

# **Bachelorarbeit**

Yan Vengerskiy

## **Modellbasierte Entwicklung einer Diagnose- und Zustandsüberwachungsmethodik am Beispiel eines PEM-Brennstoffzellensystems**

**Yan Vengerskiy**

**Modellbasierte Entwicklung einer  
Diagnose- und Zustandsüberwachungs-  
methodik am Beispiel  
eines PEM-Brennstoffzellensystems**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau/Antrieb und Fahrwerk  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Silver Atena, Electronic Systems Engineering GmbH  
Test Means and Simulations  
Hein-Saß-Weg 36  
21129 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. –Ing. Thomas Netzel  
Zweitprüfer : Dr. Christian Müller

Industrieller Betreuer: Dr. Christian Müller

Abgabedatum: 05.03.2015

## **Zusammenfassung**

### **Name des Studierenden**

Yan Vengerskiy

### **Thema der Bachelorthesis**

Modellbasierte Entwicklung einer Diagnose- und Zustandsüberwachungsmethodik am Beispiel eines PEM-Brennstoffzellensystems

### **Stichworte**

PEMFC, SHM, Zustandsüberwachung, Fehlererkennung, Fehleridentifikation, Fehlerdiagnose, neuronale Netze, MBSE

### **Kurzzusammenfassung**

Gegenstand dieser Arbeit ist das Entwickeln einer Diagnose- und Zustandsüberwachungsmethodik am Beispiel eines PEM-Brennstoffzellensystems. Teil dieser Arbeit besteht in der Entwicklung einer Reihe von Fehlersequenzen, die die Funktionseinheiten in ihrer Funktionalität beeinträchtigen. Dabei sollten diese induzierten Fehler vom System erkannt, identifiziert und bewertet werden. Das System sollte in der Lage sein auf die Fehler zu reagieren und gezielt Gegenmaßnahmen einzuleiten, um die intendierten Funktionen des Systems zu erhalten.

### **Name of Student**

Yan Vengerskiy

### **Title of the paper**

Model-based development of a diagnostic and condition monitoring methodology on example of a PEM fuel cell system

### **Keywords**

PEMFC, SHM, condition monitoring, fault detection, fault identification, fault diagnosis, neural networks, MBSE

### **Abstract**

The subject of this thesis is to develop a diagnostic and condition monitoring methodology using the example of a PEM fuel cell system. Part of this work is to develop a series of error sequences that affect the function units in their functionality. In this case, these injected errors should be detected, identified and evaluated by the system. The system should be able to respond to the error and initiate targeted countermeasures to obtain the intended functions of the system.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>10</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	10
1.2	Anforderungen . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Grundlegende Informationen über das behandelte System</b>	<b>12</b>
2.1	Das Gesamtmodell . . . . .	12
2.2	Das Brennstoffzellensystem . . . . .	13
2.2.1	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle . . . . .	14
2.2.2	Pumpenmodell . . . . .	16
2.2.3	Modell des Dreiwege-Mischventils . . . . .	16
2.2.4	Wärmetauschernachbildung . . . . .	16
2.2.5	Ventilatormodell . . . . .	17
2.2.6	Sensoren . . . . .	17
2.3	Regelkonzepte . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Theorie des System Health Management</b>	<b>19</b>
3.1	Fehlererkennung . . . . .	20
3.2	Fehleridentifikation und Fehlerdiagnose . . . . .	22
3.3	Zusammenfassende Übersicht . . . . .	22
3.4	Zustandsprognose . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Modellierung der neuronalen Netze</b>	<b>24</b>
4.1	Einführung in die Thematik neuronaler Netze . . . . .	24
4.2	Einsatzbereiche der neuronalen Netze in dieser Arbeit . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Fehlermodellierung</b>	<b>31</b>
5.1	Fehlerimplementierung im Modell . . . . .	31
5.2	Simulation der Fehler . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Realisierung von System Health Management</b>	<b>35</b>
6.1	Entwicklung einer Fehlererkennungsmethode . . . . .	35
6.1.1	Erstellung des <i>Black-Box</i> -Modells zur Fehlererkennung . . . . .	36
6.1.2	Bewertung des NN-Modells . . . . .	37
6.1.3	Erweiterung zu einem Fehlererkennungsmodell . . . . .	39
6.1.4	Bewertung der Fehlererkennungsverfahren . . . . .	41
6.2	Fehleridentifikation . . . . .	45
6.2.1	Entwicklung einer Fehleridentifikationsmethode . . . . .	45
6.2.2	Bewertung der Fehleridentifikationsmethode . . . . .	48
6.2.3	Modifikation der Fehleridentifikationsmethode . . . . .	50
6.3	Fehlerdiagnose . . . . .	50

*Inhaltsverzeichnis*

---

6.3.1	Entwicklung der Fehlerdiagnose . . . . .	50
6.4	Notlaufstrategien im Fehlerfall eines Brennstoffzellensystems . . . . .	53
6.4.1	Abhilfemaßnahme zum Schutz vor Unterkühlung . . . . .	53
6.4.2	Abhilfemaßnahme zum Schutz gegen Überhitzen . . . . .	54
6.5	Gegenüberstellung des behandelten Systems mit und ohne SHM . . . . .	56
6.6	Bewertung alternativer Entwicklungsansätze . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>61</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>63</b>

# Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

## Abkürzungen

<b>MBSE</b>	Model Based Systems Engineering
<b>PEMFC</b>	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
<b>PGW</b>	Propylen-Glykol-Wasser
<b>SHM</b>	System Health Management
<b>BSZS</b>	Brennstoffzellensystem
<b>NN</b>	Neuronales Netz

## Formelzeichen

$P$	[W]	Leistung
$E$	[J]	Energie
$T$	[K]	Temperatur
$t$	[s]	Zeit
$R$	[ $\Omega$ ]	Widerstand
$v$	[km/h]	Geschwindigkeit
$\dot{m}$	[kg/s]	Massenstrom
$n$	[s <sup>-1</sup> ]	Drehzahl
$\phi$	[%]	Öffnungsgrad
$U$	[V]	elektrische Spannung
$I$	[A]	elektrischer Strom

## Indizes

<b>el</b>	elektrisch
<b>FC</b>	Fuel Cell

## *Inhaltsverzeichnis*

---

<b>HX</b>	Heat eXchanger, Wärmetauscher
<b>PGW</b>	Propylen-Glykol-Wasser
<b>n</b>	nach
<b>v</b>	vor
<b>Car</b>	Auto / Personenkraftwagen
<b>Amb</b>	(Ambient) Umgebung
<b>H2</b>	Wasserstoff
<b>Air</b>	Luft
<b>Valve</b>	Ventil
<b>Fan</b>	Ventilator

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Einsatz des Brennstoffzellensystem (BSZS) in einem Fahrzeug . . . . .	13
2.2	Schaltbild des Modells . . . . .	14
2.3	Schema Brennstoffzelle . . . . .	14
2.4	Leistungssteuerung über Wasserstoffmassenstrom . . . . .	18
3.1	Überblick über Fehlererkennungsmethoden . . . . .	20
4.1	Tangens Hyperbolicus . . . . .	26
4.2	Schematische Darstellung des „ <i>feedforwardnet</i> “-Neuronales Netz (NN) .	26
4.3	Vergleich zwischen Approximation und dem echten PGW Massenstrom .	28
4.4	Gegenüberstellung: echter und approximierter Luftmassenstrom . . . . .	29
4.5	Vergleich Approximation und echtes Signal der Propylen-Glykol-Wasser (PGW) Temperatur nach dem Wärmetauscher . . . . .	30
4.6	Vergleich des approximierten und echten Wasserstoffmassenstroms . . .	30
5.1	Pumpenfehler: $\dot{m}_{PGW}$ sinkt auf 50% bei $t = 600s$ . . . . .	32
5.2	Ventilatorfehler: $n_{Fan} = 0$ bei $t = 600s$ . . . . .	33
5.3	PEMFC-Fehler: $R_{i,neu} = 1,8R_0$ bei $t = 600s$ . . . . .	34
5.4	Langsamer Ventil . . . . .	34
6.1	Entwickelte Methodik des System Health Management (SHM) . . . . .	35
6.2	Fehlererkennung durch Residuumbildung . . . . .	36
6.3	Vergleich der Temperaturverläufe . . . . .	38
6.4	Vergleich der Temperaturverläufe Ab- und Einschaltvorgang . . . . .	39
6.5	Residuen durch Lastwechsel . . . . .	39
6.6	Residuen: Ventilatorfehler . . . . .	40
6.7	Ventilatorfehler a) mittlere- und b) hohe Last . . . . .	42
6.8	Pumpenfehler unterschiedlicher Lasten . . . . .	43
6.9	Identifikationschart mittlerer Ebene aktiviert durch <i>einfache Grenzwert- betrachtung</i> . . . . .	47
6.10	Mittlere Ebene der Fehlerdiagnose . . . . .	51
6.11	Effizienz Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) über den In- nenwiderstand . . . . .	53
6.12	Wasserstoffsteuerung: Schutz gegen Unterkühlung . . . . .	54
6.13	Schematischer Aufbau des verwendeten PID-Reglers . . . . .	55
6.14	Gegenüberstellung der Temperatur- und Wasserstoffmassenstromverläu- fe des behandelten System mit und ohne SHM . . . . .	56
6.15	Tatsächlicher und approximierter Verlauf der Fehlerschwere . . . . .	57



# Tabellenverzeichnis

2.1	Vor- und Nachteile einer Hybridausführung . . . . .	12
2.2	Benötigte Sensoren . . . . .	17
2.3	Geregelte und gesteuerte Größen des BSZS . . . . .	18
5.1	Induzierten Fehler . . . . .	31
5.2	Testbedingungen . . . . .	32
6.1	Verwendete Signale . . . . .	37
6.2	Erkennen der Ventilfehlersequenzen mit entwickelten Methoden . . . . .	44
6.3	Erkennen der Fehler mit entwickelten Methoden . . . . .	45
6.4	Aktivierung der Identifikationscharts mittleren Ebene . . . . .	46
6.5	Fehleridentifikationsmethode Auswertung . . . . .	49
6.6	Fehleridentifikationsvektor Benennung . . . . .	50

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

In den letzten Jahren ist bei der Entwicklung hoch integrierter und komplexer Systeme der Funktionsumfang stetig angewachsen. Daraus folgt das Problem, dass fehlerhafte bzw. unvollständige Spezifikationen der Funktionen erst in einer späten Entwicklungsphase erkannt werden. Eine Korrektur dieser Fehler ist meist mit hohen Kosten sowie Zeitaufwand verbunden. Um diesem Sachverhalt entgegenzuwirken, wurde in den letzten Jahren in der Industrie sehr stark die Model Based Systems Engineering (MBSE)-Methodik verfolgt. Diese Methode ermöglicht es, in der frühen Entwicklungsphase das Gesamtsystem in der Vollständigkeit zu analysieren. Das Herzstück einer MBSE-Methodik ist ein funktionales Verhaltensmodell eines Gesamtsystems. Zusätzlich werden die funktionalen Anforderungen in den sog. Spezifikationsmodellen zusammengefasst. Somit ist man in der Lage schon frühzeitig in der Entwicklung in einer sog. „Modell in the Loop“ Entwicklungsumgebung funktionale Integrationstests zu führen. Diese den klassischen Anforderungsprozess unterstützende Methodik erlaubt eine frühere Erkennung der Fehler, reduziert die Entwicklungszeit und dadurch die Entwicklungskosten. Nicht nur die finanziellen und zeitlichen Vorteile des MBSE, sondern auch der erhöhte Grad der Verifikation vor allem bei den sicherheitskritischen Systemen verbessern die Kundenakzeptanz.

Zudem kann dieses Verhaltensmodell mit nur wenig Mehraufwand erweitert bzw. verbessert werden und ermöglicht, im späteren Entwicklungsprozess diese Modelle zur Zustandsüberwachung sowie Diagnostik zu nutzen. Das Einsatzgebiet wäre in dem Fall auf einem Steuergerät, welches das Streckenmodell des Systems als Zustandsbeobachter beinhaltet und in Echtzeit mithilfe der vorhandenen Sensoren auf den Zustand / die Unversehrtheit des Systems schließen lässt. So ließen sich beispielsweise in der Produktionsbranche, wo die Instandhaltung von Produktionsmaschinen 40% der gesamten Produktionskosten verursachen können, jährlich je nach Maschine / Funktionseinheit bis zu 400.000€ einsparen [3], da Instandhaltungsarbeiten aufgrund eines hohen Automatisierungsgrades effizienter werden können.

In [4] wird beschrieben, dass Systeme im Laufe der Zeit ausfallen können, d.h. eine Zuverlässigkeit von 100% kann bei technischen Systemen nicht erreicht werden. Für mobile Anwendungen z.B. in der Automobilbranche bzw. Luftfahrt, wo ein Ausfall von Komponenten / Funktionseinheiten eine Gefährdung von Menschenleben bedeuten kann,

rückt der wirtschaftliche Aspekt in den Hintergrund und die Sicherheit wird verstärkt thematisiert. Erhalt der Gesamtfunktionalität ist dabei das primäre Ziel und zwingt die Hersteller, das System mit redundanten Ressourcen zu versehen, neuartige Komponenten zu entwickeln oder die Bauteile überzudimensionieren, jedoch sind diese Methoden nur bedingt hinnehmbar, da die Komponenten schwerer, kostspieliger und komplexer werden. Reflektiert man diese Tatsachen auf den Kunden, so kann dieser mit dem entwickelten System entweder weniger Last transportieren oder muss Sicherheitseinbußen bzw. erhöhte Kosten hinnehmen.

In dieser Bachelorarbeit soll eine Diagnose- und Zustandsüberwachungsmethodik am Beispiel eines Brennstoffzellensystems erarbeitet werden, um die Zuverlässigkeit des Systems zu verbessern, ohne auf redundante Ressourcen zurückzugreifen.

### 1.2 Anforderungen

Um den Einsatz des „System Health Management (SHM)“ adäquat zu erforschen und zu testen, wird ein Beispielsystem benötigt, welches eine solche Untersuchung zulässt. Als ein solches System bietet sich ein Brennstoffzellensystem (BSZS) an. Die Wahl wurde durch einen derzeit hohen Bedarf nach den alternativen Energiequellen sowie einem klaren Trend zur Elektromobilität begünstigt. Dieser Trend wird mit den Initiativen *HySolutions – Innovative Antriebe für Hamburg*, *Wasserstoff-Gesellschaft Hamburg* und die *Hamburger Landesinitiative für Brennstoffzellen und Wasserstofftechnologie* an dem Wirtschaftsstandort Hamburg verfolgt. Eine sog. PEM (Proton Exchange Membrane) Brennstoffzelle, die sich, aufgrund des guten dynamischen Verhaltens und einer hohen Stromdichte, ideal für mobile Anwendungen eignet [1], soll für weitere Untersuchungen benutzt werden. Das Modell sollte alle nötigen chemischen sowie physikalischen Zusammenhänge berücksichtigen und für das Vorhaben ein echtes BSZS hinreichend genau abbilden können. Darüber hinaus ist es wichtig, dass die Kommunikation und die Korrelation einzelner Hilfsaggregate untereinander sowie mit der Zelle nachgebildet werden, da dies für die weiteren Untersuchungen in Richtung SHM unabdingbar ist.

Da die Entwicklung einer Zustandsüberwachung- und Diagnosemethodik im Vordergrund dieser Arbeit steht, ist der Einsatz eines echten Systems nicht zweckdienlich, da dessen Einsatz hohe Kosten verursacht und sich dadurch das grundlegende Vorgehen nicht ändern würde. Wichtiger ist die Perspektive des modellbasierten Programmierens, da das Resultat in einem eingebetteten System als Zustandsbeobachter eingesetzt werden kann und somit den Einsatz des SHM begünstigt.

## 2 Grundlegende Informationen über das behandelte System

In diesem Kapitel findet eine Einführung in das behandelte System statt. Zunächst wird die Gesamtübersicht über das System gegeben. Im Folgenden werden das BSZS und die einzelnen Bestandteile erläutert und schließlich werden die Regelkonzepte vorgestellt.

### 2.1 Das Gesamtmodell

Angeregt durch die gegenwärtige Entwicklung von Fahrzeugen mit einem BSZS, wurde eine Hybridausführung für die Untersuchung gewählt. Mit dem Einsatz einer Batterie, die zusätzlich zu einem BSZS in einem Fahrzeug verbaut ist, stellen sich mehrere Vor- und Nachteile ein, die in der Tabelle 2.1 zusammengefasst sind. Dabei wird ein Hybrid mit einem rein auf dem BSZS basierenden Fahrzeug verglichen.

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile einer Hybridausführung

Vorteile	Nachteile
höhere Reichweiten	mehr Komponenten
Möglichkeit von Rekuperation beim Bremsen	komplexes System
niedriger Verbrauch	
höhere Lebensdauer	
besserer Kaltstartvorgang	

Der theoretische Aufbau von Hybridfahrzeugen mit dem Einsatz eines BSZS könnte gemäß der Abbildung 2.1 aussehen. Dabei handelt es sich um eine schematische Darstellung, d.h. die Positionierung sowie die Größe einzelner Teilsysteme können variieren. Dieser prinzipielle Aufbau wird als Muster zum Modellieren des Gesamtsystems verwendet.

Für die realitätsnahe Betrachtung enthält das Modell unterschiedliche Fahrscenarien und die dazu gehörigen Fahrwiderstände, diese resultieren aus der Geschwindigkeit, Steigung, Beschleunigung sowie der Wechselwirkung zwischen dem Reifen und dem Untergrund. Die dazugehörige berechnete Leistung wird als Soll-Leistung der Batterie abverlangt. Diese übernimmt den Teil des dynamischen Fahrverhaltens und wird durch die PEMFC als Reichweitenverlängerer (eng. Range Extender) aufgeladen. Die

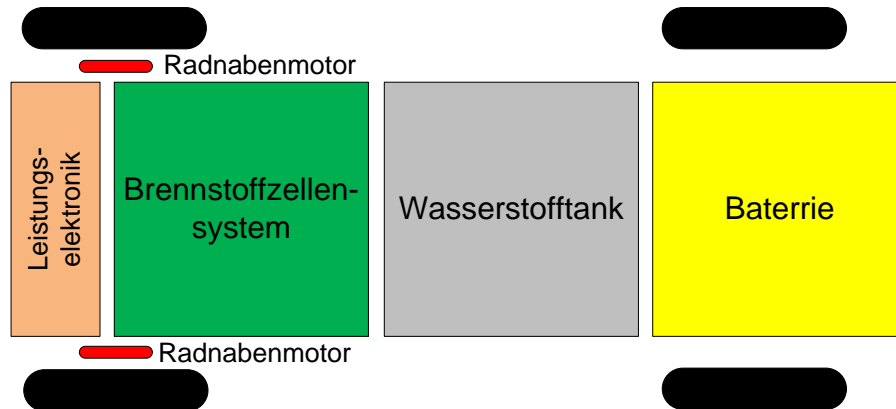


Abbildung 2.1: Einsatz des BSZS in einem Fahrzeug

theoretische Nutzungsdauer (Lebensdauer) der PEMFC kann verlängert werden, da der dynamische Teil der Belastung auf die Batterie verlagert wird.

Die Umsetzung findet mithilfe der Software *Matlab/Simulink/Stateflow* der Firma *Mathworks* statt.

Die Simulation sowie Entwicklung des Modells findet zeitdiskret statt, da Sensordaten bei realen Anwendungen ebenfalls die Messwerte in äquidistanten Zeitschritten aufnehmen und verarbeiten. Die gewählte Schrittweite beträgt  $0.1s$ , da diese eine schnell ablaufende Simulation garantiert und eine Verkleinerung der Schrittweite nur geringfügig zur Präzision beiträgt.

## 2.2 Das Brennstoffzellensystem

Wie das System aufgebaut ist, soll mithilfe der Abbildung 2.2 verdeutlicht werden.

Das Modell des Brennstoffzellensystems besteht aus acht Funktionseinheiten, die jeweils eine Komponente repräsentieren. Die grün-gestrichelte Linie repräsentiert die Eingrenzung für das SHM.

