



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Konrad Wienand

# **Konzeptionierung eines ökonomisch geregelten Brennstoffzellenhybridversuchsstand**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Konrad Wienand**

**Konzeptionierung eines ökonomisch  
geregelten  
Brennstoffzellenhybridversuchsstand**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau – Energie- und Anlagensysteme  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Achim Schmidt  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Alexander von Stryk

Abgabedatum: 29.03.2023

# **Zusammenfassung**

**Konrad Wienand**

## **Thema der Bachelorthesis**

Konzeptionierung eines ökonomisch geregelten Brennstoffzellenhybridversuchsstand

## **Stichworte**

Brennstoffzelle, Energiespeicher, fiktive Kosten, Hybridsystem, Degradation, Entwicklung

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Bachelorarbeit beschreibt die Entwicklung eines Konzepts für einen ökonomisch geregelten Brennstoffzellenhybridversuchsstand. Das Ziel besteht darin, die Komponenten des Versuchstandes optimal aufeinander abzustimmen, um sowohl die längste Lebensdauer als auch den höchsten Wirkungsgrad für verschiedene Leistungspunkte zu erreichen. Die Umsetzung erfolgt über eine fiktive Kosten Definition, welche die ökonomischen Aufwendungen innerhalb des Versuchstandes minimiert.

Die Arbeit beinhaltet eine detaillierte Beschreibung der Hauptkomponenten des Versuchstandes sowie eine Abbildung ihrer Funktionen innerhalb eines Programms. Dabei wird ein breites Spektrum an Degradationsmechanismen untersucht, um deren Auswirkungen und Zustände, welche diese herbei rufen zu vermeiden.

Die Konzeptentwicklung erfolgt mithilfe von Methoden der theoretischen Informatik. Entsprechende Grafiken und Diagramme illustrieren das entwickelte Konzept, welches als Grundlage für die weitere Entwicklung eines Programmablaufs für die Simulation und Regelung des Versuchstandes dient. Diese Arbeit trägt dazu bei, ein besseres Verständnis für die Integration von Brennstoffzellenhybridversuchsständen zu entwickeln und liefert wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Forschungen auf diesem Gebiet.

## **Name of Student**

## **Title of the paper**

Design of an economically regulated fuel cell hybrid test stand

## **Keywords**

Fuel cell, energy storage, fictitious costs, hybrid system, degradation, development

## **Abstract**

This bachelor's thesis describes the development of a concept for an economically regulated fuel cell hybrid test bench. The aim is to optimize the components of the test bench to achieve both the longest possible lifespan and the highest efficiency for different power points. The implementation is based on a fictional cost definition that minimizes economic expenses within the test bench.

The work includes a detailed description of the main components of the test bench as well as a representation of their functions within a program. A wide range of degradation mechanisms are investigated to avoid their effects and states that cause them.

The concept development is carried out using methods of theoretical computer science. Appropriate graphics and diagrams illustrate the developed concept, which serves as the basis for further development of a program sequence for the simulation and regulation of the test bench. This work contributes to a better understanding of the integration of fuel cell hybrid test benches and provides valuable insights for future research in this field.

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	V
Symbolverzeichnis .....	V
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	VIII
1 Einleitung .....	1
2 Grundlagen und technischer Hintergrund.....	2
2.1 Hybridsysteme.....	2
2.1.1 Hybridisierungsarten.....	2
2.2 Kopplungsarten von Brennstoffzelle und Energiespeicher .....	2
2.2.1 Direkte Kopplung .....	3
2.2.2 Indirekte Kopplung.....	3
2.3 Versuchsaufbau und Komponenten.....	3
2.4 Brennstoffzelle.....	4
2.4.1 PEM-Brennstoffzelle .....	5
2.5 Energie Speicher .....	7
2.5.1 Elektrochemische Energiespeicher.....	8
2.5.2 Kondensatoren .....	9
2.6 DC/DC-Wandler.....	10
2.7 Elektrische Leitungen und Schalter.....	11
2.8 Regelung .....	12
2.9 Messeinrichtungen.....	13
3 Methoden der theoretischen Informatik zur Modellentwicklung .....	15
3.1 Schritte der Softwareentwicklung.....	15
3.1.1 Requirement-Engineering.....	15
3.1.2 Systemanalyse .....	16
3.1.3 Machbarkeitsanalyse .....	16
3.1.4 Systementwurf.....	16
3.2 Strukturierte Analyse .....	16
3.2.1 Entitäten und Attribute .....	17
4 Analyse des Problembereichs.....	19
4.1 Aufstellung der Requirements.....	19
4.2 Analyse des Versuchsaufbaus.....	20
4.2.1 Komponenten Charakteristik.....	21
4.2.2 Mögliche Einflussfaktoren auf das System.....	23
4.3 Untersuchung von Alterung- und Temperaturverhalten.....	23
4.3.1 Degradation Brennstoffzelle.....	24
4.3.2 Degradation von Batteriespeichern.....	26

4.4	Notwendigkeit eines Managementsystems .....	29
5	Konzeptionierung der Lösungsansätze .....	31
5.1	Formulierung der Einflussfaktoren für eine Programmanwendung.....	31
5.2	Erweiterung der Komponenten .....	32
5.3	Möglicher Programmablauf.....	34
5.4	Modularer Aufbau .....	35
5.5	Datenbank .....	37
6	Konzeptentwicklung anhand fiktiver Kosten .....	37
6.1	Regelung und Management über fiktive Kosten.....	38
6.2	Kostenverläufe der Brennstoffzelle .....	39
6.2.1	Wirkungsgrad-Leistungsverlauf der BSZ.....	39
6.2.2	Reduktionsfaktor - Leistungsverlauf der BSZ.....	40
6.2.3	Reduktionsfaktor - Temperaturverlauf der BSZ.....	41
6.2.4	Reduktionsfaktor-Lastwechselerlauf der BSZ.....	42
6.3	Bildung der Kosten aus Reduktionsfaktor und Wirkungsgrad.....	42
6.4	Kostenverläufe des Energiespeichers.....	44
6.4.1	Reduktionsfaktor - Leistungsverlauf des E-Speichers .....	44
6.4.2	Reduktionsfaktor - Temperaturverlauf des E-Speichers.....	45
6.4.3	Wirkungsgrad-Leistung-Verlauf ES.....	46
6.4.4	Einfluss des SOC auf Kosten des Speichers .....	46
6.5	Ermittlung des Optimums.....	48
6.6	Ausschnitte eines möglichen Programmaufbaus .....	49
7	Zusammenfassung .....	52
8	Bewertung und Ausblick .....	53
	Literaturverzeichnis.....	54
	Anhang A. Datenblätter.....	56
	Anhang B. Lastenheft .....	63
	Anhang C. Ablaufdiagramm .....	68

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
Al	Aluminium
BMS	Batterie-Management-System
BSZ	Brennstoffzelle
BW	Betriebsweise
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cu	Kupfer
DC	Direct-Current
DOD	Depth-Of-Discharge
ERD	Entity-Relationship-Diagramm
ERM	Entity-Relationship-Modell
ES	Energiespeicher
FCCU	Fuel-Cell-Controll-Unit
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
Li	Lithium
LID	Lithiumionenbatterie
MEA	Membran-Elektroden-Einheit
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PEM	Proton-Exchange-Membrane
SEI	Solid-Electrolyte-Interphase
SOA	Safe-Operating-Area
SOC	State-Of-Charge

## Symbolverzeichnis

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
$A$	Oberfläche der Komponente
$E^0$	Reversible Zellspannung
$E^{Anode}$	Elektrodenpotential Anode
$E^{Kathode}$	Elektrodenpotential Kathode
$F_{Anschaffung}$	Faktor der Anschaffungskosten
$F_{Lebensdauer}$	Faktor der Lebensdauer
$I$	Elektrischer Strom
$K_{Energie}$	Kosten der zugeführten Energie
$K_{fiktiv}$	Fiktive Kosten
$P$	Leistung
$P_{el}$	Elektrische Leistung
$P_{therm}$	Thermische Leistung

$Q$	Elektrische Ladung
$R_i$	Innenwiderstand
$T$	Temperatur
$\Delta T$	Temperaturdifferenz
$U$	Elektrische Spannung
$\Phi$	Wärmestrom
$\Phi_{in}$	Eingehender Wärmestrom
$\Phi_{out}$	Ausgehender Wärmestrom
$c$	Spezifische Wärmekapazität
$m$	Masse
$n$	Ladungsträgerkonzentration
$t$	Zeit
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\eta$	Wirkungsgrad
$\eta_{komponente}$	Wirkungsgrad der Komponente
$\eta_{optimal}$	Optimaler Wirkungsgrad
$\mu$	Ladungsträgerbeweglichkeit
$\sigma$	Elektrische Leitfähigkeit

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Direkte Kopplung von BSZ und ES.....	3
Abbildung 2: Indirekte Kopplung von BSZ und ES .....	3
Abbildung 3: Möglicher Versuchsaufbau mit den wesentlichen Komponenten .....	4
Abbildung 4: Entwicklungslinien der Brennstoffzellentechnik .....	5
Abbildung 5: Funktion PEM Schema.....	6
Abbildung 6: Strom/Spannungskennlinie einer PEM-Brennstoffzelle.....	6
Abbildung 7: Normierte Leistungskennlinie einer PEM-Brennstoffzelle .....	7
Abbildung 8: Funktionsschema einer Batterie .....	8
Abbildung 9: Ragone-Diagramm.....	9
Abbildung 10: Aufbau eines Plattenkondensators .....	9
Abbildung 11: a) Kondensator mit Dielektrikum b) Superkondensator dielektrische Schicht – Elektrolyt - dielektrische Schicht .....	10
Abbildung 12: DC/DC-Wandler Schema .....	11
Abbildung 13: Leitfähigkeit einiger Metalle .....	11
Abbildung 14: Wirkungsplan eines geregelten Systems.....	12
Abbildung 15: Funktionsaufbau eines digitalen Thermometers .....	13
Abbildung 16: Heiß- und Kaltleiter und deren Widerstandsabhängigkeit .....	14
Abbildung 17: Grafische Symbole der Strukturierten Analyse .....	17
Abbildung 18: Symbole ERM .....	18
Abbildung 19: Datenfluss der Hauptkomponenten .....	20
Abbildung 20: Erweiterter Versuchsaufbaus und Darstellung der Funktionen .....	21
Abbildung 21: Auszug aus Produktdatenblatt einer PEM-Brennstoffzelle.....	22
Abbildung 22: Kennlinien einer 100W PEM-Brennstoffzelle .....	22
Abbildung 23: Komponenten der Brennstoffzelle .....	25
Abbildung 24: Aufbau einer LIB mit den verwendeten Komponenten.....	27
Abbildung 25: Angaben der möglichen Zyklen Anzahl bei unterschiedlichen Entladetiefen..	28
Abbildung 26: Bereichsgrenzen und Arbeitsbereich für ein BMS .....	30
Abbildung 27: Einflussfaktoren und deren Funktionaler Aufbau. ....	31
Abbildung 28: Hardwarekomponenten und deren Eigenschaften sowie auf sie wirkende Einflüsse.....	33
Abbildung 29: Virtuelle Komponenten und ihre Funktionen.....	33
Abbildung 30: Wirkungsgrade von BSZ .....	39
Abbildung 31: Verlauf der fiktiven Kosten bei steigender Leistung. ....	40
Abbildung 32: Verlauf der fiktiven Kosten in Abhängigkeit der Temperatur .....	41
Abbildung 33:Fiktiver Kostenverlauf der BSZ bei auftretenden Lastsprüngen. ....	42
Abbildung 34: Kostenverläufe des Reduktionsfaktors sowie eines Energiemehrverbrauchs und der Kombination beider für eine BSZ. ....	43
Abbildung 35: Verlauf der fiktiven Kosten eines Energiespeichers zur Leistung.....	44
Abbildung 36: Fiktive Kosten des Energiespeichers in Abhängigkeit der Temperatur. ....	45
Abbildung 37: Verlauf des Wirkungsgrades eines ES in Abhängigkeit der Leistung.....	46
Abbildung 38: Einfluss des SOC auf den Kostenverlauf bei Lade- und Entladeleistung. ....	47
Abbildung 39: Kosten/Leistungsverlauf in Abhängigkeit des SOC, die Kosten können negativ werden, wenn der Speicher unbedingt geladen werden sollte.....	47
Abbildung 40: Gegenüberstellung der Kosten von BSZ und E-Speicher und Auswahl eines Optimums. ....	48
Abbildung 41: ERD von Brennstoffzelle und Energiespeicher zu der Leistungsbestimmung über die Kosten.....	50
Abbildung 42: ERD der Wärmeentwicklung eines Objektes. ....	51
Abbildung 43: Datenblatt einer PEM-Brennstoffzelle von balticFuelCells GmbH.....	56
Abbildung 44: Datenblattauszug einer Bleisäure-Batterie Teil1 .....	57



Abbildung 45: Datenblattauszug einer Bleisäure-Batterie Teil2.....	58
Abbildung 46: Datenblattauszug eines DC/DC-Wandlers Teil1 .....	59
Abbildung 47: Datenblattauszug eines DC/DC-Wandlers Teil2 .....	60
Abbildung 48: Datenblattauszug eines Superkondensators Teil1 .....	61
Abbildung 49: Datenblattauszug eines Superkondensators Teil2.....	62
Abbildung 50: Ablaufdiagramm des Versuchsstandes mit Ja / Nein Entscheidungen.....	68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Alterungseinflüsse auf LIB.....	27
Tabelle 2: Aufbau der Objekte als Entitäten mit verschiedenen Attributs-Typen.....	36
Tabelle 3: Übersicht über mögliche Komponentenkosten, der Lebenserwartung und deren Verhältnissen.....	38

# 1 Einleitung

Eine ständige und ausreichende Verfügbarkeit von elektrischer Energie ist für unser alltägliches Leben unabdingbar geworden. Es gilt also, den andauernden Energiebedarf ausreichend zu decken. Diese Energie wird größtenteils über Stromnetzwerke dem Verbraucher bis zur Steckdose geliefert. Jedoch ist auch eine Versorgungssicherheit außerhalb dieser Netzwerke für diverse Anwendungen mittlerweile ein fester Bestandteil des alltäglichen Lebens. In Mobiltelefonen, Laptops und diversen weiteren Elektrogeräten kommen elektrochemische Energiespeicher zum Einsatz. Die Nachfrage nach immer effizienteren und größeren Energiespeichern stellt eine der großen technischen Herausforderungen der heutigen Zeit dar. Die Verwendung eines Hybrid-Systems aus Brennstoffzelle und Batterie vereint zwei vielversprechende Technologien zur mobilen Bereitstellung von elektrischer Energie. Hierbei ergänzen sich die Vorzüge der einzelnen Techniken und reduzieren in Kombination deutlich die Nachteile, welche die Systeme als einzelne aufweisen. Solch ein System ist gerade für die mobile Anwendung geeignet.

Im Institut für erneuerbare Energien und energieeffiziente Anlagen der HAW-Hamburg ist die Realisierung eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybridversuchsstands geplant. Dabei wird eine Brennstoffzelle in Kombination mit einer Batterie durch einen Verbraucher elektrisch belastet. Der entstehende Versuchsstand soll Studierenden das Wissen und den Umgang mit dieser Technik vermitteln. Des Weiteren soll er als Versuchsstand für anknüpfende Projekte und Laborpraktika Verwendung finden.

Aufbauend auf der Studienarbeit von Ronja Müller und Björn Falkenhain mit dem Titel „Entwicklung eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybridversuchs“ sowie der Studienarbeit von Marieke Andersson ist als nächster wesentlicher Schritt ein Regelungskonzept auszuarbeiten und dieses als Regelungssoftware für den Versuchsstand bereitzustellen. Das Ziel dieser Arbeit ist die Konzeptionierung einer möglichen Programmanwendung, die die Regelung eines solchen Versuchsaufbaus übernehmen kann.

Um eine Auswahl möglicher Komponenten treffen zu können, sollen diese innerhalb der zu entwickelnden Programmanwendung als Simulationsansatz hinterlegt werden. Das zu erstellende Konzept berücksichtigt daher eine Implementierung dieser Komponenten als Funktionsmodelle innerhalb der Anwendung. Spätere Schnittstellen zu realen Komponenten des Versuchsstands sowie dessen Regelung sollen möglich sein.

Um ein Grundverständnis für die Komponenten zu erlangen, erfolgt zunächst ein Einblick in den technischen Hintergrund dieser. Es werden mögliche Komponenten aufgeführt und beschrieben. Anhand von Methoden der theoretischen Informatik erfolgt eine Analyse der zu entwickelnden Programmanforderungen. Hierfür werden Problemstellungen der Betriebsweisen von Brennstoffzelle und Energiespeicher genauer untersucht. Anschließend werden Modelle entwickelt, die die aufgeführten Komponenten beschreiben.

Durch die Definition fiktiver Kosten wird die Betriebsdauer der Komponenten bestimmt. Hierbei wird ein besonderer Fokus auf die Reduktion von Degradationsmechanismen gelegt, welche die Lebensdauer der Komponenten verringern könnten. Die ökonomische Optimierung der Betriebsdauer der Komponenten erfolgt durch die Einbeziehung der fiktiven Kosten in die Entscheidungsfindung des Programms.

Das Konzept beschreibt einen Programmaufbau, der als Grundlage für die weitere Entwicklung der Regelung und Abbildung des Versuchsstands dient.

## 2 Grundlagen und technischer Hintergrund

Um eine Versuchsanordnung aus Brennstoffzelle und Energiespeicher zu erstellen, sind verschiedene Komponenten erforderlich. Es gibt auch verschiedene Möglichkeiten, wie diese Komponenten miteinander verbunden werden können. Um ein besseres Verständnis für Brennstoffzellen, Speicherarten und weitere Komponenten zu erhalten, werden in diesem Kapitel die wesentlichen Funktionen und der Aufbau der einzelnen Komponenten näher beschrieben.

### 2.1 Hybridsysteme

Der Begriff Hybrid stammt aus dem Lateinischen und leitet sich vom Wort „hibrida“ ab, was so viel wie Mischling bedeutet. Im technischen Zusammenhang wird unter einem Hybridsystem eine Kombination zweier oder mehrerer unterschiedlicher Systeme zu einem Gesamtsystem verstanden. Hierbei kommen verschiedene Techniken zum Einsatz, welche im Zusammenspiel die Vor- und Nachteile des jeweils anderen Systems ausgleichen können [1]. Durch die Verbreitung von sogenannten Hybridautos ist der Begriff mittlerweile geläufig geworden. Bei diesen wird in der Regel ein Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor kombiniert. In dem hier untersuchten Hybridsystem wird eine Brennstoffzelle mit einem elektrischen Energiespeicher gekoppelt.

#### 2.1.1 Hybridisierungsarten

Um die beiden Komponenten aus Brennstoffzelle und Energiespeicher miteinander zu verbinden, gibt es verschiedene Möglichkeiten. In der Antriebstechnik wird zwischen serieller und paralleler Hybridisierung unterschieden. Der Unterschied besteht in der Art der Verbindung beider Systeme. Bei der parallelen Hybridisierung wird ein mechanischer Kopplungspunkt verwendet, sodass beide Systeme über einen Motor die erbrachte Energie in kinetische Energie umwandeln und diese dann in den Antriebsstrang einspeisen. Beim seriellen Hybriden hingegen wird die Energie aus beiden Systemen über einen elektrischen Knoten eingebracht und erst dann über einen Elektromotor in kinetische Energie umgewandelt. Eine Variante, die den seriellen und den parallelen Ansatz vereint, wird als Misch-Hybrid bezeichnet. Hier kann die Energie entweder elektrisch oder direkt in den Antriebsstrang eingespeist werden. [1].

Der gewählte Versuchsaufbau besteht aus zwei rein elektrischen Systemen. Die Energieversorgung geht von der Brennstoffzelle aus, welche auch den Energiespeicher bei Bedarf lädt. Die serielle Hybridisierung wird hier vorausgesetzt, da das System so kompakt wie möglich sein soll. Vielmehr soll herausgestellt werden, wie die Systeme miteinander arbeiten.

### 2.2 Kopplungsarten von Brennstoffzelle und Energiespeicher

Die serielle Kopplung unterscheidet sich wiederum zwischen einer direkten und einer indirekten Verbindung von Brennstoffzelle und Energiespeicher. Zudem ist die Umsetzung dieser vielfältig.

## 2.2.1 Direkte Kopplung

Bei der direkten Kopplung sind Brennstoffzelle und Energiespeicher mit der Last parallelgeschaltet. Hier haben Brennstoffzelle und Energiespeicher das gleiche Spannungsniveau. Eine gezielte Leistungsabnahme über einer der beiden Komponenten ist nicht möglich, da diese an beiden direkt anfällt. So ist auch die Brennstoffzelle auftretenden Lastschwankungen ausgesetzt [1, S. 38]. In der Abbildung 1 ist die elektrische Verschaltung der direkten Kopplung abgebildet.

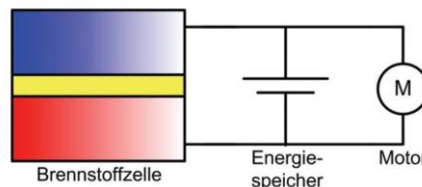


Abbildung 1: Direkte Kopplung von BSZ und ES

Quelle: [1, S. 38]

## 2.2.2 Indirekte Kopplung

Damit Brennstoffzelle und Energiespeicher auf verschiedenen Spannungsniveaus arbeiten können ist ein DC/DC-Wandler notwendig (Abbildung 2). Dieser ermöglicht zudem eine geregelte Leistungsabnahme an den Komponenten. Auch wird über den DC/DC-Wandler die Brennstoffzelle vor Lastpulsen geschützt [1, S. 38].

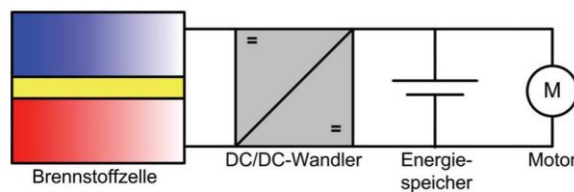


Abbildung 2: Indirekte Kopplung von BSZ und ES

Quelle: [1, S. 38]

## 2.3 Versuchsaufbau und Komponenten

Die Hauptkomponenten des Hybridversuchsstands sind mit der Brennstoffzelle und dem Energiespeicher vorgegeben. Bei Verwendung eines DC/DC-Wandlers kommt dieser als wichtiger Bestandteil hinzu. Eine anfallende Last, über welche die Leistung abgegeben wird, stellt ein weiteres Element dar. Dies kann im einfachsten Fall ein ohmscher Widerstand sein. Um die einzelnen Komponenten zu verbinden und den Stromfluss entsprechend zu leiten sind Leiter und Schalter erforderlich. Damit der Versuchsaufbau ordnungsgemäß betrieben werden kann müssen die jeweiligen Zustände über geeignete Sensoren erfasst werden. Hierzu gehören Strom und Spannungsmesser sowie Temperatursensoren. Um eine Betriebsart vorzugeben und die Laufenden Funktionen anzuzeigen ist eine Schnittstelle mit dem Betreiber des Versuchsstandes erforderlich. Hier sollte auch eine Recheneinheit bestehen, welche durch ein geeignetes Programm den Versuchsstand überwacht und regelt. Der Abbildung 3 ist eine Übersicht über die erwähnten Komponenten zu entnehmen.

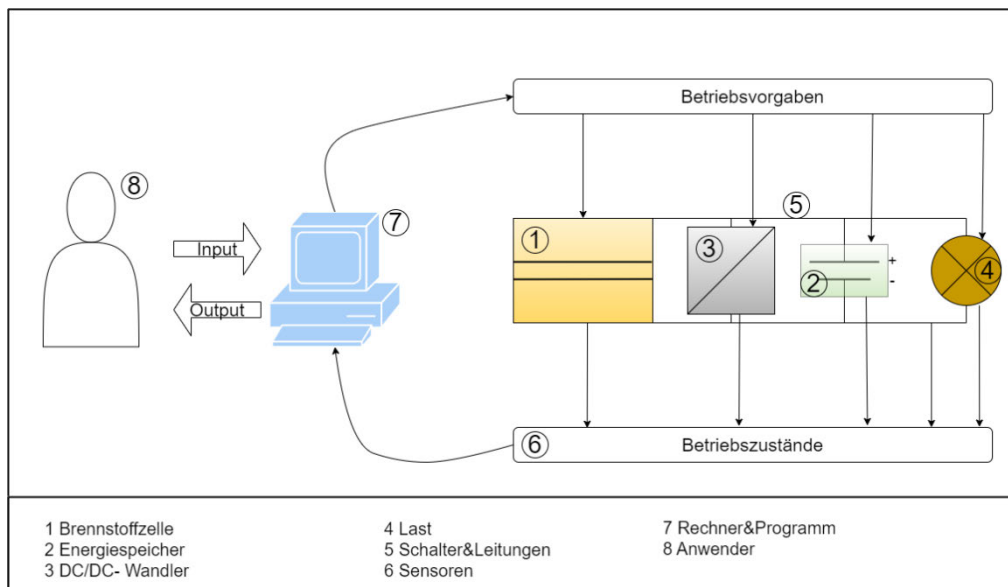


Abbildung 3: Möglicher Versuchsaufbau mit den wesentlichen Komponenten

Jedes dieser Bauteile erfüllt unterschiedliche Funktionen und hat nach Art der Ausführung unterschiedliche Eigenschaften. In den folgenden Kapiteln werden die Komponenten beschrieben.

## 2.4 Brennstoffzelle

Brennstoffzellen wandeln, anders als ihr Name vermuten lässt, einen Brennstoff nicht unter Freisetzung einer Flamme in Wärme um. Der ihr zugeführte Brennstoff, üblicherweise Wasserstoff, wird über Anode und Kathode direkt in elektrische Energie umgewandelt. Dieser Vorgang wird gemeinhin als stille oder kalte Verbrennung bezeichnet [2, S. 2]. Die Funktionsweise der Brennstoffzelle ist seit Mitte des 19. Jahrhunderts bekannt und wurde sowohl von Christian Friedrich Schönbein und Sir William Grove unabhängig voneinander untersucht und beschrieben [3, S. 25-26]. Im Vergleich zu Verbrennungsmotoren, Gasturbinen und anderen etablierten Antriebsmöglichkeiten zur Stromerzeugung weist die Brennstoffzelle einen sehr hohen Wirkungsgrad auf. Zudem wird bei der Verwendung von Wasserstoff als Energieträger kein Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) emittiert [2, S. 2].

Um dem anhaltenden Klimawandel entgegenzuwirken und die damit verbundene  $CO_2$ -Reduktion zu ermöglichen, bildet die Technologie rund um die Brennstoffzelle ein wichtiges Element. Die oben beschriebenen Vorteile machen sie für verschiedenste Anwendungen, sei es mobile Fortbewegung oder Energiespeicherung, äußerst attraktiv.

Die Entwicklung der Brennstoffzelle ist seit ihrer Einführung im 19. Jahrhundert stetig fortgeschritten. Mittlerweile lassen sich verschiedenste Brennstoffzellen Typen nach Art der Anwendung, ihres Aufbaus und dem vorgesehenen Zweck klassifizieren. In der folgenden Abbildung 4 sind die Entwicklungspfade der Brennstoffzelle aufgezeigt.

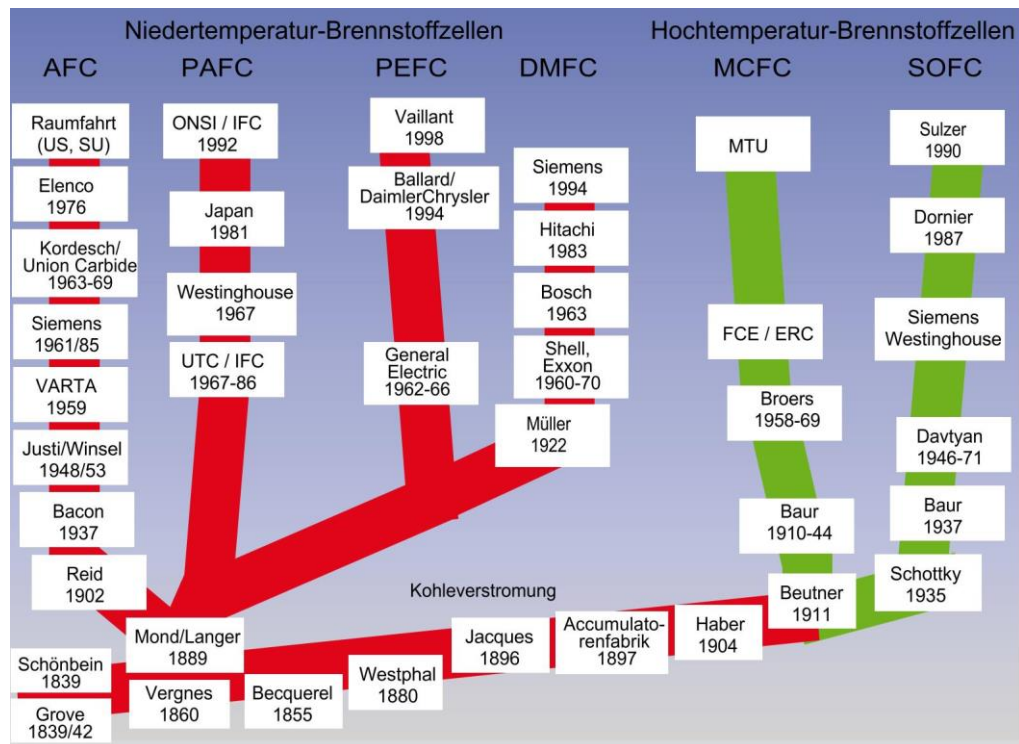


Abbildung 4: Entwicklungslinien der Brennstoffzellentechnik

Quelle: [2, S. 5]

Da diese Arbeit sich auf die Verwendung und die optimale Einbindung der Brennstoffzelle in Kombination mit einem Energiespeicher als Hybridsystem konzentriert, werden die weiteren Typen nicht im Detail erläutert. Es soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass es bei Brennstoffzellen eine große Auswahl an verschiedenen Typen gibt, die sich in Bezug auf ihre Anwendung, ihren Aufbau und ihren vorgesehenen Zweck unterscheiden.

