

# „Cold Load Pickup“

Leistungsüberhöhung nach Versorgungsunterbrechung

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen  
Technische Universität Graz

Vorgelegt von  
Stefan Alois Stadler

Betreuer  
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Herwig Renner

Co-Betreuer  
Dipl.-Ing. Christian Wakolbinger Bakk.rer.nat.

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I  
Telefon: (+43 316) 873 – 7551  
Telefax: (+43 316) 873 – 7553  
<http://www.ifea.tugraz.at>  
<http://www.tugraz.at>

Graz / Juni – 2013



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 10.06.2013

Stefan Alois Stadler

## **Kurzfassung**

Die Einschaltströme nach längeren Versorgungsunterbrechungen weisen meist eine gegenüber dem vorangegangenen Laststrom verschiedene Charakteristik auf. Transiente Vorgänge sowie bis in den Sekundenbereich nach der Zuschaltung wirksame Anlauf- und Einschaltvorgänge sind die Ursache dafür. Eine erhöhte Wirkleistungsaufnahme noch einige Minuten bis Stunden danach als Folge des Verlustes der statischen Lastdiversität wird zudem festgestellt. Für diese Masterarbeit werden Messdaten von Zuschaltströmen in Abgängen österreichischer Verteilnetzbetreiber sowie zugehörige Ausfallparameter gesammelt. Hauptziel ist es, mögliche Korrelation zwischen ausgesuchten Merkmalen von Versorgungsunterbrechungen sowie den in Minuten nach der Zuschaltung gemessenen Strömen zu finden. Dadurch soll eine Abschätzung für künftige Netzaufbauszenarien ermöglicht werden. Dies wird mittels eines in MatLab erstellten Expertensystems bewerkstelligt. Ein Initialregelwerk auf Basis physikalischer Überlegungen wird als Ausgangspunkt erstellt. Dieses wird mit Messdaten und Parametern aus tatsächlich gemessenen Zuschaltungen adaptiert. Es zeigt sich eine Bestätigung einzelner vermuteter Tendenzen, die statische Lastdiversität bleibt für Ausfallzeiten bis wenige Minuten erhalten. Auftretende Amplituden liegen innerhalb der Erwartungswerte, bessere Aussagekraft und Erweiterung des Expertensystems sind durch Einbringung weiterer Messdaten möglich.

Stichwörter: Einschaltstrom, Versorgungswiederherstellung, Wiedereinschaltung, statische Lastdiversität, Netzwiederaufbau, Expertensystem, Rückwärtspropagation

## **Abstract:**

In the process of service restoration after an extended outage event utilities notice quite different load behaviour in contradiction to conditions prior supply interruption. Responsible for these observations are transient as well as startup currents up to second based time domains. Further the effects due to the loss of static load diversity are still present for minutes up to hours after reenergization. For this master thesis current measurements and corresponding interruption parameters are collected from Austrian distribution network operators. The major aim is to find correlation between the behaviour of load on particular feeders and parameters or selected conditions that prevailed during the outage. Further an estimation of the reenergization current is pursued. This is accomplished by an expert system and the formulation of an initial rule base where selected parameters are linked by human assessment. Then a training of the neuro-fuzzy-expert system with measured data is performed to adapt the rule base. Assumptions regarding outage duration are confirmed, for interruptions up to few minutes static load diversity is not lost. The pickup magnitude is within expected constraints for the available dataset. Providing additional datasets will improve credibility of the results and allow an expansion of the expert system.

Keywords: cold load pickup, reenergization process, feeder restoration, static load diversity, adaptive fuzzy expert system, backpropagation algorithm

# Inhalt

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Beschreibung physikalischer Ursachen .....</b>	<b>12</b>
2.1 Einleitung.....	12
2.2 Betrachtung der transienten Einschalt- und Anlaufvorgänge.....	13
2.3 Betrachtung statische Lastdiversität .....	18
2.3.1 Betriebszyklen .....	18
2.3.2 Physikalische Modellierung.....	21
<b>3 Expertensystem zur Auswertung von CLPU-Ereignissen .....</b>	<b>24</b>
3.1 Grundstruktur des erstellten Expertensystems.....	24
3.1.1 Wahl der Expertensystemtechnologie.....	24
3.1.2 Allgemeines zum Expertensystem, Strukturbeschreibung.....	28
3.2 Beschreibung des Datenmaterials .....	33
3.2.1 Allgemeines zur Erhebung.....	33
3.2.2 Vorselektion des Datenmaterials .....	37
3.3 Getroffene Annahmen, Randbedingungen.....	39
3.3.1 Betrachtung von Strömen .....	39
3.3.2 Betrachtung von Phasengrößen .....	40
3.3.3 Betrachtung von Sekundenmittelwerten.....	40
3.3.4 Referenzwertbildung.....	41
3.3.5 Leistungsüberhöhung als Ausgangspunkt .....	43
3.3.6 Komposition der Last am Abgang .....	44
3.3.7 Ausgleichsfunktion.....	45
3.3.8 Betrachtung eines definierten Versorgungsgebietes .....	46
3.3.9 Verwendung eines Expertensystems pro Stützstelle.....	47

3.3.10	Betrachtungsdauer nach Wiederherstellung .....	49
3.3.11	Annahmen bezüglich Elektrowärme.....	51
3.3.12	Kalendereffekt .....	51
3.3.13	Weitere Annahmen.....	52
3.4	Eingebrachte „a-priori“-Informationen .....	52
3.4.1	Untersuchung hinsichtlich Korrelation einzelner Parametern .....	52
3.4.2	Ableitung von Annahmen aus dem physikalischem Modell .....	57
3.4.3	Definition linguistischer Variablen .....	57
3.4.4	Erstelltes Initialregelwerk.....	60
3.5	Realisierung in MatLab .....	61
3.5.1	Beschreibung der ANFIS-Toolbox .....	61
3.5.2	Weitere Einstellungen und Parameter.....	63
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>64</b>
4.1	Untersuchungen hinsichtlich statischer Lastdiversität .....	64
4.1.1	Initialregelwerk vor und nach dem Training mit Messdaten.....	65
4.1.2	Abschätzung CLPU aus erstelltem Expertensystem .....	73
4.2	Darstellung transienter Vorgänge .....	76
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung, Diskussion, Ausblick.....</b>	<b>79</b>
5.1	Zusammenfassung .....	79
5.2	Diskussion des Regelwerks des erstellten Systems.....	80
5.3	Diskussion der Resultate des erstellten Systems.....	81
5.4	Diskussion des Ansatzes eines Expertensystems für Problemtyp CLPU .....	82
5.5	Ausblick .....	83
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>84</b>
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>86</b>

## Abkürzungsverzeichnis

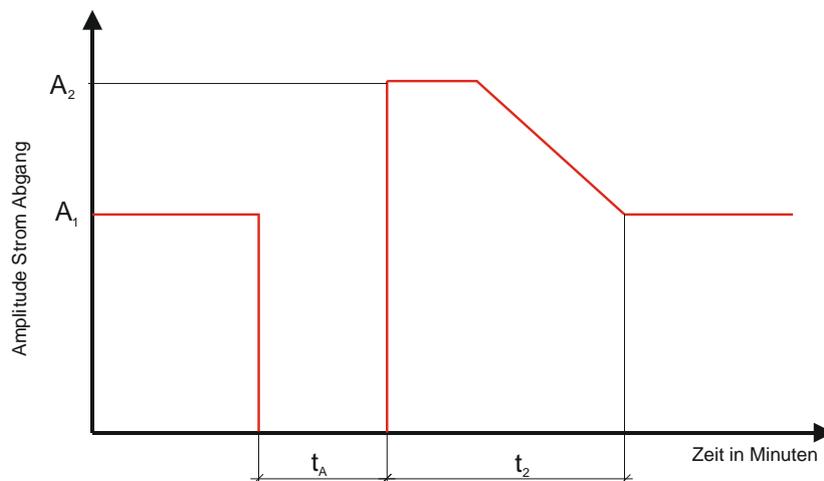
$A_1$	Amplitude Strom vor Ausfall
$A_{1000\text{Sek}}$	Amplitude Ausgleichsfunktion 1000. Sekunde
$A_{1\text{Sek}}$	Amplitude Ausgleichsfunktion 1. Sekunde
$A_2$	Amplitude Strom nach Ausfall
$A_{500\text{Sek}}$	Amplitude Ausgleichsfunktion 500. Sekunde
ANFIS	adaptive neuronal fuzzy inference system
ANN	artificial neuronal network
ASM	Asynchronmaschine
AWE	Automatische Wiedereinschaltung
CLPU	cold load pickup
$\cos(\varphi)$	Leistungsfaktor
$C_w$	spezifische Wärmekapazität
DEA	dezentrale Erzeugungsanlagen
DSM	demand side management
dW	Energieänderung
FIS	fuzzy inference system
$f_s$	Abtastfrequenz
GUI	graphical user interface
inmf	input membership function
input	Eingangswert
$k_1$	Parameter 1 Ausgleichsfunktion
$k_2$	Parameter 2 Ausgleichsfunktion
LS	Leistungsschalter
output	Ausgangswert
outputmf	output membership function

p.u.	per unit
$P_{ab}$	abgeführte thermische Leistung
$P_{zu}$	zugeführte thermische Leistung
$P_{el}$	elektrische Leistung
$R_k$	thermischer Übergangswiderstand
SM	Synchronmaschine
T	Temperatur
$t_2$	Wiederherstellungsdauer Lastdiversität
$T_a$	Umgebungstemperatur
$t_A$	Ausfalldauer
$t_D$	Verzögerung durch Prozessanlauf
$T_{HO}$	obere Temperaturschwelle Hysterese
$T_{HU}$	untere Temperaturschwelle Hysterese
TR	Trennschalter
$t_U$	Zeitpunkt Versorgungsunterbrechung
$t_W$	Zeitpunkt Versorgungswiederherstellung
UW	Umspannwerk
VNB	Verteilnetzbetreiber
W	gespeicherte thermische Energie
$W_V$	während des Ausfalls nicht gelieferte Energie
$W_W$	Energie bei der Wiederherstellung
$\Psi$	Flussverkettung
$\vartheta$	Differenz Innen- und Außentemperatur
$\tau$	thermische Zeitkonstante
$\varphi$	Phasenwinkel

# 1 Einleitung

Versorgungsunterbrechungen in elektrischen Energiesystemen sind selbst im technisch weit fortgeschrittenem 21. Jahrhundert zwar nur selten vorkommende, aber dennoch nicht vollständig ausschließbare Ereignisse. Die Konsequenzen daraus sind meist für verschiedene Individuen unterschiedlich stark, überwiegend negativ und oft sehr weitreichend ausgeprägt. Man ist daher im Sinne einer positiven Entwicklung der Lebensqualität stets bemüht, solche Vorfälle auf ein Minimum zu reduzieren. Daher werden die verantwortlichen Personen stets versuchen, solche Zwischenfälle bereits im Vorfeld durch vorausschauende Planung und nachhaltige Betriebsführung zu vermeiden.

Das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete physikalische Phänomen des „cold load pickup“ tritt unabhängig vom ursächlichen Auslöser der Unterbrechung bei Wiedereinschaltung eines Versorgungssystems auf. Konkret zeigt sich bei der Messung von Abgangsleistungen zu einzelnen Versorgungsgebieten eine vom vorangegangenen Betriebszustand verschiedene Wirkleistungsaufnahme nach der Unterbrechung. Verglichen mit dem Lastfluss vor dem Ausfall werden in zahlreichen Messungen erhöhte Abgangsleistungen registriert. Es wird in den Publikationen welche sich mit der Untersuchung auf Privathaushalte beschränken von einer Leistungsüberhöhung ausgegangen. Dies entspricht dem Schema in Abbildung 1. Ähnliche Darstellungen sind in Levebre S., „Residential load modeling for predicting distribution transformer load behaviour, feeder load and cold load pickup“ [1], Aubin J., et. al. "Distribution transformer overloading capability under cold-load pickup conditions," [2] sowie Capasso A., et. al. "A bottom-up approach to residential load modeling" [3] zu finden. Nach der Zeitdauer  $t_2$  stellt sich der vorangegangene Lastzustand mit Amplitude des Stromes  $A_1$  ein. In manchen Fällen ist die Leistung am Abgang geringer als vor dem Ausfall. Eine Untersuchung von Industriebetrieben in Agneholm E. and Daalder J., "Load recovery in different industries following an outage" [4] stellt diesen Sachverhalt dar.



**Abbildung 1: Schematische Darstellung der Leistungsüberhöhung. Mit  $A_1$  und  $A_2$  werden die Amplituden der gemessenen Abgangsströme bezeichnet. Die Unterbrechungsdauer  $t_A$  und die benötigte Dauer  $t_2$  bis zur Rückkehr zur statischen Lastdiversität charakterisieren die zeitlichen Abläufe. Ähnlich angenommene schematische Darstellungen sind in [1], [2] sowie [3] zu finden.**

Es soll untersucht werden, ob der gewählte Ansatz eines Expertensystems für diesen Problemtyp anwendbar ist. Im Gegensatz zur physikalischen Simulation von Einzelsystemen wird mit historischen Messdaten und physikalischen Überlegungen versucht eine Beschreibung des Sachverhaltes zu erstellen. Der in Mota A.A., et. al. "Load behaviour prediction under blackout conditions using a fuzzy expert system" [5] beschriebene Ansatz unterscheidet sich insofern als beispielsweise keine direkte Einbringung von Messdaten möglich ist. Zudem wird zusätzlich der statistisch erhobene Anteil an Elektrowärme im Abzweig für diese Masterarbeit herangezogen.

Im Rahmen einer Literaturrecherche zu diesem Thema werden überwiegend Publikationen aus Ländern in tendenziell kälteren Klimazonen wie Kanada oder Schweden vorgefunden. Die Autoren zeigen unter anderem eine Temperatursensitivität des Einschaltstromes auf. Ein weiterer Trend hinsichtlich Relevanz des Themas zeigt in Richtung der Verbreitung von Raumwärmebereitung durch Elektrizität. Dies sind meist Elektrodirektheizungen in Privathaushalten. Da diese in Kanada aufgrund günstiger Randbedingungen verbreitet erscheint, gibt es aus diesem Bereich entsprechende Publikationen. Im Quellenverzeichnis der Arbeit sind diese angeführt. Darin wird die Auswirkung dieser Heizungssysteme auf das Wiederversorgungsverhalten von Abzweigen dargestellt.

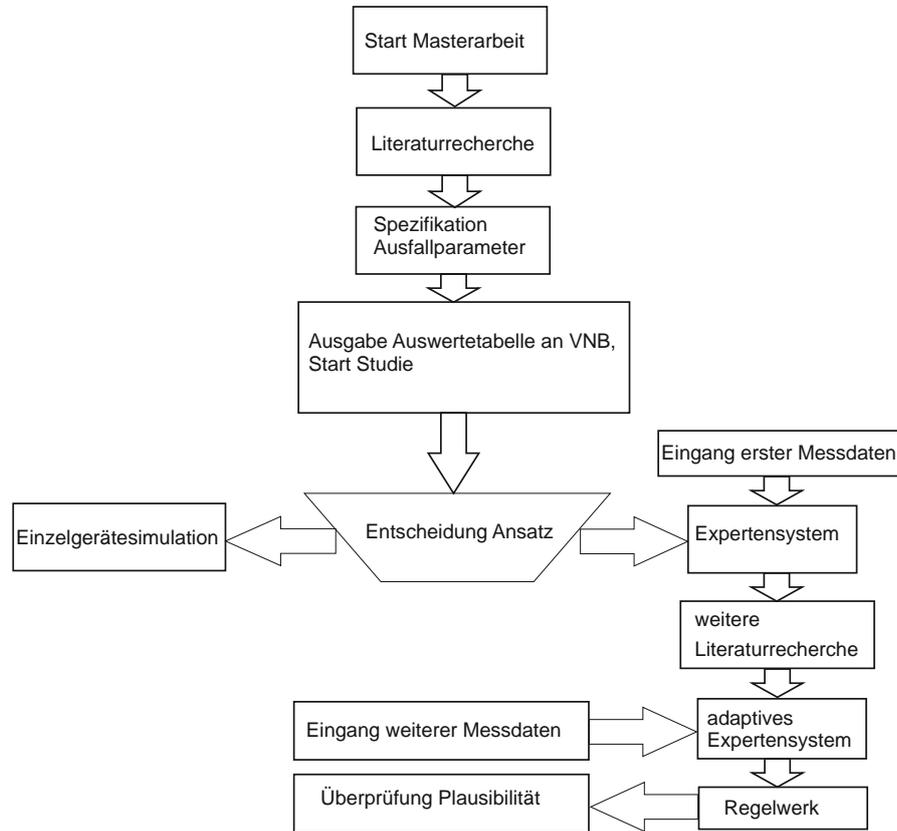
Aus den Ländern Deutschland, Schweiz und Österreich waren bei der Recherche keinerlei Studien oder Publikationen in deutscher Sprache zugänglich. Als mögliche deutsche Übersetzung des Titels könnte „Leistungsüberhöhung nach Wiederherstellung der Versorgung“ den gemeinten Sachverhalt beschreiben. Der Term „cold“ bezieht sich in diesem Fall trotz Temperatursensitivität des Sachverhaltes nicht unbedingt auf die Umgebungstemperaturen, die im Betrachtungszeitraum in einem Gebiet vorherrschen. Vielmehr soll damit der Zustand der Last aus elektrotechnischer Sicht ausgedrückt werden. Es soll damit angedeutet werden, dass beim Vorgang des „pickup“ die Lasten im betrachteten Versorgungsgebiet bereits über längere Zeit nicht versorgt sind. Als längere Unterbrechung werden einigen zehn Minuten bis zu Stunden aufgefasst. Die Ausdrücke „feeder restoration“ oder „reenergization process“ bezeichnen ebenso dieses Verhalten. Der Begriff „hot load pickup“ welcher ebenso in der Literatur zu finden ist, beschreibt im Gegensatz dazu den Wiedereinschaltvorgang nach „kurzer“ Unterbrechungszeit. Dies sind wenige Sekunden bis Minuten. Dies ist der Fall bei selbsttätigen Schaltheilungen durch die automatische Wiedereinschaltung AWE nach selbstheilenden „self clearing“ Fehlerstellen. Ein Beispiel dafür sind rückwärtige Überschlüge an Isolatoren, verursacht durch Blitzeinschläge in Freileitungsseile.

Ziel ist es aus den gesammelten Messdaten und Ausfallsdaten Erfahrungen in Bezug auf das Verhalten von Abgängen bei Wiedereinschaltung zu sammeln. Es soll zudem versucht werden, die Gründe für dieses Verhalten zu erörtern. Dies erfolgt durch Betrachtung von physikalischen Grundmodellen bei der Literaturrecherche. Als weiteren Schritt wäre es wünschenswert, Aussagen hinsichtlich der Auswirkungen künftiger Zuschaltenszenarien beim Netzwiederaufbau treffen zu können. Es soll geklärt werden ob es möglich ist, mit den betrachteten Parametern eine aussagekräftige Abschätzung vorzunehmen. Dazu werden ausgesuchten Ausfallsparametern und gemessenen Zuschaltstromverläufe auf mögliche Korrelation hin untersucht.

Die Betrachtung des Effektes „cold load pickup“ ist für zahlreiche Komponenten des Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilsystems aus unterschiedlichen Gründen relevant. Als Motivation für die Untersuchung des Themas sind hier einige Punkte erwähnt, die im Rahmen einer Literaturrecherche vorgefunden werden:

- Bei Wiederversorgung eines Netzgebietes im Inselbetrieb ist die Wirkleistungsaufnahme der Insel für die Abschätzung der Engpassleistung relevant. Die Wirkleistungsbilanz muss ausgeglichen sein um die Frequenz in der Insel halten zu können. Weitere Rahmenbedingungen zum Inselbetrieb sind in Weixelbraun M., „Dynamische Simulation eines 110-kV-Netzes im Inselnetzbetrieb“ [6] zu finden.
- Sämtliche Bestandteile des elektrischen Energiesystems müssen hinsichtlich ihrer Leistungsdimensionierung dieser Beanspruchungssituation standhalten können. Es dürfen dadurch keine dauerhafte Schäden oder übermäßige Alterung auftreten. Durch die bei der Dimensionierung von Komponenten angewandte Praxis wird nicht davon ausgegangen, dass es bei den betrachteten Daten zu Überschreitungen von Kennwerten kommt. In Wilde R. L., "Effects of Cold Load Pickup at the Distribution Substation Transformer" [7] wird von solchen Fällen berichtet.
- Schutzgeräte wie Überstromzeitschutzrelais zur Einhaltung thermischer Grenzen von Kabel und Freileitungen haben dieses Verhalten in Form spezieller Kennlinien „pickup curves“ hinterlegt. Hier wird ebenfalls nicht von ungewollten Auslösungen ausgegangen. Trotzdem ist das Wissen über den Sachverhalt für die Schutztechnik ebenso relevant. Eine Beschreibung gibt es in Mirza O. H., "Usage of CLPU curve to deal with the cold load pickup problem" [8].
- Hinsichtlich Energieplanung ist der Energiebedarf eines Abganges zu einem Versorgungsgebiet für ein Datum relevant. Das Versorgungsunternehmen muss im Rahmen definierter Fahrpläne Energie zukaufen wodurch es sich lohnt den künftigen Verbrauch möglichst genau abschätzen zu können. Zeigt sich eine stark ausgeprägte Leistungsüberhöhung über längere Dauer, etwa mehrere Stunden, so kann diese hinsichtlich zusätzlich benötigter Energie relevant sein. Es ist denkbar, dass nach nicht vermeidbaren, großflächigen, geplanten Abschaltungen für die Wiederherstellung größere Energiemengen einkalkuliert werden müssen. Ein Lastprognosemodell für den ungestörten Betriebsfall ist in Ujetz M., „Neuronale Netzwerke und Neuro-Fuzzy-Methoden zur kurzfristigen Lastprognose“ [9] zu finden.

Die Masterarbeit wurde nach dem in Abbildung 2 dargestellten Schema erstellt. Die Wahl des Ansatzes bedingte eine zusätzliche Literaturrecherche. Die Erstellung des reinen Expertensystems zu Beginn der Arbeit wurde mit den ersten vorhandenen Datensätzen durchgeführt. Mit steigender Anzahl an Messdaten veränderte sich der Ansatz hin zu einem adaptiven System, um eine effizientere Einbringung dieser zu ermöglichen.



**Abbildung 2: Vorgangsweise im Rahmen der Masterarbeit.**

## 2 Beschreibung physikalischer Ursachen

### 2.1 Einleitung

Die Charakteristik des Zuschaltstromes eines Abzweiges wird durch die in Tabelle 1 dargestellten Merkmale beschrieben. Die angegebenen Werte für Amplitude und zeitliche Basis weichen je nach Quelle etwas von den hier angegebenen ab.

Nr.	Name	Amplitude	zeitliche Basis
1	transiente Einschaltströme	bis zu 50-fach	wenige Perioden bis Sekunden
2	Anlaufströme	bis zu 10-fach	Sekunden
3	erhöhte Lastströme	bis zu 4-fach	Minuten bis Stunden

**Tabelle 1: Definition der Merkmale des Zuschaltstromes für diese Arbeit. Quellen: [2], [10] und [7].**

Um die Hintergründe für diese Merkmale zu beschreiben, ist es notwendig eine Unterteilung nach deren zeitlichen Domäne und deren Verursacher durchzuführen. Dies führt zu einer Unterteilung in deterministisches und nicht deterministisches Verhalten. Eine Auswahl ist hier dargestellt:

#### 1.) deterministisch:

- Einzelne Betriebsmittel welche dauerhaft mit dem Versorgungsnetz verbunden und ortsfeste Anlagen sind sowie bei Wiederkehr der Spannungsversorgung festgelegtes Verhalten zeigen.
- Rundsteueranlagen
- Industrieanlagen mit festgelegtem Produktionsplan
- Traktionsfahrzeuge
- Straßenbeleuchtungen

#### 2.) nicht deterministisch:

- Verhalten von Einzelkundenanlagen
- Umwelteinflüsse: Wetter, etc.
- Industrieanlagen mit stark fluktuierender Produktion

Einen Ansatz für das Verhalten von EinzelkundInnen wird in Capasso A., et. al. "A bottom-up approach to residential load modeling" [3] mit Hilfe der Nachbildung von üblichen Gewohnheiten und Tagesabläufen präsentiert. In Desbiens C., "Electric vehicle model for estimating distribution transformer load for normal and cold-load pickup conditions" [11] wird bei ausreichender Verbreitung von Elektrofahrzeugen die Möglichkeit einer Leistungsüberhöhung nach längeren Versorgungsunterbrechungen dargestellt. Die betroffenen KundInnen werden versuchen ihr Elektrofahrzeug nach Versorgungsunterbrechungen zu laden, um wieder mobil zu sein. Die Nummern 1 und 2 in Tabelle 1 werden in Kapitel 2.2 theoretisch erörtert, Nummer 3 wird in Kapitel 2.3 behandelt. Der Fokus dieser Masterarbeit liegt auf erhöhter Wirkleistungsaufnahme im Bereich von Minuten nach erfolgter Zuschaltung, verursacht durch deterministische Vorgänge in der Kundengruppe Privathaushalte.

## 2.2 Betrachtung der transienten Einschalt- und Anlaufvorgänge

Hinsichtlich der transienten Einschaltströme erfolgt in diesem Kapitel eine kurze Erläuterung der im Rahmen einer Literaturrecherche betrachteten physikalischen Phänomene.

Betrachtet man eine Auswahl an elektrischen Betriebsmitteln, so ergibt sich je nach Gerätetyp ein charakteristischer Zuschaltstrom. Die Anzahl von Einzelgeräten, die in der Praxis den Abzweig aus elektrotechnischer Sicht repräsentieren wird durch die Aufteilung in wenige Grundtypen reduziert. Individuelle Einzelgeräte stellen dann eine Kombination dieser mit zugehörigem Verhalten dar.

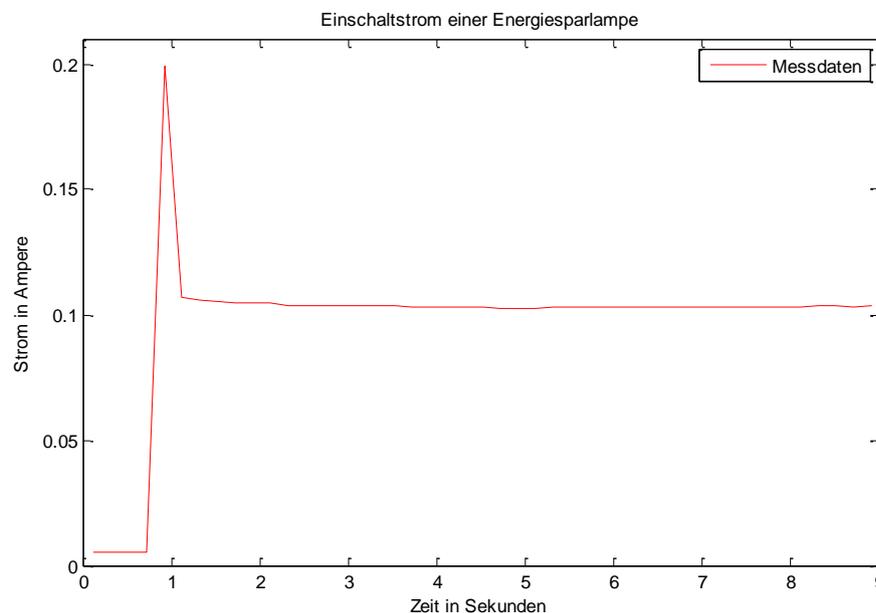
**Ausgewählte Beispiele für die Grundtypen von Betriebsmitteln in Haushalten sind:**

- 1.) **Netzgeräte:**
  - Ladestrom Kondensator
  - Stromaufnahme elektronischer Eingangsstufen Schaltnetzteile
  
- 2.) **Transformatoren, Eisendrosseln und Stromwandler:**
  - Zuschaltstrom Induktivität
  - Transformator Einschaltstrom, „inrush“
  
- 3.) **Leuchtmittel:**
  - Gasentladungslampen
  - Glühlampen
  - Halbleiterleuchtmittel
  
- 4.) **Elektrischen Maschinen und Antriebe:**
  - Anlaufverhalten Maschinensätze
  - Kompressoren (Kühlaggregate, Druckluft, Wärmepumpen)
  - Lüfter
  - Pumpen
  - Förderantriebe
  
- 5.) **Elektrowärmeanwendungen:**
  - Elektrodirektheizungen
  - Strahler
  - Radiatoren
  - Konvektoren

Auf den folgenden Seiten erfolgt eine kurze Erläuterung dieser Grundtypen hinsichtlich des Einschalt- und Anlaufverhaltens. Die in Punkt 5.) angeführten Elektrowärmeanwendungen werden zusätzlich in Kapitel 2.3 bezüglich deren quasizyklischen Verhaltens behandelt.

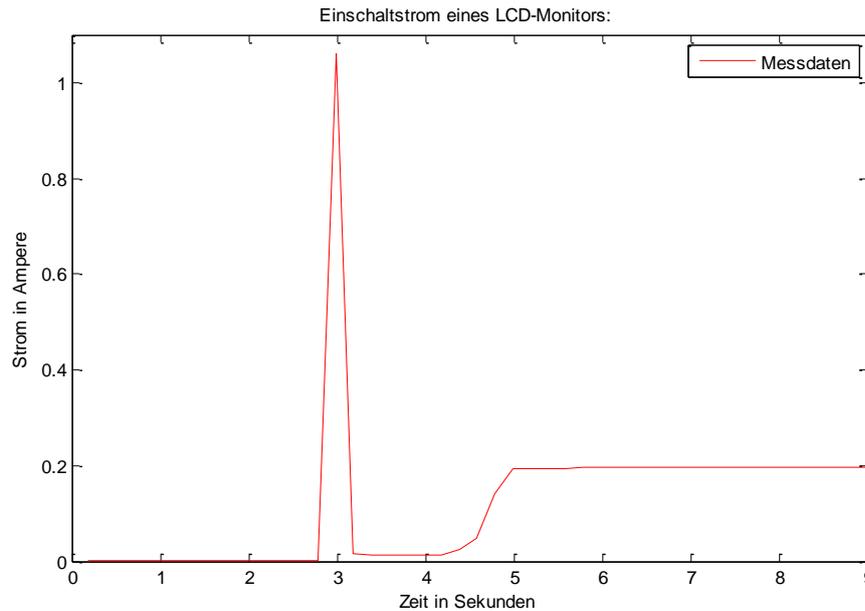
## 1.) bis 3.) Netzgeräte, Trafos, Eisendrosseln, Stromwandler und Leuchtmittel

Vorhin angeführte Punkte 1.) bis 5.) stellen eine Aufteilung des dynamischen Verhaltens zugeordnet zu bestimmten Einzelgeräten dar. Diese Vorgänge finden innerhalb einer Zeitbasis von wenigen Periodendauern bis hin zu Sekunden und Minuten statt. Dies ist in Tabelle 1 unter Punkt 1 und 2 angeführt. Aus Sicht der Energiequelle kann dies als ein dynamisches Verhalten der Lastimpedanz bei der Wiederherstellung der Versorgung aufgefasst werden. Ein solches dynamisches Lastmodell wird in Zabar Z. and Pinto J. F., "Start-Up Response of a Secondary Distribution Network Part I: Dynamic Model of Appliance Start-up" [12] präsentiert. In Abbildung 3 und Abbildung 4 erfolgt exemplarisch die Darstellung von Zuschaltströmen zweier ausgesuchter Haushaltsgeräte welche im Rahmen von [13] gemessen werden. Die Darstellung von transienten Zuschaltströmen für einen gesamten Abzweig, wie sie für diese Masterarbeit gemessen werden, erfolgt in Kapitel 4.2.



**Abbildung 3: Darstellung des Effektivwertes des Zuschaltstromes einer Energiesparlampe. Lampentyp ist Osram Deluxestar 17 W bei einer Spannung von 230 V. Messdaten aus [13] entnommen.**

Aufgrund der Ausführungsform als Energiesparlampe wird bedingt durch das integrierte Vorschaltgerät direkt nach der Zuschaltung eine transiente Einschaltspitze auftreten. Die Einschaltströme von Glühlampen bis zur Erreichung der Solltemperatur des Glühfadens durch temperaturabhängigen Widerstandsanstieg fallen ebenso in die Kategorie Leuchtmittel. Eine weitere Unterscheidung in Wirk- und Blindkomponente des Stroms wird nicht vorgenommen.



**Abbildung 4:** Darstellung der Effektivwerte des Zuschaltstromes bei 230 V eines LCD-Monitors vom Typ Eizo Flexscan L365. Ab ca. 5 Sekunden nach Zuschaltung ist ein Bild sichtbar und die Stromaufnahme weitgehend konstant. Messdaten und Beschreibung sind aus [13] entnommen.

Die transiente Amplitude in beiden Beispielen ist ein Vielfaches des Wertes im stationären Fall. Möglich könnte eine Beeinflussung folgender Punkte sein:

- Wirkleistungsregelung von Erzeugungsanlagen.
- thermische Beanspruchung von Systemkomponenten.
- elektrodynamische Beanspruchung von Systemkomponenten.

Diesbezüglich wird aber der Energiegehalt des Einschaltstroms der Verbrauchergruppe Einzelgeräte in privaten Haushalten als zu gering eingeschätzt. Diese Einschätzung erfolgt auf Basis folgender Überlegungen:

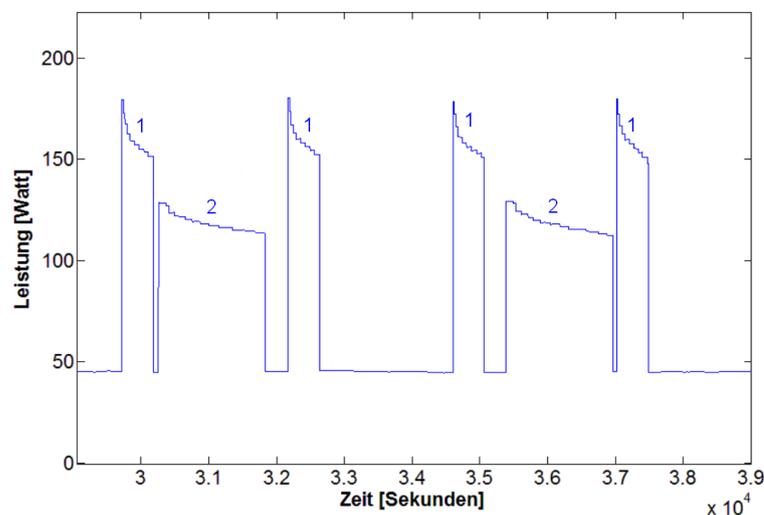
- Die Fläche unter der Einschaltstromspitze als Maß für den Energiegehalt ist durch die Steilheit der Flanken begrenzt. Dadurch wird geringer Energiegehalt vermutet.
- Bei Vorschaltgeräten und Netzgeräten wird überwiegend induktives Verhalten vermutet. Diese Einschaltvorgänge sind daher durch Blindanteile charakterisiert.
- Der Wirkenergieanteil dieser Einschaltspitzen wird deutlich geringer eingeschätzt als die in rotierenden Generatoren gespeicherte mechanische Energie. Das ist mit den vergleichsweise hohen Massenträgheitsmomenten sowie Drehzahlen und der damit verbundenen Rotationsenergie zu begründen.
- Aufgrund von Latenzzeiten in der Regelung von Erzeugungsanlagen wird davon ausgegangen, dass solche Einschaltvorgänge bereits abgeklungen sind, bevor Regeleinrichtungen aktiv werden.