Das BSZS als physikalisches Streckenmodell wurde seitens *SILVER ATENA* zu Beginn zur Verfügung gestellt. Dieses funktionierte eigenständig und ist für einen stationären Betrieb konzipiert worden [15]. Da das Modell für mobile Anwendungen ausgelegt und mit einer SHM Funktion ausgestattet werden soll, müssen einige Funktionseinheiten angepasst, die Regelung neu konzipiert und neue Schnittstellen geschaffen werden. Funktionseinheiten, die übernommen werden, werden explizit referenziert.

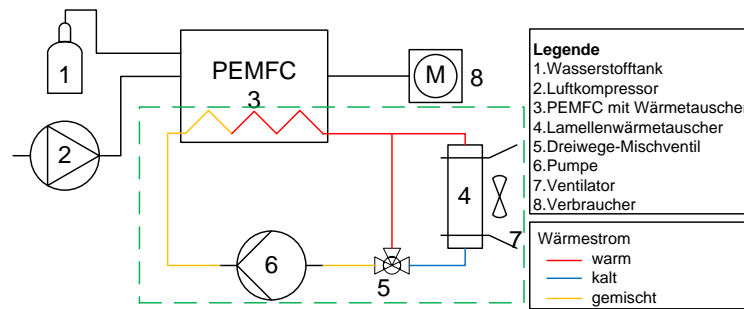


Abbildung 2.2: Schaltbild des Modells

Nachstehend werden die relevanten Funktionseinheiten und ihre Funktionen näher erläutert.

### 2.2.1 Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle

Die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle, eng. PEMFC, wird mit molekularem Wasserstoff aus einem Tanksystem und Sauerstoff aus der Luft betrieben. Dabei wird die chemisch gebundene Energie in elektrische Energie umgewandelt.

Der Aufbau der PEMFC-Zelle kann der Abbildung 2.3 entnommen werden.

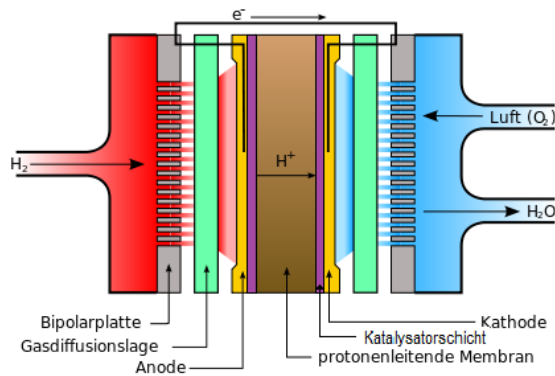
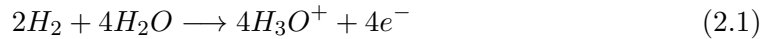


Abbildung 2.3: Schema Brennstoffzelle [2]

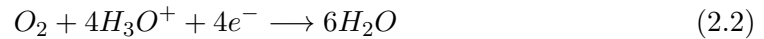
Bei der Reaktion auf der Anodenseite wird Wasserstoff unter Abgabe von zwei Elektronen zu je zwei Protonen oxidiert (2.1). Die  $H^+$ -Protonen diffundieren durch die protonleitenden Membran auf die Kathodenseite, dort werden diese, unter Zufuhr von Sauerstoff aus der Luft und Elektronen, die zuvor eine elektrische Arbeit verrichtet haben, zu  $H_2O$  reduziert (2.2). Die Gesamtreaktion wird als Redoxreaktion bezeichnet und kann mithilfe der Gleichung (2.3) beschrieben werden. Als Nebenprodukt entsteht

Wasser.

Anodenseite:



Kathodenseite:



Gesamtreaktion:



In der Theorie kann so die chemisch gebundene Energie zu 100% in elektrische Energie und zurück gewandelt werden. Jedoch kann das in der Praxis nicht erreicht werden, weil bei der Reaktion die Verluste den Wirkungsgrad herabsetzen. Diese werden in drei Bereiche gegliedert und als Aktivierungsüberspannungen, Widerstandsüberspannungen sowie Reaktionsüberspannungen bezeichnet [1].

In dem bestehenden Simulationsmodell wird zu jedem Zeitpunkt der Wirkungsgrad und die theoretisch maximale Leistung ausgerechnet. Die Verlustleistung wird zu 100% in Wärmeenergie überführt und ist für den Anstieg der Temperatur im System verantwortlich. Der Wärmetransport zwischen den Zellschichten und die Abgabe der Wärme an das PGW wird mithilfe physikalischer Gesetze berücksichtigt. Es soll darauf hingewiesen werden, dass die Wärmeabfuhr/-zufuhr der Zelle durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung nicht berücksichtigt wird, sondern komplett über die Wechselwirkung mit dem PGW erfolgt. Diese Vorüberlegung beruht auf der Tatsache, dass die Brennstoffzelle gekapselt ist, um das Gerät vor äußeren Einflüssen zu schützen [7].

Da die PEMFC, die aus einer Zelle besteht, eine geringe Spannung bereitstellen kann, werden diese einzelnen Zellen zu einem „Stack“ in Reihe geschaltet. So wird eine höhere Spannung erreicht und ermöglicht einen kompakten Aufbau.

Das vorliegende Modell der PEMFC besteht aus einem „Stack“ mit 350 Zellen. Bei der Simulation werden zunächst die physikalischen Größen für eine Zelle ausgerechnet und anschließend auf den gesamten „Stack“ erweitert. Im Weiteren wird der gesamte „Stack“ als PEMFC bezeichnet.

Ein großer Nachteil der PEMFC ist das aufwendige Wassermanagement [1]. Der Feuchte-Grad der Zelle hat eine direkte Auswirkung auf den Wirkungsgrad und die Lebensdauer, d.h. wenn die Zelle zu feucht ist, kann kein weiterer Wasserstoff aufgenommen werden. Bei niedriger Feuchtigkeit kann die Zelle austrocknen und die protonleitende Membran Risse bekommen. Um mehr zu diesem Thema zu erfahren, wird auf die Fachliteratur [8] verwiesen.

Die Feuchtigkeit in der Zelle wird stark durch die Temperatur beeinflusst. Die Zelle darf nicht zu kalt betrieben werden, da das Wasser nicht abgeführt werden kann. Bei hoher Temperatur wird jedoch zu viel Wasser verdampft und die Zelle wird austrocknen. Daraus resultiert die Problematik, dass die Zelle in einem bestimmten zulässigen Temperaturbereich betrieben werden darf. Die Temperatur sollte typischerweise zwischen  $333K - 353K$  liegen [5, 6]. Das PEMFC-Modell wurde aus [15] entnommen.

Die nachstehenden Komponenten sind für Temperaturregulierung verantwortlich.

### 2.2.2 Pumpenmodell

Das Modell der Pumpe wird vereinfacht auf die Proportionalität zwischen zugeführten Leistung und dem induzierten PGW-Massenstrom reduziert (2.4). Dabei werden der Wirkungsgrad, die Druckunterschiede und die Varianz der PGW-Dichte in der Berechnung berücksichtigt.

$$P_{el,Pumpe} \sim \dot{m}_{PGW} \quad (2.4)$$

Die Pumpe wird konstant im Optimum betrieben. Dabei ergeben sich mehrere Vorteile z.B. werden die Anschaffungskosten reduziert und die Lebensdauer erhöht. Den Vorteilen steht die höhere benötigte Energie gegenüber, die sich negativ auf den Wasserstoffverbrauch auswirkt.

### 2.2.3 Modell des Dreiwege-Mischventils

Das Dreiwege-Mischventil kann stufenlos verstellt werden. Damit wird die Durchflussmenge des PGW durch einen Bypass gesteuert. Über das Öffnen/Schließen des Ventils wird die PEMFC- Temperatur auf  $335K$  geregelt. Außerdem mischt das Ventil die Massenströme, um die Temperaturunterschiede auszugleichen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird das Dreiwege-Mischventils Einfachheit halber als Ventil bezeichnet.

### 2.2.4 Wärmetauschernachbildung

Es wird ein Simulinkmodell eines Lamellenwärmetauschers verwendet, um die Temperatur vom PGW zu senken. Dabei wird die Wärme von dem PGW über die Rohrwände an die Lamellen übertragen, die schließlich die Wärme an die Umgebungsluft abgeben. Diese Funktionseinheit wurde aus [16] entnommen.



### 2.2.5 Ventilatormodell

Der Ventilator ist eine fremd angetriebene Strömungsmaschine, die durch eine Druckerhöhung den Volumenstrom eines gasförmigen Fluids erhöht. In dem Simulationsmodell dient er zur Temperaturregulierung, er wird eingeschaltet, wenn die Kühlleistung vom Fahrtwind nicht ausreicht und die Temperatur Werte von  $348,5K$  übersteigt.

### 2.2.6 Sensoren

Das Gesamtmodell beinhaltet mehrere Sensoren, die in der Tabelle 2.2 zusammenfassend dargestellt sind. Es wird darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um keine physikalischen Sensoren handelt. Diese werden idealisiert, sodass keine Störungen und Ausfälle betrachtet werden. Einige Sensoren werden nur bei der Applikation benötigt, da deren Einsatz in der Massenproduktion zu hohen Kosten führen würde. Aus diesem Grund werden die fehlenden Sensoren durch die vorhandenen Sensordaten approximiert. Die Umsetzung wird im Kapitel 4.2 auf der Seite 27 erläutert.

Tabelle 2.2: Benötigte Sensoren

Nr.	Physikalische Größen	Stand
1	$v_{Car}$	Vorhanden
2	$T_{Amb}$	Vorhanden
3	$T_{FC}$	Vorhanden, Regelung
4	$\dot{m}_{H2}$	Vorhanden, Regelung
5	$\phi_{valve}$	Vorhanden, Regelung
6	$n_{Fan}$	Vorhanden, Regelung
7	$P_{el,FC}(ausUundI)$	Vorhanden, Regelung
8	$T_{PGW,n,FC}$	Benötigt
9	$T_{PGW,v,FC}$	Benötigt
10	$T_{PGW,n,HX}$	Benötigt
11	$\dot{m}_{c,AIR}$	Applikation
13	$\dot{m}_{PGW}$	Applikation

## 2.3 Regelkonzepte

In dem Brennstoffzellensystem enthaltene Regelkonzepte werden in der Tabelle 2.3 zusammengefasst. Wie man erkennen kann, wird nur die PEMFC- Temperatur über das Dreiwege-Mischventil geregelt, alle anderen Größen werden gesteuert.

Tabelle 2.3: Geregelte und gesteuerte Größen des BSZS

Aktoren	Regelkonzept	Abhängigkeit
Wasserstoffventil	Gesteuert	Batterieladestand
Ventilator Drehzahl	Gesteuert	PEMFC-Temperatur, -Leistung
Dreiwege-Mischventil	Geregelt (PID-Regler mit Anti-Windup)	PEMFC-Temperatur
Pumpe	Gesteuert	Zustand des Gesamtsystems

**Die Temperatur** wird nach dem Abschluss der Warmlaufphase geregelt, d.h. solange die Zelle unterhalb der geforderten  $335K$  ( $62^\circ C$ ) liegt, bleibt der Bypass geöffnet. Ab einer Temperatur größer  $335K$  wird der Bypass, je nach geforderter Kühlleistung, geschlossen. Wenn das Ventil komplett geschlossen ist, fließt 100% des PGW-Massenstroms durch den Wärmetauscher. Im normalen Betrieb verhindert die Regelung, dass die PEMFC-Temperatur die  $335K$  Grenze unterschreitet. Bei dem Regler handelt es sich um einen PID-Regler mit einem Anti-Windup-Element. Das Anti-Windup-Element verhindert, dass der Integrator zu hohe Werte annimmt und dadurch beim Rücklauf zu hohe Verzögerungen der Stellgröße entstehen. Um mehr zu dem Thema zu erfahren, wird auf die Fachliteratur [9] verwiesen.

Wenn der Fahrtwind zur Kühlung nicht ausreicht und die Temperatur die  $348,5K$  übersteigt, wird der Ventilator zugeschaltet.

**Die Leistung** wird über den Wasserstoffmassenstrom generiert und abhängig vom Batterieladestand gesteuert (siehe Abbildung 2.4).

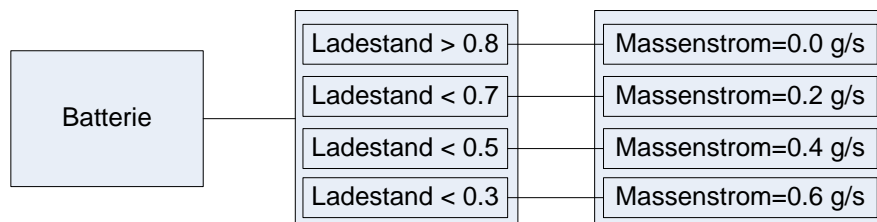


Abbildung 2.4: Leistungssteuerung über Wasserstoffmassenstrom

Die exakte Auslegung und Parametrisierung des verwendeten Reglers ist kein Hauptbestandteil dieser Arbeit. Aus diesem Grund wurde der Ventilregler nur so weit angepasst, bis das System ein plausibles Verhalten bezüglich des Öffnens und Schließens aufwies.

# 3 Theorie des System Health Management

Das SHM ist vielfältig und wird bereits in vielen Bereichen eingesetzt. Besonders wird dieser Begriff durch die Luft- und Raumfahrt geprägt. Im Fokus des SHM steht die Zuverlässigkeit eines Systems und soll durch diese Methode verbessert werden. In [4] wird SHM definiert als:

*„[...] the capabilities of a system that preserve the systems’s ability to function as intended.“*

Sinngemäß übersetzen lässt es sich in: die Fähigkeit eines Systems seine intendierte Funktion zu erhalten. Dieser Begriff trifft das Vorhaben am besten und wird aus diesem Grund in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Im Folgenden werden schrittweise die einzelnen Bestandteile des SHM beschrieben sowie die relevanten Informationen zu dem Thema erläutert. Zunächst soll jedoch die Datenerfassung und die Signalverarbeitung thematisiert werden, da diese eine hohe Relevanz haben und direkt auf den Erfolg des SHM auswirken.

- **Sensoren: Datenerfassung**

Die Messdaten werden mithilfe der Sensoren, seltener auch Messwertaufnehmer genannt, erfasst. Diese werden eingesetzt, um die physikalischen Größen oder chemischen Effekte in ein elektrisches Signal umzuwandeln [10]. Zusätzlich sollen die Sensoren zerstörungsfrei und zugänglich verbaut werden und keinen Einfluss auf gemessene- sowie andere Messgrößen haben.

Die Messgrößen können in zwei Gruppen klassifiziert werden [20]:

- *Äußere Messgrößen* beeinflussen das System von außen. Beispielsweise können diese Umgebungstemperatur, -druck, Fahrgeschwindigkeit, etc. sein.
- *Innere Messgrößen* beschreiben den inneren Zustand des Systems, wie z.B. Innenwiderstand, PEMFC-Temperatur, etc..

- **Signalverarbeitung**

Bei der Signalverarbeitung werden die Messdaten zum einen gefiltert, da bei realen Anwendungen die Messsignale verrauscht sind und dadurch die weiteren Arbeiten erschweren. Zum anderen werden die analogen Messsignale digitalisiert. Die Digitalisierung wird benötigt, um Daten, die für die Recheneinheit verständlich sind, zu erstellen. Wichtig dabei sind die Abtastrate und die Quantisierung. Die Abtastrate soll mindestens doppelt so groß sein wie die Frequenz des gemessenen

Signals (nur bei harmonischen Signalverläufen). Bei Quantisierung gilt der Satz: so hoch wie nötig, so gering wie möglich, da sonst der Speicherplatzbedarf sehr hoch wird.

### 3.1 Fehlererkennung

Durch die Fehlererkennung soll das Vorliegen eines Fehlverhaltens oder einer Störung im System erkannt werden. In [17] werden verschiedene Fehlererkennungsmethoden untersucht. Diese werden in der Abbildung 3.1 zusammenfassend dargestellt.

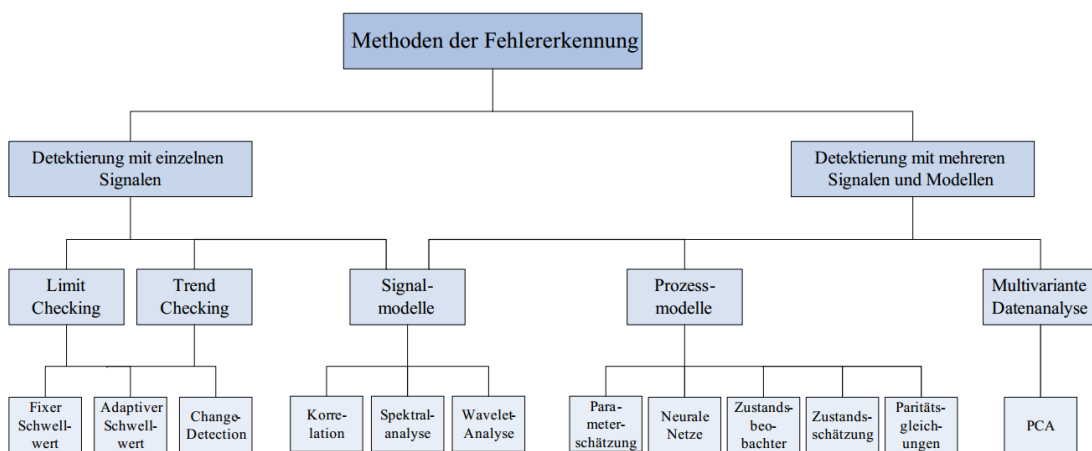


Abbildung 3.1: Überblick über Fehlererkennungsmethoden. Original aus [17] Übersetzung aus [18]

Im Weiteren werden wichtige Informationen hervorgehoben.

- **Detektierung mit einzelnen Signalen**

Bei diesem Verfahren wird der Verlauf einzelner Signale betrachtet. Bei der *Grenzwertüberwachung* (eng. Limit Checking) wird überprüft, ob sich das Signal in der festgelegten Toleranz befindet. Die *Trendüberwachung* (eng. Trend Checking) überprüft das Verhalten bzw. den zeitlichen Verlauf eines Signals. Probleme bei dieser Art der Detektierung können sich sowohl durch zu kleine als auch durch zu große Toleranzen ergeben. Die kleinere Toleranz kann Fehler im System schneller feststellen, jedoch aufgrund von Messrauschen, Toleranzen bei der Herstellung und Montage sowie bei einem dynamischen System könnte unter Umständen ein Fehlalarm ausgelöst werden. Bei einer zu großen Toleranz werden die Fehler evtl.

zu spät oder gar nicht erkannt, was zu einem Ausfall mit schwerwiegenden Folgeschäden führen kann.

Durch eine genauere Untersuchung einzelner Signale, z.B. mit der Fourier Analyse oder der Spektralanalyse, wird eine Zustandsüberwachung ermöglicht. Die Frequenzen und deren Amplituden können bei einigen technischen Systemen eine präzise Aussage über dessen Zustand treffen. Ein Beispiel dafür kann in [19] nachgelesen werden.

- **Detektierung mit mehreren Signalen und Modellen**

Ein sehr einfaches Verfahren ist die binäre Plausibilitätsabfrage zweier Signale [20]. Beispielhaft sei die Abweichung der Signale bei zwei redundant arbeitenden Sensoren genannt.

Der Einsatz künstlicher neuronaler Netze wird als ein *Black-Box*-Modell bezeichnet und gehört zu den empirischen Methoden, die keine physikalisch begründete Struktur sowie Parameter benötigen, sondern auf den Messdaten basiert [20]. Mit den neuronalen Netzen lassen sich die Messdaten klassifizieren. Wenn Daten des Normalzustandes sowie die des fehlerhaften Zustandes vorhanden sind, kann das neuronale Netz diese antrainieren und beim Wiedererkennen eines Musters einen Zustand dem realen System zuordnen. Diese Methode kommt bei komplexen Systemen bzw. bei Systemen, deren Verhalten physikalisch nur aufwendig darstellbar ist oder nicht erforscht wurde, zum Einsatz. Es wird geringes bis kein Wissen bezüglich des Verhaltens benötigt. Jedoch sind auch einige Schwierigkeiten zu nennen, z.B. kann es schwierig werden, Messdaten von fehlerhaften Zuständen aufzunehmen, vor allem bei den Prototypen bzw. bei kostspieligen System, die keinen Schaden nehmen dürfen.