#### 2.4.1 PEM-Brennstoffzelle

Für die weitere Konzeptentwicklung wird eine Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle) als Referenz herangezogen. Diese hat sich im Bereich der mobilen Verwendung von Brennstoffzellen durchgesetzt und kann hier durch folgende Vorteile punkten [4]:

- Hohe Stromdichte
- Gutes dynamisches Verhalten
- Luft kann auf der Kathodenseite verwendet werden
- Elektrolyt ist  $CO_2$  beständig
- Elektrolyt ist fest, es können keine aggressiven Flüssigkeiten austreten
- Einfach zu regeln
- Kurzschlussfest
- Einfache Herstellung der Zellen [2, S. 77]

Die PEM-Brennstoffzelle wird mit Wasserstoff als Brennstoff und Luft zur Oxydation betrieben. Die Reaktion aus Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) ist allgemein als Knallgasreaktion bekannt. Aus den Edukten  $H_2$  und  $O_2$  wird als Produkt Wasser  $H_2O$  gebildet. In der Brennstoffzelle verläuft die Reaktion vergleichsweise langsam unter einer geringen Temperaturentwicklung. In der Abbildung 5 wird das Funktionsprinzip vereinfacht dargestellt.

Anodenseitig wird der Brennstoff eingeführt und Kathodenseitig der Sauerstoff. Durch eine gasdichte Membran wird eine ungewollte Knallgasreaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff verhindert. Durch die auftretende Elektrodenverschiebung kann an der Brennstoffzelle eine Last angelegt werden [3, S. 30].

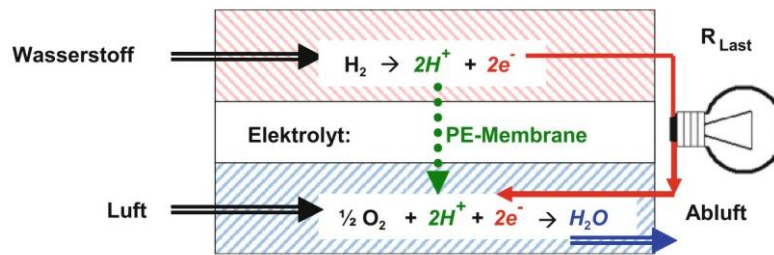


Abbildung 5: Funktion PEM Schema

Quelle: [3, S. 31]

Die Zellspannung zwischen Anode und Kathode wird durch folgende Gleichung beschrieben. Hierbei ist  $E^0$  die reversible Zellspannung.  $E_{Kathode}^0$  sowie  $E_{Anode}^0$  sind die jeweiligen Elektrodenpotentiale.

$$E^0 = E_{Kathode}^0 - E_{Anode}^0$$

Zwischen den Reaktionspartnern Wasserstoff und Sauerstoff beträgt die reversible Leerlaufspannung an den Elektroden 1,23 V, welche dem unteren Heizwert des Wasserstoffes entspricht. Dieser Wert wird in der Praxis jedoch nicht erreicht. Grund dafür sind Aktivierungsverluste an den Elektroden. Die tatsächlich Leerlaufspannung liegt bei etwa 0,9 bis 1,0 V. Bei einer Stromabnahme wird dieser Wert aufgrund von ohmschen Verlusten weiter reduziert. In der Abbildung 6 ist die Spannungscharakteristik einer PEM-Brennstoffzelle abgebildet. Sie zeigt eine lineare Abnahme der Zellspannung bei ansteigender Stromstärke. Ist der Nennstrom der Zelle überschritten bricht die Zellspannung zusammen, Grund dafür ist ein Gasmangel an den Elektroden. Tritt dieser Fall ein steigt die Wärmeentwicklung quadratisch an. Daher sollte die Zelle vor Erreichen des überlast Bereiches abgeschaltet werden [3, S. 34-35].

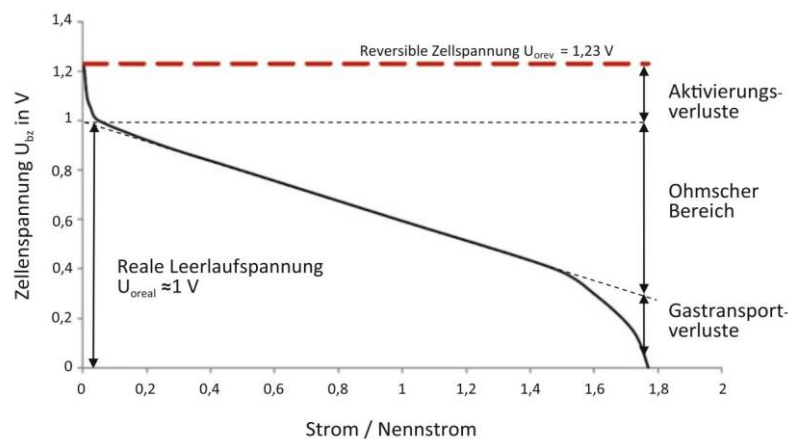


Abbildung 6: Strom/Spannungskennlinie einer PEM-Brennstoffzelle

Quelle: [3, S. 34]

Um ein gewünschtes Spannungsniveau zu erreichen ist also eine Vielzahl an Zellen notwendig. Diese werden wie bei dem Aufbau von Batterien in Reihe geschaltet. Hierbei addieren sich die einzelnen Zellspannung zur Gesamtspannung. In dem Fall wird von einem Zellen-Stack gesprochen. Für einen Stack mit n-Zellen ist also die Zelleneinzelspannung mit

der Anzahl  $n$  zu multiplizieren. Für einen Stack von 10 Zellen ergibt sich demnach bei einer Zellspannung von  $1,23\text{ V}$  eine gesamt Spannung von  $12,3\text{ V}$  [3, S. 36].

Über die maximale Leerlaufspannung der Zelle lässt sich auch der jeweilige Wirkungsgrad ableiten. So ist aus der Abbildung 7 zu erkennen, dass die elektrische Leistung abnimmt, demnach sinkt auch der Wirkungsgrad. Dies hat eine Zunahme der thermischen Leistung zu folge. Daher bildet die  $U/I$ -Spannungskennlinie gleichfalls die Wirkungsgradkennlinie der Zelle. In Abbildung 7 ist dieser Zusammenhang verdeutlicht.

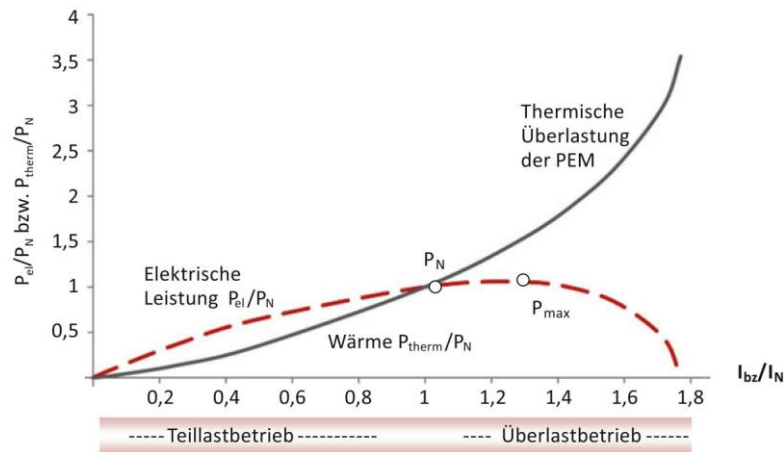


Abbildung 7: Normierte Leistungskennlinie einer PEM-Brennstoffzelle

Quelle: [3, S. 37]

Es wird ersichtlich, dass sobald der Leistungsbereich der Zelle überschritten wird, die abrufbare elektrische Leistung  $P_{el}$  stark abfällt, die thermische Leistung  $P_{therm}$  nimmt hingegen stark zu. Diese Erkenntnis gibt den Arbeitsbereich der Brennstoffzelle vor. Der Bereich, in dem die Thermische Überlast exponentiell ansteigt, sollte im Betrieb der Zelle möglichst vermieden werden. Diese Kennlinien sind auf eine PEM-Brennstoffzelle bezogen. Verläufe anderer Brennstoffzellen sind ähnlich mit dem gleichen Zusammenhang. Die Starke Thermische Leistung führt zudem zu einem Temperaturanstieg in der Zelle, der die Zelle weiter schädigen kann. Der Zusammenhang wird im Kapitel der Degradation von BSZ weiter ausgeführt.

## 2.5 Energie Speicher

Der Energiespeicher ist neben dem Energieerzeuger eine weitere Hauptkomponente in der Konzeptentwicklung des Versuchsstandes. Dieser soll bei Bedarf ebenfalls seine gespeicherte Energie zur Verfügung stellen oder Energie aufnehmen können. Da es sich bei der zu speichernden Energie um rein elektrische Energie handelt, kommen auch nur elektrische Energiespeicher in Betracht. Der bekannteste Vertreter dieser Art ist die galvanische Zelle gemein als Batterie bekannt. Hierbei handelt es sich um einen elektrochemischen Energiespeicher, der chemische Energie in elektrische wandelt und umgekehrt [5]. Es ist anzumerken dass auch die Brennstoffzelle in Verbindung mit einem Brennstofftank einen Energiespeicher darstellt.

Die folgenden unter Kapitel bilden eine Übersicht über einige elektrische Energiespeicher und deren Eigenschaften.



## 2.5.1 Elektrochemische Energiespeicher

Batterien und Akkumulatoren werden den elektrochemischen Speichern zugeordnet. Die zugeführte Energie wird als chemische Verbindung gespeichert. Diese werden weiter unterteilt in primär Batterien, welche nur einmal zu entladen sind und Sekundärbatterien, welche wiederholte Lade- und Entladezyklen erlauben. Die Sekundärbatterien auch unter dem Begriff Akkumulator bekannt werden in weitere Kategorien unterteilt [6, S. 36]:

- Niedertemperaturbatterien (Blei, Nickel, Lithium)
- Hochtemperaturbatterien (Schwefel-Natrium)
- Redox-Flow-Batterien (Vanadium)

Diese Speicher sind alle ähnlich aufgebaut und verfügen über Elektroden, die mit einem Elektrolyten als Ionen Leiter miteinander verbunden sind (Abbildung 8). Durch den Ablauf von chemischen Reaktionen kann die Energie gewandelt und entweder aufgenommen oder abgegeben werden. Beim Ablauf dieser Reaktionen werden elektrische Ladungen übertragen [6, S. 191].

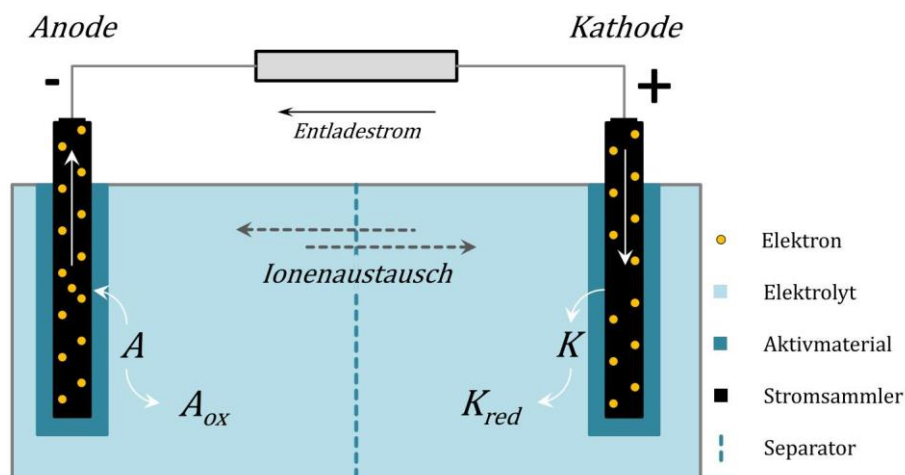


Abbildung 8: Funktionsschema einer Batterie

Quelle: [7, S. 26]

Auf die genaueren chemischen Hintergründe wird hier nicht weiter eingegangen, vielmehr ist die Charakteristika der jeweiligen Speicher interessant und wird näher beschrieben.

Die Speicherauswahl innerhalb eines Systems ist oftmals durch folgende Kriterien bestimmt [7, S. 27]:

- Art der Technologie
- Energiedichte
- Leistungsdichte
- Lebensdauer
- Sicherheit
- Entwicklungsstand
- Investitionskosten
- Gesetzgebung und Politik

In einem Ragone-Diagramm lässt sich die Energiedichte der Leistungsdichte gut gegenüberstellen. Ein solches Diagramm (Abbildung 9) zeigt gängige elektrische Speicher so dargestellt. Die spezifische Leistung und Energie bestimmen sich hierbei aus der angegebenen Leistung sowie Energie des Speichers geteilt durch dessen Masse.

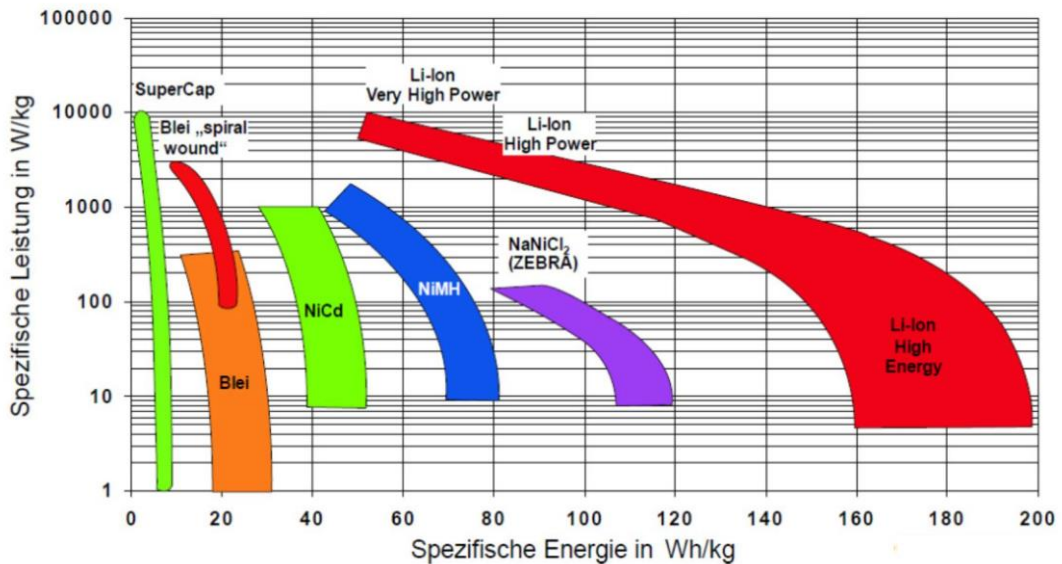


Abbildung 9: Ragone-Diagramm

Quelle: [7, S. 12]

Sind die begrenzenden Faktoren eine Speicherart bekannt, kann dem entsprechend, für ein System, die Speicherauswahl erfolgen.

### 2.5.2 Kondensatoren

Soll die zugeführte Energie in Reinform gespeichert werden, ist dies unter der Verwendung von Kondensatoren möglich [6, S. 36].

Dies geschieht durch den Aufbau eines elektrischen Feldes zwischen zwei gegenüberliegende Elektroden, welche durch ein Dielektrikum getrennt sind. Legt man nun an dem Kondensator eine Spannung an, nimmt die eine Elektrode negative Ladungsträger auf und die andere positive. Die gespeicherte Ladung wird durch die Kapazität ausgedrückt. Die Kapazität eines Kondensators nimmt mit der Elektrodenoberfläche zu und mit steigendem Elektrodenabstand ab [6, S. 167]. Ein vereinfachter Aufbau eines Plattenkondensators ist in Abbildung 10 zu sehen. Über einer Spannungsquelle bei geschlossenem Schalter wird der Kondensator geladen. Öffnet sich der Schalter wieder, bleibt diese Ladung zwischen den Kondensatorplatten erhalten.

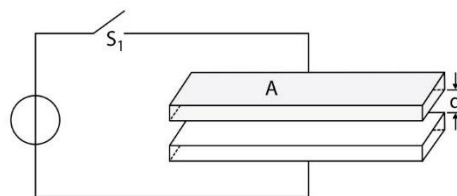


Abbildung 10: Aufbau eines Plattenkondensators

Quelle: [6, S. 166]

Eine Abwandlung des Kondensators stellt der Doppelschichtkondensator oder auch Superkondensator dar. Durch gezielte Auswahl eines entsprechenden Dielektrikums wird der Effekt der Helmholtz-Doppelschicht angewandt. Hierbei sind die Elektroden in einer wässrigen Lösung, Elektrolyten, getaucht. Dies führt zu einer Aufnahme oder Abgabe von Elektronen, der Elektrode an die Lösung. Durch Hydratation, das Umhüllen der Elektronen mit

Wassermolekülen, wird der angestrebte Spannungspotenzialausgleich der Teilchen verhindert. Dieser Effekt verstärkt die Kapazität eines Kondensators erheblich. [6, S. 167].

In der Abbildung 11 wird der Aufbau eines Plattenkondensators im Vergleich zu einem Superkondensator gezeigt.

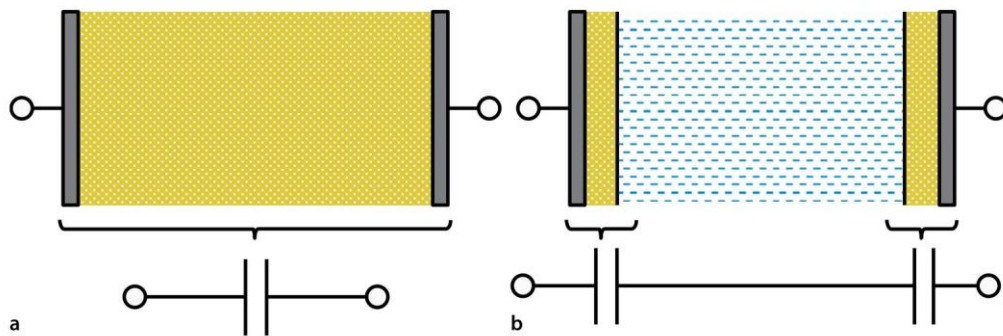


Abbildung 11: a) Kondensator mit Dielektrikum b) Superkondensator dielektrische Schicht – Elektrolyt - dielektrische Schicht

Quelle: [6, S. 167]

Um die Oberfläche eines Kondensators oder Superkondensators zu maximieren, werden diese in mehrlagigen Schichten aufgebaut. Oftmals wird dies durch das Aufrollen der vielen Schichten zu einem Zylinder ermöglicht. Daher auch die prägnante Erscheinungsform von Kondensatoren [6, S. 169].

## 2.6 DC/DC-Wandler

Ein Gleichstrom-Wandler oder auch Konverter (DC-Wandler) ist eine elektrische Schaltung, die es ermöglicht, einen Gleichstrom in einen anderen Gleichstrom zu überführen. Dabei wird durch Öffnen und Schließen eines Schaltelements (S) die am Eingang anliegende Gleichspannung in eine rechteckige Wechselspannung umgewandelt. Diese wird durch Kondensatoren (C) und Spulen (L) gefiltert und zurück in eine Gleichspannung gewandelt. Eine Diode verhindert einen Rückfluss des Stroms (D). Dabei können die Spannungsniveaus von Eingang und Ausgang unterschiedlich sein, und das Verhältnis von Eingangs- zur Ausgangsspannung wird durch den Pulsbreitenfaktor definiert [8]. Der Aufbau ist in Abbildung 12 dargestellt.

Die Topologie der DC/DC-Wandler wird durch den Aufbau des Schaltkreises bestimmt. Schalter, Spulen und Kondensatoren können je nach Anordnung und Anregung ganz unterschiedlich sein und sich in ihrer Funktion unterscheiden. Die bekanntesten Vertreter für Strukturen der ersten Ordnung lauten wie folgt [9, S. 942-957]:

- Buck-Konverter (Tiefsetzsteller), hier ist die mittlere Ausgangsspannung kleiner als die Eingangsspannung.
- Boost-Konverter (Hochsetzsteller), die mittlere Ausgangsspannung ist größer als die Eingangsspannung.
- Buck-Boost-Konverter (Spannungsinverter), die Ausgangsspannung kann sowohl kleiner als auch größer als die Eingangsspannung sein.

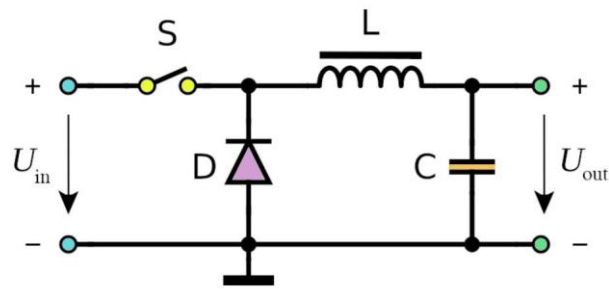


Abbildung 12: DC/DC-Wandler Schema

Quelle: [10]

DC/DC-Wandler besitzen gegenüber linearen Spannungsreglern einen deutlich höheren Wirkungsgrad, da sie verlustarmer arbeiten.

## 2.7 Elektrische Leitungen und Schalter

Um einen Stromkreis herzustellen und die verschiedenen Bauteile einzubinden, bedarf es elektrischer Leiter. Die Auswahl eines geeigneten Materials hängt zum großen Teil von dessen elektrischen Eigenschaften ab. Der Fokus liegt hierbei auf einer guten elektrischen Leitfähigkeit. Wird ein Leiter von Strom durchflossen wird ein Teil der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt. Dieser Anteil ist umso größer, je schlechter die Leitereigenschaften sind.

Die Leitfähigkeit  $\sigma$  eines Materials ist über die Ladungsträgerkonzentration  $n$ , die Elementarladung  $e$  und die Ladungsträgerbeweglichkeit  $\mu$  definiert. Es gilt [11, S. 31]:

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu$$

Da Metalle sehr gute elektrische Leiter sind, finden sie als solche häufige Verwendung. Insbesondere Kupfer wird aufgrund seiner sehr guten Leitfähigkeiten und den deutlich geringeren Materialkosten gegenüber Silber und Gold in fast allen Gebieten verbaut. Eisen hingegen hat im Vergleich, siehe Abbildung 13, eine deutlich schlechtere Leitfähigkeit.

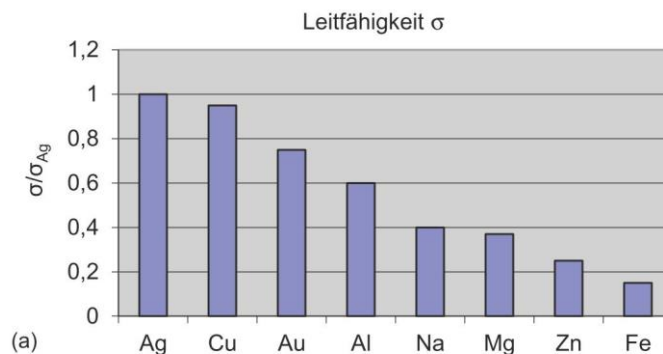


Abbildung 13: Leitfähigkeit einiger Metalle

Quelle: [11, S. 39]

Wichtige Eigenschaften bei der Leiterauswahl sind:

- Leitfähigkeit
- Materialkosten
- Formbarkeit

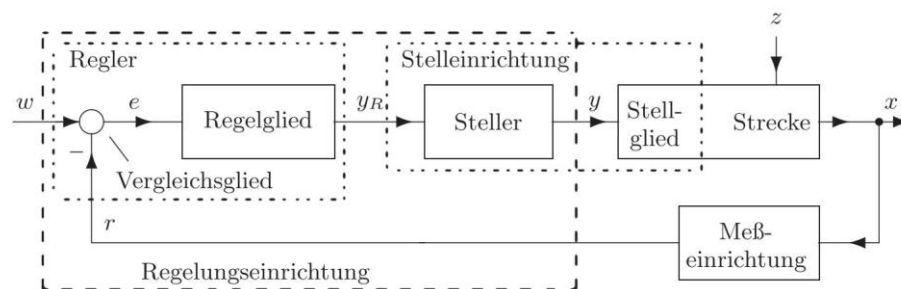
Eine elektrische Leitung wird in der Regel isoliert, um Fehlerströme zu vermeiden. Bei der Wahl des Isolators wird eine entsprechend schlechte Leitfähigkeit angestrebt. So kommen hier beispielsweise Kunststoffe, Gummi oder Keramik zum Einsatz.

Gleiches gilt bei der Materialauswahl für Schalter. Die Aufgabe von Schaltern ist es, Stromkreise zu schließen oder zu öffnen. Über einen Signaleingang verrichtet ein entsprechendes Stellglied diese Aufgabe.

## 2.8 Regelung

Die Regelungstechnik ist ein wichtiger Bestandteil des technologischen Fortschritts und findet darüber hinaus in vielen weiteren Gebieten Anwendung. Grundsätzlich ist eine Regelung für den stetigen Betrieb eines Systems verantwortlich und übernimmt die Aufgabe, das System entsprechend seines Zwecks zu betreiben [12, S. 4]. Die Regelung unterscheidet sich von der Steuerung durch eine kontinuierliche Überwachung der Regelgrößen und die damit verbundene Möglichkeit, auf Störeinflüsse zu reagieren [13, S. 12]. Ein Hauptproblem bei der Prozessregelung besteht darin, dass die meisten Systeme und deren Prozessgrößen zeitabhängig sind. Ein Eingriff erfolgt also nicht unmittelbar, sondern mit einem zeitlichen Versatz. Daraus resultiert eine Dynamik des Regelungsprozesses. So kann es im Regelungsverhalten zu Überreaktionen bis hin zur Instabilität kommen. Ein solches System kann außer Kontrolle geraten und unbrauchbar werden [14, S. 2].

In Abbildung 14 ist der Aufbau eines Regelkreises veranschaulicht. Zunächst wird dem System die Führungsgröße  $w$  zugeführt. In dem Knotenpunkt bildet sie mit der Rückführgröße  $r$  die Regeldifferenz. Diese Regeldifferenz ist das Signal für den Regler, der Einfluss auf den Steller nimmt. Daraus resultiert die Stellgröße  $y$ , die den Steller einstellt. Störgrößen werden mit dem Buchstaben  $z$  gekennzeichnet und wirken auf die Regelstrecke. An einem weiteren Knotenpunkt verlässt die Regelgröße  $x$  den Regelkreis. Über eine Messeinrichtung wird dieser Wert erfasst und als Rückführgröße  $r$  dem ersten Knotenpunkt zurückgeführt. Der Kreislauf beginnt erneut [12, S. 13].



$x$	Regelgröße	<i>closed-loop control variable</i>
$r$	Rückführgröße	<i>feedback variable</i>
$w$	Führungsgröße	<i>reference variable</i>
$e = w - r$	Regeldifferenz	<i>closed-loop error</i>
$y_R$	Reglerausgangsgröße	<i>closed-loop control output</i>
$y$	Stellgröße	<i>manipulated variable</i>
$z$	Störgröße	<i>disturbance variable</i>

Abbildung 14: Wirkungsplan eines geregelten Systems

Quelle: [12, S. 13]

Das Konzept des Regelungskreises ist abstrakt aufgebaut und auf ganz verschiedene Systeme anwendbar. Wichtig ist, dass ein technisches System, welches in einem bestimmten Arbeitsbereich betrieben werden soll, eine entsprechende Regeleinrichtung aufweist. Ohne

geeignete Messeinrichtung ist der Regelkreis „blind“ und kann keine Regeldifferenz bilden. Messeinrichtungen und Sensoren bilden die Grundlage einer jeden Regelung.

## 2.9 Messeinrichtungen

Messen beschreibt das gezielte Erfassen einer bestimmten Größe. Die Größe wird in Bezug zu einer allgemein gültigen Einheitsgröße derselben Physikalischen Dimension gesetzt und mit dieser verglichen. Sie ist also ein Vielfaches dieses Maßstabes. Um die Größe zu erfassen, benötigt es eines Messinstrumentes oder einer Messeinrichtung. Die Literatur definiert drei Voraussetzungen, welche zum Messen erfüllt sein müssen [15, S. 3]:

- Bindung an ein Zahlensystem
- Definition der Messgröße
- Bestimmung der Einheit

Zu den elektrischen Messgrößen gehören Strom, Spannung, Leistung, Widerstand sowie die Kapazität, Induktivität. Diese Größen werden erfasst und verarbeitet. Das heißt es erfolgt eine Verstärkung oder Übertragung, Linearisierung oder Digitalisierung der erfassten Größe. Das gewonnene Signal kann über eine Anzeige visualisiert und dokumentiert werden oder aber zur Regelung eines Prozesses Anwendung finden. Handelt es sich bei der zu erfassenden Größe um eine nicht-elektrische, muss diese erst mittels Sensoren in eine solche umgewandelt werden. Diese Sensoren reagieren entsprechend auf die nicht-elektrische Größe. In Abbildung 15 ist ein digitales Thermometer und dessen innerer Schaltkreis abgebildet. Der Sensor in der Spitze reagiert auf eine Temperaturerhöhung, indem sich dessen Widerstand ändert. Dies wiederum hat eine Änderung der Stromstärke zur Folge. Über diesen Zusammenhang kann die

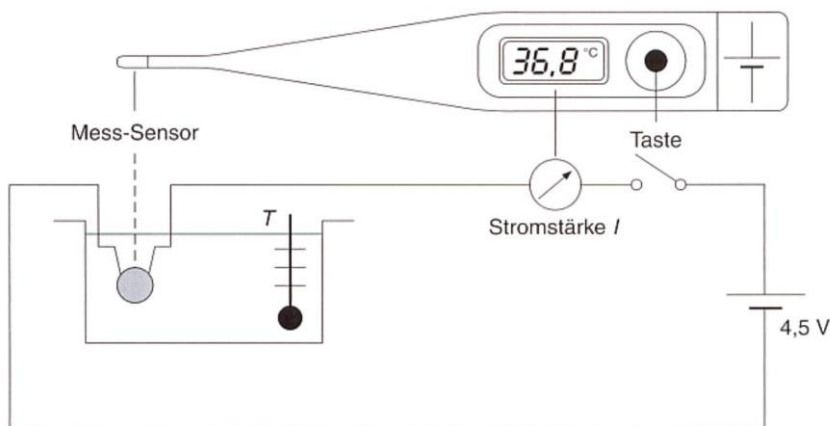


Abbildung 15: Funktionsaufbau eines digitalen Thermometers

Quelle: [16, S. 1]

Die Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur ist dem Erbauer des Thermometers bekannt. Diese Widerstände werden allgemein als Heiß- und Kaltleiter bezeichnet. In Abbildung 16 wird der Zusammenhang verdeutlicht. Jeder Temperatur ist ein Widerstand sowohl für Heißleiter als auch für Kaltleiter zugeordnet.

