

DIPLOMARBEIT

Untersuchung der Entwicklung des stationären und transienten Verhaltens des Netzselbststreckeffektes von Drehstromsystemen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

unter der Leitung von
Univ.Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik
Institut für Energiesysteme und Elektrische Anlagen (E370)

betreut von
Dipl.-Ing. Sophie Juliana Bittner, BSc
Institut für Energiesysteme und Elektrische Anlagen (E370)

eingereicht an der
Technischen Universität Wien
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Thomas Pfeifer, BSc
Matrikelnummer 01426918
Donaufelderstraße 233, 1220 Wien

Wien, 19. Oktober 2021



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Univ.Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik für die Leitung und der Bereitstellung des Themas bedanken.

Vielen lieben Dank an meine Betreuerin, Frau Dipl.-Ing. Sophie Juliana Bittner, BSc für die kompetente Betreuung meiner Diplomarbeit. Ihr stets offenes Ohr für alle meine Anliegen und Fragen und ihre Anregungen und Unterstützung haben mir sehr beim Verfassen dieser Arbeit geholfen.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei meiner Familie und speziell bei meiner Freundin Judith danken. Vielen lieben Dank für die Unterstützung während des Studiums und dass ihr immer an mich geglaubt habt. Ohne eure tatkräftige Unterstützung wäre der Abschluss meines Studiums nicht möglich gewesen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Differences of the frequency from the nominal frequency in the European power grid are very common. The self regulating effect of the power system (NSRE) has a stabilizing effect on the grid and in contrast to the Frequency Containment Reserve the NSRE operates in an instant. This effect is the result of frequency- and voltage dependent loads and small speed controlled industrial power plants in the power grid. If there is a drop of the frequency due to the loss of generation, the frequency dependant loads will draw less active power. The stabilizing effect of the frequency dependent loads decreases, when the motor loads lose there frequence dependency, for example through operation on a frequency converter. The stabilizing effect of the frequency dependent loads decreases when the motor loads lose their frequency dependency, for example through operation on a frequency converter. Therefore, these motors do not contribute to the NRSE. If motor loads lose their frequence dependency, the NSRE will decrease. Due to the change of the electric loads in the power grid and the changes on the power grid, it is assumed that the NSRE will decrease. In this thesis the future development of the NSRE will be analysed.

Previously, the NSRE was determined by a top down approach in several papers. In the present thesis the NSRE will be determined by a bottom up approach. On the one hand the advantage of a bottom up compared to a top down approach is, that regardless of sufficient large drops of the frequency in the power grid, the NSRE can be determined. On the other hand the disadvantage of the bottom up approach is that you need the information of the composition and the frequency dependency of the loads in the power grid. Therefore, a literature research on the loads in the European power grid was conducted. For the determination of the frequency dependency of the loads, typical household loads were measured. A literature research was accomplished to determine the frequency dependency of other loads, like machines with constant, linear or square torque. In order to consider the composition of the power grid in the year 2050, different scenarios were studied. With the information about the loads in the power grid and the load models the change of the NSRE can be studied through a simulation.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Kleine Abweichungen der Netzfrequenz von der Nennnetzfrequenz sind im europäischen Verbundnetz keine Seltenheit. Ein Anteil der Stabilisierung erfolgt durch den Netzselbstregeleffekt (NSRE) und wirkt im Gegensatz zu den Regelungen instantan. Dieser Effekt ist auf die Frequenzabhängigkeit und die Spannungsabhängigkeit der Lasten im Verbundnetz, sowie die kleineren drehzahlgeregelten Kraftwerke, welche sich nicht an der Primärregelung beteiligen, zurückzuführen. Sinkt aufgrund eines Kraftwerksausfall die Netzfrequenz ab, werden die frequenzabhängigen Lasten proportional zur Änderung weniger Wirkleistung beziehen und wirken somit dem Kraftwerksausfall entgegen. Der stabilisierende Effekt der frequenzabhängigen Last nimmt ab, wenn die motorischen Lasten ihre Frequenzabhängigkeit verlieren, wie etwa durch Betrieb an einem Umrichter. Durch die Veränderung der Last und des Verbundnetzes wird nun eine Verschlechterung des NSRE angenommen. Die zukünftige Entwicklung des NSRE wird in dieser Arbeit untersucht.

Mithilfe einer Literaturrecherche ist zuerst der NSRE im europäischen Verbundnetz analysiert worden. Hier wird auf die Bedeutung und Zusammensetzung des NSRE eingegangen. In der Vergangenheit ist der NSRE über einen Top-Down Ansatz ermittelt worden. In der vorliegenden Arbeit wird aber der NSRE über einen Bottom-Up Ansatz bestimmt. Der Nachteil an diesem Ansatz ist, dass die Information der Lastverteilung im Verbundnetz vorhanden sein muss, um den NSRE bestimmen zu können. Der Vorteil des Bottom-Up Ansatzes gegenüber eines Top-Down Ansatzes ist der, dass nicht auf ausreichend größere Frequenzeinbrüche im Verbundsystem gewartet werden muss, um den NSRE bestimmen zu können. Um über einen Bottom-Up Ansatz den NSRE zu bestimmen, ist anhand mehrerer Paper eine Analyse des Verbundnetzes auf seine Verbraucher durchgeführt worden. Die Frequenzabhängigkeit der Verbraucher ist aufgrund repräsentativer Haushaltsgeräte im Labor bestimmt worden. Für die Frequenzabhängigkeit anderer Lasten, wie Maschinen mit konstanter, linearer oder quadratischer Momentenkennlinie, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Für die zukünftige Entwicklung des NSRE ist unter Zuhilfenahme von Szenarien eine mögliche Lastsituation im Jahr 2050 bestimmt worden. Aus der Information der Lastverteilung und der Modelle der einzelnen Verbraucher wird auf Basis einer Simulation des Verbundnetzes die Veränderung des NSRE nachgebildet.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Technik	1
1.3	Definition	2
1.4	Inhalt der Arbeit	2
2	Literaturrecherche	4
3	Der Netzselbstregeleffekt	6
3.1	Ursprung und Zusammensetzung	6
3.1.1	Ohmsche Verbraucher	7
3.1.2	Induktive und kapazitive Verbraucher	7
3.1.3	Motorische Verbraucher	7
3.1.4	Kopplung von Antriebs- und Arbeitsmaschinen	11
3.1.5	Mischlasten	11
3.1.6	Geregelte Verbraucher	12
3.2	Stabilisierender Effekt des NSRE	12
3.3	Methode zur Bestimmung des NSRE	15
3.3.1	Top-Down Methode	15
3.3.2	Bottom-Up Methode	15
4	Europäisches Verbundnetz	16
4.1	Erzeugung	16
4.2	Lastverteilung	17
4.2.1	Industrie	18
4.2.2	Haushalt	25
4.2.3	Kommerzieller und öffentlicher Bereich	25
4.2.4	Transport, Ackerbau und Fischereien	26
4.2.5	Zusammensetzung der Gesamtlast	26
4.3	Netzselbstregeleffekt	28
4.4	Regelungen	28
4.4.1	Primärregelung	29
4.5	Regeltechnisches Ersatzschaltbild des Verbundnetzes	30