Bei analytischen modellbasierten Ansätzen sind die drei wichtigsten zu nennen:

- *Parameterschätzung*

Ziel der Parameterschätzung ist die Schätzung der Modellparameter durch eine Anzahl von Beobachtungen (Messdaten). Dabei beschreiben diese Parameter den Ausgangszustand bzw. den Normalzustand und die Abweichung von diesem führt zu der logischen Konsequenz, dass ein Fehler vorliegen muss.

- *Beobachtungsverfahren*

Bei diesem Verfahren läuft das Verhaltensmodell parallel zu einem realen System und kann aufgrund der Messdaten ein Residuum, das im Fehlerfall einen Wert abweichend von Null annimmt, registrieren.

– *Paritätsgleichungen*

Auch bei diesem Verfahren wird, ähnlich wie bei dem Beobachtungsverfahren, ein Modell parallel zu dem realen System geschaltet, sodass Residuen abweichend von Null als Fehler interpretiert werden können.

## 3.2 Fehleridentifikation und Fehlerdiagnose

Mit der Fehleridentifikation sollen die Fehler lokalisiert und Fehlerursprung bestimmt werden. Dieser Schritt wird ausgeführt, wenn Existenz eines Fehlers erkannt wurde.

Bei der Fehlerdiagnose werden die Schwere sowie die Ursache eines Fehlers diagnostiziert, somit kann das System auf den Fehler reagieren, um die schwerwiegende Folgeschäden zu vermeiden bzw. bei sicherheitsrelevanten Systemen einen sicheren Zustand einzunehmen.

Dieses Unterkapitel wird in Anlehnung an [18] verfasst.

Die Fehleridentifikation und -diagnose bestehen im Wesentlichen aus zwei Verfahren: Interferenzverfahren und Klassifikationsverfahren.

- **Interferenzverfahren**

Bei diesem Verfahren wird das Wissen über Beziehungen zwischen den Symptomen und Fehlerursache des vorliegenden Systems benötigt. Dieses Wissen wird benutzt, um beispielsweise kausale Netze zu erstellen. Zusätzlich ergibt sich die Möglichkeit des Einsatzes einer Fuzzy-Logik oder Bayes Netze, die den Einfluss von Wahrscheinlichkeiten zulassen.

- **Klassifikationsverfahren**

Bei den unbekanntem bzw. komplexen Beziehungen zwischen Symptomen und Fehlerursache können Klassifikationsverfahren eingesetzt werden, dabei werden beispielsweise neuronale Netze verwendet, da kein Vorwissen benötigt wird.

## 3.3 Zusammenfassende Übersicht

Meist werden die Fehlererkennung, -identifikation und -diagnose zusammen behandelt, da deren Differenzierung nur schwer und in vielen technischen Anwendungen zugleich nicht benötigt wird. Die Messdaten und die Komplexität des Systems liefern die Erkenntnis, ob die Unterscheidung notwendig ist oder nicht. Bei einfachen Systemen reicht die Fehlererkennung aus, um die Fehlerursache und -schwere zu beschreiben. Beispielfähig kann an der Stelle ein einfacher Balken genannt werden, dessen Biegung überwacht

werden soll. Mit einem auf Dehnungsmessstreifen basierenden Messprinzip und einem empirisch ermittelten Verhalten kann direkt auf den Zustand bzw. die Unversehrtheit geschlossen werden. Bei komplexeren Systemen kann es unter Umständen dazu kommen, dass die detektierten Symptome zu mehreren Fehlern passen können, sodass eine weitere Unterscheidung bzw. Untersuchung notwendig ist.

### **3.4 Zustandsprognose**

Mit der Prognose wird das Verhalten von Funktionseinheiten in der Zukunft abgeschätzt. Basierend auf Verschleißkurven und dem ermittelten aktuellen Zustand einer Funktionseinheit kann die Restlebensdauer vorhergesagt werden. Somit kann die verantwortliche Person die Instandhaltungsarbeiten planen und die nötigen Bauteile bestellen.

Der Umfang und die Komplexität des Themengebiets machen das Entwickeln der Prognosefunktion unmöglich, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

## 4 Modellierung der neuronalen Netze

Die Modellierung, auch Modellbildung genannt, wird in drei Klassen unterteilt:

- **White-Box-Modellierung**

Die *White-Box*-Modelle sind Annäherungen an reale Systeme. Diese Annäherungen sind durch geltende Gesetzmäßigkeiten aus Physik, Chemie usw. sowie innere Korrelation mithilfe mathematischer Gleichungen beschrieben.

- **Black-Box-Modellierung**

Die *Black-Box*-Modelle werden benutzt, um ein Systemverhalten nachzubilden. Das Verhalten des Systems wird durch Korrelationen zwischen Eingangs- und Ausgangssignalen beispielsweise mithilfe von neuronalen Netzen approximiert.

- **Grey-Box-Modellierung**

Die *Grey-Box*-Modellierung stellt eine Mischung aus den beiden zuvor beschriebenen Modellbildungstypen. Ein Teil des Modells wird analytisch beschrieben und der verbliebende Teil durch ein *Black-Box*-Modell.

In dieser Arbeit liegt das Gesamtmodell als ein *White-Box*-Modell vor. Jedoch ist in dieser Arbeit das Verhalten sowie die Korrelationen zwischen den Signalen wichtig und weniger das präzise Abbilden eines echten Systems. Aus diesem Grund und aufgrund der höheren Rechengeschwindigkeit kommt der *Black-Box*-Ansatz bei der Entwicklung des SHM verstärkt zum Einsatz. Vor allem das neuronale Netz wird oft verwendet. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle eine kurze Einleitung in das Themengebiet erfolgen.

### 4.1 Einführung in die Thematik neuronaler Netze

Das Neuronale Netz (NN), auch als künstliches neuronales Netz bezeichnet, ist als Annäherung an das menschliche Nervensystem entstanden. Dabei sollten die Möglichkeiten des menschlichen Gehirns trotz fehlender bzw. fehlerhafter Details, die Informationen folgerichtig zu extrahieren, auf Maschinen übertragen werden. Beispielsweise kann ein Mensch eine Person richtig identifizieren, obwohl die Ausgangssituation nicht ideal (Nebel, Regen usw.) ist. Dabei behilft sich der Mensch seiner Erfahrungen und kann, aufgrund seiner Sinnesorgane, sein Gegenüber identifizieren.

Die Erläuterungen des NN wurden aus [11] übernommen und werden an dieser Stelle sinngemäß wiedergegeben. Abweichende Quellen werden entsprechend referenziert.



Die im NN befindlichen Neuronen werden auch als *Units* bezeichnet. Diese erhalten die Informationen, modifizieren diese und leiten sie entweder an andere Neuronen oder an die Umwelt weiter. Die Neuronen werden in Eingabe- (*Input-*), Verdeckte- (*Hidden-*) und Ausgabe- (*Output-*) *Units* gegliedert. Bei *Input-Units* handelt es sich um die Neuronen, welche die Signale (Reize, Muster) der Außenwelt aufnehmen können. Die *Hidden-Units* bilden die Schnittstelle zwischen *Input-* und *Output-Units* und beinhalten eine interne Repräsentation der Außenwelt. Die Weitergabe der Signale wird durch die *Output-Units* realisiert.

Die Neuronen werden durch Knoten repräsentiert. Mehrere übereinander angeordnete Knoten werden zu einer Schicht (*Layer*) zusammengefasst.

Die Verbindung zwischen den Neuronen bilden die sog. Kanten, die ihrerseits einen Gewichtungsfaktor beinhalten. Beim Lernen werden die Gewichtungsfaktoren, abhängig von der verwendeten Lernregel, angepasst. Die in den Gewichten gespeicherten Werte werden als Wissen des NN bezeichnet.

Der Einfluss des *Inputs* wird durch Gewicht und dem Aktivitätslevel der sendenden *Unit* beeinflusst, diese werden miteinander multipliziert (4.1).

$$input_{ij} = a_j \cdot w_{ij} \quad (4.1)$$

Bei  $j$  handelt es sich um die sendende und bei  $i$  um die empfangende *Unit*. Mit  $a$  wird die Aktivität der sendenden *Unit* und mit  $w$  das Gewicht zwischen den *Units* beschrieben. Bei mehreren Eingängen der *Unit* werden die *Inputs* aufsummiert (4.2).

$$netinput_i = \sum_j input_{ij} = \sum_j a_j w_{ij}. \quad (4.2)$$

Durch die Aktivitätsfunktion (Transferfunktion, Aktivierungsfunktion) wird der Zusammenhang zwischen dem Aktivitätslevel und dem *Netzinput* beschrieben. Die am häufigsten verwendete Sigmoidale Aktivitätsfunktion soll hier hervorgehoben werden. Um mehr über die alternativen Aktivitätsfunktionen zu erfahren, wird auf die Literatur [12] verwiesen. Das Verhalten der Sigmoidalen Aktivitätsfunktion ähnelt der Tangens-Hyperbolicus-Funktion. Zum besseren Verständnis wird das Verhalten in der Abbildung 4.1 gezeigt. Das Verhalten wird durch  $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} = \pm 1$  und einem nahezu linearen Anstieg für  $x \in [1 - 1]$  charakterisiert.

Weiter wird die Aktivität der sendenden *Unit* durch ein sog. „Bias“ beeinflusst. Diese *Unit* hat keinen eigenen Eingang und hat einen Wert von "1". Durch die Gewichtung zwischen dem „Bias“ und einem Neuron wird ein Einfluss auf die Aktivität genommen.

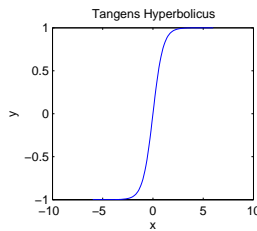


Abbildung 4.1: Tangens Hyperbolicus

Beispielsweise, wenn die „Bias“-Unit ein negatives Gewicht hat, muss die Aktivität erst ein gewisses Niveau erreichen, damit es Aktiv wird. Beim nicht Erreichen verharrt das Neuron in dem inaktiven Zustand.

Mit der sog. Trainingsphase wird das Lernen des NN bezeichnet, dabei werden die Gewichte aufgrund der Reize je nach Lernregel angepasst. Es wird zwischen überwachtem und nicht überwachtem Lernen unterschieden. Bei dem überwachten Lernen (*supervised learning*) werden die Gewichte anhand der konkreten Ausgangssignale (*Outputs*) modifiziert, d.h. es findet ein Vergleich zwischen Soll- und Istausgabe statt. Bei dem nicht überwachten Lernen (*unsupervised learning*) wird kein Output vorgegeben, wodurch das NN versucht, auf der Basis des Inputs, Muster zu erkennen, diese zu erlernen und zu klassifizieren.

Es existiert die Möglichkeit des adaptiven Lernens, wodurch das NN während des Betriebes / der Simulation laufend mit neuen Daten gespeist wird und sich an die neuen Reize anpasst. Diese Methode benötigt viel Rechenkapazität und wird aus diesem Grund nicht weiter verfolgt.

Nach der Trainingsphase folgt die Testphase, dabei wird das NN mit den Ausgangsreizen bzw. mit neuen Reizen beaufschlagt und geprüft, ob das Netz die Gewichtung richtig gewählt hat und das Lernen erfolgreich war.

In dieser Arbeit wird das sog. „*feedforwardnet*“ verwendet, um das NN zu erstellen. In der Abbildung 4.2 wird diese NN-Art dargestellt.

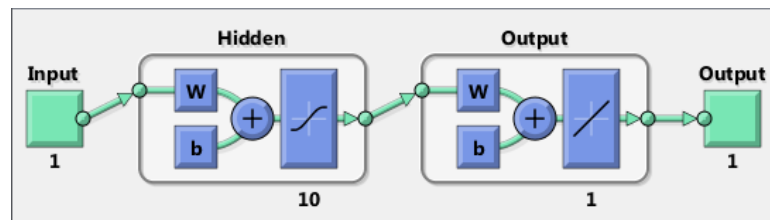


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des „*feedforwardnet*“-NN [14]

Mithilfe des NN kann ein Zustandsautomat erstellt werden. Dieser kann anhand der Messdaten den aktuellen und den künftigen Zustand ermitteln. Dabei besteht die Schwierigkeit darin, dass:

- das NN unvorhergesehen auf die nicht erlernten Inputs reagiert,
- man sehr große Menge an Trainingsdaten mit unterschiedlichen Zuständen benötigt
- und das Trainieren des Netzes sehr rechenintensiv ist.

Außerdem wurde während der Arbeit festgestellt, dass die kleinsten Veränderungen am System schwerwiegende Abweichungen für das Modell bedeuten können. Wenn man das auf das NN-Modell reflektiert, bedeutet diese Tatsache, dass das Netz bei jeder Veränderung neu trainiert werden muss. Aus diesem Grund sollte das Netz erst im Endstadium erstellt/ trainiert werden.

## 4.2 Einsatzbereiche der neuronalen Netze in dieser Arbeit

In dieser Arbeit wird das Verhalten einiger Funktionseinheiten durch das NN beschrieben. Dabei sollen zwei Sensoren, die nur bei der Applikation vorhanden sind, ersetzt und das Normalverhalten einiger Funktionseinheiten beschrieben werden. Die NN-Modelle werden mithilfe *Matlab/Neural Network Toolbox* erstellt. Dabei handelt es sich bei den NN ausschließlich um die sog. „*feedforwardnets*“, da dieses Netztyp sequentiell aktiviert werden kann. Somit ist das System in der Lage, das Netz zu aktivieren, wenn dessen Ergebnisse benötigt werden und wenn dies nicht der Fall ist bleibt das Netz inaktiv (mehr zu diesem Thema wird im Kap. 6.6 erläutert). Das Skript sowie die NN-Modelle mit den spezifischen Informationen befindet sich im Anhang auf der Seite 65. In dieser Arbeit sind fünf Bereiche vorhanden, in denen *Black-Box*-Modelle vorkommen.

### Pumpe

In diesem Bereich wird das Verhalten der Pumpe, durch die vorhandenen Messsignale der PEMFC, beschrieben. Dabei steht der PGW Massenstrom im Vordergrund, da der Sensor durch die Approximation ersetzt werden soll. Zum Beschreiben der Pumpe werden folgende Signale verwendet:

- $T_{PGW,n,FC}$ ,
- $T_{PGW,v,FC}$ ,

- $P_{el}$ ,
- $\dot{m}_{H_2}$ .

Der Grundgedanke war, dass das NN aus der Energiebilanz den PGW Massenstrom extrahiert und dessen Wert angibt. Der Vergleich zwischen der Approximation und dem tatsächlichen Signal wird in der Abbildung 4.3 dargestellt. Auffällig sind die impulsartigen Ausreißer des approximierten Signals, jedoch ist die dadurch entstehende Abweichung verschwindend gering (unter  $0,01kg/s$ ) und ist für das weitere Vorgehen unproblematisch.

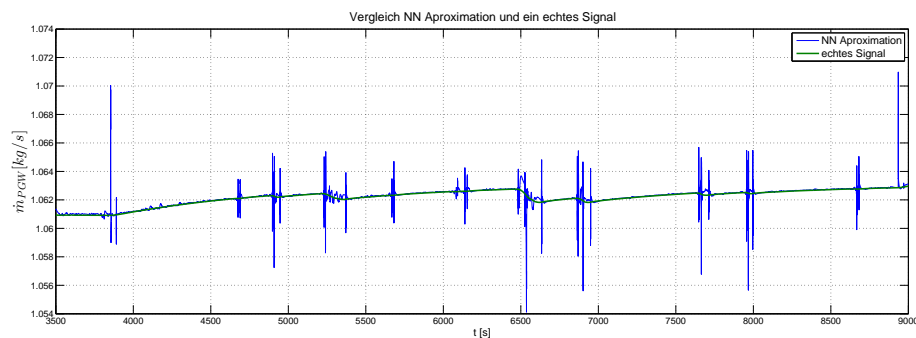


Abbildung 4.3: Vergleich zwischen Approximation und dem echten PGW Massenstrom

### Massenstrom der Kühlluft

Der Luftmassenstrom wird für die interne Berechnungen benötigt, da dieser ein Maß für den Wärmetransport ist und ohne diese Größe kann der Wärmetauscher nicht adäquat beschrieben werden. Der Luftmassenstrom hat zahlreiche Abhängigkeiten und ein nichtlineares Verhalten, wodurch dieses schwierig zu beschreiben ist. Um diese Größe abzubilden, wird ein Hammerstein-Wiener-Modell, das ähnlich wie das NN trainiert werden muss, verwendet. Dabei wird ein hinreichend genaues Verhalten generiert und der Luftmassenstrom approximiert. Dazu werden folgende Signale verwendet:

- $v_{car}$ ,
- $n_{fan}$ .

In der Abbildung 4.4 wird der direkte Vergleich zwischen dem approximierten und dem echten Signal dargestellt. Es sind nur sehr geringe Abweichungen erkennbar, die sich jedoch in einer hinnehmbaren Größenordnung befinden.

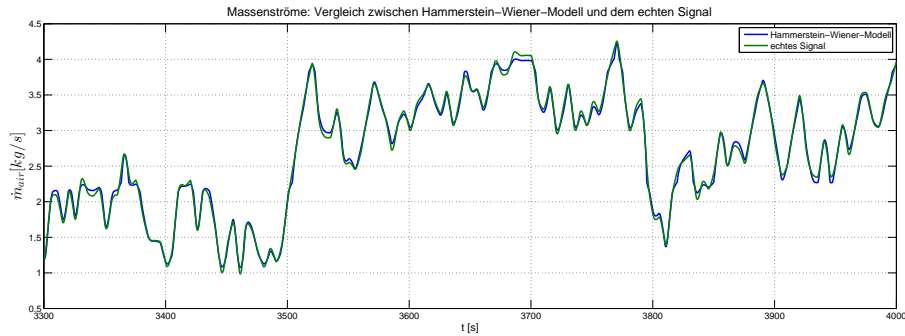


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung: echter und approximierter Luftmassenstrom

### Wärmetauscher bei Fehleridentifikation

Das Verhalten vom Wärmetauscher wird durch ein NN angenähert. Die ausschlaggebende Größe ist hierbei die PGW Temperatur nach dem Wärmetauscher und wird bei der Fehleridentifikation (Kap. 6.2) für die Fehleranalyse verwendet. Dazu werden folgende Signale verwendet:

- $T_{PGW,n,FC}$ ,
- $\phi_{valve}$ ,
- $\dot{m}_{PGW}$ ,
- $\dot{m}_{AIR}$ .

Die beiden Verläufe werden in der Abbildung 4.5 dargestellt. Mann erkennt, dass der approximierter Verlauf eine sehr gute Annäherung an das echte Signal ist.

### PEMFC bei Fehleridentifikation und -diagnose

Die Annäherung an das Verhalten der PEMFC wird ebenfalls mithilfe eines NN durchgeführt. Das so entstandene Modell wird zur Fehleridentifikation und -diagnose (Kap. 6.2 und 6.3) verwendet. Dazu werden folgende Signale verwendet:

- $P_{el}$ ,
- $T_{PGW,n,FC}$ ,
- $T_{FC}$ .