#### 4.) Elektrische Maschinen und Antriebe:

Die Anlaufströme dieser werden hingegen höhere Energiemengen enthalten. Durch die Beschaffenheit der Arbeitsmaschine kann sich zudem erhöhter Leistungsbedarf bis in den Minutenbereich ergeben. Folgende Aufteilung ist dabei denkbar:

- 1.) Losbrech- und Anlaufmomente von größeren Maschinensätzen.
- 2.) erhöhtes Belastungsmoment, bestimmt durch die Arbeitsmaschine.

Die Betrachtung von Einschalt- und Anlaufvorgängen von elektrischen Maschinen ist z.B. beschrieben in [14]. In Abzweigen mit überwiegendem Anteil von Haushalten werden keine Anlaufvorgänge durch größere Maschinensätze vermutet. Zu Punkt 2 ist im Folgenden ein Beispiel eines Kühlschranks als Arbeitsmaschine dargestellt. Dieser stellt dem Antrieb bei wärmerer Innentemperatur des Kühlschranks ein höheres Belastungsmoment entgegen<sup>1</sup>. Dies ist unter anderem dem Verhalten des Kühlmittels in Zusammenhang mit der Innentemperatur des Kühlschranks zuzuschreiben. Bei zunehmender Abkühlung des Kühlschranks wird der Antriebsmaschine des Kompressors ein immer geringeres Lastmoment entgegengesetzt. Je näher sich die Innentemperatur am Solltemperaturwert befindet, desto geringer sind die notwendige mechanische Verdichterleistung und die damit verbundene elektrische Wirkleistungsaufnahme. Dieses Verhalten ist ebenso in den Messungen in [15] ersichtlich. Nachfolgende Darstellung in Abbildung 5 zeigt diesen erhöhten Wirkleistungsbedarf, welcher innerhalb der Zyklen jeweils abnimmt.



**Abbildung 5: Leistungsgemessenes Lastprofil mit (1) Kühl- und (2) Gefriergerät in einem Haushalt.**

Der in Abbildung 5 dargestellte Verlauf der aufgenommenen Leistung stammt aus einem tatsächlich leistungsgemessenen Lastprofil eines Haushalts. Dies soll verdeutlichen das für diese Geräte die aufgenommene Wirkleistung für einen Zyklus nicht als konstant betrachtet werden kann. Beim in [16] gemessenen Kühlschrank sinkt diese während der Zeitperiode von ca. 8,3 Minuten in der Kühlphase um ca. 30 Watt.

zu 1: Eine genauere Beschreibung ist zu finden in: <http://webfiles.portal.chalmers.se/et/PhD/AgneholmEvertPhD.pdf>

Für andere Antriebssysteme wie etwa Druckluftkompressoren, Förderantriebe oder Pumpensysteme wird in Abhängigkeit der Beschaffenheit der Arbeitsmaschine ebenfalls nicht konstante Wirkleistungsaufnahme nach der Zuschaltung erwartet. Dabei ist eine direkte Proportionalität ebenso möglich. Ein Anstieg der Wirkleistungsaufnahme mit fortschreitender Zeit ergibt sich, wenn beispielsweise Druckluft mit Kompressoren verdichtet wird. Diese Vorgänge sind bereits bis in den Bereich bis wenige Minuten hin angesiedelt. Trotzdem werden sie in diesem Kapitel zu den Einschalt- und Anlaufvorgänge gezählt. Auf das quasiperiodische Auftreten der Leistungsaufnahme bestimmter Verbrauchergruppen wird gesondert in Kapitel 2.3 eingegangen.

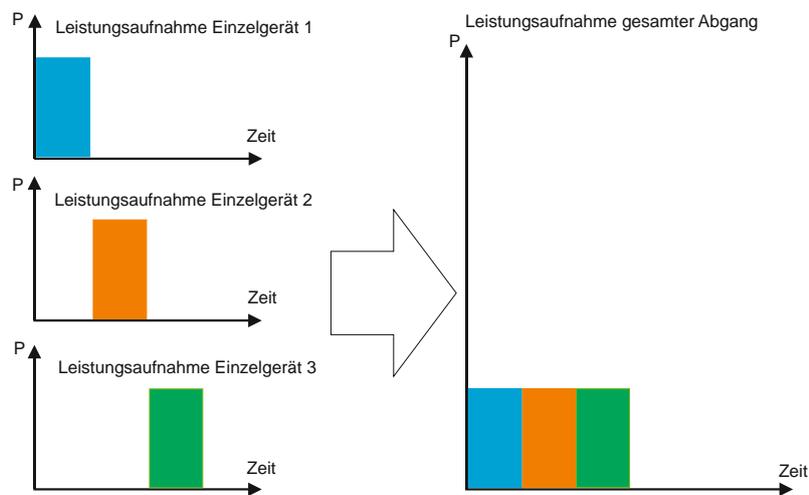
### **5.) Elektrowärmeanwendungen:**

Bei den in Punkt 5.) angeführten Elektrowärmeanwendungen wird für alle angeführten Ausführungsformen vom Prinzip der konduktiven Erwärmung eines Heizleiters ausgegangen. Dabei stellt der Heizleiter einen elektrischen Widerstand im Stromkreis dar an welchem die Heizleistung in Form reiner Wirkleistung umgesetzt wird. Abhängig vom eingesetzten Material ergibt sich ein Temperaturgang des spezifischen Widerstandes. Da der Erwärmungsvorgang und damit die Temperatur des Heizleiters von Umgebungsparametern abhängig sind, kann hier keine theoretisch begründete Aussage über den Stromverlauf getroffen werden. In [17] ist jedoch eine Auswahl an Temperaturkoeffizienten für häufig eingesetzte Legierungen dargestellt. Für positive Temperaturkoeffizienten der Legierungen steigt der Widerstand mit der Temperatur, bei konstanten Umgebungsbedingungen sinkt daher theoretisch die Wirkleistungsaufnahme mit der Zeit.

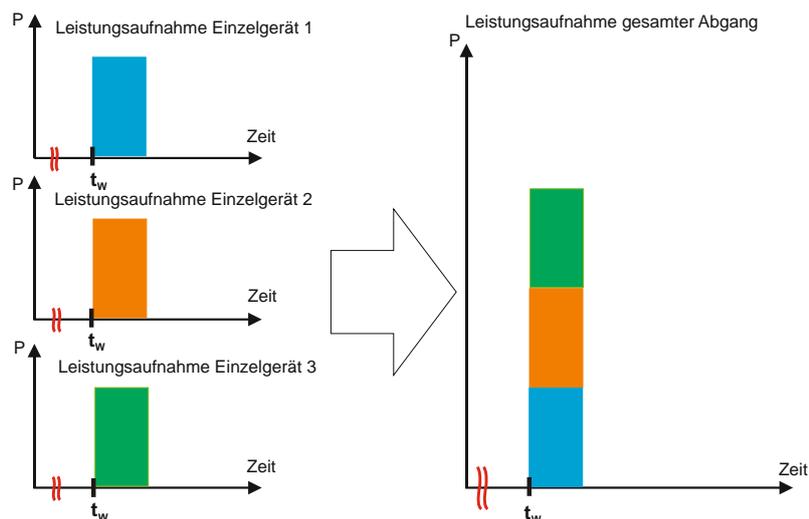
## 2.3 Betrachtung statische Lastdiversität

### 2.3.1 Betriebszyklen

Im Gegensatz zum vorigen Kapitel 2.2 wird hier auf das in Abbildung 5 dargestellte quasiperiodische Verhalten einzelner Gerätetypen eingegangen. Es zeigt sich eine in annähernd gleichförmigen Abständen wiederkehrende Leistungsaufnahme jeweils für den Kühlschrank (1) und die Gefriertruhe (2). Diese Messung bezieht sich auf einen Haushalt. Bei Betrachtung eines gesamten Abzweiges mit einer ausreichend großen Anzahl<sup>2</sup> an Einzelgeräten ergibt sich eine konstante Last wie schematisch in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 6: Schematische Darstellung der statischen Lastdiversität: Im ungestörten Betrieb ergibt sich aufgrund statistischer Normalverteilung aller Einzelgeräte konstante Leistungsaufnahme am Abzweig.**



**Abbildung 7: Verlust der statischen Lastdiversität: Nach einer ausreichend langen Versorgungsunterbrechung versuchen alle im Abzweig vorhandenen Kühlschränke den Sollwert der Innentemperatur zu erreichen. Diese werden unmittelbar mit ihrer Anschlussleistung zur Last beitragen.**

zu 2: Die Anzahl von Einzelgeräten muss ausreichend sein, um einer statistischen Normalverteilung zu genügen. In [22], S. 24 wird in Bezug auf Lastprofile eine Anzahl von mindestens 400 Haushalten angeführt um eine Annäherung des Ganglinienmittelwertes von  $\pm 10\%$  an das Standardlastprofil zu erreichen.

Ist die Ausfalldauer ausreichend lang, so werden alle Kühlschränke zum Zeitpunkt der Versorgungswiederherstellung  $t_w$  eine Innentemperatur  $T$  aufweisen, welche oberhalb der festgelegten Schaltschwelle des Thermostats liegt. Folglich werden alle Kühlschränke bei Wiederkehr der Spannung mit ihrer entsprechenden Leistung im Abzweig wirksam. Durch die Überlagerung der Leistungsaufnahme aller Einzelgeräte ergibt sich eine wirksame Leistungsüberhöhung nach dem Zuschaltzeitpunkt  $t_w$  gemäß Abbildung 7. Es tragen nur jene zusätzlichen Geräte zu Überhöhung bei, welche vor der Versorgungsunterbrechung nicht in Betrieb waren. Dies ist die Summe aller Geräte vermindert um eine unbestimmte, mittlere Anzahl von Geräten welche im Normalbetrieb vor dem Ausfall ohnehin in Betrieb sind. Infolge der Verschiedenheit der Einzelgeräte und somit deren thermischer Zeitkonstanten ist davon auszugehen, dass eine Rückkehr zur statischen Lastdiversität nach der Zeitdauer  $t_2$  gemäß Abbildung 1 erfolgt. Die Anzahl der dazu notwendigen Zyklen ist durch die Verschiedenartigkeit der Einzelgeräte bestimmt. Diesbezüglich konnten bei der Literaturrecherche keine Richtwerte als Zahlenwerte vorgefunden werden. Umwelteinflüsse wie KundInnenverhalten beeinflussen diese Anzahl zusätzlich. Denkbar sind daher weitere, zyklisch wiederkehrende, abklingende Leistungsüberhöhungen nach der ersten Überhöhung bei der Zuschaltung. Beide Darstellungen in Abbildung 6 und Abbildung 7 sind lediglich schematische Darstellungen um das Verhalten anzudeuten. Die in Kapitel 2.3.1 beschrieben und in Abbildung 5 dargestellte charakteristische Leistungsaufnahme je Zyklus von Kühlgeräten wird in Abbildung 6 und Abbildung 7 zur Vereinfachung für ein Einzelgerät bereits als konstant angenommen. Es ist zudem davon auszugehen, dass die Zeitdauer der Leistungsaufnahme für den Schaltzyklus unmittelbar nach Versorgungswiederherstellung länger dauert, da für die Einzelgeräte die Innentemperatur bereits weiter außerhalb der engen Schalthysterese des Thermostats liegt.

Alle in Abbildung 6 und in Abbildung 7 schematisch dargestellten Einzelgeräte sind in der Lage, Energie in thermischer Form zu speichern. Für einen elektrisch beheizten Haushalt bei kalter Umgebungstemperatur würde die Innenraumtemperatur umgekehrt unter der Schaltschwelle des Thermostats liegen. Eine Herleitung der zu Grunde liegenden physikalischen Gesetze ist in Kapitel 2.3.2 dargestellt. Für das Verhalten nach einer ausreichend langen Versorgungsunterbrechung können diese als eine Geräteklasse aufgefasst werden. Dabei spielt es keine Rolle eine gegenüber der Umgebungstemperatur höhere oder tiefere Innentemperatur versucht wird zu erhalten. Entscheidend ist, dass die Ausfalldauer lange genug ist, sodass die Temperatur an die Umgebungstemperatur angeglichen wird und das Gerät nach dem Ausfall selbsttätig den Betrieb wiederaufnimmt.

Letzteres ist im Fall von Kühl- und Gefriergeräten sowie Elektrowarmwasserboilern und Elektroheizsystemen anzunehmen, begründet z.B. durch Schäden bei Nichteinhaltung dieses Prinzips:

- Verderben von Lebensmitteln in Kühlanlagen:
  - Kühl- und Gefriergeräte müssen selbsttätig wiederanlaufen.
- Komfortverlust bei Versagen der Warmwasserbereitstellung:
  - Elektrowarmwasserboiler halten Innentemperatur selbsttätig.
- Schäden an Rohrleitungen durch gefrieren:
  - Elektroheizungen werden durch Thermostat gesteuert.

**Folgende Geräte sind in diese Systemklasse der thermischen Systeme einzuordnen:**

### **1.) Elektrische Warmwasserbereitung**

- Elektrowarmwasserboiler
- Wärmepumpen zur Warmwasseraufbereitung.
- Heizpatronen in Warmwasserboilern.

### **2.) Kühl- und Gefriergeräte**

- Kühlschränke
- Gefriertruhen
- Gewerbliche Kühlanwendungen: Kühlräume, Kühlregale.

### **3.) Elektrowärme zur Raumwärmebereitstellung in Privathaushalten**

- Elektrodirektheizungen in Form von ortsfesten Anlagen.
- elektrische Zusatzheizgeräte: Radiatoren, Konvektoren Strahler.
- Wärmepumpen zur Raumwärmebereitstellung.

Die obige Unterscheidung in Einzelheizgeräte als Zusatzheizungen und fest installierte Elektrowärmeanlagen als ortsfeste Anlagen erscheint wesentlich. Die Verbreitung letzterer ist den zuständigen Netzbetreibern, welche bei der Errichtung dieses Heizsystem unter Umständen mitwirken, meist bekannt. Im Gegensatz zur Warmwasserbereitung und Kühlgeräten wird bei Punkt 3.) ein elektrisch beheizter Haushalt als Einzelsystem aufgefasst. Dabei ist für Elektroheizungen anders als bei Einzelgeräten für die ja als Umgebungstemperatur konstante Raumtemperatur angenommen wird von einer zusätzlichen Abhängigkeit von der Außentemperatur auszugehen. Um diese Zusammenhänge zu verdeutlichen ist es notwendig das thermische Verhalten solcher Systeme zu betrachten. Es kann ein Zusammenhang zwischen der Umgebungstemperatur und dem Taktverhalten einer Elektroheizung abgeleitet werden.

Im Folgenden Kapitel 2.3.2 erfolgt eine Beschreibung eines möglichen Ansatzes zur Nachbildung des quasiperiodischen Verhaltens durch ein physikalisch basierendes Modell.

### 2.3.2 Physikalische Modellierung

Die Modellierung von Einzelgeräten wird in zahlreichen Publikationen [1], [7] und [10] sowie [18] als Ausgangspunkt für das Verhalten eines gesamten Abzweiges herangezogen. Dabei wird ausgehend von physikalischen Grundlagen das thermische Verhalten einzelner Systeme, dazu gehören auch elektrisch beheizte Haushalte, nachgebildet. Danach wird eine bestimmte Anzahl solcher Einzelsysteme in Form von Objekten dieser Klasse in einer objektorientierten Anwendersprache erstellt. So kann auf das kumulierte Verhalten des gesamten Abzweiges geschlossen werden. Ist die Anzahl an Objekten (Einzelsystemen) ausreichend, so können einzelne Parameter als statistisch zufällig verteilt angenommen werden. Solche Parameter sind für einen elektrisch beheizten Haushalt beispielsweise:

- aktuelle Innentemperatur  $T$
- durch BewohnerInnen eingestellte Temperaturschwelle Thermostat
- Streuung thermische Konstanten:  $R_k$ ,  $C_W$  der Einzelsysteme
- elektrische Parameter:  $P_{el}$  für ein Einzelsystem.
- aktueller Status Thermostatstatus: EIN oder AUS

Im gesamten Abzweig ergibt sich durch die zufällige Verteilung dieser Parameter eine mittlere Anzahl an Geräten welche zum Zeitpunkt vor dem Ausfall Leistung aufnehmen.

Für das Verhalten eines thermischen Systems ist eine mathematische Beschreibung der aktuellen Innentemperatur  $T$  notwendig. Diese ist durch die Schalthysterese des Temperaturreglers für das elektrische Verhalten des Einzelsystems maßgeblich.

Als Ausgangspunkt für den Erwärmungs- und Abkühlvorgang in einem definierten System kann entnommen aus [17] folgende Gleichung angesehen werden:

$$\frac{dW}{dt} = P_{zu} - P_{ab} \quad (2.1)$$

Die Änderung der im System gespeicherten thermischen Energie  $dW$  entspricht der Zu- bzw. Abfuhr von thermischer Leistung. Die im System gespeicherte thermische Energie geht während der Versorgungsunterbrechung durch die Mechanismen

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Strahlung

als thermische Leistung  $P_{ab}$  an die Umgebung über.

Für die so abgeführte Wärmeleistung  $P_{ab}$  gilt entnommen aus [17]:

$$P_{ab}(t) = \frac{T(t) - T_a}{R_k} = \frac{\vartheta(t)}{R_k} \quad (2.2)$$

Die abgegebene thermische Leistung des Systems ist als Funktion der Zeit abhängig von der Differenz  $\vartheta(t)$  der aktuellen Innentemperatur  $T(t)$  sowie der Umgebungstemperatur  $T_a$  und dem Wärmeübergangswiderstand  $R_k$ . Letzterer lässt sich aus materialspezifischen Parametern für eine Anordnung berechnen. Die Berechnung ist aus den Werten für einzelne Materialien möglich, diese sind in entsprechenden Tabellen angegeben. Eine Übersicht für Baustoffe sowie Materialien für Fenster und Türen ist auf Seite 82 in [17] angeführt.

Unter der Voraussetzung konstanter zugeführter und abgeführter Wärmeleistung  $P_{zu} = P_{ab}$  lässt sich aus (2.1) und (2.2) eine Differentialgleichung bezüglich der aktuellen Temperatur  $T$  formulieren:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{R_k \cdot C_W} (T - T_a) = \frac{P_{zu}}{C_W} \quad (2.3)$$

Dabei stellt  $C_W$  die spezifische Wärmekapazität des Mediums im Inneren der Anordnung dar. Nach Lösung der Differentialgleichung (2.3) wie in [17] dargestellt ergibt sich mit den Anfangsbedingungen  $\vartheta(0) = 0$  folgender Verlauf für die Temperatur:

$$\vartheta(t) = R_k \cdot P_{zu} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.4)$$

Die Temperaturkonstante  $\tau$  des Vorganges ist das Produkt aus Wärmeübergangswiderstand  $R_k$  und der spezifischen Wärmekapazität  $C_W$ . In Abhängigkeit von  $\tau$  wird ein System schneller oder langsamer die aktuelle Temperatur  $T(t)$  an die Außentemperatur angleichen. Dadurch ist die Charakterisierung eines thermischen Systems als nichtlinearer Problemtyp vorgenommen.

Der exponentielle Verlauf in (2.4) der Temperatur bzw. der Temperaturdifferenz wird in einigen Publikationen [1], [2], [7] sowie [10] mithilfe von elektrischen Ersatzschaltungen analog zum thermischen System nachgebildet. Ein elektrisches RC-Netzwerk stellt als Modell dabei die thermischen Konstanten nach. Die Einbringung von Wärme durch die Heizung wird mit einer Gleichstromquelle nachgebildet. Eine Berechnung der Zeitkonstanten aus den materialspezifischen Parametern und Umrechnung in elektrische Modellwerte ist theoretisch möglich. Für praktische Berechnungen müssten die materialspezifischen Parameter der Haushalte im Abzweig bekannt sein.

Gemäß Abbildung 8 sollte die Höhe der mittleren Leistungsaufnahme vor dem Ausfall an einem Abzweig mit bestimmtem Anteil von elektrisch beheizten Haushalten von der Umgebungstemperatur abhängig sein. Es wird angenommen, dass Elektrowärmeanwendungen entweder mit konstanter elektrischer Leistung wirksam oder nicht zugeschaltet sind. Dadurch ergibt sich ein elektrischer Taktzyklus (Status Thermostat) ähnlich zu den vereinfacht dargestellten Kühlgeräten. Zum Zeitpunkt der Versorgungswiederherstellung  $t_w$  werden die einzelnen elektrisch beheizten Haushalte je Zyklus für längere Zeit als Lasten wirksam sein.

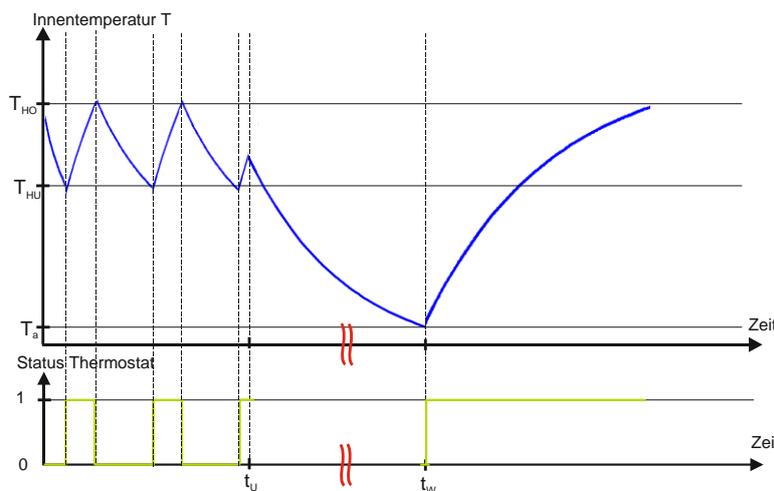


Abbildung 8: Darstellung des schematischen Verlaufs der Innentemperatur mit zugehörigem Verhalten des Thermostats. Die Skalierung der Abszisse ist abhängig vom betrachteten thermischen System.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird von einer Nachbildung von Einzelhaushalten durch thermische Einzelsysteme abgesehen. Es kann angenommen werden, dass diese Zeitkonstanten im Bereich von Stunden liegen. Diese Abschätzung erfolgt aus Überlegungen im Hinblick auf die Publikationen [1], [2] und [10]. Als Erkenntnis aus diesen theoretischen Betrachtungen wird eine Abschätzung gemäß Tabelle 2 mit folgenden Annahmen für die Zeitkonstanten getroffen:

Thermisches System	Geschätzte Zeitkonstante $\tau$
elektrisch beheizter Haushalt	einige Stunden
Elektrowarmwasserboiler	einige zehn Minuten
Kühlschränke	bis zu wenigen zehn Minuten

Tabelle 2: Vermutete Zeitkonstanten thermischer Systeme.

Für die spätere Auswahl des Lösungsansatzes zur Behandlung von CLPU-Ereignissen ist es daher von Bedeutung dass dieser:

- für nichtlinearen Problemtypus geeignet sein muss.
- die Einbringung vermuteter Zeitkonstanten ermöglichen muss.

## 3 Expertensystem zur Auswertung von CLPU-Ereignissen

### 3.1 Grundstruktur des erstellten Expertensystems

#### 3.1.1 Wahl der Expertensystemtechnologie

Wie in den Publikationen Ekwue A., et. al. "Artificial Intelligence Techniques in Power Systems" [19], Gottlob G. et. al., "Expertensysteme" [20] und Reif G., "Moderne Aspekte der Wissensverarbeitung" [21] dargestellt, gibt es zahlreiche Anwendungsgebiete für Zeitreihenanalyse, künstliche neuronale Netze oder Expertensysteme im Umfeld von elektrischen Energiesystemen.

Eine Auswahl an Anwendungsmöglichkeiten aus [19] sind:

- Erstellung von Lastprognosen
- Regelungstechnische Anwendungen
- Fehlersuche
- Interpretation von Störmeldungen
- Schutztechnik
- Wiederversorgungsstrategien
- Verlustoptimierung
- Diagnose von Systemkomponenten

Dabei kommt es zu keiner unmittelbaren Nachbildung des physikalisch zu Grunde liegenden Sachverhalts durch ein Modell. Vielmehr handelt es sich dabei meist um sogenannte „soft-computing“ Ansätze. Dieser Ausdruck rührt aus der gemeinsamen Eigenschaft dieser Systeme, dass mit Unsicherheiten behaftetes Wissen mit entsprechend statistischer Bewertung eingebracht werden kann. Dies kann von Vorteil sein wenn die Modellbildung nicht oder nur schwer möglich ist.

Einige Beispiele für die Realisierung dieses Ansatzes sind:

- Zeitreihenanalyse durch Algorithmen<sup>3</sup>:
- Autokorrelationsfunktion
- Moving Average Algorithmus
- Simplex Algorithmus
- künstliche neuronale Netze, ANN
- reine Expertensysteme, FIS
- adaptive neuronale Expertensysteme, ANFIS

zu 3: Einen verbreiteten Satz an Messdaten stellt das „Box-Jenkins gas furnace dataset“ dar. Damit kann die Eignung solcher Algorithmen zur Zeitreihenanalyse untersucht werden. Weitere mögliche Algorithmen sind zu finden unter: <http://en.wikipedia.org/wiki/Box-Jenkins>

Die Wahl dieser Realisierungsform für verschiedenste Problemstellungen in Ingenieursdisziplinen ist unter anderem Gegenstand von [21]. Darin wird auf die Unterschiede zwischen den einzelnen Realisierungsformen sowie deren informationstheoretischen Hintergrund eingegangen. Als Entscheidungskriterien für die Auswahl gibt es eine Reihe von Fragen, einige sind hier angeführt:

- Gibt es ein physikalisches Modell zum Problemtyp?
- Gibt es historische Messdaten?
- Gibt es Erfahrungswerte, Expertenwissen?
- Welche Aussage soll getroffen werden, Ergebnis:
  - tendenzielle Entscheidung: größer/kleiner, etc...
  - aussagenlogische Entscheidung: ja/nein.
  - Abschätzung: Größenordnung eines Zahlenwertes.
  - ein Zahlenwert als Ergebnis.

Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer Aspekte aus informationstheoretischer Sicht die im Rahmen dieser Masterarbeit nicht weiter erörtert werden.

**An den Lösungsansatz im Rahmen der Masterarbeit werden folgende Ausgangsbedingungen und Anforderungen gestellt:**

- **Exakte Modellierungen des Sachverhaltes nicht unmittelbar möglich, da zufällige Prozesse ebenso die Gestalt des Zuschaltstromes beeinflussen werden.**
- **Verarbeitung vorhandener Messdaten und zugehöriger Ausfallparameter muss möglich sein.**
- **Einbringung von „a-priori“ Informationen:**
  - **aus der Literaturrecherche: vermutete Zeitkonstanten.**
  - **aus Betrachtung von Messdaten: vermutete Tendenzen.**
  - **künftige Erweiterungen aus anderen Informationsquellen.**
- **Erweiterbarkeit mit künftigen Messdaten soll möglich sein.**
- **Eignung für nichtlineare Problemtypus (thermische Systeme).**
- **Aussage soll eine Abschätzung darstellen.**
- **Realisierung durch zugängliche Software, MatLab ANFIS Toolbox.**

Es folgen zwei ausgesuchte Beispiele aus der Literaturrecherche zur Anwendung von ANN und FIS im Zusammenhang mit Lastprognosen im Normalbetriebszustand sowie nach Versorgungsunterbrechungen. Dadurch wird die Wahl der Expertensystemtechnologie für diese Masterarbeit begründet.

In Ujetz M., "Neuronale Netzwerke und Neuro-Fuzzy-Methoden zur kurzfristigen Lastprognose" [9] zeigt sich die Eignung von unter anderem künstlichen neuronalen Netzen ANN und Expertensystemen FIS zur Analyse von historischen Zeitreihen, um kurzfristige Lastprognosen zu erstellen. Dabei wird die aus wirtschaftlicher Sicht relevante, 24 Stunden Last- und damit Strompreisperiode analysiert. Das Netzwerk soll dabei die Lastprognose unter bestimmten Randbedingungen wie der Globalstrahlung zum jeweiligen Zeitpunkt erstellen. Von einer vorangegangenen Versorgungsunterbrechung wird nicht ausgegangen, wodurch sich andere Bedingungen und Anforderungen ergeben.

#### **Abgeleitete Erkenntnisse für die Wahl des Ansatzes daraus:**

- ANN können je nach Anzahl der künstlichen Neuronen und der verborgenen Schichten im Inneren des Netzwerkes nichtlineare Problemstellungen nachbilden. Je nach Umfang und Qualität des Datenmaterials steigt die Prognosequalität.
- Zur Erstellung von Prognosen mit ANN wird ein höherer Bedarf an historischen Datensätzen benötigt, verglichen zu einem FIS. Zudem ist eine Einbringung von „a-priori“ Informationen nicht möglich. Daher wird für die Abschätzung des Zuschaltstromes für diese Masterarbeit ein reines ANN keine optimale Lösung darstellen.

In Mota A.A., et. al. "Load behaviour prediction under blackout conditions using a fuzzy expert system" [5] wird die Verwendung eines reinen Expertensystems zur Abschätzung des CLPU vorgeschlagen. Dieses ermöglicht kein Training mit Messdaten. Die in der Publikation präsentierte Expertensystemtechnologie unterscheidet sich daher von der im Rahmen dieser Masterarbeit verwendeten. Die Einbringung heuristischer Zusammenhänge ist zwar möglich, nicht aber die Adaption des Regelwerkes durch einen Algorithmus. Ob das Training mit Messdaten tatsächlich einen Vorteil darstellt, wird in Kapitel 5.4 diskutiert. Weiters wird der Einfluss von Elektrowärme in [5] nicht berücksichtigt, was durch die klimatischen Randbedingungen des betrachteten Gebietes (Südamerika) zu begründen ist.

#### **Abgeleitete Erkenntnisse für die Wahl des Ansatzes daraus:**

- Bei der Wahl eines FIS können durch ein vorher definiertes Regelwerk Aussagen aufgrund von Eingangsdaten (Ausfallparametern) getroffen werden.
- Die direkte Verarbeitung der Messdaten welche im Rahmen dieser Masterarbeit vorliegen ist nicht möglich. Weiters hängt das Resultat der Abschätzung ausschließlich vom durch den Autor erstellten Initialregelwerk ab.

Die beiden Beispiele stellen in Bezug auf ihre Eigenschaften gegensätzliche „soft computing“ Ansätze hinsichtlich Ausgangsposition und gewünschter Resultate dar.

Zu einer ähnlichen Erkenntnis führt die Betrachtung von aus [21] entnommene Tabelle:

ANN	FIS
<b>Vorteile</b>	
-Kein mathematisches Modell notwendig.	-Kein mathematisches Modell notwendig.
-Kein Regelwissen notwendig.	-„a-priori“ (Regel-) Wissen nutzbar.
-Es stehen unterschiedliche Lernalgorithmen zur Verfügung.	-Einfache Interpretation und Implementierung.
<b>Nachteile</b>	
-Black-Box Verhalten.	-Regelwissen muss verfügbar sein.
-Kein Regelwissen extrahierbar.	-Nicht Lernfähig.
-Anpassung an veränderte Aufgabenstellung ist eventuell schwierig und kann eine Wiederholung des Lernvorgangs erfordern.	-Keine formalen Methoden für das „Tuning“ bekannt.
-Kein „a-priori“ Wissen verwendbar.	-Anpassung an veränderte Parameter eventuell schwierig
-Der Lernvorgang konvergiert nicht garantiert.	-Ein „tuning“-Versuch kann erfolglos bleiben.

**Tabelle 3: Darstellung der Vor- und Nachteile von künstlichen neuronalen Netzen ANN und Expertensystemen FIS. Diese Tabelle ist entnommen aus [21].**

Die in Tabelle 3 dargestellten theoretischen Punkte widerspiegeln zum Teil die gesammelten Erfahrungen bei der Erstellung dieser Masterarbeit.

Bei einem reinen Expertensystem wird das Regelwerk das durch den Autor im Hinblick auf die vorhandenen Messdaten erstellt. Es zeigt sich, dass die vorhandenen Daten dann oft nur ungenau vom System reproduziert werden können.

➤ **Fähigkeit des Systems zur Reproduktion vorhandener Datensätze.**

Umgekehrt zeigt ein durch den Algorithmus mit vorhandenen Messdaten erstelltes Regelwerk ebenso Schwächen. Bei der Abschätzung von Parametersätzen welche von denen zu vorhandenen Messdaten abweichen können in vielen Fällen keine Aussagen getroffen werden.

➤ **Fähigkeit des Systems zur Generalisierung von Aussagen.**

Eine Darstellung dieser Erfahrungen bei der Erstellung der Masterarbeit im Zusammenhang mit diesen widersprüchlichen Forderungen ist in der Diskussion in Kapitel 5.4 angeführt.

**Da diese als Begründung für die Wahl des kombinierten Ansatzes eines adaptiven Expertensystems, „adaptive neuronal fuzzy inference system“ ANFIS anzusehen sind, wird bereits an dieser Stelle darauf verwiesen.**

### 3.1.2 Allgemeines zum Expertensystem, Strukturbeschreibung

Als Vorteilhaft erscheint es ein Expertensystem auf Basis von Vermutungen zu erstellen, welches mit Messdaten adaptiert werden kann. Dabei können heuristische Informationen eingebracht und durch einen Algorithmus Messdaten verarbeitet werden. Das prinzipiell vermutete Verhalten des Zuschaltstromes in Abhängigkeit bestimmter Parameter wird bei der Erstellung des Initialregelwerkes festgelegt. Später wird dieses mittels Messdaten und zugehörigen Parametern durch einen Algorithmus adaptiert. Die Realisierung eines solchen Systems ist in MatLab mit der ANFIS-Toolbox möglich, in Kapitel 3.5 wird diese beschrieben. Im Hinblick auf die in Kapitel 3.5 verwendeten Begriffe wird eine allgemeine Strukturbeschreibung durchgeführt.

