Dabei fällt auf, dass in den ersten zwei Quartalen, in denen der SOC durchschnittlich relativ hoch ist, ein negativer Fehlerdrift auftritt. Im Gegensatz dazu ist der SOC-Verlauf in den letzten zwei Quartalen auf niedrigem Niveau und der Fehler steigt positiv an.

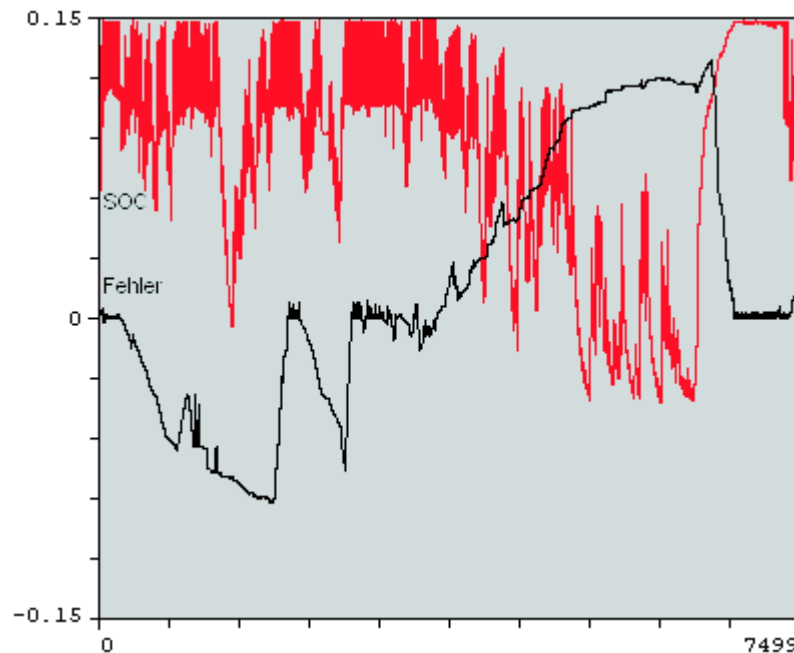


Abbildung 22: Jahresverlauf des Ladezustandes und des Fehlers

Die bei der Tiefentladung in Anhang A.7 erwähnten Vorgänge beschreiben, dass eine Batterie, die oft in tiefe Ladezustände gerät, schneller altert und somit mehr Kapazität verliert, als eine in hohen Ladezuständen gehaltene Batterie. Aus diesem Grund wurde die Regelbasis insofern geändert, als dass zur Ladezustandskorrektur ein weiterer Subtrahend $((1 - \text{SOC_alt}) * 0,00003)$ in die Formel einging. Dieser sollte sich umso größer auswirken, je kleiner der SOC lag und wurde mit $1 - \text{SOC}$ berechnet. Der Faktor $0,00003$ ist aufgrund von Tests festgelegt worden.

Die in Abbildung 21 gezeigte und in Abschnitt 7.5 beschriebene Struktur ändert sich für diesen Entwurf der Ladezustandsermittlung nicht, da lediglich die Regelbasis "Bilanz" geändert wurde. Beispielhaft ist hier die erste Regel mit der eingebauten Bilanzierung, der Korrektur mit Strom und der in diesem Kapitel beschriebenen Alterung in Abhängigkeit vom Ladezustand aufgezeigt:

```

RULE Rule1
  IF Strom_I IS posGross THEN
    SOC_neu = ((SOC_alt + (Strom_I / Intervallquotient))
              + (Strom_I * 0,000006)) - ((1 - SOC_alt) * 0,00003)
  END

```

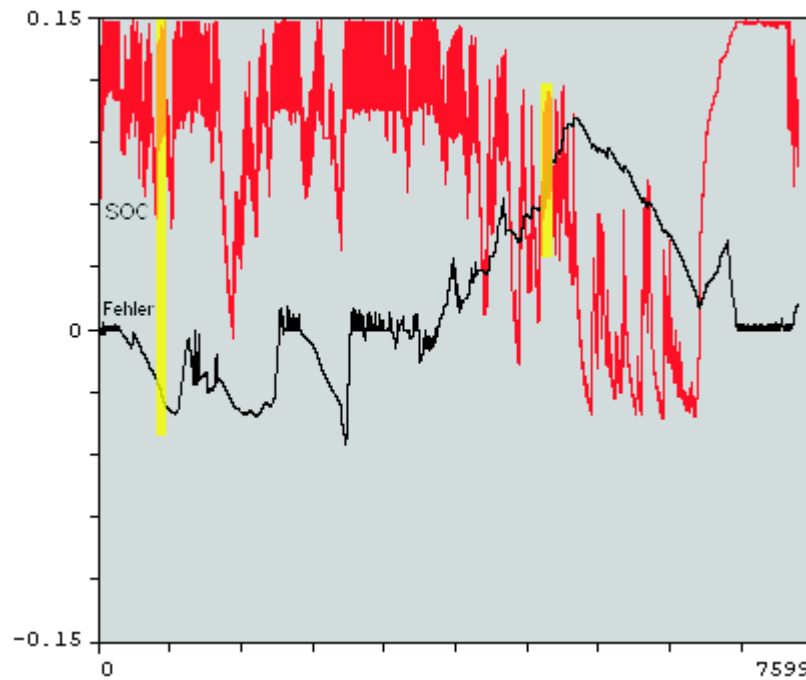


Abbildung 23: Jahresverlauf des SOC und des Fehlers der Solarleuchte mit Markierung der betrachteten Bereiche (Abszisse: Zeit, Ordinate: Fehler -0,15 bis 0,15 SOC 0 bis 1)

Mit dieser Regelbasis konnte ein maximaler absoluter Fehler von 10,3% erreicht werden (siehe Abbildung 23), wobei der Verlauf der Fehlerkurve in den ersten zwei Quartalen nach oben verschoben ist und in den letzten zwei Quartalen eine Verringerung des Fehlers nach unten erreicht wurde. Die Markierungen sind für das folgende Kapitel eingefügt.

Da in der Prämisse lediglich der Strom aufgeführt ist und in die Konklusion nur der Ladezustand und der Strom einging, konnte von einer weiteren Verbesserung des Modells durch Hinzunahme von weiteren Eingangsgrößen ausgegangen werden. Dabei konnte dieses Modell als Grundlage genommen werden und iterativ optimiert werden. Ziel der folgenden Modelle soll es auch sein, den mittleren absoluten Fehler zu verringern, der mit $F_{mittlAbs} = 0,03035$ schon sehr gering ausfällt. Noch mehr Aussagekraft hat der mittlere quadratische Fehler, er beträgt lediglich $F_{mittlQuad} = 0,00173$ und zeigt, dass bereits ein sehr gutes Modell entwickelt ist.

7.7 Fehlerverringern mit UI-Tupel

In diesem Kapitel soll nun versucht werden, den Fehler F_{maxAbs} mit dem Zusammenhang zwischen Strom und Spannung zu verringern. Dazu müssen weitere Betrachtungen durchgeführt werden, bei denen die weiteren Eingangsgrößen Spannung, Temp, etc. mit einbezogen werden.

Bei der Beurteilung der Fehlerkurve fällt ein gegenläufiger Prozess in der ersten und der zweiten Jahreshälfte auf. Wenn der absolute Fehler F_{abs} der ersten zwei Quartale verkleinert wird, verstärkt sich F_{abs} der zwei letzten Quartale und umgekehrt. Damit muss ein Kriterium gefunden werden, um die zwei Bereiche unterscheiden zu können und dann die unterschiedlichen Fehlerdrifts zu behandeln.

In Abbildung 24 ist die erste Markierung der Abbildung 23 im ersten Quartal vergrößert dargestellt. Genauso ist die Vergrößerung 25 des zweiten markierten Bereich gezeigt, die aus dem dritten Quartal entnommen ist. Dabei ist jeweils der SOC im Bereich von 0 bis 1 aufgetragen, und damit die Kurven nicht übereinanderliegen, wurden für die Spannung der Ordinatebereich 9 bis 15 V bzw. für den Strom -13 bis 19 A gewählt. Die letzte Kurve der beiden Diagramme zeigt den auftretenden Fehler F auf, der wie in der Gesamtansicht 23 zu sehen ist im ersten Quartal abfällt und im dritten Quartal ansteigt. Im Gegensatz zu den erstgenannten drei Werten SOC, Spannung und Strom ist die Skalierung des Fehlers F auf der Ordinate aufgetragen und liegt in Abbildung 24 zwischen -0,035 und 0, bei Abbildung 25 ist der Bereich des Fehlers F von 0,065 bis 0,105 .