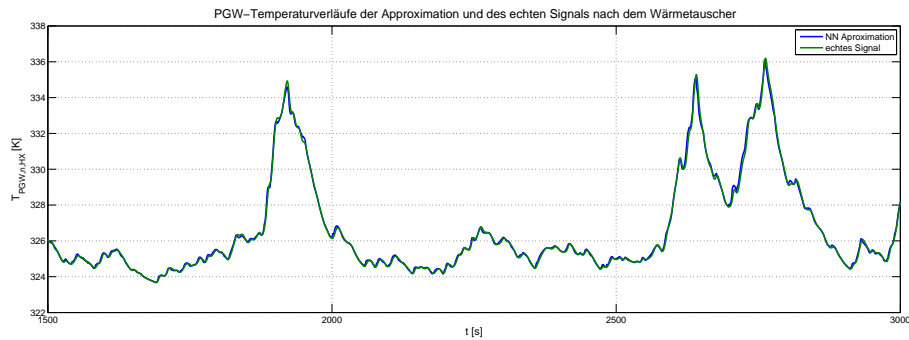


Abbildung 4.5: Vergleich Approximation und echtes Signal der PGW Temperatur nach dem Wärmetauscher

In der Abbildung 4.6 wird der Vergleich zwischen dem approximierten und dem echten Wasserstoffmassenstrom durchgeführt. Erkennbar ist die hohe Abweichung in dem unteren Bereich, wenn der Wasserstoffmassenstrom nahe Null liegt. Diese Tatsache ist auf die Trainingsdaten zurückzuführen, da der ausgeschaltete Zustand der PEMFC kein Teil des Betriebszustands ist und aus diesem Grund nicht mittrainiert wurde.

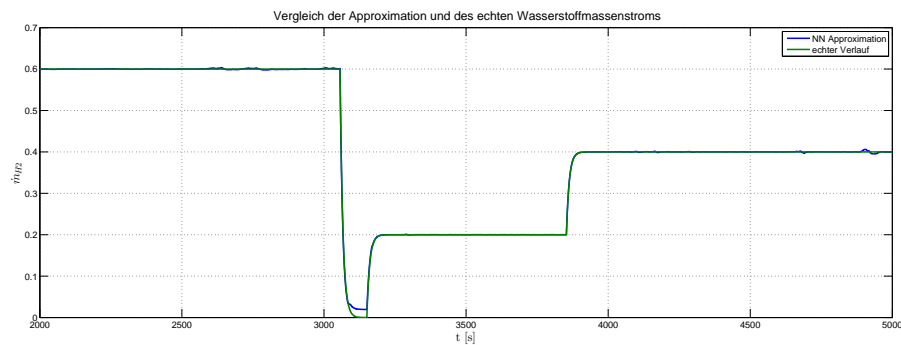


Abbildung 4.6: Vergleich des approximierten und echten Wasserstoffmassenstroms

### Brennstoffzellensystem

Bei der Fehlererkennung wird das gesamte Brennstoffzellensystem untersucht. Dabei sollen die Fehler anhand der PEMFC-Temperatur detektiert werden. Aus diesem Grund wird ein NN zur Approximation verwendet. Weitere Informationen sind im Kap. 6.1.1 enthalten.

# 5 Fehlermodellierung

Um das SHM adäquat entwickeln und simulieren zu können, werden Fehlerszenarien benötigt. In diesem Kapitel sollen diese vorgestellt werden. Zusätzlich wird ein Überblick über die Auswirkungen einzelner Fehler geschaffen.

## 5.1 Fehlerimplementierung im Modell

Das Simulationsmodell wird zunächst um die Fehler, siehe Tabelle 5.1, erweitert. Da die Ausfallwahrscheinlichkeit für eine Komponente sehr gering ist, werden die Fehler jeweils mithilfe eines Schalters simulativ initiiert. Möglichkeiten einer zeit- oder verhaltensabhängigen Initiierung sind denkbar, werden allerdings in dieser Arbeit nicht verfolgt. Außerdem ist die Wahrscheinlichkeit, dass zwei und mehr Komponenten gleichzeitig ihre Funktionalität einstellen, verschwindend gering und wird aus diesem Grund in dieser Arbeit nicht behandelt.

Tabelle 5.1: Induzierten Fehler

Bauteil	Fehler	Fehlerursache	Auswirkung
Pumpe	$\dot{m}_{PGW}$ reduziert	el. Innenwiderstand zu hoch, mech. Verschleiß	$T_{FC}$ steigt
Ventilator	$\dot{m}_{AIR}$ sinkt	el. Innenwiderstand zu hoch, mech. Verschleiß	$T_{FC}$ steigt
PEMFC	$\eta_{FC}$ verschlechtert	Alterung	$\dot{Q}_{FC}$ steigt
Wärmetauscher	$\dot{Q}_{HX}$ sinkt	Alterung, Verstopfung	$T_{FC}$ steigt
Ventil	$\dot{m}_{PGW,BP}$ steigt $\dot{m}_{PGW,BP}$ sinkt	mech. Verschleiß, Reibung  Verstellung langsam	$T_{FC}$ steigt $T_{FC}$ sinkt $T_{FC}$ schwankt

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass eine Funktionseinheit nur in seltenen Fällen plötzlich ausfällt. Viel mehr handelt es sich um einen schleichenden Alterungsprozess, bei dem mit fortschreitender Einsatzzeit sich die Funktionalitäten zunehmend verschlechtern. In der Industrie wird versucht die Wahrscheinlichkeit eines plötzlichen Versagens von Bauteilen zu reduzieren, da dieses unberechenbar ist und eine präzise Angabe von Restlebensdauer erschwert wird. Außerdem existieren viele weitere Fehlermöglichkeiten, die in diesem System entstehen können. Ein Beispiel hierfür kann die Leckage im Kühlkreislauf sein, jedoch lässt die Detailtiefe des Modells eine weitere

Untersuchung nicht zu. Es soll darauf hingewiesen werden, dass der Umfang der Fehlermöglichkeiten sowie -auswirkungen das grundlegende Vorgehen nicht verändern würde. Aus diesem Grund wird der Übersicht halber die Arbeit auf die oben beschriebenen Fehlerfälle beschränkt.

## 5.2 Simulation der Fehler

Im Weiteren wird das System mit den Fehlern simuliert. Die Testbedingungen werden bei den Tests statisch gehalten und in der Tabelle 5.2 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5.2: Testbedingungen

Variable	Wert	Einheit
$T_{Amb}$	293	$K$
$v_{car}$	40	$km/h$
$t_{Fail}$	600	$s$
$t_{Simulation}$	700	$s$

Die Fehler werden zur besseren Visualisierung der „wenn-dann“-Beziehungen im eingeschwungenen Zustand initiiert. Wichtig bei der Betrachtung ist der qualitative Verlauf der Temperatur, die im Fokus dieser Arbeit steht.

### Reduzierte Pumpenleistung

Die Simulation des plötzlich auftretenden Leistungsabfalls der Pumpen auf 50% wird in der Abbildung 5.1 dargestellt. Dabei kann die Pumpe nicht mehr die volle PGW-Fördermenge bereitstellen, d.h. die transferierte Wärme von PEMFC an das PGW sinkt. Man erkennt den Temperaturanstieg sowie den Anstieg der Ventilator-Drehzahl. Das System versucht die PGW-Eingangstemperatur der PEMFC zu senken, um den

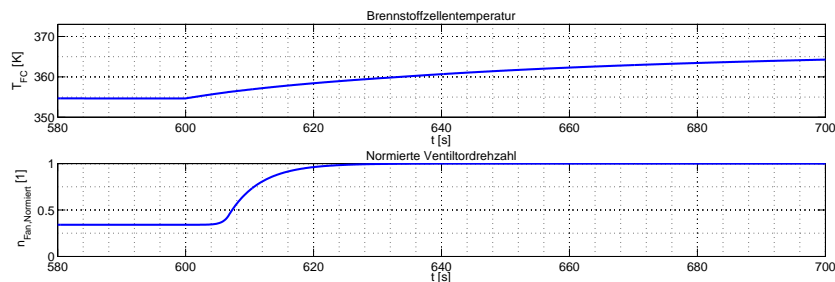


Abbildung 5.1: Pumpenfehler:  $\dot{m}_{PGW}$  sinkt auf 50% bei  $t = 600s$



Verlust des Massenstroms zu kompensieren. Trotz der vollen Leistung des Ventilators, kann der Verlust nicht ausgeglichen werden und folglich würde die PEMFC überhitzen.

### Ventilator Komplettausfall

Als Nächstes wird Einfluss des Ventilator-Fehlers demonstriert. Dabei wird der Ventilator abgeschaltet, sodass der Massenstrom der kalten Luft durch den Wärmetauscher nur durch den Fahrtwind gegeben ist. Das Ergebnis wird in Abbildung 5.2 visualisiert. Offensichtlich reicht der Fahrtwind nicht aus, um die nötige Kühlleistung zu erbringen.

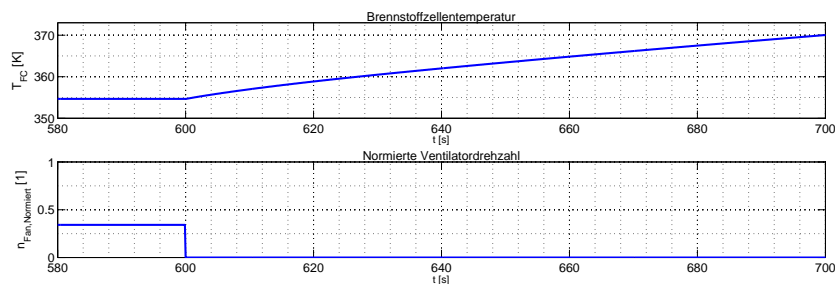


Abbildung 5.2: Ventilatorfehler:  $n_{Fan}=0$  bei  $t = 600s$

Folglich steigt die Temperatur der PEMFC und würde der Brennstoffzelle irreparable Schäden zufügen.

### PEMFC

Hier soll simuliert werden, wie sich das System verhält, wenn der Innenwiderstand der PEMFC um 80% erhöht wird. Dabei wird aus dem Wasserstoff weniger elektrische und mehr thermische Energie, gegenüber dem Normalzustand, gewandelt, d.h. Entropieproduktion nimmt zu. Wenn die Entropieabnahme kleiner als die Entropiezunahme ist, führt dies zu einer Temperaturerhöhung des Systems, siehe Abbildung 5.3.

### Wärmetauscher

Ein Fehler vom Wärmetauscher verhält sich ähnlich wie der PEMFC-Fehler. Dabei reduziert sich die Kühlkapazität. Der Ventilator muss einen höheren Luftmassenstrom fördern, um dies zu kompensieren. Wenn der Ausgleich nicht stattfindet erhöht sich die Temperatur der PEMFC.

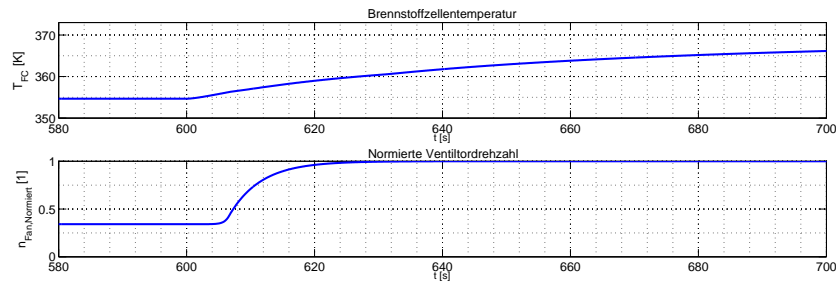


Abbildung 5.3: PEMFC-Fehler:  $R_{i,neu} = 1,8R_{i,0}$  bei  $t = 600s$

### Ventilfehler

Es soll das Verhalten des Ventils mit reduzierter Geschwindigkeit simuliert werden. Um den Effekt besser erkennen zu können, wird die Simulation angepasst. Die Außentemperatur wird auf 293K gesetzt. Die Folgen werden mithilfe der Abbildung 5.4 verdeutlicht.

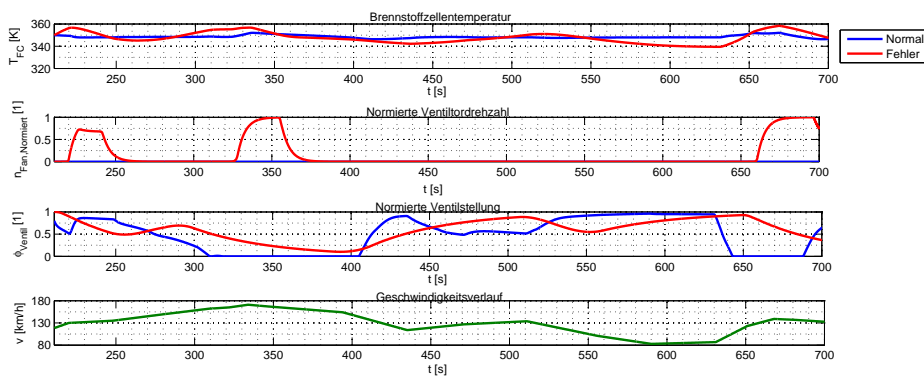


Abbildung 5.4: Auswirkung des verlangsamten Ventils

Erkennbar sind mehrere Effekte. Die Temperaturschwankungen sind bei dem fehlerhaften Zustand höher als bei dem Normalzustand und wirken negativ auf die Lebensdauer der PEMFC aus. Die Temperaturregelung erfolgt über den Ventilator, demzufolge steigt der Energieverbrauch. Im Normalzustand wird der Ventilator nicht eingeschaltet.

Die Auswirkungen des Ventilfehlers sind schwierig einzuschätzen, da diese stark von Geschwindigkeit, Leistung und Ventilstellung abhängig sind. Bei einer hohen Leistung und niedriger Geschwindigkeit würde der geöffnete Bypass zum Überhitzen der Zelle führen. Bei einer niedrigeren Leistung und hoher Geschwindigkeit führt ein geschlossener Bypass zum Unterkühlen, da der PGW-Massenstrom komplett durch den Wärmetauscher fließt.

# 6 Realisierung von System Health Management

In diesem Kapitel wird die verwendete Methodik zur Entwicklung des SHM vorgestellt. Die Entwicklung wird modellbasiert, mithilfe von *Matlab/Simulink* umgesetzt und lässt sich durch die Abbildung 6.1 schematisch darstellen.

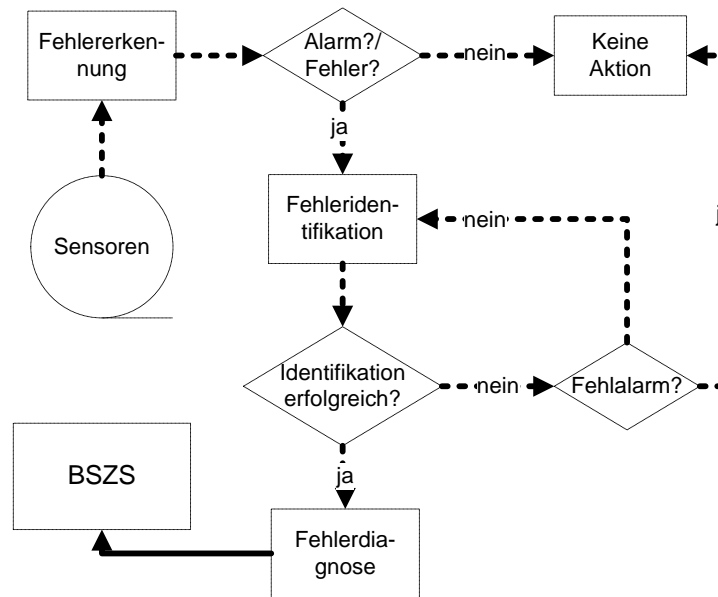


Abbildung 6.1: Entwickelte Methodik des SHM

Die einzelnen Prozesse vom Erkennen bis zum Einleiten der Gegenmaßnahmen und deren Aufbau sowie Funktionsweise werden im weiteren Verlauf behandelt.

## 6.1 Entwicklung einer Fehlererkennungsmethode

Die Fehlererkennung ist die Basis für die nächsten Schritte des SHM. Das primäre Ziel hierbei ist, eine Methode zu erstellen, die frühzeitig und zuverlässig einen Fehler im System erkennt.

In Kap. 3.1 werden unterschiedliche Verfahren zur Fehlererkennung vorgestellt. Bei der vorliegenden Bachelorarbeit wird der Fokus auf die *Detektierung mit mehreren Signalen und Modellen: Beobachtungsverfahren* gerichtet. Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei BSZS um ein dynamisches, nicht lineares *Multiple Input Multiple Output*

System handelt, werden die einfacheren Verfahren dergestalt im weiteren Verlauf nicht gesondert betrachtet.

Es wird ein *Black-Box*-Modell erstellt, welches aufgrund der Messsignale eine präzise Beziehung derer approximiert und dadurch einen Normalzustand des BSZS wiedergibt. Dies ist notwendig, um auf die Existenz eines Fehlers schließen zu können. Der Aufbau der entwickelten Fehlererkennungsmethode wird in der Abbildung 6.2 gezeigt. Dabei wird das *Black-Box*-Modell parallel zu dem betrachteten System geschaltet. Die messbaren Eingangsgrößen ( $u(t)$ ), die auf das BSZS einwirken sowie einige inneren Messgrößen / Parameter ( $p(t)$ ) werden dem *Black-Box*-Modell zugeführt. Ein Residuum wird zwischen der gemessenen Ausgangsgröße des BSZS ( $y(t)$ ) und der Approximation des *Black-Box*-Modells ( $y_M(t)$ ) gebildet. Wenn da BSZS sich im Normalzustand befindet, wird idealerweise ein Residuum von Null generiert.

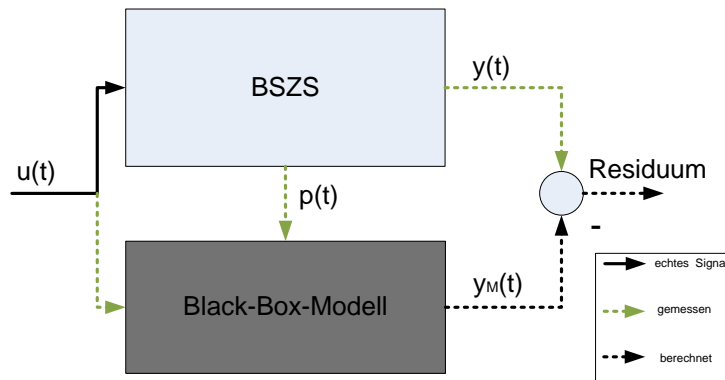


Abbildung 6.2: Fehlererkennung durch Residuumbildung

Dieses Vorgehen wird gewählt, da die *Black-Box*-Modelle im Vergleich zu *White*- oder *Grey-Box*-Modellen eine geringere Rechenkapazität benötigen und hierdurch über eine bessere Eignung für die Online-Analysen verfügen. Der zusätzliche Grund für das besagte Vorgehen stellt die Tatsache dar, dass hierfür ein relativ geringfügiges Vorwissen benötigt wird.

### 6.1.1 Erstellung des *Black-Box*-Modells zur Fehlererkennung

Beim Erstellen eines *Black-Box*-Modells wird ein NN verwendet. Zum Abbilden des Normalzustands des behandelten Systems werden Trainingsdaten benötigt. Im Kapitel 5.2 wird gezeigt, dass die behandelten Fehlerfälle eine direkte Auswirkung auf die PEMFC-Temperatur sowie deren Verlauf aufweisen. Aus diesem Grund ist die Tempe-

ratur die ausschlaggebende Größe, die zur Fehlererkennung verwendet wird, da diese zur Differenzierung zwischen dem normalen und dem fehlerhaften Zustand verwendet wird. In Folge dessen resultiert das Vorgehen, wobei die gemessene Temperatur mit der, durch das *Black-Box*-Modell approximierten, verglichen und ein Residuum gebildet wird, dessen Wert im Normalzustand idealerweise bei Null liegen sollte.

Mit der PEMFC-Temperatur wird zwar eine wichtige Größe beschrieben, jedoch werden zusätzliche Signaldaten benötigt. Diese sind in der Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die Trainingsdaten werden über eine Zeitspanne von  $30 * 10^3 s$  aufgenommen. Anschließend würde im realen technischen System eine Signalverarbeitung zwecks Minderung des Einflusses des Rauschens stattfinden. Aufgrund der modellbasierten Entwicklung des Systems werden die Sensoren idealisiert, sodass der Faktor des Rauschens nicht betrachtet wird.

Tabelle 6.1: Verwendete Signale

Signalart	Physikalischen Größen
Eingangssignal	$v_{car}, \dot{m}_{H2}$
Parametersignal	$n_{Fan}, P_{el,out}, \phi_{valve}$
Ausgangssignal	$T_{FC}$

Die Trainingsdaten werden in Eingangssignale (*input*) und Ausgangssignale (*targets*) aufgeteilt. Ein überwachtes Lernen wird ausgewählt, da der Normalzustand mit dem dazugehörigen Temperaturverlauf bekannt / messbar ist. Nach dem Einstellen der Randbedingungen für das Training und das NN wird das Netz trainiert.