Das adaptive Expertensystem besteht aus folgenden Komponenten:

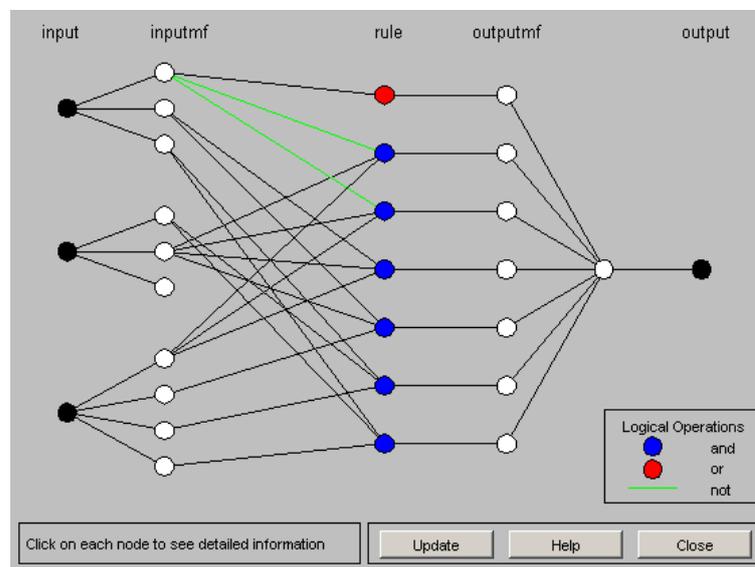


Abbildung 9: Bestandteile und Struktur eines ANFIS, entnommen aus der GUI - Darstellung des erstellten Expertensystems mit der MatLab Toolbox.

Die in Abbildung 9 dargestellten Bestandteile werden im Folgenden beschrieben:

➤ **input: Eingangsgröße**

Dies sind die Eingangsgrößen des Expertensystems. Aus Sicht der informationstechnischen Verarbeitung nehmen diese eine beliebige, reelle Fließkommazahl an. Diese darf sowohl positiv als auch negativ sein. Dieser Eingangswert kann entweder durch AnwenderInnen eingegeben oder aus vorhandenen Datensätzen eingespielt werden. Im Falle des Expertensystems zur Abschätzung des CLPU sind dies ausgesuchte Ausfallparameter, aufgrund derer eine Schätzung der Ausgangsgröße vorgenommen wird.

- **inmf: Eingangszugehörigkeitsfunktion, „input membership function“**

Um von den eingegebenen Zahlenwerten zu einer verschwommen „fuzzy“ definierten Zahlenmenge zu gelangen, muss die Zugehörigkeit zu vordefinierten linguistischen Variablen bestimmt werden. Dies geschieht mit Hilfe von Zugehörigkeitsfunktionen am Eingang des Expertensystems. Im Falle des realisierten Systems ist dies die kategorische Einordnung von Eingangswerten in Zustände wie „kurze“ Ausfalldauer oder „lange“ Ausfalldauer. Die Zugehörigkeit eines Eingangszahlenwertes zu solchen verbal beschriebenen Zuständen sowie deren Abgrenzung zueinander ist mit der Gestalt der Zugehörigkeitsfunktion eindeutig festgelegt. Eine exakte, scharfe Abtrennung zwischen den Zuständen ist oft nicht möglich, daher die Bezeichnung „fuzzy“. Der schematische Ablauf ist in Abbildung 10 dargestellt. Die realisierten Funktionen sind in Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt.
  
- **rule: Regelwerk**

Dieser Teil stellt den Mittelpunkt des Expertensystems dar: das Regelwerk welches die vorhin definierten, linguistischen Variablen logisch miteinander verknüpft. Wichtig ist dabei das einzelne Zugehörigkeitsfunktionen und nicht direkt Zahlenwerte am Eingang miteinander verknüpft sind. Jede Regel besteht aus einer Prämisse welche zu Konsequenzen führt. Diese logischen Aussagen sind eindeutig festgelegt, „fuzzy“ bezieht sich lediglich auf die Zugehörigkeitsfunktionen der Ein- und Ausgangsvariablen. Wie in Abbildung 9 dargestellt, können die Zweige konjunktiv bzw. disjunktiv bezüglich ihrer Logik sowie negiert sein. Es kann sowohl die Verknüpfung eines einzelnen Einganges als auch die Kombination mehrerer als Regel aufgefasst werden. Konkret trägt der Umstand einer „kurzen“ Ausfalldauer zu keiner Wirkleistungsüberhöhung bei der Wiederherstellung am Abgang bei. Das gesamte Initialregelwerk ist in Kapitel 3.4.4 dargestellt.
  
- **outputmf: Ausgangszugehörigkeitsfunktion, „output membership function“**

Um am Ausgang des Systems von der Verknüpfung einzelner Regeln zu einem Ergebnis in Form eines Zahlenwertes zu gelangen, ist es notwendig die am Eingang festgelegte Prozedur in umgekehrter Richtung zu vollführen. Im dargestellten Strukturbild ist ein Ausgang für dieses Expertensystem festgelegt. Dieser soll die Amplitude des Stromes am Abgang zu einem bestimmten Zeitpunkt nach der Zuschaltung relativ zum Bezugswert darstellen. Um festzulegen, wie stark diese am Ausgang ausfällt werden konkret Bezeichnungen wie „unverändert“ bis „stark überhöht“ eingeführt. Der schematische Ablauf ist in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Eine Darstellung der Realisierung erfolgt in Kapitel 3.5.

➤ **output: Ausgangsgröße**

Ausgangsgröße als Zahlenwert, den das System für ein bestimmtes Muster an Eingangsparametern ausgibt. Möglichkeiten der Bildung dieses sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Expertensysteme können mehrere Ausgänge aufweisen. Es ist möglich ein System für die Erstellung des gesamten Verlaufes heranzuziehen. In Kapitel 3.3.9 und Kapitel 3.5.2 wird für die Umsetzung eine Struktur mit nur einer Ausgangsgröße als vorteilhaft erachtet. In einigen Anwendungen, etwa bei künstlichen neuronalen Netzen, wird die fortschreitende Betrachtungszeit als Eingangsgröße aufgefasst, wodurch sich für die eine Ausgangsgröße ebenso ein zeitlicher Verlauf ergibt. Dadurch kann ein zeitlich veränderlicher Verlauf aus nur einem Ausgang erstellt werden.

Der in Abbildung 10 dargestellte Übergang von einem Zahlenwert  $in_1$  zu einer Zugehörigkeit  $inmf_1(in_1)$ ,  $inmf_2(in_1)$  zu vordefinierten linguistischen Variablen  $inmf_1$ ,  $inmf_2$  wird als „fuzzification“ bezeichnet. Umgekehrt wird die Berechnung eines Ausgangszahlenwertes als „defuzzification“ bezeichnet.

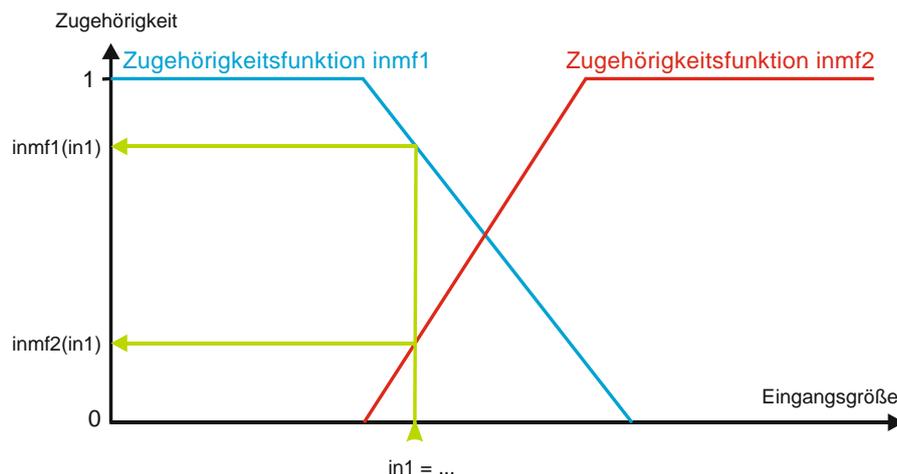


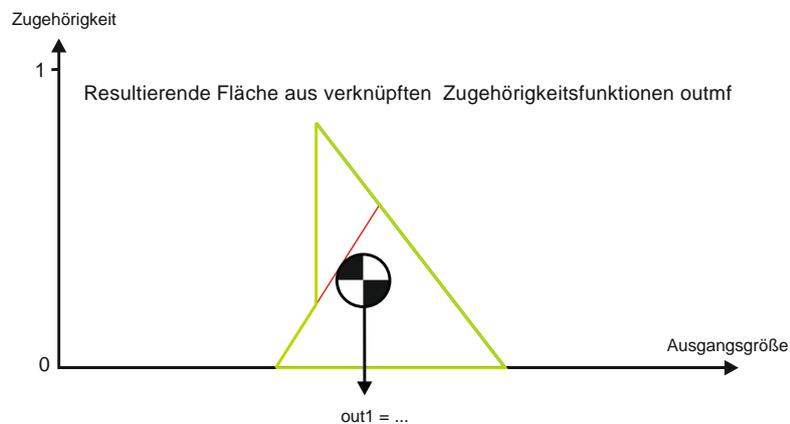
Abbildung 10: Schema zur Ermittlung des Grades der Zugehörigkeit zu linguistisch definierten Variablen  $inmf_1$  und  $inmf_2$ . Dabei wird die „membership“  $inmf_1(in_1)$ ,  $inmf_2(in_1)$  des Eingangswerts  $in_1$  bezüglich der Zugehörigkeitsfunktionen  $inmf_1$  und  $inmf_2$  ermittelt.

Oft verwendete Funktionen sind:

- Dreiecksfunktion
- Sigmoidfunktion
- Gauß'sche Glockenkurve

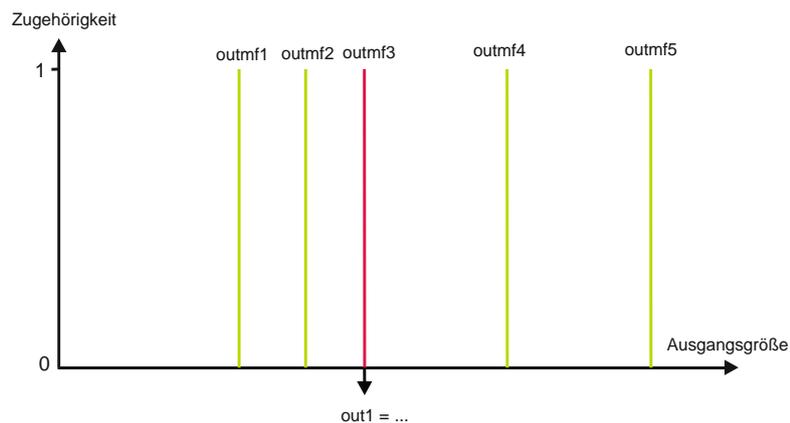
Die vorhergehende Aufbereitung der Eingangsgröße  $in_1$  vor der „fuzzification“ wird als „fuzzy preprocessing“ bezeichnet. Die dazu getroffenen Annahmen zur Aufbereitung der Messdaten sind in Kapitel 3.3 dargestellt.

Am Ausgang des Systems kann die Berechnung des Ausgangswertes nach dem in Abbildung 11 oder Abbildung 12 dargestellten Schema erfolgen.



**Abbildung 11:** Bei der „centroid defuzzification“ wird durch Integration die Fläche unter den beteiligten Zugehörigkeitsfunktionen des Ausgangs berechnet. Danach wird der in der Abbildung symbolisch angedeutete Schwerpunkt der resultierenden Fläche berechnet. Dadurch ergibt sich ein eindeutiger Zahlenwert out1 als Ausgangsgröße.

Als Alternative dazu kann die Gestalt der Ausgangszugehörigkeitsfunktionen in Form einer Impulsförmigen Funktion, dem Singlet-Impuls definiert sein. In diesem Fall werden vordefinierte Zahlenwerte für den Wert des Ausgangs bei der Erstellung festgelegt. Ergibt sich aufgrund des Regelwerks die Auswahl einer Zugehörigkeitsfunktion, so ist das Ergebnis dessen konstanter Zahlenwert. Durch die Verknüpfungen mit dem Regelwerk können auch mehrere Ausgangsimpulse ausgewählt werden. Der „Schwerpunkt“ dieser stellt dann die Ausgangsgröße dar. Dies stellt eine Reduktion des Berechnungsaufwandes dar, da keine Integration durchgeführt werden muss. Diese Methode wird im erstellten Expertensystem CLPU verwendet.

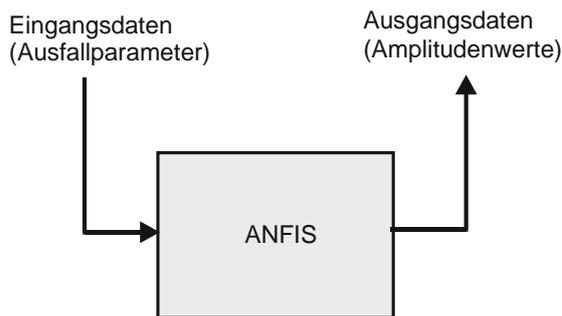


**Abbildung 12:** Bei der „singleton defuzzification“ erfolgt die Ermittlung des Ausgangswertes out1 mit der Auswahl eines Einzelimpulses outmf3 durch das Regelwerk.

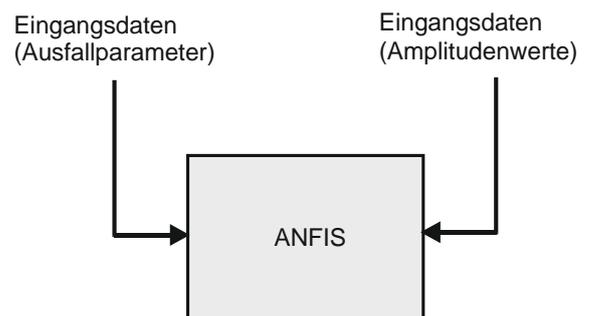
Je nach Wahl der Ausgangsfunktion werden diese auch als „Mamdani“ Typ gemäß Abbildung 11 bzw. „Sugeno“ Typ gemäß Abbildung 12 nach ihren Entwicklern benannt. In beiden Fällen wird die nachfolgende Aufbereitung der Ausgangsdaten nach der Ausgabe als „fuzzy postprocessing“ bezeichnet. Nähere Ausführungen sind in [20] und [21] zu finden.

Diese Schritte skizzieren die Bildung eines Zahlenwertes aus den Eingangsparametern. Umgekehrt kann das System auch mit Eingangsdaten und dazugehörigen, bekannten Ausgangsdaten trainiert werden. Dabei dreht sich der Signalpfad am Ausgang des Systems um und die Ausgangsdaten können als Teil der Eingangsdaten aufgefasst werden. Dadurch kommt es zu einem Training des Systems durch den hinterlegten Algorithmus.

### Vorwärtspropagation



### Rückwärtspropagation



**Abbildung 13:** Im Falle der Vorwärtspropagation wird das Expertensystem mit Ausfallparametern beaufschlagt und liefert daraus eine Schätzung. Bei der Rückwärtspropagation werden historische Datensätze welche die Ausfallparameter und gemessene Werte beinhalten an das System angelegt.

Die Beschreibung des Ablaufes eines mit Rückwärtspropagation arbeitenden Algorithmus wird im Folgenden erläutert. Der maschinelle Lernvorgang in einem Expertensystem mit Messdaten funktioniert im Prinzip nach diesen Schritten. Unter der Voraussetzung dass bereits ein durch den Autor erstelltes Initialregelwerk vorliegt, erfolgt der Trainingsvorgang in folgenden Prinzipschritten<sup>4</sup>:

1. Ein Eingabemuster wird angelegt und vorwärts durch das Netz propagiert.
2. Die Ausgabe des Netzes wird mit der gewünschten Ausgabe verglichen. Die Differenz der beiden Werte wird als Fehler des Netzes erachtet.
3. Der Fehler wird nun wieder über die Ausgabe- zur Eingabeschicht zurück propagiert. Dabei werden die Gewichtungen der Neuronenverbindungen abhängig von ihrem Einfluss auf den Fehler geändert. Dies garantiert bei einem erneuten Anlegen der Eingabe eine Annäherung an die gewünschte Ausgabe.

Der Name des Algorithmus ergibt sich aus dem Zurückpropagieren des Fehlers. Ausgehend von dieser grundlegenden Strukturbeschreibung erfolgt im Folgenden Kapitel eine Charakterisierung des Datenmaterials. Die tatsächliche Umsetzung ist in Kapitel 3.5 angeführt.

zu 4: Das Schema für den Ablauf des Algorithmus soll nur beispielhaft den Trainingsvorgang erläutern. Bei der Realisierung des Expertensystems „CLPU“ wird allerdings bereits eine weiterentwickelte Hybridvariante verschiedener Algorithmen angewandt. Diese ist in der MatLab Umgebung verfügbar. Aus Anwendersicht wird dies nicht detaillierter betrachtet. Die Ablaufschritte sind entnommen aus: <http://de.wikipedia.org/wiki/Backpropagation>

## 3.2 Beschreibung des Datenmaterials

### 3.2.1 Allgemeines zur Erhebung

Zur Sammlung von Messdaten und zugehörigen Parametern wurde eine Excel-Datei gemäß Tabelle 4 an österreichische Netzbetreiber übermittelt. Sämtliche im Zeitraum der Durchführung der Masterarbeit verfügbaren historischen Datensätze werden als Grundlage für die Erstellung herangezogen. Ein Datensatz besteht immer aus ausgesuchten Ausfallparametern und zugehörigen Messdaten. Eine möglichst weite Streuung einzelner Parameter sowie eine hohe Anzahl voneinander unabhängiger Datensätze sind wünschenswert. Da überwiegend Langzeitmessungen nach der Zuschaltung mit geringerer Abtastfrequenz (meist Sekundenmittelwerte) vorliegen, liegt der Schwerpunkt der Auswertung bei der Betrachtung von Wirkleistungsverläufen im Minutenbereich. Damit wird die Untersuchung des Verlustes der statischen Lastdiversität durchgeführt.

**Spezifizierte Parameter für einen Abzweig sind:**

- **Spannungsebene**
  - Niederspannungsebene
  - Verteilnetzebene
- **Prozentualer Anteil von:**
  - Haushalten
  - Industrie
  - Gewerbe
  - Landwirtschaftlichen Betrieben
- **Wirkleistung vor Ausfall:**
  - Gesamtleistung
  - Paralleleinspeisung DEA
- **Zeitpunkt des Ausfalls:**
  - Datum
  - Uhrzeit
  - Unterbrechungsdauer
- **Klimatische Bedingungen:**
  - Witterung
  - Außentemperatur

Eine nähere Beschreibung aller getroffenen Annahmen zu diesen Punkten ab Seite 39 ist in Kapitel 3.3, Getroffene Annahmen, Randbedingungen zu finden.

Dateiname des Störschriebes	Grobe Anonymisierte Charakterisierung des Abzweiges bzw. der Station:			Wirkleistung vor Ausfall (zb. aus Netzleitsystem, sofern nicht in der Aufzeichnung enthalten)		Zeitpunkt des Ausfalls/ der Abschaltung			Klimatische Bedingungen:		Aufzeichnung	
	Spannungsebene	Anteil von Industrie, Haushalt und Gewerbe	Anteil von E-Heizung an Haushaltslast	Gesamtleistung	dezentrale Einspeiser (aktuelle Einspeiseleistung)	Datum	Uhrzeit hh:mm	Dauer der Unterbrechung hh:mm	während des Ausfalles	ungefähre Außentemperatur	schnelle Aufzeichnung/ Störschrieb vorhanden	langsame Aufzeichnung (Leitsystem) vorhanden
XXX-Netz Gmbh_1	20kV	90%HH; 10% Gewerbe	35%	800kW	0 kW	31.01.2012	14:02	03:20	Regen	-3°C	nein	ja
XXX-Netz Gmbh_2	20kV	15%HH; 15% Gewerbe; 70% Ind.	0%	12,3MW	0,6 MW	15.06.2012	01:25	00:35	bewölkt	25°C	ja	ja

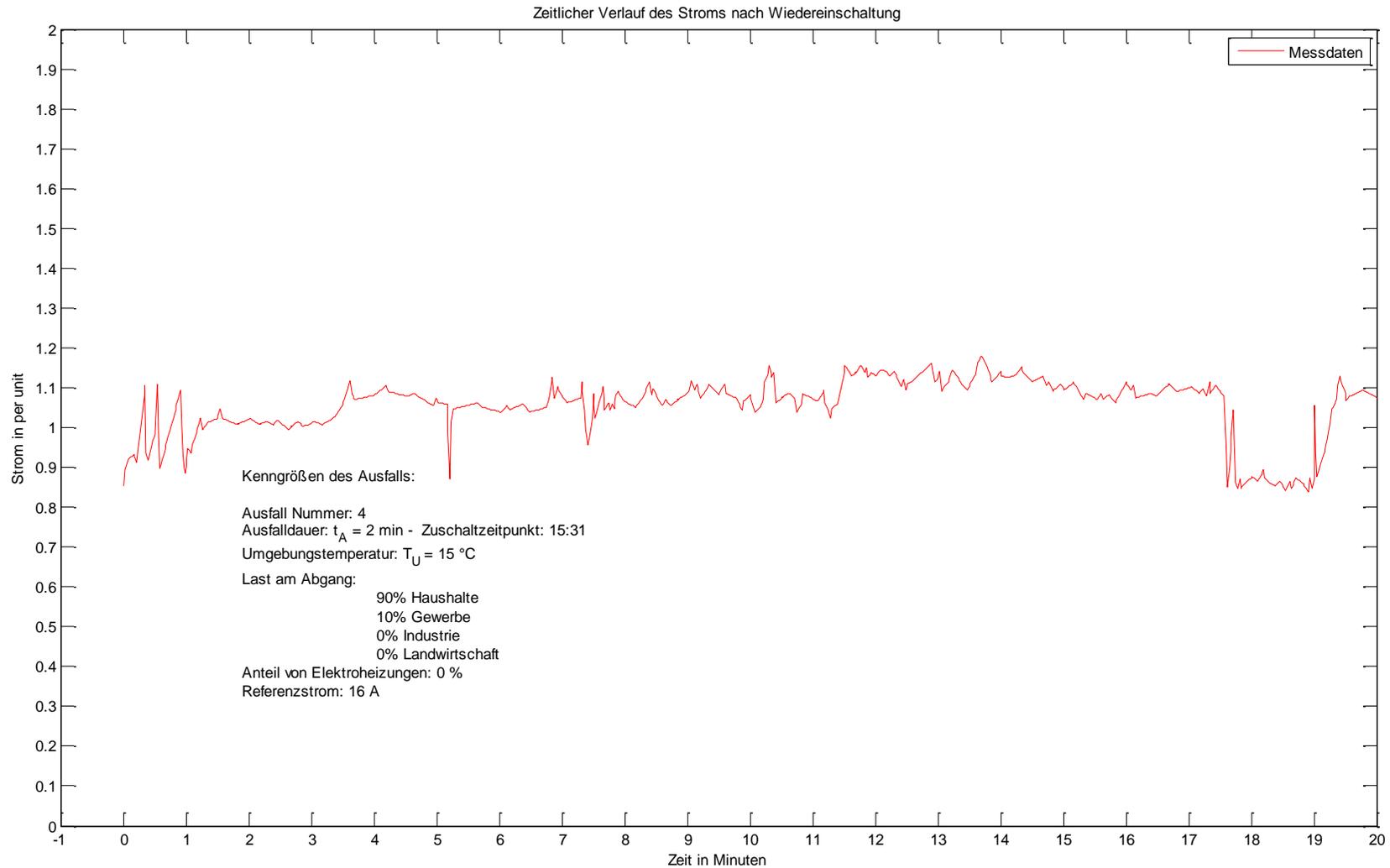
**Tabelle 4: Beispielhaft dargestellte Parameter für mögliche Ausfallszenarien. Alle im Rahmen der Masterarbeit gesammelten Datensätze werden in einer Auswertetabelle zusammengefügt welche vom erstellten MatLab Skript eingelesen wird.**

Bezüglich der Aufzeichnung des Zuschaltstromes sind folgende Unterscheidungen zu treffen:

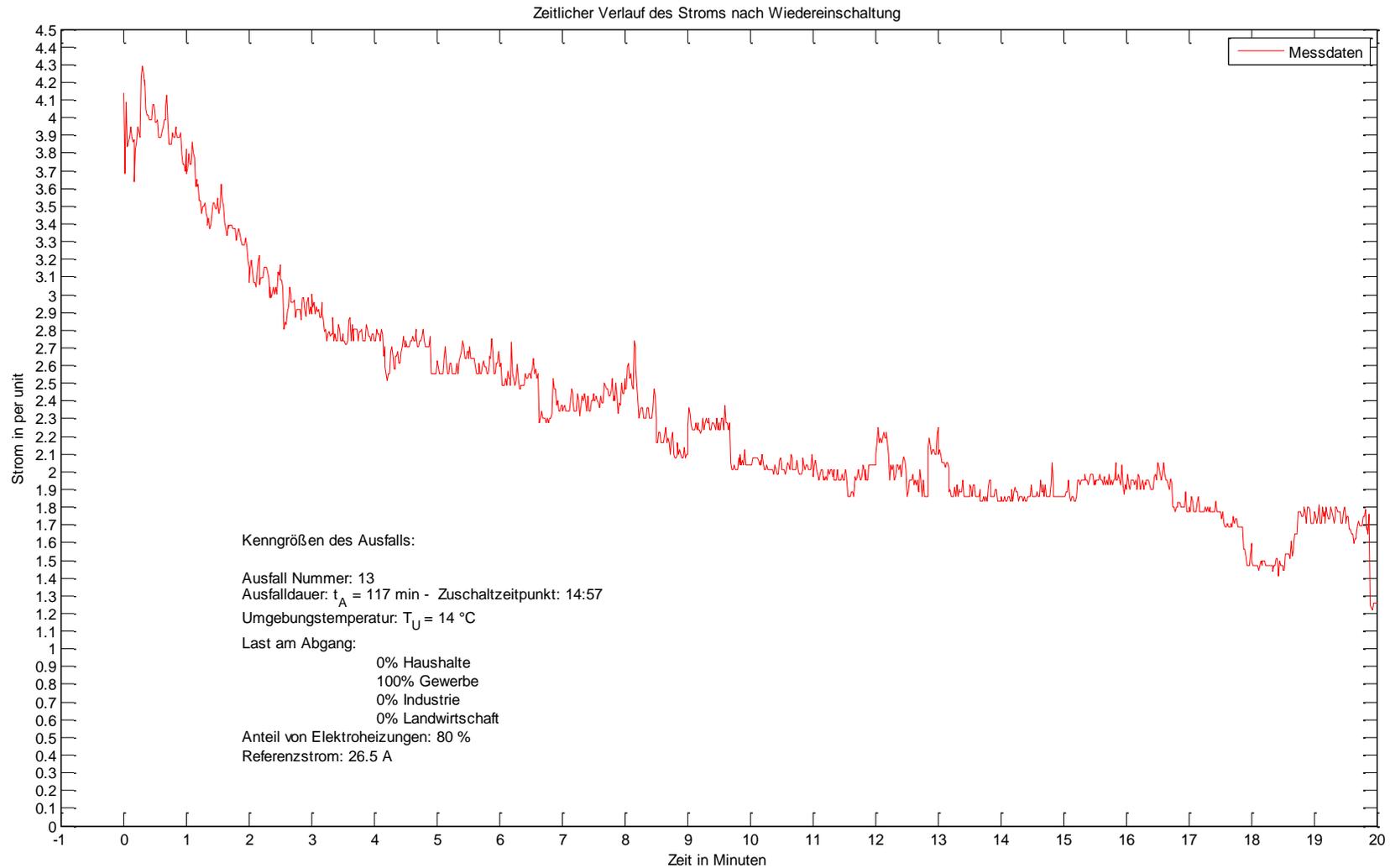
- Schnelle Aufzeichnung mit hoher Abtastfrequenz  $f_s$  (einige kHz) zur Darstellung transienter Vorgänge. Diese Messungen müssen mit einem hochabtastenden Messsystem gesondert durchgeführt werden.
- Langsame Aufzeichnung mit geringer Abtastfrequenz  $f_s$  (einige Hz) zur Darstellung der statischen Lastdiversität. Diese Messungen werden direkt aus dem Leitsystem des Betreibers entnommen.

Im Hinblick auf Kapitel 2.1 sind so alle für die Beschreibung der in Tabelle 1 angeführten Merkmale notwendigen Bereiche abgedeckt.

Eine vollständige Version von Tabelle 4 ist in anonymisierter Form in Kapitel 7, Anhang angeführt. Alle zugehörigen Messdaten liegen in elektronischer Form vor. Zur exemplarischen Darstellung sind auf den folgenden Seiten zwei ausgesuchte Verläufe des Zuschaltstromes mit zugehörigen Ausfallsparametern angeführt.



**Abbildung 14: Gemessener Zuschaltstrom bei Versorgungswiederherstellung mit zugehörigen Ausfallsparametern. Die Skalierung der Ordinate ist bezogen auf den Referenzstrom von 16 A. In Tabelle 13 im Anhang ist das der Ausfall Nr. 4.**



**Abbildung 15: Gemessener Zuschaltstrom bei Versorgungswiederherstellung mit zugehörigen Ausfallsparametern. Die Skalierung der Ordinate ist bezogen auf den Referenzstrom von 26.5 A. In Tabelle 13 im Anhang ist das der Ausfall Nr. 13.**

### 3.2.2 Vorselektion des Datenmaterials

Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen ist eine möglichst hohe Anzahl von wie in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellten Kombinationen aus Messdaten und Ausfallparametern notwendig. Von diesen eingelangten Daten soll wiederum ein möglichst hoher Anteil in das Expertensystem eingehen.

Einige Rücksendungen der Auswertetabelle enthalten zusätzliche Kommentare der Netzbetreiber. Aufgrund dieser müssen diese bei der Auswertung gesondert betrachtet werden bzw. scheiden diese bereits im Vorfeld für das Training des Expertensystems aus.

Dies sind Messdaten von Abgängen bei denen zusätzliche Schalthandlungen durchgeführt werden:

- Umschaltung, Ringschließung
- Unterbrechbare Lasten:
  - Rundsteueranlagen
  - Demand Side Management, DSM

Diese Datensätze werden daher zwar in die Auswertetabelle aufgenommen und mit MatLab erfasst, für eine weitere Verarbeitung im Expertensystem aber vorerst nicht herangezogen. In Tabelle 14 im Anhang sind diese Ausfälle gesondert mit jeweiliger Begründung angeführt.

Es müssen alle eingehenden Datensätze betrachtet werden um zu einer realitätsnahen Darstellung des Sachverhaltes zu gelangen. Das unbegründete Nichtbeachten von einzelnen Datensätzen würde zu falschen Schlussfolgerungen führen und ist daher unzulässig. Es soll aber andererseits durch die Vorselektion vermieden werden, dass durch Training mit den nicht vergleichbaren Daten eine Verfälschung des Regelwerkes bewirkt wird.

Die genauere Definition aller getroffenen Annahmen und Randbedingungen die sich aus dem Datenmaterial ergeben ist im Folgenden Kapitel 3.3 dargestellt. Eine Untersuchung hinsichtlich möglicher Korrelation einzelner Parameter wird in Kapitel 3.4.1 durchgeführt.

In Abbildung 17 folgt nun ein Beispiel anhand eines Datensatzes, welcher durch Vorliegen einer zusätzlichen Begründung aus Abbildung 16 nicht für die Auswertung herangezogen wird.

Dieser Ausfall soll exemplarisch darstellen, warum bestimmte Messdaten nicht in das Training des Expertensystems eingehen sollen.

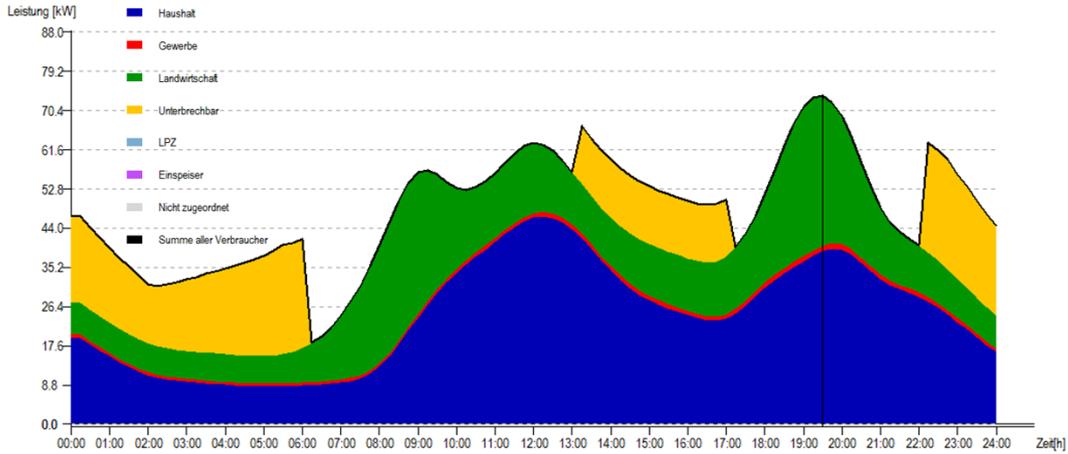


Abbildung 16: Diese Darstellung ist eine Zusatzinformation zur Auswertetabelle und stammt direkt von einem Netzbetreiber. Der Wiedereinschaltzeitpunkt für diesen Abzweig ist 13:18 Uhr. Es kann davon ausgegangen werden das die unterbrechbare Last, in der Darstellung gelb dargestellt, die Gestalt des Einschaltstromes zusätzlich beeinflusst.