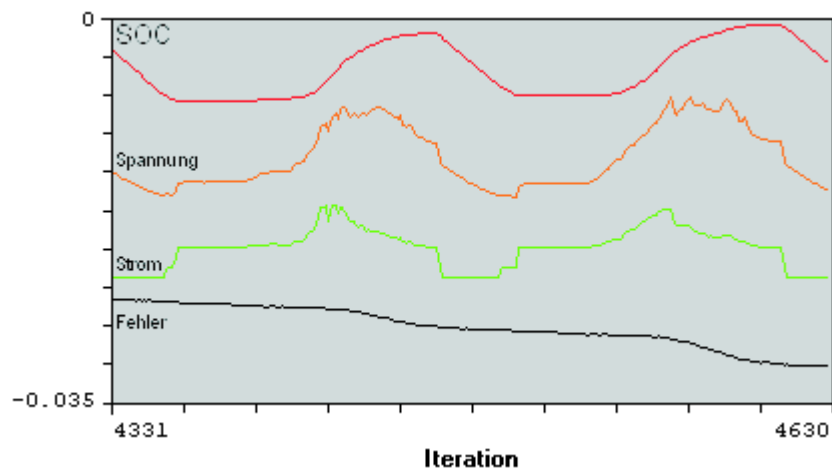


Abbildung 24: Vergrößerung des in Abbildung 23 markierten Bereiches im ersten Quartal

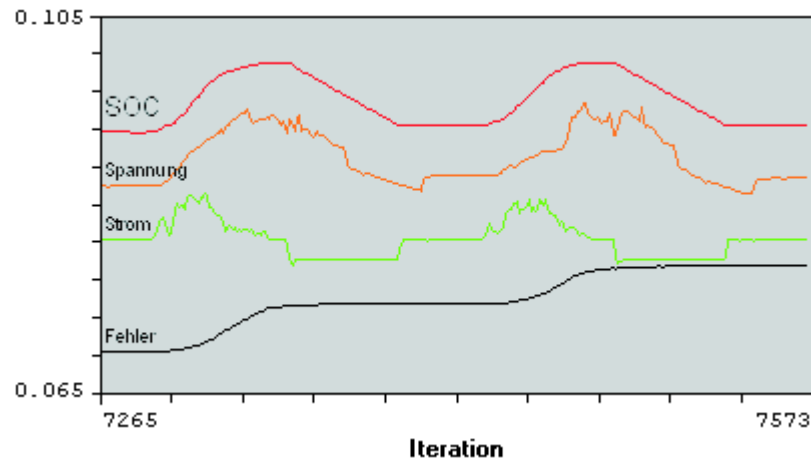


Abbildung 25: Zwei Tageszyklen des in der zweiten Jahreshälfte markierten Bereiches in Abbildung 23

Beim Vergleich der beiden Abbildung kann festgestellt werden, dass die Stromspitzen im ersten Quartal nur einen leichten Versatz zu den Spannungsspitzen aufweisen. Der Abstand der Maxima des Stromes und der Spannung ist im dritten Quartal allerdings wesentlich größer. Damit kann je nach Lage der Strom-Spannungs-Maxima die Steigung des Fehlers F_{dif} unterschiedlich vermindert werden. Zur Unterscheidung wird in die Regelbasis neben dem Strom noch die Spannung als weitere Prämissengröße aufgenommen, wobei lediglich in den Regeln mit positiven Strom unterschieden werden muss, da dort der größte Fehleranstieg F_{dif} zu sehen ist. Die Spannung wird in zwei Fuzzy-Sets mit den Namen gross, klein aufgeteilt und werden mit den Stromzuständen posGross, gross verknüpft. Damit entstehen aus der vorherigen Regel “IF Strom_I IS posGross THEN ...” zwei Regeln “Rule1” und “Rule2”, die sich in der Spannung unterscheiden.

RULE Rule1

IF (Strom_I IS posGross) AND (Spannung IS gross) THEN

$$\text{SOC_neu} = (\text{SOC_alt} + \text{Strom_I} / \text{Intervallquotient})$$

$$+ \text{Strom_I} * 0.000006 - ((1 - \text{SOC_alt}) * 0.00001)$$

END

RULE Rule2

IF (Strom_I IS posGross) AND (Spannung IS klein) THEN

$$\text{SOC_neu} = (\text{SOC_alt} + \text{Strom_I} / \text{Intervallquotient}) *$$

$$+ \text{Strom_I} * 0.000006 - ((1 - \text{SOC_alt}) * 0.00001)) - 0.00025$$

END

Mit den Regeln *Rule1* und *Rule2* wird bewirkt, dass bei großem Versatz der Maxima der SOC leicht verringert wird. Somit wird in diesem Bereich eine Minderung der Steigung des Fehlers F_{dif} erreicht. Wenn beide Werte Strom und Spannung sehr hoch sind, dann ist, wie in Abbildung 24 zu sehen, der Fehleranstieg F_{dif} sehr gering und wird nicht verändert. Der Aufbau der Regeln *Rule3* und *Rule4* ist sehr ähnlich zu den ersten zwei Regeln, nur dass in *Rule4* bei grosser Spannung der Wert 0.00005 in der Konklusion addiert wird. Wenn diese Regel zutrifft, liegt F_{dif} im abfallenden Bereich und der steigende absolute Fehler F_{difAbs} wird verringert. Die weiteren Regeln *Rule5* bis *Rule7* enthalten in der Konklusion lediglich die Bilanzierung und den Subtrahend $((1-SOC_alt*0,00001))$.

Mit diesem Modell wurde der von allen Ansätzen kleinste Fehler F_{maxAbs} von 6,8 % erreicht, da der negative Fehlerdrift F_{dif} in den ersten zwei Quartalen sowie der positive Fehlerdrift in den Quartalen drei und vier vermindert werden konnte. Auch die Fehler $F_{mittlAbs} = 0,0278$ und $F_{mittlQuad} = 0,001226$ haben sich weiter verbessert.

7.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel ist die Erstellung eines Systemmodelles der Ladezustandsermittlung mit Fuzzy-Logic aufgezeigt, wobei versucht wurde, die einer Batterie zugrundeliegenden physikalisch-chemischen Zusammenhänge aus Anhang A in die Regelbasis mit einfließen zu lassen. Die eingestellten Parameter wurden mit einem "Trial and Error"-Vorgehen ermittelt, d. h. zu Beginn wurden Werte festgelegt, die als sinnvoll angesehen wurden. Daraufhin wurden diese Faktoren geändert und das Systemverhalten analysiert. Bei einer Verringerung des absoluten Fehlers F_{maxAbs} wurde die letzte Änderung als richtig angesehen und weiter verfolgt. Die so erreichten Fehlerwerte der in diesem Kapitel dargestellten Modelle sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Die aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass eine Modellierung des Ladezustandes grundsätzlich mit Fuzzy-Logic möglich ist. Allerdings sind die hier gezeigten Modelle sehr genau auf das vorliegende Beispiel der Solarleuchte abgestimmt. Damit ist eine Allgemeingültigkeit nicht gegeben, weil letztendlich nur versucht wurde, dem Fehlerdrift entgegenzusteuern. Mit der Modellierung eines einzelnen Jahres ist ausserdem nicht sichergestellt, dass über die gesamte Lebensdauer der Batterie von fünf bis acht Jahren dieses Modell

Modellname	F_{maxAbs}	$F_{mittlAbs}$	$F_{mittlQuad}$
einfache Bilanzierung	0,16	0,0456	0,00475
Fuzzy-Bilanzierung	0,12	0,0517	0,00458
Beeinflussung durch Ladezustand	0,103	0,0304	0,00173
Fehlerrückführung durch UI-Tupel	0,068	0,0278	0,00123

Tabelle 5: Fehler der erstellten Systemmodelle

angewendet werden kann.

Da andere Batterien einen anderen Fehlerverlauf aufweisen, kann mit diesem Ansatz nicht dem Fehler dieser Batterietypen entgegengewirkt werden. Es ist fraglich, ob dieser Ansatz an jede Batterieart angepasst werden kann. Also sollte versucht werden, ein allgemeingültiges Modell zu entwickeln, das einfach und schnell erstellt werden kann und einen geringen Fehler aufweist.

8 Automatisch optimierte Systemmodelle

Mit dem in diesem Kapitel beschriebenen Systemmodell soll ein allgemeingültiger Ansatz der Ladezustandsermittlung verfolgt werden, indem das Modell erstellt und automatisch optimiert werden soll. Dieses Modell soll aus den in Kapitel 5 beschriebenen Gründen auf einer Bilanzierung aufbauen.

Basierend auf einer Bilanzierung wurde der erste in Abschnitt 8.1 dargestellte Ansatz mit Strom und Spannung als Eingangswerte in Konklusion und Prämisse entwickelt. Die Erweiterung dieses Modells mit einer Bilanzierung als Grundlage wird in Abschnitt 8.2 beschrieben, bei der in die Regelbasis neben Strom und Spannung die Temperatur aufgenommen wurde. Diese Regelbasis wurde immer weiter optimiert, bis ein neuer Ansatz zur weiteren Verbesserung nötig wurde. An dieser Stelle wurde das in Abschnitt 4.3 beschriebene U-I-Kennfeld betrachtet und zur Optimierung Nebenbedingungen festgelegt, die in Abschnitt 8.3.1 nachzulesen sind. Die Erfolge dieses UI-Kennfeldes und die beste Bilanzierung wurden dann zusammengeführt um die positiven Eigenschaften der beiden Verfahren zu vereinen. Dieses Modell ist in Abschnitt 8.3 beschrieben und abgebildet.

Nachdem diese Modelle grundlegend erstellt sind, sollen die Werte der Konklusion mit einem Algorithmus berechnet werden. Dazu werden die in Abschnitt 7.2 erwähnten Referenzdaten benötigt, um mit einem "least square"-Verfahren die Konklusionsparameter zu berechnen. Grundlage für diese Berechnung sind die in [3] beschriebenen Entwürfe für Fuzzy-Regelungen. Die Implementation dieses Tools ist eine Entwicklung des Institut für Innovative Informatik-Anwendung (I3A), der Arbeitsgruppe Angewandte Fuzzy-Technologien (AFT), die für diese Diplomarbeit zur Verfügung stand. Wichtig für dieses Verfahren ist, dass für die zu modellierenden Zustände genug Daten vorliegen, d. h. jeder Ladezustand der Batterie sollte mit verschiedenen Parametern Strom, Spannung, etc. vorhanden sein, damit eine Abhängigkeit automatisch erstellt werden kann.