Zum Trainieren wird das *Matlab / Neural Network Tool* verwendet. Als Trainingsfunktion wird die *Levenberg-Marquardt*-Methode verwendet, diese ist standardmäßig voreingestellt und wird von *Mathworks* als optimale Lernregel bezüglich der Geschwindigkeit bezeichnet [13].

### 6.1.2 Bewertung des NN-Modells

Das erstellte Modell soll auf Plausibilität untersucht und dessen Stärken und Schwächen herausgearbeitet werden. Dabei wird das NN-Modell in das Simulationsmodell implementiert. Das NN-Modell erhält die nötigen Messsignale von dem BSZS und approximiert die dazugehörige PEMFC-Temperatur. Anschließend findet ein Vergleich zwischen dem approximierten und tatsächlichen Temperaturverlauf statt.

Zunächst wird der Normalzustand des BSZS simuliert. Die Residuen können mit dem bloßen Auge nicht erkannt werden (siehe Abbildung 6.3a). Die Temperaturverläufe sind

nahezu identisch, d.h. das NN-Modell kann die Temperatur der PEMFC sehr präzise nachbilden. Die Darstellung der Residuen über der Zeit (mit einer höchsten Auslenkung von  $0.05K$ ) wird in der Abbildung 6.3b veranschaulicht.

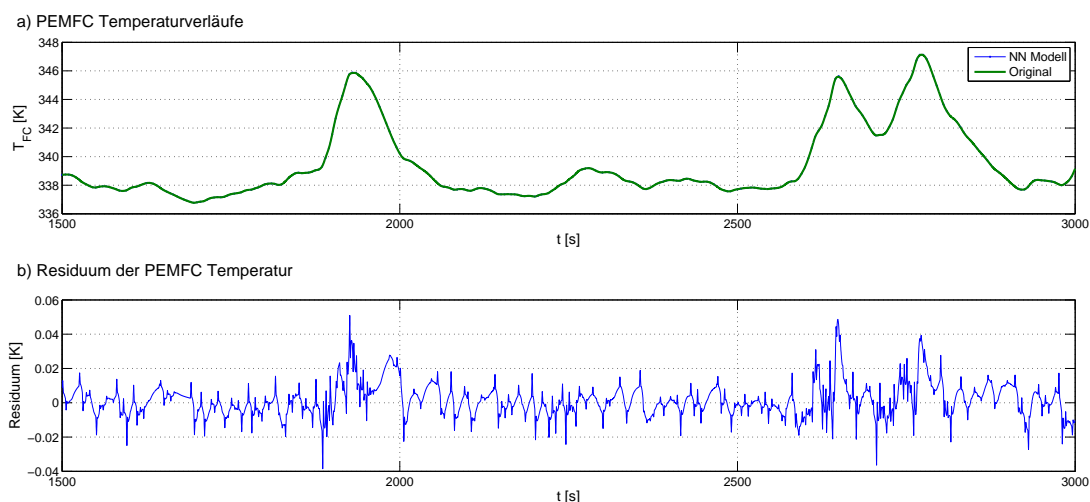


Abbildung 6.3: Vergleich der Temperaturverläufe

Hohe Residuen werden beim Ab- / Einschaltvorgang sowie im ausgeschalteten Zustand der PEMFC generiert (siehe Abbildung 6.4). Aufgrund der Auslegung des Gesamtsystems sind diese Zustände kein Teil der Trainingssequenz, da dabei das SHM sowie die Hilfsaggregate ausgeschaltet und für die weitere Betrachtung irrelevant sind. Allerdings sind die höheren Residuen ein Indiz für die Plausibilität des NN-Modells, da der ausgeschaltete Zustand nicht dem normalen Betriebszustand entspricht.

Ähnlich verhält sich das NN-Modell bei der Warmlaufphase der PEMFC, sodass auch in diesem Fall enorme Diskrepanzen zwischen approximiertem und tatsächlichem Temperaturverlauf entstehen.

Außerdem wird die Approximation durch das dynamische Verhalten des Systems beeinträchtigt, wodurch hohe Residuen entstehen. Vor allem beim Lastwechsel der PEMFC hat das NN-Modell höhere Abweichungen von der tatsächlichen Temperatur ( $0,66K$ ; siehe Abbildung 6.5).

In Ermangelung der Trainingsdaten, die für diesen Bereich zur Verfügung stehen, kann das NN-Modell den vorstehend genannten Vorgang nicht exakt abbilden. Dies kann zu etwaigen Problemen beim Gestalten der Tolerierung führen, wenn die Residuen in einem Fehlerfall geringer als beim Lastwechsel sind.

Das Tolerierungsproblem soll anhand der Abbildung 6.6 demonstriert werden. Dabei

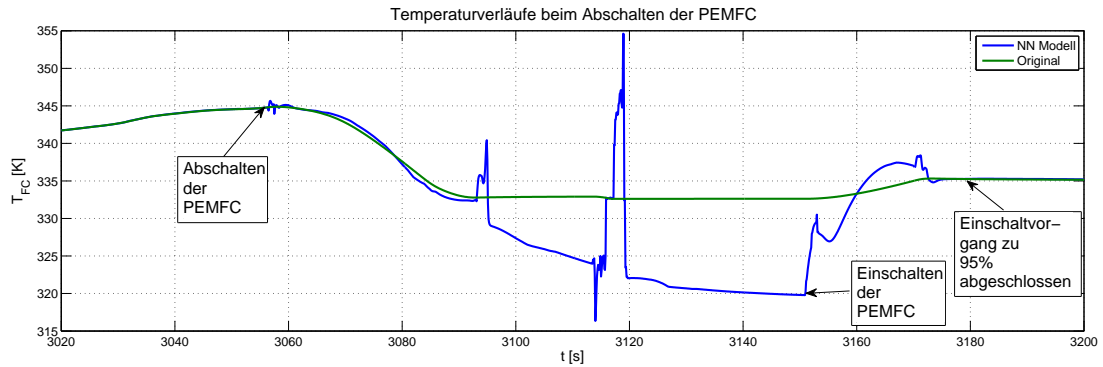


Abbildung 6.4: Vergleich der Temperaturverläufe Ab- und Einschaltvorgang

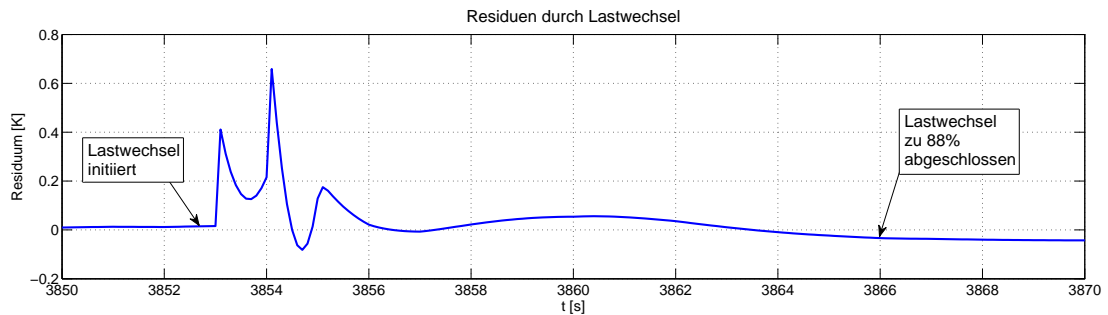


Abbildung 6.5: Residuen durch Lastwechsel

wird der Ventilatorfehler mit einer 10% niedrigeren Drehzahl initiiert.

Bereits beim Einschaltvorgang werden größere Residuen generiert, da die Drehzahl über der Zeit langsamer zunimmt und dadurch verglichen mit dem Normalzustand abnormal abläuft. Die maximale Auslenkung liegt bei unter  $0,2K$  und ist somit um Faktor 3 kleiner als die Auslenkung beim Lastwechsel. Aus diesem Grund kann die Grenzwertbetrachtung nicht ohne Modifikation an dem Fehlererkennungsmodell stattfinden, da die Fehler übersehen werden bzw. ein Fehlalarm ausgelöst wird.

### 6.1.3 Erweiterung zu einem Fehlererkennungsmodell

Zu dem NN-Modell wird eine Logik nachgeschaltet, um die Auswirkungen der Lastwechselvorgänge und des ausgeschalteten Zustandes zu reduzieren. Außerdem wird das Fehlererkennungsmodell erst beim Überschreiten einer PEMFC-Temperatur von  $333K$  aktiviert. So lässt sich die Warmlaufphase umgehen, die ähnlich wie bei dem ausgeschalteten Zustand hohe Residuen generiert. Damit soll gewährleistet werden, dass die

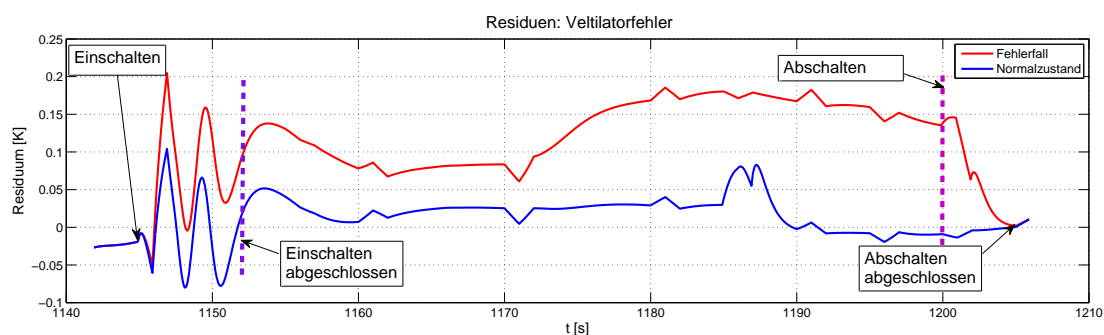


Abbildung 6.6: Residuen: Ventilatorfehler

geringen Abweichungen vom Normalzustand bei einem Fehlerfall von dem Modell erkannt werden.

Ferner wird das BSZS um ein Modul erweitert, das beim Systemstart sowie in den ersten Sekunden der Warmlaufphase das System auf Fehler untersucht. Im Zuge dessen findet eine 10%ige Verstellung des Ventils, die nach Ablauf von 3s mit dem gemessenen Wert abgeglichen wird. Ähnliche Vorgehensweise obwaltet bei der Untersuchung der Funktionalität des Ventilators (33%ige Beschleunigung der maximalen Drehzahl; anschließender Abgleich mit dem gemessenen Wert). Beim Starten der PEMFC wird unter Berücksichtigung der Temperatur der Wasserstoffmassenstrom mit der generierten elektrischen Leistung verglichen. Dabei werden in einer sog. Nachschlagetabelle die Werte durch das Modell auf Plausibilität untersucht. Wenn die aktuelle Leistung unterhalb der definierten liegt, wird dieser Zustand als fehlerhaft bewertet.

Da die PEMFC während des Lastwechsels nicht auf das Vorliegen eines Fehlers untersucht wird, wird die BSZS-Temperatur in dieser Zeitspanne überwacht. Liegt die Temperatur über  $353K$ , wird das System in den Alarmmodus versetzt, um ein etwaiges Überhitzen zu vermeiden. Aufgrund der Tatsache, dass die PEMFC im Normalzustand diese Temperaturgrenze nicht verletzt, kann der Zustand als fehlerhaft gewertet werden.

Zur Fehlererkennung werden drei Zusatzmethoden entwickelt. Mit der *einfachen Grenzwertbetrachtung* werden die Residuen auf das Verlassen einer Grenze überprüft, wobei ein Abgleich zwischen dem Residuum und einem Grenzwert stattfindet. Bei der *Kurz- und Langzeitüberwachung* werden Integrale über den Residuen gebildet und anschließend ebenfalls auf Grenzwertüberschreitung geprüft. Der Unterschied zwischen *Kurz- und Langzeitüberwachung* ist die Zeitspanne, nach der die Integratoren auf Null zurückgesetzt werden (10s und 120s).

Die Methoden werden zunächst ohne Fehler (Normalzustand) simuliert, um die Grenz-



werte bestimmen zu können. Im nächsten Schritt werden die ermittelten Grenzwerte mit einem Sicherheitsfaktor von "1,25" multipliziert, um die Wahrscheinlichkeit eines Fehlalarms zu reduzieren.

Die Fehlererkennung ist stark situationsabhängig und deshalb mithilfe der drei aufgeführten Methoden überwacht, um die Fehler flexibel, frühzeitig und zuverlässig zu erkennen.

#### 6.1.4 Bewertung der Fehlererkennungsmethoden

Beim Systemstart wird die Erkennbarkeit der zuvor initiierten Fehler mit 10%iger Schwere betrachtet. Die Diagramme veranschaulichen die Fehlererkennungsmethoden aufgetragen über der Zeit, wobei der Wert "1" das Erkennen und "0" das Nichterkennen impliziert.

##### 6.1.4.1 Ventilatorfehler

Der Ventilatorfehler wird erst bei dessen Inbetriebnahme erkannt. Das bedeutet, dass der Fehler in dem inaktiven Zustand dieser Funktionseinheit und bei niedriger Last nicht erkannt wird.

In der Abbildung 6.7a wird der Abschnitt mit der mittleren Last dargestellt. Der Fehler wird nur von der *Langzeiterkennung* erkannt, da die Residuen zwar stets bleibende Abweichungen größer  $0K$  aufweisen, diese sind jedoch zu gering, um von der *einfachen Grenzwertbetrachtung* und *Kurzzeitüberwachung* als Fehler erkannt zu werden. Außerdem wird auf die nicht unerhebliche Verspätung des Fehlererkennens hingewiesen: Das Integral benötigt annähernd die kompletten "120s", bis der Fehler als solches erkannt wird. Diese Tatsache ist ebenfalls die Folge der niedrigen Residuen.

Der Abschnitt der hohen Last und des aktiven Ventilators wird in der Abbildung 6.7b dargestellt. Der Fehler wird von allen Fehlererkennungsmethoden erkannt. Die *einfache Grenzwertbetrachtung* ist in der Lage, den Fehler frühzeitig zu erkennen. Das System kann die Abweichung von der normalen Ventilatorbeschleunigung feststellen und meldet einen Fehler. Bei der *Kurzzeitüberwachung* wird ein relativ großer Zeitraum verstrichen, bevor der Fehler als solcher erkannt wird. Im Zuge der *Langzeitüberwachung* dauert das Erkennen des Fehlers am längsten.

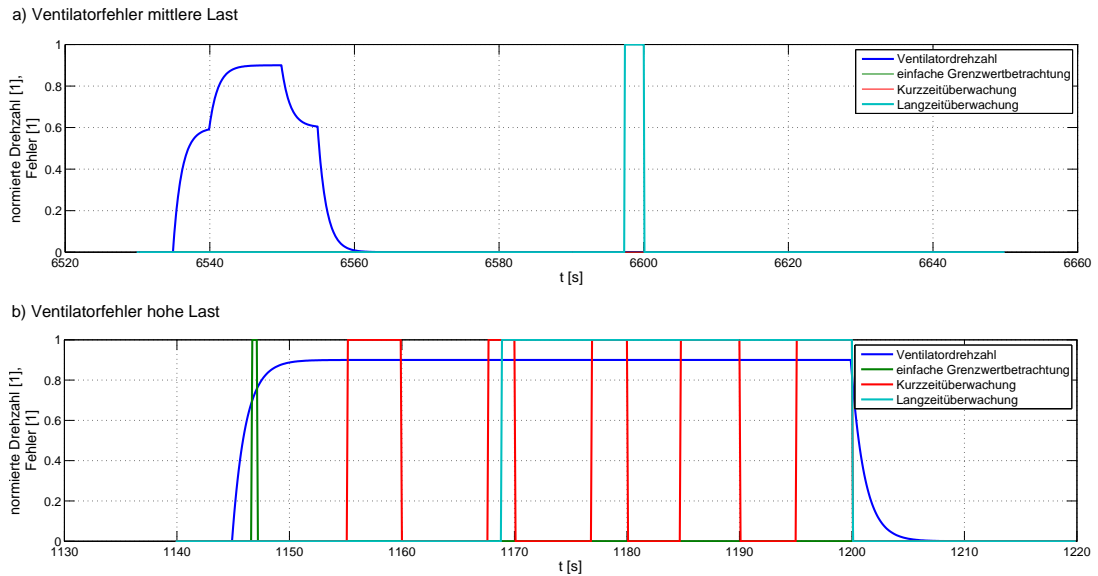


Abbildung 6.7: Ventilatorfehler a) mittlere- und b) hohe Last

#### 6.1.4.2 Pumpenfehler

Der Pumpenfehler bei unterschiedlichen Lastfällen wird in der Abbildung 6.8 dargestellt. Der Fehler wird durch die *einfache Grenzwertbetrachtung* und *Kurzzeitüberwachung* nicht erkannt, da die Residuen die festgelegten Grenzen nicht überschreiten. Lediglich im Verlaufe der *Langzeitüberwachung* wird der Fehler erkannt. Außerdem fällt auf, dass diese Methode nicht die vollen 120s benötigt, sondern:

- Bei Lastfall *a*) 57s,
- bei Lastfall *b*) 41s und
- bei Lastfall *c*) 42s

verstrichen.

#### 6.1.4.3 Ventilfehler

Die graphische Darstellung der Auswirkungen des Ventilfehlers ist nicht unproblematisch und wird deshalb tabellarisch veranschaulicht (siehe Tabelle 6.2). Die Fehlerszenarien des Ventils werden sequenziell initiiert und auf das Erkennen der Fehler durch die

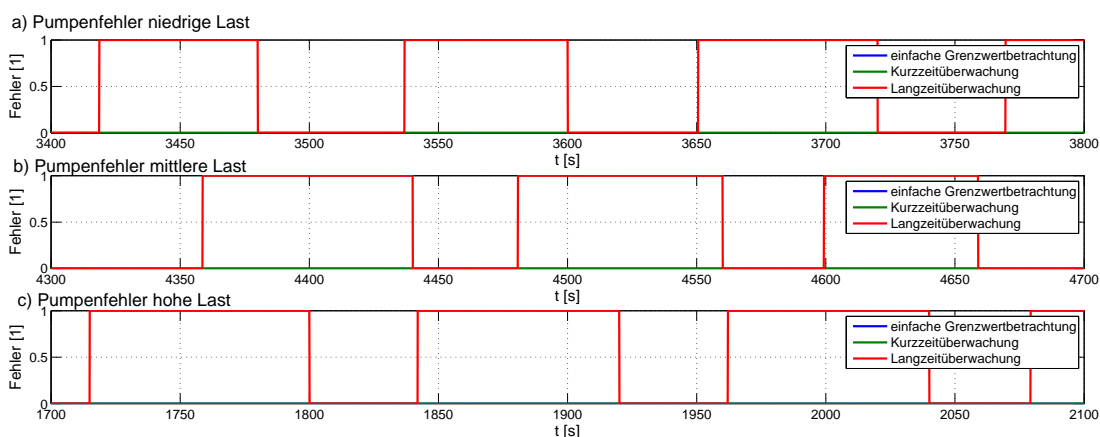


Abbildung 6.8: Pumpenfehler a) niedrige, b) mittlere und c) hohe Last

behandelten Methoden untersucht. Nachstehend werden drei initiierte Fehler Szenarien aufgelistet:

- Das begrenzte Schließen bedeutet für das System, dass das Ventil den Bypass nicht komplett schließen kann und dadurch weniger, verglichen mit dem Normalfall, PGW-Massenstrom durch den Wärmetauscher führt.
- Beim langsameren Verstellen werden die Ventilbewegungen langsamer ausgeführt.
- In der Fehlersequenz des begrenzten Öffnens kann das Ventil den Bypass nicht komplett schließen, sodass der PGW-Massenstrom zum Teil durch den Wärmetauscher fließt, was das Unterkühlen der PEMFC als unmittelbare Folge hat.