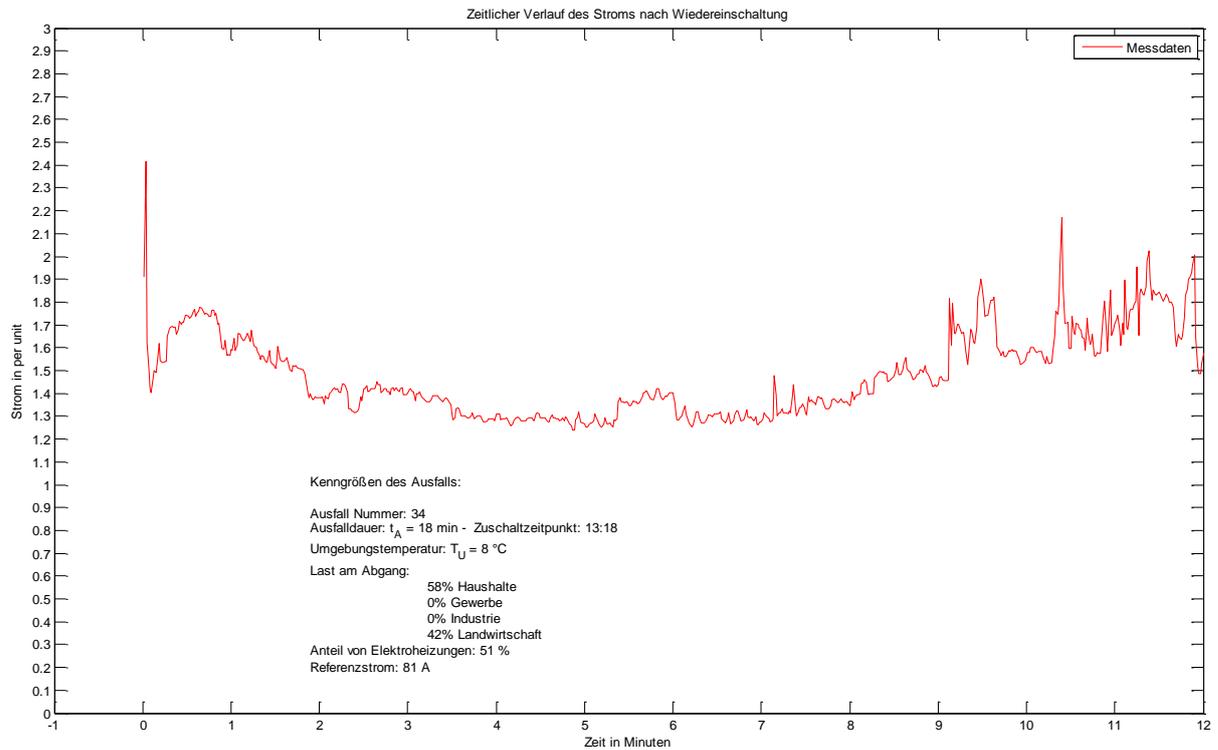


Abbildung 17: Gemessener Verlauf des Zuschaltstromes zum Abzweig für welchen der zugehörige Tageslastgang in Abbildung 16 dargestellt ist. Die unterbrechbare Last wird als Ursache für den Anstieg ca. 7 bis 10 Minuten nach erfolgter Zuschaltung vermutet. Mit dieser Begründung wird dieser Datensatz nicht für das Training des Expertensystems herangezogen. Es kommt zu keinem Rückgang zum Referenzwert vor dem Ausfall von 81 A.

### 3.3 Getroffene Annahmen, Randbedingungen

Die für diese Masterarbeit zur Verfügung stehenden digitalen Messdaten stammen von verschiedenen Verteilnetzbetreibern aus Österreich. Daher werden unterschiedliche Messsysteme und Leitsystemtechnik verwendet. Die Daten liegen dadurch in unterschiedlicher Form vor. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Messungen zu erreichen müssen diverse Annahmen getroffen werden. Diese sind im Folgenden angeführt, um darzustellen weshalb bestimmte Programmteile in ihrer Realisierung zumindest aus theoretischer Sicht Kompromisse bedeuten. Dieses Kapitel soll die Aufbereitung der Messdaten für das Expertensystem verdeutlichen. Das „fuzzy pre-/ postprocessing“ stellt wie in [19], [20] und [21] beschrieben einen wesentlichen Beitrag für die zu erwartende Qualität der Abschätzung dar.

**Alle Annahmen die bei der Erstellung des Auswerteskripts der Messdaten und der Erstellung des Expertensystems getroffen werden sind in diesem Kapitel angeführt, um die Nachvollziehbarkeit der Resultate zu gewährleisten.**

#### 3.3.1 Betrachtung von Strömen

Aus Sicht des Versorgungsunternehmens wird die Wirkleistungsüberhöhung bei Netz wiederaufbau im Inselnetzbetrieb für die Bemessung der Engpassleistung relevant sein. Für alle weiteren Betrachtungen ist daher die Analyse von Wirkleistungen an den Abzweigen wünschenswert. Da aber nicht in allen Messungen Wirk- bzw. Scheinleistungen oder Angaben des  $\cos(\varphi)$  sowie zugehörigen Spannungsmessungen zur Verfügung stehen wird die Betrachtung auf Ströme reduziert. Eine Betrachtung des Phasenwinkels wird durch die Auswertung daher nicht durchgeführt.

Weiters bleiben Effekte durch die unter Umständen nicht vollständig erreichte Betriebsspannung zum Zeitpunkt der Versorgungswiederherstellung unberücksichtigt. Das Niederspannungsnetz ist als überwiegend resistiv anzusehen, wie in [22] näher beschrieben. Daher ist es möglich, dass der Einfluss der Amplituden von Knotenspannungen an den Messpunkten die Abschätzung der Wirkleistung im Niederspannungsnetz beeinflusst.

Eine Beeinflussung durch die Knotenspannungen könnte ebenso bei den Messungen in den Mittelspannungsabzweigen auftreten. Stufenschalter von Mittelspannungstransformatoren können nach großflächigen, ausreichend langen Ausfällen erst im Sekunden- bis Minutenbereich auf die neue Lastflusssituation reagieren. Dadurch kann es sein, dass die Amplituden der Spannungen an den Abzweigen in den ersten Minuten der Wiederherstellung nicht denen vor dem Ausfall entsprechen. Es wird von der Einhaltung der definierten Grenzwerte für die Amplituden der Spannungen ausgegangen. Dadurch wird der relative Fehler im Vergleich zur den Erwartungen an die Abschätzung als gering eingeschätzt. Um eine möglichst hohe Anzahl an vorhandenen Messdaten für den gewählten Ansatz verwenden zu können, werden daher stets die zur Verfügung stehenden Stromwerte verwendet. Dieser Kompromiss lässt im Gegenzug dafür eine größere Anzahl von Datensätzen in die Auswertung eingehen.

### 3.3.2 Betrachtung von Phasengrößen

Die gesammelten Messdaten liegen in folgendem Format vor:

- Einphasige Strommessung
- Dreiphasige Strommessung mit unbelastetem Neutralleiter
- Dreiphasige Strommessung mit belastetem Neutralleiter

Um Vergleichbarkeit zwischen den Messungen zu erzielen werden Mittelwerte aus den beteiligten Phasen gebildet. Es wird davon ausgegangen, dass die einphasigen Messungen bereits eine Mittelung aller Phasengrößen bedeuten und nicht einphasig gemessen wurden. Als Resultat ergibt sich ein gemittelter Stromverlauf über der Zeit.

Im Falle eines unbelasteten Neutralleiters wird dieser weggelassen. Als unbelasteter Neutralleiter werden jene Messungen mit Werten die im einstelligen Prozentbereich der aktiven Phasenströme liegen angesehen.

Dadurch soll verhindert werden, dass bei einem fest vorgegebenen Referenzwert aus der Auswertetabelle die Amplitude bei der Zuschaltung im Verhältnis geringer wird.

### 3.3.3 Betrachtung von Sekundenmittelwerten

Aus den Langzeitmessungen nach der Zuschaltung werden in fast allen Fällen Sekundenmittelwerte der Ströme aufgezeichnet. Bei einigen Messdaten wurde das Intervall auch mit 2 bzw. 10 Sekunden bis hin zu einer Minute gewählt.

In anderen Messungen ist das Intervall zwischen den Messpunkten variabel. Für diese Fälle werden die Daten mittels einer linearen Interpolation in Excel für die Verwendung im MatLab-Skript in ein Format mit Intervall von einer Sekunde umgewandelt.

Für die Betrachtung der Wirkleistungsüberhöhung im Minutenbereich erscheinen diese Intervallauern ausreichend kurz.

Date	Time	IL1	IL2	IL3
dd:mm:yyyy	hh:mm:ss	A	A	A
14.11.2012	11:55:03	390.95	411.00	404.00
14.11.2012	11:55:04	234.95	227.00	188.00
14.11.2012	11:55:05	142.95	120.00	152.00
14.11.2012	11:55:06	147.95	108.00	145.00
14.11.2012	11:55:07	142.95	104.00	140.00
14.11.2012	11:55:08	142.95	99.00	140.00
14.11.2012	11:55:09	142.95	108.00	137.00
14.11.2012	11:55:10	149.95	108.00	140.00
14.11.2012	11:55:11	147.95	105.00	140.00
14.11.2012	11:55:12	154.95	105.00	140.00

**Tabelle 5: Gemessene Zuschaltströme an einem Abzweig, Messdaten aus dem Leitsystem. Bei den Einschaltamplituden für den Zeitpunkt 11:55:03 zeigen sich hohe Werte im Bereich von 400 A für die Ströme. Der Referenzwert im Abzweig beträgt 4 Stunden vor dem Ausfall ca. 51 A. Ursache für diese Werte können transiente Vorgänge sein, die bereits nach wenigen Periodendauern abgeklungen sind. Nach 10 Sekunden zeigt sich eine Reduktion um den Faktor 3-4. Diese hohen Einschaltwerte gehen nicht unmittelbar in die Auswertung ein. Die Messdaten werden mit der in Kapitel 3.3.7 beschriebenen Ausgleichsfunktion weiterverarbeitet. Diese Daten stellen Ausfall Nr. 10 aus Tabelle 14 dar. Zusätzlich wird für diesen Ausfall eine Beeinflussung durch KundInnenverhalten (Mittagsspitze) erwartet. Daher kommt es zu keinem Training des Expertensystems mit diesen Messdaten.**

Bei einzelnen Aufzeichnungen aus den Leitsystemen sind wie in Tabelle 5 unmittelbar nach der Zuschaltung hohe Einschaltstromwerte für die ersten Sekundenwerte enthalten. Diesen wird physikalisch aber keine Bedeutung zugesprochen. Die folgenden Gründe sprechen gegen die Verwendung der Messdaten aus den Leitsystemen zur Betrachtung dieser transienten Einschaltstromspitzen:

- Die Abtastfrequenz ist zu gering da einzelne Vorgänge bereits im Bereich unter eine Sekunde abgeklungen sind. Die Mittelung dieser Werte zwischen den Sekundenintervallen ist zudem für einzelne Messsysteme vermutlich verschiedenartig realisiert. Daher sind diese nicht vergleichbar.
- Nichtlineares Verhalten von Stromwandlern durch Sättigungseffekte in den magnetischen Kreisen bei den hohen Einschaltamplituden.
- Unterschiedliche Zeitpunkte (Triggerung) bezüglich Zuschaltung und Start der Aufzeichnung werden in Einzelfällen vermutet. Dadurch sind diese Spitzen in den ersten Sekunden nicht in allen Datensätzen enthalten.

Für die Betrachtung der transienten Vorgänge werden daher ausschließlich die Messdaten der hochabtastenden Messsysteme in Kapitel 4.2 herangezogen.

### 3.3.4 Referenzwertbildung

Um die Leistungsüberhöhung einzelner Ausfälle zueinander in Beziehung setzen zu können müssen diese in einer vergleichbaren Form dargestellt werden. Dazu erfolgt der Übergang von Effektivwerten des Stromes zu Amplitudenwerten bezogen in per unit p.u. auf einem dem Ausfall vorangegangenen Betriebspunkt. So kann die Leistungsüberhöhung am Abgang als Multiplikator unabhängig vom Effektivwert des Stroms angegeben werden.

Dazu werden alle gemessenen Werte des Stroms nach dem Zuschaltzeitpunkt durch einen Referenzwert des Stroms vor dem Ausfall dividiert.

Abhängig von den Messdaten wird dieser Referenzwert auf unterschiedliche Weise gebildet, wodurch es zu Abweichungen kommen kann.

Es ergeben sich für die vorliegenden Daten folgende Möglichkeiten der Referenzwertbildung.

- Mittelung von Strömen einige Minuten vor dem Ausfall bis zum Ausfall am betrachteten Abgang. Eventuell auftretende Fehlerströme vor dem Ausfall müssen dabei aus der Mittelung entfernt werden. Daher werden alle Messdaten für diese Masterarbeit auf solche überprüft bevor diese eingelesen werden.
- Mittelung von Strömen aus einer Referenzmessung zum Ausfallszeitpunkt. Diese erfolgt entweder am Tag davor oder am Tag danach.
- In manchen Fällen erfolgt diese an einem Vergleichstag eine Woche vor oder nach dem Ausfall am betrachteten Abgang.
- Angabe des Referenzwertes durch einen Zahlenwert in der Auswertetabelle.

Bei der Bildung dieses Referenzwertes müssen aufgrund der Verschiedenartigkeit der vorhandenen Messdaten Kompromisse eingegangen werden. Liegt der Bezugswert in Form eines einzelnen durch den Netzbetreiber angegebenen Wertes vor, ergibt sich ein weiterer Unsicherheitsfaktor da nicht definiert ist wie dieser ermittelt wurde. Die in der Auswertetabelle aus Tabelle 13 im Anhang spezifizierte Wirkleistung am Abgang wird nicht zur Bildung des Referenzwertes herangezogen.

In manchen Messungen lassen einzelne Messpunkte auf das Vorliegen eines vom Normalbetriebszustand abweichenden Zustandes schließen. Ein Beispiel dafür sind hohe Amplituden des Abgangsstromes, welche unmittelbar vor Abschaltung auftreten und auf einen Fehlerstrom schließen lassen. Diese Messpunkte werden bei der Referenzwertbildung nicht berücksichtigt. Die Mittelung dieser Referenzstromwerte erfolgt in Excel. Zur Veranschaulichung wird in Tabelle 6 die Bildung dieses Referenzwertes dargestellt.

Date	Time	IL1	IL2	IL3	I N
dd:mm:yyyy	hh:mm:ss	A	A	A	A
17.10.2012	08:40:30	43.17	34.10	54.04	19.22
17.10.2012	08:40:31	43.22	37.75	53.98	18.45
17.10.2012	08:40:32	43.33	37.43	56.48	19.90
17.10.2012	08:40:33	43.65	34.19	61.33	25.20
17.10.2012	08:40:34	43.68	34.47	61.29	24.97
17.10.2012	08:40:35	43.67	34.39	61.24	25.04
17.10.2012	08:40:36	43.67	34.21	61.24	25.14
17.10.2012	08:40:37	43.64	34.57	61.22	24.87
17.10.2012	08:40:38	43.45	34.23	61.19	25.18
17.10.2012	08:40:39	43.29	34.25	57.31	22.03
17.10.2012	08:40:40	43.26	39.94	53.98	17.26
17.10.2012	08:40:41	43.18	34.71	53.96	18.97
17.10.2012	08:40:42	43.20	34.29	53.95	19.06
17.10.2012	08:40:43	43.22	34.18	53.95	19.21
17.10.2012	08:40:44	43.20	34.04	53.94	19.28
17.10.2012	08:50:27	0.48	0.57	0.64	0.60
17.10.2012	08:50:28	0.65	0.83	0.84	0.70
17.10.2012	08:50:29	0.59	0.63	0.70	0.66
17.10.2012	08:50:30	0.64	0.67	0.78	0.79
17.10.2012	08:50:31	0.49	0.76	0.86	0.69
17.10.2012	08:50:32	0.64	0.83	0.84	0.77

**Tabelle 6: Referenzwertbildung aus Messdaten vor dem Ausfall, welcher zum Zeitpunkt 08:40:44 angegeben ist. Alle rot markierten Werte tragen zur Bildung des Bezugswertes bei.**

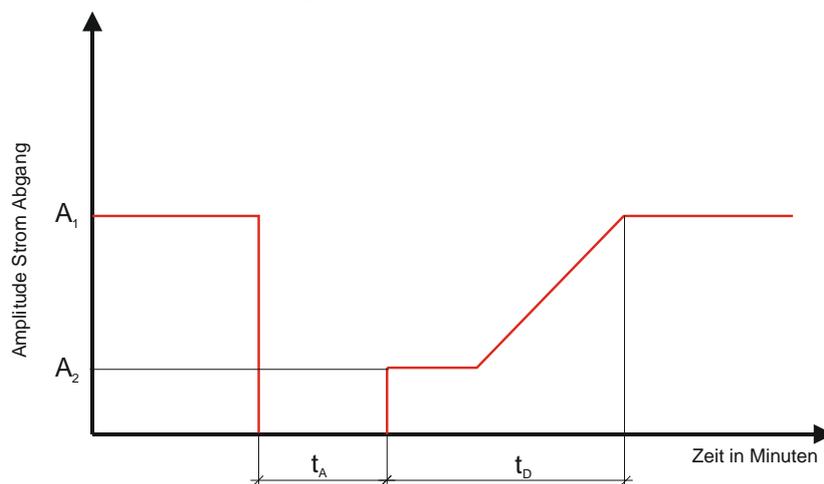
IL1	IL2	IL3	I N	Referenzwert
A	A	A	A	A
43.39	35.12	57.27	21.58	39.34

**Tabelle 7: Referenzwertbildung aus den Messdaten in Tabelle 6. Alle gemessenen Phasengrößen des Zuschaltstromes werden gemittelt um einen Verlauf zu erhalten. Dieser wird auf den Referenzwert von 39.34 A bezogen.**

Da für Messung Nr. 10 in Tabelle 14 im Anhang kein plausibler Messwert ermittelt werden kann, wird dieser nicht für das Training des Expertensystems verwendet.

### 3.3.5 Leistungsüberhöhung als Ausgangspunkt

Aus Sicht des Zuschaltstromes wird für die Erstellung des Expertensystems stets von einer Leistungs- bzw. Stromüberhöhung ausgegangen. Diese Erwartung aus der Literaturrecherche setzt einen Abzweig mit Haushaltskunden voraus. In den vorhandenen Datensätzen ist ein nur geringer Anteil an Industriekunden enthalten. Der Definitionsbereich des Schätzwertes beginnt daher bei einem Wert welcher größer als mindestens 1 p.u. ist. Dies ist physikalisch gleichbedeutend mit dem Referenzwert des Stroms am Abgang. Bei der Betrachtung von Messdaten in Kapitel 3.4.1, Tabelle 8 ist dies jedoch nicht immer der Fall. Als Amplituden  $A_{1\text{sek}}$  gemäß treten dort Werte ab z.B. 0.89 p.u. auf. Die Begründung dafür kann in Unsicherheiten bei der Referenzwertbildung oder in manuell durch KundInnen zuschaltbare Lasten liegen. Ziel sollte eine Abschätzung der Größenordnung dieses Multiplikators sein. Daher wird diese relative Abweichung von beispielsweise 11 % der Amplitude gegenüber dem theoretischen Wert als nicht signifikant erachtet. Als Vorteil reduziert diese Annahme die Anzahl der Zugehörigkeitsfunktionen am Ausgang und somit die Anzahl der zu erstellenden Regeln.



**Abbildung 18: Schema eines Zuschaltstromes für einen Abgang wobei die Amplitude nach Zuschaltung  $A_2$  unter der des vorangegangenen Betriebszustandes  $A_1$  liegt. Die Verzögerungszeit bis wieder ein Strom mit Amplitude  $A_1$  am Abgang fließt wird hier mit  $t_D$  bezeichnet.**

Abbildung 18 ist die Darstellung des möglichen Wiederherstellungsstromes eines Industriebetriebes. Von diesem Verhalten für Industrieanlagen wird unter anderem in Agneholm E. and Daalder J., "Load recovery in different industries following an outage" [4] ausgegangen. Durch den Wegfall von leistungsintensiven Produktionsprozessen, welche nicht selbständig wiederanlaufen, liegt die Amplitude  $A_2$  unter  $A_1$ . Bis zum Anlauf der Produktion ergibt sich eine prozessbedingte Verzögerung  $t_D$ . Diese kann eine technisch bedingte Verzögerungen sein oder das Verhalten von MitarbeiterInnen nach Ausfällen beinhalten. Beispielsweise ist in einem Produktionsbetrieb aus wirtschaftlichen Gründen die Einstellung sämtlicher Tätigkeiten für einen solchen Tag bei einer sehr langen Versorgungsunterbrechung (Stunden) denkbar. Damit reduziert sich die Leistungsaufnahme gegenüber vor dem Ausfall. Nähere Ausführungen zur Zusammensetzung der Last im Abgang sind im Folgenden Kapitel 3.3.6 angegeben.

### 3.3.6 Komposition der Last am Abgang

Aus der Literaturrecherche sind gemäß [4] und [10] deutliche Unterschiede für das Verhalten zwischen den Kundengruppen Haushalt und Industrie zu erwarten.

Daher wird eine Unterscheidung in folgende Untergruppen vorgenommen:

- Haushalte
- Industriebetriebe
- Gewerbebetriebe
- Landwirtschaftliche Betriebe

Um diese Unterscheidung vornehmen zu können muss der jeweilige Anteil dieser Kundengruppen im Abzweig als Eingangsgröße für das Expertensystem aufgefasst werden. In [5] geht die Komposition der Last direkt in das Expertensystem ein und es wird zwischen Haushalt, Industrie und Gewerbe unterschieden. Bei der Erstellung des Expertensystems konnte aber für den vorhandenen Datensatz keine Korrelation zwischen dem prozentualen Anteil von Kunden und den Amplituden abgeleitet werden. Der überwiegende Anteil der Messungen stammt aus Abgängen welche fast ausschließlich aus Haushaltskunden bestehen. Dadurch ist es nicht möglich ein Regelwerk bezüglich des Anteils an Haushalten, Industrie, Gewerben und Landwirtschaft abzuleiten. Weiters ist eine größere Anzahl von Eingangsvariablen für das Expertensystem aus verschiedenen Gründen nicht wünschenswert.

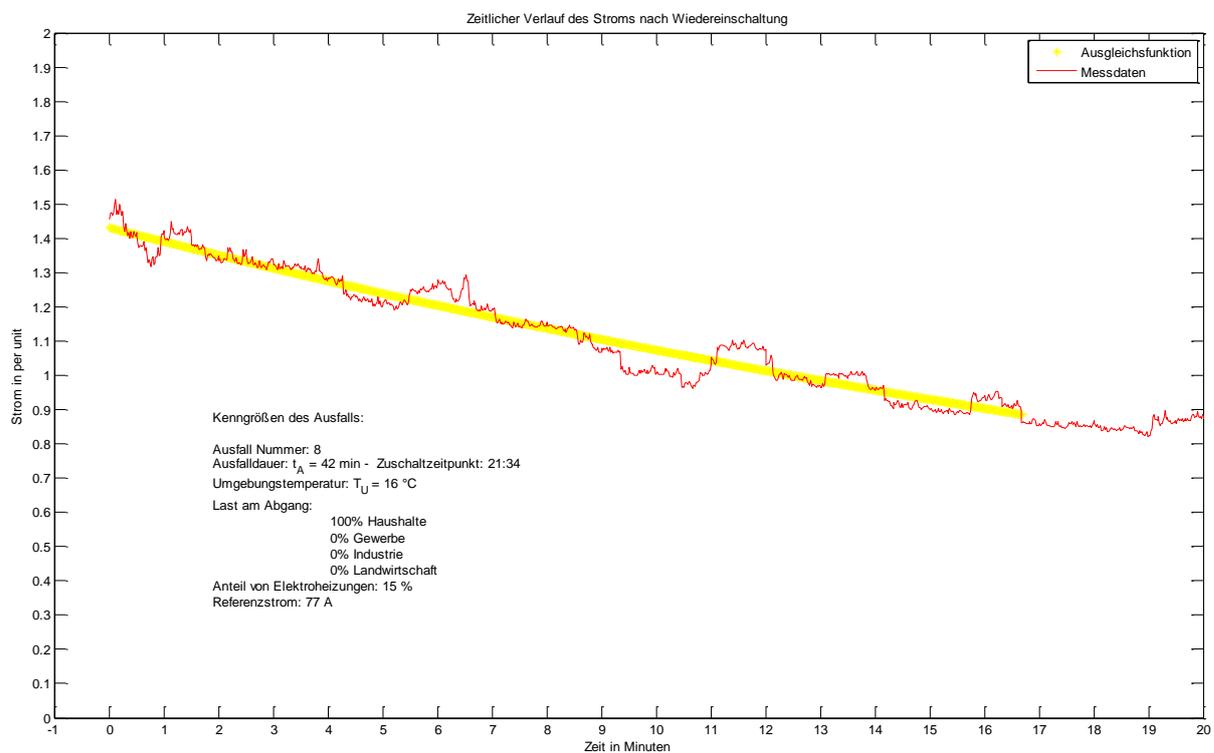
**Als Alternative wird daher vorgeschlagen, ein eigenes Expertensystem für jeweils eine Kundengruppe zu erstellen.**

Für das realisierte Expertensystem werden alle Datensätze herangezogen welchen überwiegend (in Summe mehr als 75 %) Haushalte oder Gewerbebetriebe zugeordnet sind. Das Verhalten von Haushalten und Gewerben bei der Versorgungswiederherstellung wird zur Vereinfachung als ähnlich angesehen. Dies wird stark von der jeweiligen Gewerbeform abhängen. Da keine näheren Angaben bekannt sind, wird dies nicht näher unterschieden.

Aus [4] geht hervor, dass das Verhalten bei Versorgungswiederherstellungen in Industriebetrieben vom jeweiligen Industriesektor abhängt. Längere Ausfälle bei haben meist eine deutlich geringere Leistungsaufnahme unmittelbar nach Zuschaltung zur Folge, wie im vorigen Kapitel erwähnt. Dies ist mit dem Wiederanfahren von Produktionsprozessen, welches oft mit zeitlicher Verzögerung erfolgt zu begründen. Da nur geringe Anteile landwirtschaftlicher Betriebe in vorhandenen Abgängen enthalten sind, werden diese ebenso nicht näher betrachtet. In Tabelle 14 im Anhang gibt es 3 Datensätze (Nr. 3, 6 und 9) welche zu einem größeren Anteil Industriebetriebe enthalten. Diese werden zwar erfasst, scheiden dadurch aber für das Training des Expertensystems aus. Über die einzelnen Betriebe sind keine weiteren Daten bekannt, weshalb nicht auf ein Verhalten nach Ausfällen geschlossen werden kann.

### 3.3.7 Ausgleichsfunktion

Die Aufzeichnung der Messdaten aus dem Leitsystem erfolgt meist in Form von Sekundenmittelwerten. Daher ist aufgrund der hohen Einschaltstromspitzen (Zeitbereich ms...sek) mit keiner zuverlässigen Auswertung der so gemessenen Einschaltstromspitzen zu rechnen. Weiters ergeben sich während der Versorgungswiederaufnahme Schwankungen im Lastgang. Um eine Beeinflussung durch diese Faktoren zu verhindern wird der Zuschaltstrom mit einer Ausgleichsfunktion gemittelt. Dabei wird eine Exponentialfunktion mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gemäß Abbildung 18 in den tatsächlich gemessenen Verlauf eingepasst.



**Abbildung 19: Ausgleichsfunktion über die Messwerte um Schwankungen der Amplitude zu unterdrücken und den tendenziellen Verlauf der Abgangsleistung darzustellen.**

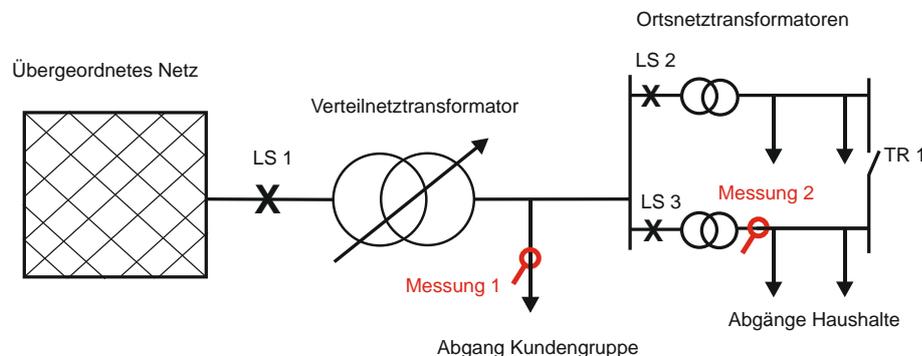
Die gewählte Ausgleichsfunktion ist eine Exponentialfunktion mit den in (3.1) dargestellten Parametern.

$$y(x) = k_1 \cdot e^{k_2 \cdot x} \quad (3.1)$$

Die Parameter  $k_1$  und  $k_2$  skalieren die Exponentialfunktion und werden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in die Messdaten eingepasst. Dabei wird als Zeitintervall für die Parameterbestimmung ein fest vorgegebener Zeitraum von 1000 Sekunden nach der Zuschaltung herangezogen.

### 3.3.8 Betrachtung eines definierten Versorgungsgebietes

Alle im Rahmen der Arbeit verwendeten Parameter sowie Strommessungen stammen aus einem eindeutig zugeordneten Versorgungsgebiet. Die Topologie der Messungen auf Niederspannungs- und Mittelspannungsebene ist in allen für Auswertung herangezogenen Fällen eine Stichleitung in Richtungsbetrieb, da es sich hier um offen betriebene Ringnetze handelt. Damit ist keinerlei Beeinflussung durch Paralleleinspeisung außer durch den in der Auswertetabelle spezifizierten Anteil an DEA zu erwarten. Damit ist die in Kapitel 3.2 beschriebenen Zuordnung von Ausfallparametern und Messdaten zulässig. Bei einer vermaschten Topologie oder hohem Anteil (bezogen auf Gesamtleistung) an Paralleleinspeisung durch DEA würde die Zuordnung der Abzweige zu gemessenen Abzweigströmen zusätzlich erschwert werden.



**Abbildung 20: Schematische Darstellung einer möglichen Topologie. Die Strommessung durch das Leitsystem wird mit den rot angedeuteten Wandlern dargestellt. TR1 stelle eine offene Trennstelle und LS1 bis LS3 Leistungsschalter dar.**

Bei der Wiederherstellung werden entweder die Leistungsschalter LS 1 bzw. LS 2 oder LS 3 betätigt. Zur Vereinfachung wird angenommen dass jeweils eine Schalthandlung stattfindet. Es wird nicht angenommen, dass nach Schließung des Leistungsschalters LS 1 mit anschließender Messung 1 in der untergeordneten Niederspannungsebene noch weitere Schalthandlungen durch den Netzbetreiber durchgeführt werden. Für die Strommessung 1 auf Verteilnetzebene werden alle untergeordneten Netzbereiche zusammengefasst und nicht näher betrachtet. Es sind keine weiteren Details über die untergeordnete Struktur bekannt.

Für die Messungen Nr. 1, 2, 7, 8 und 10 in Tabelle 14 sind diese Annahmen nicht eingehalten, da es zu Umschaltungen durch die VNB kommt. Eine Zuordnung der Messdaten ist daher nicht möglich. Ein charakteristischer Zuschaltstrom wie in Abbildung 1 dargestellt ist in diesen Fällen bei Betrachtung der Messdaten nicht erkennbar.

Die angedeutete offene Trennstelle in Form von TR 1 ermöglicht eine Ringschließung. Diese ist hier Beispielhaft auf Niederspannungsebene angenommen. Im Datensatz Nr. 4 in Tabelle 14 kommt es zu einer solchen Ringschließung bei 30 kV, dieser wird nicht miteinbezogen.

### 3.3.9 Verwendung eines Expertensystems pro Stützstelle

Die Aufbereitung von Ein- und Ausgangsdaten ist mit für den Erfolg von Expertensystemen verantwortlich. Dies ist in [20] und [21] zu finden und wird als Fuzzy Pre- sowie Postprocessing bezeichnet.

Für die Ausgangsdaten sind folgende Optionen denkbar:

- Zuordnung der Parameter der Ausgleichsfunktion  $k_1$  und  $k_2$ .
- Zuordnung der Zeitdauer  $t_2$  gemäß Abbildung 1.
- Zuordnung aller Messpunkte als Funktion der Zeit. Die fortschreitende Zeit nach Zuschaltung muss dann aber als zusätzliche Eingangsgröße definiert werden.

Nach Betrachtung dieser Möglichkeiten und Analyse zugehöriger Ergebnisse wird ein alternativer Ansatz gewählt:

Die Ausgleichsfunktion wird an definierten Zeitpunkten nach Zuschaltung ausgewertet. Den so bestimmten Amplituden dieser Stützstellen wird eine größere physikalische Bedeutung zugeordnet als den Parametern  $k_1$  und  $k_2$ .

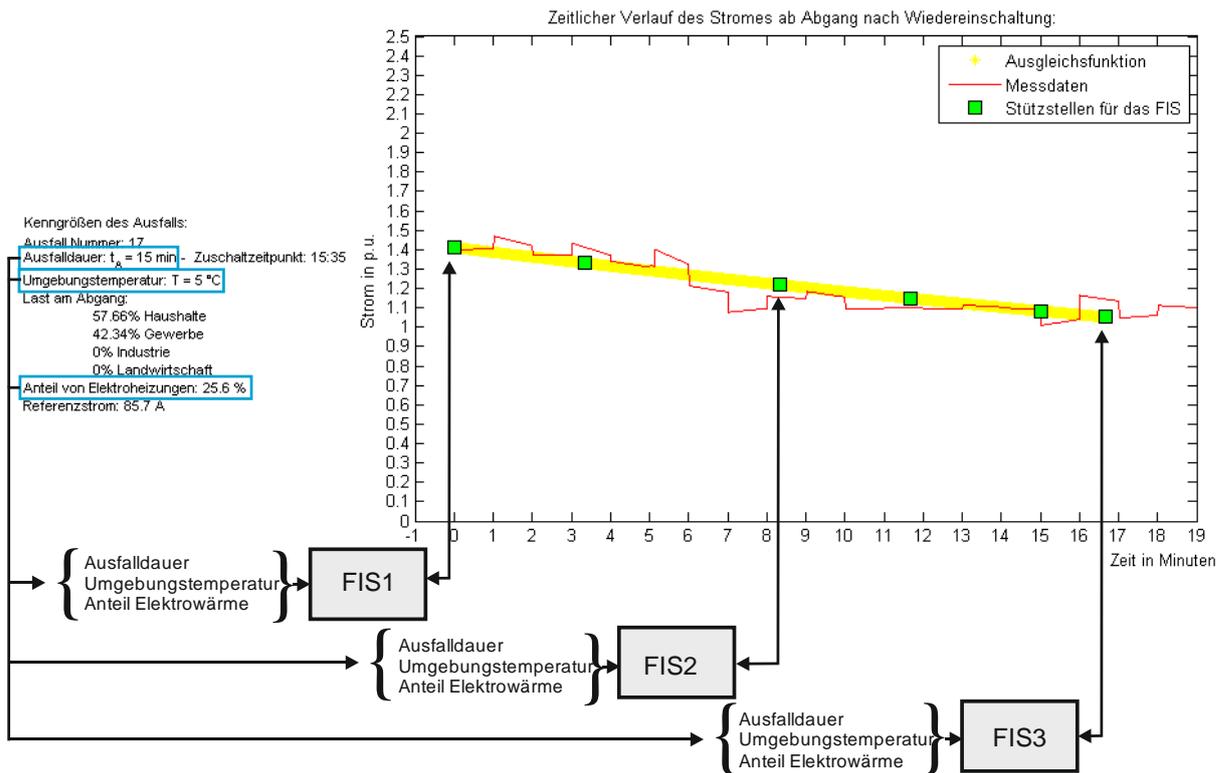


Abbildung 21: Schema der realisierten Expertensysteme zu drei ausgewählten Stützstellen der Ausgleichsfunktion. Es werden die Abstände 1 Sekunde, 500 Sekunden und 1000 Sekunden nach erfolgter Zuschaltung gewählt. Alle Eingangsparameter werden an alle FIS übergeben. In Tabelle 13 im Anhang ist dies der Ausfall Nr. 17.