5	Szenarien für ein zukünftiges Verbundnetz	31
5.1	Veränderungen der elektrischen Lasten	31
5.2	Veränderung der Energieversorgung	32
5.3	Veränderung des Energiebedarfs	34
5.3.1	Industrie	34
5.3.2	Haushalte	36
5.3.3	Kommerzieller und öffentlicher Bereich	37
5.3.4	Transport, Ackerbau, Fischerei und Sonstige	37
5.3.5	Lastverteilung 2050	40
6	Messung der Lasten im Labor	41
6.1	Aufbau und Messgeräte	41
6.2	Gemessene Lasten	44
6.2.1	Ventilator	44
6.2.2	Wasserkocher	45
6.2.3	Geschirrspüler	46
6.2.4	Elektro-Heizlüfter	48
6.2.5	Backrohr	50
6.2.6	Waschmaschine	52
6.2.7	Kühlschrank	53
6.2.8	Laptop	54
6.2.9	LCD-Bildschirm	55
6.2.10	Aufladegerät für elektronische Zahnbürste	56
6.2.11	Glühlampe	57
6.2.12	LED-Lampe	58
6.2.13	LED-Lampe 2	59
6.2.14	Kompaktleuchtstofflampe	60
7	Simulationen und Modelle	61
7.1	Modellierung der Verbraucher	61
7.2	Simulation des Verbundnetzes	63
7.3	Frequenzantwort des Verbundnetzes Jahr 2012	68
7.4	Frequenzantwort des Verbundnetzes im Jahr 2050	69
8	Ergebnisse und Ausblick	72
8.1	Veränderung des Verbundnetzes	72
8.2	Simulationen	72
8.3	Ausblick	73

9	Abkürzungsverzeichnis	75
10	Literaturverzeichnis	76
11	Abbildungsverzeichnis	80
12	Tabellenverzeichnis	82
13	Einverständniserklärung	83

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch den vermehrten Einsatz von Leistungselektronik und der daraus resultierenden konstanten Wirkleistungsaufnahme elektrischer Antriebsmaschinen wird eine Abnahme des Netzselbststreckeffekts (NSRE) prognostiziert[1]. Mit den entsprechenden Experimenten, wie in den 80er- und 90er Jahren[2] könnte man den NSRE bestimmen. Jedoch wirken diese sich auf die Netzstabilität innerhalb des europäischen Verbundnetzes aus, so dass davon Abstand genommen wird. Um den NSRE trotzdem neu zu bestimmen, kann aber eine andere Methodik angewendet werden. Dieser Bottom-Up Ansatz soll in dieser Arbeit behandelt werden. Eine zentrale Frage, die sich durch die ganze Arbeit zieht, ist, wie sich der NSRE im Laufe der nächsten Jahre entwickeln wird. Eine Verringerung des NSRE bedeutet für das Verbundnetz, dass der unterstützende Effekt des NSRE bei einem Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Last weniger wird und das Verbundnetz vermehrt auf andere Regelungen zurückgreifen muss. Um die Klimaziele der Europäischen Union bis 2030 und 2050 zu erreichen, haben sich die Mitgliedstaaten im Pariser Klimaabkommen dazu verpflichtet, auf erneuerbare Energien und energiesparende Maßnahmen zu setzen. Werden mehr regenerative Energiesysteme eingesetzt, dann werden konventionelle Kraftwerke vom Netz genommen. Die kleineren drehzahlgeregelten Kraftwerke, welche sich nicht an der Primärregelung beteiligen, sind die Ursache für den erzeugerabhängigen NSRE. Ein Abschalten dieser Kraftwerke bedeutet, dass sich dieser Effekt auch verringert. Die energiesparenden Maßnahmen werden umgesetzt, indem Leistungselektronik verbaut wird. Dadurch wird der Wirkleistungsverbrauch verringert, die Lasten verlieren aber ihre Frequenzabhängigkeit und verringern somit den verbraucherabhängigen NSRE. In den bestehenden Analysen wird von einem Proportionalitätsfaktor von 1-2 %/% ausgegangen. Ist dies in dem Kontext dann annehmbar? Und ist die Darstellung als P-Glied im Ersatzschaltbild für schnelle Frequenzänderungen überhaupt noch zulässig?

1.2 Stand der Technik

Für die Regelung des europäischen Verbundnetzes gibt es zwei wichtige Mechanismen, um die Frequenz stabil zu halten. Dies wären zum einen die Frequency Containment Reserve (FCR) und zum anderen der NSRE. Der

NSRE ist auf die Frequenz- und Spannungsabhängigkeit der Lasten im Verbundnetz sowie auf die kleineren drehzahleregelten Kraftwerke, welche sich nicht an der Primärregelung beteiligen, zurückzuführen. Dieser Effekt wirkt ohne jegliche Verzögerung auf den Wirkleistungsverbrauch, wobei die FCR erst ab einer Frequenzabweichung von $\pm 20 \text{ mHz}$ aktiviert wird[3]. Für kleine Frequenzänderungen ist es dem Verbundnetz nun möglich, ohne die Hilfe der FCR das Ungleichgewicht von Erzeugung und Last zu regeln. Wenn der NSRE nun verringert wird oder sogar verschwindet, indem die frequenzabhängigen Lasten oder die drehzahleregelten Kleinkraftwerke vom Netz genommen werden, dann wird das Verbundnetz bis zum Einsetzen der FCR ohne den stabilisierenden Effekt des NSRE betrieben.

Der NSRE ist in der Energietechnik kein neu auftretender Begriff. So ist bereits im Jahre 1968 eine gewisse Frequenzabhängigkeit der Wirk- und Blindleistungsaufnahme passiver Netze von Laible T, [4] beschrieben worden. Auch, dass elektrische und motorische Lasten einen frequenzabhängigen Wirkleistungsverbrauch besitzen, kann in der Literatur [5][6] nachgelesen werden. Die letzte messtechnische Erfassung und Modellierung des NSRE ist in den 80er und 90er Jahren durchgeführt worden. Die Ergebnisse hierzu sind im Paper [7] beschrieben worden. Im regeltechnischen Ersatzschaltbild des Verbundnetzes kann der NSRE als P-Glied mit einem Proportionalitätsfaktor von 1.5 \%/\% angenommen werden[8]. In „P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C]“ einer von der ENTSO-E veröffentlichten Richtlinie im Jahr 2009, wird der Proportionalitätsfaktor des NSRE derzeit mit 1 \% / Hz angenommen[9].