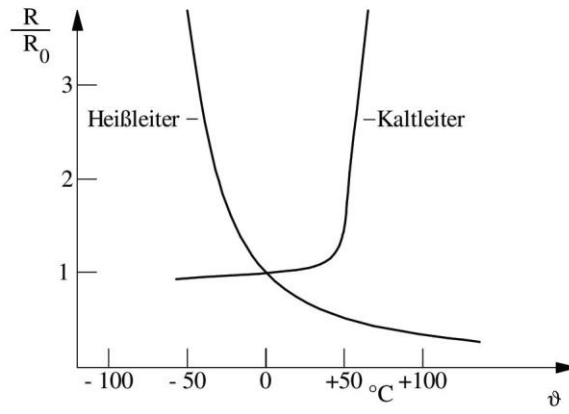


Abbildung 16: Heiß- und Kaltleiter und deren Widerstandsabhängigkeit

Quelle: [15, S. 77]

### 3 Methoden der theoretischen Informatik zur Modellentwicklung

Die zu verwendenden Komponenten des Versuchsstands sind bekannt. Nun gilt es herauszuarbeiten, wie diese innerhalb eines Programms abgebildet werden können. Hierfür müssen Modelle erstellt werden, welche die Eigenschaften und Funktionen der Komponenten beschreiben. Zur Erstellung solcher Modelle werden Methoden und Modellierungsmöglichkeiten der theoretischen Informatik herangezogen.

#### 3.1 Schritte der Softwareentwicklung

Die Theoretische Informatik unterscheidet bei der Entwicklung eines Programms oder einer Software zwischen Problembereich und Lösungsbereich.

Der Problembereich ist durch das Aufstellen sogenannter Requirements und einer Systemanalyse gekennzeichnet. Ist der Problembereich abgehandelt erfolgt die Ausarbeitung des Lösungsbereichs. Dieser beschäftigt sich mit einer Machbarkeitsanalyse und dem Systementwurf. Danach erfolgt die eigentliche Programmierung und dem Testen und Integrieren des entwickelten Programms.

So werden folgende Entwicklungsschritte bei der Realisierung einer Programmanwendung durchlaufen [17, S. 48-50]:

1. **Aufstellen der Requirements**
2. **Systemanalyse**
3. **Machbarkeitsanalyse**
4. **Systementwurf**
5. Programmierung
6. Test & Integration
7. Abnahme durch den Auftraggeber

In dieser Arbeit werden lediglich die Schritte bis hin zum Systementwurf umgesetzt. Eine weitere Entwicklung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Im Folgenden werden die ersten vier Schritte beschrieben.

##### 3.1.1 Requirement-Engineering

Das Requirements Engineering beschreibt in systematischer Form die tatsächlichen Produkthanforderungen. Das Ziel ist es, dass Auftraggeber und Auftragnehmer sich auf ein eindeutiges und bestmöglich beschriebenes Ziel einigen. Diese Zielvorgabe dient dazu, den Lösungsraum einzugrenzen und findet am Ende des Prozesses in der Testung des Programms Anwendung. Die Anforderungen werden für alle Prozessbeteiligten in einer klaren natürlichen Sprache verfasst, so dass sie für jeden verständlich sind [17, S. 54].

Im deutschen Sprachraum ist noch oft von Lasten- und Pflichtenheft die Rede. Diese erfüllen denselben Zweck wie das Requirements Engineering, jedoch sind diese Begriffe international unbekannt und werden auch in Deutschland zunehmend von der Begrifflichkeit des Requirements Engineering abgelöst. Das Lastenheft wird vom Auftraggeber geschrieben und umfasst dessen Wünsche und Vorstellungen. Das Pflichtenheft ist die Antwort des Auftragnehmers auf das Lastenheft und umfasst, wie er diese Anforderungen umsetzen wird [18].



### 3.1.2 Systemanalyse

In der zweiten Phase der Entwicklung erfolgt die Systemanalyse. Zum einen werden hier die Requirements überprüft, und zum anderen werden klare Systemgrenzen definiert. Die Hauptaufgabe der Systemanalyse besteht jedoch darin, ein erstes Modell des Systems zu entwerfen. [17, S. 54]. Die Literatur stellt eine Vielzahl von Methoden zur Systemanalyse zur Verfügung. Hier wird die Software aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet. Zum Beispiel wird hier die Sichtweise des Benutzers von der des Entwicklers differenziert. Aber auch die Sicherheit und die Funktionen sind wichtige Aspekte. Verschiedene Diagrammarten kommen hier zum Einsatz [19, S. 47-48].

### 3.1.3 Machbarkeitsanalyse

Die Machbarkeitsanalyse dient im Wesentlichen der Risikoabschätzung und -minderung. Um den Umfang dieser Arbeit einzugrenzen, wird diese jedoch nicht weiter erörtert und in der späteren Konzeptentwicklung auch nicht angewandt.

### 3.1.4 Systementwurf

Der Systementwurf stellt die letzte Stufe vor dem Schreiben oder Programmieren des Programms dar. Folgende Methoden sind Teil des Systementwurfs bei der Verwendung der Strukturierten Analyse und finden später auch Anwendung:

- Hierarchische Zerlegung des Systems in Subsysteme
- Datenflussdiagramme auf verschiedenen Ebenen
- Prozessspezifikation bzw. Prozessbeschreibung
- Datenbeschreibung, Datenmodellierung mit Entity-Relationship-Diagramm

## 3.2 Strukturierte Analyse

Seit den siebziger Jahren hat sich die Strukturierte Analyse zu einem Standard innerhalb der Systemanalyse und dem Systementwurf entwickelt. Hier werden Funktionen, Prozesse und Vernetzungen grafisch dargestellt. Diese Darstellung ist umfangreich und kann komplexe Zusammenhänge gut verständlich darstellen. Es soll möglichst der Kern eines Systems dargestellt werden. Zudem ist es möglich, Modelle für unterschiedliche Granularitätsstufen zu entwickeln. So kann ein System als Ganzes dargestellt werden, aber auch jedes einzelne erkannte Detail.

Die Betrachtung liegt hier auf dem Zusammenwirken der Systeme miteinander und der Umgebung sowie dem Zusammenspiel der verschiedenen Prozesse. Durch das Herausarbeiten der Schnittstellen offenbaren sich die Funktionen des Systems automatisch.

Im Folgenden sind die grafischen Symbole der Strukturierten Analyse dargestellt [17, S. 190-200].

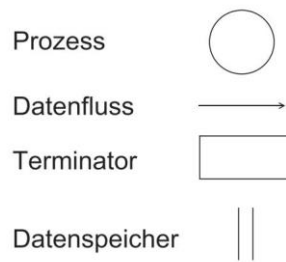


Abbildung 17: Grafische Symbole der Strukturierten Analyse

Quelle: [17, S. 194]

Ein Prozess wird durch einen Kreis dargestellt, er enthält eine Funktion oder einen Algorithmus und wandelt so Daten vom Eingang in entsprechende Ausgangsdaten um.

Der Datenfluss wird durch einen Pfeil kenntlich gemacht, er verdeutlicht die Übergabe der Daten an einen Prozess, Terminator oder Datenspeicher.

Terminatoren zeigen die Grenzschichten des Systems auf, sie können Schnittstellen zu anderen Systemen sein. In der erstellten Abbildung werden sie nicht weiter beschrieben und haben nur die Aufgabe, Daten zu empfangen oder zu versenden. Der Terminator kann demnach auch ein sich geschlossenes weiteres System sein.

Wenn Daten nicht direkt in ein System einfließen, werden diese in einem Datenspeicher gesammelt. So sind diese Daten zusätzlich von ihrer zeitlichen Entstehung und der Weitergabe oder Verwendung entkoppelt [17, S. 190-200].

### 3.2.1 Entitäten und Attribute

Der Begriff "Entität" wird in der Informatik im Allgemeinen verwendet, um ein Objekt zu beschreiben, dessen Eigenschaften oder Charakteristiken als Attribute dieser Entität auftreten. Eine wichtige Methode zur Modellierung von Systemen ist das Entity-Relationship-Diagramm, das 1970 entwickelt wurde und später vielfach weiterentwickelt wurde. Es wurde nachträglich in die Strukturierte Analyse aufgenommen [17, S. 258].

Eine Entität ist dabei ein reales oder abstraktes Objekt, das im Modell als Informationseinheit dargestellt wird und über eindeutige Merkmale identifiziert werden kann. Wenn mehrere Entitäten die gleichen Merkmale und Eigenschaften besitzen, werden diese zu einem Entitätstyp oder einer Klasse zusammengefasst [20].

Die Attribute beschreiben die Eigenschaften dieser Objekte und sind diesen zugeordnet. Das Attribut hat einen entsprechenden Wert welcher durch einen Wertebereich, der Domäne festgelegt ist.

Zwischen den Entitäten bestehen verschiedene Beziehungen, welche nach ihrer Komplexität auch Kardinalität genannt, unterschieden werden. Hierbei kann eine Entität mit anderen Entitäten, Entitätstypen sowie mit sich selbst in Beziehung stehen. Auch Beziehungen können Attribute besitzen [17, S. 258-262]. In der Abbildung 18 werden die im Diagramm verwendeten Symbole für Entität, Attribut und Beziehung gezeigt.

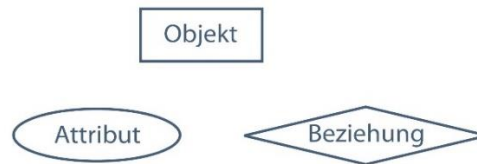


Abbildung 18: Symbole ERM

Quelle: [21]

Andere Methoden zur Systemanalyse und dem Systementwurf setzen einen anderen Fokus. Um einen groben Überblick zu schaffen, sind diese im Folgenden aufgelistet. Es wird jedoch nicht weiter auf diese Methoden eingegangen [17, S. 51].

- Funktionsorientiert
- Datenorientiert
- Objektorientiert
- Aspektorientiert

## 4 Analyse des Problembereichs

In Kapitel 3 wurde ein grundsätzliches Vorgehen zur Programmentwicklung und verschiedene Methoden erläutert. Diese finden nun für die eigentliche Aufgabenstellung Anwendung.

### 4.1 Aufstellung der Requirements

Für die Entwicklung eines geeigneten Programms, das einerseits die in Kapitel 2 beschriebenen Komponenten des Versuchsaufbaus abbildet und deren Funktionen in den Grundlagen widerspiegelt und andererseits eine Regelung der Komponenten nach einem optimalen ökonomisch ausgelegten Prinzip ermöglicht, werden folgende Anforderungen an das Programm gestellt:

Die Anforderungen werden in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen unterteilt. Die funktionalen Anforderungen beschreiben die Funktionen des Programms und umfassen:

- Simulierung eines BSZ-Hybrid-Systems
- Regelung eines BSZ-Hybridversuchstandes sowohl als Simulation als auch mit Hardwarekomponenten
- Realisierung verschiedener Lasten und Lastfälle
- Verschiedene Betriebsmodi zwischen BSZ und Batterie
- Hinterlegung von Fiktiven Kosten und deren Berücksichtigung in den Regelungsprozessen
- Autonome Betriebsweise um ein Optimum von höchstem Wirkungsgrad und geringsten fiktiven Kosten
- Anzeige des jeweiligen Betriebsmodus für den Anwender
- Anzeige der Betriebszustände der jeweiligen Komponenten
- Sicherheitseinrichtung zum Schutz des Anwenders und der Anlagenkomponenten
- Visualisierung der aktuellen Last, der Lastdeckung, der Spannung und Stromstärken
- Speicherung und Ausgabe der Informationen in einer Datei

Nicht funktionale Anforderungen richten sich an den Aufbau und die Struktur des Programms:

- Ansprechendes und leicht bedienbares User Interface
- Erweiterbarer Aufbau
- Geringe Reaktionszeit des Programms

Die Anforderungen wurden zudem in einem Lastenheft aufgenommen, welches dem Anhang dieser Arbeit beigelegt ist.

## 4.2 Analyse des Versuchsaufbaus

In Kapitel 2 wurde ein erster Überblick über den Versuchsaufbau entwickelt. Die verwendeten Komponenten wurden dort grundlegend beschrieben. Es gilt nun, die weiteren Zusammenhänge und Funktionen herauszuarbeiten. Im Folgenden (Abbildung 19) sind die Hauptkomponenten und deren Datenflüsse untereinander dargestellt. Aus dieser Ansicht wird ersichtlich, dass alle verwendeten Komponenten miteinander kommunizieren und der dafür notwendige Datenaustausch in einem Speicher zwischengelagert werden muss. Diese Daten und Betriebsvorgaben können wiederum an einer Schnittstelle dem Benutzer ausgegeben werden. Wie der genauere Datenfluss abläuft und welche Funktionen auftreten, ist an dieser Stelle noch nicht ersichtlich.

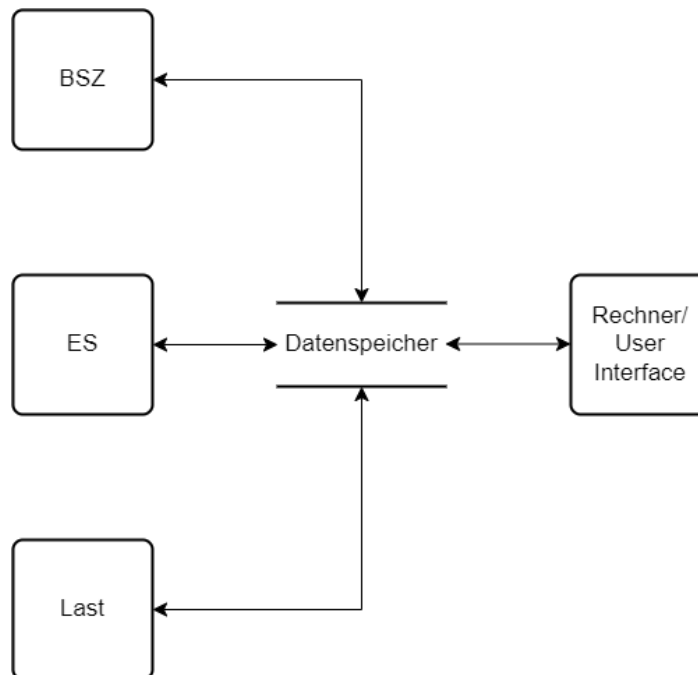


Abbildung 19: Datenfluss der Hauptkomponenten

Um die Zusammenhänge und Funktionen zu verdeutlichen, wird in Abbildung 20 eine Erweiterung der Systembausteine dargestellt, welche wichtige Funktionen übernehmen. Im Kern der Abbildung sind erneut die Hauptkomponenten des Versuchsaufbaus zu sehen, bestehend aus der Brennstoffzelle, dem Energiespeicher und der Last. Neu hinzugekommen sind Sensoren zur Temperatur-, Strom- und Spannungsüberwachung mit den entsprechenden Funktionen. Diese Informationen werden an einen Speicher übergeben, um sie zeitlich unabhängig an anderer Stelle abrufen zu können. Es handelt sich hierbei um ein und dieselbe Speichereinheit, welche mehrfach dargestellt wird, um die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

Neu hinzugefügt wurden die Komponenten Schalter, Leitungen und der DC/DC-Wandler. Schalter und Leitungen ermöglichen das Schließen und Öffnen von Stromkreisen, um eine Leistungsabgabe der Hauptkomponenten an die Last zu ermöglichen. Der DC/DC-Wandler kann unterschiedliche Spannungen im System auf ein einheitliches Niveau anheben oder senken, wodurch die Komponenten unabhängig voneinander eine für ihren Arbeitsbereich optimale Spannung bereitstellen können.

Über ein User Interface kann der Benutzer mit dem System interagieren und Betrieb und Belastung vorgeben sowie die Informationen der Komponenten über Ausgabefunktionen anzeigen lassen.

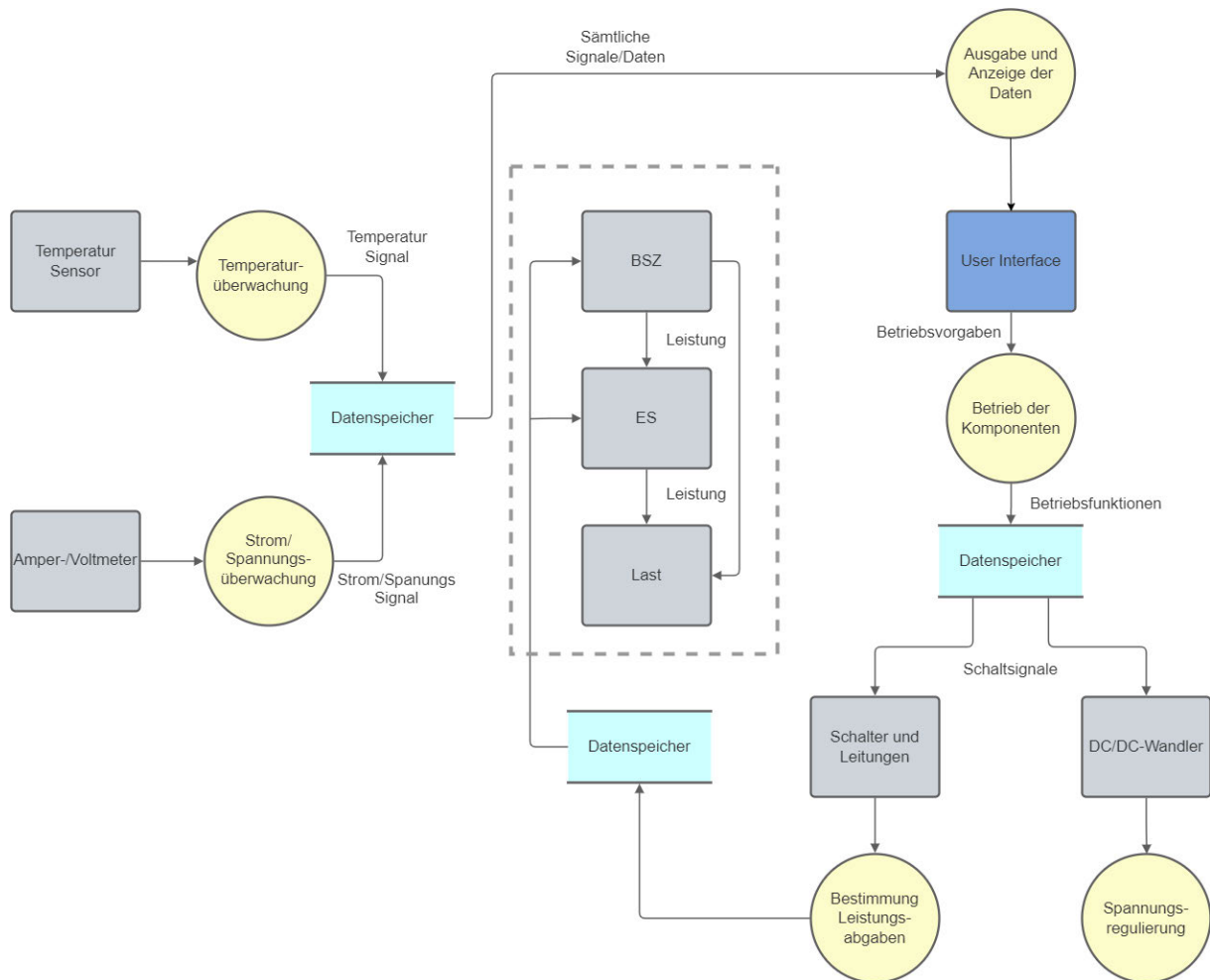


Abbildung 20: Erweiterter Versuchsaufbau und Darstellung der Funktionen

### 4.2.1 Komponenten Charakteristik

Zur weiteren Analyse der Komponenten und ihrer Funktionen gilt es, ihre Charakteristiken herauszuarbeiten. Es muss ermittelt werden, wie sie im Wesentlichen aufgebaut sind und welche Funktionen sie haben. Die technischen Grundlagen wurden in einer kurzen Zusammenfassung im Kapitel 2 aufgeführt. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Optimierung des Betriebs aus Brennstoffzelle und Energiespeicher liegt, werden diese als Referenzobjekte charakterisiert.

Zu den Charakteristiken einer Komponente, in diesem Fall der PEM-Brennstoffzelle, gehören ihre technischen Spezifikationen, die vom jeweiligen Hersteller für das Produkt angegeben werden. Im Anhang sind Auszüge aus technischen Datenblättern beigefügt. In Abbildung 21 wird ein solcher Auszug aus einem Produktdatenblatt gezeigt, der den Typ, die Zellenanzahl, die Leistung sowie weitere Betriebsgrößen der Brennstoffzelle enthält.

Anhand dieser Angaben kann eine Beschreibung der Komponenten für eine Programm-Anwendung erfolgen. Dabei sollten die Komponenten als "Black-Box" betrachtet werden. Das bedeutet, dass die internen Funktionsabläufe nicht weiter dargestellt werden. Der Komponente werden Daten und Informationen zugeführt und diese reagiert darauf mit entsprechend hinterlegten Funktionen wie beispielsweise der U/I-Kennlinie. Der weitere technische Hintergrund bleibt unbeleuchtet.

## 4. Technical Specification

Type of fuel cell	PEM
Number of cells	20
Rated Power	100W
Performance	12V @8.3A
H2 Supply valve voltage	12V
Purging valve voltage	12V
Blower voltage	12V
Reactants	Hydrogen and Air
External temperature	5 to 30°C
Max. stack temperature	65°C
H2 Pressure	0.45-0.55bar
Hydrogen purity	≧ 99.995 % dry H2
Humidification	self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Stack weight (with fan & casing)	1290 grams(±50grams)
Controller weight	400 grams(±30grams)
Dimension	11.8cm x 10.4cm x 9.4cm
Flow rate at max output*	1.3 L/min
Start up time	≧ 30S at ambient temperature
Efficiency of stack	40% @ 12V
Low voltage shut down	10V
Over current shut down	12A
Over temperature shut down	65°C
External power supply**	13V (±1V), 5A

\* The flow rate may change with the power output.

\*\* System electronics need external power supply.

\*\*\* The Specification is subject to change without notice.

Abbildung 21: Auszug aus Produktdatenblatt einer PEM-Brennstoffzelle

Quelle: [22, S. 12]

Die Funktionen ergeben sich demnach über die ebenfalls vom Hersteller angegebenen Kennlinien. Diese können die Leistungskennlinie in Abhängigkeit der Stromstärke, die U/I-Kennlinie sowie die angegebene Wasserstoffverbrauchskennlinie sein, wie in Abbildung 22 für eine PEM-Brennstoffzelle dargestellt.

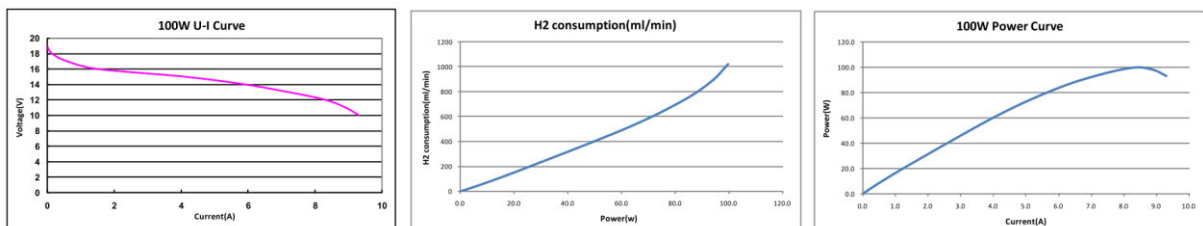


Abbildung 22: Kennlinien einer 100W PEM-Brennstoffzelle

Quelle: [22, S. 25]

Die Charakterisierung für die weiteren Komponenten erfolgt auf die gleiche Weise. Auch hier sind von den entsprechenden Herstellern Informationen über die technischen Datenblätter abrufbar. Diese sind im Anhang dieser Arbeit beigefügt.

### 4.2.2 Mögliche Einflussfaktoren auf das System

Im laufenden Betrieb sowie bei Stillstand der geplanten Anlage ist diese sowie ihre Komponenten einem ständigen Einfluss verschiedenster Faktoren ausgesetzt. Diese Faktoren ergeben sich zum einen durch das gegenseitige Zusammenspiel, aber auch durch Umgebungs- und zeitlich abhängige Einflüsse.

Diese Einflussfaktoren wirken auf das System und sollten auch bei einer modellbasierten und softwareseitigen Entwicklung berücksichtigt werden.

Um einige Einflussfaktoren zu nennen sind diese im Folgenden aufgeführt [23, S. 3]:

- Vibration
- Strahlungen
- **Wärmeentwicklung**
- **Alterung**
- Klima

Je nach Gesichtspunkt ist diese Liste beliebig erweiterbar. Daher wird die Betrachtung auf zwei wesentliche Einflussgrößen reduziert. Diese sind Alterung der Komponenten und eine auftretende Wärmeentwicklung dieser.

Diese beiden Einflussgrößen stechen dadurch heraus, da sie in der technischen Entwicklung von Brennstoffzellen und Energiespeichern schon immer zur Problemstellung gehörten. Die Größen wirken zudem aufeinander ein, so bewirkt eine Erhöhung der Temperatur meist auch eine schnellere Alterung. Eine gealterte Komponente hingegen weist oft einen schlechteren Wirkungsgrad auf und begünstigt wiederum die Wärmeentwicklung.

Im Folgenden werden die Wärmeentwicklung und das Alterungsverhalten genauer untersucht.

### 4.3 Untersuchung von Alterung- und Temperaturverhalten.

Die Lebensdauer elektrochemischer Systeme wird durch diverse Alterungsprozesse reduziert. Grundsätzlich ist diese Alterung von den Belastungen des Systems abhängig. So bestimmt das Belastungsprofil eines Systems dessen Alterung [24, S. 909]. Zu der Systembelastung gehört auch die Temperaturentwicklung und ihre Auswirkung.

Brennstoffzellen und elektrochemische Energiespeicher haben im Vergleich zu den anderen Komponenten ein deutlich ausgeprägteres Alterungsverhalten. Sie überwiegen auch in den Anschaffungskosten, daher wird das Alterungsverhalten der anderen Komponenten nicht untersucht.



### 4.3.1 Degradation Brennstoffzelle

Die Lebensdauer einer Brennstoffzelle kann durch unterschiedliche innere Mechanismen reduziert werden. Die Literatur bezeichnet diese Vorgänge als Degradationsmechanismen. Die Ursachen für die Degradation sind unterschiedlich, gemeinhin verursachen sie eine Abnahme der elektrischen Spannung und eine Erhöhung des Wasserstoffdurchtritts. Dadurch verschlechtert sich mit der Zeit und der zunehmenden Degradation der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle, bis diese unbrauchbar wird [25, S. 10].

Das Alterungsverhalten von Brennstoffzellen und deren Degradation ist vielschichtig, daher werden nur einige Mechanismen, deren Auswirkungen sowie die Ursachen aufgeführt. Zum einen kann es bei PEM-Brennstoffzellen zur Lochbildung in der Membran kommen. Hat diese eingesetzt, ist die Membran nicht mehr dicht. Als Resultat vergrößert sich die Undichtigkeit im Betrieb weiter. Grund dafür ist das Entstehen von Radikalen an der Kathode durch Wasserstoffmoleküle, welche hier mit Sauerstoff reagieren. Eine Lochbildung kann bereits durch Fertigungsfehler vorhanden sein, aber auch Druckschwankungen und eine geringe Feuchte greifen die Membran an.

Die Membranfunktion wird auch durch eine Abnahme der Protonenleitfähigkeit reduziert. Dies tritt auf, wenn Verschmutzungen in der Verbrennungsluft bestehen. Beim Auftreten einer Wasserstoffunterversorgung kann die Katalysatorbeschichtung in einer PEM-Brennstoffzelle abgebaut werden. Dies hat eine geringere Katalysatoroberfläche zur Folge. Der Effekt tritt auch im normalen Betrieb der Brennstoffzelle auf, wird aber durch zu hohe Flüchtigkeiten, hohe Temperaturen und weitere Faktoren verstärkt.

Ein weiterer Degradationsmechanismus wird durch die Platinoxidation beschrieben. Hierbei reagiert oxidiertes Platin mit einem freien Proton und es bildet sich Wasser sowie gelöstes Platin. Das Platin innerhalb der Membran kann auch durch lange Betriebszeiten inaktiv werden. Hier verändert sich die Anordnung des Platins, so dass es seine Funktion nicht mehr erfüllen kann. Der Effekt wird als Platinpartialdeaktivierung beschrieben. Auch hier ist ein Treibfaktor eine Verunreinigung der zugeführten Luft.

Die Bipolarplatte kann durch Auftreten von Korrosion zu einer Verunreinigung der MEA führen. Eine Vergrößerung der Oxidschicht an der Bipolarplatte hat auch eine Vergrößerung des Widerstandes zur Folge, welche wiederum die Leistung der Brennstoffzelle reduziert.