Im ersten Schritt wird in SieFuzzy ein Modell entworfen, in dem die Eingangs- und Ausgangsdaten festgelegt werden. Beim Aufruf der automatischen Optimierung wird im zweiten Schritt angegeben, welche Form die Konklusion aufweisen soll, bzw. welche Eingangswerte dort aufgenommen werden sollen. Daraufhin wird von der automatischen Optimierung eine Projektdatei OUT.FPL für SieFuzzy erstellt, das dann im dritten Schritt geöffnet und editiert werden kann. Die erstellte Datei enthält die fertige Regelbasis, die aus den Testdaten erstellt wurde.

Die Lage der Fuzzy-Sets ist für die automatische Optimierung mit der

angegebenen Projektdatei festgelegt. An dieser Stelle kann dann weiter optimiert werden, indem die Eingangsgrößen feiner unterteilt oder die Fuzzy-Sets verschoben werden.

8.1 Bilanzierung mit Strom und Spannung

In diesem Kapitel wird das erste automatisch optimierte Modell vorgestellt. Dabei wurde im ersten Ansatz die Struktur aus Abschnitt 7.7 übernommen und angepasst. In die Prämisse der Regelbasis wurde die Spannung und der Strom aufgenommen und das Ergebnis wurde ebenfalls aus Spannung und Strom in der Konklusion berechnet. Der Unterschied zu den in Kapitel 7 beschriebenen Verfahren ist allerdings gewesen, dass aufgrund der automatischen Optimierung nicht direkt der Ladezustand ermittelt werden konnte, sondern indirekt über eine Differenz SOC_dif des alten und neuen Ladezustandes berechnet werden musste. Damit wurde die Bilanzierung in diesem Modell außerhalb der Regelbasis berechnet. Die Fuzzy-Sets der beiden Eingangsgrößen wurden feiner aufgeteilt, so dass sich für den Strom eine Anzahl von sieben und die Spannung eine Anzahl von fünf Fuzzy-Sets ergab. Im Gegensatz zu Kapitel 7 wurden anstelle von sieben Regeln nun $5 \cdot 7 = 35$ Regeln erzeugt, die “von Hand” nicht mehr eingestellt werden konnten.

Somit wurde mit der automatischen Optimierung auf der Grundlage der angegebenen Referenzdaten eine Regelbasis erstellt, die daraufhin getestet wurde. Über den Jahresverlauf der Solarleuchte ergab sich ein maximaler absoluter Fehler $F_{maxAbs} = 0,089$, der im ersten Moment als schlecht beurteilt worden ist, da die Einstellung der Parameter “von Hand” einen wesentlich besseren Wert erzielte, wie in 7.7 beschrieben ist. Der mittlere absolute Fehler lag mit $F_{mittlAbs} = 0,0306$ ebenso im hohen Bereich, allerdings wurde am mittleren quadratischen Fehler von $F_{mittlQuad} = 0,00159$ deutlich, worauf der angewendete Algorithmus optimierte. Dieser Wert lag schon sehr nahe am besten Ergebnis der in Kapitel 7 vorgestellten Modelle.

Der folgenden Auszug der Regel *Rule22* zeigt die Struktur der Regelbasis:

```

RULE Rule22
  IF (Strom_I IS posGross) AND (Spannung IS gross) THEN
    SOC_dif = (0.00257968 * Strom_I) + (-0.000197287 * Spannung)
  END

```

Da die Differenz SOC_dif aufgrund der Strombilanzierung im wesentlichen wieder vom Strom abhängt, ist dessen Faktor sehr hoch, wobei der Spannungswert lediglich einen kleinen Einfluss hat.

8.2 Bilanzierung mit Strom, Spannung und Temperatur

Nachdem ein erster Systemansatz mit Berechnung der Differenz der Ladezustände SOC^t und SOC^{t-1} erfolgte, soll nun die Bilanzierung implementiert werden, indem in der Konklusion der SOC mit sehr hohem Faktor(ca. eins) aufgenommen wird und somit die Bilanzierung innerhalb der Regelbasis berechnet wird. Die Werte *Strom*, *Spannung* und *Temperatur* sind ebenfalls in der Konklusion aufgeführt und werden von der automatischen Optimierung ermittelt. Die Prämissengröße *Strom* ist in 5 Fuzzy-Sets aufgeteilt, wohingegen die *Spannung*, die *Temperatur* und der *SOC_alt* drei Fuzzy-Sets enthalten. So ergab sich der am Beispiel der Regel *Rule84* dargestellte Regelaufbau:

```

RULE Rule84
  IF (Strom_I IS negativ) AND (SOC_alt IS gross) AND
    (Spannung_U IS gross) AND (Temperatur IS klein) THEN
    SOC_neu = (0.0030523 * Strom_I)
              + (0.000149684 * Spannung_U)
              + (0.0000754 * Temperatur)
              + (0.999619 * SOC_alt)
END

```

Die Anzahl der Regeln ist in dieser Regelbasis auf $5 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 3 = 135$ Regeln gewachsen, womit die Zeit der Berechnung der Konklusionswerte bei der automatischen Optimierung von wenigen Sekunden der Regelbasis in Abschnitt 8.1 zu etwa einer Minute der hier erzeugten Regelbasis ansteigt. Beim Test der Regelbasis zeigte sich, dass der maximale absolute Fehler $F_{maxAbs} = 0,101$ höher liegt als der in Abschnitt 8.1 erreichte Fehler. Im Gegensatz dazu sind der mittlere Fehler $F_{mittlAbs} = 0,0281$ und der mittlere quadratische Fehler $F_{mittlAbs} = 0,00154$ jedoch kleiner als der des vorherigen Modells, womit sich eine weitere Verfolgung dieses Ansatzes zu lohnen scheint.

8.3 Fuzzy-Bilanzierung mit Rekalibrierung mittels U-I-Kennfeld

Nach der Optimierung des Fuzzy-Modells mit Bilanzierung sollte auch versucht werden, ein U-I-Kennfeld mit Hilfe der automatischen Optimierung zu erzeugen. Damit der maximale absolute Fehler F_{maxAbs} möglichst gering ist, werden in Abschnitt 8.3.1 Bedingungen erarbeitet, die den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Nachteile des U-I-Kennfeldes vermindern. Dieses

entwickelte U-I-Kennfeld wird daraufhin in Abschnitt 8.3.2 in die Bilanzierung zur Verminderung des Driftes eingebaut.

8.3.1 UI-Kennfeld mit zeitlich konstanten hohen Strom

Mit den in diesem Kapitel beschriebenen Bedingungen wird ein U-I-Kennfeld aufgebaut, das einen Teil der Datensätze berücksichtigt und modelliert die die in diesem Abschnitt beschriebenen Bedingungen erfüllen. Ziel ist die spätere Nutzung des U-I-Kennfeldes, da dieses kein Driftverhalten wie die Bilanzierung aufzeigt. Da das hier entwickelte U-I-Kennfeld nicht für den gesamten Jahresverlauf anwendbar ist, muss es in eine Bilanzierung integriert werden wie in Abschnitt 8.3.2 gezeigt wird.

Die Werte Strom und Spannung wurden jeweils in viele Fuzzy-Sets aufgeteilt, womit eine große Regelbasis entstand, jedoch konnte die Aufgabe der Einstellung der Parameter wie beschrieben auf die automatischen Optimierung übertragen werden. Aufgrund der in Abschnitt 4.3 bereits beschriebenen Trägheit der Batterie ist es nahezu unmöglich mit einem U-I-Kennfeld den Ladezustand zu ermitteln, wenn sich kurz zuvor der Strom geändert hat. Also wurde ein neuer Ansatz versucht, bei dem nur bestimmte Datensätze zur Modellierung genutzt werden sollen. Die Bedingung für die Datensätze ist, dass der Gradient des Stromes über längere Zeit konstant gewesen ist, d. h. es werden nur die Datensätze zur Modellierung verwendet, bei denen die Batterie "halbwegs" ausgeglichen ist. Nachteil dieses Verfahrens ist allerdings, dass im späteren Einsatz nur jeweils in diese Bereichen der Ladezustand ermittelt werden kann, in denen die beschriebene Bedingung zutrifft.

Mit dieser Nebenbedingung wurde ein U-I-Kennfeld erzeugt, jedoch wurden trotzdem große Fehler F_{abs} beobachtet. Bei der Betrachtung, in welchen Bereichen der Zeitachse die geringsten Fehler auftraten, fiel auf, dass bei hohem Strom die Ladezustandsermittlung besser funktionierte als bei einem Stromwert um Null. Damit wurde eine weitere Bedingung für das Kennfeld aufgestellt, und zwar sollte der absolute Strom über einem Ampere liegen.

Zur Auswahl der Datensätze für dieses Modell mussten nun die Kriterien beschrieben werden, die der Stromverlauf zu erfüllen hat. Dazu wurde jeweils das Quadrat der Stromdifferenz $I^n - I^{n-1}$ von den letzten $z = 25$ Zeitschritten berechnet. Die Summe dieser 25 Werte musste kleiner als die festgelegte Schranke $\theta = 0,001$ sein und wie bereits beschrieben wurde eine weitere Schranke für den absoluten Strom von $I_\theta = 1$ definiert, d. h. die Bedingung $|I^t| > I_\theta$ muss erfüllt sein. Der folgende Algorithmus wählt die Datensätze aus, mit denen ein U-I-Kennfeld möglich ist:

$$\text{If } ((\sum_{n=t-z}^t (I^n - I^{n-1})^2 < \theta) \wedge (|I^t| > I_\theta)) \text{ then}$$

```
    nehme_Datensatz_auf
else
    verwerfe_Datensatz
endif
```

Mit dieser Bedingung werden beim Beispiel der Solarleuchte aus 52373 Datensätzen des gesamten Jahres 816 ausgewählt, mit denen dann ein U-I-Kennfeld erstellt wird. Beim Test dieser Datensätze ergibt sich ein maximaler Fehler von 15 Prozent, jedoch sind damit nur kurze Teilbereiche des gesamten Jahres modelliert. Die weitere Verwendung dieses Modells wird in Abschnitt 8.3.2 beschrieben.