Die einzelnen Amplituden werden jeweils durch ein Expertensystem repräsentiert wie in Abbildung 21 dargestellt. Dadurch wertet jedes einzelne Expertensystem die Amplitude an bestimmten, fest vorgegebenen Zeitpunkten nach Zuschaltung aus. Umgekehrt wird beim Training die Stützstelle des Expertensystems zur jeweiligen Eingangsgröße. Im Schema aus Abbildung 21 ist daher dieser Signalpfad mit Pfeilen in beide Richtungen angedeutet. Dies bringt folgende Vor- und Nachteile mit sich, welche bei der Erstellung beobachtet werden:

- +Die Expertensysteme je Stützstelle können individuelle Parameter annehmen. Im Hinblick auf die zu Grunde liegenden physikalischen Ursachen in Tabelle 1 ist dies ein Vorteil. Bei der Realisierung wird dies genutzt. Die Maximalwerte für die Ausgangsamplitude werden für jede Stützstelle im Initialregelwerk unterschiedlich hoch angenommen.
- +Ausgleichsfunktion und Stützstellen sind ineinander überführbar. Da letztere durch Auswertung ersterer an bestimmten Zeitpunkten erfolgt sind somit beide Darstellungen gleichwertig. Bei der Zuordnung von Parametern  $k_1$  und  $k_2$  als Ausgangsgröße gestaltet sich aber die Festlegung einer Abbruchsbedingung beim Training durch eine Fehlerschranke als zusätzliche Herausforderung. Die Parameter  $k_1$  und  $k_2$  sind numerisch ( $10^{-6}$ ) verglichen zu den Amplitudenwerten in p.u. sehr klein. Eine Hochskalierung dieser ist für alle Messdaten nicht möglich. Die Verwendung der numerisch größeren Amplitudenwerte in p.u. ist bei der Wahl der Trainingsparameter in der praktischen Umsetzung vorteilhaft.
- +Bei Zuordnung eines Expertensystems für alle Stützstellen müsste die Nummer der Stützstelle bzw. die fortschreitende Zeit als Eingangsgröße mitübergaben werden. Gemäß Kapitel 3.4.1 wird eine zusätzlich Eingangsgröße aber als Nachteil angesehen.
- Ein Expertensystem für den gesamten Verlauf könnte hingegen den Vorteil haben das bei Ableitung des Regelwerkes zusätzliche Informationen gewonnen werden. Das System „kennt“ den gesamten Verlauf und nicht nur eine Stützstelle. Bei der praktischen Umsetzung dieses Ansatzes überwogen zum Zeitpunkt der Erstellung aber die Nachteile.

### 3.3.10 Betrachtungsdauer nach Wiederherstellung

In Abbildung 1 ist schematisch dargestellt das sich nach der Zeitdauer  $t_2$  wieder die Amplitude  $A_1$  des Abgangsstroms einstellt. Dies ist der dem Ausfall vorangegangene Zustand. Die statische Lastdiversität der Lasten im Abzweig ist dann wiederhergestellt.

Aus Betrachtung von Abbildung 8 kommt es durch die verschiedenartig beschaffenen Zeitkonstanten einzelner thermischer Systeme zu verschieden langen Taktzyklen dieser. Dadurch sollte es aus theoretischer Sicht zu einer Rückkehr zur statischen Lastdiversität nach ausreichend langer Zeit  $t_2$  kommen. Bei der Ermittlung dieser Zeitdauer  $t_2$  bis zur Wiederherstellung des Zustands vor dem Ausfall zeigen sich für einzelne Messdaten folgende Herausforderungen:

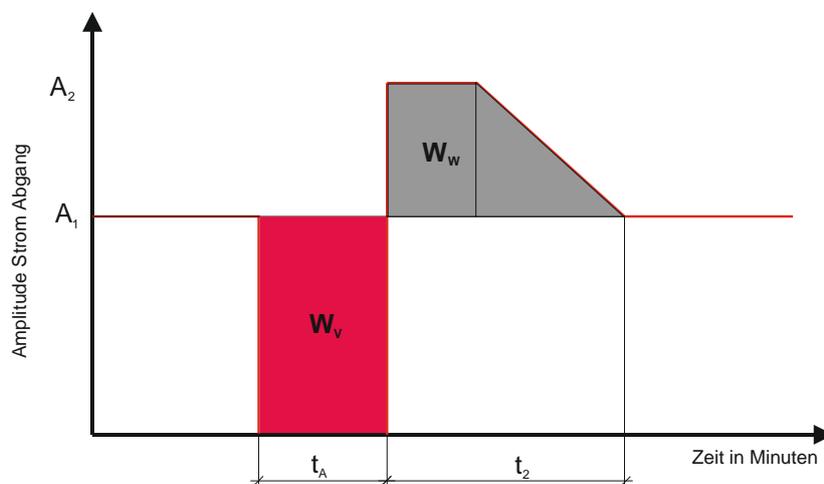
#### -Festlegung eines aussagekräftigen Kriteriums:

- Unterschreiten des Sekundenwertes 1 p.u. durch einen Messpunkt.
- Unterschreiten des Sekundenwertes 1 p.u. für mehrere Messpunkte.
- Unterschreiten des Sekundenwertes 1 p.u. durch Ausgleichsfunktion.

#### -Aufzeichnungsdauer:

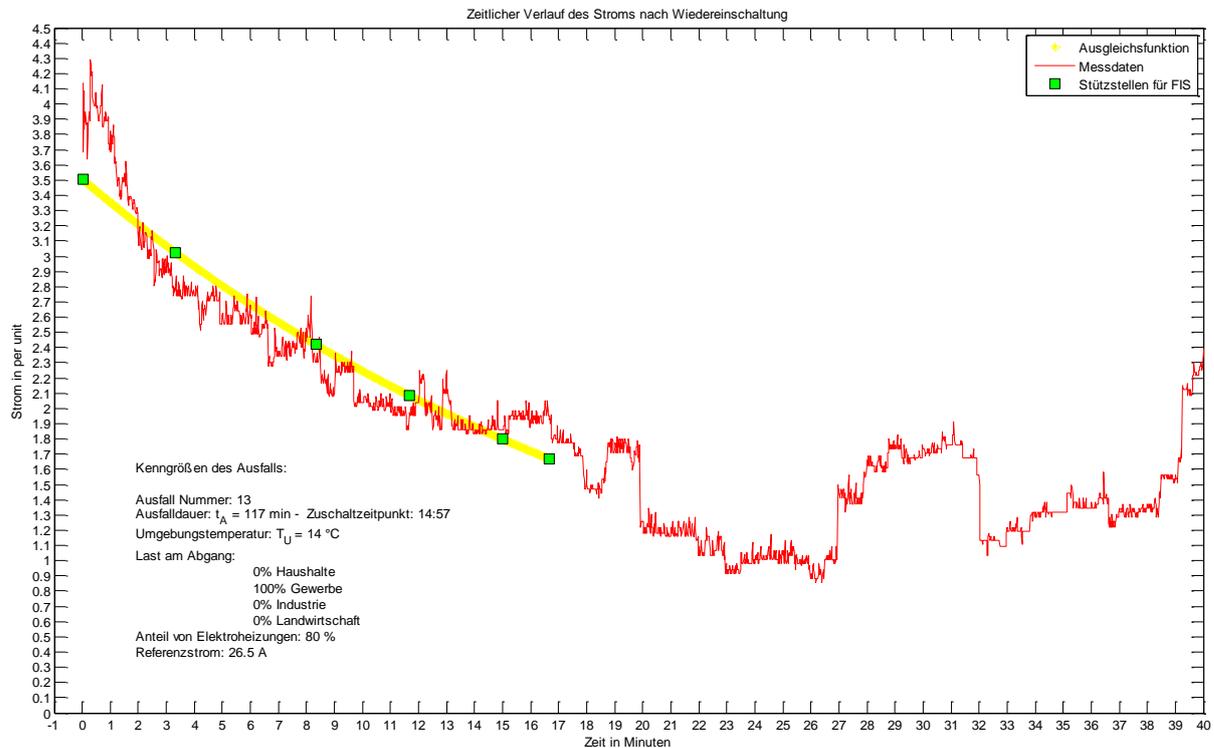
- Nach Zuschaltung liegt diese in einigen Messdaten unter der Zeit, die notwendig ist bis 1 p.u. vermutlich unterschritten wird.
- In manchen Fällen wird der Wert vor dem Ausfall selbst Stunden nach der Zuschaltung nicht mehr erreicht. Durch den Verlauf des weiteren Tageslastganges kann eine Rückkehr zur statischen Lastdiversität nicht festgestellt werden.

Bei der Erstellung des Expertensystems kann aus den angeführten Gründen keine direkte Korrelation von Ausfalldauer  $t_A$  und Wiederherstellungsdauer  $t_2$  abgeleitet werden. Einer Betrachtung der Energiemenge über die Zeiträume des Ausfalls und der Wiederherstellung wird aus theoretischer Sicht keine Bedeutung zugemessen. Viele Verbraucher im Abzweig wandeln die aufgenommene elektrische Energie um, und speichern diese nicht. Aus dieser Überlegung heraus wird die während des Ausfalls nicht gelieferte Energie  $W_v$  gemäß Abbildung 22 nicht unmittelbar zur Wiederherstellungsdauer  $t_2$  beitragen.



**Abbildung 22: Betrachtung von nicht gelieferter Energie  $W_v$  und zusätzlich gelieferter elektrischer Energie  $W_w$  beim Wiederherstellungsprozess. Aus theoretischer Sicht keine Korrelation erwartet.**

Die Problematik eines Aussagekräftigen Kriteriums wird durch die Wahl eines Ansatzes mit fest vorgegebenen Zeitabständen umgangen. In nachfolgender Abbildung 23 sind die Messdaten aus Abbildung 15 erneut dargestellt, jedoch für eine längere Betrachtungsdauer. In diesem Fall wird eine Rückkehr zur statischen Lastdiversität erst ab ca. 20 bis 30 Minuten nach Zuschaltung vermutet.



**Abbildung 23: Erneute Darstellung des in Abbildung 15 dargestellten Ausfalls für eine längere Betrachtungsdauer. Es zeigt sich eine Unterschreitung des Wertes von 1 p.u. etwa 20 bis 30 Minuten nach erfolgter Zuschaltung.**

Obwohl die Rückkehr zur statischen Lastdiversität erst nach ca. 20 bis 30 Minuten vermutet wird erfolgt die Betrachtung nur bis 16.67 Minuten.

Die Vereinheitlichung der Betrachtungsdauer auf 1000 Sekunden nach Zuschaltung sowie eine einheitliche Zuordnung der Stützstellen für alle Messdaten hat zur Folge, dass in manchen Datensätzen diese weiteren Informationen verloren gehen. Dadurch kann jedoch eine größere Anzahl vergleichbare Ergebnissen erzielt werden, da auch Messdaten mit nur kürzerer Aufzeichnungsdauer in die Auswertung eingehen können. Die Amplituden werden mit  $A_{1\text{Sek}}$ ,  $A_{500\text{Sek}}$  und  $A_{1000\text{Sek}}$  bezeichnet, in Abbildung 23 sind dies drei der grün markierten Quadrate an den entsprechenden Zeitabständen. Eine Abänderung der Abstände sowie Anzahl der Stützstellen ist für künftige Messdaten möglich. Als Vorteil kann eine möglichst hohe Anzahl der vorhandenen Messdaten in die Auswertung einbezogen werden.

### 3.3.11 Annahmen bezüglich Elektrowärme

Alle im Abzweig vorhandenen elektrisch beheizten Haushalte werden als statistisch erfasst angenommen und sind daher in der vom Netzbetreiber übermittelten Prozentzahl enthalten. Die Deutung dieser Prozentzahl ist nicht exakt festgelegt. Als wahrscheinlichste Variante wird angenommen, dass diese die Anzahl der elektrisch beheizten Haushalte im Verhältnis zu allen Haushalten im Abzweig darstellt. Über die Leistungsbezogene Gewichtung kann keine Aussage getroffen werden. Es wird ein physikalisches Verhalten gemäß Kapitel 2.3.2, Abbildung 8 vorausgesetzt. Das bedeutet, es wird nicht davon ausgegangen das ein anderwärtiges Taktverhalten bezüglich der Leistungsaufnahme zu Grunde liegt. Für den gewählten Ansatz sollte dies prinzipiell nicht von Bedeutung sein. Das tatsächliche Verhalten von Einzelgeräten liegt nicht als Modell vor.

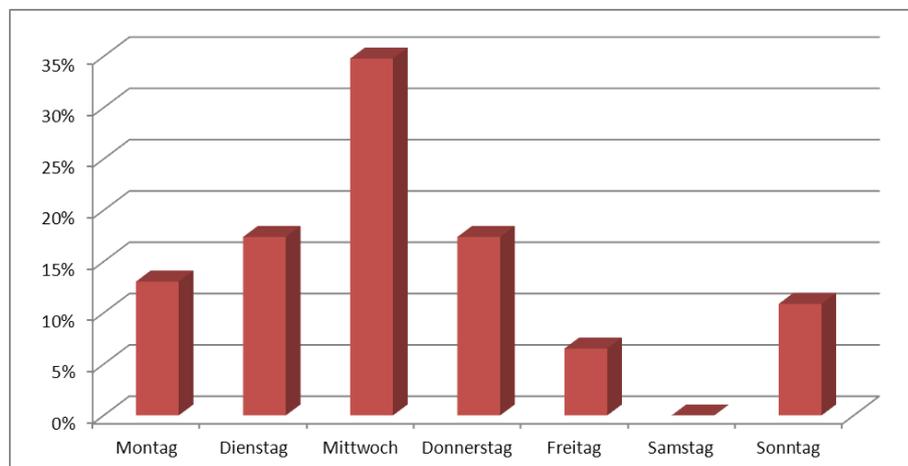
### 3.3.12 Kalendereffekt

Der in [9] berücksichtigte Kalendereffekt im Zusammenhang mit Lastprognosen kann den Wiederherstellungsprozess beeinflussen. Je nach Wochentag und Uhrzeit ergibt sich ein unterschiedlicher Lastfluss in einem Gebiet. Dadurch kann sich ebenso unterschiedliches Verhalten bei der Wiederherstellung ergeben. In Abbildung 24 sind die Ausfälle nach Wochentagen dargestellt.

Denkbare Unterscheidungskriterien sind:

- Wochentag/Wochenende
- Werktag/Feiertag
- Jahreszeit/Monat
- Urlaubs- und Ferienzeit
- Sonderdatum: Feiertage einzelner Bundesländer, etc.

Die Berücksichtigung würde jedoch eine größere Anzahl an Datensätzen erfordern. Bei den vorhandenen Daten sind keine Feiertage enthalten. Dieser Effekt wird daher vernachlässigt.



**Abbildung 24: Sortierung aller Ausfälle nach Wochentagen.**

### 3.3.13 Weitere Annahmen

Alle in diesem Kapitel nicht explizit angeführten Einflussgrößen werden als vernachlässigt angenommen. Dadurch werden sie bei der Erstellung des Expertensystems nicht berücksichtigt.

Weitere Punkte könnten sein:

- Öffentliche Verbraucher die in einem Versorgungsgebiet nicht unmittelbar statistisch erfasst sind: Straßenbeleuchtungen, Traktionsfahrzeuge, etc.
- Einfluss durch Sonderereignisse an Messtagen wie z.B. Großveranstaltungen, Umweltereignisse verschiedenster Art welche zusätzlich in das KundInnenverhalten eingehen.

## 3.4 Eingebachte „a-priori“-Informationen

Die aus den gesammelten Datensätzen sowie den physikalischen Betrachtungen abgeleiteten Schlussfolgerungen werden bei der Erstellung des Expertensystems eingebracht. Dies geschieht in Form eines durch ein MatLab-Skript erstelltes Regelwerk welches festlegt, wie einzelne Parameter zueinander in Beziehung stehen. Bei der Erstellung des Regelwerks sollte einerseits sichergestellt sein, dass dieses möglichst Allgemeine Gültigkeit besitzt, andererseits dass es die vorhandenen Messdaten möglichst gut nachbildet.

### 3.4.1 Untersuchung hinsichtlich Korrelation einzelner Parametern

Aus Sicht der Informationstheorie ist es **nicht** wünschenswert eine große Anzahl an unabhängigen Eingangsgrößen für ein Expertensystem zu wählen. Die Anzahl an möglichen Kombinationen von Eingangsparametern welche zu einem Ausgangswert führen, steigt überproportional mit jedem zusätzlichen Eingangsparameter. Aus dieser Forderung ergibt sich ein erhöhter Bedarf an Datensätzen je mehr Eingangsparameter berücksichtigt werden. Beim Trainingsvorgang des Systems mit Messdaten zeigt sich dieser ungewünschte Effekt<sup>5</sup>.

**Daher sollten möglichst wenige Eingangsparameter ausgewählt werden. Dies sind jene, die beim vorhandenen Datensatz beste Korrelation mit Ausgangsdaten zeigen.**

Zur Erstellung des Initialregelwerkes wird das zum Zeitpunkt der Erstellung vorhandene Datenmaterial auf mögliche Korrelation einzelner Parameter hin untersucht. Die Darstellung von bedingten Formatierungen und Reihung nach verschiedenen Parametern in den folgenden Darstellungen erweist sich dabei in Einzelfällen als hilfreich. Für die Erstellung der Masterarbeit wird diese Untersuchung für verschiedenste Einzelparameter vorgenommen. Im Folgenden sind nun vier Beispiele angeführt, für diese wurde bei der Erstellung der Arbeit am deutlichsten Korrelation aus der Literaturrecherche erwartet.

zu 5: Dieser als „Fluch der Dimensionalität“ bezeichnete Effekt stellt bei vielen Computerlernproblemen eine Grenze dar. [http://en.wikipedia.org/wiki/Curse\\_of\\_dimensionality#Machine\\_learning](http://en.wikipedia.org/wiki/Curse_of_dimensionality#Machine_learning)

Beispiel 1: Sortierung Datensatz nach steigender Ausfalldauer  $t_A$

Nr	Ausfalldauer	Umgebungstemperatur	Elektrowärme	Amplituden		
	Minuten	Grad Celsius	Prozent	p.u.	p.u.	p.u.
-	$t_A$	$T_U$	%Eheiz	$A_{1\text{Sek}}$	$A_{500\text{Sek}}$	$A_{1000\text{Sek}}$
1	2	15	0	1.05	1.05	1.06
2	3	-1	16	1.08	0.98	0.89
3	3	-1	18	1.31	1.17	1.04
4	4	5	18	1.05	1.14	1.24
5	5	4	0	1.00	0.98	0.95
6	5	19	2	0.95	0.87	0.80
7	15	5	26	1.41	1.22	1.05
8	21	4	10	1.48	1.20	0.96
9	28	3	0	0.99	0.91	0.84
10	37	8	26	1.74	1.48	1.26
11	42	16	15	1.43	1.13	0.89
12	50	15	20	1.96	1.53	1.19
13	62	2	5	1.59	1.70	1.83
14	67	9	10	1.26	1.11	0.97
15	85	15	20	2.53	1.70	1.14
16	108	20	10	2.50	2.04	1.66
17	117	14	80	3.50	2.42	1.67
18	125	10	2	2.43	2.09	1.79
19	140	20	0	2.10	1.74	1.44
20	148	19	1	1.95	1.72	1.52
21	154	7	10	1.55	1.61	1.66
22	154	18	5	2.22	1.82	1.50
23	170	-4	20	1.44	1.54	1.64
24	170	6	10	3.02	2.12	1.49
25	175	-3	10	1.83	1.91	1.99
26	182	7	5	2.50	1.80	1.30
27	189	10	10	2.49	2.29	2.10
28	191	10	10	2.00	1.65	1.37
29	238	0	30	1.80	1.76	1.72
30	299	8	40	1.83	1.70	1.57
31	316	-5	0	3.44	2.73	2.16
32	355	12	2	1.68	1.65	1.62

Tabelle 8: Die Sortierung erfolgt nach steigender Ausfalldauer. Grün gefärbte Amplituden bedeuten einen Abgangsstrom der dem vorangegangenen Betriebsstrom entspricht.

Bei den Ausfällen Tabelle 8 welche länger als 60 Minuten dauern zeigen sich bezüglich aller Amplituden überwiegend gelb und rot eingefärbte Bereiche. Die Amplitudenwerte liegen hier daher im unteren Bereich der Skalierung. Es kann zumindest von einem tendenziellen Zusammenhang der Leistungsüberhöhung und Ausfalldauer ausgegangen werden. Aus Ausfall Nr. 10 ( $t_A = 37$  Minuten, %Eheiz = 25.6 %) bzw. Ausfall Nr. 17 ( $t_A = 117$  Minuten, %Eheiz = 80 %) ist ersichtlich dass nicht von einer direkten Korrelation der Amplitude mit der Ausfalldauer ausgegangen werden kann. Als Erkenntnis aus dieser Betrachtung wird angesehen dass die vorhandenen Ausfälle bis zu einer Dauer von 5 Minuten keine nennenswert überhöhten Amplituden aufweisen. Dies deckt sich mit der Annahme dass die Abkühl- und Erwärmungsvorgänge über längere Zeitkonstanten verfügen. Infolgedessen werden „kurze“ Ausfälle gesondert betrachtet. Für die weiteren Betrachtungen in diesem Unterkapitel werden diese daher nicht miteinbezogen.

**Beispiel 2: Sortierung Datensatz nach steigender Umgebungstemperatur  $T_U$** 

Nr	Ausfalldauer	Umgebungstemperatur	Elektrowärme	Amplituden		
	Minuten	Grad Celsius	Prozent	p.u.	p.u.	p.u.
-	$t_A$	$T_U$	%Eheiz	$A_{1\text{Sek}}$	$A_{500\text{Sek}}$	$A_{1000\text{Sek}}$
1	316	-5	0	3.44	2.73	2.16
2	170	-4	20	1.44	1.54	1.64
3	175	-3	10	1.83	1.91	1.99
4	238	0	30	1.80	1.76	1.72
5	62	2	5	1.59	1.70	1.83
6	28	3	0	0.99	0.91	0.84
7	21	3.5	10	1.48	1.20	0.96
8	15	5	26	1.41	1.22	1.05
9	170	6	10	3.02	2.12	1.49
10	154	7	10	1.55	1.61	1.66
11	182	7	5	2.50	1.80	1.30
12	37	8	26	1.74	1.48	1.26
13	299	8	40	1.83	1.70	1.57
14	67	9	10	1.26	1.11	0.97
15	125	10	2	2.43	2.09	1.79
16	189	10	10	2.49	2.29	2.10
17	191	10	10	2.00	1.65	1.37
18	355	12	2	1.68	1.65	1.62
19	117	14	80	3.50	2.42	1.67
20	50	15	20	1.96	1.53	1.19
21	85	15	20	2.53	1.70	1.14
22	42	16	15	1.43	1.13	0.89
23	154	18	5	2.22	1.82	1.50
24	148	19	1	1.95	1.72	1.52
25	108	20	10	2.50	2.04	1.66
26	140	20	0	2.10	1.74	1.44

**Tabelle 9:** Die Sortierung erfolgt nach steigender Umgebungstemperatur. Die farbliche Abstufung der Temperatur erfolgt innerhalb der vorhandenen Maximalwerte von -5 °C und +20 °C. Die „kurzen“ Ausfälle aus Tabelle 8 sind in dieser Darstellung nicht mehr enthalten.

In Tabelle 9 sind alle Ausfälle bis zu einer Dauer von 5 Minuten sind bereits aus der Auflistung ausgenommen, da für „kurze“ Ausfälle keine Temperaturabhängigkeit angenommen wird. Daher reduziert sich die Anzahl der Zeilen im Vergleich zu Tabelle 8. Für die in Tabelle 9 dargestellten, „langen“ Ausfälle wird eine Temperatur Abhängigkeit erwartet. Mit dieser Darstellung soll untersucht werden ob, es bei den restlichen Datensätzen eine generelle Korrelation zwischen der Umgebungstemperatur und dem Wiederherstellungsstrom gibt. Die Betrachtung erfolgt unabhängig vom Anteil an Elektrowärme.

Als Schlussfolgerung ist aus Tabelle 9 keine direkte Korrelation zwischen Umgebungstemperatur und Amplitude des Zuschaltstromes zu erkennen. Für das Regelwerk wird daher lediglich eine Abhängigkeit der Temperatur in Zusammenhang mit dem Elektrowärmeanteil angenommen.

**Beispiel 3: Sortierung Datensatz nach steigendem Elektrowärmeanteil %Eheiz**

Nr	Ausfalldauer	Umgebungstemperatur	Elektrowärme	Amplituden		
	Minuten	Grad Celsius	Prozent	p.u.	p.u.	p.u.
-	$t_A$	$T_U$	%Eheiz	$A_{1Sek}$	$A_{500Sek}$	$A_{1000Sek}$
1	28	3	0	0.99	0.91	0.84
2	140	20	0	2.10	1.74	1.44
3	316	-5	0	3.44	2.73	2.16
4	148	19	1	1.95	1.72	1.52
5	125	10	2	2.43	2.09	1.79
6	355	12	2	1.68	1.65	1.62
7	62	2	5	1.59	1.70	1.83
8	154	18	5	2.22	1.82	1.50
9	182	7	5	2.50	1.80	1.30
10	21	4	10	1.48	1.20	0.96
11	67	9	10	1.26	1.11	0.97
12	108	20	10	2.50	2.04	1.66
13	154	7	10	1.55	1.61	1.66
14	170	6	10	3.02	2.12	1.49
15	175	-3	10	1.83	1.91	1.99
16	189	10	10	2.49	2.29	2.10
17	191	10	10	2.00	1.65	1.37
18	42	16	15	1.43	1.13	0.89
19	50	15	20	1.96	1.53	1.19
20	85	15	20	2.53	1.70	1.14
21	170	-4	20	1.44	1.54	1.64
22	15	5	25.6	1.41	1.22	1.05
23	37	8	25.6	1.74	1.48	1.26
24	238	0	30	1.80	1.76	1.72
25	299	8	40	1.83	1.70	1.57
26	117	14	80	3.50	2.42	1.67

**Tabelle 10: Die Sortierung erfolgt nach steigenden Anteilen an Elektrowärme im Abzweig. Alle „kurzen“ Ausfälle bis zu einer Dauer von 5 Minuten sind bereits aus der Auflistung ausgenommen. Daher reduziert sich die Anzahl der Zeilen im Vergleich zu Tabelle 8.**

Da alle in Tabelle 10 betrachteten Messdaten eine Umgebungstemperatur von unter 20 °C aufweisen, wird versucht diese ausschließlich nach dem Elektrowärmeanteil zu reihen. Bis zu einem Anteil von 15 % wird deren Beitrag zur Gesamtlast als zu gering verglichen zur Abzweiglast angenommen. Bei Betrachtung der Zeilen 16 bis 22 fällt folgendes auf:

- Die Amplituden  $A_{1Sek}$ ,  $A_{500Sek}$  und  $A_{1000Sek}$  steigen mit dem Anteil an Elektrowärme. Eine Ausnahme bildet die Zeile des Ausfalls Nr. 17 mit einem Elektrowärmeanteil von 20 Prozent. Dieser Ausfall weist jedoch mit -4 °C eine wesentlich tiefere Umgebungstemperatur auf.

Diese vermutete Tendenz deckt sich mit physikalischen Überlegungen aus Kapitel 2.1. Die Betrachtung weniger Einzelfälle wird nicht als allgemein gültige Aussage erachtet. Es könnten auch andere, nicht betrachtete Effekte für dieses Verhalten verantwortlich sein. Weitere Messdaten würden für diese Untersuchungen zusätzliche Erkenntnisse bringen. Um eine Berücksichtigung der Temperatur zu erreichen wird im Folgenden Beispiel 4 die Kombination aus Elektrowärmeanteil und Umgebungstemperatur mit einer Hilfsgröße betrachtet.

### Beispiel 4: Sortierung Datensatz nach steigender Hilfsgröße

Nr	Ausfalldauer	Umgebungstemperatur	Elektrowärme	Amplituden			Hilfsgröße
	Minuten	Grad Celsius	Prozent	p.u.	p.u.	p.u.	
-	$t_A$	$T_U$	%Eheiz	$A_{1\text{sek}}$	$A_{500\text{sek}}$	$A_{1000\text{sek}}$	Hilfsgröße
1	28	3	0	0.99	0.91	0.84	0.00
2	108	20	10	2.50	2.04	1.66	0.00
3	140	20	0	2.10	1.74	1.44	0.00
4	316	-5	0	3.44	2.73	2.16	0.00
5	148	19	1	1.95	1.72	1.52	1.00
6	154	18	5	2.22	1.82	1.50	10.00
7	355	12	2	1.68	1.65	1.62	16.00
8	125	10	2	2.43	2.09	1.79	20.00
9	42	16	15	1.43	1.13	0.89	60.00
10	182	7	5	2.50	1.80	1.30	65.00
11	62	2	5	1.59	1.70	1.83	90.00
12	50	15	20	1.96	1.53	1.19	100.00
13	85	15	20	2.53	1.70	1.14	100.00
14	189	10	10	2.49	2.29	2.10	100.00
15	191	10	10	2.00	1.65	1.37	100.00
16	67	9	10	1.26	1.11	0.97	110.00
17	154	7	10	1.55	1.61	1.66	130.00
18	170	6	10	3.02	2.12	1.49	140.00
19	21	4	10	1.48	1.20	0.96	165.00
20	175	-3	10	1.83	1.91	1.99	230.00
21	37	8	26	1.74	1.48	1.26	307.20
22	15	5	26	1.41	1.22	1.05	384.00
23	117	14	80	3.50	2.42	1.67	480.00
24	170	-4	20	1.44	1.54	1.64	480.00
25	299	8	40	1.83	1.70	1.57	480.00
26	238	0	30	1.80	1.76	1.72	600.00

**Tabelle 11: Die Sortierung erfolgt nach steigender Hilfsgröße welche eine Maß für die Kombination aus kalten Temperaturen und Anteil Elektrowärme sein soll. In der Tabelle sind alle Ausfälle von einer Dauer bis zu 5 Minuten bereits ausgeblendet.**

Eine Hilfsgröße wird in Tabelle 11 eingeführt welche das Produkt aus Elektrowärmeanteil und der Temperaturdifferenz einer Referenztemperatur von 20 °C vermindert um die Umgebungstemperatur gemäß (3.2) ist.

$$Hilfsgröße = \%Eheiz \cdot (20^{\circ}C - T_U) \tag{3.2}$$

- bei geringem Elektrowärmeanteil wird diese in der Gesamtlast unbedeutender.
- bei wärmeren Umgebungstemperaturen wird dieser Anteil unbedeutender.

Beträgt der Elektrowärmeanteil null Prozent, ist das Produkt dieser Größen selbst bei tiefen Umgebungstemperaturen ebenfalls null. Es könnten zusätzlich höhere Zuschaltamplituden aufgrund einer generellen Temperatursensitivität auftreten. Ausfall Nr.1 ( $T_U = -5$  °C und %Eheiz = 0 %) in Tabelle 11 zeigt, dass diese Betrachtung ungeeignet ist. Ein weiteres Problem ist die Vernachlässigung der Tatsache, dass der erhobene Anteil an Elektrowärme im Abzweig je nach Heizungseinsatz wirksam wird. Obwohl die Temperatur von 14 °C in dieser Darstellung eine als Zahlenwert betrachtete relativ gesehen hohe darstellt, (der Maximalwert beträgt 20 °C) kann es bei dieser Umgebungstemperatur zu einem Einsatz von Heizungssystemen kommen. Die Einbringung solcher Schlussfolgerungen ist eine Stärke des Expertensystems. Eine direkte Korrelation aus der Sortierung ist nicht ableitbar. In Abbildung 26 ist die Zugehörigkeitsfunktion bezüglich der Umgebungstemperatur definiert.

### 3.4.2 Ableitung von Annahmen aus dem physikalischen Modell

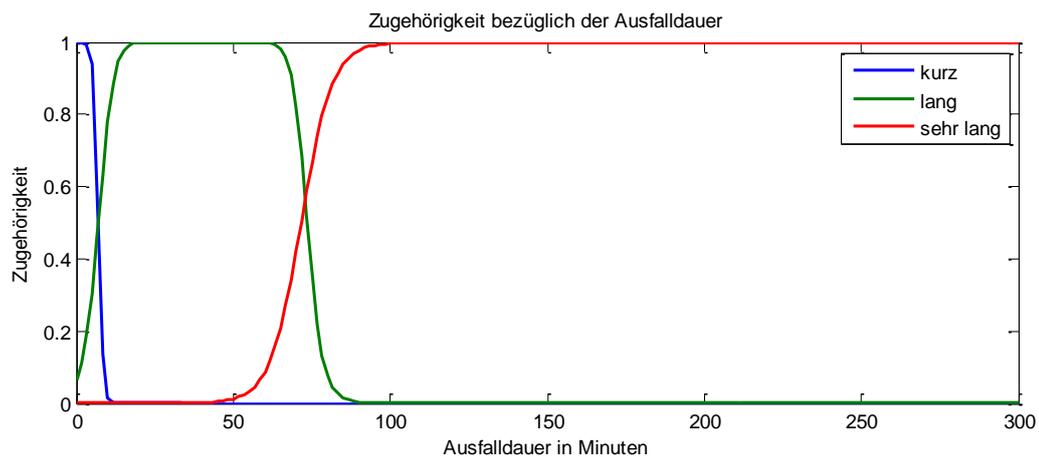
Die in Kapitel 2 beschriebenen physikalischen Ursachen werden durch folgende Punkte in das Expertensystem eingebracht.