Dabei steht das Symbol „✓“ für die erfolgreiche Erkennung und das „X“ symbolisiert das Nichterkennen. Außerdem sollen die Lastfälle unterschieden werden, da die Auswirkungen stark von diesen abhängen. Die Reihenfolge der Aufstellung der Elemente beschreibt sukzessive die Lastfälle der PEMFC. Die Syntax soll beispielhaft an der *Kurzzeitüberwachungsmethode* bei einem begrenzten Schließen gezeigt werden: Diese Methode ist in der Lage bei einer mittlerer- und hoher Last den Fehler zu detektieren, jedoch bleibt der Fehler bei der niedrigen Last unerkannt.

Dass die Fehler nicht erkannt werden, hängt in erster Linie mit dem Systemverhalten und weniger mit den Fehlererkennungsmethoden zusammen. Wenn der Bypass nicht zu 100% geöffnet bzw. geschlossen werden kann, so macht sich dies nur unter bestimmten Voraussetzungen bemerkbar.

Tabelle 6.2: Erkennen der Fehler mit entwickelten Methoden

Methode/ Sequenz	einfache Grenzwertbetrachtung	Kurzzeitüberwachung	Langzeitüberwachung
Begrenztes Schließen auf 90%	<b>X</b> ✓✓	<b>X</b> ✓✓	<b>X</b> ✓✓
langsames Verstellen	✓✓ <b>X</b>	✓✓ <b>X</b>	✓✓✓
Begrenztes Öffnen auf 10%	✓ <b>XX</b>	✓ <b>XX</b>	✓ <b>XX</b>

Der Fehler der langsameren Ventilverstellung wird bei der niedrigen- und der mittleren Last erkannt, da die Regelung in diesen Bereichen erfolgt, um die PEMFC-Temperatur in einem definierten Bereich zu halten. Anders ist es bei der hohen Last, wobei das Ventil in der geöffneten Stellung verharret, da die PEMFC-Temperatur stets größer  $335K$  ist. Die Ausnahme bildet die *Langzeitüberwachung*, die als einzige Methode über längeren Zeitraum die Werte aufnimmt und dadurch den Ventilfehler in dem Bereich des Lastwechsels detektieren kann.

#### 6.1.4.4 PEMFC-Fehler

Der PEMFC-Fehler wird für jeden Lastfall sowie bei jeder Methode nahezu ohne Verzögerung detektiert, da das NN die Kohärenz zwischen der Leistung und der Temperatur optimal nachbilden kann und dadurch im Fehlerfall hohe Residuen entstehen. Aufgrund der niedrigen elektrischen Leistung, wird ein Residuum gebildet, das auf eine niedrigere PEMFC-Temperatur hinweist.

#### 6.1.4.5 Fehler des Wärmetauschers

Der initiierte Fehler des Wärmetauschers hat zur Folge, dass die Residuen bleibende Abweichungen aufweisen, jedoch zu gering sind, um von der *einfachen Grenzwertbetrachtung* erfasst zu werden. Auch die *Kurzzeitüberwachung* kann, nur in vereinzelt Abschnitten und nur bei der mittleren und hohen Last, den Fehler richtig erkennen. Die zuverlässigste Methode ist die *Langzeitüberwachung*, die das richtige Detektieren bei allen Lastfällen garantiert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Erfolg einzelner entwickelter Methoden situationsabhängig ist, wobei die *Langzeitüberwachungsmethode* einen erhöhten Grad an Zuverlässigkeit aufweist und so geringe Abweichungen von dem Normalzustand detektiert, jedoch mit dem Nachteil, dass es relativ lange Zeit benötigt, bevor ein Fehler erkannt wird. Die *einfache Grenzwertbetrachtung* und *Kurzzeitüberwachung*

sind schnell und können umgehend einen Alarm auslösen, können aber nicht zu 100% den Fehler erkennen, sodass es unumgänglich ist, alle drei Methoden im Weiteren zur Fehlererkennung zu benutzen. In der Tabelle 6.3 werden die drei Methoden und deren Möglichkeit, die Fehler zu erkennen, zusammengefasst. Die Syntax wird gemäß der Tabelle 6.2 übernommen (Ausnahme: *O* bedeutet, dass die Fehler in Ausnahmefällen erkannt werden).

Tabelle 6.3: Erkennen der Fehler mit entwickelten Methoden

<b>Methode/ Funktionseinheit</b>	einfache Grenzwertbetrachtung	Kurzzeit- überwachung	Langzeit- überwachung
Ventilator	<b>XX</b> ✓	<b>XX</b> ✓	<b>X</b> ✓✓
Pumpe	<b>XXX</b>	<b>XXX</b>	✓✓✓
Ventil	→	siehe Tabelle 6.2	←
PEMFC	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Wärmetauscher	<b>XXX</b>	<b>XOO</b>	✓✓✓

## 6.2 Fehleridentifikation

Nachdem ein Fehler erfolgreich entdeckt wird, aktiviert das System ein Alarmmodus und versucht durch die vorliegenden Sensordaten die Fehler zu lokalisieren. Da bei der Lokalisierung die einzelnen Funktionseinheiten nacheinander überprüft werden, wird ein *Matlab/Simulink/Stateflow*-Modell implementiert. Mithilfe des Modells kann eine Methode entwickelt werden, die wenig Rechenzeit benötigt und zudem sehr übersichtlich aufgebaut werden kann. Außerdem können die einzelnen Schritte beim Durchlauf des Programms über einen „Debugger“ angezeigt werden.

### 6.2.1 Entwicklung einer Fehleridentifikationsmethode

Angestrebt wird eine schnelle und präzise Fehlerlokalisierung bei gleichzeitig geringfügiger Inanspruchnahme der Rechenzeit / -kapazität. Dabei soll das System, wenn der Fehler erkannt wurde, nicht erst die komplette Suchschleife durchlaufen, sondern diese verlassen und direkt in den Fehlerdiagnosepfad der betroffenen Funktionseinheit wechseln.

Auf der Basis der Tabelle 6.3 werden unterschiedliche Fälle entwickelt, um den Fehler schnell zu lokalisieren.

Das angestrebte Ziel: Das System soll die Analyse idealerweise bei der betroffenen Funktionseinheit starten. Es widerspricht jedoch der Fehleridentifikation, denn wenn das System imstande ist, direkt die betroffene fehlerhafte Funktionseinheit zu lokalisieren, wird die Identifikation der Fehler nicht benötigt. Es ist aus diesem Grund wichtig, zwischen dem wahrscheinlichen und dem unwahrscheinlichen Fall zu differenzieren. Für den Fall, dass ein Fehler durch die *einfache Grenzwertbetrachtung* erkannt wird, stellen die Sensoren unter anderem fest, dass das System bei einer niedrigen Last und einer Temperatur unter  $350K$  befindet. Demzufolge sind die nachstehenden hypothetischen Annahmen schlüssig:

- Es ist unwahrscheinlich, dass ein Fehler des Ventilators, der Pumpe oder des Wärmetauschers vorliegt, da diese Fehler aufgrund dieser Erkennungsmethode nicht detektierbar sind.
- Es ist wahrscheinlich, dass ein Fehler aufgrund eines Fehlverhaltens der PEMFC oder einer Fehlfunktion des Ventils vorliegt.

Auf der Basis dieser Art der Unterscheidung wird eine Logik (dies wird nachfolgend erklärt) erstellt. Die Fehlererkennungsmethoden weisen grob auf die betroffene fehlerhafte Funktionseinheit hin. In Anbetracht der vorhandenen Sensordaten kann eine weitere Abgrenzung der Fehlersuche vorgenommen werden. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Analysestart bei der richtigen Funktionseinheit beginnt. Mit diesem Prinzip kann die wertvolle Rechenzeit eingespart werden, die anschließend zur Diagnose und schließlich zum Einleiten der Abhilfemaßnahmen genutzt werden kann.

Nach dem Erkennen eines Fehlers, wird die *obere Ebene* der Fehleridentifikation aktiviert (siehe Abbildung ?? im Anhang). Abhängig von der Fehlererkennungsmethode wird ein explizites *Chart* der mittleren Ebene aktiviert (siehe Tabelle 6.4).

Tabelle 6.4: Aktivierung der Identifikationscharts mittleren Ebene

<b>Chart</b>	<b>aktiviert durch</b>
<b>On_Fault_LimitCheck</b>	<i>einfache Grenzwertbetrachtung</i>
<b>On_Fault_Short_TC</b>	<i>Kurzzeitüberwachung</i>
<b>On_Fault_Long_TC</b>	<i>Langzeitüberwachung</i>

Die *Charts* in der mittleren Ebene sind identisch aufgebaut und werden in der Abbildung 6.9 gezeigt. Man erkennt fünf weitere *Charts*, welche die untere Ebene der Fehleridentifikation bilden:

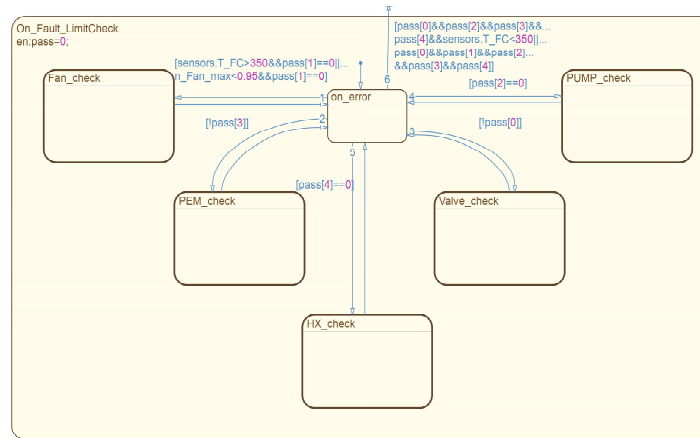


Abbildung 6.9: Identifikationschart mittlerer Ebene aktiviert durch *einfache Grenzwertbetrachtung*

### Fan\_check

Mit diesem *Chart* wird der Ventilator auf ein Fehlverhalten analysiert. Dabei findet eine logische Abfrage statt, die einen Zusammenhang zwischen Temperatur und Ventilatorumdrehzahl berücksichtigt und auf Plausibilität überprüft.

### PEM\_check

Dieses Chart ist für die Analyse der PEMFC verantwortlich. Hier wird überprüft, ob der eingestellte Wasserstoffmassenstrom mit dem approximierten übereinstimmen. Dabei wird ein neuronales Netz verwendet, da das nichtlineare Verhalten der PEMFC den Einsatz einfacher Nachschlagetabellen unmöglich macht.

Der Wasserstoffmassenstrom wird in einem Varianzband zwischen  $0g/s$  und  $0.6g/s$  variiert und die dazugehörigen Messdaten gesammelt. Die generierte elektrische Leistung, PEMFC-Temperatur sowie die des PGW nach der PEMFC werden als Eingangssignale verwendet. Anschließend wird das NN trainiert und in das Fehleridentifikationsmodell implementiert.

Beim Aktivieren der Fehleridentifikation wird das NN-Modell ausgeführt und der Wasserstoffmassenstrom approximiert. Der Quotient aus der approximierten und der tatsächlich eingestellten Größe gibt an, ob die PEMFC ein Fehlverhalten aufweist.

### HX\_check

Dieses *Chart* befasst sich mit dem Wärmetauscher und führt eine *Simulink*-Funktion aus, die ein Residuum zwischen der gemessenen austretenden Temperatur des PGW und der approximierten bildet. Die Approximation wird ebenfalls mithilfe eines NN realisiert. Dazu wird der theoretische PGW-Massenstrom, die Ventilstellung, die eintretende PGW-Temperatur sowie der Massenstrom der kalten Luft verwendet. (Massenstrom der kalten Luft wurde empirisch ermittelt und mithilfe von Hammerstein-Wiener-Modell abgebildet).

### Valve\_check

Mit diesem *Chart* wird das Ventil auf Fehlverhalten analysiert. Es wird ein Residuum gebildet, das durch die aktuell gemessene Ventilstellung und dem aus der Ventilregelung entnommenem Wert bedingt wird.

### PUMP\_check

Beim Aktivieren dieses *Charts* wird ein Residuum zwischen dem theoretischen PGW Massenstrom und dem approximierten gebildet.

Die Charts der unteren Ebene werden sukzessive aktiviert, bis die fehlerhafte Funktionseinheit lokalisiert wurde oder zur Fehlererkennung zurückkehrt. Wenn der Fehler nicht identifiziert werden konnte, liegt ein Fehlalarm vor. Damit die Funktionseinheiten nicht mehrmals analysiert werden, wird ein Hilfszähler der jeweiligen Einheit auf 1 gesetzt. D.h. nur wenn der Hilfszähler gleich 0 ist, wird die Funktionseinheit analysiert. Die Reihenfolge der Funktionseinheitenanalyse ist für das weitere Vorgehen von enormer Bedeutung, da die Fehleridentifikation so schnell wie möglich abgeschlossen werden soll.

## 6.2.2 Bewertung der Fehleridentifikationsmethode

In diesem Unterkapitel soll die entwickelte Fehleridentifikationsmethode untersucht werden. Dazu werden die Fehlerfälle, die bereits in den vorherigen Kapiteln behandelt wurden, initiiert. Expliziert werden nachstehende Aspekte hypothetisch betrachtet:

- Korrekte Fehlerzuordnung der betroffenen Funktionseinheit:

Dies ist der wichtigste Aspekt bei der Fehleridentifikation, da ansonsten die Ab-



hilfemaßnahmen zum Beheben der Fehlerauswirkungen nicht initiiert werden können.

- Richtigkeit der differierten Analysereihenfolge:

Der notwendigen Rechenzeit wird hierbei ebenfalls eine erhebliche Bedeutung beigemessen. Denn reagiert das System nicht rechtzeitig auf die auftretenden Fehler, können dadurch Folgeschäden für das Gesamtsystem entstehen.

In der Tabelle 6.5 wird die Auswertung der Fehleridentifikation zusammengefasst. Auffällig ist, dass alle Fehler erkannt und bis auf den Ventilatorfehler in der mittleren Leistung richtig identifiziert werden. Verantwortlich hierfür ist die Fehlererkennungsmethode (*Langzeitüberwachung*), da diese relativ verspätet den Fehler meldet und der Ventilator sich bereits im ausgeschalteten Zustand befindet. Dabei stimmt die gemessene mit der aus der Steuerung bekannten Drehzahl überein. Aus diesem Grund kann der Fehler nicht identifiziert werden und das System meldet einen falschen Alarm.

Außerdem ist auffällig, dass die Fehleridentifikation meist bei der betroffenen Funktionseinheit startet. Die Ausnahme bildet der Wärmetauscher, der erst als drittes analysiert wird. Es hängt mit der Approximation zusammen: Der PGW-Massenstrom und die Ventilstellung fließen in die Berechnung mit ein und müssen aus diesem Grund zuerst analysiert werden, da sonst das System fälschlicherweise den Pumpen- als Wärmetauscherfehler identifiziert.

Tabelle 6.5: Fehleridentifikationsmethode Auswertung

Fehler	Leistung	Erkennungsmethode	lokalisiert	Reihenfolge
Ventilator 90%	mittel	Langzeitüberwachung	<b>X</b>	-
	hoch	einfache Grenzwertbetrachtung	✓	1
Pumpe 90%	niedrig	Langzeitüberwachung	✓	1
	mittel	Langzeitüberwachung	✓	1
	hoch	Langzeitüberwachung	✓	1
Ventil 90%	mittel	Kurzzeitüberwachung	✓	1
	hoch	Langzeitüberwachung	✓	2
Ventil 10%	niedrig	Kurzzeitüberwachung	✓	1
PEMFC 90%	niedrig	einfache Grenzwertbetrachtung	✓	1
	mittel	einfache Grenzwertbetrachtung	✓	1
	hoch	einfache Grenzwertbetrachtung	✓	1
HX 90%	niedrig	Langzeitüberwachung	✓	3
	mittel	Langzeitüberwachung	✓	3
	hoch	Langzeitüberwachung	✓	3

### 6.2.3 Modifikation der Fehleridentifikationsmethode

Das Problem, dass der Ventilatorfehler bei der mittleren Leistung nicht erkannt wird, soll gelöst werden. Dabei wird der Maximalwert der Ventilator Drehzahl gespeichert und beim Beschleunigungsvorgang stets zurückgesetzt, sodass die aktuelle Maximaldrehzahl bewertet wird. Somit wird der Ventilatorfehler primär in der Reihenfolge analysiert und lässt sich auch richtig identifizieren.

Diese Methode ist nun in der Lage, die Fehler abschließend zu lokalisieren. Um anschließend die Diagnose der betroffenen Funktionseinheit zu beginnen, wird ein "5x1" Vektor **Fail[X]**, der zu Beginn ausschließlich Nullen enthält, definiert. Das [X] steht jeweils für die Funktionseinheit, die als fehlerhaft identifiziert wird (siehe Tabelle 6.6). Wenn die fehlerhafte Funktionseinheit erfolgreich identifiziert wird, wird die jeweilige Stelle des Vektors mit einer "1" überschrieben. Anschließend bricht das System die Identifikationsschleife ab und wechselt in den Diagnosepfad.

Tabelle 6.6: Fehleridentifikationsvektor Benennung

<b>X</b>	<b>Funktionseinheit</b>
0	Ventil
1	Ventilator
2	Pumpe
3	PEMFC
4	Wärmetauscher

## 6.3 Fehlerdiagnose

Mit der Fehlerdiagnose soll das System die Schwere und die Ursache des Fehlers abschätzen. Dabei ist es zwingend notwendig, dass der Fehler erkannt und die betroffene Komponente lokalisiert wurde. Mit dem Übergang von der Fehleridentifikation zur -diagnose wird das System zeitgleich in den Notlauf "**H2\_management\_fail**" geschaltet, um die PEMFC vor Überhitzen zu schützen. Auf das Thema der Abhilfemaßnahmen wird im Kap. 6.4 näher eingegangen.

### 6.3.1 Entwicklung der Fehlerdiagnose

Die Fehlerdiagnose besteht aus zwei Ebenen, die vergleichbar mit der unteren und der mittleren Ebene der Fehleridentifikationsmethode aufgebaut sind. Die primäre Differenz des Aufbaus wird dergestalt geäußert, dass die mittlere Ebene der Fehlerdiagnose

lediglich aus einem *Chart* besteht (siehe Abbildung 6.10). Zusätzlich gewährt diese Abbildung eine Übersicht über die untere Ebene mit den dazugehörigen *Charts*. Die fünf

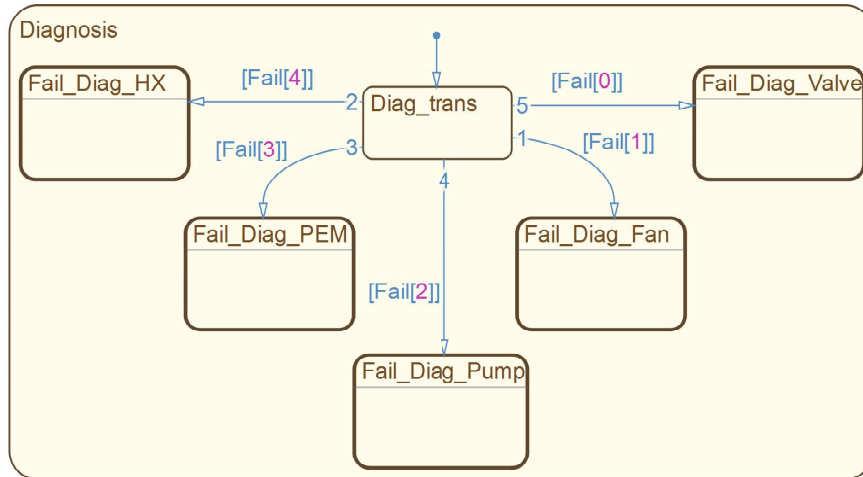


Abbildung 6.10: Mittlere Ebene der Fehlerdiagnose

*Charts* stehen stellvertretend für die Funktionseinheiten und analysieren diese auf die Fehlerschwere. Die Bedingung für die Transaktion ist der **Fail[X]**-Vektor, dabei kann immer nur ein *Chart* aktiv sein. Die prozentual angegebene Fehlerschwere der jeweiligen Funktionseinheit wird in der unteren Ebene berechnet und anschließend ausgegeben. Wenn bei der Fehlererkennung und -identifikation die Rechenzeit im Fokus stand, so wird in der Fehlerdiagnose eine präzise Aussage zu dem Zustand der jeweiligen Funktionseinheit verlangt. Damit können Prognosen zu dem weiteren Verlauf erstellt und schließlich Abhilfemaßnahmen initiiert werden.