Bei Anwendung dieses Modells für andere Batterietypen und Testdaten müssen die Konstanten z , θ und I_θ neu festgelegt werden um ein gutes Ergebnis des maximalen absoluten Fehlers zu erreichen, genauso wie die Anzahl der Fuzzy-Sets der Spannung und des Stroms variiert werden können.

8.3.2 Korrigierte Fuzzy-Bilanzierung

Im letzten Modell dieser Diplomarbeit wird eine Kombination der Bilanzierung aus Abschnitt 8.2 und des beschriebenen U-I-Kennfeldes in Abschnitt 8.3.1 dargestellt. Dabei sollen jeweils die positiven Eigenschaften der beiden Verfahren genutzt werden um eine allgemeingültige Ladezustandsermittlung aufzubauen. Der Aufbau des Gesamtsystems wird an dem in SieFuzzy erstellten Modell in Abbildung 26 erläutert.

Nachdem aus der Eingangsdatei “Solarleuchte” die Größen *Strom*, *Spannung* und *Temperatur* gelesen wurden, werden sie den Variablen für das U-I-Kennfeld oder der Bilanzierung übergeben. Die Eingangsvariablen für die beiden Regelbasen müssen unterschieden werden, da sie eine unterschiedliche Anzahl und Lage der Fuzzy-Sets aufweisen. In den Regelbasen “uiSOC” bzw. “BilSOC” werden daraufhin die jeweiligen Ergebniswerte “SOC_UI” bzw. “SOC_Bil” nach den in Abschnitt 8.3.1 und 8.2 beschriebenen Verfahren berechnet. Dabei sind die Resultate der Regelbasis “uiSOC” nur dann sinnvoll, wenn die in Abschnitt 8.3.1 festgelegte Bedingung zutrifft. Die Entscheidung, welcher der beiden Regelbasiswerte als das Gesamtergebnis “SOC_neu” ausgegeben wird, trifft das Berechnungsglied “neuerSOC” und benötigt dafür die letzten 25 Stromwerte von “Strom4Bil”. Wenn die Quadratesumme der letzten 25 Stromdifferenzen kleiner als 0,001 ist, dann kann der Ladezustand mit dem U-I-Kennfeld berechnet werden und die Berechnung der Bilanzierung wird verworfen. Zwischen diesen vom U-I-Kennfeld berechneten Werten werden die von der Bilanzierung ausgegebenen Ergebnisse übernommen. Damit wird die Problematik des Fehlerdriftes aufgrund der Bilanzierung, wie

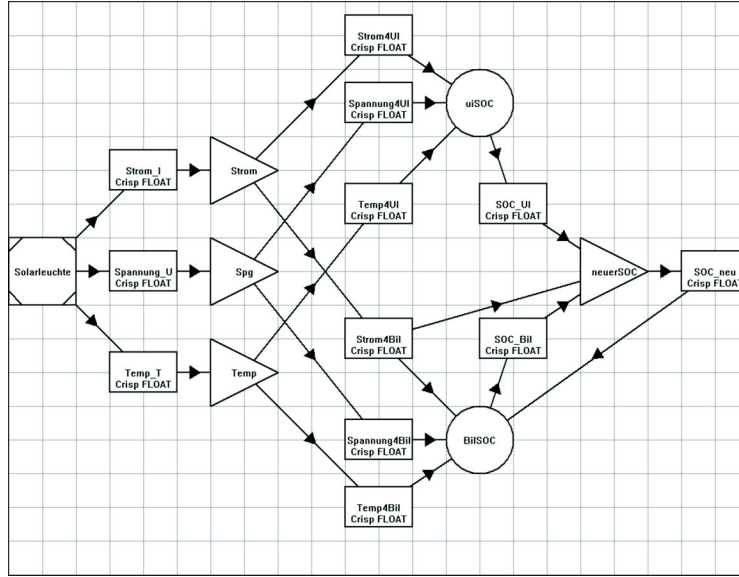


Abbildung 26: Gesamtsystem mit Bilanzierung und U-I-Kennfeld

in Abschnitt 4.4.3 erläutert, umgangen, weil mit dem Berechnen des Ladezustandes über das U-I-Kennfeld eine Rekalibrierung eintritt und der vom U-I-Kennfeld berechnete Wert in die Bilanzierung eingeht.

Der mit diesem Verfahren erreichte maximale absolute Fehler $F_{maxAbs} = 0,152$ ist auf F_{maxAbs} des U-I-Kennfeldes zurückzuführen. Die Abstände zwischen den Rekalibrierungen sind sehr klein, so dass sich der Fehlerdrift der Bilanzierung nur wenig bemerkbar macht. Bei den Fehlern $F_{mittlAbs}$ und $F_{mittlQuad}$ sind die von allen Modellen besten Werte erreicht worden, denn sie liegen bei 0,0179 für den mittleren absoluten und 0,00087 beim mittleren quadratischen Fehler.

Bei der Betrachtung des Verlaufes des Fehlers fällt immer wieder auf, dass während der Bilanzierung nur geringe Änderung F_{dif} auftreten, jedoch sind an den Stellen Sprünge zu verzeichnen, an denen mit dem U-I-Kennfeld der Ladezustand berechnet wird.

9 Test der entwickelten Verfahren

Zur besseren Beurteilung der einzelnen Modelle der entwickelten Verfahren mit automatischer Optimierung sind die Fehler in Tabelle 6 zusammengestellt. Die erreichten Ergebnisse und daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Kapitel zusammengefasst.

automatisch optimiertes Modell	F_{maxAbs}	$F_{mittlAbs}$	$F_{mittlQuad}$
Bilanzierung mit UI-Korrektur	0,089	0,0306	0,00159
Bilanzierung mit U-I-T-SOC	0,101	0,0281	0,00154
U-I-Kennfeld mit Bedingung (Teilmodell)	0,152	0,0247	0,00122
Kombinierte Bilanzierung mit U-I-Kennfeld	0,152	0,0179	0,00087

Tabelle 6: Fehler der automatisch optimierten Modelle

Das erste automatisch optimierte Modell wurde erstellt, um zu zeigen, dass eine Erstellung eines Fuzzy-Modells mit Hilfe der automatischen Optimierung möglich ist. Die dabei erreichten Fehler machen deutlich, dass mit einem einfachen Modell schon gute Ergebnisse erzielt werden können. Die im darauffolgenden Modell hinzugenommen Eingangsgrößen bewirkten eine weitere Verbesserung des mittleren quadratischen Fehlers, auf den die automatische Optimierung optimiert. Eine besondere Betrachtung muss dem dritten Modell bei der Interpretation zugrundeliegen, da nur mit einem Teilbereich der Daten modelliert wurde. Die erreichten Fehler des Teil-U-I-Kennfeldes werden mit der Vorgabe aus Abschnitt 4.3 von 30% maximalen absoluten Fehler als sehr gut beurteilt. Damit wurde dieses U-I-Kennfeld in die Bilanzierung integriert und erreicht die besten Fehler $F_{mittlAbs}$ und $F_{mittlQuad}$.

Beim Vergleich der Tabellen 5 und 6 fällt auf, dass der maximale absolute Fehler bei der automatischen Optimierung gegenüber den erstellten Modellen in Kapitel 7 wesentlich schlechter abschneidet. Der Grund dafür ist das unterschiedliche Ziel der beiden Verfahren. Während die automatische Optimierung eine im Mittel beste Lösung sucht, wurde bei den Systemmodellen in Kapitel 7 versucht, den maximalen absoluten Fehler zu verringern. Außerdem sind die durch das UI-Kennfeld verursachten Fehler F_{maxAbs} nur selten auftretende Ausreisser, wie durch den mittleren quadratischen Fehler deutlich wird.

Ein weiterer Nachteil des Ansatzes in Kapitel 7 ist die nicht generisch erstellte Regelbasis, denn in diesem Fall wurden chemische Prozesse in den

Verlauf des Fehlers interpretiert, die nicht automatisch erkannt werden können. Dagegen kann die beschriebene automatische Optimierung immer angewendet werden und erzeugt einen kleinen mittleren quadratischen Fehler.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ermittlung des Ladezustandes von Bleibatterien sollte in dieser Arbeit mit Hilfe eines Fuzzy-Modells ermöglicht werden. Die bereits vorhandenen Ansätze zur Ermittlung des Ladezustandes wurden zusammengetragen und bewertet um eine weitere Verarbeitung zu ermöglichen. Darauf aufbauend wurden erste Modellansätze diskutiert und das grundlegende Modell der Bilanzierung festgelegt. Im nächsten Schritt sind die zur Verfügung stehenden Referenzdaten auf ihre Eigenschaften untersucht worden, um die ersten Modellierungs- und Testdaten auszuwählen. Die Entscheidung, welches Fuzzy-System als Werkzeug gewählt werden soll, fiel zu Gunsten von Takagi-Sugeno aus. Damit wurde ein auf den physikalisch-chemischen Grundlagen basierendes Modell erstellt, in dem gezeigt wurde, dass die Fuzzy-Technologie in diesem Anwendungsfall angewendet werden kann. Mit dieser Erkenntnis wurde das entgeltliche Modell mit Hilfe einer automatischen Optimierung und einer Rekalibrierung über ein U-I-Kennfeld verwirklicht.