1.3 Definition

Der NSRE beschreibt das dynamische spannungs- und frequenzabhängige Wirk- und Blindleistungsverhalten von Verteilungsnetzen im Zeitbereich innerhalb weniger Sekunden[1]. Wie bereits erwähnt, kann der NSRE mit $1\%/\text{Hz}$ angenommen werden. Dies bedeutet in Worten, dass bei einer Frequenzabnahme von einem Hertz bereits die Wirkleistung um 1 \% reduziert wird[9].

1.4 Inhalt der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird der NSRE mit Hilfe einer Bottom-Up Methode bestimmt. Dazu wird zuerst theoretisch auf den NSRE eingegangen,

danach wird mithilfe verschiedener Lastmodelle der NSRE simuliert und zum Schluss unter Verwendung von Frequenzsprüngen der Wirkleistungsverlauf von repräsentativen Lasten gemessen. Auf Basis der Sprungantworten und der Lastverteilung im Verbundnetz kann auf das gesamte Verbundnetz hochgerechnet werden. Es werden zusätzliche Szenarien, wie sich der NSRE in den nächsten Jahren entwickeln könnte, beschrieben.

2 Literaturrecherche

Es wurden bis zum Jahr 1989 hauptsächlich einzelne Lasten auf ihre frequenzabhängige Wirkleistung untersucht und modelliert. In „Investigations of the frequency and voltage dependance of load part systems using a digital self-acting measuring and identification system” [7] wird ein automatisiertes Messsystem vorgestellt, welches für zwei verschiedene Lastverteilungen in Deutschland eingesetzt worden ist. Das System erkennt Einbrüche der Versorgung und der Frequenz und zeichnet diese auf. Aus diesen Frequenzereignissen ist der NSRE mithilfe eines Top-Down Ansatzes bestimmt worden. Für die gemessenen Lastzentren Heidelberg und Berlin-Kreuzberg nehmen die Autoren den Proportionalitätsfaktor des NSRE mit 1.2 %/% und 0.8 %/% an. Die Einheit des Proportionalitätsfaktors (%/%) ergibt sich folgendermaßen: Die prozentuelle Leistungsänderung wird durch die prozentuelle Frequenzänderung dividiert und ergibt somit die Einheit %/ %.

Eine von mehreren Papern im Zusammenhang des NSRE ist die zitierte Dissertation „Experimentelle Untersuchung zur frequenz- und spannungsabhängigen Leistungsaufnahme elektrischer Verbraucherteilnetze” [2] von B. Hall aus dem Jahr 1993. Diese Dissertation liegt leider nicht digital vor und konnte somit nicht eingesehen werden, wird aber der Vollständigkeit wegen erwähnt.

Ein für den NSRE sehr relevantes Paper ist „Study of the dependence of consumer subsystems on frequency and voltage” [10]. Zuerst ist von den Autoren die Modellierung des NSRE beschrieben worden. Sie haben die Aufteilung der Lasten in ungesteuerte und gesteuerte Verbraucher eingeteilt. Weiters haben sie die Frequenzabhängigkeit der Motoren beschrieben. In diesem Paper wird sowohl auf den frequenz- als auch den spannungsabhängigen Netzselbsteffekt eingegangen. Zusätzlich finden sich auch Modelle für die frequenz- und spannungsabhängige Wirk- und Blindleistung. In diesem Paper wird wieder mithilfe eines Top-Down Ansatzes der Netzselbsteffekt von mehreren Lastverteilungen (Industrie und Haushalte) in Deutschland bestimmt. Aus den Messungen schließen die Autoren, dass sich der Netzselbsteffekt im Sommer gegenüber jenem im Winter unterscheidet. Über das gesamte Jahr gemittelt wird der Proportionalitätsfaktor des NSRE mit 0.9 %/Hz angegeben und beträgt im Winter 0.6 %/Hz sowie im Sommer 1.1 %/Hz. Den niedrigen NSRE im Winter erklären die Autoren, dass sich im Winter ver-

mehrt mit elektrischen Heizungen geheizt wurde. Für den NSRE im gesamten Verbundnetz ist der Proportionalitätsfaktor mit 1.5 %/Hz berechnet worden.

In "Importance of the self regulating effect within power systems", einem Paper von M. Kurth und E. Welfonder [11], wird zuerst auf den positiven Effekt des NSRE eingegangen. Dieser positive Effekt zeigt sich dadurch, dass während größerer Ausfälle weniger Primärregelenergie benötigt wird. Im Jahr 2006 ist der NSRE in den Netzregeln der DVG, die heute unter dem Namen VDN bekannt ist, mit 0.5 %/Hz angenommen worden, denn zu dieser Zeit ist der erzeugerabhängige NSRE nicht einbezogen worden. Dies ist von den Autoren anhand dreier verschiedener Experimente widerlegt worden. Zusätzlich ist in diesem Paper auf den erzeugerabhängigen NSRE näher eingegangen worden. Der NSRE ist in diesem Paper mit 1.5 %/Hz angenommen worden.

Das Paper "Bedeutung des Netzselbstregeleffekts" [8] beschreibt die Bedeutung des NSRE in Hinblick auf das europäische Verbundnetz. Mithilfe von regeltechnischen Ersatzschaltbildern erklären die Autoren die Wirkungsweise des NSRE im Verbundnetz sowie den erzeugerabhängigen NSRE der Kleinkraftwerke. In weiterer Folge wird von den Autoren angenommen, dass sich aufgrund der Energiewende der stabilisierende Effekt des NSRE verringern wird. Anhand mehrerer Simulationen zeigen die Autoren, welche Auswirkung diese Verringerung auf die Frequenzantwort hat.

In "Bedeutung und messtechnische Bestimmung des Netzselbstregeleffekts" [1] ist von den Autoren die Anforderung der Messgeräte für eine Messung nach einem Top-Down Ansatz genannt worden. Hier ist einzeln auf ein Spannungssowie ein Frequenzereignis eingegangen worden. Zudem werden in dem Paper anhand mehrerer Simulationen die Regelungen und der NSRE einzeln betrachtet, um die Bedeutung des NSRE zu verdeutlichen. Zum Schluss wird von den Autoren vorgeschlagen, die Modelle des NSRE zu überarbeiten. Die Modelle können laut [1] die Frequenzoszillation aufgrund der hohen Anzahl der dezentralen Erzeugung nicht korrekt abbilden und sollten daher überarbeitet werden.

3 Der Netzselbstregeleffekt

3.1 Ursprung und Zusammensetzung

Der frequenzabhängige NSRE besteht zu einem Drittel aus dem erzeugerabhängigen und zu zwei Drittel aus dem verbraucherabhängigen Anteil. Elektrische Lasten besitzen zusätzlich noch einen spannungsabhängigen Wirk- und Blindleistungsverbrauch. Dieser wird aber in dieser Arbeit nicht weiter beschrieben und ist nicht Teil dieser Diplomarbeit.