- Gestalt der Zugehörigkeitsfunktionen am Eingang.
- Gestalt der Zugehörigkeitsfunktionen am Ausgang.
- Erstellung des Initialregelwerkes.

In den folgenden beiden Kapiteln 3.4.3 und 3.4.4 sind diese verbal beschrieben.

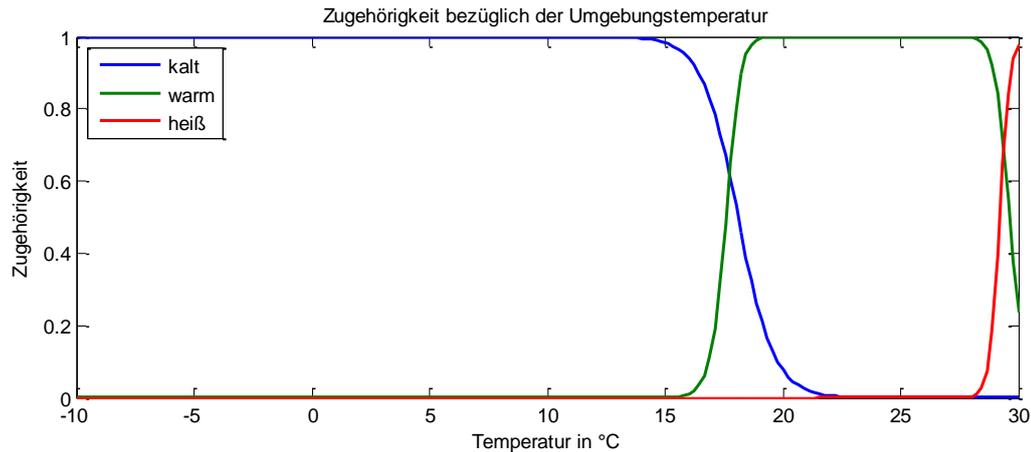
### 3.4.3 Definition linguistischer Variablen

Die Klassifizierung von Eingangsparametern in Form linguistischer Variablen ist notwendig. Diese sind für die spätere Verarbeitung durch Zugehörigkeitsfunktionen definiert. Die Unterteilung und Gestalt dieser erfolgt im Hinblick auf die vorhandenen Messdaten sowie den aus der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnissen. Alle Parameter für die Erstellung dieser Funktionen sind im Anhang in Tabelle 15 angeführt.



**Abbildung 25: Zugehörigkeitsfunktionen bezüglich der Ausfalldauer. Damit ist festgelegt wie „kurze“, „lange“ und „sehr lange“ Ausfälle für die Auswertung definiert sind.**

In Abbildung 25 als „kurz“ bezeichnete Ausfalldauern sind in die ersten Zeilen bis Nr. 6 in Tabelle 8. Diese Unterbrechungsdauer wird als so kurz angesehen, dass in Bezug auf die Geräte der Klasse thermischer Systeme keine Leistungsüberhöhung erwartet wird. Beim elektrischen Taktverhalten der in Abbildung 5 gemessenen Kühlgeräte liegt die Dauer je Zyklus über diesen. Für die größtenteils aus Haushalten bestehenden Abzweige werden zudem keine bedeutenden Anlaufvorgänge erwartet. Die als „lang“ definierte Zeitdauer soll den Anteil dieser thermischen Systeme wie Kühlschränke und Gefriertruhen abdecken. Ein exakter Übergang zwischen den Zuständen ist nicht möglich, wodurch eine Gauß'sche Glockenkurve bzw. eine Sigmoidfunktion gewählt wird. Mit „sehr lang“ gekennzeichnete Ausfalldauern sind jene, welche bis in den Stundenbereich reichen. Physikalisch werden hier Elektrowärmeanwendungen vermutet. Eine weitere Unterscheidung im Stundenbereich ab ca. 2 Stunden wird nicht vorgenommen. Der Einfluss des Tageslastganges wird hier immer dominanter. Weitere Daten würden eine Berücksichtigung ermöglichen.



**Abbildung 26: Zugehörigkeitsfunktionen bezüglich der Umgebungstemperatur. Diese Beschreibung bezieht sich nicht auf das Empfinden von Außentemperaturen.**

Der Einsatz von Heizungssystemen in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur ist als sehr individuell anzusehen und kann nicht direkt dargestellt werden. Für die Erstellung von Abbildung 26 werden folgende Annahmen getroffen:

- Bei „kalten“ Temperaturen kommt es unabhängig von zusätzlichen Bedingungen zu einem Heizungseinsatz. Der Bereich „kalt“ ist in diesem Fuzzy Set ein äußerst unscharf definierter Bereich. Der gewünschte Heizungseinsatz durch BewohnerInnen wird unter anderem durch folgende Parameter beeinflusst sein:
  - Jahreszeit
  - Haushaltsform
  - Witterung
  - Globalstrahlung
  - persönliche Gewohnheiten
- Umgekehrt wird angenommen, dass es bei „warmen“ Temperaturen zu keinem signifikanten Einsatz von Heizungssystemen kommt. Der Heizungseinsatz hängt von der Witterung ab. Die Witterung kommt durch das Zusammenwirken von fühlbaren Wetterelementen zustande. Im erstellten Expertensystem ist der Einfluss der Witterung nicht berücksichtigt.
- Die Definition von „heiß“ mittels einer Sigmoidfunktion ab ca. 30 °C soll andeuten, dass es möglich wäre den Einfluss von Klimaanlage gesondert zu behandeln. In diesem Temperaturbereich über 20 °C sind keine Messdaten vorhanden und der Anteil von Klimageräten ist nicht erfasst. Der Einsatz von Elektrowärme bei diesen Temperaturen wird kategorisch durch das Regelwerk ausgeschlossen.

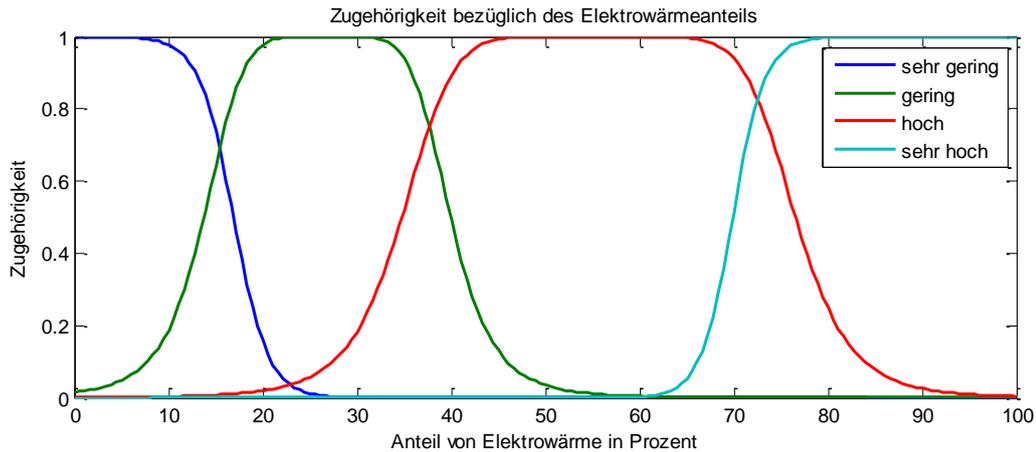


Abbildung 27: Zugehörigkeitsfunktionen Bezüglich des Anteils an Elektrowärme.

Die Anteile an Elektrowärme in Abzweig werden in Abbildung 27 hinsichtlich der vorhandenen Messdaten aufgeteilt.

Ist der Anteil im Prozentbereich zwischen 10 und 20 Prozent so wird von keiner signifikanten Beeinflussung durch Elektrowärme ausgegangen. Dies wird daher als „sehr gering“ bezeichnet. In Tabelle 10 im vorigen Kapitel 3.4.1 betrifft dies mehr als die Hälfte der dargestellten Ausfälle. In einigen Messungen kommt es trotz eines geringen Elektrowärmeanteils zu einer ausgeprägten Leistungsüberhöhung. Als Ursache wird in diesen Fällen nicht der vorherrschende Elektrowärmeanteil vermutet.

Ab einem Anteil von ca. 80 Prozent wird dieser als „sehr hoch“ angesehen. Bei den vorhandenen Messdaten trifft dies auf Messung Nr. 15 aus Tabelle 8 zu.

Zwischen diesen beiden Randbereichen gibt es eine bezüglich der Grenzwerte eher willkürliche Aufteilung in „gering“ und „hoch“. Die Darstellung soll kein Maß über eine statistische Verbreitung solcher Heizsysteme bedeuten.

Bezüglich der Ausgangswerte ist eine graphische Darstellung der Zugehörigkeitsfunktionen bei Expertensystemen vom Typ „Sugeno“ durch die verwendete Toolbox nicht vorgesehen. Die gewählten Werte sind daher in Tabelle 12 dargestellt.

Klassifizierung Ausgangsamplitude	Amplituden		
	p.u.	p.u.	p.u.
	$A_{1Sek}$	$A_{500Sek}$	$A_{1000Sek}$
"unverändert"	1	1	1
"kaum überhöht"	1.25	1.15	1.1
"sehr leicht überhöht"	0.15	1.3	1.3
"leicht überhöht"	2	1.5	1.5
"überhöht"	2.5	1.8	1.8
"stark überhöht"	3	2	2
"sehr stark überhöht"	4	2.5	2.3

Tabelle 12: Definition der gewählten Begriffe um die Amplitudenüberhöhung zu beschreiben. Durch verschiedenen Definitionsbereichen für einzelne Stützstellen wird eine genauere Abstufung erreicht. Die Erstellung dieser Funktionen ist exemplarisch für eine Amplitude in Abbildung 30 dargestellt.

### 3.4.4 Erstelltes Initialregelwerk

Die Notwendigkeit ein solches Regelwerk erstellen zu müssen kann als Nachteil der Methode angesehen werden, da Vorwissen notwendig ist.

- Das Regelwerk soll lediglich eine Abschätzung durch betrachtete Parameter ermöglichen.
- Die Grundstruktur wie sie Abbildung 9 dargestellt ist wird bezüglich der Verbindung einzelner Knotenpunkte festgelegt. Wird bei der Erstellung ein in der Realität existierender Zusammenhang nicht durch eine Verbindung nachgebildet, so kann dieser bei begrenzter Anzahl von Trainingsdaten später nicht hinzugefügt werden. Umgekehrt zieht das Expertensystem falsche Schlussfolgerungen wenn Beziehungen zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen unterstellt werden welche nicht in der Realität existieren.
- Die Erstellung dieses Regelwerkes kann nur im Hinblick auf vorhandene Messdaten und vermutete Tendenzen erfolgen.

Das Regelwerk in Abbildung 28 stammt direkt aus dem MatLab Kommandofenster.

```
>> showrule(c1pu1,1:7,'verbose','deutsch')

ans =

1. Wenn (Ausfalldauer ist kurz) dann (Amplitude 1 sek. nach Zuschaltung ist unverändert) (1)

2. Wenn (Ausfalldauer ist nicht kurz) und (Umgebungstemperatur ist warm) und (Prozentsatz Elektroheizung ist sehr gering) dann (Amplitude 1 sek. nach Zuschaltung ist kaum überhöht) (1)

3. Wenn (Ausfalldauer ist nicht kurz) und (Umgebungstemperatur ist warm) und (Prozentsatz Elektroheizung ist sehr gering) dann (Amplitude 1 sek. nach Zuschaltung ist sehr leicht überhöht) (1)

4. Wenn (Ausfalldauer ist lang) und (Umgebungstemperatur ist warm) und (Prozentsatz Elektroheizung ist sehr gering) dann (Amplitude 1 sek. nach Zuschaltung ist leicht überhöht) (1)

5. Wenn (Ausfalldauer ist lang) und (Umgebungstemperatur ist warm) und (Prozentsatz Elektroheizung ist gering) dann (Amplitude 1 sek. nach Zuschaltung ist überhöht) (1)

6. Wenn (Ausfalldauer ist sehr lang) und (Umgebungstemperatur ist kalt) und (Prozentsatz Elektroheizung ist hoch) dann (Amplitude 1 sek. nach Zuschaltung ist stark überhöht) (1)

7. Wenn (Ausfalldauer ist sehr lang) und (Umgebungstemperatur ist kalt) und (Prozentsatz Elektroheizung ist sehr hoch) dann (Amplitude 1 sek. nach Zuschaltung ist sehr stark überhöht) (1)
```

**Abbildung 28: Erstelltes Initialregelwerk aus dem MatLab Kommandofenster in verbaler Form.**

Damit steht ein Initialregelwerk welches über den Trainingsalgorithmus adaptiert werden kann zur Verfügung. Die Abschätzung am Ausgang des Systems in erfolgt zunächst Aufgrund dieses Regelwerkes. Dies ist in Kapitel 4.1.2 für ausgesuchte Eingangsdaten dargestellt. Inwiefern die zu Grunde liegenden Annahmen durch das Training mit den Messdaten bestätigt oder widerlegt werden wird in Kapitel 5 diskutiert.

### 3.5 Realisierung in MatLab

#### 3.5.1 Beschreibung der ANFIS-Toolbox

In diesem Kapitel sind einige Aspekte, die sich durch die verwendete Software ergeben dargestellt. Für AnwenderInnen ist es möglich über ein integriertes GUI die Gestalt von Zugehörigkeitsfunktionen sowie die Verbindung von Knoten durch verbal formulierte Regeln wie in Abbildung 29 zu erstellen. Im Rahmen der Arbeit wird dies durch ein Skript bewirkt, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Die Erstellung des Regelwerkes über die graphische Oberfläche führt zu einer Matrix welches dieses enthält.

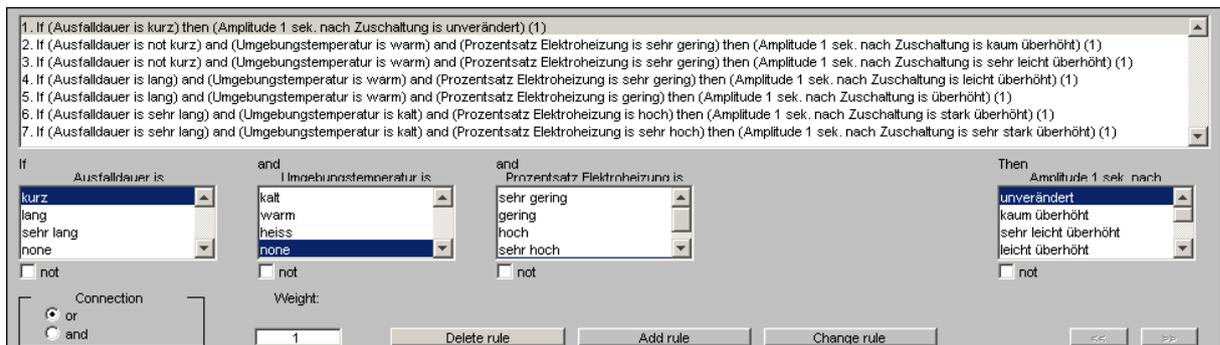


Abbildung 29: Erstellung des Regelwerkes über das ANFIS GUI.

Durch die Verwendung der ANFIS-Toolbox ergeben sich Randbedingungen auf die nun eingegangen wird. Diese sind in der MatLab Dokumentation angeführt oder werden durch Rückmeldungen des MatLab Kommandofensters ausgegeben. Das erstellte Initialregelwerk kann in MatLab auf verschiedene Varianten dargestellt werden, z.B. durch verbale Ausgabe, in Matrixform sowie als graphische Darstellung durch mehrdimensionale Funktionen. In Kapitel 4.1.1 sind Teile dieses Regelwerkes vor und nach dem Training graphisch dargestellt.

Für jeden Ausgangswert in p.u. gibt es genau eine Regel die auf diesen Wert verweist. Es ist nicht möglich, dass mehrere Regeln auf einen Ausgangswert zeigen. Dies wird als „rule sharing“ bezeichnet. In der ANFIS Toolbox ist dies nicht möglich. Um auszudrücken, dass mehrere Bedingungen unabhängig voneinander zu einer Konsequenz führen könnten diese durch ein logisches „oder“ miteinander verknüpft werden. Sollen mehrere logische „und“ verknüpfte Bedingungen einen Ausgangswert liefern ergibt sich eine Einschränkung. Es kann Abhilfe geschaffen werden indem ein Wert welcher eine sehr geringe Abweichung in einer niedrigen Dezimale zeigt erstellt wird. Dadurch kann die Regel hinterlegt werden ohne die Schätzung wesentlich zu beeinflussen.

Für adaptive Expertensysteme erlaubt die MatLab ANFIS Toolbox nur die Verwendung des „Sugeno“ Typ. Gemäß Kapitel 3.1.2 bedeutet das konstante Funktionen am Ausgang wie in Abbildung 12 dargestellt. Dies hat den Nachteil, dass für die Erstellung des Systems konkrete Zahlenwerte festgelegt werden müssen. Die Staffelung in Tabelle 12 erfolgt dabei im Hinblick auf in den Messdaten enthaltene Amplitudenwerte. In Abbildung 28 ist die Erstellung dieser Ausgangszugehörigkeitsfunktionen für das erste Expertensystem dargestellt. Gemäß den Erwartungen aus der Literaturrecherche wird ein Bereich von 1 p.u. bis 4 p.u. festgelegt.

```

clpu1 = addvar(clpu1, 'output', 'Amplitude 1 sek. nach Zuschaltung', [1 4]);
clpu1 = addmf(clpu1, 'output', 1, 'unverändert', 'constant', [1]);
clpu1 = addmf(clpu1, 'output', 1, 'kaum überhöht', 'constant', [1.25]);
clpu1 = addmf(clpu1, 'output', 1, 'sehr leicht überhöht', 'constant', [1.5]);
clpu1 = addmf(clpu1, 'output', 1, 'leicht überhöht', 'constant', [2]);
clpu1 = addmf(clpu1, 'output', 1, 'überhöht', 'constant', [2.5]);
clpu1 = addmf(clpu1, 'output', 1, 'stark überhöht', 'constant', [3]);
clpu1 = addmf(clpu1, 'output', 1, 'sehr stark überhöht', 'constant', [4]);

```

Abbildung 30: Staffelung von Ausgangsamplituden für die erste Stützstelle der Ausgleichsfunktion.

Die Matrix welche beim anschließenden Training des Expertensystems die Trainingsdaten enthält, ist in eine definierte Form zu bringen. Dabei sind folgende Bedingungen einzuhalten.

- Alle Zeilen sind jeweils voneinander unabhängige Sets an Mess- und Ausfallsdaten.
- Alle Spalten außer der letzten sind die Eingangsdaten (Ausfallsparameter).
- Die letzte Spalte beinhaltet die Ausgangsdaten (Amplitudenwerte).

21.0	3.50	10.00	1.48
67.0	9.00	10.00	1.26
5.0	4.00	0.00	1.00
2.0	15.00	0.00	1.05
5.0	19.00	2.00	0.95
148.0	19.00	1.00	1.95
108.0	20.00	10.00	2.50
42.0	16.00	15.00	1.43
154.0	7.00	10.00	1.55
154.0	18.00	5.00	2.22
182.0	7.00	5.00	2.50
238.0	0.00	30.00	1.80
117.0	14.00	80.00	3.50
299.0	8.00	40.00	1.83

Abbildung 31: Beispielmatrix mit den Trainingsdaten für das erste Expertensystem clpu1. Blau markiert sind Eingangsdaten, Orange markiert Ausgangsdaten. Beim Trainingsvorgang stellt die gesamte Matrix Eingangsdaten dar.

In Abbildung 31 sind in der ersten Spalte die Ausfallsdauern, in der zweiten die Umgebungstemperaturen und in der dritten die Prozentanteile an Elektrowärme der Ausfälle angeführt. Jede Zeile repräsentiert einen Ausfall. In der vierten Spalte ist die Amplitude der ersten Stützstelle jedes Ausfalls angeführt. Es gibt für jede Stützstelle eine Matrix, wobei sich diese Matrizen nur durch die Amplitudenwerte unterscheiden. Eine Forderung aus der ANFIS-Toolbox ist, dass die Anzahl der Zeilen mindestens der Anzahl der Spalten entsprechen muss.

### 3.5.2 Weitere Einstellungen und Parameter

Das Verhalten des Expertensystems kann durch die Parameter in Abbildung 32 beeinflusst werden. Damit können je nach Problemtyp Anpassungen durchgeführt werden.

```

fisName = 'clpu';
fisType = 'sugeno';
andMethod = 'prod';
orMethod = 'probor';
impMethod = 'prod';
aggMethod = 'sum';
defuzzMethod = 'wtaver';
  
```

**Abbildung 32: Parameter bei Erstellung der Expertensysteme.**

Die Wahl des „Sugeno“ Typs ist Voraussetzung um ein Training durchführen zu können. Die Parameter „andMethod“, „orMethod“ sowie „impMethod“ und „aggMethod“ bezeichnen die Realisierung der Implikation von Aussagen im Regelwerk. Die „defuzzification“ erfolgt in Form eines gewichteten Mittelwertes „wtaver“. Wie unter Kapitel 3.1.2 in Abbildung 12 angedeutet ist damit die Auswahl von Einzelimpulsen realisiert. Diese sind mit unterschiedlichsten Gewichtungen bewertet. Beim anschließenden Training werden diese Gewichte adaptiert. Für das Training mit Messdaten kann durch die Parameter in Abbildung 33 bestimmt werden, wie stark diese in das System eingehen. Der in [9] beschriebene Effekt des Übertrainings mit Eingangsdaten soll unbedingt vermieden werden. Dies geschieht durch Reduktion der Trainingsepochen auf den Wert von 3 gemäß Abbildung 33.

```

% trnOpt(1): training epoch number (default: 10)
% trnOpt(2): training error goal (default: 0)
% trnOpt(3): initial step size (default: 0.01)
% trnOpt(4): step size decrease rate (default: 0.9)
% trnOpt(5): step size increase rate (default: 1.1)
trnOpt(1) = 3;
trnOpt(2) = 0.0015;
trnOpt(3) = 0.01;
trnOpt(4) = 0.9;
trnOpt(5) = 1.1;
  
```

**Abbildung 33: Parameter beim Training des Expertensystems mit Angabe von Standardwerten.**

Über die genaue Auswirkung dieser Parameter in der MatLab ANFIS Toolbox kann keine nähere Aussage getroffen werden. Die Adaption des Regelwerkes erfolgt durch die Anzahl der Trainingsepochen. Diese Kennzahl legt fest wie oft der Trainingsvorgang wiederholt wird bis die gewünschte Fehlerschranke unterschritten wird. Dadurch kann festgelegt werden wie stark das Regelwerk durch die Messdaten beeinflusst wird. In Abbildung 33 ist dies als trnOpt(1) dargestellt. Die Fehlerschranke trnOpt(2) als weiteres Abbruchkriterium für den Algorithmus wird zudem aus Gründen der Rechenzeit erhöht. Durch Variation dieser Parameter kann sich grundverschiedenes Verhalten nach dem Trainingsvorgang zeigen. Mit den Einstellungen in Abbildung 33 wird folgender Kompromiss gewählt.

- Reproduktionsfähigkeit von Datensätzen.
- Fähigkeit zur Generalisierung von Aussagen.

Die Reaktion des Systems auf ausgesuchte Eingangsdaten ist im Folgenden Kapitel 4 Ergebnisse dargestellt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Untersuchungen hinsichtlich statischer Lastdiversität

Als Ergebnisse dieser Masterarbeit werden sowohl das nach dem Training resultierende Regelwerk, als auch die Antwort des Expertensystems auf Eingangsgrößen erachtet. Die Ausführungen zu den erzielten Resultaten beziehen sich auf Beobachtungen innerhalb vorhandener Messdaten. Ob die erzielten Resultate für die Untersuchung des Sachverhaltes „cold load pickup“ tatsächlich aussagekräftig und ausreichend sind, wird in Kapitel 5 Diskussion diskutiert.

Zu den Ergebnissen gehört daher:

- Das erstellte Initialregelwerk vor dem Training in graphischer Darstellung.
- Das erstellte Initialregelwerk nach dem Training in graphischer Darstellung.
- Die Reaktion des Expertensystems auf Eingangsdatsensets:
  - vor dem Training mit Messdaten
  - nach dem Training mit Messdaten

Eingangsdatsensets bestehend aus Ausfallparametern sind dabei:

- 1- Datensätze aus der vorhandenen Sammlung von Parametern.
- 2- Kombination einzelner Parameter von Ausfällen aus der Sammlung.
- 3- Konstruierte Parameter. Diese können bezüglich ihres Wertebereichs auch außerhalb der von gesammelten Parametern liegen.

Für das Initialregelwerk soll eine Aussage getroffen werden, ob die unterstellten Zusammenhänge durch die vorhandenen Messdaten tendenziell bestätigt werden. Dies erfolgt durch Vergleich des Regelwerks vor und nach dem Trainingsvorgang. Die Reaktion des Expertensystems vor dem Trainingsvorgang zeigt, ob das Initialregelwerk im Hinblick auf vorhandene Messdaten erstellt wurde. Nach dem Trainingsvorgang ist die Reaktion auf Eingangparameter gemäß Punkt 1 ein Maß für die Fähigkeit des Expertensystems, vorhandene Datensätze zu reproduzieren. Ein Vergleich der ausgegebenen Resultate des Expertensystems mit den vorhandenen Messdaten ist in diesen Fällen möglich.

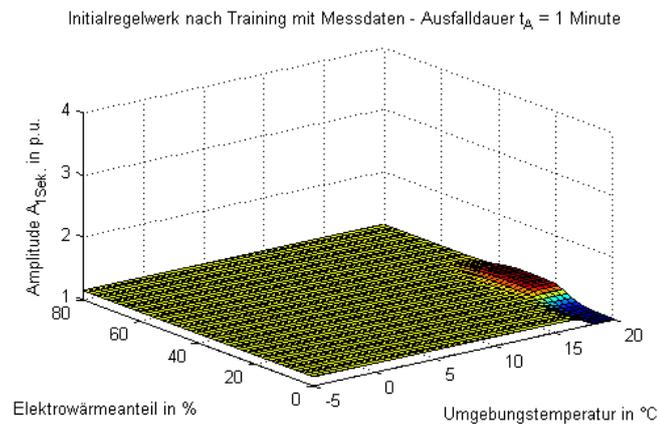
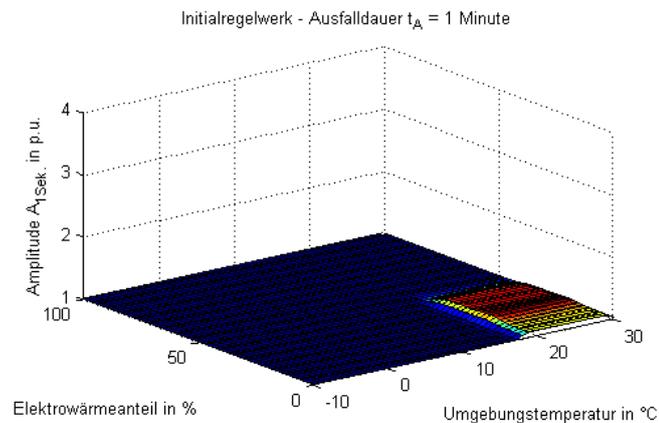
Bezüglich der Punkte 2 und 3 ist eine solche Gegenüberstellung der Resultate mit Messdaten nicht möglich, da keine historischen Messdaten dazu vorhanden sind. Es soll untersucht werden, wie das System auf diese Situation reagiert. Dies ist ein Maß für die Kombinationsfähigkeit bzw. Extrapolationsfähigkeit des Expertensystems.

Eine Variation der im vorigen Kapitel 3.5.2 in Abbildung 33 dargestellten Trainingsparameter wurde nur beim Entwurf des Expertensystems durchgeführt. Da diese die Resultate direkt beeinflussen, wurden sie für die Auswertung aller hier dargestellten Resultate in weiterer Folge auf konstanten Werten belassen. Diese Werte sind in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.

### 4.1.1 Initialregelwerk vor und nach dem Training mit Messdaten

Jede Eingangsvariable stellt eine Dimension in der horizontalen Ebene dar. Die Ausgangsgröße  $A_{1\text{Sek.}}$  ist durch die Ordinate dargestellt. Da drei Eingangsgrößen zur Verfügung stehen und nur eine zweidimensionale Fläche zur Verfügung steht, muss die dritte Variable für jede Darstellung auf einen definierten Wert festgehalten werden. Dieser ist im Diagrammtitel angeführt. Um darzustellen, wie sich die Gestalt des Regelwerkes mit der dritten Eingangsvariable ändert, wird das Regelwerk jeweils für steigende Werte dieser geplottet. Alle folgenden Darstellungen beziehen sich auf das Expertensystem „clpu1“ durch an der ersten Stützstelle  $A_{1\text{Sek.}}$  des Zuschaltstroms.

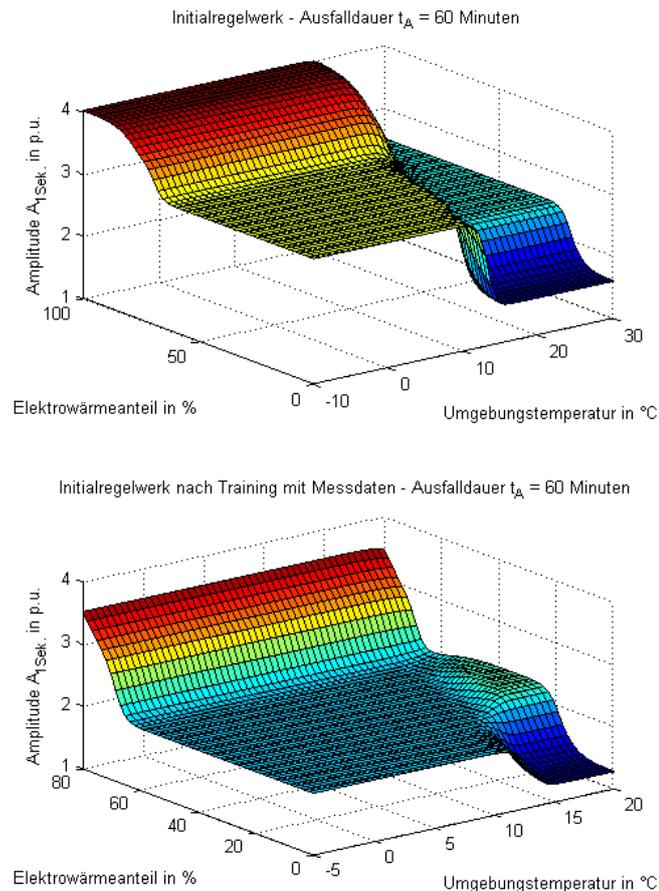
#### 1. Regelwerk für eine Ausfalldauer $t_A = 1$ Minute.



**Abbildung 34: Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude von Umgebungstemperatur in °C und Elektrowärme in Prozent. Die Ausfalldauer wird auf den Wert  $t_A = 1$  Minute festgehalten.**

Bei „kurzer“ Ausfalldauer kommt es entsprechend den Erwartungen unabhängig vom Elektrowärmeanteil oder der Umgebungstemperatur zu keiner Anhebung der Amplitude. Die geringe Überhöhung von ca. 1.1 p.u. sowie der etwas abgesenkte Bereich für Temperaturen zwischen 15 °C und 20 °C kommen durch das Training mit Messdaten zustande.

## 2. Regelwerk für eine Ausfalldauer $t_A = 60$ Minuten.

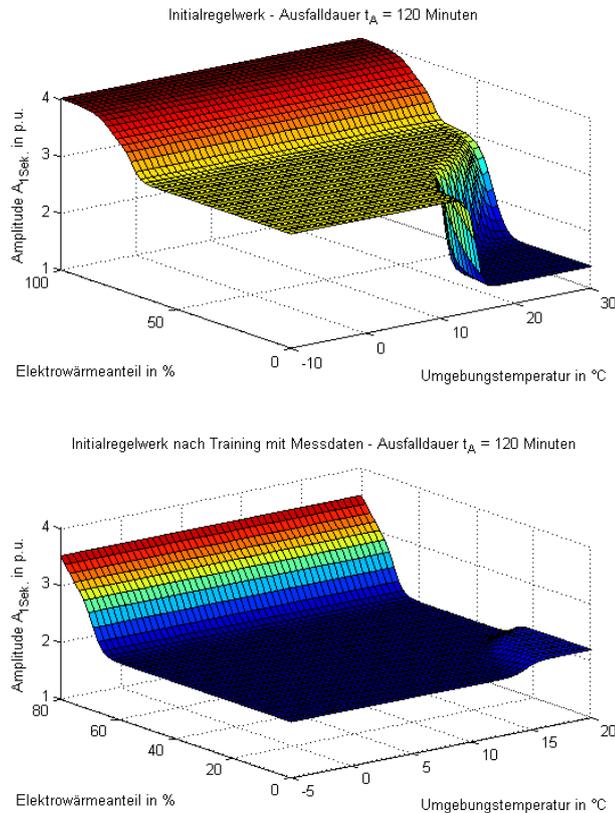


**Abbildung 35: Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude von Umgebungstemperatur in °C und Elektrowärme in Prozent. Die Ausfalldauer wird auf den Wert  $t_A = 60$  Minuten festgehalten.**

In Abbildung 35 zeigt sich eine Bestätigung der Annahme, dass die Amplitude des Zuschaltstromes mit zunehmender Temperatur und abnehmendem Elektrowärmeanteil abnimmt. Bezüglich der Achsenskalierung kann das trainierte Regelwerk nur bis 80 % Elektrowärme und 20 °C Umgebungstemperatur geplottet werden. Das liegt daran, dass der höchste Elektrowärmeanteil in den Trainingsdaten 80 % aus Messung Nr. 13 in Tabelle 13. beträgt und die Temperatur von 20 °C in keinem Datensatz überschritten wurde. Dadurch wird der darstellbare Bereich des trainierten Regelwerks automatisch mit 80 % bzw. 20 °C als Maximalwert begrenzt. Eine Auswertung des Expertensystems über diese Grenzen ist aber möglich, z.B. für eine Temperatur von 28 °C (Abbildung 47).