Die einzelnen *Charts* der Fehlerdiagnose werden im weiteren Verlauf beschrieben:

- **Fail\_Diag\_Fan**

Im Fall des Ventilators ist die Beziehung zwischen Symptomen und der Schwere trivial. Es wird analog zu Fehleridentifikation des Ventilators aufgebaut und beruht auf dem Vergleich zwischen den maximalen Drehzahlen aus der Systemvorgabe und dem gemessenen Wert.

- **Fail\_Diag\_HX**

Die Fehlerschwere des Wärmetauschers wird durch ein *White-Box*-Modell beschrieben, damit kann die nötige Präzision gewährleistet werden. Zunächst wird auf der Basis der Messwerte die austretende PGW-Temperatur aus dem Wärmetauscher approximiert. Der Wirkungsgrad ( $\eta_{HX}$ ), der eine Maßzahl für die Effizienz

ist, nimmt in einem Fehlerfall ab und kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\eta_{HX} = \frac{\dot{Q}_{tat}}{\dot{Q}_{app}} = \frac{\dot{m}_{PGW} c_p T_{ein,mess} - T_{aus,mess}}{\dot{m}_{PGW} c_p T_{ein,mess} - T_{aus,app}}. \quad (6.1)$$

Da der PGW Massenstrom ( $\dot{m}_{PGW}$ ) und die spezifische Wärmekapazität ( $c_p$ ) in beiden Fällen nahezu identisch ist, kann die Gleichung (6.1) weiter vereinfacht werden:

$$\eta_{HX} = \frac{T_{ein,mess} - T_{aus,mess}}{T_{ein,mess} - T_{aus,app}}. \quad (6.2)$$

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die spezifische Wärmekapazität sich mit der Temperatur ändert. Durch die Abweichung zwischen den austretenden Temperaturen ( $T_{aus,app} \wedge T_{aus,mess}$ ) können Abweichungen der spezifische Wärmekapazität und folglich auch des Wärmestroms entstehen. Dementsprechend muss man davon ausgehen, dass eine geringe Unsicherheit bei der Berechnung der Effizienz entsteht. Als die Fehlerschwere wird die aktuelle prozentuale Abweichung von der Normaleffizienz ausgegeben (6.2).

- **Fail\_Diag\_PEM**

Die PEMFC Analyse wird mithilfe eines NN durchgeführt. Durch die äußeren Messgrößen ( $T_{FC}, T_{PGW_{nFC}}, P_{el}$ ) wird der aktuelle Wasserstoffverbrauch, den die PEMFC im Normalzustand haben würde, approximiert. Der Quotient aus dem approximierten und dem tatsächlichen Wasserstoffverbrauch gibt die aktuelle Effizienz gegenüber dem Normalzustand wieder. Es wird darauf hingewiesen, dass mit höheren Last und gleich bleibendem Innenwiderstand die Effizienz stärker abnimmt, siehe Abbildung 6.11. Aus diesem Grund wird der Innenwiderstand als die Fehlerschwere definiert, um eine Lastniveau-übergreifende Größe zu erhalten.

- **Fail\_Diag\_Pump**

In diesem *Chart* wird der Pumpenfehler abgeschätzt. Es wird ein Quotient aus dem approximierten PGW Massenstrom und einem Wert, der bei dieser Pumpe zu erwarten ist, gebildet. Der Quotientenwert gibt den aktuellen Wirkungsgrad der Pumpe wieder. Mit dem Wirkungsgrad ist hier ein Wert gemeint, um den die Pumpe, aufgrund eines Fehlers, vom Normalzustand abweicht.

- **Fail\_Diag\_Valve**

In diesem *Chart* wird das Ventil untersucht und es wird verfolgt, wie schnell dieser die vorgegebene Stellung erreicht. Außerdem wird eine Soll-Istwert-Abfrage

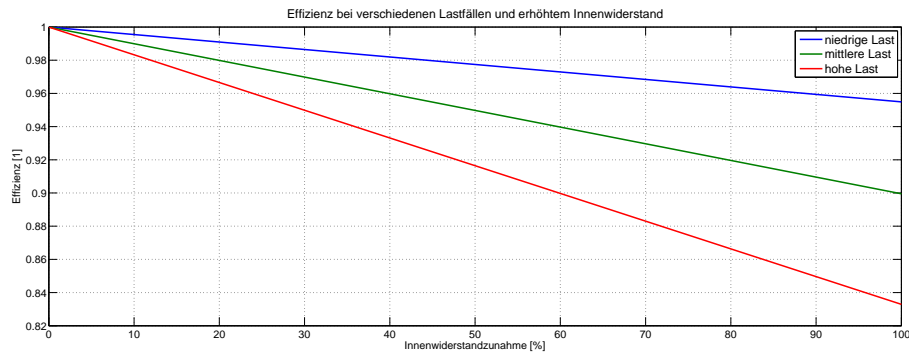


Abbildung 6.11: Effizienz PEMFC über den Innenwiderstand

durchgeführt. Dadurch wird einerseits die Größenordnung der Abweichung errechnet und andererseits abgefragt, ob das Ventil die Zielstellung überhaupt erreichen kann.

## 6.4 Notlaufstrategien im Fehlerfall eines Brennstoffzellensystems

In diesem Unterkapitel werden beispielhaft die Abhilfemaßnahmen erläutert. Diese werden in einem Fehlerfall initiiert und sollen die PEMFC sowie andere Funktionseinheiten vor weiteren Schäden schützen. Dabei steht die intendierte Funktion des BSZS im Fokus und soll idealerweise nicht beeinträchtigt werden. Es werden zwei Fehlerauswirkungen analysiert. Zunächst soll auf den einfacheren Fall des Unterkühlens eingegangen werden und anschließend wird der Fall, bei dem die PEMFC zu überhitzen droht, betrachtet.

### 6.4.1 Abhilfemaßnahme zum Schutz vor Unterkühlung

Hier wird eine Strategie entwickelt, die verhindert, dass die PEMFC bei niedrigen Temperatur läuft. Als Fehlerquelle kommt lediglich das Ventil in Frage, da diese Funktionseinheit für die Temperaturregulierung in dem unteren Temperaturbereich verantwortlich ist.

Es wird folgendes Szenario entwickelt: Das Ventil klemmt in dem geschlossenen Zustand, d.h. der Bypass ist komplett geschlossen und 100% des PGW Massenstroms fließt durch den Wärmetauscher. Wenn keine Abhilfemaßnahmen eingeleitet werden, würde die PEMFC in dem mittleren sowie unterem Leistungsbereich unterhalb der geforderten

Grenztemperatur betrieben. Dies soll verhindert werden, indem das SHM aktiv in die Steuerung des BSZS eingreift.

#### 6.4.1.1 Entwicklung der Strategie gegen Unterkühlung

Das Modell wird um ein zusätzliches Steuerkonzept erweitert, das im analogen Fall aktiviert wird. Dabei verlässt das System den normalen Betrieb und wechselt in den Notlaufzustand (**emergency\_mode\_cold**). In diesem Zustand wird das niedrige sowie mittlere Leistungsniveau nicht angefahren und somit kann die untere Temperaturgrenze nicht verletzt werden. Dabei werden auch die Ein- und Abschaltvoraussetzungen angepasst (siehe Abbildung 6.12).

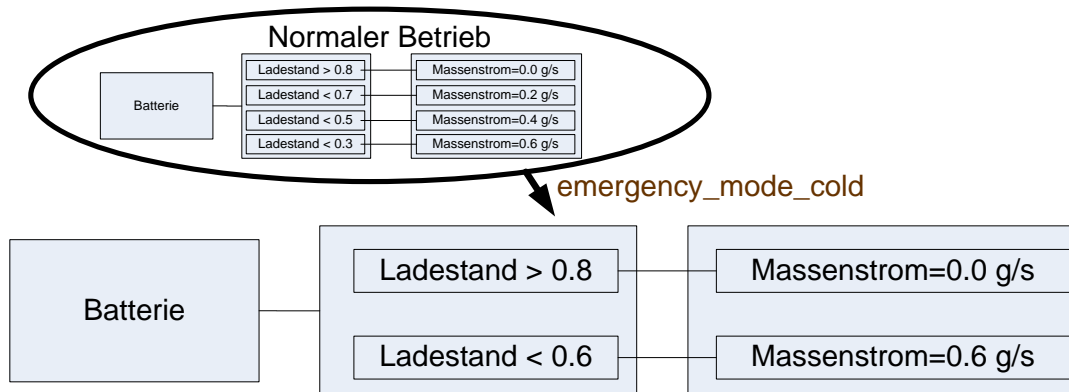


Abbildung 6.12: Wasserstoffsteuerung: Schutz gegen Unterkühlung

#### 6.4.1.2 Bedeutung für den Fahrer

Der Fahrer wird über einen Fehler im System informiert und aufgefordert, eine Werkstatt aufzusuchen. Die Fehlerauswirkungen sind für den Fahrer nicht spürbar, außer beim Starten der Hilfsaggregate.

#### 6.4.2 Abhilfemaßnahme zum Schutz gegen Überhitzen

In dem Verlauf dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die meisten Fehler im System zum Überhitzen des PEMFC führen können. Außerdem gestaltet der hohe Einfluss vom Fahrtwind auf den Wärmetransport die Entwicklung der Abhilfemaßnahmen als besonders komplex. Aus diesen Gründen kann keine explizite Strategie entwickelt werden, die

jeweils einzeln auf die Fehlerfälle eingeht, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

#### 6.4.2.1 Entwicklung einer ganzheitlichen Lösung

Dabei wird ein PID-Regler verwendet, um das System unterhalb der oberen Temperatur von  $352,5K$  zu betreiben, siehe Abbildung 6.13. Mittels eines Drosselventils wird der Wasserstoffmassenstrom begrenzt und somit resultieren auch die elektrische Leistung sowie die entwickelte Wärme. Die beiden Größen haben eine besondere Wichtigkeit, da einerseits die Temperaturentwicklung an den Wärmetransport gekoppelt ist und dadurch direkt auf die Lebensdauer der PEMFC auswirkt. Andererseits kann im ungünstigsten anzunehmenden Fall die fehlende elektrische Leistung und eine komplett entladene Batterie zu schlimmen Unfällen führen, da die Hilfsaggregate (Servolenkung, Bremskraftverstärker, etc.) ohne Funktion sind und das Fahrzeug schwerer zu beherrschen ist.

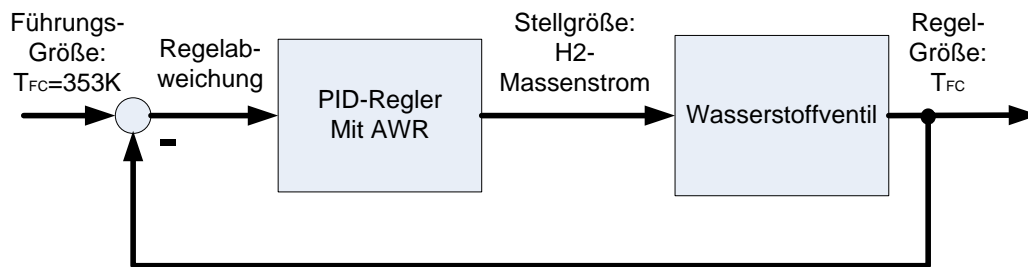


Abbildung 6.13: Schematischer Aufbau des verwendeten PID-Reglers

Außerdem muss gewährleistet werden, dass dem Fahrer genug Zeit zur Verfügung steht, um sich und das Fahrzeug in den sicheren Zustand zu bringen. Aus diesem Grund wird zusätzlich das Leistungsmanagement der Batterie angepasst, um den Energieverbrauch zu senken. Dabei wird die abgegebene elektrische Leistung der Batterie herabgesetzt, da die Batterie, im schlimmsten Fall, die einzige Energiequelle ist und nur eine begrenzte Reichweite hat. Weitere Möglichkeiten zur Energieverbrauchsreduzierung können dergestalt aussehen, dass die Sekundärkomponente (Heizung, Klimaanlage, Radio, etc.), die keinen Beitrag zur Sicherheit leisten, vom Netz genommen werden.

### 6.4.2.2 Bedeutung für den Fahrer

Für den Fahrer bedeutet dies, dass das Fahrzeug nicht mehr die volle Leistung aufbringen kann und somit keine hohen Geschwindigkeiten erreicht werden können. Außerdem steht das Beschleunigungsvermögen nicht 100%ig zur Verfügung, sodass das Fahrzeug die gewünschte Geschwindigkeitszunahme nicht umsetzen kann.

## 6.5 Gegenüberstellung des behandelten Systems mit und ohne SHM

Am Beispiel des Pumpenfehlers soll exemplarisch ein Vergleich zwischen dem System mit und ohne SHM-Funktion durchgeführt werden. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht die Abbildung 6.14, welche die für das Vorhaben benötigten Verläufe zeigt (auf die zusätzlichen Referenzierungen auf diese Abbildung wird Übersicht halber verzichtet). Die senkrechten Linien mit den Ziffern symbolisieren die Ereignisse, die im weiteren Verlauf erläutert und ausgewertet werden.

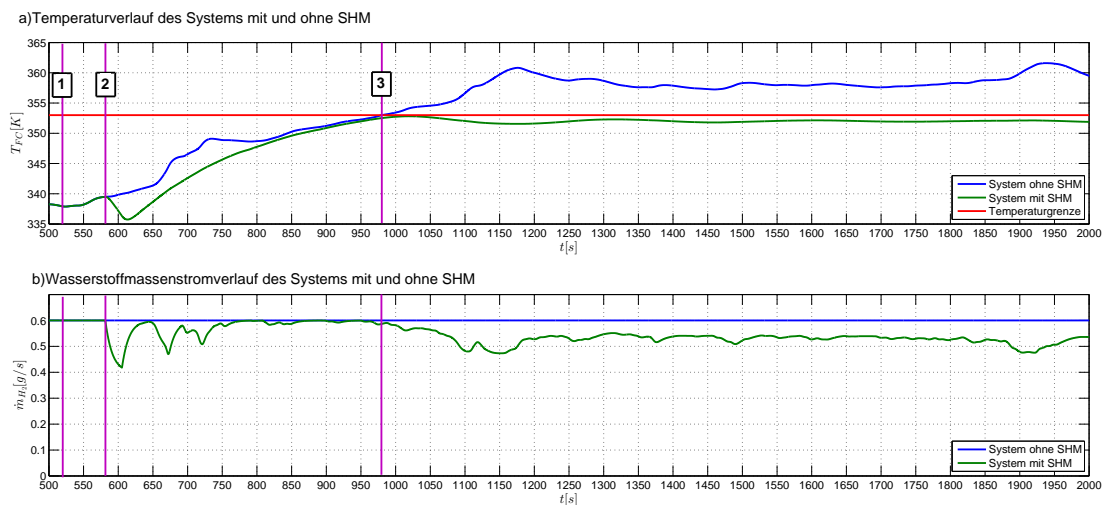


Abbildung 6.14: Gegenüberstellung der a) Temperatur- und b) Wasserstoffmassenstromverläufe des behandelten System mit und ohne SHM

### Vor dem Ereignis "1"

Das System erreicht den eingeschwungenen Zustand, der dem Normalzustand entspricht. Der Wasserstoffmassenstromverbrauch liegt bei  $0,6\text{g/s}$ , daraus resultiert ein



hohes Leistungsniveau. Dieses Leistungsniveau ist besonders kritisch für das System, da im Falle eines Fehlers die Grenztemperatur, abhängig von der Fehlerschwere, schnell erreicht wird.

### Ereignis "1"

Der Pumpenfehler wird bei  $t = 520s$  initiiert. Dabei nimmt der PGW-Massenstrom prozentual über der Zeit gemäß der Abbildung 6.15 (blauer Graph) ab.

### Vor dem Ereignis "2"

Die Temperaturverläufe sind in diesem Abschnitt identisch. Erkennbar ist der zu Beginn langsame und stetig wachsende Temperaturanstieg.

### Ereignis "2"

Bei  $t = 580,9$  wird der Fehler durch die *Langzeitüberwachung* erkannt. Die Fehleridentifikation ist bei  $t = 581,2s$  abgeschlossen und die Abhilfemaßnahme wird initiiert. Der Zeitabschnitt zwischen Erkennen und der Ausgabe der Fehlerschwere, dessen Verlauf in der Abbildung 6.15 (grüner Graph) dargestellt wird, beträgt  $0,9s$ .

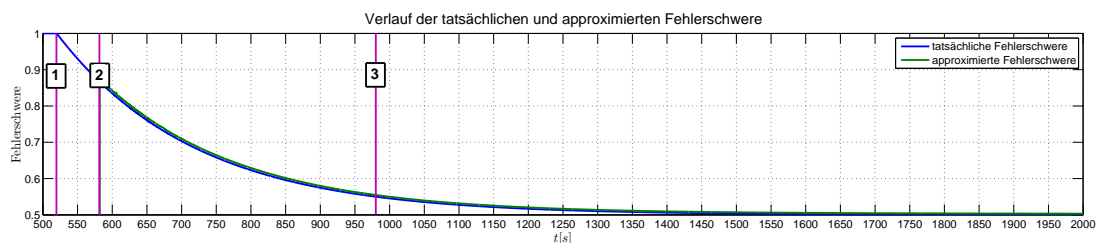


Abbildung 6.15: Tatsächlicher und approximierter Verlauf der Fehlerschwere

### Vor dem Ereignis "3"

Auffällig ist der Temperatureinbruch bei dem System mit SHM direkt nach dem Ereignis "2". Dies ist durch den Umschaltvorgang des Wasserstoffmassenstroms von dem Steuer- zum Regelkonzept bedingt. Anschließend steigen die beiden Verläufe und haben ab  $t = 800s$  einen nahezu identischen Verlauf.

### Ereignis "3"

Mit diesem Ereignis entscheidet sich, wie sich die PEMFC-Temperatur verhält. Bei dem System ohne SHM-Funktion wird mit dem Eintreffen des Ereignisses "3" die obere Temperaturgrenze von  $353K$  überschritten und erreicht Werte von bis zu  $361,8K$ . Diese Temperatur ist kritisch für die PEMFC und wird zu schwerwiegender Schädigung der Membran führen.

Bei dem System mit der SHM-Funktion bleibt die PEMFC-Temperatur unter  $353K$  (Maximaltemperatur beträgt kurzzeitig  $352,8K$ ) und stabilisiert sich auf den Sollwert von  $352,5K$ . Die Temperaturgrenze wird nicht verletzt, sodass die PEMFC-Membran keinen Schaden nimmt. Da die PEMFC-Temperatur durch den Wasserstoffmassenstrom geregelt wird, kann die PEMFC durchschnittlich knapp 10% weniger elektrische Leistung abgeben. Aufgrund des höheren Wirkungsgrades der PEMFC bei dieser Temperatur fällt dieser Wert relativ gering aus.

## 6.6 Bewertung alternativer Entwicklungsansätze

Mit dem anfänglichen Ansatz wurde ein Versuch unternommen, die Funktionseinheiten mithilfe der Nachschlagetabellen abzubilden. Der Aufwand zum Erstellen dieser Tabellen ist enorm hoch: Das richtige Aufnehmen und Bearbeiten der Messdaten nimmt immens viel Zeit in Anspruch, da eine Funktionseinheit mit mehreren Eingangssignalen eine Matrix mit einer hohen Ordnung erfordert, sodass viele Betriebspunkte angefahren werden und das System diese halten muss, bis der eingeschwungene Zustand erreicht ist. Beispielsweise ist zum Abbilden der Wärmetauscher-Ausgangstemperatur eine dreidimensionale Matrix notwendig, da diese Größe durch mindestens drei Eingangssignale beeinflusst ist. Je nach geforderten Präzision kann die Matrix mehrere tausend Elemente enthalten. Außerdem werden nur die eingeschwungenen Zustände präzise angegeben. Aus diesem Grund konnte dieser Ansatz nicht implementiert werden, da die Funktionseinheiten ein dynamisches Verhalten aufweisen und der eingeschwungene Zustand nur in seltenen Fällen erreicht wird.