Der erzeugerabhängige NSRE soll hier kurz Erwähnung finden, wird aber in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht. Dieser Effekt entsteht aufgrund des Regeleinflusses kleiner Kraftwerke (Industrie- und Kommunkraftwerke), welche drehzahlregelt betrieben werden, aber sich nicht an der Primärregelung beteiligen[5][12]. Der Proportionalitätsfaktor für den erzeugerabhängigen NSRE wird mit $0.5 \text{ \%}/\text{Hz}$ angegeben.[8]

Der verbraucherabhängige NSRE entsteht aus der Summe aller unregelten Verbraucher im Verbundnetz, welche direkt an das Netz angeschlossen sind. Bei konstanter Leistungsaufnahme trotz Frequenzänderung, zum Beispiel aufgrund eines Betriebes mit Frequenzumrichter (FU), werden diese Verbraucher nicht zum frequenzabhängigen NSRE gezählt[1].

Elektrische Lasten können in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- ohmsch
- induktiv und kapazitiv
- motorisch
- Mischlasten

Zusätzlich unterscheidet man noch zwischen geregelten und unregelten Verbrauchern, wobei hauptsächlich motorische Lasten mit entsprechender Leistungselektronik geregelt werden[1].

3.1.1 Ohmsche Verbraucher

Ohmsche Verbraucher wandeln die elektrische Energie in Wärme oder Licht um und besitzen keine Frequenzabhängigkeit. Sie verhalten sich wie ein ohmscher Widerstand und sind somit in der Leistungsaufnahme konstant. Zu dieser Kategorie zählen hauptsächlich elektrische Raumheizungen, Heizradiatoren, der Elektroherd (Ceranfeld und Backrohr) sowie Beleuchtungen durch Glühlampen[1]. Neuartige energiesparende Beleuchtungen, wie zum Beispiel die LED-Leuchtmittel, zählen nicht zu dieser Kategorie. Bei Vorhandensein von kapazitiven oder induktiven Parasitäten entsteht eine Frequenzabhängigkeit der Last.

3.1.2 Induktive und kapazitive Verbraucher

Induktive sowie kapazitive Verbraucher weisen im Blindleistungsverbrauch eine Frequenzabhängigkeit auf[1]. Die Reaktanz einer Spule hängt proportional von der Frequenz ab. Die Reaktanz eines kapazitiven Verbrauchers hingegen hängt indirekt proportional von der Frequenz ab[13]. Induktive und kapazitive Verbraucher sind in den Haushalten seltener aufzufinden. Als Beispiel kann aber die Induktionsherdplatte genannt werden. Durch die heutigen Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten einer herkömmlichen Induktionsplatte kann man davon ausgehen, dass diese Leistungselektronik beinhaltet. Somit verliert sie wieder ihre Frequenzabhängigkeit und ist für den verbraucherabhängigen NSRE nicht relevant.

3.1.3 Motorische Verbraucher

Der Großteil der Verbraucher, auch Arbeitsmaschinen genannt, wird mithilfe eines Motors betrieben. Zu diesen Verbrauchern zählen unter anderem Pumpen, Kompressoren, Verdichter usw. Diese motorischen Verbraucher sind aufgrund ihrer Frequenzabhängigkeit und ihres Verbrauchs im Netz hauptverantwortlich für den Verbraucherselbstregeleffekt, denn diese Lastkategorie verbraucht 50 % der gesamten Erzeugung im Europäischen Verbundnetz [14]. Der Leistungsverbrauch hängt bei elektrischen Maschinen direkt proportional von der Netzfrequenz ab[6]. Als Antriebsmaschine für die Arbeitsmaschinen werden üblicherweise Asynchronmaschinen verwendet[5]. Es werden nun die verschiedenen Antriebsmaschinen und ihre Frequenzabhängigkeit beschrieben.

Asynchronmaschine: Die Asynchronmaschine wird heutzutage hauptsächlich als Antriebsmaschine für motorische Verbraucher verwendet[5]. Ihre frequenzabhängige Wirkleistung lässt sich folgendermaßen erklären: Wenn eine Asynchronmaschine direkt an das Verbundnetz gehängt wird, dann entsteht ein rotierendes Drehfeld, welches die gleiche Frequenz besitzt wie das Verbundnetz. Änderungen der Netzfrequenz werden direkt an das Drehfeld der Maschine weitergegeben.

$$\omega_{syn} = 2\pi \cdot \frac{f_{syn}}{p} \quad (1)$$

In der Beziehung 1 steht ω_{syn} für die synchrone Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes, f_{syn} für die synchrone (Netz)frequenz und p für die Polpaarzahl der Maschine. Die mechanische Drehzahl n des Läufers einer Asynchronmaschine läuft nicht synchron mit der synchronen Drehzahl, sondern ist abhängig vom Schlupf s der folgendermaßen definiert worden ist[5][6]:

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \quad (2)$$

Die mechanische Drehzahl des Läufers einer Asynchronmaschine lässt sich nun folgendermaßen angeben mit:

$$n = s \cdot n_{syn} \quad (3)$$

Das elektrische Drehmoment einer Maschine M_{el} ist die treibende Kraft hinter einer rotierenden Bewegung und folgendermaßen definiert[5]:

$$M_{el} = \frac{P_{mech}}{\omega_{mech}} = \frac{P_{\delta}(1-s)}{\omega_{mech}(1-s)} = \frac{P_{\delta}}{\omega_{mech}} = p \frac{P_{\delta}}{\omega_{syn}} \quad (4)$$

Die Gleichung 4 zeigt, dass das elektrische Moment der Asynchronmaschine schlupfabhängig und somit von der Netzfrequenz abhängig ist. Für die Gleichung 4 können noch weitere Faktoren einbezogen werden. So wird die Luftspaltleistung P_{δ} noch genauer ausgeführt und führt zu folgender Gleichung[5]:

$$M_{el} = m_s \frac{p}{\omega_{syn}} U_s^2 \frac{s(1-\sigma)X_s X'_f X'_r}{(R_s R'_r - s\sigma X_s X'_r)^2 + (sR_s X'_r + X_s R'_r)^2} \quad (5)$$

In der Abbildung (5) wird das normierte elektrische Moment als Funktion über der normierten Drehzahl oder dem negativen Schlupf nach Gleichung (5) dargestellt.