Zwischen der Bipolarplatte und der MEA befindet sich eine Gasdiffusionsschicht, welche oft aus Teflon hydrophobisierten Kohlefaserstrukturen realisiert wird. Diese Fasern können brechen, die Folge ist ein Druckabfall in den Kanälen und ein Leistungsverlust. Ein Versagen der Dichtung zwischen Bipolarplatten und der Membran hat ein Austritt der Reaktionsgase in die Umgebung zur Folge.

Abbildung 23 zeigt die erwähnten Bauteile der Brennstoffzelle, um das Degradationswirken besser zuordnen zu können.

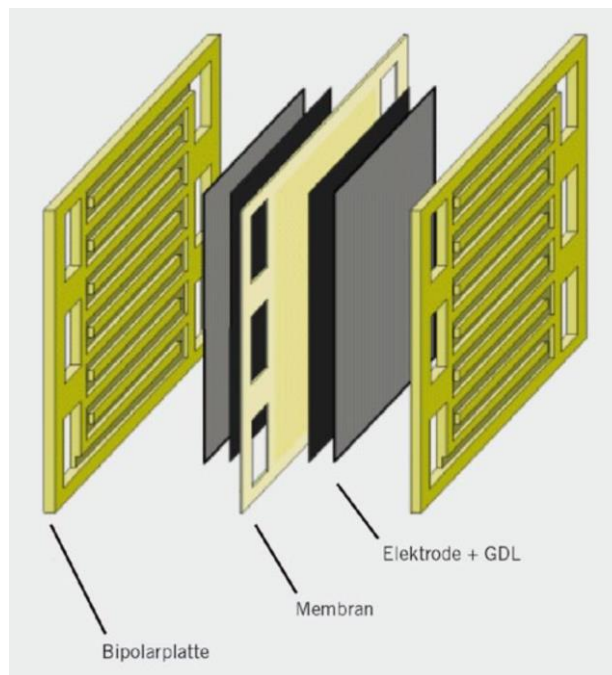


Abbildung 23: Komponenten der Brennstoffzelle

Quelle: [26, S. 910]

Diese Effekte treten oftmals im Zusammenspiel auf und ihre Ursachen überschneiden sich. Daher sind im Folgenden jene Faktoren zu nennen, welche die Lebensdauer der Brennstoffzelle reduzieren:

- Stromgradient
- Temperaturniveau (Kühlmittel seitig)
- Neustart nach langem Stillstand
- Start Stopp Vorgänge
- Feuchtigkeit der Kathode
- Verunreinigungen an Anode und Kathode
- Belastung nahe der Leerlaufspannung (Idlestrom)

Eine zu hohe Temperatur begünstigt jene Effekte, die zu einer verfrühten Alterung beitragen. Die Zunahme ist exponentiell von der Temperatur abhängig.

Der Stromgradient beschreibt die wirkende Belastung der Brennstoffzelle. Ist der Stromgradient zu hoch oder steigt dieser zu schnell an, kommt es zur Wasserstoffunterversorgung. Ebenso schädlich ist ein häufiger Wechsel des Stromgradienten.

Nach längeren Stillstandzeiten kann es dazu kommen, dass die Brennstoffzelle mit Luft geflutet ist. Bei der Inbetriebnahme kann es dann zu einer schädlichen Wasserstoff-/Luftfront kommen, die den Katalysator beschädigt. Diese Schädigung hängt linear von der Anzahl der Neustarts ab, die nach langem Stillstand durchgeführt werden.

Die Feuchtigkeit an der Kathode beansprucht die Membran, da sie dazu führt, dass die Membran schrumpft oder aufquillt. Wenn es zu wenig Feuchtigkeit gibt, kann die Membran austrocknen und wenn es zu viel Feuchtigkeit gibt, kann es zur Clusterbildung von Platinpartikeln kommen.

Verunreinigungen an Anode und Kathode entstehen in der Regel durch die Umgebungsluft und ihrer Partikel Belastung.

Die Leerlaufspannung liegt an, wenn kein oder nur ein sehr kleiner Verbraucher an der Brennstoffzelle angeschlossen ist. In diesem Zustand ist die Spannung maximal und kann eine Fluorfreisetzung und einen Katalysatorabbau an der Membran verursachen.

Häufige Start-Stopp-Betriebe können zu einem erhöhten Potential an der positiven Elektrode führen, was den Abbau des Platinkatalysators beschleunigt.

Die Degradation der Brennstoffzelle wird in reversible und irreversible Anteile unterschieden. So können gewisse negative Effekte durch Einflussnahme im Betrieb wieder ausgeglichen werden [27, S. 33-63]. Diese Effekte und die eingesetzten Maßnahmen werden jedoch in dieser Arbeit nicht weiter aufgeführt.

Der Effekt der Alterung macht sich hauptsächlich durch einen Abfall der Strom-Spannungskennlinie bemerkbar. Die abrufbare Leistung der Brennstoffzelle nimmt mit zunehmender Leistung weiter ab, hierbei verschlechtert sich auch der Wirkungsgrad der Zelle. Daher wird für die weitere Auswirkung der Alterung, eine Reduktion des Wirkungsgrades als Referenzfaktor betrachtet.

### 4.3.2 Degradation von Batteriespeichern

Die Alterung von Batteriespeichern macht sich durch eine Verschlechterung ihrer Kennzahlen bemerkbar, wie dem Abfall der maximalen Kapazität, des Spannungsniveaus und einer Zunahme des Innenwiderstands im Laufe ihrer Lebensdauer. Es gibt zwei Arten von Alterung: die kalendarische Alterung, die durch die Zeit und Lagerung verursacht wird, und die zyklische Alterung, die durch den Betrieb des Energiespeichers und die Anzahl der Lade- und Entladezyklen verursacht wird. Chemische und mechanische Beanspruchung können die Degradation beschleunigen. [28, S. 20].

Je nach Art des Energiespeicher sind die Alterung Einflüsse und deren Auswirkungen unterschiedlich. Grundsätzlich ähneln sich diese jedoch für die Vielzahl an Batteriespeichern in ihrem Effekt auf diesen. Für diese Arbeit wird das Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batteriespeichern näher untersucht.

In der Tabelle 1 sind die Komponenten einer Lithium-Ionen-Batterie (LIB) aufgeführt sowie die an der Komponente wirkenden Alterungsvorgänge und deren Auswirkung. Die Abbildung 24 beinhaltet ein Schema des Aufbaus einer LIB und die aufgeführten Komponenten.

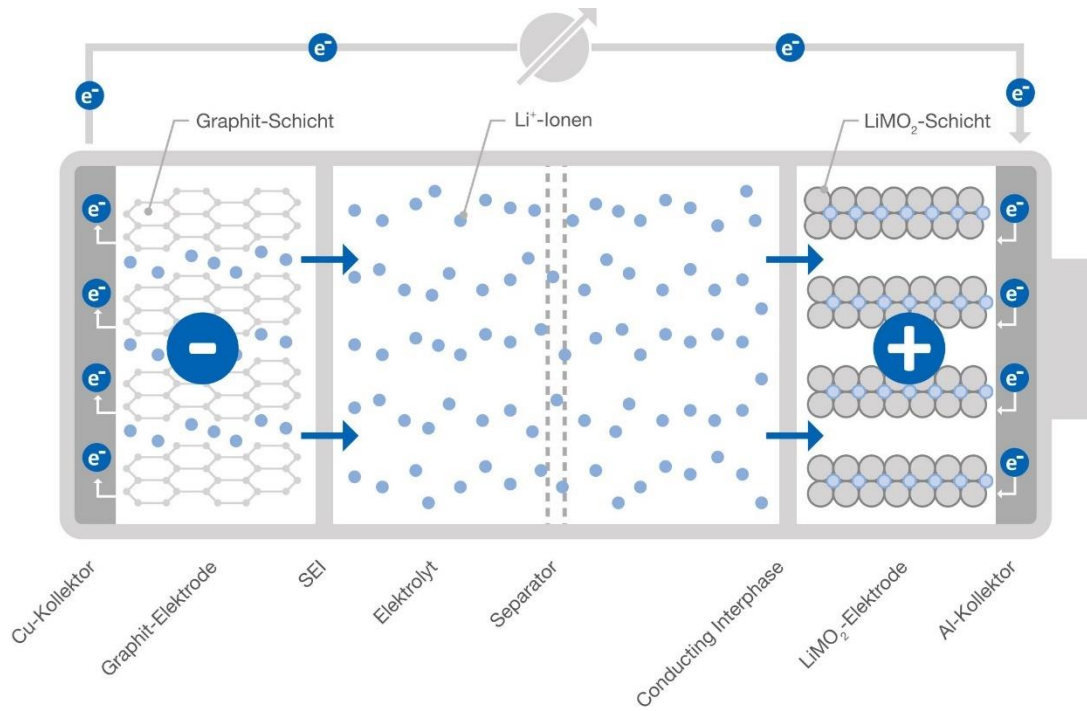


Abbildung 24: Aufbau einer LIB mit den verwendeten Komponenten

Quelle: [29, S. 3]

Tabelle 1: Alterungseinflüsse auf LIB

Quelle: [28, S. 20]

Komponente	Alterungsvorgang	Auswirkung
Negative und positive Elektrode	Änderung der Morphologie an Anode / Elektrode	Möglicher Kontaktverlust zum Stromkollektor
	Reduzierung der aktiven Elektrodenoberfläche	Kapazität und Spannungsverlust
	Bindemittelabbau	Anstieg des RI, da Elektronen Übergabe vermindert
	Irreversible Lithiumablagerung im Grafit	Reduktion der Kapazität, da das Lithium nicht mehr für Reaktionen zur Verfügung steht. Es kann zum Kurzschluss der Batterie kommen.
Elektrolyt	Leitsalzabbau	Kapazitätsverlust durch eine verminderte Leitfähigkeit der Ionen
	Lithium-Plating, Bildung von metallischem Lithium	Reduktion der Kapazität, da das Lithium nicht mehr für Reaktionen zur Verfügung steht. Es kann zum Kurzschluss der Batterie kommen.
	Verunreinigung des Elektrolyten	Bildung von Fluss-Säure und dadurch eine Zerstörung der Zelle
Grenzschicht zwischen Anode und Elektrolyt	Bildung und Ausweitung der Solid-Electrolyte-Interphase (SEI)	+ vermindert die Zersetzung des Elektrolyten, - Anstieg des Innenwiderstands
Stromkollektor	Korrosion und Dendriten Bildung	Anstieg des Innenwiderstands
Separator	Abrieb des Separators	
	Verminderung der Porosität	Reduktion der Oberfläche

Die aufgeführten Alterungseffekte sind vielfältig und zusammenhängend. Auf ihre tiefe Grundlage wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Es gilt zu ergründen, wie diese Effekte hervorgerufen werden und wie deren Auswirkungen im Hinblick der Lebensdauer der Komponenten sind.

Die Einflussfaktoren, welche zur Alterung der LIB führen, werden durch eine Belastung der Batterie hervorgerufen und können nach der Art ihres Wirkens unterteilt werden. Eine Einteilung erfolgt nach mechanischer, elektrischer und thermischer Belastung der Batterie.

Zu den mechanischen Belastungen gehören Spannungen und Ausdehnungen im Material des Speichers, die im normalen Betrieb auftreten können. Aber auch Stöße und andere mechanische Belastungen von außen können einen Einfluss haben.

Die elektrischen Belastungen entstehen bei zu hohen Lade- und Entladeströmen. Hierbei wird die Zellchemie der Batterie stark beansprucht, was wiederum zu einer Wärmeentwicklung führt

Eine thermische Belastung wirkt wiederum auf die Zellchemie und kann die chemischen Vorgänge beschleunigen, hierbei werden jedoch auch ungewollte Nebenreaktionen in der Zelle in Gang gesetzt. Mit der Zeit nimmt der Innenwiderstand der Zelle zu und die maximale Kapazität sinkt.

Für jeden elektrochemischen Energiespeicher sind von dessen Hersteller einzuhaltende Temperatur Ober- und Untergrenzen sowie begrenzende Lade- und Entladeströme angeben.

Die zyklische Lebensdauer wird ebenso vom Hersteller entsprechend der Tiefe der Entladung (Depth-of-Discharge, DOD) angegeben. Hier hat eine zu hohe Temperatur auch einen negativen Einfluss und begrenzt die Anzahl der Zyklen maßgeblich. Der Ladungszustand (State-of-Charge, SOC) oder eben die DOD bestimmt sich durch die verbleibende Kapazität bezogen auf die Gesamtkapazität der Zelle. Bei den Lade- und Entladezyklen wird abhängig vom SOC zwischen Vollzyklen und Teilzyklen unterschieden. Ein Betrieb einer LIB im Teilzyklenbereich ermöglicht in der Regel eine weitaus höhere zyklische Lebensdauer [29, S. 11-15]. Beispielhaft ist in Abbildung 25 durch den Hersteller die Lebensdauer einer LIB verdeutlicht.

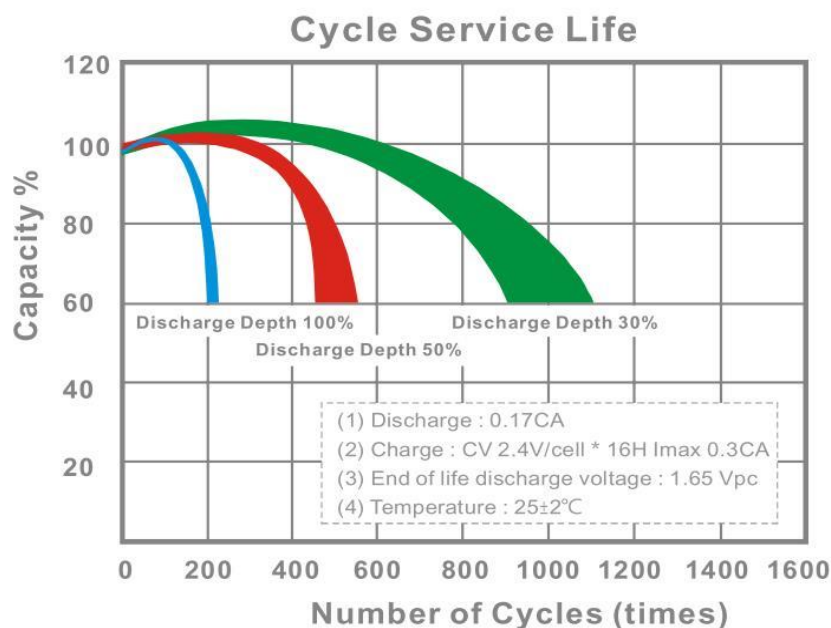


Abbildung 25: Angaben der möglichen Zyklen Anzahl bei unterschiedlichen Entladetiefen

Quelle: [30, S. 2]

#### 4.4 Notwendigkeit eines Managementsystems

Für den sicheren Betrieb eines elektrischen Systems benötigt dieses die notwendigen Sicherheitseinrichtungen um bei möglichen Störungen und Unfällen, das System abzuschalten. Bei der Verwendung eines Managementsystems werden die betriebs Parameter überwacht und geregelt. So können Störungen frühzeitig erkannt werden und ein weiterer Schaden oder Ausfall des Systems kann verhindert werden. Diese Funktionen verhindern auch gerade eine Frühzeitige Alterung der System Komponenten.

Ist in einer technischen Anwendung eine Batterie bzw. ein Akkumulator verbaut, geht dies in der Regel mit der Verwendung eines Batterie-Management-Systems (BMS) einher. Dies sorgt für ein optimales Zusammenspiel der verbauten Zellen und Zellen-Stacks. Es schützt diese vor fehlerhafter Bedienung und ermöglicht die optimale Ansteuerung. So werden durch das BMS die Lade- und Entladeprozesse überwacht und geregelt. Das BMS überwacht den Ladezustand und kann diesen an weitere Systeme weitergeben. Auch der Alterungsvorgang der Zellen kann durch hinterlegte Parameter überwacht und bestimmt werden. Eine sehr wichtige Aufgabe ist das Wärmemanagement (Thermal Management), welches auch vom BMS übernommen wird. Hier wird aufgrund der Umgebungs- und Batterietemperatur die Stromführung der Batterien geregelt, um im optimalen Temperaturbereich zu bleiben. So wird der optimale Betrieb der Zellen, mit der maximalen Lebensdauer für den anfallenden Leistungsanspruch erreicht [31].

Ähnlich verhält es sich beim Betrieb eines Brennstoffzellensystems. Auch hier ist es notwendig die betriebs Größen zu überwachen. Wie bei der Batterie soll auch die Brennstoffzelle möglichst im optimalen Bereich arbeiten. Schäden an der Anlage, des Betreibers oder weiterer Systeme sollen verhindert werden. Auch hier kann von einem Fuel-Cell-Management-System bzw. einer Fuel-Cell-Controll-Unit (FCCU) gesprochen werden. Es werden die einzelnen Teilbereiche, der Brennstoffzelle, überwacht und geregelt. Dazu gehören die richtige Wasserstoff- und Sauerstoffzufuhr, thermische Systeme sowie das Wassermanagement [32].

Um einen besseren Eindruck eines BMS zu bekommen, können die begrenzende Bereiche der Abbildung 26 entnommen werden.

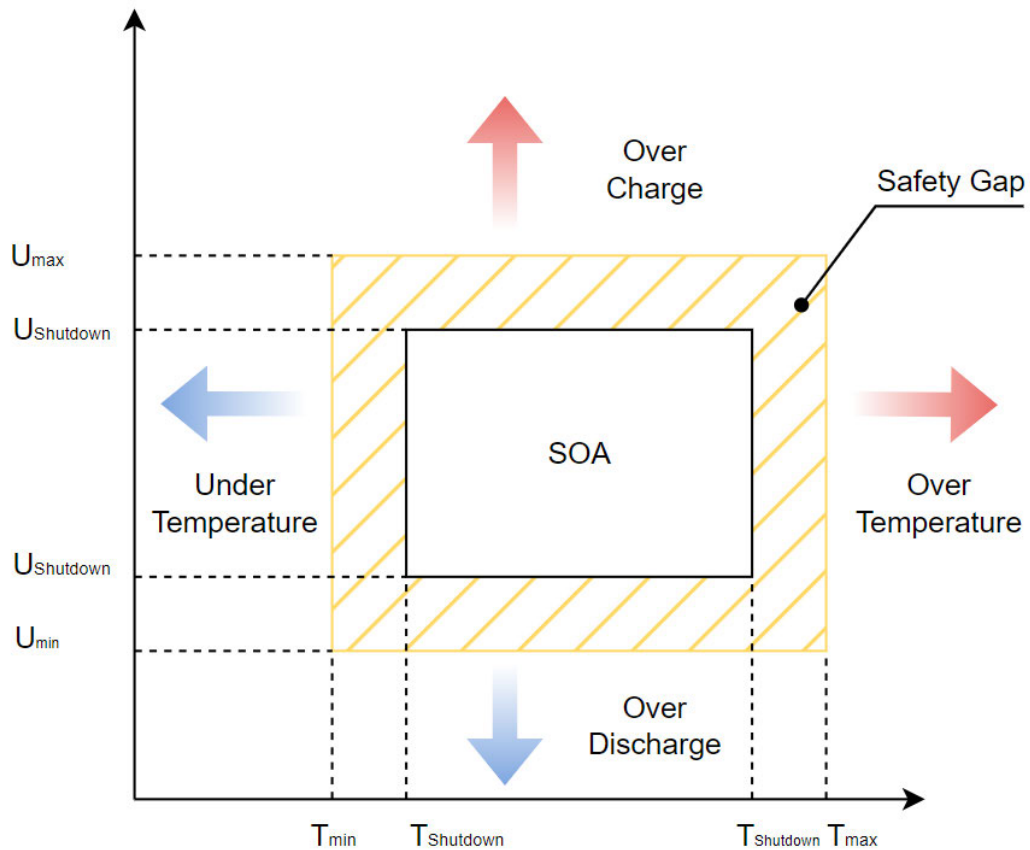


Abbildung 26: Bereichsgrenzen und Arbeitsbereich für ein BMS

Quelle: Eigene Darstellung nach [33]

In diesem Graphen verläuft über die X-Achse das Temperaturniveau, welches nach rechts hin ansteigt. Über die Y-Achse ist die Spannung aufgetragen, welche nach oben hinzunimmt. Für jede Batterie oder Zelle sind Bereichsgrenzen vorgegeben, welche nicht zu überschreiten sind. Diese sind mit  $T_{max}$ ,  $U_{max}$ ,  $T_{min}$  und  $U_{min}$  eingetragen. Sollten diese Werte erreicht werden, hat das einen Schaden der Zelle zur Folge (Thermal-Runaway, Lithiumplating). Daher wird ein Bereich definiert, in dem die Zelle sicher arbeiten kann (Safe Operating Area). Wie in dem Graphen zu sehen ist, besteht zwischen den Grenzen der SOA und den minimal und maximal Werten ein Sicherheitsabstand (Safety-Gap). Das BMS greift bereits beim Erreichen der Grenzen der SOA ein, damit die kritischen Werte im Betrieb nicht erreicht werden.

## 5 Konzeptionierung der Lösungsansätze

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Beschreibung des Problembereichs dienen dazu, entsprechende Lösungsansätze zu finden, um diese Zusammenhänge innerhalb einer Programmanwendung darzustellen. Es gilt also, Modelle der Komponenten in ihren Charakteristiken zu erstellen. Ebenso müssen Modelle für die Einflussfaktoren und deren Auswirkungen sowie für die Beziehungen zwischen allen Elementen erstellt werden.

### 5.1 Formulierung der Einflussfaktoren für eine Programmanwendung

Dem System sowie seiner Komponenten stehen Einflussgrößen wie im Kapitel 4.2 beschrieben gegenüber. Diese haben einen wesentlichen Einfluss auf die Funktionsweise der verwendeten Komponenten. Daher müssen diese definiert und beschrieben werden.

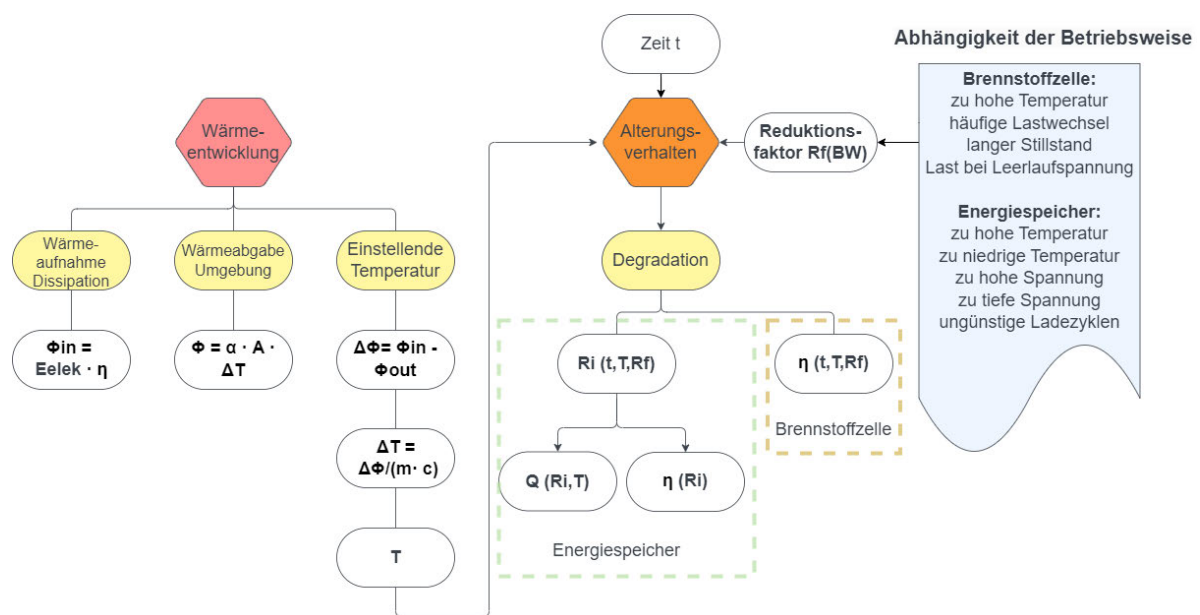


Abbildung 27: Einflussfaktoren und deren Funktionaler Aufbau.

Die Einflussfaktoren wurden auf die Wärmeentwicklung und das Alterungsverhalten begrenzt. Die Auswirkung dieser Beiden Einflussgrößen auf die BSZ und den ES wurde in Kapitel 4.3 beschrieben. Abbildung 27 zeigt die Beiden Einflussfaktoren, ihre Funktionale Beschreibung und deren Zusammenhang.

Die Wärmeentwicklung (links) nimmt über eine konkrete in dem Objekt auftretende Temperatur Einfluss. Diese Temperatur gilt es für das Programm als Funktion zu hinterlegen. Hier ist der Ansatz, dass die zugeführte Energie zu einem Teil in Wärme dissipiert. Die Wärmemenge bestimmt sich demnach aus dem Wirkungsgrad und der zugeführten Energiemenge. Hierbei ist die dissipierte Energie die Wärmemenge. Ein Objekt steht im ständigen Wärmeaustausch mit seiner Umgebung. Diese Tatsache wird durch einen Wärmestrom ausgehend von dem Objekt an die Umgebung berücksichtigt. Hier sind die Einflussgrößen der Temperatur Unterschied von dem Objekt zur Umgebung, der Wärmeübergangskoeffizient und die Oberfläche des Objektes. Die Differenz aus den Wärmemengen am Eingang und Ausgang bestimmt die Temperatur und ihre Änderung. Hier erfolgt der Ansatz über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik, indem die Wärmemenge durch die Masse des Objektes multipliziert mit der Spezifischen Wärmekapazität des Objektes geteilt wird. Diese Ansätze sind grobskaliert und spiegeln das Tatsächliche Temperaturverhalten innerhalb eines Systems



nicht wider. Eine genauere Ausformulierung der Wärmeentwicklung und Auswirkung kann durch weitere Arbeiten erfolgen.

Die rechte Seite der Abbildung zeigt Betriebsweisen für BSZ und ES, welche eine vorzeitige Alterung herbeiführen. In Abhängigkeit von diesen Betriebsweisen gilt es einen Reduktionsfaktor  $R_f$  zu entwickeln.

Nach dem Ansatz wie abgebildet beschreibt der Reduktionsfaktor im Zusammenspiel mit der Temperatur sowie der Zeit des Wirkens, die Degradation. Die Auswirkungen dieser werden beschrieben. Demnach wird hier für eine Batterie ein steigender Innenwiderstand in Abhängigkeit der genannten Größen dargestellt. Für eine Batterie geht mit der Erhöhung des Innenwiderstandes ein schlechterer Wirkungsgrad einher. Die Gesamtkapazität nimmt über einer Zunahme des Innenstandes ebenso ab, sie ist jedoch auch deutlich von der Temperatur abhängig.

Bei der Brennstoffzelle wird das Alterungsverhalten nur durch einen zunehmend schlechter werdenden Wirkungsgrad dargestellt. So müssen weitere Innere Vorgänge nicht ausformuliert werden.

Die Einflussgrößen sind also als Funktionen der Temperatur, der Betriebsweise und dem zeitlichen Verlauf abzubilden. Hierfür sollten zunächst vereinfachte Ansätze umgesetzt werden.

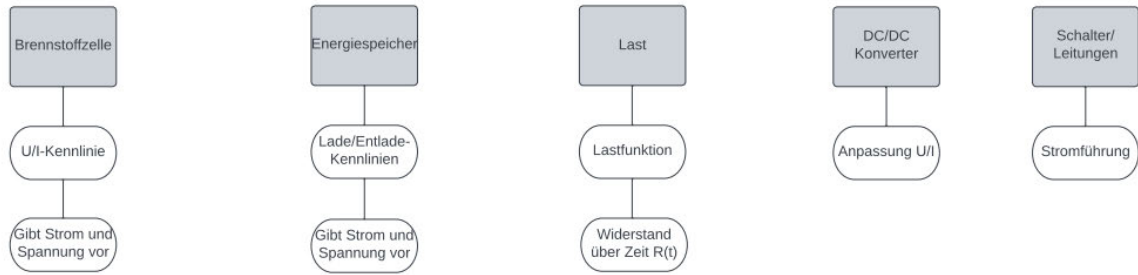
## 5.2 Erweiterung der Komponenten

Für die weitere Programmentwicklung müssen die aus Kapitel 4 gewonnen Erkenntnisse berücksichtigt werden.

Daher werden die bekannten Komponenten um solche erweitert, die eine sichere Funktion und Betrieb der ersten ermöglichen. Unter dem Begriff Virtuelle Komponenten sind genau diese Management System sowie Komponenten, welche als Funktion des Programms in Erscheinung treten aufgefasst.

Es erfolgt eine Unterteilung in Hardwarekomponenten und Virtuelle Komponenten des Gesamtsystems. Die Hardwarekomponenten (Abbildung 28) sind hierbei den genannten Einflüssen ausgesetzt und treten durch ihre Charakteristik in Erscheinung. Die virtuellen Komponenten (Abbildung 29) zeichnen sich durch ihre Funktionen zur Erhaltung und sicheren Betriebsweise des Systems aus.