Grundsätzlich läßt sich nach der Erstellung eines Modells der Ladezustandsermittlung mit Fuzzy-Logic sagen, dass die erzielten Ergebnisse eine Modellierung mit Fuzzy-Logic rechtfertigen. Die in Kapitel 8 aufgebauten Systeme zeigen, dass nahezu ohne Kenntnisse der chemischen und physikalischen Zusammenhänge der Bleibatterie ein Fuzzy-Modell mit automatischer Optimierung erstellt werden kann, das einen maximalen Fehler von unter zehn Prozent erreicht.

Da in dieser Diplomarbeit nur eine Batterie der Betriebsklasse 1 untersucht wurde, müssen noch weitere Batterietypen untersucht werden, um die erreichten Ergebnisse zu untermauern. Dazu zählen Batterien mit anderen Belastungszyklen, z. B. der Einsatz einer Batterie in einem Hybridsystem, in dem völlig andere Lade- und Entladezyklen vorkommen. Außerdem werden dort für längere Zeit tiefe Ladezustände erreicht und die Modellierung mit Ladezustand als Eingangswert gewinnt an Bedeutung. Für Batterien mit anderen physikalischen Eigenschaften, z. B. einer Umwälzpumpe, muss ein neues Modell erstellt werden. Genauso müssen die Bauart (flüssig oder Gel) und die Batteriegröße bzw. Kapazität berücksichtigt werden.

Der Beweis der Allgemeingültigkeit der dargestellten Modellerstellung sollte mit Hilfe der Aufteilung der zur Verfügung stehenden Daten in Modellierungs- und Testdaten erfolgen, ebenso wie zu zeigen ist, dass das Verfahren langzeitstabil ist.

Als ein weiterer Punkt sollte auch versucht werden, den in dieser Arbeit gezeigten Vorgang der Anfertigung einer Bilanzierung mit U-I-Kennfeld zu automatisieren, damit für jeden Batterietyp eine Ladezustandsermittlung mit

einfachen Mitteln aufgebaut werden kann. Dazu gehört die Festlegung der Fuzzy-Sets für die Eingangsgrößen des U-I-Kennfeldes, sowie die Länge des zu betrachtenden Intervalls, der Schranken für den minimalen absoluten Strom und die Summe der Quadrate der Stromdifferenzen.

Eine Modellierung mit weniger Daten als einem ganzen Jahr ist auch möglich, nur sollte in diesem Fall die Regelbasis neu definiert werden. Da mit einer geringen Anzahl von Modellierungsdaten die Faktoren der Konklusion nur schlecht berechnet werden können, ist eine Verringerung der Anzahl der Fuzzy-Sets sinnvoll. Eine weitere Verkleinerung der Regelbasis ist mit der Vernachlässigung der Temperatur möglich. Da dieser Wert den kleinsten Einfluss hat, kann er gestrichen werden, um die Berechnung der Konklusionswerte zu erleichtern.

A Physikalische und chemische Grundlagen

Die folgenden Abschnitte beschreiben die physikalischen und chemischen Grundsätze zur Speicherung von elektrischer Energie.

Damit zwischen den zwei Polen einer Batterie Strom fließen kann, muss ein Ladungsunterschied bestehen. Diese Ladungsdifferenz beruht darauf, dass am Minus-Pol (Anode) ein Überschuss an Elektronen herrscht und am Plus-Pol (Kathode) ein Mangel an Elektronen. Der Elektrolyt einer Bleibatterie besteht aus Schwefelsäure H_2SO_4 und Wasser H_2O .

A.1 Ladevorgang

Im entladenen Zustand bestehen die Anode und Kathode aus Bleisulfat ($PbSO_4$). Der Elektrolyt hat einen hohen Wassergehalt. Wenn an den Polen eine Spannung angelegt wird, entsteht ein elektrisches Feld zwischen den beiden Bleisulfat-Platten wie in Abbildung 27 dargestellt.

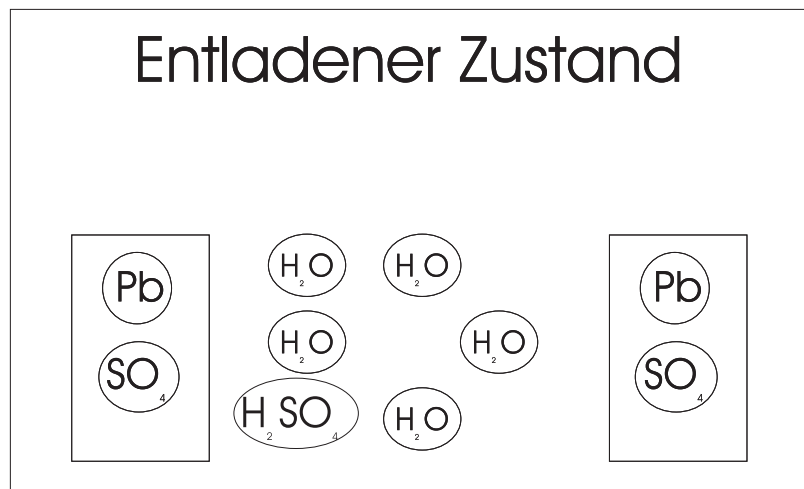
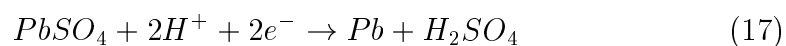


Abbildung 27: Entladener Zustand einer Bleibatterie

Aufgrund dieses Feldes wandern die positiven Wasserstoffionen (H^+) des Elektrolytes zur Kathode. Mit den Elektronen (e^-) der angelegten Spannung entsteht Blei (Pb) an der Kathode und Schwefelsäure (H_2SO_4) im Elektrolyt (siehe Abbildung 28).



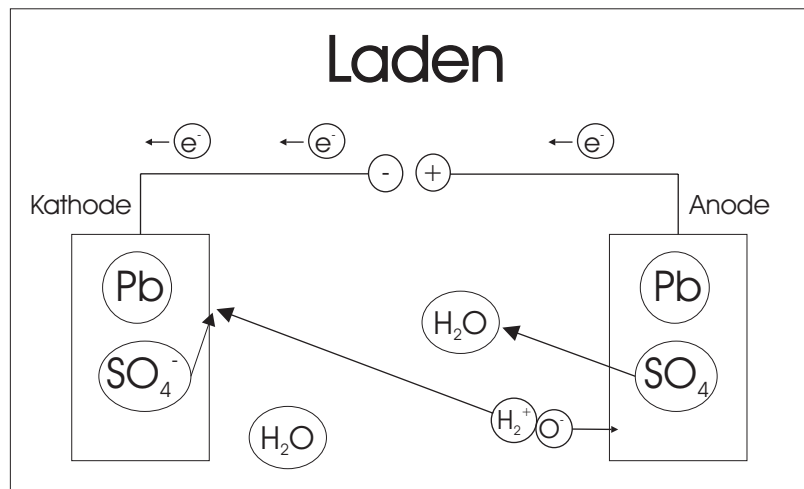


Abbildung 28: Ladevorgang einer Bleibatterie

Die negativen Sauerstoffatome(O^-) bewegen sich zur Anode. Dort bildet sich Bleidioxid(PbO_2), nachdem die negativen Sulfationen (SO_4^{2-}) in den Elektrolyt übergegangen sind und Schwefelsäure(H_2SO_4) gebildet haben. Außerdem werden Elektronen an den äußeren Stromkreis abgegeben. Damit ergibt sich der in Abbildung 29 gezeigte geladene Zustand.

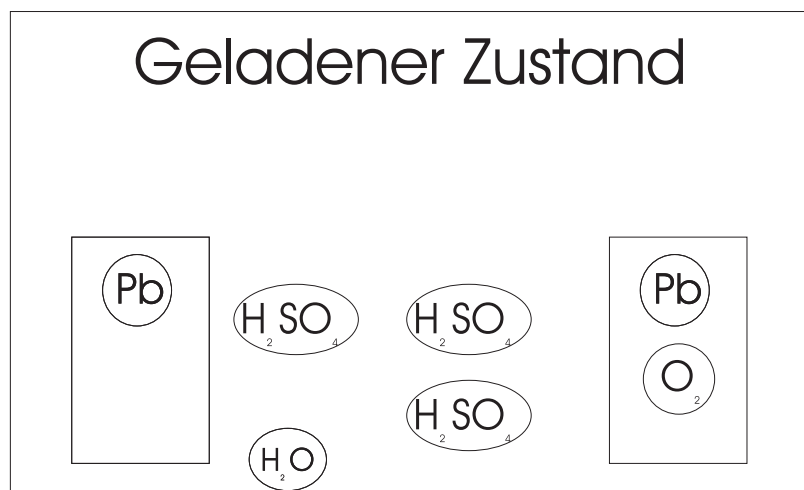
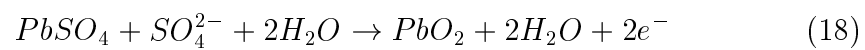


Abbildung 29: Geladener Zustand einer Bleibatterie

A.2 Entladevorgang

Im geladenen Zustand (siehe Abbildung 29) liegt bei der Anode Bleidioxid (PbO_2) und der Kathode Blei (Pb) vor. Das Elektrolyt besitzt einen hohen Säuregehalt. Wenn jetzt ein Verbraucher an die Batterie angeschlossen wird, wird der Ladungsunterschied durch Elektronenfluss abgebaut wie in Abbildung 30 dargestellt.