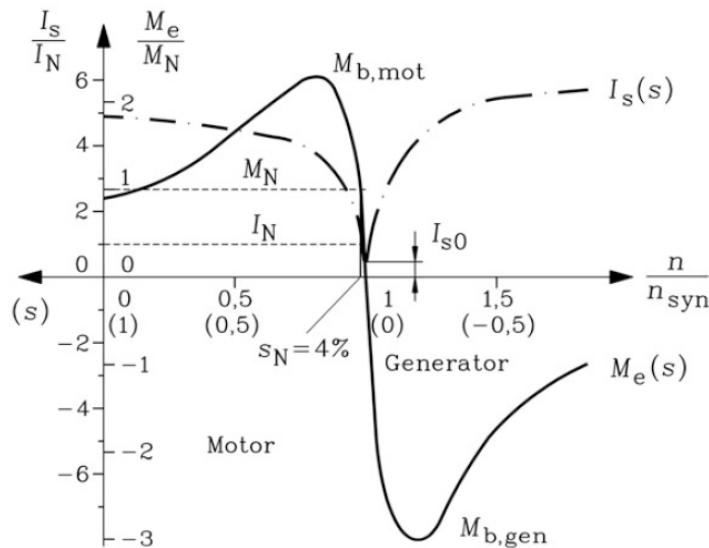


Abbildung 1: Drehmoment M_e und Ständerstrom I_s in Abhängigkeit der Drehzahl n/n_{syn} bzw. des Schlupfs $-s$ ($R_s/X_s = 1/100$, $R_r/X_r = 1.3/100$, $\sigma = 0.067$, $X_s = X_r' = 3Z_N$)[5]

Die Verluste der Asynchronmaschine, die Hysterese- und Eisenverluste besitzen ebenfalls eine lineare sowie eine quadratische Frequenzabhängigkeit und dies wirkt sich auch positiv auf den Verbrauchernetzregeleffekt aus. Die elektrische Wirkleistung, also jene Wirkleistung, welche vom Verbundnetz zur Verfügung gestellt werden muss, ist die Summe aus der mechanischen Wirkleistung sowie den Verlusten[5].

Synchronmaschine: Die Synchronmaschine findet hauptsächlich im Generatorbetrieb Verwendung. Jedoch nutzen viele hochpräzise Anwendungen eine geregelte Synchronmaschine im Motorbetrieb als Antriebsmaschine. [5] In der E-Mobilität finden sich bereits viele Synchronmaschinen im Einsatz. Aber diese Verbraucher werden nicht direkt am Netz betrieben und haben somit für den NSRE keine Relevanz[15].

Gleichstrommaschine: Gleichstrommaschinen werden nicht direkt am Verbundnetz angeschlossen, denn sie werden über eine Stromrichterschaltung betrieben. Dadurch verlieren sie ihre Frequenzabhängigkeit und haben keinen Einfluss auf den verbraucherabhängigen NSRE.[5]

Arbeitsmaschinen: Je nach Anwendungsbereich ändert sich auch das Lastmoment in Abhängigkeit der Drehzahl für die Arbeitsmaschine. Es werden Maschinen mit konstantem Moment, direkt proportionalem und indirekt proportionalem sowie quadratischem Lastmoment unterschieden. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt die vier verschiedenen Momentenkennlinien.[5]

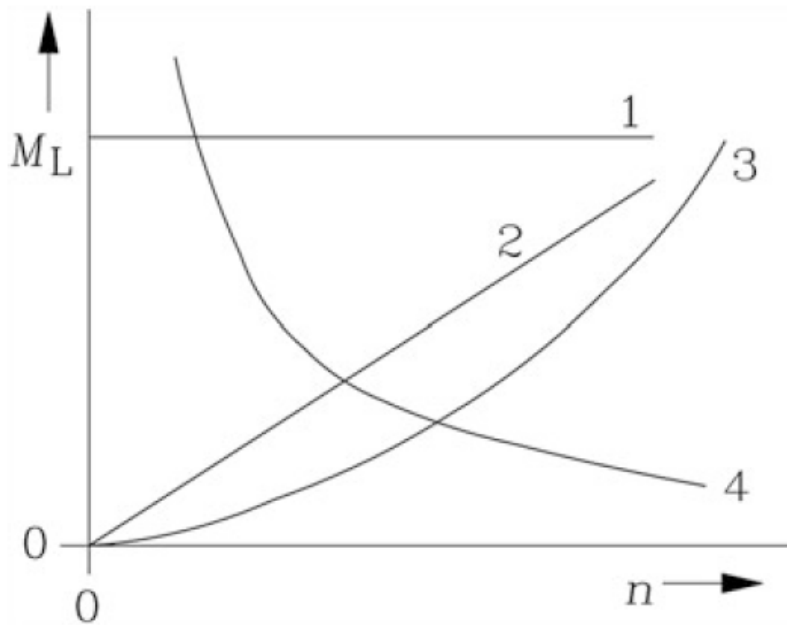


Abbildung 2: Darstellung der verschiedenen Momentenkennlinien von Arbeitsmaschinen[5]

Die benötigte mechanische Wirkleistung der Arbeitsmaschinen lässt sich aber unabhängig der Momentenkennlinie in nachfolgender Gleichung darstellen[5][6]:

$$P_{mech} = M_{mech} \cdot \omega = M_{mech} \cdot 2\pi n \quad (6)$$

3.1.4 Kopplung von Antriebs- und Arbeitsmaschinen

Zuerst wurden nur die Antriebs- und Arbeitsmaschinen als einzelne Komponenten beschrieben. Als motorische Last werden immer die beiden Komponenten gekoppelt betrachtet. Dies zeigt sich in einem gemeinsamen Schnittpunkt der Kennlinien für die Antriebs- und die Arbeitsmaschine. Wenn die Netzfrequenz durch einen Kraftwerksausfall absinkt, dann ändert sich auch sofort die mechanische Wirkleistung, indem sie sprunghaft absinkt. Dieser Vorgang ist durch den senkrechten Wechsel der Kennlinien in Abbildung 3 grafisch dargestellt (durch die senkrechte Verbindungslinie zwischen den Zeitpunkten -0 und $+0$). Der neue gemeinsame Arbeitspunkt der beiden Maschinen wird erst später unter Ausspeicherung der Rotationsenergie erreicht[8].