## Hardware Komponenten: Aufgaben und Einflüsse



### Einflüsse auf Komponenten

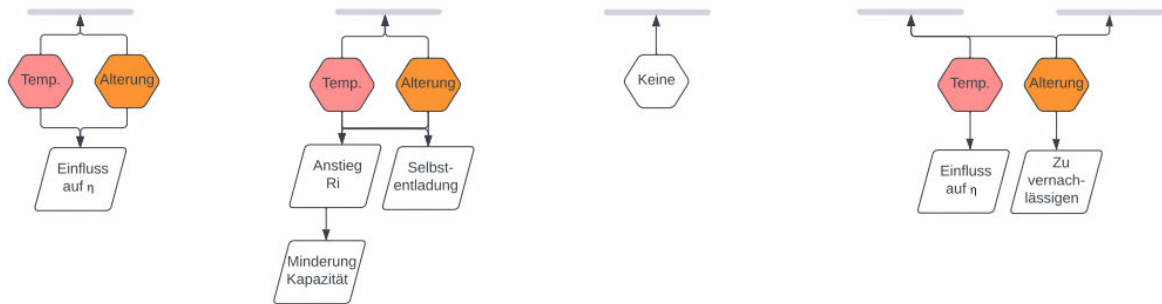


Abbildung 28: Hardwarekomponenten und deren Eigenschaften sowie auf sie wirkende Einflüsse

## Virtuelle Komponenten und deren Funktionen

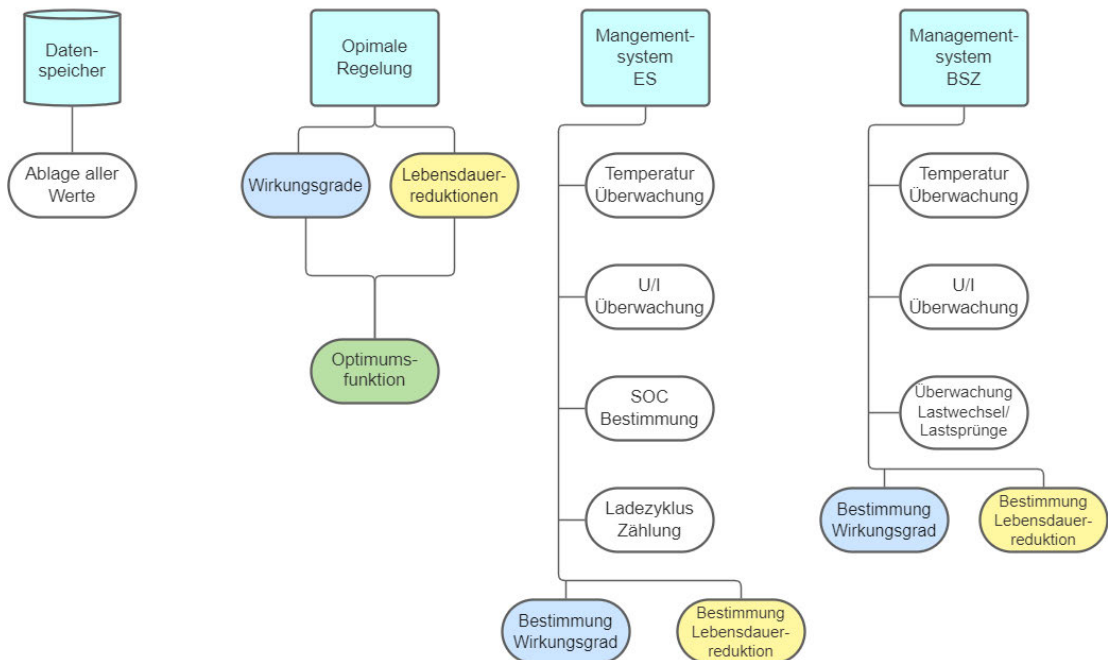


Abbildung 29: Virtuelle Komponenten und ihre Funktionen

Zum einen ist der Datenspeicher und die Funktion der Ablage aller Daten und Informationen als Virtuelle Komponente aufgefasst. Zum anderen wird ein Regler benötigt, der die optimale Betriebsweise der Komponenten in Abhängigkeit von auftretenden Einflussgrößen und dem Wirkungsgrad des Gesamtsystems bestimmt. Zusätzlich überwachen die

Managementsysteme den sicheren Betrieb der Komponenten. Im Fall des Energiespeichers wird hier auch der Ladezustand sowie die in Anspruch genommenen Lade- und Entladezyklen bestimmt. Außerdem können hier Wirkungsgrade und Lebensdauerreduktionen in Abhängigkeit vom Lastpunkt angegeben werden.

Für die geplante Programmentwicklung werden die Hardwarekomponenten zunächst rein virtuell simuliert. Diese sind jedoch an reale Komponenten angelehnt und nachempfunden. Später sollen Schnittstellen integriert werden, um das Programm auch mit realen Komponenten betreiben zu können.

### 5.3 Möglicher Programmablauf

Um eine Übersicht über verschiedene Abläufe einer möglichen Programmentwicklung zu gewinnen, zeigt das im Anhang C aufgeführte Diagramm einen Entscheidungsbaum. Jede Frage wird mit Ja oder Nein beantwortet. Daraus folgt die nächste Abfrage, bis ein Endzustand erreicht wird. Das System spiegelt eine typische Steuerungsmöglichkeit wider und ist in seinem Aufbau einfach gehalten. Die Fragestellungen berücksichtigen hierbei bereits die Charakteristik von Brennstoffzellen. So wird zum Beispiel ein Betrieb der Brennstoffzelle bei geringer Last vermieden, da dies die Brennstoffzelle vorzeitig altern lässt. Auch sollen Lastspitzen oder schnelle Lastwechsel vermieden werden und sind in der Fragestellung berücksichtigt.

Nach diesem Diagramm sind die zu erreichenden Endzustände wie folgt:

- Standby des Systems, da keine Last anliegt. Dieser Zustand bleibt erhalten bis sich die Anfangsparameter ändern.
- Der Energiespeicher versorgt allein die Last. Dies ist der Fall, wenn der Energiespeicher genügend Speicherkapazitäten aufweist und die Last unterhalb der Mindestanforderungen der Brennstoffzelle liegt.
- Nur die Brennstoffzelle versorgt die Last. Dieser Zustand tritt ein, wenn die Last gerade im Leistungsbereich der Brennstoffzelle liegt. Der Energiespeicher leer ist und seine Leistung nicht zu Verfügung steht, die Last aber so groß ist, dass auch ein Laden des Speichers nicht möglich ist.
- Brennstoffzelle und Energiespeicher versorgen gemeinsam die Last. Dies ist der Fall, wenn die Last im Leistungsbereich der Brennstoffzelle liegt, es jedoch Lastspitzen oder Lastwechsel gibt, die die Brennstoffzelle schädigen würden. Diese werden durch die Leistung des Energiespeichers aufgefangen.
- Die Brennstoffzelle versorgt die Last und den Energiespeicher. Dieser Zustand tritt ein, wenn der Energiespeicher geladen werden muss, da er leer ist und gleichzeitig eine Last anliegt. Durch das Laden des Energiespeichers, kann die Belastung der Brennstoffzelle erhöht werden, so dass sie auch bei geringen Lasten außerhalb des kritischen Lastbereiches arbeitet.

Das Diagramm vermittelt einen groben Eindruck von den Programmabläufen und den zu beantwortenden Fragestellungen. Ein solcher Programmablauf wäre durch die Verwendung einer Zustandsmaschine (State-Machine) gut umsetzbar. Der Ablauf ist logisch und nachvollziehbar, jedoch muss für jede Fragestellung ein exakter Schwellenwert der Antwort bestimmt werden. Es sind auch nicht alle Fragestellungen oder Problemfälle des Systems in das Diagramm eingebunden. Eine Aufnahme dieser könnte das Programm schnell sehr komplex und unübersichtlich machen. Die Frage, nach welchen Parametern das System geregelt ist, bleibt auch unbeantwortet, da es entweder an oder aus ist.

Um die Ja-Nein-Entscheidungen zu umgehen und keine festen Schwellenwerte zu definieren, ist es das Ziel, eine elegantere Lösung für den Programmablauf zu finden. Gleichzeitig soll das Design einfach gehalten und eine nachträgliche Erweiterung problemlos möglich sein.

### 5.4 Modularer Aufbau

Um den Aufbau eines Programms übersichtlicher und einfacher zu gestalten, bietet es sich an, alle Komponenten auf die gleiche Art und Weise anzulegen. Hierfür kann ein definiertes Gerüst verwendet werden. Zur Erstellung der Objekte und ihrer realen Komponenten werden deren Eigenschaften und Funktionen herangezogen. Jedes Objekt wird nach dem gleichen Prinzip aufgebaut und durch seine Charakteristika als Attribute beschrieben.

Die Attribute werden in folgende Kategorien unterteilt:

- Beschreibende Attribute
- Begrenzende Attribute
- Funktionale Attribute
- Variable Attribute

Die beschreibenden Attribute beziehen sich auf die Art des Objektes, angefangen bei der Art, dem Typ und seiner Bezeichnung. Zudem werden hier die Maße, das Gewicht und jegliche Informationen zu seinem Aufbau eingeordnet.

Die begrenzenden Attribute beziehen sich auf Informationen, die eingrenzenden Betriebsbereiche vorgeben. Gemeint sind also Maximal-, Minimal- und Nennwerte für den Strom, die Spannung oder die Temperatur. Aber auch die nominellen Nutzungsstunden oder der nominelle Wirkungsgrad. Diese Attribute stellen die Grundlage für Funktionen, welche sich aus diesen Attributen entwickeln.

Die Funktionalen Attribute sind vielmehr objekttypische Funktionen, welche den Bezug entweder zu Objekt internen Informationen also Attributen haben oder von außen über ein weiteres Attribut bzw. eine Funktion hinzugefügt werden.

Die Variablen Attribute beschreiben den Betriebszustand des Objektes. Gemeint sind also Zeit aktueller Werte. Zu diesen zählen der aktuell wirkende Strom, die Spannung, die herrschende Temperatur des Objekts und die Abgegebene Leistung.

## Konzeptionierung der Lösungsansätze

Tabelle 2: Aufbau der Objekte als Entitäten mit verschiedenen Attributs-Typen

	Brennstoffzelle	Energiespeicher	DC/DC-Wandler	Weitere Komponente
Beschreibende Attribute	Bezeichnung Typ Material Spezifische Eingänge [n] Ausgänge [n] Länge [m] Breite [m] Höhe [m] Gewicht [kg]	Bezeichnung Typ Material Spezifische Eingänge Ausgänge Länge [m] Breite [m] Höhe [m] Gewicht [kg]	Bezeichnung Typ Material Spezifische Eingänge Ausgänge Länge [m] Breite [m] Höhe [m] Gewicht [kg]	Bezeichnung Typ Material Spezifische Wärmekapazität Eingänge Ausgänge Länge [m] Breite [m] Höhe [m] Gewicht [kg]
Begrenzende Attribute	Nennspannung (nominell) Spannung min [V] Spannung max [V] Spannung Float [V] Kapazität nominell [Ah] Innenwiderstand Ri Leistung nominell [W] Strom nominell [A] Strom min [A] Strom max entladen[A/s] Strom max [A] Wirkungsgrad nominell Nominelle Externe Spannungsversorgung [V] Start Up Time [s] Temperatur max [°C] Temperatur min [°C]	Nennspannung (nominell) Spannung min [V] Spannung max [V] Spannung Float [V] Kapazität nominell [Ah] Innenwiderstand Ri [Ohm] Strom min [A] Strom max entladen[A/s] Nominelle Temperatur max [°C] Temperatur min [°C]	Nennspannung (nominell) Spannung min [V] Spannung max [V] Spannung Float [V] Kapazität nominell [Ah] Innenwiderstand Ri [Ohm] Strom min [A] Strom max [A] Netzeingag [AC, Hz] Eingangsleistung nominell Eingangsleistung max [W] Wirkungsgrad [%] Nominelle  Temperatur max [°C] Temperatur min [°C]	Nennspannung (nominell) Spannung min [V] Spannung max [V] Spannung Float [V] Kapazität nominell [Ah] Innenwiderstand Ri [Ohm] Strom min [A] Strom max [A] Netzeingag [AC, Hz] Eingangsleistung max [W] Nominelle Nutzungsstunden Temperatur max [°C] Temperatur min [°C]
Funktionale Attribute	Wirkungsgrad Funktion / U/I Kennlinie [Diagramm] Wasserstoffverbrauch [l/min]	Temperatur Einfluss auf Selbstentladung Kennline [Diagramm] Lade/Entlade Charakteristik [Diagramm]	Wirkungsgrad Input Wirkungsgrad Output Strom [Diagramm]  Kennlinie [Diagramm]	Kennlinie [Diagramm] Kennlinie [Diagramm]  Kennlinie [Diagramm]
Variable Attribute	Aktuelle Spannung [V] Aktueller Strom [I] Aktuelle Leistung [W] Aktuelle Temperatur [°C] Aktuelle Betriebsstunden Aktuelle Wirkungsgrad Wasserstoffverbrauch	Aktuelle Spannung [V] Aktueller Strom [V] Aktuelle Leistung [W] Aktueller SOC [%] Aktuelle Selbstentladung Aktuelle Temperatur [°C] [h]	Aktuelle Spannung IN [V] Aktuelle Spannung OUT[V] Aktueller Strom IN [V] Aktueller Strom OUT [V] Aktuelle Leistung [W] Aktuelle Temperatur [°C] [h]	Aktuelle Spannung [V] Aktueller Strom [I] Aktuelle Leistung [W] Aktuelle Temperatur [°C] Aktuelle Betriebsstunden [h] Aktueller Widerstand [Ohm] Variable

Die Tabelle 2 beinhaltet eine mögliche Umsetzung des beschriebenen Aufbaus. So sind die Komponenten BSZ, ES, DC/DC-Wandler gleich gestaltet. Weitere Komponenten folgen dem Beispiel. In den beschreibenden Attributen liegt der unterschied rein in den hinterlegten Werten dieser. Unterschiede werden in den funktionalen Attributen ersichtlich, diese unterscheiden sich je nach Art der Komponente. Durch diesen Aufbau ist es jedoch gut möglich weitere Komponenten der gleichen Art nachträglich in die Programmanwendung zu implementieren. Die Attribute werden über die Angaben der Datenblätter der Hersteller beschrieben.

## 5.5 Datenbank

Bis zum Ende der 60er Jahre war es noch gängige Praxis für Programme und Anwendungen Daten als Dateien zu speichern. So wurden Daten oft mehrfach gehalten und die Übersicht über die abgelegten Informationen ging verloren. So entstanden Ende der 60er Jahre die ersten Datenbanken. Hierbei werden sämtliche Daten zentral gespeichert und verwaltet [34, S. 1].

Auch für die zu entwickelnde Programmanwendung kann die Verwendung einer Datenbank nützlich sein. Hier liegt der Fokus weniger auf der Zentralen Sammlung der Umlaufenden Daten, sondern vielmehr in der Strukturierten Anordnung und Ablage dieser.

So kann eine Datenbank die Ergebnisse eines Programmdurchlaufes speichern und für zukünftige Anwendung zur Verfügung stellen. In dem Kapitel zum modularen Aufbau wurde darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Komponenten in ihren Attributen ähnlich aufgebaut sind und es zudem je nach Art und Hersteller eine Vielzahl davon existieren. Die Verwendung einer Datenbank ermöglicht hier die Hinterlegung verschiedener Komponententypen und ermöglicht zudem die Schaffung von Rohlingen bzw. Komponenten Gerüsten, die dann nur noch entsprechend gefüllt werden müssen.

Eine Datenbank ist gut skalierbar und kann eine mehrdimensionale Verknüpfung der abgelegten Daten schaffen. So können verschiedene Programmanwendungen und Funktionen innerhalb eines oder mehrere Programme darauf zugreifen. Zudem wird die redundante Ablage oder auch Eingabe von Informationen vermieden. Auch eine Vermeidung von Fehlern ist dadurch gegeben, wenn bestimmte Bereiche in der Art ihres Informationsgehaltes vordefiniert sind [35].

Es bietet sich daher an, die beschriebenen Entitäten der Objekte innerhalb einer Datenbank abzulegen, um diese später zu befüllen, wiederaufzurufen oder zu vervielfältigen.

## 6 Konzeptentwicklung anhand fiktiver Kosten

In der geplanten Konzeptionierung eines Brennstoffzellen Hybridsystems, gehören sowohl die Brennstoffzelle als auch der Energiespeicher zu den wesentlichen Komponenten, auf denen das Gesamtsystem aufgebaut wird. Die Beschaffungskosten von Brennstoffzelle und Energiespeicher liegen aktuell weit über den Beschaffungskosten weiterer Hardwarekomponenten des Versuchsaufbaus.

Die Komponenten unterliegen einem Alterungsprozess, der einen Austausch der Komponenten erforderlich macht. Dies ist dann der Fall, wenn diese nicht mehr ihre Arbeitspunkte den Anforderungen und Erwartungen entsprechend erreichen können. Durch die Hersteller wird eine ungefähre Lebenserwartung angegeben.

Eine Verkürzung dieser Lebenserwartung, sowie die grundsätzliche Reduktion der Komponenten treten für den Betreiber der Anlage als Kosten auf.

Die Lebenserwartung hängt dabei stark von der Betriebsweise und Beanspruchung der Komponenten ab. Für die Brennstoffzelle und den Energiespeicher sind genau solche Betriebsweisen und Beanspruchung beschrieben. Daher ist es aus wirtschaftlicher Sicht von großem Interesse den Zeitpunkt des Ausfalls und die damit verbundene Neubeschaffung so weit wie möglich hinauszuzögern. Im Umkehrschluss, kann jedoch jegliche Betriebsweise, die diesen Zeitpunkt vorzeitig herbeiführt, als eine Betriebsweise mit erhöhten Kosten interpretiert werden. Durch die Einführung von sogenannten fiktiven Kosten wird gerade diese Betrachtung

wiedergegeben. Fiktiv sind die Kosten, da sie noch nicht greifbar sind und nur unter den genannten Voraussetzungen in Erscheinung treten.

Die fiktiven Kosten definieren sich über die Verkürzung der Lebensdauer einer Komponente und den damit verbundenen Kostenaufwand für die Neubeschaffung. Die fiktiven Kosten besitzen keine feste Wertangabe oder Währungseinheit. Sie beschreiben das Verhältnis zwischen der maximal angegebenen Lebensdauer und der tatsächlichen Verkürzung durch die aktuelle Beanspruchung der Komponente. Es ist dabei wichtig herauszustellen, welche Betriebsweisen und Beanspruchungen zu einer Verkürzung der Lebensdauer führen.

Tabelle 3: Übersicht über mögliche Komponentenkosten, der Lebenserwartung und deren Verhältnissen.

	Komponente A	Komponente B	Verhältnis	Faktor
Anschaffungskosten	2.000€	500€	4 zu 1	$F_{Anschaffung}$
Zu erwartende Lebensdauer	10 Jahre	5 Jahre	2 zu 1	$F_{Lebensdauer}$

Die Tabelle 3 enthält Informationen zu den Kosten und Lebenserwartungen der Komponenten A und B einer Anlage. Um die Kosten zu vereinheitlichen, wird ein Verhältnis der Kosten gebildet, sodass die fiktiven Kosten im Verhältnis zu den Kosten der jeweiligen Komponenten der Anlage stehen. Ein Reduktionsfaktor beschreibt die Auswirkung eines bestimmten Lastfalls auf die Lebenserwartung der Komponenten. Die fiktiven Kosten berücksichtigen auch die Kosten der zugeführten Primärenergie, wenn die Anlage oder einzelne Komponenten in einem schlechteren Arbeitspunkt betrieben werden, was ebenfalls durch ein Verhältnis wiedergegeben wird. Die fiktiven Kosten sind einheitslos und fallen an, wenn die Komponenten belastet werden.

Im Folgenden ist eine mögliche Ausformulierung der Kosten angegeben. Hierbei ist  $F_{Anschaffung}$  der Anschaffungsfaktor, der Kosten.  $F_{Lebensdauer}$  der Faktor der Lebensdauer und  $F_{Reduktion}(P)$  der zu erwartende Reduktionsfaktor der Last. In Addition der Kosten eines erhöhten Verbrauchs ergeben sich die fiktiven Kosten des Leistungspunktes  $K_{Fiktive}(P)$ . Das Verhältnis aus optimalem Wirkungsgrad  $\eta_{Optimal}$  und dem aktuellen Wirkungsgrad  $\eta_{Komponente}$  wird mit den Energiekosten  $K_{Energie}$  multipliziert.

$$\frac{F_{Anschaffung}}{F_{Lebensdauer}} \cdot F_{Reduktion}(P) + \frac{\eta_{Komponente}}{\eta_{Optimal}}(P) \cdot K_{Energie} = K_{Fiktive}(P)$$

## 6.1 Regelung und Management über fiktive Kosten

Rückblickend auf das Ablaufdiagramm aus Kapitel 5.3 und die dort getroffenen Ja/Nein-Entscheidungen, besteht die Idee darin jegliche Regelung einem zentralen System zu überlassen. Hierbei dienen die fiktiven Kosten als Lösungsansatz. Ist der Betrieb einer einzelnen Komponente und ihrer Belastungsgrenzen über eine Kostenfunktion definiert, so verhindert diese durch einen rasanten Anstieg ihrer Kosten den Betrieb außerhalb eines zulässigen Bereichs.

Die Kostenfunktion berücksichtigt jene Faktoren, die zu einer verfrühten Alterung der Komponenten führen, durch einen entsprechenden Anstieg. Die Kosten der jeweiligen Komponenten werden einander gegenübergestellt. Durch den Einsatz einer Lösungsfunktion wird für die anliegende Belastung, unter Berücksichtigung des jeweiligen Wirkungsgrades, der optimale Betriebspunkt für jede Komponenten gewählt.

In den folgenden Unterkapiteln sind Kostenverläufe in Abhängigkeit der Einflüsse dargestellt. Hierbei werden diese als Reduktionsfaktor in Abhängigkeit der Belastung sowie Änderung des Wirkungsgrades durch die Belastungen dargestellt.

### 6.2 Kostenverläufe der Brennstoffzelle

Im Folgenden werden mögliche Verläufe der fiktiven Kosten anhand eines Einflusses auf den Wirkungsgrad und der Entstehung eines Reduktionsfaktors für eine BSZ dargestellt.

#### 6.2.1 Wirkungsgrad-Leistungsverlauf der BSZ

In Abbildung 30 sind Wirkungsgradverläufe einer Brennstoffzelle (BSZ) dargestellt. Der linke Verlauf zeigt den Einfluss einer steigenden Belastung auf den Wirkungsgrad. Bei höheren Leistungen nimmt der Wirkungsgrad ab, was den maximal abrufbaren Leistungsbereich wiedergibt. Diese Abbildung basiert auf verschiedenen Herstellerangaben für Brennstoffzellen.

Die Darstellung in der Mitte zeigt den Einfluss einer steigenden Temperatur auf den Wirkungsgrad. Es wird angenommen, dass der Wirkungsgrad linear abnimmt, wenn die Temperatur steigt. Diese Auswirkung ist für einen begrenzten Temperaturbereich der Brennstoffzelle nicht stark ausgeprägt. Hier wird jedoch nur der Einfluss auf den Spannungswirkungsgrad der Zelle anhand der Reaktionsenthalpie berücksichtigt. Die tatsächliche Auswirkung kann von der abgebildeten abweichen.

Die Abbildung rechts zeigt den Einfluss der Alterung auf den Wirkungsgrad. Es wird angenommen, dass der Wirkungsgrad mit fortschreitender Alterung der Brennstoffzelle abnimmt. Etwaige Effekte können sich verstärken, bis der Wirkungsgrad immer weiter abnimmt. Es wird jedoch angenommen, dass die grundlegende Funktion der Zelle auch bei zunehmender Alterung erhalten bleibt.

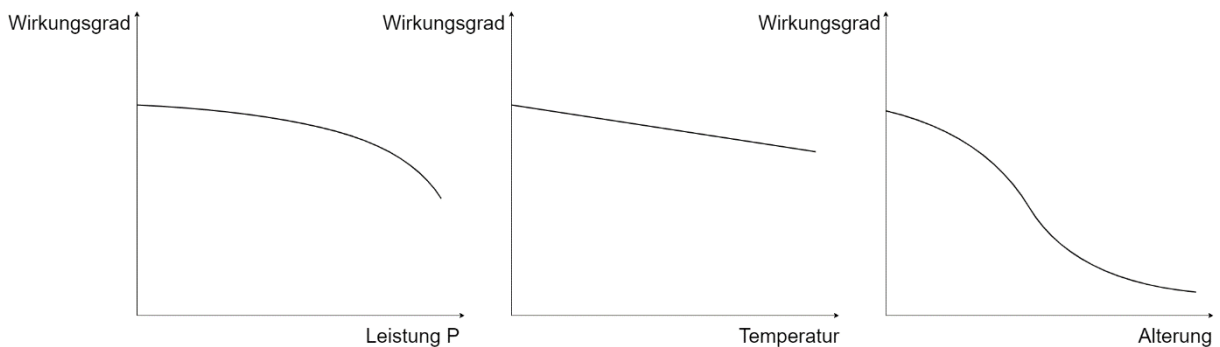


Abbildung 30: Wirkungsgrade von BSZ



6.2.2 Reduktionsfaktor - Leistungsverlauf der BSZ

Der angenommene Verlauf eines Reduktionsfaktors über der Leistung, der BSZ ist in der Abbildung 31 dargestellt.

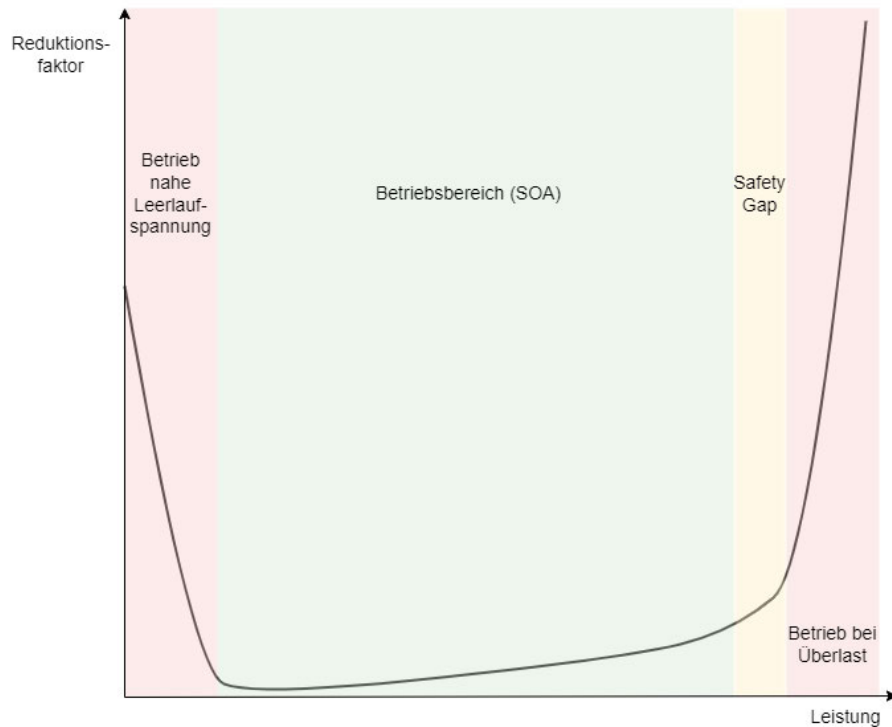


Abbildung 31: Verlauf der fiktiven Kosten bei steigender Leistung.

Da die BSZ nicht bei Spannungen nahe der Leerlaufspannung betrieben werden soll, ist der Reduktionsfaktor bei geringen Leistungen bereits erhöht und nimmt zunächst bei Zunahme der Leistung ab. Diese Abnahme erfolgt bis der Betriebsbereich der Zelle erreicht wird, dieser ist von einem Hersteller für eine Zelle angegeben. Der grüne Bereich zeichnet den sicheren Betriebsbereich der BSZ ab. Der Reduktionsanstieg ist hier moderat abgebildet. Steigt die Leistung weiter an, steigt auch die Reduktion, da hier zulässige Ströme überschritten werden, welche die BSZ angreifen. Der Safety-Gap wird durch einen stärkeren Kostenanstieg verwirklicht, so dass der Betrieb außerhalb der Grenzen möglichst vermieden wird.

6.2.3 Reduktionsfaktor - Temperaturverlauf der BSZ

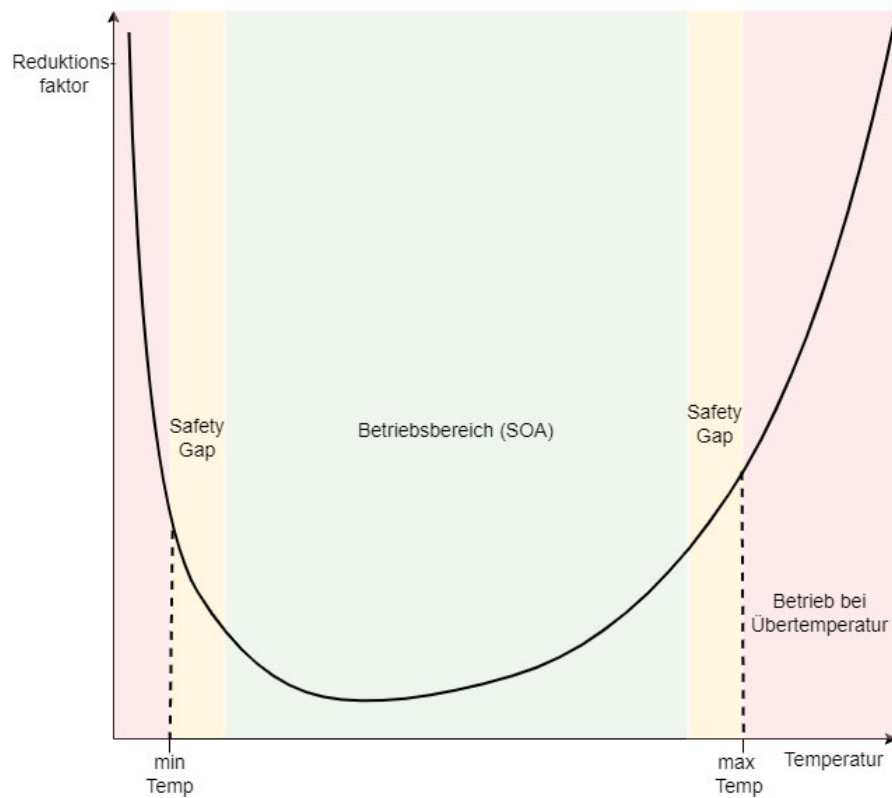


Abbildung 32: Verlauf der fiktiven Kosten in Abhängigkeit der Temperatur

Das Temperaturniveau hat auf den Reduktionsfaktorverlauf bei Überschreitung der Betriebswerte einen starken Einfluss. Auch hier führt ein Betrieb außerhalb der vorgegeben Temperaturniveaus zu einer erhöhten Beanspruchung, welche durch einen Anstieg des Reduktionsfaktors wiedergeben wird. Die Steigung ist im Bereich des „Safety-Gap“ deutlich stärker ausgeprägt. So kann ein Betrieb der BSZ, bei zu hohen oder niedrigen Temperaturen, vermieden werden.