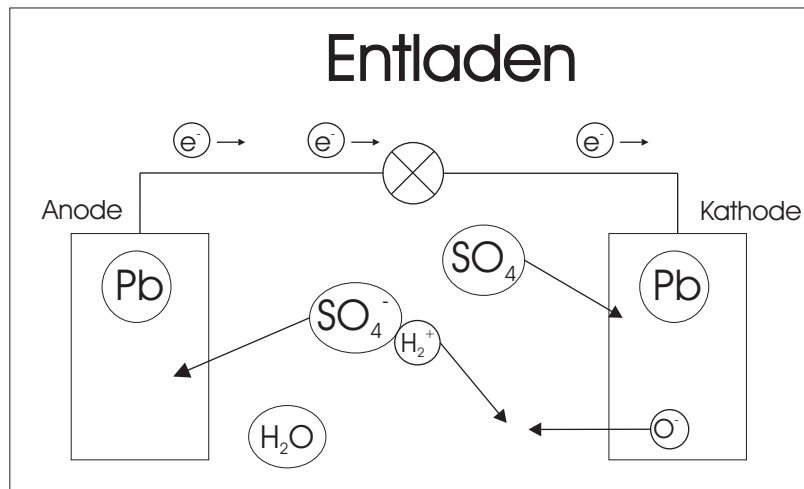
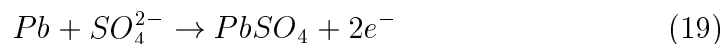
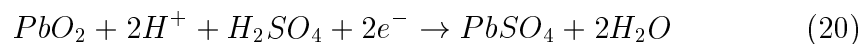


Abbildung 30: Vorgang der Entladung bei einer Bleibatterie

Aus dem Elektrolyt wandern die negativen Sulfationen (SO_4^{2-}) zur Kathode (Pb), bilden dort Bleisulfat ($PbSO_4$) und geben Elektronen ab.



An der Anode werden Elektronen aufgenommen, mit positiven Wasserstoffionen (H^+) und Schwefelsäure (H_2SO_4) bildet sich wieder Bleisulfat ($PbSO_4$) und Wasser (H_2O). Somit ergibt sich wieder der in Abbildung 27 gezeigte Ausgangszustand einer entladenen Batterie.



A.3 Ersatzschaltbild Batterie

Das in Abbildung 31 vereinfacht dargestellte Ersatzschaltbild modelliert einige Vorgänge der Batterie mit folgenden Größen:

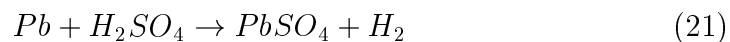
U_Z = Zellenspannung, die von der Batterie erzeugt wird. Die Spannung ist bei der realen Batterie nicht konstant, da sie vom Ladestrom, Ladezustand, etc. abhängt.

C_D = Durchtrittskapazität, hier wird die elektrische Energie gespeichert, die die Batterie aufnimmt. Die nutzbare Kapazität der Batterie begrenzt diesen Wert.

R_D = Diffusionswiderstand, der durch die chemischen Reaktionen hervorgerufen wird. Die verschiedenen Konzentrationen innerhalb des flüssigen Elektrolytes bewirken einen Konzentrationsausgleich, bei dem Energie benötigt wird.

R_t = Durchtrittswiderstand, der beim Ladungsdurchtritt durch die Grenzfläche Metall-Elektrolyt aufgewendet werden muss.

R_S = Selbstentladungswiderstand (Selbstentladung = Reaktion der Aktivmasse mit dem Elektrolyt)



U_K = Klemmenspannung, die aussen an der Batterie gemessen wird.

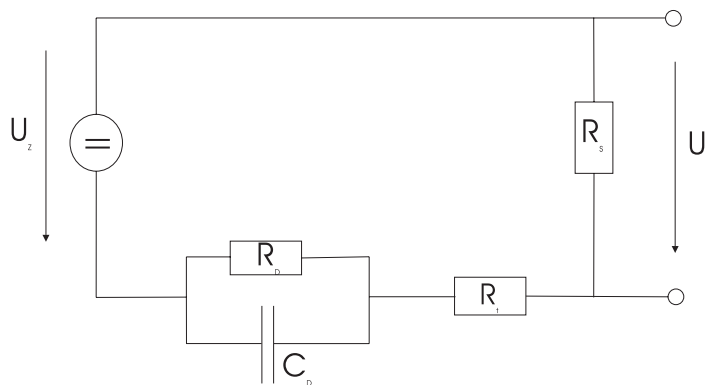


Abbildung 31: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Bleibatterie

A.4 Alterungsmechanismen

Zur Erstellung der Regelbasis müssen die chemischen und physikalischen Vorgänge bekannt sein, die in der Batterie ablaufen. In Abhängigkeit der Auswirkung der verschiedenen Prozesse müssen dann diese Faktoren modelliert

werden. Es gibt Mechanismen, die sich schon nach kurzer Zeit auswirken, andere über längere Zeit, je nachdem unter welchen Voraussetzungen die Batterie betrieben wurde. Auch die Alterung über die gesamte Lebensdauer muss modelliert werden.

A.4.1 Gasung

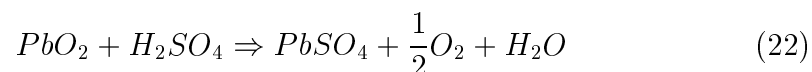
Die Gasung beschreibt die Entstehung von O_2 bzw. H_2 bei der Elektrolyse. Der Gasfluss ist abhängig von der Temperatur und der Spannung. Folgende Faustformel gibt den Zusammenhang zwischen Temperatur, Spannung und Gasung an: Verdoppelung der Gasbildung bei Temperaturerhöhung um 10K, Verdreifachung bei Spannungserhöhung von 10mV/Zelle [6]. Dabei entsteht durch Spaltung von Wasser an der positiven Elektrode Sauerstoff und an der negativen Elektrode Wasserstoff. Das dadurch verlorengegangene Wasser führt zu einer Erhöhung der Konzentration des Elektrolytes und zu einem Absinken des Elektrolytpegels.

Neben den negativen Folgen der Gasung gibt es auch positive Wirkungen. Wie im späteren Abschnitt A.4.6 beschrieben, kommt es zur Säureschichtung als ein weiterer Alterungsmechanismus. Dieser Vorgang kann gemindert werden, wenn es zur Durchmischung des Elektrolytes kommt [11]. Die bei der Gasung aufsteigenden Gasblasen verdrängen ein Flüssigkeitsvolumen und dadurch tritt ein Austausch des Elektrolytes zwischen übereinanderliegenden Volumenelementen auf. Um diesen positiven Nebeneffekt zu erzielen kann man die Batterie gezielt überladen, wodurch es zu einer starken Gasung und erwünschten Vermischung des Elektrolytes kommt. Da die Gasung zu den bedeutendsten Nebenreaktionen zählt, muss sie besonders berücksichtigt werden.

A.4.2 Selbstentladung

Die Selbstentladung ist der Strom, der innerhalb der Batterie fließt, ohne dass ein Verbraucher angeschlossen ist. Sie ist hauptsächlich auf die Reaktion der Aktivmasse mit dem Elektrolyten zurückzuführen. Daraus resultiert die Umwandlung von geladenem aktiven Material zu entladene Material.

Beispiel: Plus-Pol einer Bleibatterie

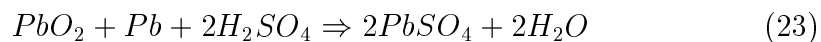


Die Selbstentladung ist Temperatur- und Altersabhängig: Umso größer die Temperatur, umso größer die Selbstentladung. Alte Batterien haben eine höher Selbstentladung als junge. Bei einer Temperatur von 25°C kann man

von einer Selbstentladung von 3-5% pro Monat ausgehen [12, Seite 21].

A.4.3 Gitterkorrosion

Die Korrosion führt zu einer ungünstigen Spannungslage, da sich Bleisulfat auf dem Gitter bildet. Diese Schutzschicht aus Bleisulfat bremst die weitere Reaktion [11, Seite 57]. Durch Selbstentladung oder kleine Säuredichten kommt es zur Korrosion des Gitters, da die Aktivmasse und das Gitterblei reagieren.



Die negative Elektrode wird beim Entladen mit Bleisulfat überzogen. Da beim Laden dieser Prozess wieder negiert wird, ist die Korrosion am negativen Gitter zu vernachlässigen [10].

Am positiven Gitter hat die Korrosion Folgen für die Batterie: Hier korrodiert die Platte im Laufe der Zeit immer weiter bis zur Mitte. Die Volumenvergrößerung des pos. Gitters kann zu Plattenkurzschlüssen führen. Die Aufweitung des Metalls durch den entlang der Korngrenzen fortschreitenden Korrosionsvorgang [10], zählt zu den Langzeiteffekten. Alle Korrosionsvorgänge zusammen bilden ein komplexes System. Generell kann man sagen, je länger die Selbstentladeströme oder sonstige kleine Ströme fließen, umso höher ist die Korrosion. Auch die Temperatur hat großen Einfluss, denn wenn die Temperatur hoch ist, korrodiert die Batterie mehr als bei geringen Temperaturen. Je geringer die Säuredichte bzw. je kleiner der Ladezustand, desto größer ist die Korrosionsgeschwindigkeit. Zyklische Belastung beschleunigt die Korrosion.

A.4.4 Sulfatierung

Die Sulfatierung führt zum Verlust von nutzbarer aktiver Masse; die Überspannungen werden erhöht, mithin die Ladbarkeit verschlechtert.