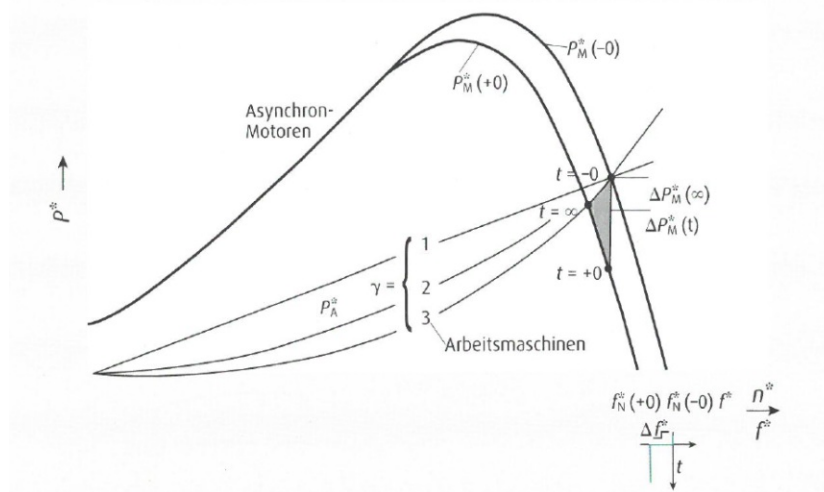


Abbildung 3: Darstellung des Verbraucherselbstregelleffekts bei Kopplung von Antriebs- und Arbeitsmaschine [8]

3.1.5 Mischlasten

Bei dieser Kategorie handelt es sich um jene Lasten, welche nicht genau einer Verbrauchergruppe zugeordnet werden können. So besitzen zum Beispiel ohmsch-induktive Lasten, einen ohmschen sowie einen induktiven Anteil. Die motorischen Lasten können auch einen induktiven beziehungsweise kapazitiven Anteil besitzen[9].

3.1.6 Geregelte Verbraucher

Um Verluste der Verbraucher zu verringern, und somit die Effizienz dieser Verbraucher zu steigern, ist die Nachfrage an der Leistungselektronik stark gestiegen. Zugleich ergibt sich durch den Einsatz der Umrichterschaltungen eine einfachere und elegantere Möglichkeit, Kraftmaschinen zu regeln. Durch den Einsatz von Leistungselektronik in elektrischen Verbrauchern jedoch entfällt die Frequenzabhängigkeit der Last und es resultiert ein konstanter Leistungsverbrauch[16]. Dies hat negative Folgen auf den NSRE[9][8].

Bei Betrieb der motorischen Lasten über FU verlieren die motorischen Lasten ihre frequenzabhängige Leistungsaufnahme aufgrund der verbauten Elektronik im FU. Ein FU ist in drei Teilen aufgebaut. Zuerst wird die Netzspannung und Netzfrequenz über einen Gleichrichter gleichgerichtet. Danach glätten Spulen und Kondensatoren die Spannung im Zwischenkreis. Zuletzt wird über Schaltzyklen des Ausgangswechselrichters eine neue motorische Frequenz erstellt, und ist somit von der Netzfrequenz nicht mehr abhängig[5][16].

Verbraucher, welche über ein Netzteil betrieben werden, besitzen ebenfalls keine Frequenzabhängigkeit in der Wirkleistung. Dies lässt sich wieder im Aufbau des Netzteils zeigen, denn in den Netzteilen sind wieder Filter und Gleichrichter verbaut[16].

3.2 Stabilisierender Effekt des NSRE

Bei Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch kommt es zu einer Veränderung der Frequenz. Wenn mehr Leistung ins Netz eingespeist wird als derzeit benötigt wird, dann steigt die Frequenzänderung proportional mit der Leistungsänderung im Verbundsystem an. Im Falle, dass zu wenig Leistung ins Netz eingespeist wird, zum Beispiel auf Grund eines Kraftwerksausfalls, wird die Frequenz dementsprechend absinken[17][18]. Bei einem unregelmäßigen Netz hat das fatale Auswirkungen auf die Netzstabilität. Das Netz stabilisiert sich aber mithilfe mehrerer Mechanismen wieder.

Hauptsächlich wird durch die Primärregelung im elektrischen Verbundsystem aufgrund der schnellen Bereitstellung von Ausgleichsenergie das Netz wieder stabilisiert. Die Primärregelung wird aber erst ab einem Frequenzunterschied von $\pm 20 \text{ mHz}$ aktiviert[9] und setzt einige Sekunden danach ein[3].

Der NSRE wirkt hingegen sofort im Netz und stabilisierend auf das Netz, wenn auch nicht in der Größenordnung der Primärregelung.

Der verbraucherabhängige sowie der erzeugerabhängige NSRE wird im regelungstechnischen Ersatzschaltbild des Verbundnetzes, dargestellt in Abbildung 5, durch ein Proportionalglied modelliert. Das bedeutet, dass bei einer Frequenzabnahme direkt proportional auch die Leistungsaufnahme sinkt. Dadurch wird dem Kraftwerksausfall automatisch durch die geringere Leistungsaufnahme entgegengewirkt und folgedessen wird weniger Primärregelleistung benötigt.

Die Autoren Schöll, Lehner und Lens beschreiben in ihrem Paper [1] anhand mehrerer Szenarien den stabilisierenden Effekt des NSRE und die Dynamik der Frequency Containment Reserve (FCR). Für die Simulation wurde ein Kraftwerksausfall von 1,5 GW und eine Netzanlaufzeitkonstante von 12 s angenommen[1]. In deren Paper wurden vier Simulationen mit folgenden Parametern durchgeführt:

- ohne NSRE ohne FCR
- mit NSRE ohne FCR
- ohne NSRE mit FCR
- mit NSRE mit FCR

In der ersten Simulation wird angenommen, dass kein NSRE und keine Primärregelung wirkt. Es wirkt also nur die Schwungmasse der Synchrongeneratoren im Netz und dadurch kommt es zu einer konstanten Frequenzabnahme. Spätestens nach 10 Sekunden ist die untere Ansprechgrenze von 49 Hz erreicht und es kommt zum Lastabwurf[1].

Wenn aber, wie in der zweiten Simulation[1] angenommen, der NSRE aktiv ist, dann wird ein stabilisierender Effekt nach den gleichen 10 Sekunden bemerkbar, die stationäre Frequenz beträgt hier 49.7 Hz[1].

In der dritten Simulation, ohne NSRE, aber mit aktiver FCR, wird die stationäre Frequenz erst nach 50 Sekunden oder später erreicht. Die Autoren

geben aber an, dass dieser Simulationsverlauf von der Aktivierungsgeschwindigkeit und der Dynamik der FCR abhängt. Die Frequenzabweichung im stationären Fall ist deutlich geringer als in der zweiten Simulation[1].

Wenn aber beide Mechanismen aktiviert werden, dann werden beide Vorteile des NSRE und der FCR bemerkbar. Der Einschwingvorgang ist bereits nach 15 Sekunden abgeschlossen. Sowohl der quasistationäre als auch der transiente Frequenzunterschied zur Nennnetzfrequenz werden in der letzten Simulation niedriger als in den vorherigen Simulationen berechnet[1].

In der nachfolgenden Abbildung 4 werden alle Simulationen noch einmal dargestellt.