### 6.2.4 Reduktionsfaktor-Lastwechselverlauf der BSZ

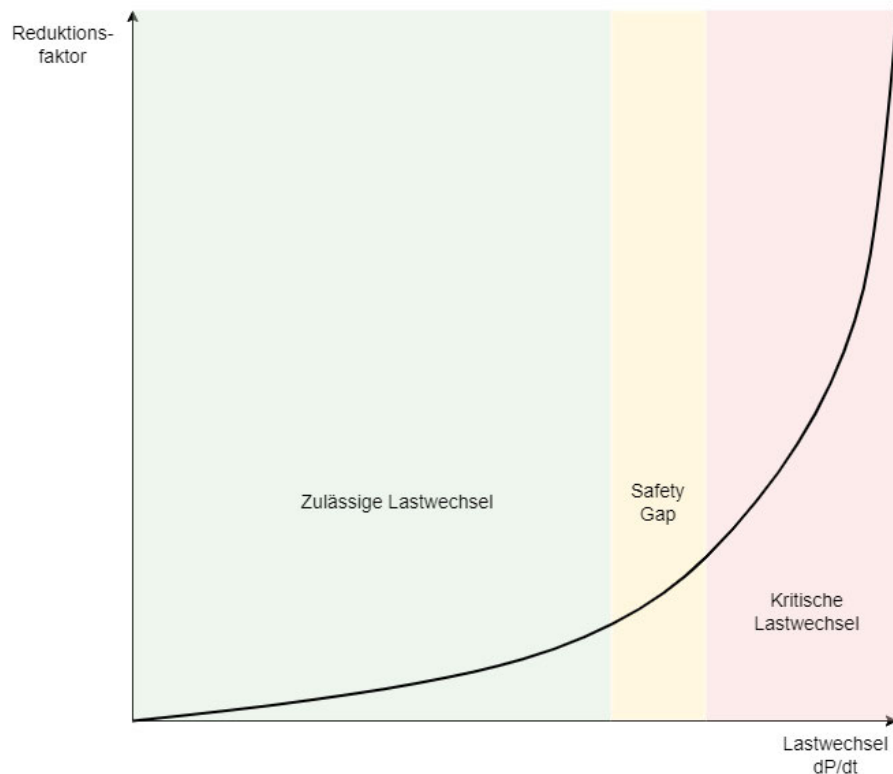


Abbildung 33: Fiktiver Kostenverlauf der BSZ bei auftretenden Lastsprüngen.

Die BSZ wird durch auftretende Lastsprünge oder Lastschwankungen stark belastet. Hierbei verkürzt sich die Lebensdauer der Zelle. Die Lastsprünge sind zum einen über die Leistungsunterschiede und zum anderen über die Häufigkeit dieser definiert. Sind die Lastsprünge zu groß oder treten zu häufig in Erscheinung, lässt sich dies durch einen rasanten Anstieg des Reduktionsfaktors interpretieren.

### 6.3 Bildung der Kosten aus Reduktionsfaktor und Wirkungsgrad

Um den Verlauf der Kosten einer Komponente aus dem Reduktionsfaktor und dem Wirkungsgrad abzubilden, müssen diese in einem entsprechenden Verhältnis zueinander gesetzt werden. Die Kosten definieren sich hierbei über die Reduktion und den Anschaffungspreis der Komponente, und der Wirkungsgrad nimmt durch einen Mehrverbrauch der zugeführten Energie Einfluss. Der Mehrverbrauch tritt dann auf, wenn die Komponente außerhalb ihres optimalen Wirkungsgrades arbeitet, um einen Reduktionsfaktor klein zu halten. So sind die zusätzlich benötigte Energie und die damit verbundenen erhöhten Energiekosten für einen möglichen Lastpunkt zu berücksichtigen. Um eine klare Verhältnismäßigkeit zu bilden, ist eine weitere Analyse der Energiekosten und der Komponentenkosten erforderlich. Das folgende Diagramm (Abbildung 34) zeigt eine mögliche Kostenabbildung aus Reduktionsfaktor und Wirkungsgrad.

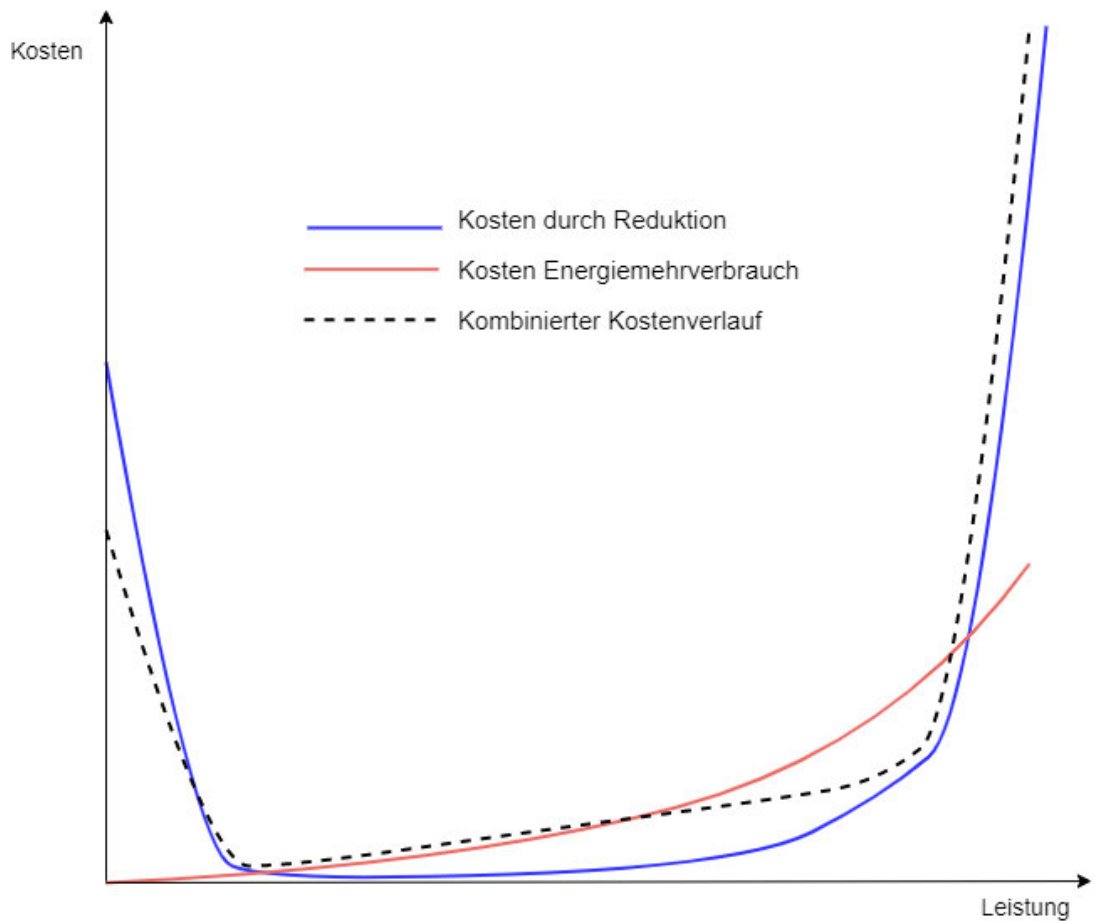


Abbildung 34: Kostenverläufe des Reduktionsfaktors sowie eines Energiemehrverbrauchs und der Kombination beider für eine BSZ.

Hierbei sind die Kosten der Reduktion in Blau sowie die Kosten eines Energiemehrverbrauchs in Rot abgebildet. Der Verlauf des Energiemehrverbrauchs entspricht dem vertikal gespiegelten Wirkungsgradverlauf in Abhängigkeit der Leistung.

## 6.4 Kostenverläufe des Energiespeichers

Für den Energiespeicher erfolgt die Entwicklung der Kostenverläufe analog zu dem der BSZ.

### 6.4.1 Reduktionsfaktor - Leistungsverlauf des E-Speichers

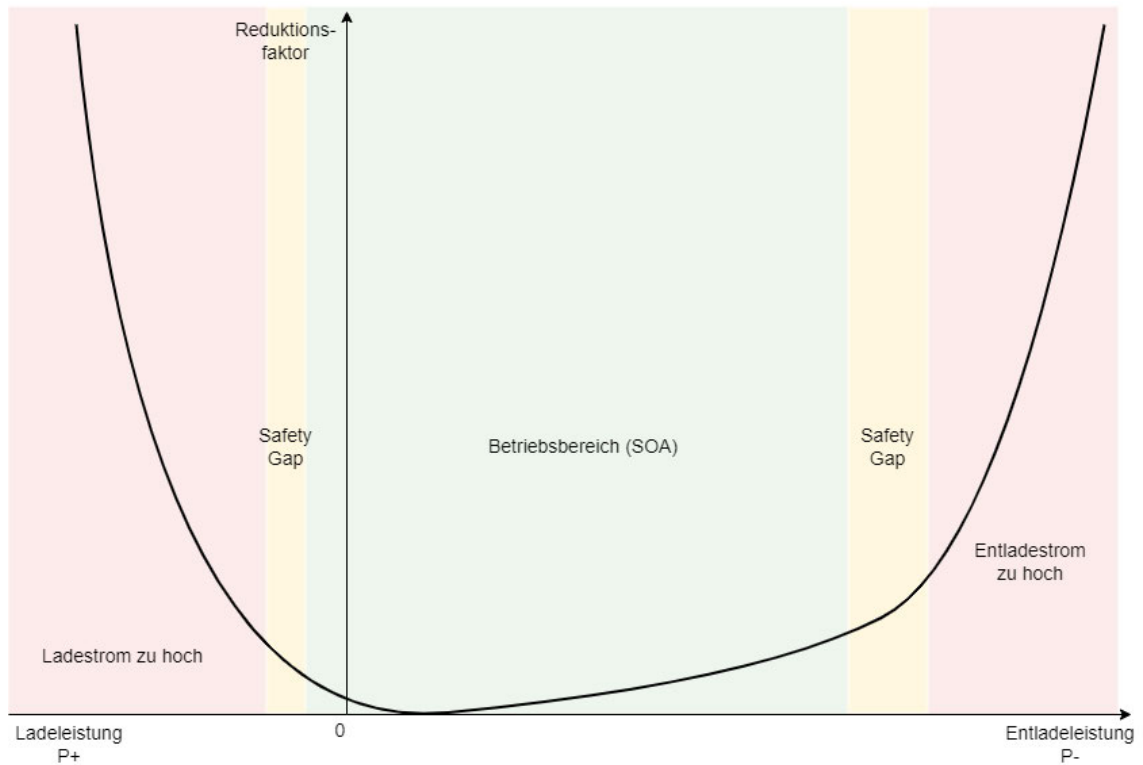


Abbildung 35: Verlauf der fiktiven Kosten eines Energiespeichers zur Leistung.

Die meisten elektrochemischen Energiespeicher werden durch starke Lade- und Entladeströme belastet. Hohe Lade- und Entladeleistungen, die einen hohen Strom erfordern, sind in der Abbildung 35 durch einen starken Faktoranstieg verzeichnet. Hierbei kann der noch zulässige Ladestrom höher ausfallen als der Ladestrom des Speichers. Durch den verstärkten Anstieg innerhalb der Safety-Gaps wird versucht, den Speicher innerhalb des Betriebsbereichs zu betreiben.

6.4.2 Reduktionsfaktor - Temperaturverlauf des E-Speichers

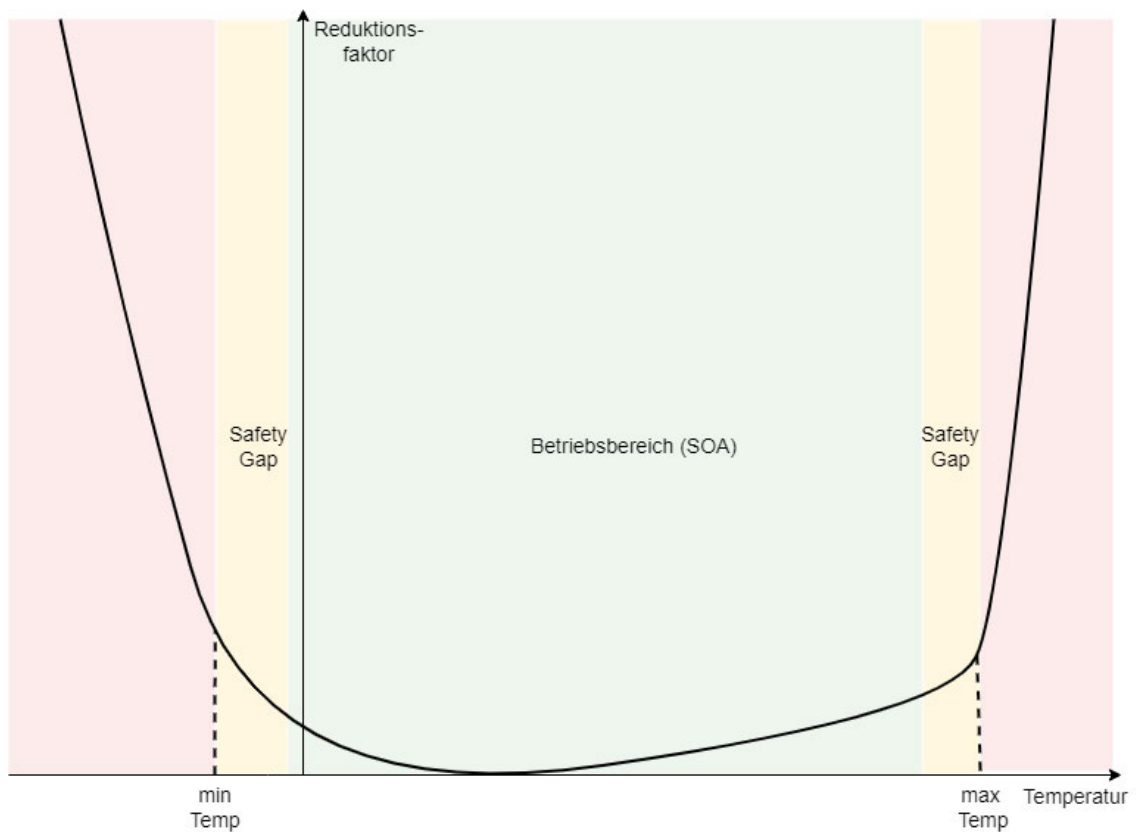


Abbildung 36: Fiktive Kosten des Energiespeichers in Abhängigkeit der Temperatur.

Wie bei der BSZ sind auch für die meisten E-Speicher begrenzende Temperaturen vorgegeben. Diese bestimmen den Betriebsbereich des Speichers. Hierbei ist die Reduktion moderaten. Ein Betrieb außerhalb dieser Grenzen oder abweichend von den Ideal Temperaturen belastet den Speicher. Dieses Verhalten wird durch einen Anstieg des Reduktionsfaktors wiedergegeben (Abbildung 36).

### 6.4.3 Wirkungsgrad-Leistung-Verlauf ES

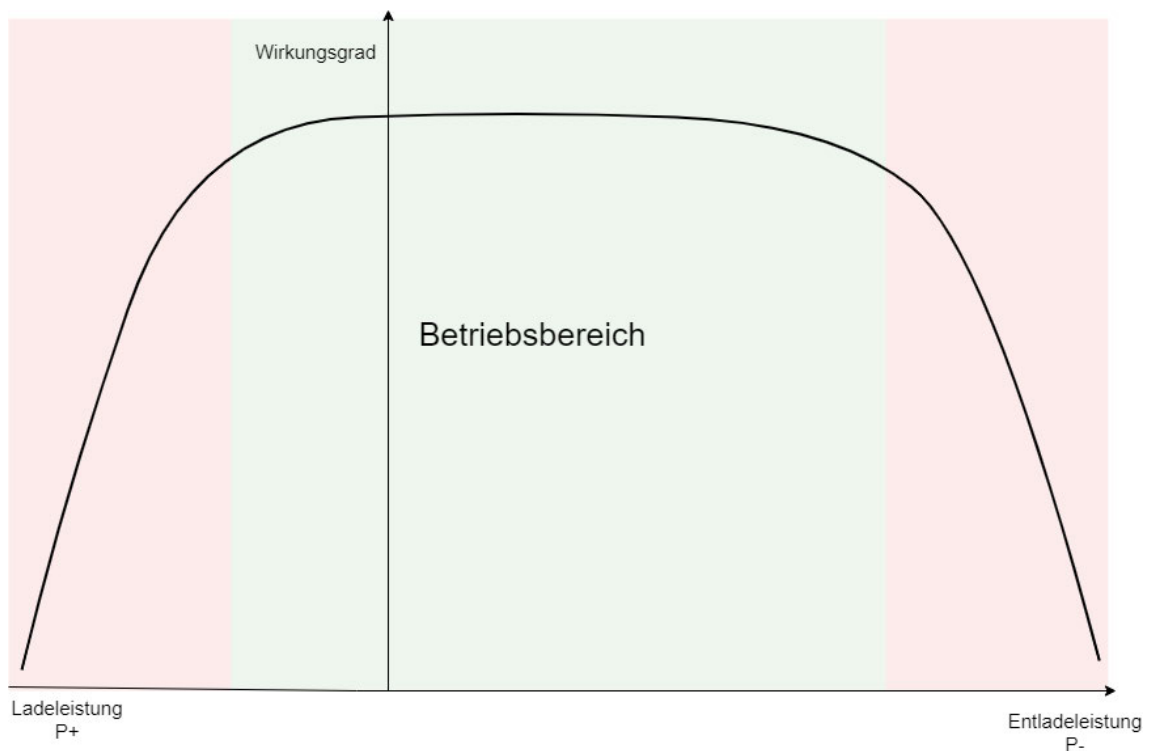


Abbildung 37: Verlauf des Wirkungsgrades eines ES in Abhängigkeit der Leistung

Im Falle einer LIB ist der Wirkungsgrad innerhalb des Betriebsbereichs als gut anzunehmen. Dieser Verlauf wird in diesem Diagramm (37) aufgezeigt. Der Wirkungsgrad verschlechtert sich erst dann, wenn die Lade und Entladeleistung deutlich erhöht wird. Eine deutliche Verschlechterung des Wirkungsgrades wird erst durch eine Degradation der LIB erreicht.

### 6.4.4 Einfluss des SOC auf Kosten des Speichers

E-Speicher sind deutlich weniger anfällig für Lastwechsel und werden durch diese nicht in der gleichen Art degradiert wie die BSZ. Aus diesem Grund werden die Lastwechsel in dem Kostenverlauf der Speicher nicht berücksichtigt.

Eine wesentliche Auswirkung auf die Kosten hat jedoch die zyklische Alterung der Speicher. Die DOD bzw. der SOC beschreiben den Prozentualen Energiegehalt des Speichers. Erfolgt eine Ladung oder Entladung des Speichers bei ungünstigem SOC hat dies einen wesentlichen Einfluss auf die entstehenden Kosten. In Abhängigkeit vom SOC kann die Leistungsabgabe oder Aufnahme auch günstig für die zyklische Alterung sein, wenn dadurch die Zyklenzahl reduziert wird. Dieses Verhalten ist in der Abbildung 38 dargestellt. Der Einfluss auf die Kosten in Abhängigkeit der Leistung wird durch ein Strecken und Stauchen durch entsprechende SOC werte angenommen. Ausgehend von einem Speicher mit einem SOC von 70%, steigen die Kosten entsprechend sollte der Speicher weiter geladen werden. Eine Entladung hingegen ist bei höherem SOC günstiger.

## Konzeptentwicklung anhand fiktiver Kosten

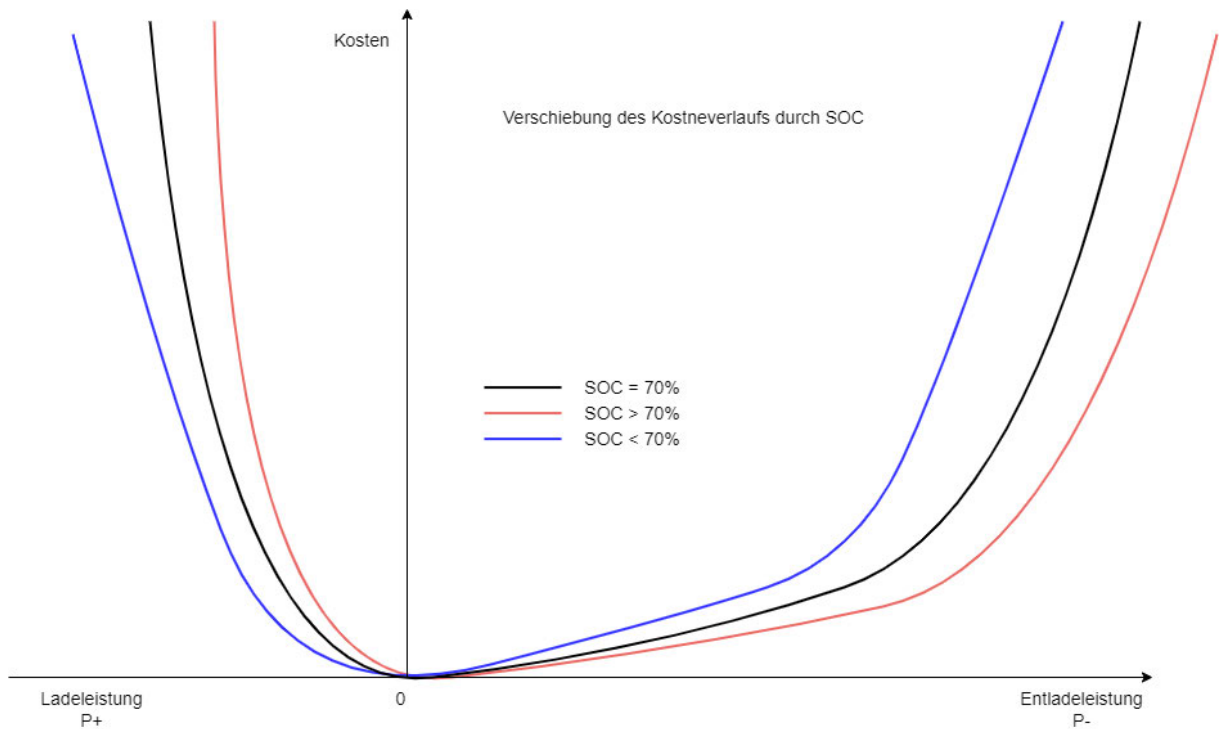


Abbildung 38: Einfluss des SOC auf den Kostenverlauf bei Lade- und Entladeleistung.

Ist der Speicher mit nur 30% geladen, wäre eine weitere Entladung ungünstig. Eine Ladung des Speichers hingegen kann durch eine negative Kostenentwicklung interpretiert werden. Durch das Laden wird der Speicher vor einer weiteren Degradation durch hohe Entladespannungen bewahrt. Dieses Verhalten ist in der Abbildung 39 aufgeführt.

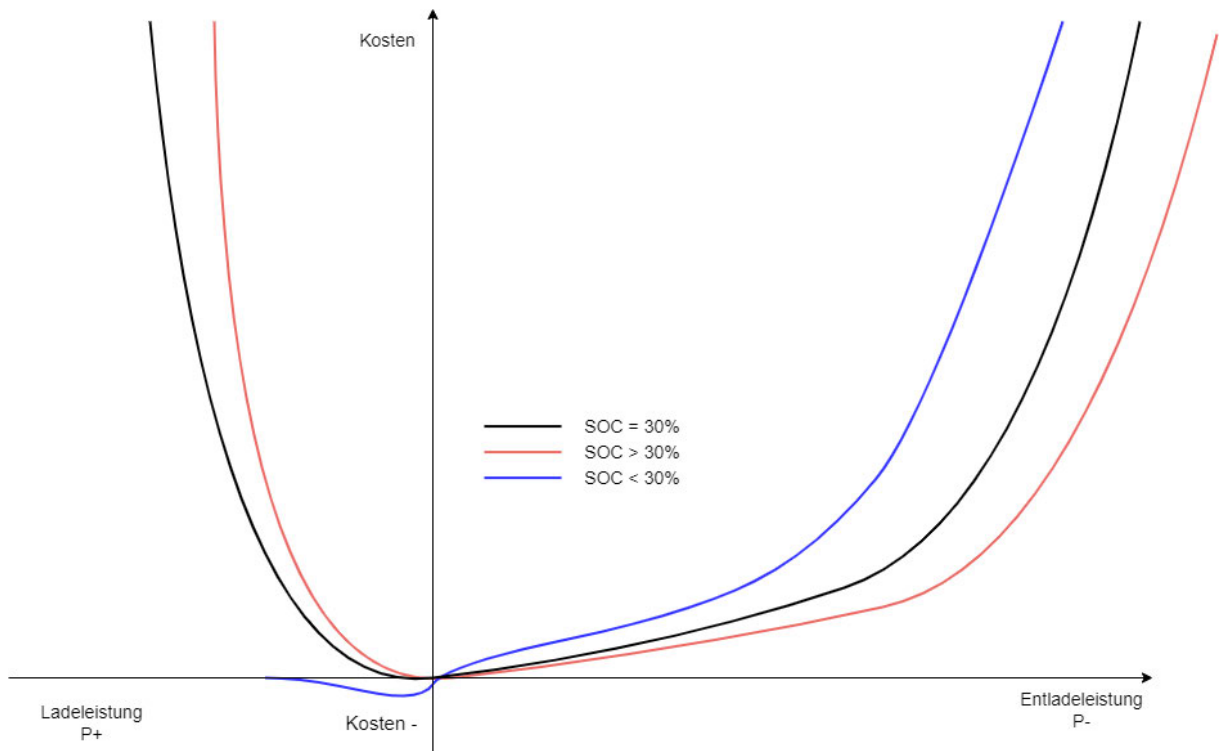


Abbildung 39: Kosten/Leistungsverlauf in Abhängigkeit des SOC, die Kosten können negativ werden, wenn der Speicher unbedingt geladen werden sollte.

Die blaue Kurve zeigt den Kostenverlauf eines Speichers bei weniger als 30% Restladung. Um eine Ladung dieses Speichers zu begünstigen, ist der Kostenverlauf für eine moderate



Ladungsleistung negativ angegeben. Folgt das System dem Verlauf wird eine Schädigung des Speichers vorgebeugt.

## 6.5 Ermittlung des Optimums

Sind die Kostenverläufe für die Komponenten bekannt, werden diese einander gegenübergestellt.

Die verwendeten Komponenten konkurrieren demnach um die Vermeidung von Lastaufnahmen welche Kosten verursachen. Um für einen Betriebszustand und einer Entsprechenden Leistungsbeanspruchung die geringsten Kosten zu ermitteln, bedarf es einer optimalen Verteilung der Leistung auf die verwendeten Komponenten. Die folgende Grafik zeigt, wie eine solche Verteilung aussehen kann, um die geringsten Gesamtkosten im System zu erhalten. Die Ermittlung eines Optimums erfolgt hier händisch an der aufgeführten Grafik.

Diese Werte sind Einheitslos und nicht weiter zu interpretieren, sie dienen nur dazu den Zusammenhang zu verdeutlichen. Jegliche Kostenverläufe sind in Annäherung auf die beschriebenen Einflüsse erstellt und sollen diese widerspiegeln. In dem zu entwickelnden Programm müssten die Kostenverläufe für jede Komponente anhand ihrer Charakteristiken, den Einflüssen und deren realen Auswirkungen entwickelt werden.

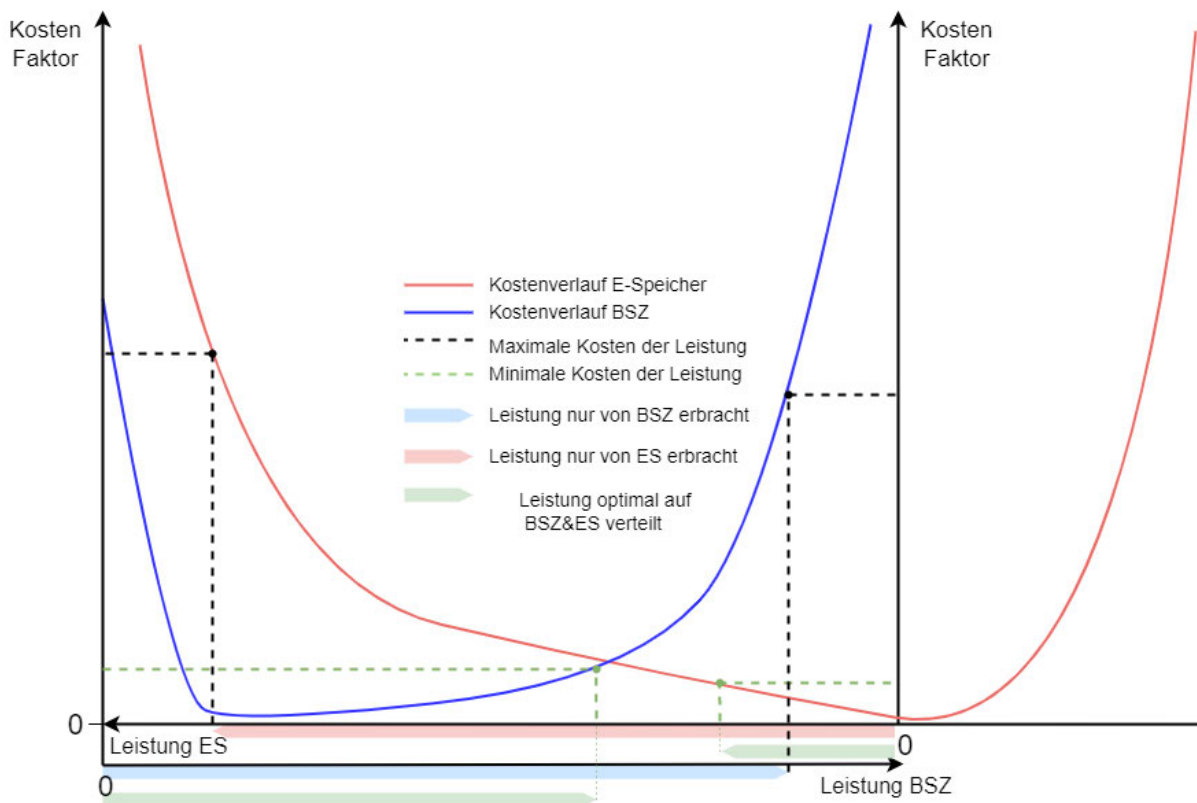


Abbildung 40: Gegenüberstellung der Kosten von BSZ und E-Speicher und Auswahl eines Optimums.