Im Initialregelwerk in Abbildung 35 wird für einen Elektrowärmeanteil von 80 % mit zunehmender Umgebungstemperatur eine Abnahme der Amplitude erwartet. Durch weitere Messdaten mit hohem Elektrowärmeanteil kann dieser Bereich für steigende Temperaturen auch über 20 °C näher charakterisiert werden. Der konstante Bereich, welcher als Fläche in Abbildung 35 dargestellt ist, ergibt sich durch lineare Interpolation des Expertensystems.

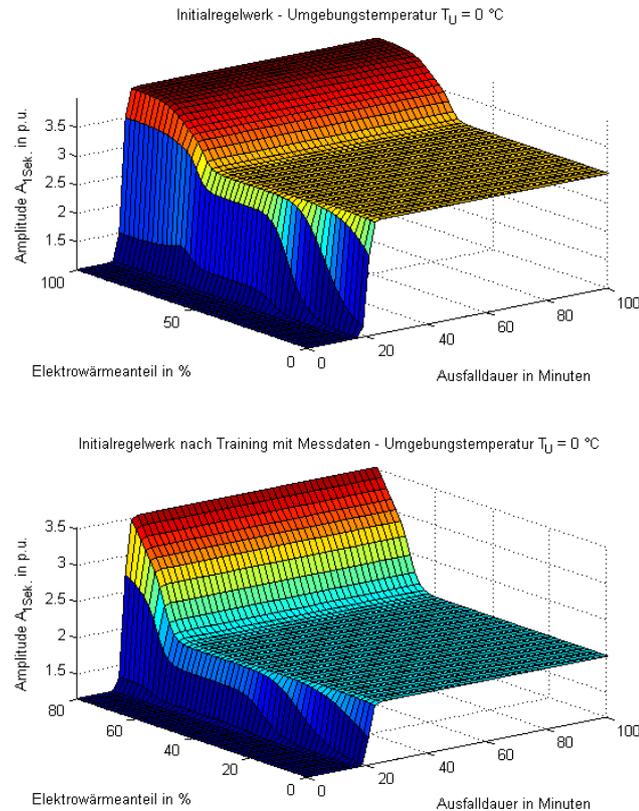
### 3. Regelwerk für eine Ausfalldauer $t_A = 120$ Minuten.



**Abbildung 36: Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude von Umgebungstemperatur in °C und Elektrowärme in Prozent. Die Ausfalldauer wird auf den Wert  $t_A = 120$  Minuten festgehalten.**

Im Vergleich zum Initialregelwerk ergeben sich für das trainierte Regelwerk in Abbildung 36 höhere Amplituden bei Elektrowärmeanteilen unter 20 % und Temperaturen über 15 °C. In diesem Bereich kommt es zu einem Anstieg der Amplitude im trainierten Regelwerk gegenüber der Darstellung in Abbildung 35 für 60 Minuten Ausfalldauer. Diese Anhebung kann ihre Ursache in der nun doppelte Ausfalldauer im Vergleich zu Abbildung 35 haben. Auffällig ist zudem, dass der im Initialregelwerk in Abbildung 36 als gelbe Fläche dargestellte Bereich bei etwa einem Wert von 3 p.u. nach dem Training mit Messdaten auf 2 p.u. abgesenkt wird. Die Begründung dafür liegt in der Erstellung des Initialregelwerks, dieses kann nicht im Hinblick auf alle Aspekte der Messdaten erstellt werden.

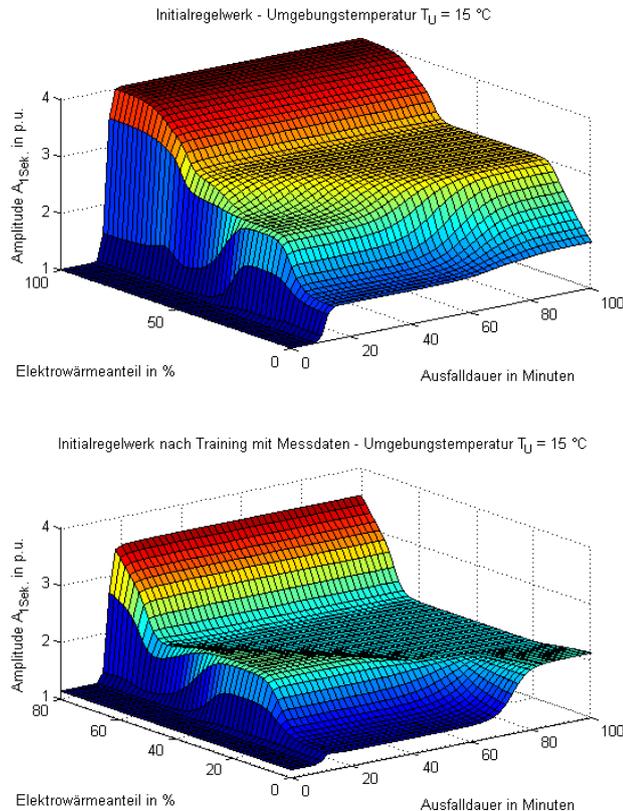
#### 4. Regelwerk für eine Umgebungstemperatur $T_U = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Abbildung 37: Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude von Ausfalldauer und Elektrowärme in Prozent. Die Umgebungstemperatur wird auf den Wert  $T_U = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  festgehalten.**

Bezüglich der Ausfalldauer ist die Darstellung eines fließenden Übergangs zwischen „kurzen“ und „langen“ Ausfällen aus der Betrachtung von Messdaten in Tabelle 8 nicht eindeutig möglich. Es zeichnet sich in Abbildung 37 aber ein Profil für den Bereich 0 % Elektrowärme und steigender Ausfalldauer ab. Hier kommt es zu einem Anstieg der Amplitude auf ca. 2 p.u. nach etwa 20 Minuten. Die Annahme, dass bei längeren Ausfalldauern und höheren Anteilen an Elektrowärme die Amplitudenüberhöhung zunimmt, wird durch das Training mit Messdaten bestätigt. Dass die Amplitude selbst bei hohen Elektrowärmeanteilen aber nur „kurzer“ Ausfalldauer unter 20 Minuten auf den Wert von 1 p.u. bleibt erscheint plausibel. Die thermischen Zeitkonstanten der betrachteten Systeme werden über dieser Zeitspanne eingeschätzt. Der im Regelwerk nach Training als Fläche dargestellte Bereich mit Amplitudenwerte bei 2 p.u. würde auf eine Unabhängigkeit vom Elektrowärmeanteil und der Ausfalldauer hindeuten. Tatsächlich sind hier jedoch keine weiteren Messdaten für eine Umgebungstemperatur  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  vorhanden. Daher wird dieser Bereich ebenso als konstante Funktion durch eine Fläche dargestellt. In Abhängigkeit von der Ausfalldauer wird ein weiterer Anstieg für längere Ausfalldauern im Bereich von Stunden erwartet. Die Darstellung endet bei 100 Minuten, da es für vorhandene Daten zu keinen weiteren Überhöhungen kommt.

## 5. Regelwerk für eine Umgebungstemperatur $T_U = 15\text{ °C}$ .



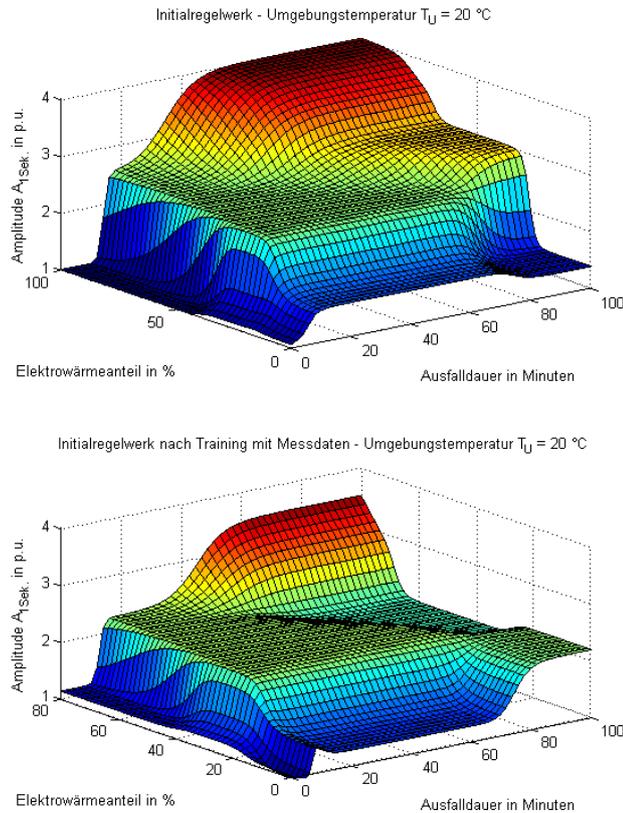
**Abbildung 38: Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude von Ausfalldauer und Elektrowärme in Prozent. Die Umgebungstemperatur wird auf den Wert  $T_U = 15\text{ °C}$  festgehalten.**

Wird in Abbildung 38 bei einer Umgebungstemperatur von  $15\text{ °C}$  die Ausfalldauer und der Elektrowärmeanteil steigen, ergibt sich eine Zunahme der Amplitude. Dies wird im Initialregelwerk festgelegt und bestätigt sich durch die vorhandenen Daten nach dem Training. Im Vergleich zur vorigen Abbildung 34 ergibt sich eine feiner aufgelöste Abstufung, da eine größere Anzahl von Messdaten für den Temperaturbereich von etwa  $15\text{ °C}$  vorhanden sind als bei  $0\text{ °C}$  in Abbildung 37.

In Abbildung 38 ist für einen Elektrowärmeanteil von  $0\%$  ein Profil der Amplitude in Abhängigkeit von der Ausfalldauer sichtbar. Dabei ist hier ein erneuter Anstieg der Amplitude auf etwa  $2\text{ p.u.}$  nach  $80\text{ Minuten}$  Ausfalldauer erkennbar. Der im Initialregelwerk als Fläche dargestellte Bereich wird von ca.  $3\text{ p.u.}$  auf ca.  $2\text{ p.u.}$  nach dem Training mit Messdaten abgesenkt. Dieser wird durch das Initialregelwerk daher tendenziell überschätzt.

Beim Elektrowärmeanteil von  $80\%$  wird in Abhängigkeit von der Ausfalldauer ab  $20\text{ Minuten}$  entgegen dieser Darstellung kein konstanter Wert bei etwa  $3.5\text{ p.u.}$  erwartet. Es wird ein abgestufter, mit der Ausfalldauer steigender Verlauf der Amplitude ähnlich dem in nachfolgender Abbildung 39 diesbezüglich erwartet.

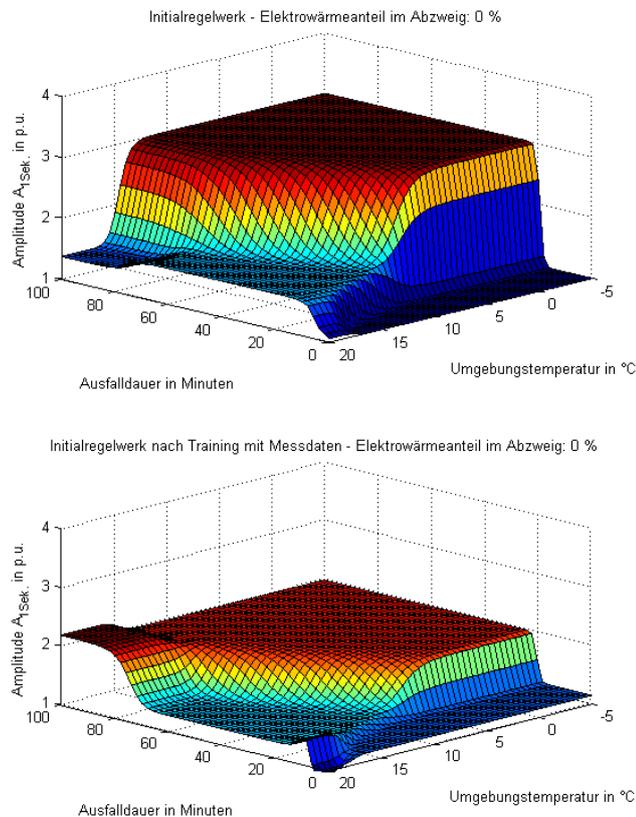
## 6. Regelwerk für eine Umgebungstemperatur $T_U = 20\text{ °C}$ .



**Abbildung 39: Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude von Ausfalldauer und Elektrowärme in Prozent. Die Umgebungstemperatur wird auf den Wert  $T_U = 20\text{ °C}$  festgehalten.**

Im Initialregelwerk in Abbildung 39 nimmt die Amplitude bei einem geringen Elektrowärmeanteil unter 20 % und steigender Ausfalldauer über einem Wert von 80 Minuten leicht auf etwa 1.5 p.u. ab. Dieser Bereich ist im Initialregelwerk unzureichend definiert, nach dem Training kommt es hier zur Anhebung der Amplitude für steigende Ausfalldauer. Im Regelwerk nach Training wird bei einem Elektrowärmeanteil von 20 % bis 60 % hingegen eine Zunahme der Amplitude für den Bereich über 80 Minuten Ausfalldauer vermutet. Ein Rückgang der Amplitude mit zunehmendem Elektrowärmeanteil ab 20 % stellt hier das Gegenteil der Annahmen aus dem Initialregelwerk dar. Als Erklärung dafür ist das Fehlen von Messdaten mit entsprechenden Verbreitungsgraden von Elektrowärme zwischen 20 % und 60 % verantwortlich.

## 7. Regelwerk für einen Elektrowärmeanteil im Abzweig von 0 %.

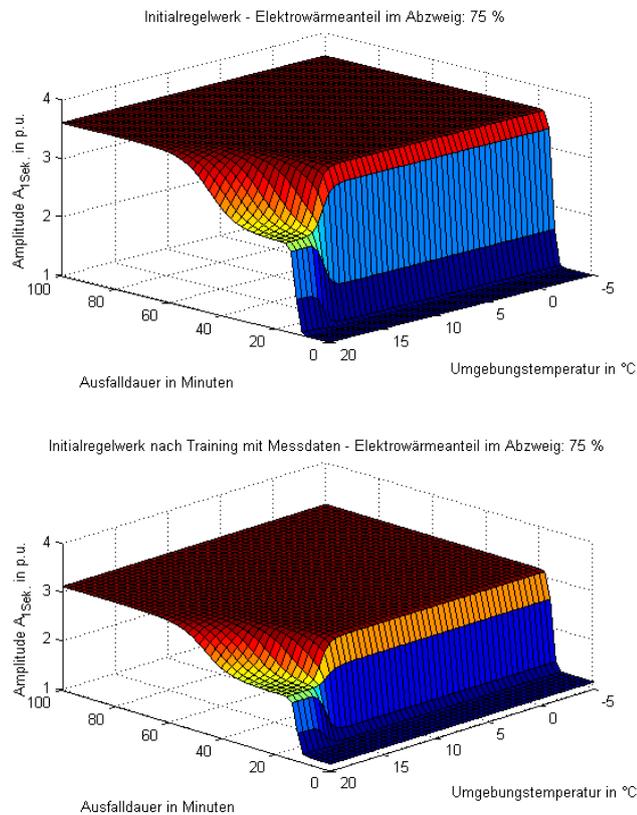


**Abbildung 40: Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude von Ausfalldauer und Umgebungstemperatur in °C. Der Elektrowärmeanteil wird auf 0 % festgehalten.**

In Abbildung 40 wird der Elektrowärmeanteil auf 0 % gehalten. Dies sollte eine allgemeine Temperaturabhängigkeit des Sachverhalts für Gebiete ohne Elektrowärmeanteil darstellen. Ab einer Ausfalldauer von 80 Minuten wird im trainierten Regelwerk in einem Temperaturbereich zwischen 15 °C und 20 °C die Amplitude auf über 2 p.u. durch die vorhandenen Messdaten angehoben. Ein Profil für die Amplitude in Abhängigkeit der Ausfalldauer für eine Umgebungstemperatur von 20 °C wird sichtbar. Für tiefere Umgebungstemperaturen sollte die Amplitude aber gemäß den Erwartungen aus dem Initialregelwerk ansteigen, und nicht von 3 p.u. auf den im Regelwerk nach dem Training dargestellten, konstanten Wert bei etwa 2 p.u. absinken. Eine weitere Abdeckung dieses Bereichs kann durch die Einbringung künftiger Messdaten erfolgen.

Für kürzere Ausfalldauern bis 20 Minuten gibt es erwartungsgemäß keine Anhebung der Amplitude.

## 8. Regelwerk für einen Elektrowärmeanteil im Abzweig von 75 %.



**Abbildung 41: Darstellung der Abhängigkeit der Amplitude von Ausfalldauer und Umgebungstemperatur in °C. Der Elektrowärmeanteil wird auf 75 % festgehalten.**

Verglichen mit dem trainierten Regelwerk aus Abbildung 40 erhöht sich in Abbildung 41 für Ausfälle ab 20 Minuten Ausfalldauer unter 15 °C Umgebungstemperatur. Die flächenförmig bei 2 p.u. und 3 p.u. dargestellte Amplitude steigt für den nun höheren Elektrowärmeanteil von 75% in Abbildung 41. Dies wird mit dem Training durch den Datensatz bei 80 % begründet. Um eine feiner aufgelöste Abstufung dieser Fläche vorzunehmen, müssten diesbezüglich weitere Messdaten vorliegen. Für eine Umgebungstemperatur von 20 °C ergibt sich bei einem Verlauf, welcher ab 60 Minuten Ausfalldauer in eine konstante Funktion bei etwa 3 p.u. übergeht. Mit sinkender Umgebungstemperatur tritt dieser Übergang zu schneller auf. In der Darstellung wird diese Fläche durch das Expertensystem interpoliert.

### 4.1.2 Abschätzung CLPU aus erstelltem Expertensystem

Die Einschätzungen bezüglich Aussagekraft werden in Kapitel 5.3 diskutiert.

#### 1- Reaktion auf vorhandene Eingangsparameter aus dem Datensatz

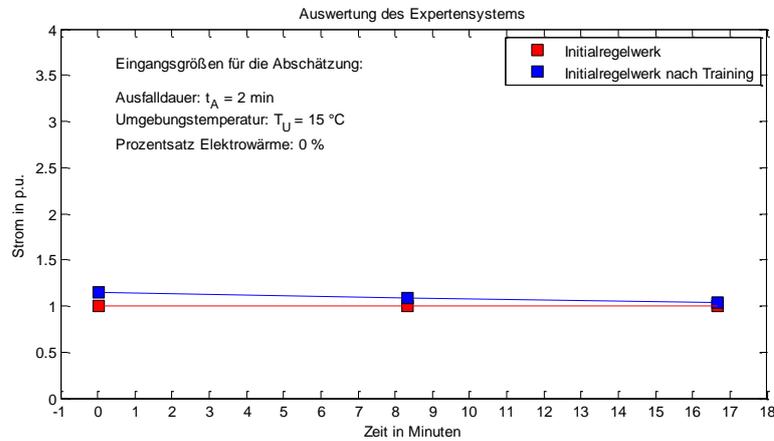


Abbildung 42: Abschätzung der Auswirkungen betrachteter Parameter.

Als Ausfallparameter in Abbildung 42 werden jene der tatsächlich durchgeführten Messung Nr.1 gemäß Tabelle 8 herangezogen. Die Abschätzung, dass es zu keiner Anhebung der Amplitude bei „kurzen“ Ausfällen kommt, zeigt sich in allen vorhandenen Messdaten.

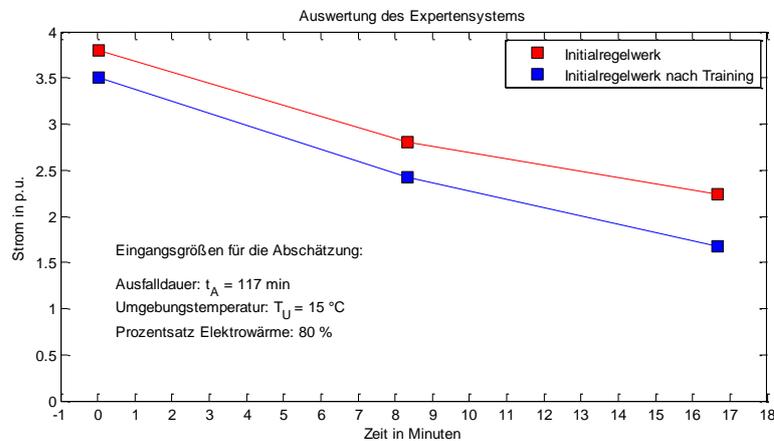


Abbildung 43: Abschätzung der Auswirkungen betrachteter Parameter.

Als Ausfallparameter in Abbildung 43 werden jene aus der Messung zu Ausfall Nr. 15 gemäß Tabelle 8 verwendet. Nach dem Training mit den Messdaten zeigt sich eine tendenzielle Annäherung an den Verlauf eines tatsächlich gemessenen Zuschaltstroms in Abbildung 15. Nach dem Training mit Messdaten werden die Amplitudenwerte reduziert.

## 2- Reaktion auf Kombination aus verschiedenen vorhandenen Parametern

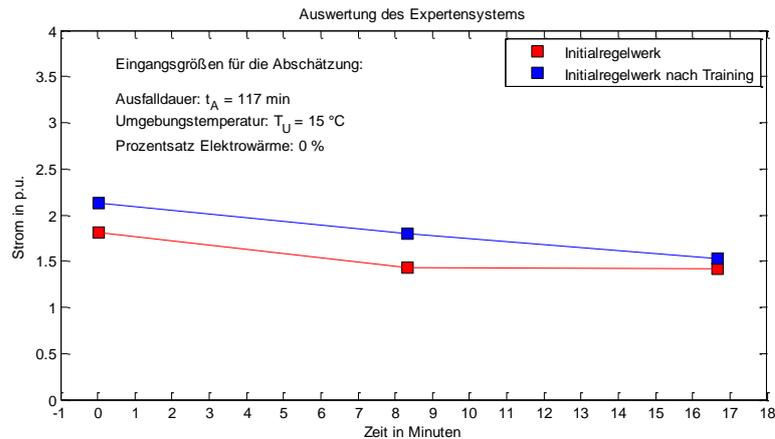


Abbildung 44: Abschätzung der Auswirkungen betrachteter Parameter.

Abbildung 44 zeigt die Abschätzung aufgrund einer Kombination der Eingangsparameter aus den beiden vorigen Ausfällen. Bei gleicher Ausfalldauer und Umgebungstemperatur wie in Abbildung 43 wird der Elektrowärmeanteil gemäß Abbildung 42 auf null verringert. Die erwartete Tendenz einer Verringerung der Amplituden gegenüber Abbildung 43 ist eingetreten.

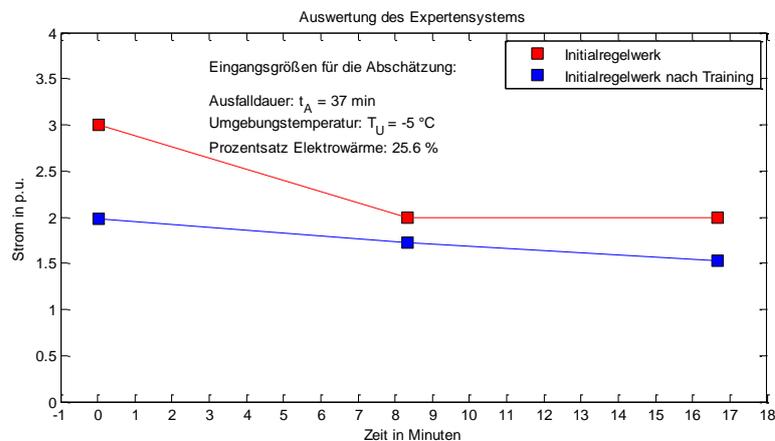


Abbildung 45: Abschätzung der Auswirkungen betrachteter Parameter.

Abbildung 45 stellt eine Kombination der Parameter von Ausfall Nr. 11 (Ausfalldauer, Elektrowärmeanteil) und Nr. 1 (Temperatur) aus Tabelle 8 dar. Ein direkter Vergleich mit Messdaten ist nicht möglich, es sind lediglich Messdaten zur den vorhandenen Kombinationen von Eingangsparametern vorhanden. Es zeigen sich aber tendenziell höhere Amplitudenwerte verglichen mit denen des vorhandenen Ausfalls Nr. 10 in Tabelle 8. Bei der geringeren Temperatur von  $-5$  °C gegenüber von  $+8$  °C für den gemessenen Ausfall erscheint diese Tendenz für den Verlauf nach dem Training mit Messdaten plausibel.

### 3- Reaktion Initialregelwerk auf willkürlich gewählte Eingangsdaten

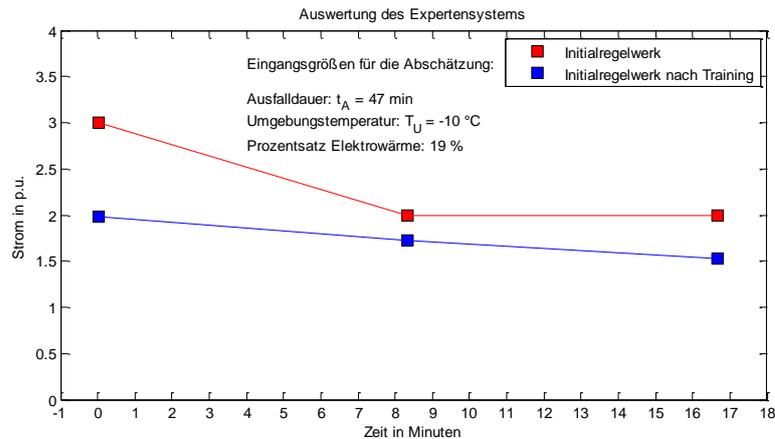


Abbildung 46: Abschätzung der Auswirkungen betrachteter Parameter.

Abbildung 46 zeigt das Resultat für einen Ausfall mit willkürlich gewählten Ausfallparametern. Die Zahlenwerte für die Eingangsdaten sind in keinem Datensatz enthalten. Die Temperatur von  $-10$  °C liegt unter dem tiefsten vorhandenen Wert von  $-5$  °C bei den durchgeführten Messungen.

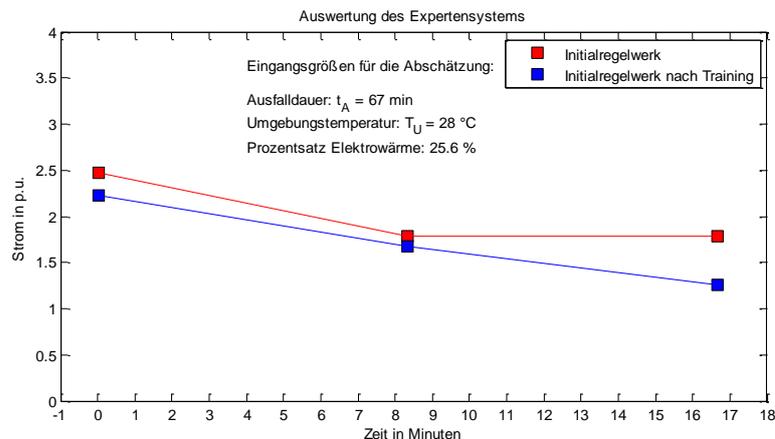


Abbildung 47: Abschätzung der Auswirkungen betrachteter Parameter.

In Abbildung 47 extrapoliert das Expertensystem für eine Temperatur von  $28$  °C die Ausgangsamplitude der Stützstellen. Dieser Wert liegt oberhalb der maximalen Temperatur von vorhandenen Daten. Das Resultat kann nicht verifiziert werden.

Diese beiden Darstellungen in Abbildung 46 und Abbildung 47 sollen zeigen, dass es prinzipiell möglich ist das Expertensystem außerhalb der Wertebereiche vorhandener Datensätze auszuwerten. Die Resultate haben aber in manchen Fällen keine physikalische Bedeutung.

## 4.2 Darstellung transienter Vorgänge

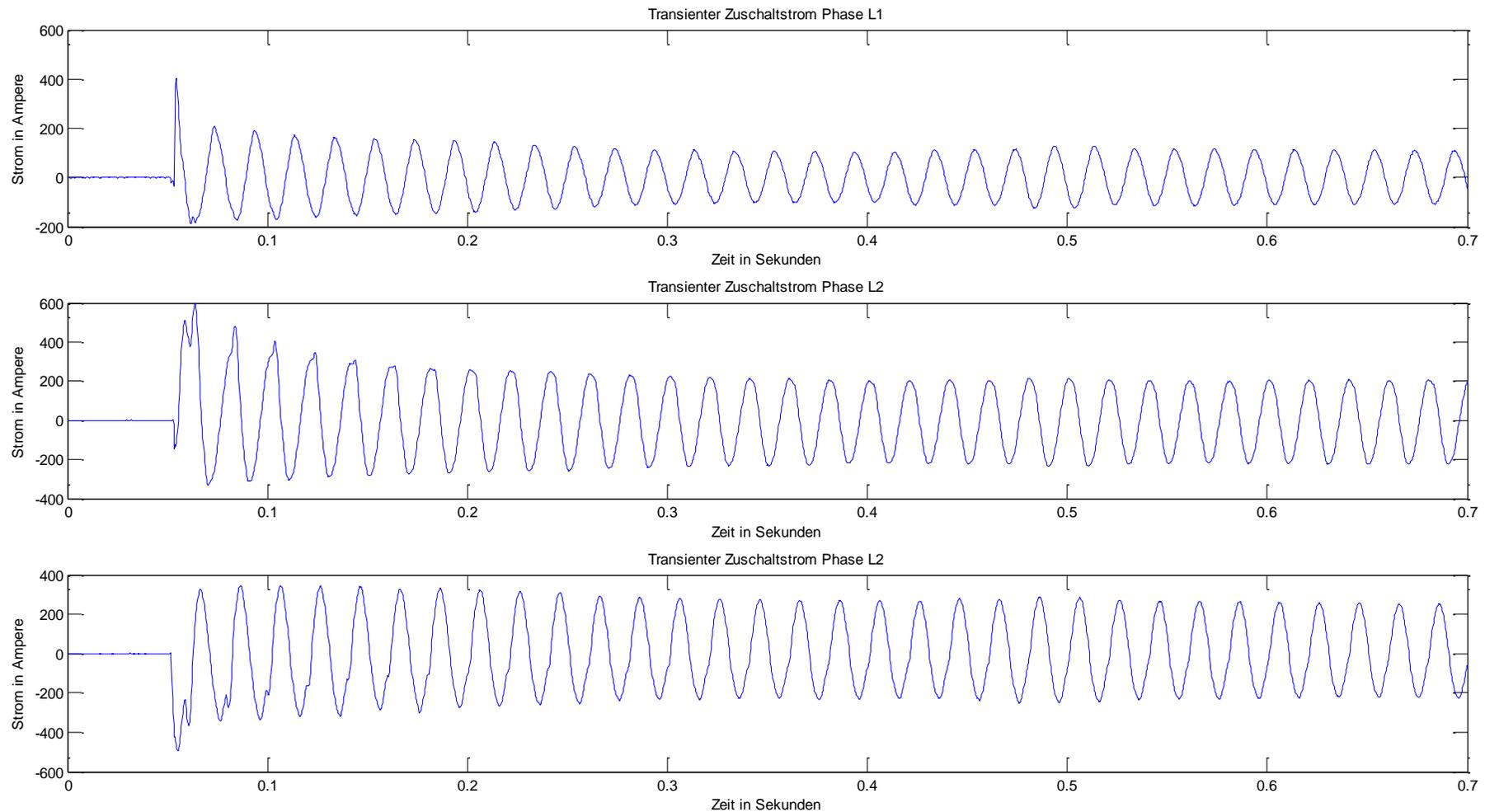
Eine Messung von transienten Zuschaltströmen erfolgt für wenige Störschriebe durch ein hochauflösendes Messsystem. Diese tasten in den vorhandenen Fällen mit einer Abtastfrequenz von  $f_s = 3200$  Hz ab. Neben den Effektivgrößen können daher auch Momentanwerte des Einschaltstroms angezeigt werden. Als wesentlicher Unterschied zeigt sich eine stärker ausgeprägte Überlagerung eines abklingenden Gleichanteils bei Strömen welche nicht im 400 V Niederspannungsnetz gemessen werden. Dies wird durch Ausgleichsvorgänge bei der Zuschaltung in Verteilnetztransformatoren begründet. Bei allen drei Phasen treten zudem unterschiedlich starke Abweichungen von der Sinusform auf.

Beim Einschaltvorgang am Niederspannungsnetz mit 400 V in Abbildung 48 kommt es zu einer geringen Anhebung des Wechselanteils nach der Zuschaltung. Diese klingt bereits nach ca. 100 - 200 ms. ab. Die Amplitude der Ströme ist verschieden stark ausgeprägt, da zu unterschiedlichen Zeitpunkten zugeschaltet wird und der Abzweig unsymmetrisch belastet ist. Diese Messung wird am Abzweig mit den Parametern aus Tabelle 13, Nr. 12 durchgeführt. Das transiente Einschaltverhalten des Niederspannungstransformators ist nicht in diesem Verlauf enthalten, da die Messung auf dessen Sekundärseite bei 400 V erfolgt.

Verglichen dazu sind in Abbildung 49 unterschiedlich stark ausgeprägte Gleichanteile zusätzlich zum Wechselanteil im Phasenstrom der einzelnen Phasen überlagert. Als physikalische Ursache für dieses Verhalten wird das Prinzip der Flusskonstanz in mehrphasigen Drehstrommaschinen vermutet. Die magnetische Flussverketzung  $\Psi$  in den Schenkeln des Drehstromtransformators kann sich nicht sprunghaft ändern. Die mit der Flussverketzung über die Windungszahlen und Frequenz verknüpften Spannungen weisen aber im Zuschaltzeitpunkt unterschiedliche Momentanwerte auf. Es kommt daher zu einem exponentiell abklingenden Gleichstromglied in den Phasen. Der Einschaltvorgang jeder einzelnen Phase hängt jeweils davon ab, ob im Spannungsnulldurchgang oder beim maximalen Augenblickswert der Spannung zugeschaltet wird. Zum Zuschaltzeitpunkt weist jede der drei Phasen bezüglich ihrer Spannung unterschiedliche Momentanwerte auf. Dadurch ist das Gleichstromglied in allen drei Phasen unterschiedlich stark ausgeprägt. Eine Beschreibung dieses Zusammenhang ist in [14] zu finden. Zusätzlich werden Maschinenparameter des zugeschalteten Transformators den Verlauf des Einschaltstroms beeinflussen. Für einen größeren Anteil an Industrie im Abzweig wird ein zunehmender Gleichanteil bei der Zuschaltung erwartet.