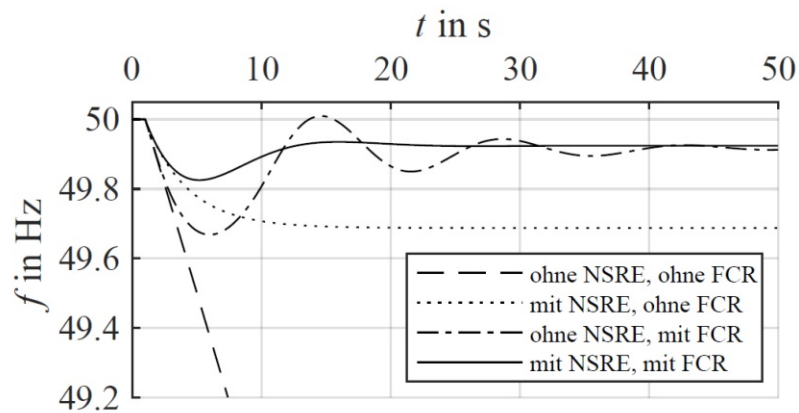


Abbildung 4: Simulierte Frequenzantworten bei einem Kraftwerksausfall für verschiedenen Szenarien[1]

3.3 Methode zur Bestimmung des NSRE

Um den NSRE zu bestimmen, werden in der Praxis zwei Methoden angewendet. Das sind die Top-Down Methode und die Bottom-Up Methode. Eine Beschreibung der beiden Methoden erfolgt im Anschluss. Für diese Arbeit wurde der Bottom-Up Ansatz gewählt.

3.3.1 Top-Down Methode

Um den NSRE nach einem Top-Down Ansatz zu bestimmen, müssen zuerst ausreichend geeignete Spannungs- oder Frequenzereignisse im Netz, zum Beispiel durch einen Kraftwerksausfall vorgefallen sein. Aus der gemessenen Frequenzantwort des Verbundnetzes kann nun der NSRE bestimmt werden. Um den NSRE nach dieser Methode neu zu bestimmen, werden verschiedenste Anforderungen an die Messungen gestellt. Dazu zählen unter anderem die Netzgröße, um das Verbraucherrauschen zu minimieren. Das vermessene Netz sollte nur von einem Anschlusspunkt versorgt werden, um den Aufwand gering zu halten. Zum Schluss werden noch Anforderungen an die Netzeigenschaften gestellt. So sollte in den gemessenen Verteilnetzen eine unterschiedliche Lastverteilung herrschen, um den Einfluss der Verbraucherdynamik zu identifizieren[1].

3.3.2 Bottom-Up Methode

Bei der Bottom-Up Methode wird das Netz auf seine Verbraucher hin genau analysiert. Dazu werden die einzelnen Verbraucher modelliert und auf das gesamte Netz hochgerechnet. Die Schwierigkeit dieser Methode zeigt sich in der Genauigkeit der einzelnen Modelle und der Information über das Verbundnetz[1]. Der Vorteil dieser Methode gegenüber eines Top-Down Ansatzes ist, dass diese Methode jederzeit, also ohne ausreichend geeignete Kraftwerksausfälle durchgeführt werden kann.

4 Europäisches Verbundnetz

In diesem Abschnitt der Diplomarbeit wird das Europäische Verbundnetz behandelt, welches als Grundlage für das später eingeführte Simulationsmodell genommen wird. Wichtige Parameter für das Modell sind die Erzeugung (beziehungsweise die Umwandlung in elektrischer Energie), die Lastverteilung der Haushalte und der Industrie sowie die Regelungen, um das Netz zu stabilisieren.

4.1 Erzeugung

Die elektrische Energie, welche benötigt wird, um elektrische Lasten zu betreiben, wird hauptsächlich von Synchronmaschinen im Generator-Betrieb bereitgestellt. Drehstrom-Asynchrongeneratoren werden hingegen bei kleineren Kraftwerken und Windkraftanlagen eingesetzt [3]. Das vergangene und heutige Stromnetz erfährt durch die Maschinen eine sehr wichtige Dynamik, um schnellen Frequenzänderungen entgegenzuwirken und wird auch als Trägheit (Inertia) des Verbundnetzes bezeichnet. Die Bewegungsdifferentialgleichung eines Synchrongenerators wird nach [19] folgendermaßen beschrieben.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_{mech} - M_{el} \quad (7)$$

Das bedeutet wiederum, um eine Maschine zu beschleunigen, muss die Momentenbilanz $M_{mech} - M_{el}$ positiv sein. Die Bewegungsdifferentialgleichung (7) lässt sich durch Erweitern mit der Winkelgeschwindigkeit ω , sowie durch Ersetzen des Trägheitsmoments J durch die Scheinleistung S_N und die Anlaufzeitkonstante T_A in folgende Gleichung überführen:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{p}{\omega S_N T_A} P_{mech} - P_{el} \quad (8)$$

Diese Form der Bewegungsdifferentialgleichung wird bei Stabilitätsrechnungen verwendet und ist die Differentialgleichung eines nichtlinearen Drehschwingers. Die zweite Ableitung des Drehwinkels nach der Zeit $d^2\theta/dt^2$ ist zugleich die Änderungsrate der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\omega}$.

Die Gesamtheit aller Synchrongeneratoren im Netz werden für dieses Netzdyamikmodell auf einen Synchrongenerator vereinfacht, um die Auswirkungen von Kraftwerksausfällen zu simulieren. Dazu wird die Anlaufzeitkonstante

durch die Netzanlaufzeitkonstante T_{Netz} ersetzt. In [17] wird die Netzanlaufzeitkonstante folgendermaßen definiert:

$$T_{Netz} = \frac{\sum_1^n T_{AN,KW,i} \cdot P_{Nenn,KW,i}}{P_{Netzlast}} \quad (9)$$

Die Netzanlaufzeitkonstante ist demnach die Summe aller Generatoren mit Schwungmassen im Verbundnetz. $T_{AN,KW,i}$ beschreibt die Anlaufzeit eines Generators und $P_{Nenn,KW,i}$ die Nennwirkleistung eines Generators. Aufgrund von unterschiedlichen Trägheitsmomenten variiert die Anlaufkonstante der einzelnen Generatoren. Diese Anlaufzeit wird mit der Nennleistung des einzelnen Generators multipliziert und auf die Gesamtheit aller Erzeugungsanlagen im Netz hochgerechnet und auf die Netzlast bezogen. In der englischen Literatur wird anstelle der Netzanlaufzeitkonstante die Trägheit des Systems H (Inertia) angegeben[18]. Die Netzanlaufzeitkonstante ergibt sich als doppelte Trägheit:

$$T_{Netz} = 2 \cdot H \quad (10)$$

Bei Änderung der Leistungsbilanz im Verbundnetz, etwa durch einen Kraftwerksausfall oder durch die Abtrennung elektrischer Lasten, bremsen bzw. beschleunigen die Synchrongeneratoren im gesamten Verbundnetz und ändern dadurch die Netzfrequenz[17].

Dieses Verhalten wird im regeltechnischen Ersatzschaltbild durch ein I-Glied beschrieben. Die Integrationszeit T_i des I-Gliedes entspricht der Netzanlaufzeitkonstante des Verbundnetzes[8][12].