Es sind die Kostenverläufe des Speichers und der Brennstoffzelle in der Abbildung 40 dargestellt. Der Graph des Kosten-Lastverlaufs des ES wird dabei auf der Y-Achse gespiegelt und auf den Graphen der BSZ verschoben. Es handelt sich also um zwei Graphen in einer Abbildung.

Für das Gesamtsystem wird eine bestimmte Leistungsabgabe gefordert, die sowohl von der BSZ als auch vom ES einzeln bereitgestellt werden kann. Wenn die Leistung nur von einer

Komponente allein bereitgestellt wird, sind die Kosten entsprechend hoch. Die Leistungen werden als blauer Pfeil für die BSZ und als roter Pfeil für den ES dargestellt. Die schwarz gestrichelten Linien zeigen eine Kostenentnahme der Verläufe.

Es gilt also, die Leistung so zu verteilen, dass die Gesamtkosten minimal werden. Die grünen Pfeile zeigen eine Aufteilung der geforderten Gesamtleistung, bei der die Kosten deutlich geringer ausfallen. Diese sind der grün gestrichelten Linie zu entnehmen. Die Kosten für die Leistungspunkte von BSZ und ES summieren sich und liegen deutlich unterhalb der zuvor ermittelten Kosten.

Dieses Vorgehen zeigt ein mögliches Optimierungsverfahren in Bezug auf die anfallenden Kosten für einen Leistungspunkt. Für eine Umsetzung innerhalb einer Programmanwendung ist eine Ausformulierung dieser Optimierung erforderlich.

### 6.6 Ausschnitte eines möglichen Programmaufbaus

Im Folgenden wird ein möglicher Programmaufbau vorgestellt. Dazu werden Ausschnitte des Programms in einem Entity-Relationship-Modell (ERM) dargestellt.

Über ein ERM werden die Beziehungen zwischen den Entitäten und deren Attributen verdeutlicht. Das Diagramm 41 zeigt die Zusammenhänge zwischen der Brennstoffzelle (BSZ), dem Energiespeicher (E-Speicher) und einer Last. Einflussfaktoren und Regelungskomponenten sind durch weitere Entitäten dargestellt.

## Konzeptentwicklung anhand fiktiver Kosten

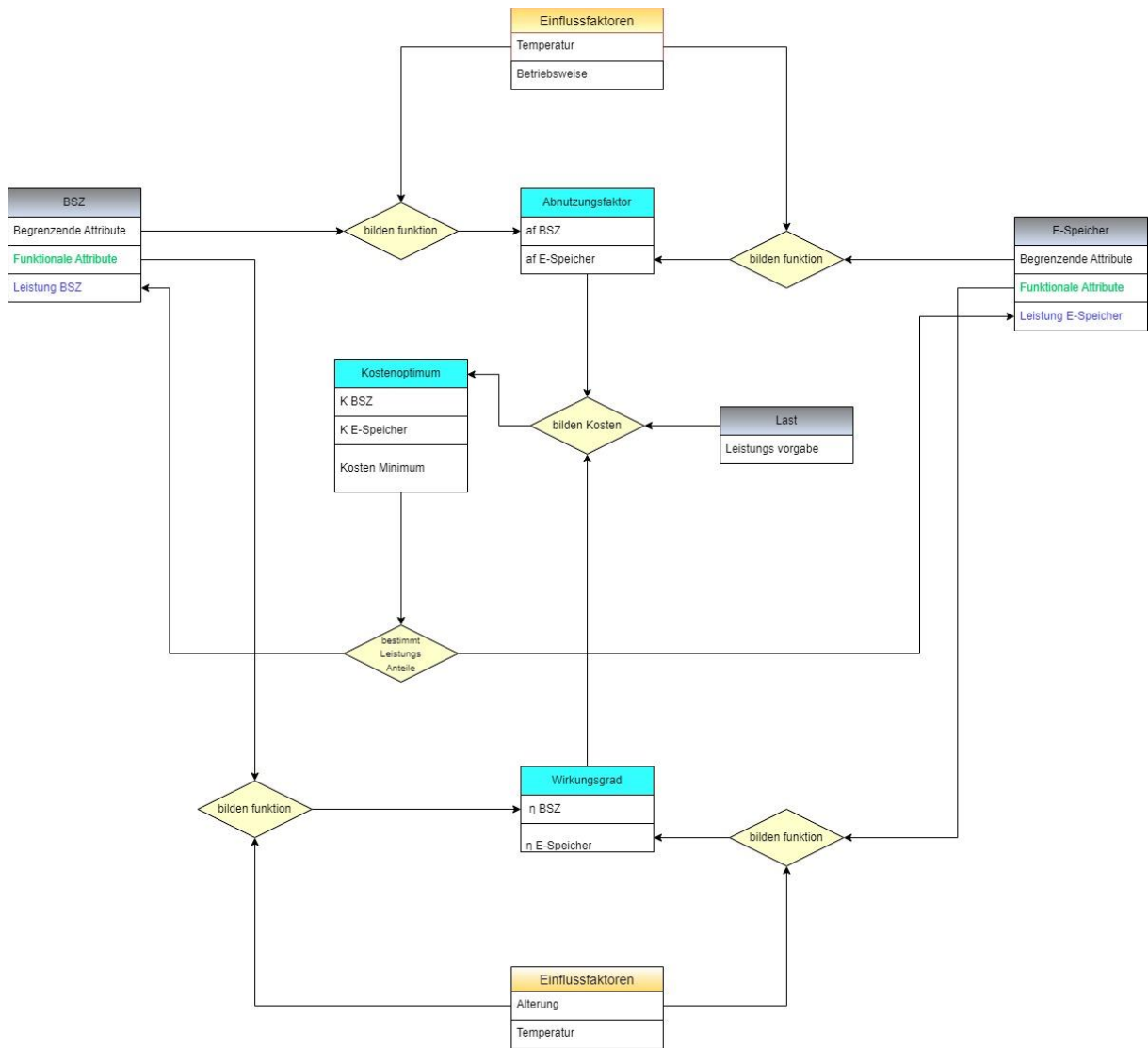


Abbildung 41: ERD von Brennstoffzelle und Energiespeicher zu der Leistungsbestimmung über die Kosten

Die Begrenzenden Attribute von BSZ und E-Speicher bilden in Zusammenhang mit den Einflussfaktoren, Temperatur und Betriebsweise, eine Funktion, welche für beide Komponenten einen Abnutzungsfaktor anhand der Leistung beschreibt. Im Zusammenwirken mit dem Wirkungsgrad bilden sich so die Kosten für die Leistung.

In der Entität des Kostenoptimums werden die Kosten von BSZ und ES gegenübergestellt. Durch ein Optimierungsverfahren werden die jeweiligen Leistungsanteile der Komponenten bestimmt. Dabei sollen die Gesamtkosten minimal werden.

Die funktionalen Attribute sowie der Alterungseinfluss geben den Wirkungsgradverlauf von Brennstoffzelle und Energiespeicher an.

Die Leistung tritt ebenfalls als Entität in Erscheinung und gibt die geforderte Gesamtleistung des Systems vor.

Ändert sich der Lastfall oder entsprechende Einflussfaktoren, erfolgt die Ermittlung der Leistungsanteile anhand der Änderungen erneut.

In einem weiteren ERM (Abbildung 42) ist die Wärmeentwicklung im Zusammenspiel mit einer Komponente und der Umgebung dargestellt. Die Komponente ist hierbei beliebig und beispielhaft.

## Konzeptentwicklung anhand fiktiver Kosten

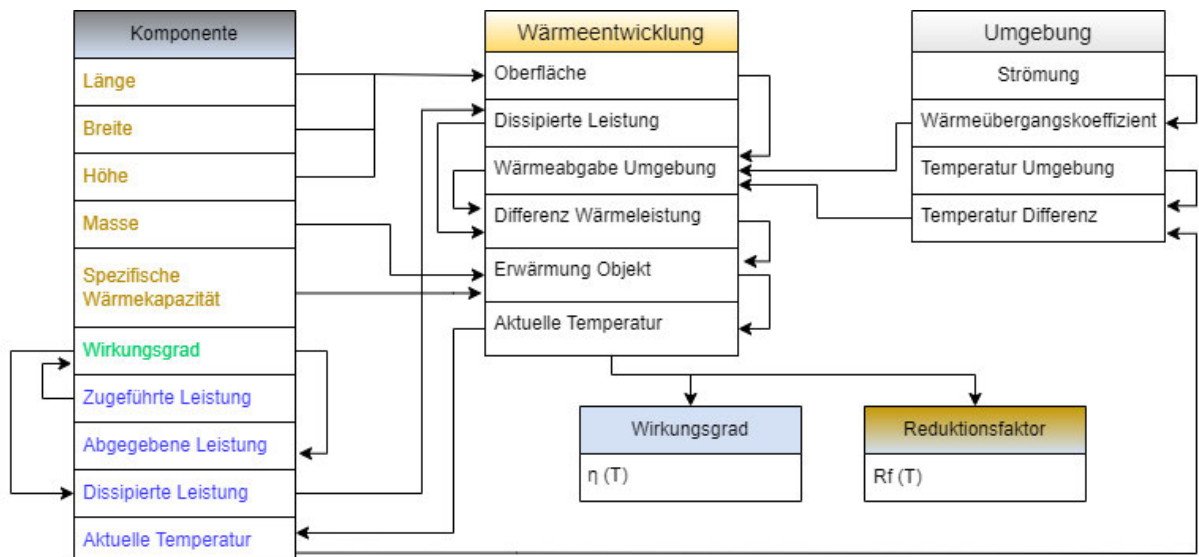


Abbildung 42: ERD der Wärmeentwicklung eines Objektes.

Die Zugeführte Leistung unterteilt sich an der Komponente durch ihren Wirkungsgrad in die abzugebende Nutzleistung und die auftretende Dissipation als Wärmeleistung. Die dissipierte Leistung wird der Entität der Wärmeentwicklung übergeben.

Die beschreibenden Attribute der Komponente, hier Längenmaße, Masse und die spezifische Wärmekapazität werden ebenfalls der Wärmeentwicklung als Information zur Verfügung gestellt.

Die Entität der Umgebung besitzt als Attribut einen Wärmeübergangskoeffizienten sowie eine Temperatur. Auch diese Angaben fließen in Wärmeentwicklung.

Die Entität der Wärmeentwicklung besitzt die Funktionen, um aus diesen Angaben die Wärmeabgabe an die Umgebung zu bestimmen. Zudem bildet sie aus der dissipierten Leistung und der Wärmeabgabe eine Differenz. Durch eine weitere Funktion und der Berücksichtigung beschreibenden Attribute der Komponente wird so die im Objekt entstehende Temperatur bestimmt und an dieses zurückgegeben.

Diese Temperatur wird auch an weitere Entitäten, die des Wirkungsgrades und des Reduktionsfaktors übergeben. So können diese die Temperatur innerhalb ihrer Funktionen verwenden und daraus einen Rückgabewert generieren.

Anhand dieser Beispiele sollte der Aufbau des Programms erfolgen. Es sind weitere Modelle für die unterschiedlichen Entitäten und deren Zusammenspiel erforderlich.

## 7 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde ein Brennstoffzellenhybridversuchsstand untersucht, wobei der Fokus auf den Komponenten Brennstoffzelle und elektrochemischem Energiespeicher lag. Es wurden verschiedene Typen von Brennstoffzellen und Energiespeichern für den Versuchsaufbau vorgestellt und Entscheidungskriterien für eine Auswahl erläutert. Weitere Bestandteile wie Regelung und Verschaltung wurden ebenfalls betrachtet. Es wurde eine indirekte Kopplung der Komponenten gewählt und ein allgemeines Vorgehen zur Programmentwicklung aus dem Bereich der Theoretischen Informatik beschrieben und umgesetzt. Dabei wurden Anforderungen an das zu entwickelnde Programm sowie notwendige Funktionen, die es bedienen muss, abgeleitet. Die Effekte von Einflussgrößen wie der Wärmeentwicklung und Alterung der Komponenten wurden für eine PEM-Brennstoffzelle und eine LIB untersucht. Hierbei konnten ungünstige Betriebszustände beschrieben werden, die in einer möglichen Programmanwendung berücksichtigt wurden. Es wurde ein Ablaufdiagramm für verschiedene Anwendungsfälle erstellt und gezeigt, dass ein modularer Programmaufbau für eine einfache Erweiterung und Erweiterbarkeit notwendig ist. Management-Systeme zur Vermeidung von schadhaften Betriebszuständen wurden erläutert und in Kostendiagrammen für Brennstoffzellen und Energiespeicher wurden die Effekte der Einflussgrößen berücksichtigt. Durch eine Implementierung dieser Zusammenhänge kann in einer späteren Programmentwicklung eine optimale Betriebsweise der Komponenten erreicht werden. ERM-Diagramme visualisieren den modularen Programmaufbau sowie die entwickelten Beziehungen und Abläufe.

## 8 Bewertung und Ausblick

Das Konzept, das erstellt wurde, befasst sich mit den Herausforderungen bei der Entwicklung eines hybriden Prüfstands für Brennstoffzelle und Energiespeicher und bietet Lösungsansätze dafür. Dabei wird jedoch nur eine abstrakte Konzeptionierung vorgenommen, ohne in die Tiefe spezifischer Probleme einzugehen. Dadurch bleibt die weitere Entwicklung in vielen Punkten offen. Diese Offenheit ermöglicht es, dass das Konzept für verschiedene Anwendungsfälle und Komponenten angewendet werden kann. Allerdings sind weitere Schritte und Ausarbeitungen notwendig, um das Konzept in die Tat umzusetzen.

Als nächster Schritt bietet es sich an, die Charakteristiken ganz bestimmter Komponenten nach Typ und Modell herauszuarbeiten und zu beschreiben. Eine Untersuchung des tatsächlichen Alterungsverhaltens und des Verhaltens auf Umwelteinflüsse steht dem dann nach. Sind diese Untersuchungen abgeschlossen, können die gewonnenen Erkenntnisse in dieses Konzept eingebunden werden. Danach kann mithilfe geeigneter mathematischer Modelle eine Erstellung der Kostenverläufe erfolgen.

Der Programmaufbau sollte gemäß dem beschriebenen Gerüst der Entitäten erfolgen. Diese sollten in der weiteren Programmentwicklung miteinander verbunden werden. Die Schritte sollten hierbei vom Kleinen zum Großen erfolgen. So reicht es für den Anfang aus, die Komponenten in ihren Grundfunktionen aufzunehmen. Gleiches gilt für die Beziehungen und Einflussgrößen. Ist die Entwicklung im Kleinen lauffähig, können anschließend Verbesserungen und Erweiterungen vorgenommen werden. Eine genauere Beschreibung und mathematische Formulierung der Vorgänge, kann durch weitere Arbeiten implementiert werden. So kann das Programmmodell den tatsächlichen Abläufen innerhalb eines realen Versuchsaufbaus immer näherkommen. Hierbei ist es zu empfehlen, die entwickelten mathematischen Modelle zur Beschreibung der Funktionen bereits während der Entwicklung mit den Abläufen aus der Realität abzugleichen. So kann das entstehende Programm für seine Aufgaben validiert werden.

In dem erstellten Konzept konkurrieren die Brennstoffzelle und der Energiespeicher um die Vermeidung der Entstehung von Kosten durch auftretende Belastungen. In vielen Umsetzungen eines Hybridsystems aus Brennstoffzelle und Energiespeicher ist der Energiespeicher der Brennstoffzelle untergeordnet. Der Grund dafür liegt in der deutlich größeren Anfälligkeit für Degradationsmechanismen, die von der Betriebsweise abhängen. Zusätzlich ist eine Brennstoffzelle in der Anschaffung deutlich teurer als eine Batterie im gleichen Leistungsspektrum. Daher sollte ergründet werden, ob diese Unterordnung eine Allgemeingültigkeit hat.

Die Verwendung eines Hybriden aus Brennstoffzelle und Energiespeicher sollte auch mit anderen mobilen Systemen verglichen werden. Eine Bewertung anhand unterschiedlicher Kriterien kann für die Entwicklung eines Brennstoffzell-Hybridsystems entscheidende Erkenntnisse liefern.

## Literaturverzeichnis

## Literatur

- [1] J. C. Wilhelm, *Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems* (Zugl.: Aachen, RWTH, Diss., 2010) (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt Bd. 73). Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/2128/3788>
- [2] P. Kurzweil, *Brennstoffzellentechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [3] J. Lehmann und T. Luschtinetz, *Wasserstoff und Brennstoffzellen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [4] 1997-2023 LUMITOS AG. „Polymerelektrolytbrennstoffzelle.“ <https://www.chemie.de/lexikon/Polymerelektrolytbrennstoffzelle.html> (Zugriff am: 3. Februar 2023).
- [5] P. Kurzweil, *Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*, 1. Aufl. (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [6] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [7] S. Balischewski, „Multifunktionaler Einsatz von Batteriespeichern in elektrischen Verteilnetzen : optimale Auslegung und Betrieb,“ 2020, doi: 10.25673/32637.
- [8] Querom Elektronik GmbH. „Topologien der DC/DC Wandler - Querom Elektronik GmbH.“ <https://querom.de/beitrag/topologien-dcdc-wandler/> (Zugriff am: 10. Februar 2023).
- [9] F. Zach, Hg. *Leistungselektronik: Ein Handbuch Band 1* (1). Wien: Springer, 2010.
- [10] <https://x-engineer.org/>. „What is a DC-DC converter ? – x-engineer.org.“ <https://x-engineer.org/dc-dc-converter/> (Zugriff am: 10. Februar 2023).
- [11] P. Wellmann, *Materialien der Elektronik und Energietechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [12] K. Reinschke, *Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [13] Prof. Dr. Birgit Koeppen, „Mess-, Steuer- und Regelungstechnik Teil A,“ Kapitel 1.
- [14] H. Henning und R. Oetker, „Grundlagen der Regelungstechnik,“ in *Handbuch der Regelungstechnik*, G. Bleisteiner und W. v. Mangoldt, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1961, S. 7–66.
- [15] R. Lerch, *Elektrische Messtechnik*, 5. Aufl. (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [16] T. Wilhelm. „Arbeitsblaetter\_Temperaturmessung.“ [http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Arbeitsblaetter\\_Temperaturmessung.pdf](http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Arbeitsblaetter_Temperaturmessung.pdf) (Zugriff am: 10. Februar 2023).
- [17] J. Goll, *Methoden und Architekturen der Softwaretechnik*, 1. Aufl. (Studium). Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [18] novamushr01 GmbH. „Leitfaden zur Anforderungsanalyse/-Management.“ <https://www.novamushr01.com/de/blog/leitfaden-zur-anforderungsanalyse-management> (Zugriff am: 12. Februar 2023).
- [19] B. Mütterlein, *Handbuch für die Programmierung mit LabVIEW: Mit Studentenversion LabVIEW 8*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2007.
- [20] Prof. Dr.–Ing. habil. Norbert Gronau, „Teil 5 - Vom Datenmodell zur Tabelle,“ Universität Potsdam, 2016/2017.
- [21] Prof. Dr.–Ing. habil. Norbert Gronau, „Einführung in die Wirtschaftsinformatik: Vom Datenmodell zur Tabelle,“ Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik Prozesse und Systeme, 2017. Zugriff am: 22. März 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://wi.uni-potsdam.de/>

- homepage/lehrewi.nsf/0/9d05cd41e1f8ade9c1258053002a0578/\$FILE/Teil%20%20-%20Vom%20Datenmodell%20zur%20Tabelle.pdf
- [22] Horizon Fuel Cell Technologies. „H-100 Fuel Cell Stack User Manual.” <https://www.horizoneducational.com/h-100-pem-fuel-cell-100w/p1248> (Zugriff am: 22. März 2023).
- [23] H. Henning und R. Oetker, „Grundlagen der Regelungstechnik,“ in *Handbuch der Regelungstechnik*, G. Bleisteiner und W. v. Mangoldt, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1961, S. 7–66.
- [24] K. Jonas und M. Klingner, „Alterung von Brennstoffzellen in Fahrzeugen – Prinzipien und Analysemethoden,“ *MTZ Motortech Z*, Jg. 72, Nr. 11, S. 908–913, 2011, doi: 10.1365/s35146-011-0195-z.
- [25] C. Kiesling, „Aufwärmprozess einer Brennstoffzelle,“ Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Graz, 2012.
- [26] K. Jonas und M. Klingner, „Alterung von Brennstoffzellen in Fahrzeugen – Prinzipien und Analysemethoden,“ *MTZ Motortech Z*, Jg. 72, Nr. 11, S. 908–913, 2011, doi: 10.1365/s35146-011-0195-z.
- [27] S. Bonitz, „Zur Lebensdauerabschätzung von Brennstoffzellen\_Bundsteg,“
- [28] A. Klein, „Experimentelle Untersuchung von Batteriesystemen im simulierten niedrigen Erdorbit,“ Masterarbeit, Institut für Energiespeicherung, Universität Stuttgart, Stuttgart, 31.06.2017.
- [29] Lydia Dorrman, VDE e.V., Dr. Kerstin Sann-Ferro, VDE e.V./DKE, Patrick Heining und Dr. Jochen Mähliß und VDE Renewables GmbH, „Kompendium: Li-Ionen-Batterien,“
- [30] Kung Long Batteries Industrial Co. „Datenblatt WP4.5-12.” <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/D500/WP4%2C5-12%23LON.pdf>
- [31] Infineon Technologies AG. „Battery Management Systems (BMS) - Infineon Technologies.” <https://www.infineon.com/cms/de/discoveries/battery-management-system/> (Zugriff am: 25. Februar 2023).
- [32] „Brennstoffzellen-Steuergerät.” <https://www.bosch-mobility-solutions.com/de/loesungen/antriebe/brennstoffzellen-elektrisch/brennstoffzellen-steuergeraet/> (Zugriff am: 25. Februar 2023).
- [33] Erik Staff, *Battery Management System Safety and Fault Management for Lithium Ion Batteries*. Zugriff am: 25. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=8eltvOuDRjw>
- [34] S. Cordts, G. Blakowski und G. Brosius, Hg. *Datenbanken für Wirtschaftsinformatiker: Nach dem aktuellen Standard SQL:2008*, 1. Aufl. (Aus dem Programm Programmiersprachen und Datenbankentwicklung). Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [35] R. Bucher. „Datenbanken- 5 Vorteile gegenüber einfachen Tabellen.” <https://seatable.io/vorteile-datenbank/> (Zugriff am: 17. Februar 2023).
- [36] balticFuelCells GmbH. „Datenblatt PEM Stack 300 W.” [https://www.hannovermesse.de/apollo/hannover\\_messe\\_2022/obs/Binary/A1151826/bFC\\_Flyer\\_PEM-Stack-300W\\_220428.pdf](https://www.hannovermesse.de/apollo/hannover_messe_2022/obs/Binary/A1151826/bFC_Flyer_PEM-Stack-300W_220428.pdf) (Zugriff am: 22. März 2023).
- [37] batterium GmbH. „Accurat-Supply-Datenblatt-S-4\_5-12V.” [https://www.autobatterienbilliger.de/mediafiles/Datenblatt/accurat/Supply/Accurat-Supply-Datenblatt-S-4\\_5-12V.pdf](https://www.autobatterienbilliger.de/mediafiles/Datenblatt/accurat/Supply/Accurat-Supply-Datenblatt-S-4_5-12V.pdf) (Zugriff am: 22. März 2023).
- [38] MORNSUN POWER GmbH. „Datenblatt IB1203S-W75R3.” <https://www.mornsunpower.de/html/pdf/IB1203S-W75R3.html> (Zugriff am: 22. März 2023).
- [39] KYOCERA Europe GmbH. <https://datasheets.kyocera-avx.com/AVX-SCM-16V.pdf> (Zugriff am: 22. März 2023).



## Anhang A. Datenblätter



### PEM Stack 300 W Wasserstoff-Brennstoffzellen-Stack

- ➔ ideale Basiskomponente für individuelle Systemlösungen
- ➔ benutzerfreundlicher Stack ohne zusätzliche Befeuchtung
- ➔ einfache Integration und hohe Flexibilität
- ➔ skalierbare Leistung



#### Technische Daten

Art.-Nr. 10875	PEM Stack 300 W
elektr. Spannung	15 - 30 V DC
elektr. Leistung	300 W nominal
elektr. Strom	18 A (bei Nennleistung)
Betriebstemperatur	5 bis 55 °C
Wirkungsgrad	45 % bei 300 W
Medien	Wasserstoff 3,0 (trocken), Umgebungsluft
Wasserstoffverbrauch	4,5 l/min
Wasserstoff-Eingangsdruck	250 bis 350 mbar
Anzahl der Zellen	30 (andere auf Anfrage)
Maße	175 mm x 85 mm x 95 mm
Gewicht (leer)	1,7 kg
Anschlüsse *	G1/4" (Innengewinde)

\* Medienanschlüsse nicht im Lieferumfang enthalten

#### Optional mit Steuerung und BOP-Komponenten

Passend zum PEM Stack 300 W bietet balticFuelCells optionales Equipment. Dazu gehören neben Pumpen, Lüftern und Druckminderern für die Medienversorgung auch eine elektronische Steuereinheit für die Reglung Ihres Gesamtsystems.

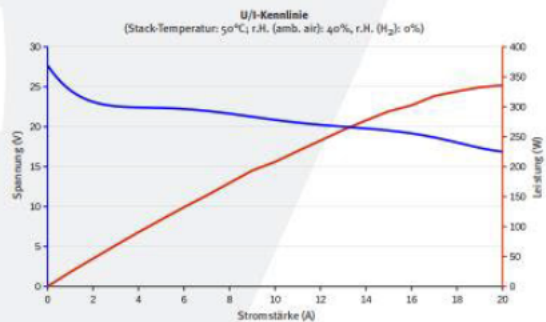


Elektronische Steuereinheit

Ausgänge H<sub>2</sub>/Luft

Eingang Kühlflüssigkeit

Der flüssigkeitsgekühlte Stack von balticFuelCells liefert eine elektrische Leistung von 300 W. Durch die Flüssigkeitskühlung ist eine Wärmeauskopplung und -nutzung möglich. Der Stack kommt ohne externe Befeuchtung der Medien aus und erlaubt so den Aufbau eines einfacheren und effizienteren Gesamtsystems. Der Stack kann in verschiedenen Bereichen, wie etwa in mobilen Anwendungen, Testumgebungen und USV-Anlagen eingesetzt werden. Für Systemintegratoren steht mit dem PEM Stack 300 W ein serienreifes Produkt von einem kompetenten und zuverlässigen Partner zur Verfügung.