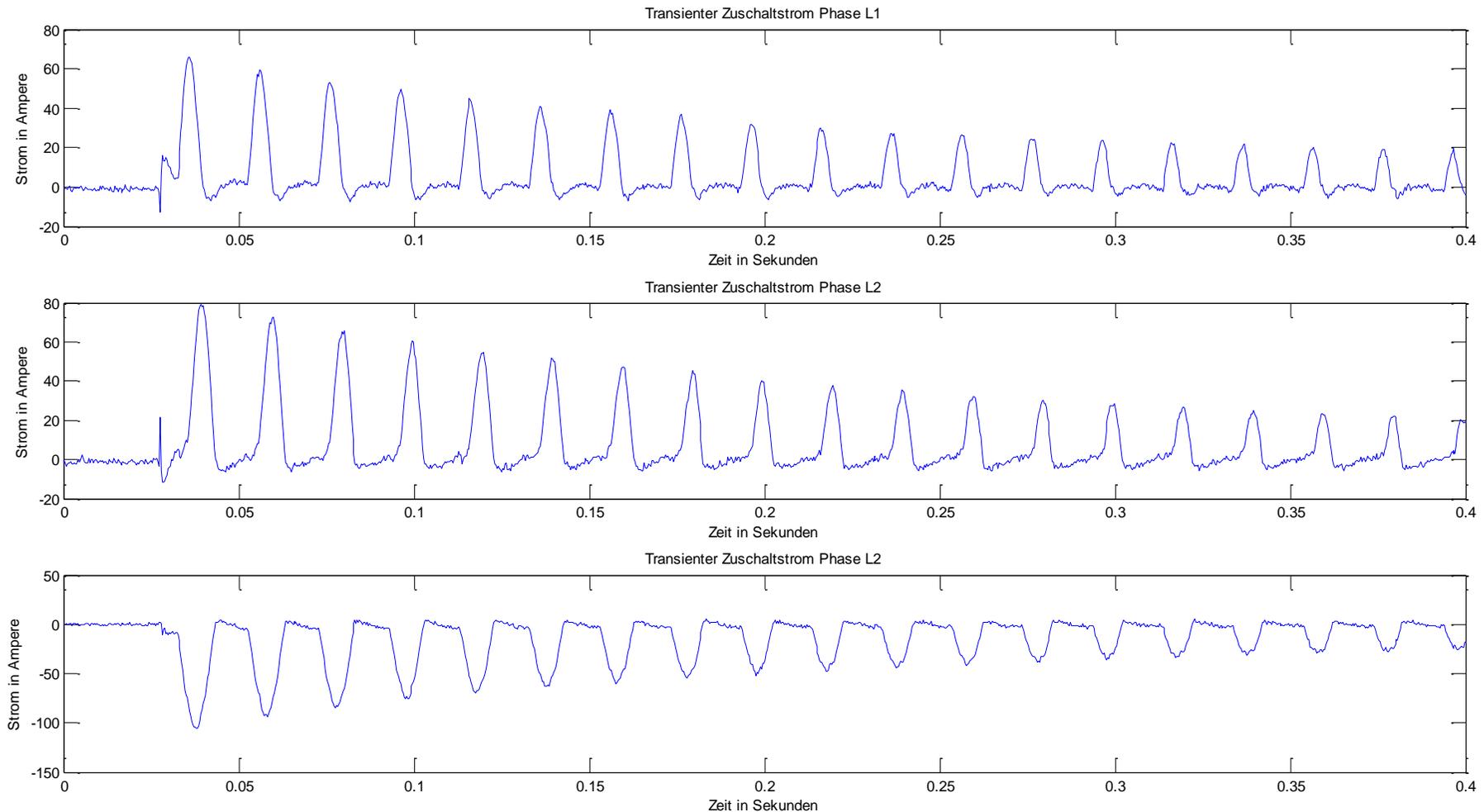
- Einschaltvorgänge und Anlaufvorgänge von größeren SM und ASM in Produktionsbetrieben.
- Einschaltvorgänge von größeren Mittelspannungstransformatoren da Anspeisung der Betriebe nicht mehr auf Niederspannungsebene.

Da keine näheren Informationen zu den jeweiligen Transformatoren bekannt sind, wird von einer weiteren Betrachtung abgesehen. Bei Betrachtung der vorhandenen, hochauflösenden Messungen konnte keine Korrelation mit Ausfallsparametern abgeleitet werden.



**Abbildung 48: Darstellung der transienten Zuschaltströme für den Ausfall Nr. 12 aus Tabelle 13. Die Betrachtung von Ausfallparametern und transienten Zuschaltströmen liefert für vorhandene Messdaten keine Anzeichen für mögliche Korrelation. Diese Messung erfolgt im 400 V Niederspannungsnetz.**

Für den in Abbildung 48 gezeigten Einschaltvorgang ergeben sich Amplituden bis zu ca. 600 A. Der Momentanwert der Amplitude ist dabei das etwa 15 – fache verglichen mit dem stationären Referenzwert aus dem Laststrom vor dem Ausfall von ca. 36.8 A.



**Abbildung 49: Darstellung der transienten Zuschaltströme für den Ausfall Nr. 9 aus Tabelle 13. Die Betrachtung von Ausfallparametern und transienten Zuschaltströmen liefert für vorhandene Messdaten keine Anzeichen für mögliche Korrelation. Diese Messung erfolgt auf 30 kV Verteilnetzebene.**

Für den in Abbildung 49 gezeigten Einschaltvorgang ergeben sich Amplituden bis ca. 100 A. Der Momentanwert der Amplitude ist dabei das etwa 7 – fache verglichen mit dem stationären Referenzwert aus dem Laststrom vor dem Ausfall von ca. 14.3 A.

## 5 Zusammenfassung, Diskussion, Ausblick

### 5.1 Zusammenfassung

**In Bezug auf vorhandene Messdaten werden folgende Schlussfolgerungen als Ergebnis der Masterarbeit gezogen:**

- Alle gemessenen Amplituden der Lastströme nach der Zuschaltung liegen im Bereich von 1 bis 4 p.u. Diese Aussage bezieht sich auf die Untersuchungen der statischen Lastdiversität durch Auswertung der Ausgleichsfunktion zu Messungen mittels Sekundenmittelwerten. Diese in Tabelle 1 angeführte Erwartung diesbezüglich aus der Literatur wird durch vorhandene Messdaten bestätigt.
- Transiente Einschaltvorgänge an Abzweigen können wie in Kapitel 4.2 dargestellt deutlich größere Einschaltamplituden hervorrufen. In Tabelle 1 ist das bis zu 50 - fache aus Quellen der Literaturrecherche angeführt. Dieser Wert wird in den Messdaten nicht erreicht, der Maximalwert liegt beim etwa 15 - fachen bei Ausfall Nr. 3 in Tabelle 14.
- Es wird festgestellt, dass alle drei betrachteten Eingangsparameter – Ausfalldauer, Umgebungstemperatur und Elektrowärmeanteil - beim vorliegenden Datensatz einen unterschiedlich starken, aber darstellbaren Einfluss auf den Zuschaltstrom haben.
- Der Einfluss der Ausfalldauer zeigt sich dabei am deutlichsten. Der Übergang von „kurzen“ zu „langen“ Ausfällen kann in Übereinstimmung mit den Erwartungen in Tabelle 8 dargestellt werden. Durch die Verteilung der Ausfalldauern von wenigen Minuten bis mehrere Stunden im vorhandenen Datensatz wird diesbezüglich von einer ausreichenden Aussagekraft ausgegangen. Eine genauere Aufteilung oder Abstufung wird hier auch bei einer größeren Anzahl an Datensätzen nicht erwartet. Bei sämtlichen „kurzen“ Unterbrechungen betrachteter Haushaltsabzweige bleibt die statische Lastdiversität nach dem Ausfall erhalten. Für die Kundengruppe der Privathaushalte erscheint dieses Verhalten plausibel. In Industrieanlagen wird gemäß [4] ein anderes Verhalten diesbezüglich erwartet.
- Für Ausfälle, welche sich über mehrere Stunden erstrecken, wird der Einfluss des Tageslastganges die Wiederherstellungsströme beeinflussen. Um diesen zu berücksichtigen müsste eine größere Anzahl von Datensätzen vorhanden sein.
- Der Einfluss der Umgebungstemperatur wird als deutlich unsicherer hinsichtlich Aussagekraft eingeschätzt. Hier müssten weitere Messdaten, auch bei Temperaturen über 20 °C betrachtet werden. Eine weite Verteilung des Temperaturbereichs für „lange“ Ausfälle ist dazu notwendig. Bei den vorhandenen Daten zeigt sich eine generelle Temperatursensitivität für konstanten Elektrowärmeanteil bei ausreichender Ausfalldauer im Regelwerk.

- Bezüglich der Wahl des Elektrowärmeanteils als Eingangsparameter ist zu sagen, dass der Einfluss durch diesen auf den Zuschaltstrom innerhalb der vorhandenen Messdaten mit Unschärfe behaftet ist. Hier müssten weiteren Messdaten bei ausreichend langen Ausfalldauern (Stunden) und ausreichend tiefen Temperaturen (unter 15 °C) bei variablem Elektrowärmeanteil vorhanden sein.  
Die Erhebung dieses Kennwertes kann zudem mit Unsicherheiten behaftet sein. Es kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob die angegebene Prozentzahl tatsächlich alle vorhandenen Technologien von Elektrowärmeanwendungen beinhaltet. Obwohl die Elektrowärme in Form der Elektrodirektheizung an Verbreitungsgrad verloren hat, wird deren Bedeutung auch weiterhin nicht zu unterschätzen sein. Gerade bei Einfamilienhäusern gewinnen Wärmepumpensysteme in verschiedenen Ausführungsformen durch attraktive Wärmezahlen zunehmend an Verbreitung. Wie weit diese im erhobenen Prozentanteil enthalten sind und sich daher auf den Zuschaltstrom auswirken kann nicht festgestellt werden.
- Eine Vorhersage des zu erwartenden Zuschaltstroms ist nur mit einer gewissen Unschärfe möglich. Da dieser Vorgang auch von nicht deterministischen Prozessen (KundInnenverhalten) abhängig ist, wird der Wiederherstellungsvorgang für jeden Abzweig als individuell angesehen.

## 5.2 Diskussion des Regelwerks des erstellten Systems

Der präsentierte Ansatz versucht den Beitrag hervorgerufen durch ausgesuchte Parameter abzuschätzen. Auffällig ist, dass vereinzelt flächenförmig ausgebildete Bereiche mit konstanten Amplitudenwerten zur Abdeckung von Eingangswerten entstehen. Bei den graphischen Darstellungen des Regelwerks sind diese sichtbar. Diese kommen durch Interpolation des Expertensystems zwischen vorhandenen Messdaten zustande. Das Regelwerk bezüglich größerer Elektrowärmeanteile ergibt sich aus nur wenigen zur Verfügung stehenden Datensätzen. Daher kann die tatsächliche Beeinflussung durch diese betrachtete Eingangsgröße nicht mit Sicherheit bestimmt werden. Da die vorhandenen Daten zwar eine Variation dieses Parameters aufweisen, oft aber andere Bedingungen nicht erfüllt sind (Ausfalldauer z.B. zu kurz), ist das Regelwerk diesbezüglich mit deutlichen Unsicherheiten behaftet. Zusätzliche Messdaten können diese Bereiche genauer abdecken.

Ein weiterer möglicher Schwachpunkt des Ansatzes liegt in der Notwendigkeit, dass zu Beginn ein Initialregelwerk durch den Autor erstellt werden muss. Obwohl die Einbringung von Vermutungen ein Vorteil ist, stellt dieser Punkt zugleich ein Risiko dar. Das Initialregelwerk legt das spätere Verhalten grundlegend fest. Werden aufgrund der betrachteten Messdaten „falsche“ Schlüsse gezogen, wird das Expertensystem keine befriedigenden Resultate liefern können. Das Training führt dann zu einer Verschlechterung der Resultate. Wird das Regelwerk im Gegensatz dazu durch die verwendete Toolbox automatisch erstellt, so ist die Einbringung von definitiv bekannten Tatsachen nicht möglich. Diese Erfahrungen zeigten sich als Grenzen bei der Entwicklung des Expertensystems.

### 5.3 Diskussion der Resultate des erstellten Systems

**Alle in Kapitel 4.1.2 erzielten Ergebnisse ergeben sich durch Auswertung des vorhandenen Regelwerks vor und nach dem Training mit Messdaten.**

Im Hinblick auf die gewählten Eingangsparameter lassen die dargestellten Resultate folgende Schlussfolgerungen zu:

**zu Punkt 1 - Reaktion auf vorhandene Eingangsparameter aus dem Datensatz.**

Wird das Expertensystem mit den Eingangsparametern zu den Messungen beaufschlagt nähern sich die Resultate aus Abbildung 42 und Abbildung 43 an die Messdaten an. Es ist nicht davon auszugehen, dass der tatsächlich gemessene Zuschaltstrom ausschließlich durch diese Parameter charakterisiert wird. Von einer gemeinsamen Darstellung der Messdaten des realen Ausfalles und diesen Resultaten wird daher in der Arbeit bewusst abgesehen

**zu Punkt 2: - Reaktion auf Kombination aus verschiedenen vorhandenen Parametern.**

Für eine Kombination von Eingangsparametern zeigen die Resultate in Abbildung 44 und Abbildung 45 vereinzelt Tendenzen, welche plausibel erscheinen. Eine quantitative Bewertung ist nicht möglich, da keine entsprechenden Ausfälle mit Messdaten im Datensatz vorhanden sind.

**zu Punkt 3: - Reaktion Initialregelwerk auf willkürlich gewählte Eingangsdaten.**

Liegen die Eingangsparameter außerhalb vorhandener Messdaten muss extrapoliert werden. In Abbildung 47 zeigen sich dabei Werte, welche durch die im Regelwerk hinterlegten Tendenzen zustande kommen. Für zunehmende Temperaturen sind darin tendenziell abnehmende Amplituden festgelegt. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung des unteren Grenzwertes von 1 p.u. für die Amplitude nach unten, wenn der obere Grenzwert 20 °C des Eingangsparameters Temperatur überschritten wird. Eine Auswertung des Regelwerks außerhalb dieser Grenzen führt daher in diesem Fall zu keinen brauchbaren Resultaten. Dies muss bei der Betrachtung solcher Ergebnisse berücksichtigt werden.

**Im Vordergrund der weiteren Diskussion steht daher der gewählte Ansatz. Das erstellte System soll diesen Ansatz beispielhaft repräsentieren.**

## 5.4 Diskussion des Ansatzes eines Expertensystems für Problemtyp CLPU

Die in den Publikationen [2], [7] und [10] durchgeführte Einzelgerätesimulation ermöglicht es nicht direkt, vorhandene Messdaten einzubringen. Es kann ein Vergleich mit diesen durchgeführt werden. Dabei müssen zusätzlich noch Modellparameter für vorhandene Haushalte und Elektroheizungen identifiziert werden. Die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit dieser stellt dabei ein Hindernis dar.

Eine Untersuchung hinsichtlich Korrelation einzelner Ausfallparameter wird in Kapitel 3.4.1 durchgeführt. Es zeigt sich Korrelation zwischen einzelnen Parametern. Die definierte Hilfsgröße zur Kombination von Elektrowärmeanteil und Umgebungstemperatur ist jedoch unzureichend. Ein Zusammenwirken mehrerer Parameter kann besser durch ein Expertensystem berücksichtigt werden. Der Hauptvorteil des adaptiven Expertensystems ist die Kombination von:

- heuristisch eingebrachtem Wissen
- algorithmisch verarbeiteten Daten

Dabei ist für die Wahl des Ansatzes ausschlaggebend, ob der untersuchte Sachverhalt einem vordefinierten Verhalten folgt oder von vielen nichtdeterministischen Prozessen abhängt. Für das Verhalten der Lasten im Abzweig nach Versorgungswiederherstellung werden beide Effekte eine Rolle spielen.

**Durch die konsequente Verarbeitung von Eingangsgrößen und zugehörigen Messdaten durch den Algorithmus sollte der Einfluss zufälliger Prozesse mit steigender Anzahl von Datensätzen zunehmend unterdrückt werden.**

Dies macht sich durch die Bestätigung einzelner Tendenzen durch das erstellte und trainierte Regelwerk in den Ergebnissen bemerkbar.

Ein zusätzlicher Unsicherheitsfaktor bei der Erstellung des adaptiven Expertensystems ist die Wahl der Trainingsparameter. Werden zu viele Trainingsepochen (einige hundert bis tausend, der Standardwert ist 10) gewählt, so ist das System in der Lage, die vorhandenen Datensätze zu reproduzieren. Es zeigt sich dann eine geringere Abweichung von den Messdaten zu einem vorhandenen Ausfall. Dies wird aber nicht als sinnvoll erachtet, da die Reproduktion vorhandener Daten keinen Erkenntnisgewinn darstellt. In den Resultaten bewirkt dies, dass keine Aussage getroffen werden kann. Wird eine größere Abweichung von den Trainingsdaten zugelassen und weniger Trainingsepochen als Abbruchkriterium gewählt, weicht die Abschätzung stärker von den Messdaten ab. Das Training mit Messdaten geht dann mit nur geringerem Einfluss in das Expertensystem ein. Das System kann dann jedoch auf Kombination von Eingangsparametern reagieren und ein plausibler erscheinendes Regelwerk ableiten. Gegenüber einem Training mit fehlerhafteten Messdaten ist das System robuster, da der Einfluss des Trainings generell geringer ist. Als weiteren positiven Effekt reduziert sich die Rechenzeit, da weniger Trainingsepochen durchgeführt werden.

## 5.5 Ausblick

Eine Erweiterung des bisher erstellten Expertensystems setzt zusätzliche Datensätze voraus. Folgende Adaptionen und Erweiterungen sind beispielsweise denkbar:

- zusätzliche Eingangsparameter:
  - Uhrzeit, dadurch Einfluss Tageslastgang, z.B. Mittagsspitze.
  - Witterung, dadurch Heizungseinsatz genauer festgelegt.
  - geographische Parameter.
  - demographische Parameter.
- Adaption der Zugehörigkeitsfunktionen:
  - genauere Abstufung dieser, sollten aus neuen Messdaten zusätzliche Erkenntnisse diesbezüglich gewonnen werden.
- Erweiterung Initialregelwerk mit zusätzlichen Regeln:
  - Einbringung von Erkenntnissen aus weiteren Messdaten.
  - Einbringung von Erkenntnissen aus Befragungen.
- Training Regelwerk mit weiteren Datensätzen.

Als Szenario für die Anwendung eines solchen Ansatzes könnte die Umsetzung in einer EDV-Anlage denkbar sein. Für jeden einzelnen Abzweig in einem UW würde ein Expertensystem erstellt werden. Dieses ist ausschließlich einem Abzweig zugeordnet und so auf dessen individuelles Verhalten abgestimmt. Die Einbringung von „a-priori“ Wissen könnte durch Befragung von Personen erfolgen. Bei jeder Zuschaltung kommt es automatisch zu einem Training mit tatsächlichen Messdaten, dazu werden alle weiteren Ausfallparameter elektronisch abgerufen. Dadurch könnte bereits während der Unterbrechung eine grobe Abschätzung des zu erwartenden Zuschaltstromes als Hilfsmittel zur Verfügung stehen.

## 6 Literatur

- [1] Levebre S., "Residential load modeling for predicting distribution transformer load behaviour, feeder load and cold load pickup", 2002, Electrical Power and Energy Systems.
- [2] Aubin J., Bergeron R., and Morin R., "Distribution transformer overloading capability under cold-load pickup conditions," vol. 5, no. 4, pp. 1883-1891, 1990.
- [3] Capasso A., Grattieri W., Lamedica R., and Prudenzi A., "A bottom-up approach to residential load modeling," vol. 9, no. 2, pp. 957-964, 1994.
- [4] Agneholm E. and Daalder J., "Load recovery in different industries following an outage," IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, vol. 149, no. 1, pp. 76-82, 2002.
- [5] Mota A.A., Morelato A., Mota L. T. M., "Load behaviour prediction under blackout conditions using a fuzzy expert system," Generation, Transmission Distribution, IET, vol. 1, no. 3, pp. 379-387, May.
- [6] Weixelbraun M., "Dynamische Simulation eines 110-kV-Netzes im Inselnetzbetrieb", 2007, Diplomarbeit, TU Graz.
- [7] Wilde R. L., "Effects of Cold Load Pickup at the Distribution Substation Transformer," no. 3, pp. 704-710, 1985.
- [8] Mirza O. H., "Usage of CLPU curve to deal with the cold load pickup problem," vol. 12, no. 2, pp. 660-667, 1997.
- [9] Ujetz M., "Neuronale Netzwerke und Neuro-Fuzzy-Methoden zur kurzfristigen Lastprognose", 2004, Diplomarbeit, Technische Universität Graz.
- [10] Agneholm E. and Daalder J., "Cold load pick-up of residential load," IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, vol. 147, no. 1, pp. 44-50, 2000.
- [11] Desbiens C., "Electric vehicle model for estimating distribution transformer load for normal and cold-load pickup conditions," in Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012, pp. 1-6.

- [12] Zabar Z. and Pinto J. F., "Start-Up Response of a Secondary Distribution Network Part I: Dynamic Model of Appliance Start-up," no. 6, pp. 3143-3146, 1981.
- [13] Schwingshackl M., "Konzeptstudie zum Verhalten von Lasten bei Unterspannung mit Berücksichtigung von spannungsgesteuerter Stufenversorgung", 2013, Masterarbeit, TU Graz.
- [14] Th., Sequenz, H., Bödefeld, "Elektrische Maschinen - Eine Einführung in die Grundlagen", 8th ed. New York: Springer, 1971.
- [15] awtec AG Siegrist M., "Modifizierter A++-Standard-Kühlschrank mit 30% Verbrauchsreduktion", Schlussbericht 31. Mai 2010.
- [16] Amon A., "Analyse von Kundenlastprofilen und automatische Zerlegung in Gerätelastgänge", 2011, Masterarbeit, Technische Universität Wien.
- [17] Sakulin M., "Studienbehelf Elektrowärme LV-Nr. 432.160 WS 2011", TU Graz.
- [18] Hinrichs C., "Untersuchung und Entwicklung von Verfahren zur Desynchronisation adaptiver Kühlgeräte", 2008, Masterarbeit, Universität Oldenburg.
- [19] Ekwue A., Aggarwal R., Warwick K., "Artificial Intelligence Techniques in Power Systems", 22nd ed., The Institution of Electrical Engineers, Ed. London, UK: The Institution of Electrical Engineers, 1997.
- [20] Frühwirth T., Horn W. Gottlob G., "Expertensysteme", Thomas Frühwirth, Ed. Wien, Österreich: Springer Verlag, 1990.
- [21] Reif G., "Moderne Aspekte der Wissensverarbeitung", 2000, Diplomarbeit, Technische Universität Graz.
- [22] Kerber G., "Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilstellen für die Einspeisung von Photovoltaikkleinanlagen", 2010, Dissertation.
- [23] Chen-Ching Liu, Seung-Jae Lee, and S.S. Venkata, "An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 3, no. 2, pp. 619-626, 1988.

# 7 Anhang

Grobe Anonymisierte Charakterisierung der Station							Wirkleistung vor Ausfall		Zeitpunkt des Ausfalls/ der Abschaltung			Klimatische Bedingungen	
Nr	Spannung	Anteil: Industrie, Haushalt und Gewerbe				E-Heizung	Gesamtleistung	DEA	Datum	Uhrzeit	Unterbrechungsdauer	Witterung	Außentemperatur
-	kV	%HH	%IND.	%GEW.	%LANDW.	%	kVA	kWp	[dd.mm.jjjj]	[hh:mm:ss]	Minuten	-	°C
1	20	75	0	10	15	10	600	0	29.10.2012	09:42:00	21	bewölkt	3.5
2	20	80	0	20	0	10	250	0	14.11.2012	11:59:38	67	bewölkt	9
3	20	90	0	10	0	0	3600	0	06.03.2012	09:46:00	5	sonnig	4
4	30	90	0	10	0	0	1500	0	13.06.2012	15:29:00	2	sonnig	15
5	0.4	98	0	2	0	2	250	5.3	31.10.2012	16:40:00	5	bewölkt	19
6	0.4	100	0	0	0	1	100	0	17.10.2012	08:40:00	148	schön	19
7	0.4	100	0	0	0	10	250	0	20.09.2012	12:09:00	108	schön	20
8	0.4	100	0	0	0	15	160	0	05.09.2012	20:52:00	42	Gewitter	16
9	0.4	90	0	10	0	10	630	0	20.09.2012	08:30:00	154	bewölkt	7
10	0.4	90	0	10	0	5	630	0	20.09.2012	08:30:00	154	bewölkt	18
11	0.4	100	0	0	0	5	250	0	11.10.2011	09:01:00	182	schön	7
12	0.4	50	0	50	0	30	20	0	29.10.2012	07:30:00	238	leichter Schneefall	0
13	0.4	0	0	100	0	80	35	0	09.11.2012	13:00:00	117	sonnig	14
14	0.4	100	0	0	0	40	35	0	13.11.2012	08:00:00	299	leichter Regen	8
15	30	69.84	0	30.16	0	15.78	4000	57	28.10.2012	04:22:04	2.5	Schneefall	-1
16	10	69.68	0	30.32	0	18.05	900	90	28.10.2012	04:22:04	3	Schneefall	-1
17	10	57.66	0	42.34	0	25.6	1000	0	28.11.2012	15:20:40	15	bewölkt	5
18	30	36.36	0	63.64	0	17.57	8000	371	29.11.2012	08:21:05	4	bewölkt	5
19	10	57.66	0	42.34	0	25.6	750	0	30.12.2012	11:43:21	37	Sonne	8
20	0.4	100	0	0	0	2	250	0	27.11.2012	13:59:17	125	bewölkt	10
21	0.4	100	0	0	0	2	400	0	28.11.2012	09:07:24	355	bewölkt	12
22	0.4	90	0	10	0	5	630	0	05.12.2012	15:06:00	62	bewölkt	2
23	0.4	0	100	0	0	0	1000	0	17.12.2012	17:14:00	28	bewölkt	3
24	0.4	90	0	10	0	10	250	0	07.02.2012	08:35:00	175	schönwetter	-3
25	0.4	100	0	0	0	0	30	0	24.02.2013	08:00:00	316	leichter Schneefall	-5
26	0.4	100	0	0	0	10	85	15	31.01.2013	12:00:00	189	sonnig	10
27	0.4	100	0	0	0	10	60	5	31.01.2013	12:00:00	191	sonnig	10
28	0.4	100	0	0	0	20	40	0	13.03.2013	08:00:00	170	bewölkt	-4
29	0.4	100	0	0	0	20	100	4.8	06.05.2013	14:00:00	50	schönwetter	15
30	0.4	100	0	0	0	0	160	0	16.05.2013	09:02:00	140	bewölkt	20
31	0.4	100	0	0	0	20	250	0	14.05.2013	09:00:00	85	bewölkt	15
32	0.4	100	0	0	0	10	100	0	07.03.2013	09:30:00	170	bewölkt	6

Tabelle 13: Anonymisierte Auswertetabelle der verwendeten Ausfälle mit Ausfallparametern für die Masterarbeit.

Nr	Grobe Anonymisierte Charakterisierung der Station						Wirkleistung vor Ausfall		Zeitpunkt des Ausfalls/ der Abschaltung			Klimatische Bedingungen		Begründung
	Spannung	Anteil: Industrie, Haushalt und Gewerbe				E-Heizung	Gesamtleistung	DEA	Datum	Uhrzeit	Unterbrechungsdauer	Witterung	Außentemperatur	
-	kV	%HH	%IND.	%GEW.	%LANDW.	%	kVA	kWp	[dd.mm.jjjj]	[hh:mm:ss]	Minuten	-	°C	-
1	0.4	100	0	0	0	10	160	0	26.09.2012	08:38:00	30	Regen	14	Weitere Schalthandlung durch Betreiber.
2	0.4	100	0	0	0	10	160	0	28.09.2012	09:07:00	87	schön	20	Weitere Schalthandlung durch Betreiber.
3	30	33.3	33.3	33.3	0	40	190	10	29.10.2012	13:00:00	124	leichter Schneefall	0	Anteil Haushalte unter 75%.
4	30	100	0	0	0	40	180	0	12.11.2012	12:30:00	177	leichter Regen	8	Weitere Schalthandlung durch Betreiber.
5	0.4	100	0	0	0	50	40	0	14.11.2012	08:00:00	233	sonnig	10	Zuschaltung einer unterbrechbaren Last.
6	0.4	58	0	0	42	51	81	0	31.10.2012	13:00:33	18	-	8	Anteil Haushalte unter 75%.
7	0.4	100	0	0	0	10	100	0	28.09.2012	09:07:00	87	schön	20	Weitere Schalthandlung durch Betreiber.
8	0.4	100	0	0	0	10	160	0	26.09.2012	08:38:00	30	Regen	14	Weitere Schalthandlung durch Betreiber.
9	30	33	33	33	0	0	75	0	06.03.2013	12:31:00	175	sonnig	6	Anteil Haushalte unter 75%.
10	0.4	100	0	0	0	0	10	0	05.02.2013	08:00:00	145	Regen	5	Referenzwert nicht eindeutig feststellbar.
11	10	70	15	15	0	0	16500	0	16.01.2013	21:22:00	25	bewölkt	-5	Weitere Schalthandlung durch Betreiber.
12	20	70	0	0	30	0	150	0	08.05.2013	08:32:00	19	heiter	17	Anteil Haushalte unter 75%.
13	0.4	100	0	0	0	30	160	0	12.02.2012	12:02:00	179	schneefall	-2	Referenzwert nicht eindeutig feststellbar.
14	0.4	100	0	0	0	0	160	0	21.05.2013	08:09:00	195	bewölkt	18	Weitere Beeinflussung vermutet.

Tabelle 14: Für die Auswertung der statischen Lastdiversität nicht verwendete Störschriebe.

```

clpul = addvar(clpul, 'input', 'Ausfalldauer', [0 300]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 1, 'kurz', 'sigmf', [-1.37 6.983]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 1, 'lang', 'gbellmf', [33.2 6.9 40.28]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 1, 'sehr lang', 'sigmf', [0.203 71.6]);

clpul = addvar(clpul, 'input', 'Umgebungstemperatur', [-10 30]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 2, 'kalt', 'sigmf', [-1.31 18.1]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 2, 'warm', 'gbellmf', [6.02 9.596 23.6]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 2, 'heiss', 'sigmf', [4.716 29.2]);

clpul = addvar(clpul, 'input', 'Prozentsatz Elektroheizung', [0 100]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 3, 'sehr gering', 'sigmf', [-0.546 16.9]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 3, 'gering', 'gbellmf', [13.1 2.91 26.84]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 3, 'hoch', 'gbellmf', [20.9 3.65 55.65]);
clpul = addmf(clpul, 'input', 3, 'sehr hoch', 'sigmf', [0.592 69.89]);

```

Tabelle 15: Auszugsweise Darstellung des MatLab Skript um Definition der Gestalt der Zugehörigkeitsfunktionen vorzunehmen.

```

%Hauptroutine Masterarbeit "Cold Load Pickup" - Zweck dieses Programms:
% Auswertung von Störschrieben des Einschaltstroms von Abgängen im
% Minutenbereich nach der Zuschaltung. Untersuchung hinsichtlich Verlust
% der statischen Lastdiversität. Transiente Vorgänge werden gesondert mit
% den files im Ordner "transiente" dargestellt.
% Der Verlauf des Stroms wird an 6 ausgewählten Stützstellen von 1
% bis 1000 Sekunden nach erfolgter Zuschaltung betrachtet.
% Zur Berechnung der Amplituden der einzelnen Stützstellen wird eine
% Näherung an den tatsächlichen Verlauf ausgewertet und auf einen
% Referenzwert des Stroms vor dem Ausfall in p.u. bezogen.
% Die Stützstellen sowie Parameter des Ausfalles stellen die Ein- und
% Ausgangsparameter des Fuzzy-Systems dar.
%-----
% Vorgehensweise beim Hinzufügen neuer Störschriebe:
% 1. - Parameter in Tabelle "Sammlung_Studie_CLPU_m.xlsx" ergänzen.
%       Dateiname des Störschriebes eintragen, z.B. nach Datum Eingang.
%       Zusätzlich kann ein "Betrachtungszeitraum" für die
%       Ausgleichsfunktion gewählt werden, und ob Daten in das Training
%       eingehen sollen.
% 2. - Die im Verzeichnis /messdaten abgelegten Störschriebe sind in
%       einlesen_clpu.m bezgl. Format spezifiziert.
% 3. - Dieses Skript ausführen.
% 4. - plot_clpu.m plottet einzelne/alle vorhandenen Störschriebe sowie
%       deren Ausgleichsfunktion
% 5. - auswertung_fuzzy.m schätzt einen Verlauf des Einschaltstromes
%       Aufgrund eingegebener Ausfallsparameter aus dem Fuzzy-System ab.
% 6. - plot_regelw zeigt das Regelwerk vor und nach Training an.
%-----
%1 - einlesen_tabelle()           ->Parameter Ausfall von Excel einlesen.
%2 - einlesen_clpu()             ->Messdaten aus /messdaten einlesen.
%3 - auswertung_messdaten()      ->Messdaten Ausgleichsfunktion erstellen.
%4 - erstelle_fuzzy              ->Erstellung Expertensystem.
%5 - trainiere_fuzzy             ->Training mit Messdaten
%-----
close all; clear; clc; %Excel-file Name, einlesen bis Störschrieb Nummer:
dateiname = '2013_05_07_Sammlung_Studie_CLPU_m.xlsx'; ende = 38;
[parameter zusatzinformation] =... %Excel Tabelle einlesen.
einlesen_tabelle_2013_05_07(ende, dateiname);
[messdaten headerinformation]=... %Messdaten aus Textfiles einlesen.
einlesen_clpu_2013_05_07(ende, parameter);
[daten_auswertung plot_optionen n_koeffs_exp ] = ...%Ausgleichsfunktion(en)
auswertung_messdaten_2013_05_07(ende, parameter, headerinformation,...
messdaten);
erstelle_fuzzy_2013_05_07; %Erstellung des Expertensystems
trainiere_fuzzy_2013_05_07; %Training des ANFIS mit den Messdaten.

```

**Tabelle 16: Darstellung der Hauptroutine.**