Um energetisch stabiler zu werden, versuchen die feinen Aktivmassepartikel ihre Oberfläche mit der Rekristallisation zu verringern [11]. Je geringer der Ladezustand, desto schneller läuft diese Rekristallisation ab. Die beim Entladen entstandenen $PbSO_4$ -Moleküle verbinden sich zur Stabilisierung mit anderen Teilchen. Wenn der Entladestrom hoch ist, verbinden sich wenige Moleküle zu einem $PbSO_4$ -Keim. Beim niedrigen Strom (z. B. Selbstentladung) wandern die Moleküle zu einem bereits vorhandenen $PbSO_4$ -Kristall (bis zu 1000 Moleküle) und dadurch steigt die Kristallbildung. Also bewirkt ein kleiner Strom eine große Sulfatierung.

Durch die Sulfatierung wird die Oberfläche verringert. Beim Entladen bzw. Laden wird die kleine Oberfläche stark belastet, wodurch man schnell in den Bereich der Gasungsspannung gelangt, d. h. der Spannungsbereich ab dem die Gasbildung zunimmt. Dann ist die Batterie nicht mehr ladbar.

A.4.5 Abschlammung

Als Abschlammung bezeichnet man den Prozess, bei dem sich aktives Material von den Elektroden löst und am Boden der Batterie niederschlägt [12]. Ursache für eine Abschlammung sind Tiefentladungen, starke Gasung und mechanische Belastung der Gitter durch Korrosion und Gitterwachstum. Durch die Abschlammung kommt es zu einem Verlust an aktiver Masse, d. h. die Batterie kann weniger elektrische Energie speichern. Weiterhin kann es über den Schlammraum hinweg zu einem Kurzschluss kommen.

A.4.6 Säureschichtung

Aufgrund der Schwerkraft und der verschiedenen Dichten der Säure innerhalb einer Batterie sinkt der Elektrolyt mit geringerer Dichte ab und es werden Schichten gebildet. Aufgrund des Aufbaus der Batterie und der Lage der Bleiplatten bilden sich die drei Bereiche

1. oberhalb der Platten
2. innerhalb der Platten
3. unterhalb der Platten

mit unterschiedlichen Dichtewerten, wie in Abbildung 32 zu sehen ist.

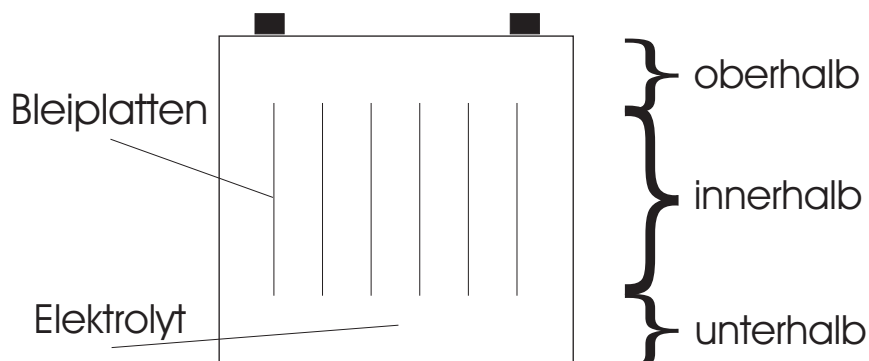


Abbildung 32: Schichtenmodell einer Bleibatterie

Die während des Ladevorganges im Plattenbereich entstehende Schwefelsäure mit großer Dichte sinkt nach unten. So werden der Elektrolyt im mittleren und unteren Bereich vermischt, allerdings kann der Elektrolyt oberhalb der Platten nicht geladen werden.

Während des Entladens wird die Schwefelsäure im Plattenbereich verdünnt, was dazu führt, dass der Elektrolyt in die oberen Schichten aufsteigt. Durch die Vermischung der oberen und der mittleren Schicht nehmen beide an den chemischen Vorgängen der Entladung teil, während die Säure im unteren Bereich nicht genutzt werden kann.

Beim ersten Lade-Entlade-Zyklus stellt sich eine starke Schichtung ein. Danach nimmt die Säureschichtung bei den weiteren Zyklen nur noch wenig zu. Nach mehreren Zyklen stellt sich innerhalb der Batterie eine nicht lineare Dichteänderung in vertikaler Richtung ein. In der obersten Schicht ist die Dichte nahezu konstant, jedoch weist der Elektrolyt in der direkten Nähe zu den oberen Plattenkanten einen starken Dichteansprung auf das Niveau innerhalb der Platten auf. Zwischen dieser oberen und der unteren Plattenkante steigt die Dichte nahezu linear, um dann an der unteren Plattenkante wieder stark anzusteigen und zur Säuredichte der Schicht unterhalb der Platten überzugehen. Auch im Bereich unterhalb der Platten ist die Dichte konstant und hat einen hohen Wert [4, Seite 30].

Neben der beschriebenen Säureschichtung in die drei Bereiche oberhalb, innerhalb und unterhalb der Platten und der daraus folgenden schlechten Nutzung des Elektrolytes, ist ein weiterer negativer Effekt aufgrund der Säureschichtung im Bereich von oberer bis unterer Plattenkante zu verzeichnen. Wie in Abbildung 33 zu sehen ist, kann die Batterie aufgrund der unterschiedlichen Säuredichten im oberen Bereich der Platten mehr Ladung aufnehmen als im unteren Bereich. Allerdings bewirkt dieses Konzentrationsgefälle auch eine kleinere Spannung in höheren als in tieferen Schichten, womit ein Ladestrom den oberen stärker als den unteren Bereich lädt. Bei der Entladung wird dieser Effekt nochmals verstärkt, da die höhere Spannung in den tieferen Schichten einen großen Entladestrom hervorruft, obwohl der lokale Ladezustand dort geringer ist. Somit wird die Batterie bevorzugt im oberen Bereich geladen und im unteren Bereich entladen.

Aufgrund der Vernachlässigung der unteren Regionen beim Laden und der besonderen Belastung beim Entladen, kommt es dort oft zur Tiefentladung. Die in diesem Bereich vorliegende große Dichte hat eine verstärkte Sulfation zur Folge. Im Gegensatz dazu werden die oberen Säureschichten der Batterie viel geladen und wenig entladen, womit es zur Überladung und zu einer verstärkten Korrosion kommt [4].

Da die Säureschichtung wesentlich zur Alterung beiträgt, versucht man diesen Mechanismus zu mindern. Dazu kann man die Überladung nutzen,

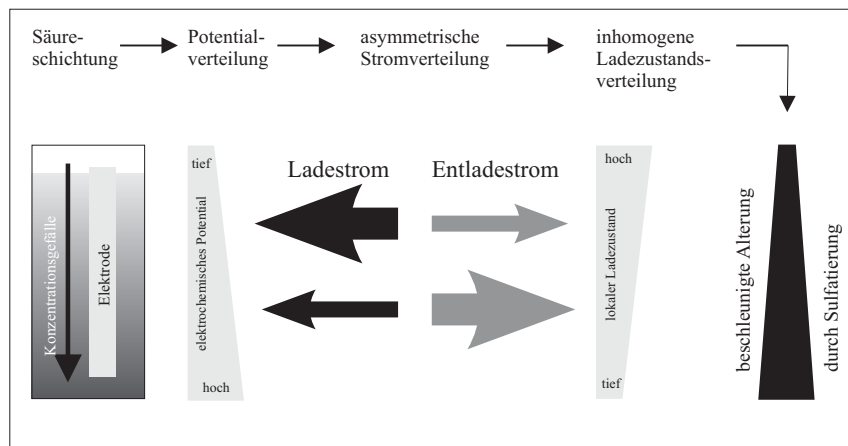


Abbildung 33: Kausalkette zwischen Säureschichtung und Batteriealterung [12]

da die daraus folgende Gasung den Elektrolyt durchmischt, allerdings treten dann die negativen Effekte der Gasung (siehe A.4.1) auf. Eine weitere Möglichkeit der Durchmischung ist eine Umwälzpumpe, die in die Batterie eingebaut ist und den Elektrolyt zirkulieren lässt. Da der Einbau und die Wartung eines solchen mechanischen Teils teuer und aufwändig sind, werden Umwälzpumpen nur bei großen Batterien(>300Ah) genutzt, damit sich die Kosten der Pumpe relativieren.

A.5 Einfluss der Entladestromstärke

Die entnehmbare Kapazität ist von der Höhe des Stromes abhängig, mit dem die Batterie entladen wird.

In Abbildung 34 sind sieben Kurven mit unterschiedlicher Entladestromstärke in A eingetragen. Auf der Abszisse kann man die Strommenge in Ah ablesen, die der Batterie bei angegebenem Entladestrom entnommen werden konnte. Bei hohen Strömen, also eine der unteren Kurven, konnte man nur etwa ein Drittel der eigentlich vorhandenen Kapazität der Batterie entnehmen.