**baltic FuelCells**  
innovation in fuel cell technologies

Made in Germany

balticFuelCells GmbH

Abbildung 43: Datenblatt einer PEM-Brennstoffzelle von balticFuelCells GmbH

Quelle: [36]



**WP4.5-12 12Volt 4.5Ah**

**Specifications**

Nominal Voltage(V)	12V		
<b>Nominal Capacity</b>			
20 hour rate (0.225A to 10.50V)	4.5Ah		
10 hour rate (0.428A to 10.50V)	4.275Ah		
5 hour rate (0.765A to 10.20V)	3.825Ah		
1 C (4.5A to 9.60V)	2.55Ah		
3 C (13.5A to 9.60V)	1.8Ah		

**Weight** Approx. 1.62kg(3.56Lbs.)

**Internal Resistance (at 1KHz)** Approx. 34.2 mΩ

**Maximum Discharge Current for 5 seconds:** 67.5A

**Charging Methods at 25°C(77 )**

<b>Cycle use:</b>	
Charging Voltage	14.4 to 15.0V
Coefficient	-5.0mv/°C/cell
Maximum Charging Current :	1.35A
<b>Standby use:</b>	
Float Charging Voltage	13.50 to 13.80V
Coefficient	-3.0mv/°C/cell

**Operating Temperature Range**

Charge	-15°C(5 )	to	40°C(104 )
Discharge	-15°C(5 )	to	50°C(122 )
Storage	-15°C(5 )	to	40°C(104 )

**Charge Retention (shelf life) at 20°C(68 )**

1 month	92%
3 month	90%
6 month	80%

**Case Material** ABS  
(Option: UL94 HB & UL94 V-0 flame retardant )

**Terminal** F1 or F2 (Faston Tab 187 or 250)



**Dimensions**

mm(inch)

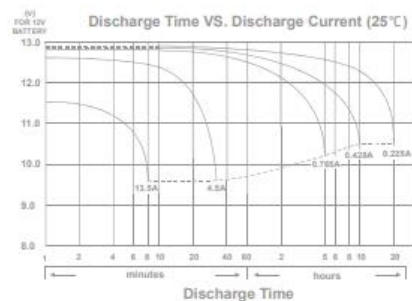
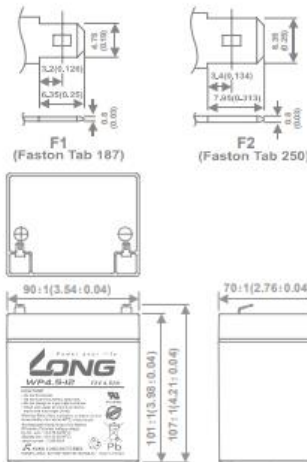


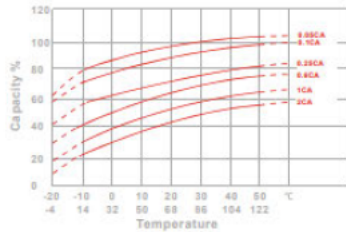
Abbildung 44: Datenblattauszug einer Bleisäure-Batterie Teil1

Quelle: [37]

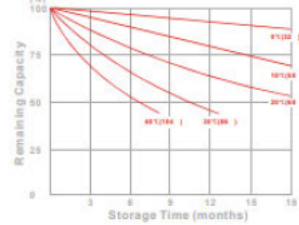


# WP4.5-12

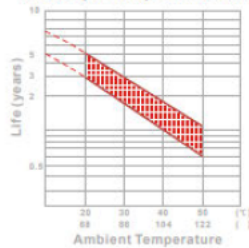
Effect of Temperature on Capacity 25°C(77 )



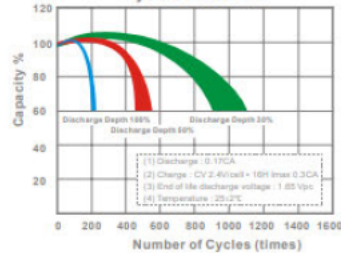
Capacity Retention Characteristic



Trickle (or float) Service Life



Cycle Service Life



**- PERFORMANCE DATA**

Discharge Rates in Watts to Various End Voltages at 25°C(77 )

Time	End Voltage	Discharge Rates in Watts to Various End Voltages at 25°C(77 )						
		1.85V	1.80V	1.75V	1.70V	1.67V	1.65V	1.60V
5	min	143	161	174	186	191	197	204
10	min	102	115	123	129	132	135	138
15	min	84.5	93.4	97.2	99.1	100	101	102
30	min	49.1	54.9	57.1	58.2	58.8	59.5	60.2
60	min	25.2	28.6	30.8	32.6	33.2	33.9	34.4
120	min	14.9	16.6	17.4	18.0	18.3	18.7	19.1
180	min	11.8	13.0	13.6	14.1	14.3	14.6	14.9
240	min	9.61	10.4	10.8	11.1	11.3	11.5	11.7
300	min	8.76	9.35	9.62	9.81	9.92	10.1	10.3
600	min	5.13	5.48	5.64	5.76	5.81	5.87	5.95
1200	min	2.59	2.81	2.99	3.06	3.08	3.12	3.16

- Discharge Rates in Amperes to Various End Voltages at 25°C(77 )

Time	End Voltage	Discharge Rates in Amperes to Various End Voltages at 25°C(77 )						
		1.85V	1.80V	1.75V	1.70V	1.67V	1.65V	1.60V
5	min	15.3	17.6	18.9	19.5	19.7	19.9	20.2
10	min	10.5	11.7	11.9	12.1	12.2	12.3	12.4
15	min	7.56	8.22	8.71	8.92	8.99	9.07	9.15
30	min	4.39	4.94	5.11	5.25	5.3	5.35	5.41
60	min	2.36	2.61	2.73	2.84	2.87	2.91	2.94
120	min	1.32	1.44	1.50	1.54	1.55	1.57	1.59
180	min	1.09	1.15	1.18	1.20	1.21	1.22	1.23
240	min	0.835	0.891	0.916	0.942	0.948	0.955	0.963
300	min	0.776	0.812	0.825	0.837	0.841	0.846	0.852
600	min	0.435	0.452	0.464	0.473	0.477	0.481	0.486
1200	min	0.219	0.233	0.241	0.247	0.250	0.253	0.257

All data on the spec. sheet is an average value:

The tolerance range : X<6min(+15%~-15%), 6min ≤ X<10min(+12%~-12%), 10min ≤ X < 60min(+8%~-8%), X ≥ 60min(+5%~-5%)

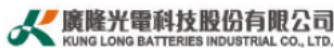


Abbildung 45: Datenblattauszug einer Bleisäure-Batterie Teil2

Quelle: [37]

**DC/DC Converter**  
**IB\_S-W75R3 Series**



0.75W isolated DC-DC converter  
 Fixed input voltage, regulated single output

**FEATURES**

- Continuous short-circuit protection
- No-load input current as low as 8mA
- Operating ambient temperature range: -40°C to +85°C
- High efficiency up to 74%
- I/O Isolation test voltage 1.5k VDC
- Industry standard pin-out



EN 62368-1



BS EN 62368-1

RoHS



Continuous Short Circuit Protection



3 years warranty

Patent Protection

*IB\_S-W75R3 series are especially designed for distributed power supply systems where an isolated voltage is required. They are suitable for: pre-interference isolation, ground interference elimination, pure digital circuit, voltage isolation conversion, general low frequency analog circuit, relay drive circuit, etc.*

Selection Guide						
Certification	Part No.	Input Voltage (VDC)	Output		Full Load Efficiency(%) Min./Typ.	Capacitive Load (µF) Max.
		Nominal (Range)	Voltage (VDC)	Current (mA) Max./Min.		
EN/BS EN	IB1203S-W75R3	12 (11.4-12.6)	3.3	200/20	64/68	2400
	IB1205S-W75R3		5	150/15	68/72	2400
	IB1212S-W75R3		12	62/7	69/73	560
	IB1215S-W75R3		15	50/5	70/74	560
	IB2403S-W75R3	24 (22.8-25.2)	3.3	200/20	62/68	2400
	IB2405S-W75R3		5	150/15	66/72	2400
	IB2412S-W75R3		12	62/7	67/73	560
	IB2415S-W75R3		15	50/5	68/74	560

Input Specifications							
Item	Operating Conditions			Min.	Typ.	Max.	Unit
Input Current (full load / no-load)	12V Input	3.3VDC output		--	92/8	98/--	mA
		5VDC output		--	87/8	92/--	
		12VDC output		--	86/8	91/--	
		15VDC output		--	85/8	90/--	
	24V Input	3.3VDC output		--	46/8	51/--	
		5VDC output		--	44/8	48/--	
		12VDC output		--	43/8	47/--	
		15VDC output		--	43/8	46/--	
Reflected Ripple Current*				--	15	--	
Input Filter				Capacitance filter			
Hot Plug				Unavailable			

Note: \* Refer to DC-DC Converter Application Notes for detailed description of reflected ripple current test method.

Output Specifications							
Item	Operating Conditions			Min.	Typ.	Max.	Unit
Voltage Accuracy				--	--	±3	%
Linear Regulation	Input voltage change: ±1%			--	--	±0.25	
Load Regulation	10%-100% load	3.3VDC output		--	--	±3	
		5VDC/12VDC/15VDC output		--	--	±2	



MORNSUN Guangzhou Science & Technology Co., Ltd.

2022.01.14-A/2

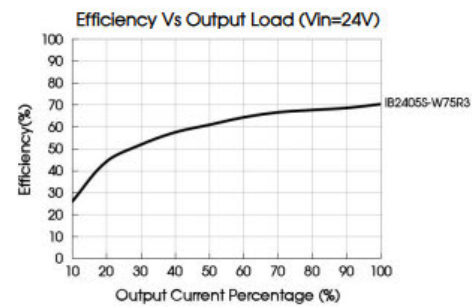
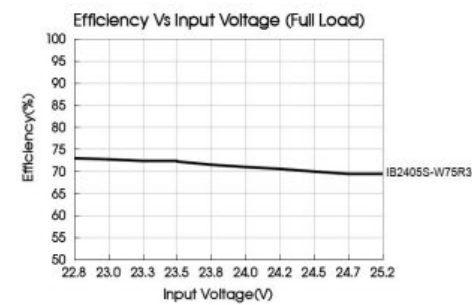
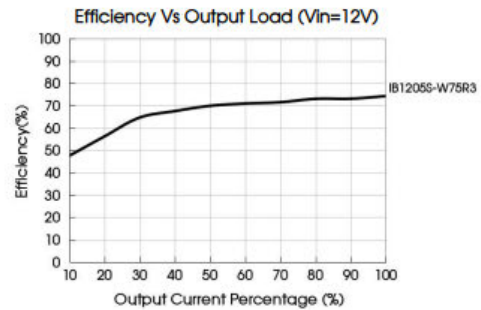
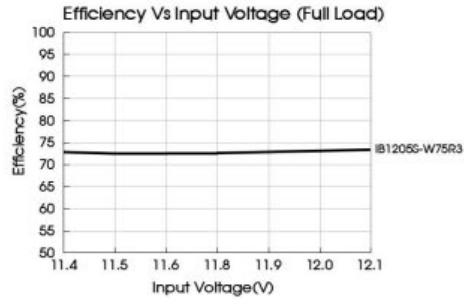
Page 1 of 4

MORNSUN Guangzhou Science & Technology Co., Ltd. reserves the copyright and right of final interpretation

Abbildung 46: Datenblattauszug eines DC/DC-Wandlers Teil1

Quelle: [38]

DC/DC Converter  
IB\_S-W75R3 Series



Design Reference

1. Typical application circuit

Input and/or output ripple can be further reduced, by connecting a filter capacitor from the input and/or output terminals to ground as shown in Fig. 2

Choosing suitable filter capacitor values is very important for a smooth operation of the modules, particularly to avoid start-up problems caused by capacitor values that are too high. For recommended input and output capacitor values refer to Table 1.



Fig. 2

Table 1: Recommended input and output capacitor values

Vin	Cin	Output	Cout
12VDC	2.2 $\mu$ F/25V	3.3VDC/5VDC	10 $\mu$ F/16V
24VDC	1 $\mu$ F/50V	12VDC	2.2 $\mu$ F/25V
--	--	15VDC	1 $\mu$ F/25V

2. EMC (CLASS B) compliance circuit

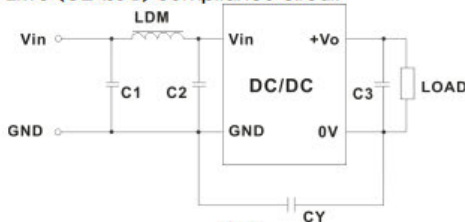


Fig. 3

Table 2: Recommended EMC filter values

Emissions	C1/C2	4.7 $\mu$ F /50V
	CY	270pF /2kV
	C3	Refer to the Cout in table
	LDM	6.8 $\mu$ H

3. For additional information please refer to DC-DC converter application notes on [www.mornsun-power.com](http://www.mornsun-power.com)



MORNSUN Guangzhou Science & Technology Co., Ltd.

2022.01.14-A/2

Page 3 of 4

MORNSUN Guangzhou Science & Technology Co., Ltd. reserves the copyright and right of final interpretation

Abbildung 47: Datenblattauszug eines DC/DC-Wandlers Teil2

Quelle: [38]



## 16V SCM Series

### Series-Connected SuperCapacitor Modules



This new series of electrochemical, double-layer, series-connected SuperCapacitor modules offers excellent pulse power handling characteristics based on the combination of very high capacitance and very low ESR. Used by themselves or in conjunction with primary or secondary batteries, they provide extended back up time, longer battery life, and provide instantaneous power pulses as needed. Offers great solutions to Hold Up, Energy Harvesting, and Pulse Power Applications.

#### FEATURES

- Low ESR provides high efficiency and high power density
- Withstands high vibrations and high current applications
- Life time capable of millions of cycles
- Active cell balancing

#### APPLICATIONS

- Heavy industrial equipment
- Grid storage
- UPS/Industrial systems
- Regenerative energy capture
- Pitch control

#### HOW TO ORDER

<b>SCM</b>	<b>Z</b>	<b>1E</b>	<b>K</b>	<b>507</b>	<b>S</b>	<b>R</b>	<b>B</b>	<b>B</b>	<b>O</b>
Series SuperCap Module	Width Z = 68mm	Length 1E = 418mm	Voltage Code K = 16V	Capacitance Code 507 = 500F	Tolerance S = +30% / -10%	Lead Format R = Battery Posts	Package B = Bulk	Balancing B = Active Balanced	Mounting O = Vertical

#### QUALITY INSPECTION

Parts are tested for life cycle, high temperature load life, temperature characteristics, vibration resistance, and humidity characteristics. See page 2 for more information.

#### TERMINATION

Power terminals are M8 (+) and M10 (-). Recommended torque is 20 Nm (M8) and 30 Nm (M10). See pages 4 and 6 for more information on pin out and polarity.

#### OPERATING TEMPERATURE

-40°C to +65°C @ 16V



For RoHScompliant products, please select correct termination style

Abbildung 48: Datenblattauszug eines Superkondensators Teil1

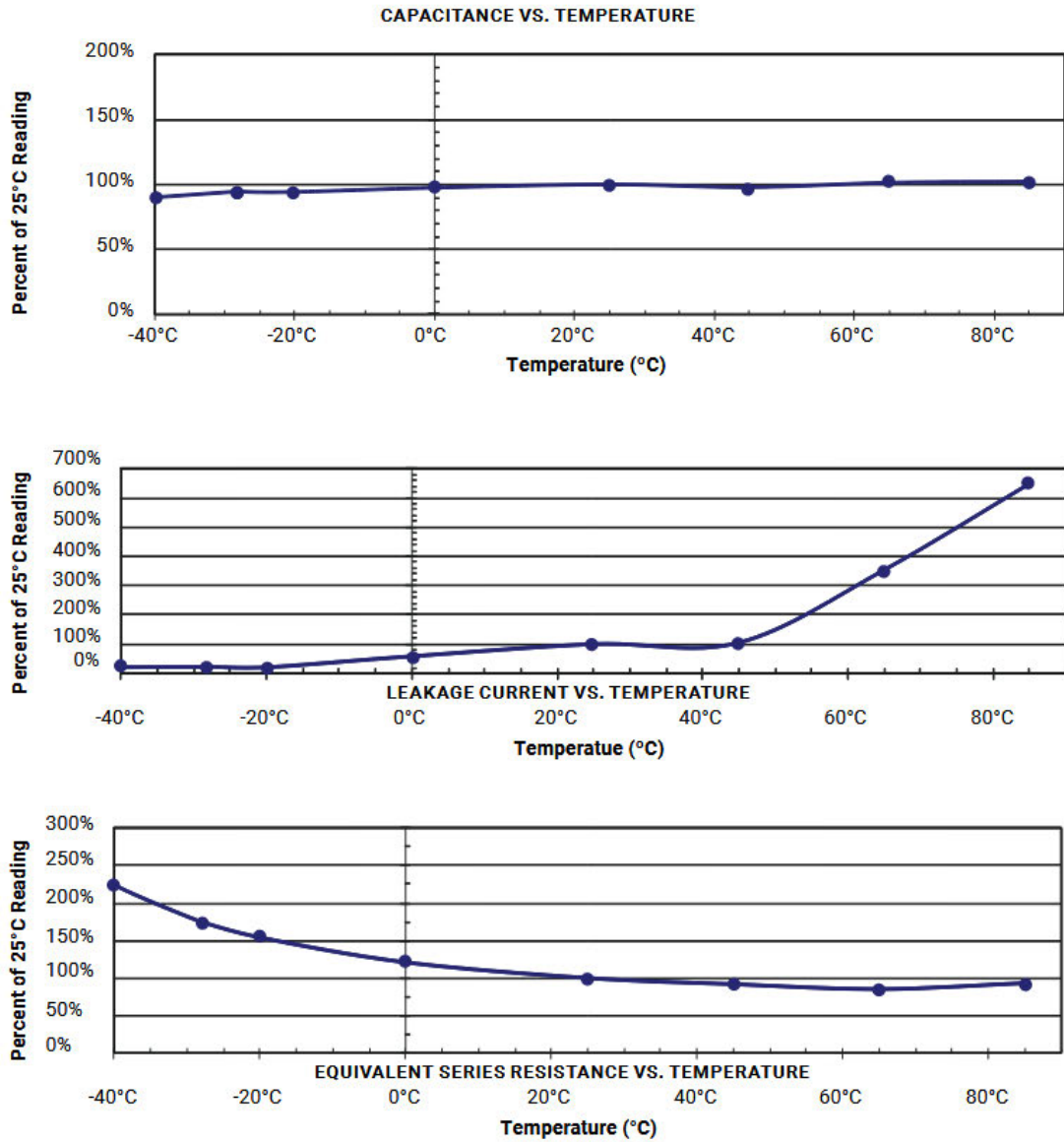
Quelle: [39]

## 16V SCM Series

### Series-Connected SuperCapacitor Modules



#### QUALITY AND RELIABILITY



The Important Information/Disclaimer is incorporated in the catalog where these specifications came from or available online at [www.avx.com/disclaimer/](http://www.avx.com/disclaimer/) by reference and should be reviewed in full before placing any order.

011519

- SUPERCAPACITORS -

Abbildung 49: Datenblattauszug eines Superkondensators Teil2

Quelle: [39]

## Anhang B. Lastenheft

# Lastenheft

**Version:** 1.0  
**Datum:** 18.10.2022

## Dokumentenversion

<b>VERSIONS NR.:</b>	<b>DATUM</b>	<b>AUTOR</b>	<b>ÄNDERUNGSGRUND / BEMERKUNG</b>
1.0	10.10.2023	KW	Ersterstellung



## I. Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Ausgangssituation .....	1
3	Zielbestimmung.....	2
4	Produkteinsatz.....	2
5	Funktionale Anforderungen .....	3
6	Nicht funktionale Anforderungen .....	4
7	Umsetzung.....	4

### 1 Einleitung

Eine ständige und ausreichende Verfügbarkeit von elektrischer Energie ist für unser alltägliches Leben unabdingbar geworden. So gilt es den andauernden Energiebedarf ausreichend zu decken. Diese Energie wird größtenteils über Stromnetzwerke dem Verbraucher bis zur Steckdose geliefert. Jedoch ist auch eine Versorgungssicherheit außerhalb dieser Netzwerke für diverse Anwendungen mittlerweile fester Bestandteil des alltäglichen Lebens. In Mobiltelefonen, Laptops und diversen weiteren Elektrogeräten kommen elektrochemische Energiespeicher zum Einsatz. In den letzten 15 Jahren hatte dies eine enorme Auswirkung auf die Elektromobilität. Die Nachfrage nach immer effizienteren und größeren Energiespeichern stellt eine der großen technischen Herausforderungen der heutigen Zeit dar. Diesen Forderungen gerecht zu werden ist das Verstehen und Begreifen der aktuellen Techniken der erste Schritt. Diese können infolgedessen erweitert werden.

Die Verwendung eines Hybridsystem aus Brennstoffzelle und Batterie vereint zwei vielversprechende Technologien zur mobilen Bereitstellung von elektrischer Energie. Hierbei ergänzen sich die Vorzüge der einzelnen Techniken und reduzieren in Kombination deutlich die Nachteile welche die Systeme als einzelne aufweisen. Solch ein System ist gerade für die Anwendung in einem Elektroauto geeignet.

### 2 Ausgangssituation

Im *Institut Erneuerbare Energien* ist die Realisierung eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybridversuchsstand geplant. Hierbei wird eine Brennstoffzelle in Kombination mit einer Batterie durch einen Verbraucher elektrisch belastet. Der entstehende Versuchsstand soll Studierenden das Wissen und den Umgang mit dieser Technik vermitteln, des Weiteren soll dieser als Versuchsstand für anknüpfende Projekte und Laborpraktika Verwendung finden.

Aufbauend auf der Studienarbeit von Ronja Müller und Björn Falkenhain „Entwicklung eines Brennstoffzellen-Batterie-Hybridversuchs“ sowie der Studienarbeit von Marieke Andersson ist als nächster wesentlicher Schritt ein Regelungskonzept auszuarbeiten und dieses als Regelungssoftware für den Versuchsstand bereitzustellen.

Das zu erstellende Konzept berücksichtigt in erster Betrachtung einen Brennstoffzellen-Batterie Hybridversuchsstand als Ausgangssituation. Dieser besteht im Wesentlichen aus einer Brennstoffzelle einem Energiespeicher und der anfallenden Last. Die vorgegebene Last bzw. das Lastprofil ist über die Brennstoffzelle im Zusammenspiel mit dem Energiespeicher zu versorgen. Die Last wird im einfachsten Fall über einen einstellbaren Widerstand vorgegeben. Die Brennstoffzelle erzeugt durch die chemische Wandlung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser elektrische Energie. Die entstehende Spannung fällt entsprechend an der vorgegebenen Last, dem Widerstand, ab. Zusätzlich wird der Energiespeicher welcher Teil des Stromkreises ist durch die Brennstoffzelle geladen. Der Energiespeicher kann bei Bedarf wieder entladen werden, um die Last ohne Einsatz der Brennstoffzelle oder mit dieser unterstützend die Last zu tragen. So können Lastspitzen abgefangen und die Schaltzyklen der Brennstoffzelle reduziert werden. Sollte die anfallende Last über dem vorgesehen Leistungsbereich der Brennstoffzelle liegen führt dies zu einer Beschädigung dieser. Gleiches gilt für häufige ein und aus Schaltvorgänge der Brennstoffzelle mit kurzer Laufzeit. Die Beschädigung macht sich durch eine beschleunigte Alterung der Brennstoffzelle bemerkbar. Durch die Kopplung von Brennstoffzelle und Energiespeicher kann also die Lebenserwartung der Brennstoffzelle erhöht werden. Ein Austausch oder eine Reparatur ist mit einem finanziellen Aufwand verbunden. Eine fortschreitende oder beschleunigte Beschädigung oder Alterung von Anlagenkomponenten kann durch anfallende Kosten interpretiert werden, da diese Komponenten ersetzt werden müssen.

Eine Brennstoffzelle hat über ihre U/I-Kennlinie einen Leistungsbereich, in dem sie betrieben werden kann. Für jeden Punkt auf dieser Kurve ist im Allgemeinen ein Wirkungsgrad hinterlegt. Sollte der Energiespeicher als herkömmliche Batterie gewählt werden, so ergibt sich auch hier ein Lade- und Entladewirkungsgrad. Alle weiteren Anlagenkomponenten können in der gleichen Weise betrachtet werden. Sie weisen alle einen Wirkungsgradbereich auf, der die jeweiligen Verluste im Betrieb angibt und sich durch den derzeitigen Arbeitspunkt und äußere Einflussfaktoren bestimmt. Als erheblicher Einflussfaktor ist die jeweilige Temperatur der Anlagenkomponenten zu betrachten. Eine Erhöhung der Temperatur führt in der Regel zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades. Durch den Wirkungsgrad bestimmt sich die Effizienz des Systems und damit der Treibstoffverbrauch. Ein Mehrverbrauch an Treibstoff führt zu erhöhten Betriebskosten.

Der sich im Betrieb ergebende Gesamtwirkungsgrad mit den jeweiligen Einflussgrößen wird den prozessbedingten Anfallenden Kosten gegenübergestellt. Die hinterlegten Kosten aus Treibstoffverbrauch und Anschaffungskosten für Komponenten werden in den sogenannten fiktiven Kosten des Systems beschrieben.

### 3 Zielbestimmung

Es soll durch das zu entwickelnde Programm möglich sein einen Brennstoffzellen Batterie-Hybridversuchsstandes sowohl zu simulieren als auch mit Hardwarekomponenten zu betreiben und zu regeln.

Die Umsetzung als Simulationsprogramm ist vorrangig. Hierbei werden jegliche Komponenten des Versuchsstandes in der Simulation aufgenommen und nach ihren Attributen beschrieben. Die Umsetzung des Programms als Regelung des Versuchsstandes ist dem nachgestellt.

### 4 Produkteinsatz

Das Produkt soll am Institut für Energie und Nachhaltigkeit an der HAW-Hamburg angewandt werden. Zielgruppe sind hierbei Studierende und Mitarbeitende des Instituts.

Plattform: PC mit Windows Betriebssystemen Microsoft

## 5 Funktionale Anforderungen

- Simulierung eines BSZ-Hybrid-Systems
- Regelung eines BSZ-Hybridversuchstandes sowohl als Simulation als auch mit Hardwarekomponenten
- Realisierung verschiedener Lasten und Lastfälle
- Verschiedene Betriebsmodi zwischen BSZ und Batterie
- Hinterlegung von Fiktiven Kosten und deren Berücksichtigung in den Regelungsprozessen
- Autonome Betriebsweise um ein Optimum von höchstem Wirkungsgrad und geringsten fiktiven Kosten
- Anzeige des jeweiligen Betriebsmodus für den Anwender
- Anzeige der Betriebszustände der jeweiligen Komponenten
- Sicherheitseinrichtung zum Schutz des Anwenders und der Anlagenkomponenten
- Visualisierung der aktuellen Last, der Lastdeckung, der Spannung und Stromstärken
- Speicherung und Ausgabe der Informationen in einer Datei

## 6 Nicht funktionale Anforderungen

- Ansprechendes und leicht bedienbares User Interface
- Erweiterbarer Aufbau
- Geringe Reaktionszeit des Programms

## 7 Umsetzung

Das zu entwickelnde Programm soll so aufgebaut sein, dass eine ständige Erweiterung der Komponenten sowie der Funktionen möglich ist.

Die betriebsweise des Programms soll sogenannte fiktive Kosten berücksichtigen. Diese Kosten sind über der Idealen Betriebsweise der einzelnen Komponenten definiert. Sie berücksichtigen die Beanspruchung der Komponenten und beschreiben als Funktion deren Alterung und Abnutzung. Sollten Komponenten in einer Art betrieben werden, dass diese vermehrt altern oder Schaden nehmen wird dies durch entsprechend hoher fiktiver Kosten wiedergeben. So soll das Programm für die jeweiligen Kostenfunktionen der Komponenten stets die Betriebsweise wählen, welche die geringsten Kosten aufweist. Die Wirkungsgrade der Anlagenkomponenten sowie der Gesamtwirkungsgrad fließt in die Beurteilung der kosten ebenso mit ein.

Erwartungsgemäß wird so der größte mögliche Wirkungsgrad des Systems sowie eine maximale Lebensdauer der Komponenten erreicht.

Anhang C. Ablaufdiagramm

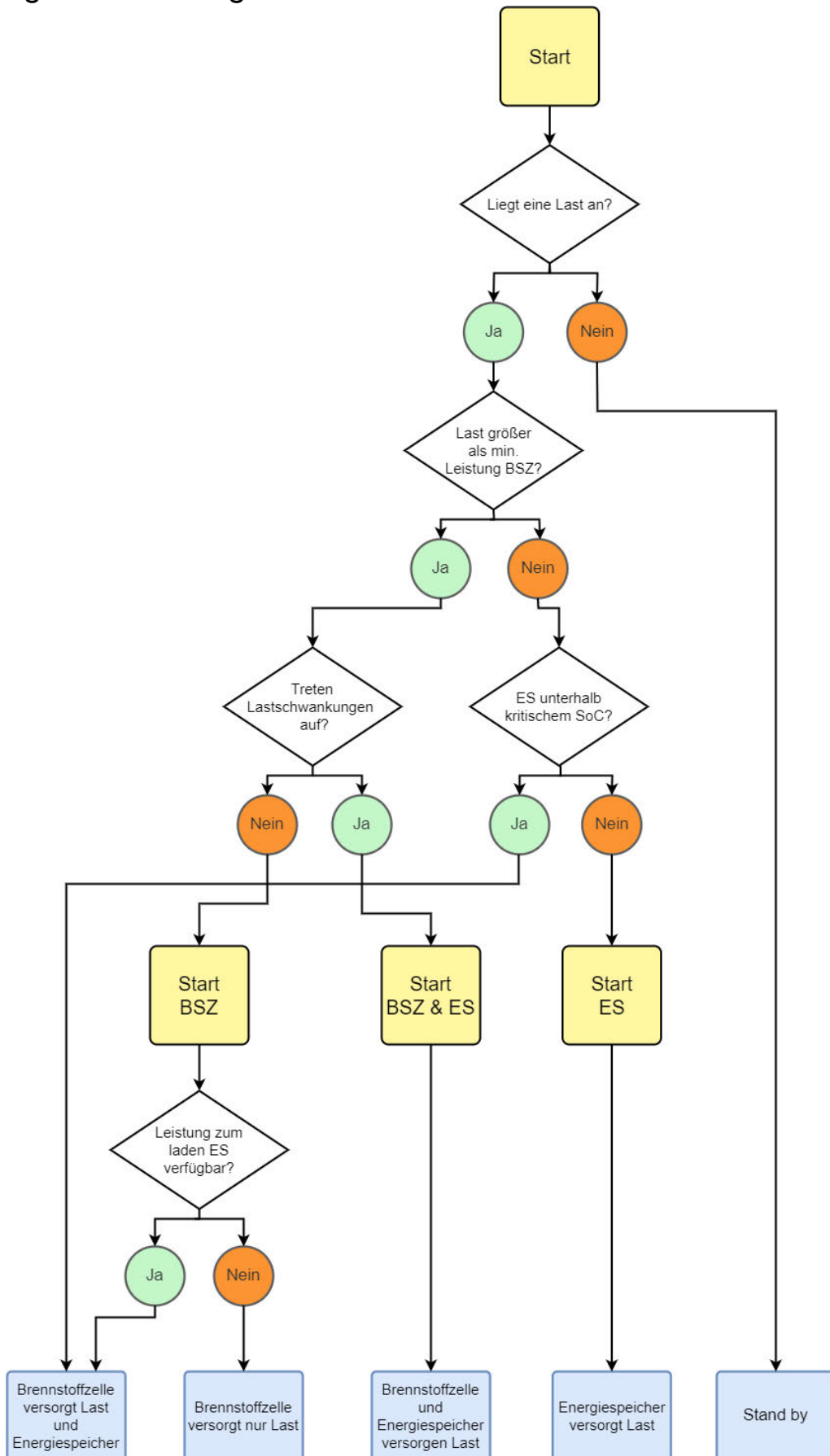


Abbildung 50: Ablaufdiagramm des Versuchsstandes mit Ja / Nein Entscheidungen.



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Wienand

Vorname: Konrad

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konzeptionierung eines ökonomisch geregelten Brennstoffzellenhybridversuchsstand

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

29.03.2023

Ort

Datum

Unterschrift im Original