Zusätzlich wurden andere NN-Typen in der Entwicklungsphase auf die Eignung für das Vorhaben getestet. Das sog. *NARX*-NN kann das System zwar genauer darstellen, da die Messdaten der vergangenen Zeitschritte ( $M(t), M(t-1), \dots, M(t-k)$ ) sowie der approximierten Wert in die Berechnung einfließen, benötigt jedoch kontinuierlich Eingangsdaten. Aus diesem Grund muss dieser NN-Typ kontinuierlich aktiv sein und benötigt dadurch mehr Rechenkapazität, als ein System mit dem in dieser Arbeit vorgestellten

Ansatz. Außerdem können die *NARX*-NN nicht in ein *Stateflow*-Modell implementiert werden, da einige *Charts* sequentiell ausgeführt werden und dadurch *Matlab/Debugger* einen Fehler meldet. Zusätzliches Problem entstand bei dem Abbilden des gesamten BSZS mit dem *NARX*-NN zwecks Fehleridentifikation, dabei werden geringe Residuen des fehlerhaften Zustands berechnet (unter  $0,02K$ ). Aus diesen Gründen konnte dieser Ansatz nicht weiter Verfolgt werden.

## 7 Zusammenfassung

Zusammenfassend wurde eine Methode entwickelt, die den Zustand eines komplexen Systems überwacht und im Fehlerfall eine Diagnose durchführt. Das System ist in der Lage, auf diagnostizierte Fehler mit den entwickelten Gegenmaßnahmen gezielt zu reagieren, um die intendierte Funktion des BSZS zu erhalten. Die Entwicklungsarbeiten wurden iterativ durchgeführt, das Modell kontinuierlich um Funktionen erweitert und zwecks Validierung in regelmäßigen Abständen simuliert.

Um die SHM-Funktion adäquat zu entwickeln, wurde eine Reihe Fehlerszenarien erstellt. Die Auswirkungen einzelner Fehler auf das BSZS wurden untersucht und beschrieben.

Das Fehlererkennungsmodell besteht im Kern aus einem NN, welches den Normalzustand des gesamten BSZS beschreibt. Da einige Zustände des BSZS durch das NN nicht präzise approximiert werden können, wurde eine Logik entwickelt, die dem entgegenwirkt. Mit den drei entwickelten Fehlererkennungsmethoden ist das System in der Lage, die definierten Fehler als solche zu erkennen. Je nach der speziellen Fehlererkennungsmethode analysiert die Fehleridentifikation die einzelnen Funktionseinheiten in einer definierten Reihenfolge, um Rechenzeit effektiv zu nutzen. Es wurde gezeigt, dass die Fehler richtig lokalisiert und den betroffenen Funktionseinheiten zugewiesen wurden. Die Diagnosemethode kann die Fehlerschwere richtig abschätzen und gibt eine, für die jeweilige Funktionseinheit spezifische Größe an. Strategien zu Gegenmaßnahmeninitiierung wurden zwecks des Erhalts der Funktionalität des BSZS entwickelt.

Eine Erkenntnis dieser Arbeit ist, dass Sensoren mithilfe der *Black-Box*-Modelle ersetzt werden können und ein NN in der Lage ist, ein nichtlineares Verhalten eines komplexen Systems nachzubilden.

Damit wurde das Ziel erreicht, eine Zustandsüberwachung- und Diagnosemethode zu entwickeln, um die Zuverlässigkeit des Systems zu verbessern. Da das System eigenständig die Fehler erkennen und auf diese reagieren kann, steht die Funktionalität des Fahrzeugs trotz einer Zustandsverschlechterung zur Verfügung und lässt dem Fahrer genügend Zeit, sich auf die gegebene Situation einzustellen und zielgerichtet zu reagieren.

## 8 Ausblick

Angesichts der beispielhaften Betrachtung des BSZS wurden einige Aspekte in dieser Arbeit idealisiert bzw. vereinfacht betrachtet und müssten noch an ein konkretes System angepasst werden. Z.B. wurden die Sensoren idealisiert und dadurch sind keine Störungen bzw. Messrauschen entstanden. Dies ist in der Realität nicht der Fall, sodass weitere Untersuchungen mit echten Sensoren durchgeführt werden müssten. Außerdem müssten die Auswirkungen des Messrauschens auf den Trainingserfolg des NN analysiert werden, da dadurch evtl. höhere Fehlertolerierungsprobleme entstehen. Zusätzlich müsste eine Untersuchung bezüglich der Sensorgenauigkeit durchgeführt werden, da die Tolerierung der Residuen unter Umständen zu gering ist.

Außerdem müsste die Detailtiefe des Modells erweitert werden, um weitere Fehleruntersuchungen zu ermöglichen. Zum Beispiel wird in der Industrie derzeit stark an dem Austrocknen und Überfluten der PEMFC-Membran geforscht, da diese Probleme schwerwiegende Konsequenzen für die Lebenserwartung und den Betrieb bedeuten. Mit dem erweiterten Modell können weitere Fehlerfälle (Leckage im Kühlmittelkreislauf, defekter Wasserstoffventil etc.) der Funktionseinheiten entwickelt werden, um ein Gesamtbild über die möglichen Fehler zu erhalten und diese gezielt zu Diagnostizieren.

Es müssten weitere Abhilfemaßnahmen und Strategien entwickelt werden, um die speziellen Probleme besser behandeln zu können. Beispielsweise kann ein Heizer, der normalerweise den Kaltstart der PEMFC beschleunigt / ermöglicht, als Abhilfemaßnahme zur Kompensation von Unterkühlung eingeschaltet werden. Die Umsetzbarkeit muss genauer untersucht werden. Außerdem können andere redundant arbeitende Funktionseinheiten hinzugefügt werden, um die Sicherheit des Gesamtsystems zu erhöhen und im Fehlerfall auf diese zurückzugreifen.

Ein weiterer Punkt kann in Richtung der Zeiteinflussanalyse gehen, da diese Größe sich kritisch auf die Sicherheit des System und der Menschenleben auswirken kann. Wenn der Zeitfaktor eher als unkritisch eingestuft wird, könnte die Fehleranalyse zwecks einer Fehlalarmvorbeugung längeren Zeitraum durchgeführt werden.

Eine adaptive NN-Lernmethode, die während des Betriebes lernt, könnte sich besser an das Dynamische Verhalten anpassen und so den Zustand präziser wiedergeben. Somit könnten die Auswirkungen von Toleranzen bei der Herstellung und Montage, die sich negativ auf die Bestimmung der Grenzwerte der Fehleridentifikation auswirken, unter Kontrolle gebracht werden. Das setzt den Einsatz leistungstarker Recheneinheiten voraus, was zusätzliche Kosten verursachen könnte. Außerdem müsste eine Logik entwickelt

werden, die den Systemzustand intern bewertet und einen Einfluss auf das Lernverhalten des NN ausübt, da anderenfalls die fehlerhaften Zustände „mitgelernt“ werden und dadurch nicht erkannt werden.

Ein weiterer Aspekt könnte in Richtung einer Prognosefunktion gehen. Die Frage, wie lange das System unter speziellen Umständen funktionieren kann, könnte vom großen Interesse sein. Außerdem würde eine Angabe der Restlebensdauer der jeweiligen Komponente eine hohe Akzeptanz beim Kunden hervorrufen, da dieser eine Instandhaltungsarbeit planen und die benötigten Komponenten im Voraus bestellen kann.

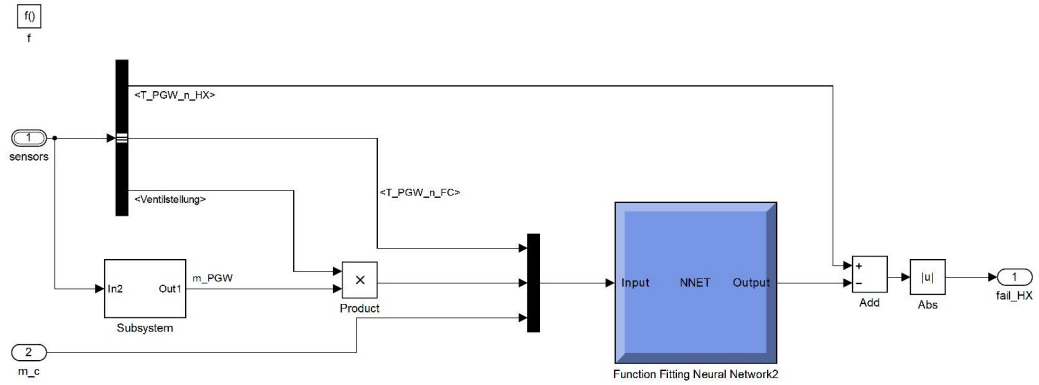
# Literaturverzeichnis

- [1] Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. techn. Helmut Eichlseder et al., Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, 2010, Erzeugung, Speicherung, Anwendung, 2. Auflage.
- [2] wikipedia, Polymerelektrolytbrennstoffzelle, 20.10.2014, <http://de.wikipedia.org/wiki/Polymerelektrolytbrennstoffzelle>.
- [3] The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, July 2006, Volume 28, Issue 9-10, pp 1012-1024.
- [4] System Health Management: with Aerospace Applications, Dr Stephen B. Johnson, July 2011, ISBN: 978-0-470-74133-7, 664 pages.
- [5] Emmanuel Frappé et al., PEM fuel cell fault detection and identification using differential method: simulation and experimental validation, The European Physical Journal Applied Physics 54, 2, 2011
- [6] C. Kunsch et al., Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells, Advances in Industrial Control, DOI 10.1007/978-1-4471-2431-3\_2, © Springer-Verlag London Limited 2012.
- [7] Jean-Philippe Poirot-Crouvezier, Francis Roy, GENEPAC Project: Realization of a fuel cell stack prototype dedicated to the automotive application, WHEC 16 / 13-16 June 2006 – Lyon France.
- [8] Mengbo Ji and Zidong Wei, A Review of Water Management in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, Energies 2009, 2, 1057-1106; doi:10.3390/en20401057.
- [9] Guido Kramann, 11.3 Der Windup-Effekt bei Reglern mit begrenzten Stellgrößen, [http://www.kramann.info/64\\_Regelungssysteme/11\\_Stabilitaet/-03\\_Windup/index.php](http://www.kramann.info/64_Regelungssysteme/11_Stabilitaet/-03_Windup/index.php), am 19.11.2014 um 11:55.
- [10] ITWissen, Sensor, <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Sensor-sensor.html>, am 19.11.2014 um 14:00.
- [11] Fabian Beck, Neuronale Netze, Eine Einführung, <http://www.neuralesnetz.de/index.html>, am 19.11.2014
- [12] Martin T. Hagan et al., Neural Network Design, 2nd Edition, kostenloses Ebook: <http://hagan.okstate.edu/nnd.html>, am 22.11.2014.
- [13] Mathworks, Train and Apply Multilayer Neural Networks, [www.mathworks.com/help/nnet/ug/train-and-apply-multilayer-neural-networks.html#bss3311-2](http://www.mathworks.com/help/nnet/ug/train-and-apply-multilayer-neural-networks.html#bss3311-2), am 12.01.2015.

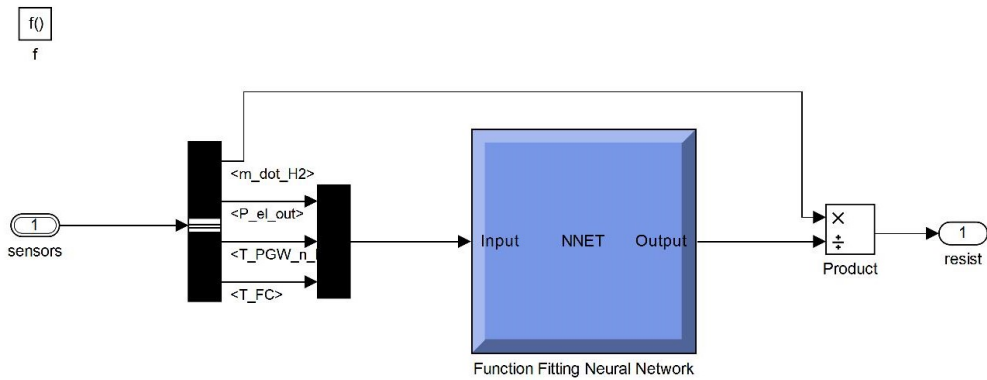
- [14] Mathworks, Neural Network Toolbox / feedforwardnet, <http://de.mathworks.com/help/nnet/ref/feedforwardnet.html>
- [15] Jan-Ole Schrader, Modellierung, Simulation und Optimierung eines Brennstoffzellensystems unter Berücksichtigung thermodynamischer und elektrischer Gesichtspunkte.
- [16] Dr. Christian Müller et al., Heat exchanger(air to water), SILVER ATENA Electronic Systems Engineering GmbH, 02.04.2012
- [17] Isermann, R., Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance, isbn=9783540241126, 2006, Springer.
- [18] Norman Juchler, Methoden der Fehlerdiagnose: eine Übersicht, Institut für Mess- und Regelungstechnik IMRT Eidgenössische Technische Hochschule Zrich, Frühjahr 2006.
- [19] Andrej Debenjak et al., Detection of Flooding and Drying inside a PEM Fuel Cell Stack, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 59(2013)1, 56-64.
- [20] Manuel Boog, Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslastfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten, isbn=9783866446007, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, 2011, Karlsruher Institut für Technologie



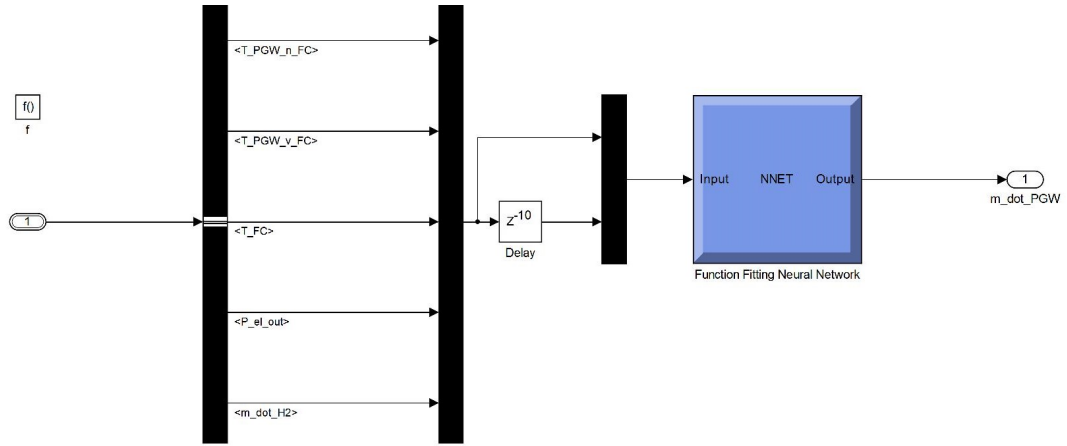
# Anhang



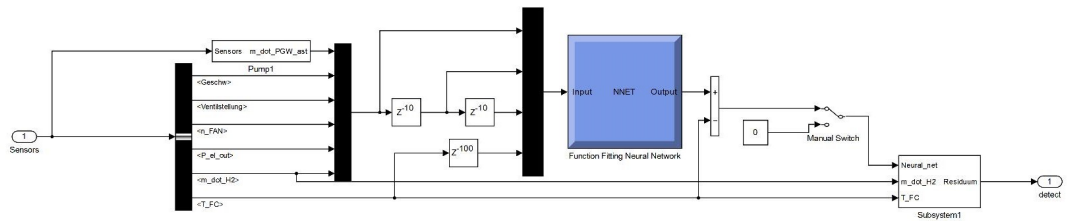
Wärmetauscher NN-Modell: Epoch=1000, Time=1548s, Performance= $1,5e - 9$ , Anzahl verdeckter Neuronen: 20



PEMFC NN-Modell: Epoch=336, Time=446,3s, Performance= $5,9e - 10$ , Anzahl verdeckter Neuronen: 15



Pumpe NN-Modell: Epoch=1000, Time=3479s, Performance= $5,9e - 8$ , Anzahl verdeckter Neuronen: 20



Fehlererkennung NN-Modell: Epoch=1000, Time=7248s, Performance= $2,48e - 6$ , Anzahl verdeckter Neuronen: 20

## Matlab-Skript zum Trainieren der NN

```
% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network
% Script generated by NFTOOL
% Created Thu Jan 22 12:51:55 CET 2015
%
% This script assumes these variables are defined:
%
%   input_param - input data.
%   output_param - target data.

inputs = in;
targets = out;

% Create a Fitting Network
hiddenLayerSize = 15;
net = fitnet(hiddenLayerSize);

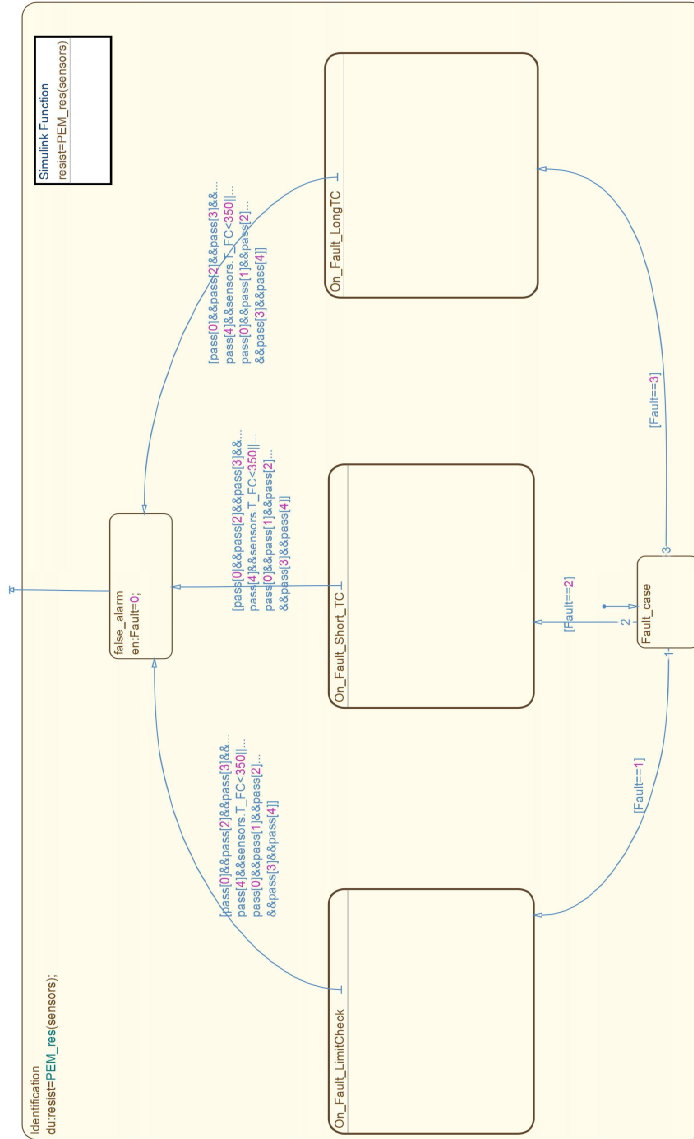
% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

% Train the Network
[net,tr] =
train(net,inputs,targets,'useParallel','yes','showResources','yes');

%%
% Test the Network
outputs = net(inputs);
errors = gsubtract(targets,outputs);
performance = perform(net,targets,outputs)

% View the Network
view(net)

% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, plotfit(net,inputs,targets)
%figure, plotregression(targets,outputs)
%figure, ploterrhist(errors)
```



Fehleridentifikation obere Ebene



## 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: Vengerskiy

Vorname: Yan

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

Modellbasierte Entwicklung einer Diagnose- und Zustandsüberwachungsmethodik am Beispiel eines PEM-Brennstoffzellensystems

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 Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

04.03.2015

Datum

Unterschrift im Original