Bei der Entladung reagiert die Säure mit der Oberfläche der Bleiplatten. Diese Elektrolytschicht muss sich mit der Säure zwischen den Platten vermischen, damit es zu weiteren Reaktionen kommen kann. Wenn dieser Vermischungsvorgang noch nicht stattgefunden hat, entsteht, wie in Abb. 35 zu sehen, ein Konzentrationsgefälle zwischen der inneren Säure, d.h. zwischen

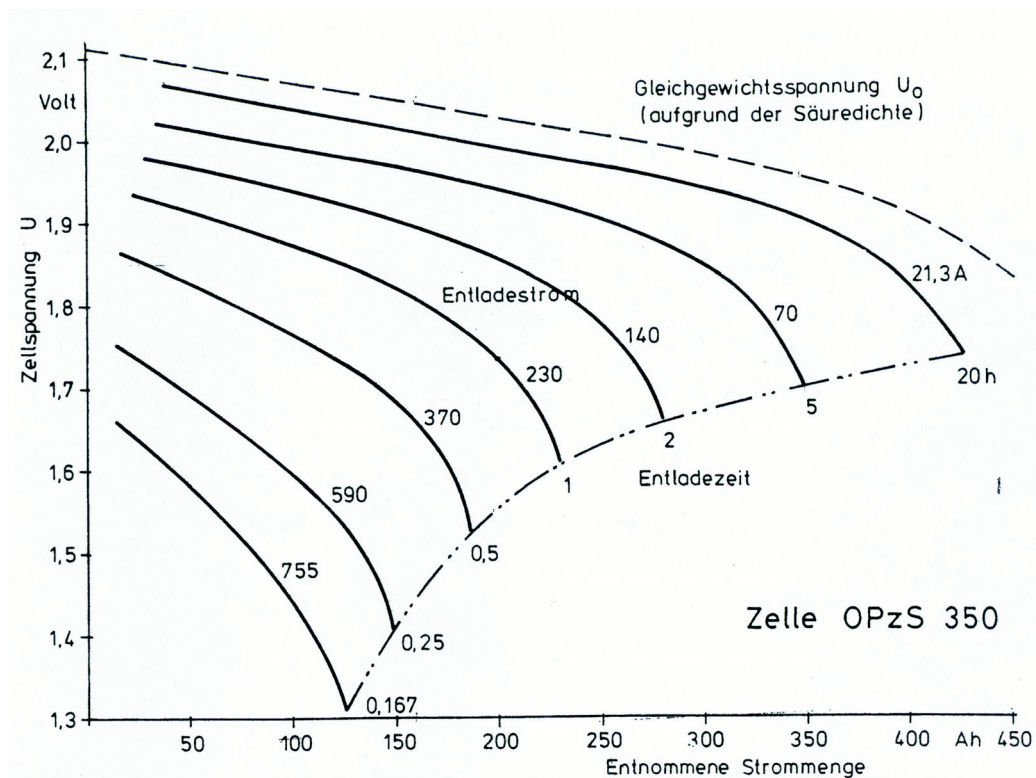


Abbildung 34: Entladekurven einer Bleibatterie (Nennkapazität 350 Ah) [10]

den Platten, und der äußeren Säure, die man direkt an den Bleiplatten findet [8]. Die unterschiedlichen Konzentrationen gleichen sich nur langsam aus, so dass die entnehmbare Kapazität einer Batterie bei hohen Entladeströmen kleiner ist als bei kleinen Strömen.

A.6 Einfluss der Temperatur

Verschiedene Vorgänge in der Batterie werden durch die Temperatur beeinflusst. Der signifikanteste Prozess ist die Änderung des Elektrolytwiderstandes. Wenn die Temperatur sinkt, reduziert sich die entnehmbare Strommenge und der Innenwiderstand steigt. Als Faustregel gilt: Ein Prozent Kapazitätsminderung pro Kelvin Temperaturerniedrigung [10]. Bei geringeren Temperaturen sinkt weiterhin die mittlere Entladespannung. Viele Anwendungsbeispiele benötigen eine konstante Leistung $P = U \cdot I$. Wenn U sinkt und P konstant bleiben soll, muss I erhöht werden. Über die Zeit gesehen wird bei

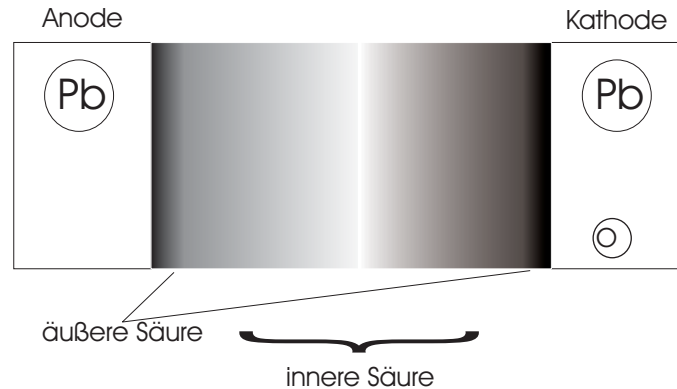


Abbildung 35: Konzentrationsgefälle zwischen innerer und äußerer Säure

geringerer Spannung also eine größere Ladungsmenge benötigt.

Bei den betrachteten Bleibatterien kommt es ab einer bestimmten Temperatur sogar zum Einfrieren des Elektrolyts. Der Gefrierpunkt hängt stark vom Ladezustand der Batterie ab, ca. -70°C bei 100% SOC und -15°C bei 20% SOC [2].

Auch zu hohe Temperaturen müssen besonders berücksichtigt werden. Ab einer Durchschnittstemperatur von 25°C gilt: Bei Erhöhung der Durchschnittstemperatur um 10K verringert sich die Lebensdauer um die Hälfte und die Gasbildung verdoppelt sich [6]. Grund für die Lebensdauerverringering ist die Zunahme der Gasentwicklung und eine schnellere Korrosion.

A.7 Tiefentladung

Bei der Tiefentladung wird eine Batterie so weit entladen, dass sie keine elektrische Energie mehr enthält. Da die Alterungsmechanismen in diesem Fall sehr stark beschleunigt werden, wird die Batterie nahezu zerstört. Aus diesem Grund darf eine Bleibatterie nie völlig entladen werden. Um den Tiefentladestatus zu vermeiden wird bei solaren Inseln in den Laderegler eine Ladezustandsüberprüfung eingebaut. Wenn die Batterie einen bestimmten Ladegrad (meistens durch Spannungsmesser ermittelt) unterschreitet, werden die Verbraucher abgeschaltet.

Bei sinkendem Ladezustand verringert sich die Schwefelsäurekonzentration. Damit steigt die Löslichkeit des PbSO_4 im Elektrolyten, und die Prozesse

Korrosion, Sulfatierung(siehe A.4.4) und Kurzschlussbildung werden beeinflusst [12, Seite 30].

Die Korrosion wird normalerweise durch eine $PbSO_4$ -Schutzschicht behindert. Wenn wie oben beschrieben die $PbSO_4$ -Löslichkeit zunimmt wird diese Schutzschicht zerstört und die Korrosion steigt.

Bei höherer $PbSO_4$ -Löslichkeit fällt das Entladeprodukt $PbSO_4$ nicht mehr nur direkt auf der Elektrode aus, sondern kann bis in den Separator wandern. Dort kann es in leitfähiges Pb oder PbO_2 umgewandelt werden und einen Kurzschluss verursachen.

Die beschriebenen Prozesse der Tiefentladung wirken sich nicht nur im absoluten Tiefentladezustand aus, sondern beginnen bereits bei kleinen Ladezuständen und müssen berücksichtigt werden. Generell gilt, dass je kleiner der Ladezustand ist, desto schneller altert die Batterie.

A.8 Überladung

Die Überladung tritt dann ein, wenn die Batterie den Vollzustand erreicht hat und immer noch geladen wird. Da dieses Ereignis sehr gut erkannt werden kann, und dann der Ladevorgang gestoppt wird, kommt die ungewollte Überladung fast nie vor.

Wie in A.4.1 beschrieben, wird die Überladung genutzt um eine Elektrolytmischung zu bewirken und den unerwünschten Effekt der Säureschichtung (siehe A.4.6) zu vermindern. Bei der Gasung, als ein Nebeneffekt der Überladung, wird mit jeder Gasblase Flüssigkeit verdrängt und vermischt.

Die negativen Effekte sind Korrosion, Elektrolytverlust und die negativen Folgen der Gasung [12].

Literaturverzeichnis

- [1] ALTROCK, CONSTANTIN V.: *Fuzzy Logic*, Band 1. Oldenbourg Verlag, München, 1993.
- [2] HAUDEK, RICHARD: *Die Sonnenenergie als Kernelement eines regenerativen Energiesystems*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik, <http://elite.e2i.at/diplomarbeiten/Haudek.pdf>, Mai 1998.
- [3] HECKENTHALER, T.: *Systematischer Entwurf fast-zeitoptimaler Fuzzy-Regelungen*. Shaker-Verlag, Aachen, 1996.
- [4] JOSSEN, ANDREAS: *Betriebsführung photovoltaischer Anlagen mit Energiespeichern*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart, Mai 1994.
- [5] KAHLERT, J. und H. FRANK: *Fuzzy - Logik und Fuzzy - Control*. Vieweg, Braunschweig; Wiesbaden, 2. Auflage, 1994.
- [6] KAISER, RUDI: *Entwicklung eines Verfahrens zur Batterieladezustandsbestimmung mit Fuzzy-Logik für Mikrocontrollersteuerungen*. Diplomarbeit, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- [7] KOHLHAAS, STEFFEN: *Gesprächsnotiz: Diskussion zum Verständnis der Probleme bei der Ermittlung des Ladezustands und ersten Lösungsansätzen mit Dirk-Uwe Sauer vom Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme (ISE)*. August 2002.
- [8] PRZYCHOWSKI, MICHAEL DUNIN V.: *Batterie Infos*. <http://www.taunusbiker.de/mdvp/Bat/Batterie.pdf>, November 2001.
- [9] SAUER, DIRK UWE: *Dokumentation zum Programm zur Berechnung des Ladezustandes, Version b-3.0*. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 1999.
- [10] VARTA BATTERIE AG, VDI-VERLAG: *Bleiakkumulatoren*, 11 Auflage.
- [11] WORKSHOP DES FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE: *Fortschrittliche Back-up- und Speichersysteme für regenerative Energieversorgungsanlagen*, Berlin, 1996. Forschungsverbund Sonnenenergie.

- [12] WORKSHOP DES FORSCHUNGSVERBUND SONNENENERGIE: *Elektro-chemische Speichersysteme für regenerative Energieversorgungsanlagen*, Berlin, 1999. Forschungsverbund Sonnenenergie.