4.2 Lastverteilung

Für die Bestimmung der gesamten elektrischen Last nach Komponenten im Europäischen Verbundsystem ist ein Top-Down Ansatz angewandt worden. Laut dem Statistischen Amt der Europäischen Union (Eurostat) lag der elektrische Gesamtverbrauch der damals 28 Europäischen Mitgliedstaaten im Jahr 2012 bei 240069 ktOE[20]. Dieser Gesamtverbrauch kann in drei große Gruppen eingeteilt werden:

- Industrie
- Haushalte

- kommerzielle und öffentliche Bereich

Zum dritten Bereich zählen unter anderem Banken, Krankenhäuser, Geschäfte und Hotels, um einige Vertreter zu nennen. Den Rest des elektrischen Energieverbrauchs nehmen die Sektoren für Transport, Forstwirtschaft und Fischerei ein, sowie noch weitere, welche nicht spezifiziert worden sind. Aufgrund ihres Anteils an der Gesamtlast können die Sektoren der Fischereien und der nicht spezifizierten Sektoren vernachlässigt werden.

Tabelle 1: Verbrauch der Sektoren in Europa 2012[20]

Sektor	Energieverbrauch [ktoe]	%
Industrie	86668	36.00
Haushalte	71225	29.60
Kommerziell und öffentlich	72647	30.19
Ackerbau und Forstwirtschaft	3810	1.58
Transport	5508	2.29
Fischerein	30	0.01
Andere	720	0.30

4.2.1 Industrie

Eurostat publiziert jedes Jahr einen Bericht über den gesamten Energieverbrauch in der Europäischen Union. Für diese Arbeit wurde speziell das Jahr 2012 ausgewertet, weil die Aufschlüsselung des elektrischen Endverbrauchs der Teilindustrien für dieses Jahr vorlagen[21]. In der nachfolgenden Tabelle 2 werden zunächst die Teilindustrien und ihr Anteil am elektrischen Gesamtverbrauch laut Eurostat 2012 dargestellt.

Im Bericht der ICF International 2015 [21] wird auf die Industrien im Jahr 2012 eingegangen. Dazu zählt eine genaue Auflistung der einzelnen Endverbraucher, um die Lasten in der Industrie in weiterer Folge in die oben genannten Verbraucherklassen einzuteilen. In dem oben genannten Bericht werden nicht alle Sektoren behandelt. Um die fehlenden Industrien zu beschreiben, wird auf andere Berichte und Paper verwiesen. Der ICF International teilt die Lasten in der Industrie in folgende Kategorien ein:

- Lüfter und Ventilatoren

- Heating Ventilation Air Conditioning (HVAC)
- Schmelze, Öfen und Brennöfen
- Dampfkessel und -systeme
- Beleuchtung
- Kühlung und Tiefkühlung
- Spezifisch für Prozess
- Druckluft
- Andere Motoren

Tabelle 2: Verbrauch der Teilindustrien in Europa 2012[20]

Industrie	Energieverbrauch [ktoe]	%
Eisen und Stahl	10163	11.73
Chemie und Petroleum	16101	18.58
Nichteisen Metall	5420	6.25
Nichtmetalle Werkstoffe	5987	6.91
Fahrzeugbau	4420	5.1
Maschinenanlagen	10446	12.05
Bergbau und Steinbruch	1340	1.55
Essen, Trinken und Tabak	9457	10.91
Papier, Pulpe und Druck	10561	12.19
Holz und Holzproduktion	1832	2.11
Bau	1281	1.48
Textil und Leder	1851	2.14
Sonstige Industrien	7809	9.01

Die Verteilung der Verbraucher werden in den nachfolgenden Tabellen 3 - 9 angegeben.

Tabelle 3: Lastverteilung für “Eisen und Stahl” [21]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Lüfter und Ventilatoren	7
HVAC	8
Schmelze, Öfen und Brennöfen	34
Dampfkessel und Dampfsysteme	2
Beleuchtung	4
Kühlung und Tiefkühlung	2
Spezifisch für Prozess	9
Pumpen	11
Druckluft	10
Andere Motoren	12
Andere Verbraucher	1

Holzproduktion: Zur Industrie der Holzproduktion zählen hauptsächlich Sägewerke und Tischlereien sowie Produktionen zur Herstellung von Sperrholzplatten und Brettern. Zu den elektischen Lasten der Sägewerke und Tischlereien zählen vor allem Asynchronmotoren, welche Sägen und Lüfter antreiben. Die Herstellung der Bretter zeigt in der Lastverteilung Ähnlichkeiten mit der chemischen Industrie[22]. In [22] werden zu diesem Bereich keine genaueren Prozentangaben gemacht. Aufgrund der hohen Anzahl an Sägewerken und Tischlereien sowie dem niedrigen Anteil am Gesamtverbrauch wird sie den motorischen Lasten hinzugefügt.

Bergbau und Steinbruch: Der Sektor ”Bergbau und Steinbruch” wird in [22] behandelt. Wie bei der Holzproduktion werden auch hier keine genauen Angaben zur Lastverteilung gemacht. Der Autor beschreibt aber die Lasten im Bergbau hauptsächlich als motorische Lasten. Dazu zählen Motoren und Maschinen, um das Erz zu verarbeiten. Ein wichtiger Aspekt in den Minen ist auch, dass Restwasser mit Pumpen aus dem Schacht gepumpt werden muss. Zusätzlich ist auch die Ventilation über Lüfter wichtig und für ausreichende Beleuchtung muss auch gesorgt werden. Eine Auflistung der Endverbraucher wird in [23] angegeben. Die Lastverteilung für diesen Industriesektor wird in der Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 4: Lastverteilung für "Chemie und Petroleum" [21]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Lüfter und Ventilatoren	13
HVAC	14
Schmelze, Öfen und Brennöfen	2
Dampfkessel und Dampfsysteme	3
Beleuchtung	1
Kühlung und Tiefkühlung	2
Spezifisch für Prozess	16
Pumpen	16
Druckluft	15
Andere Motoren	17
Andere Verbraucher	1

Tabelle 5: Lastverteilung für "Nichteisen Metalle" [21]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Lüfter und Ventilatoren	4
HVAC	5
Schmelze, Öfen und Brennöfen	69
Dampfkessel und Dampfsysteme	0
Beleuchtung	2
Kühlung und Tiefkühlung	0
Spezifisch für Prozess	5
Pumpen	5
Druckluft	3
Andere Motoren	6
Andere Verbraucher	1

Tabelle 6: Lastverteilung für "Nichtmetallische Werkstoffe" [21]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Lüfter und Ventilatoren	11
HVAC	1
Schmelze, Öfen und Brennöfen	28
Dampfkessel und Dampfsysteme	2
Beleuchtung	0
Kühlung und Tiefkühlung	1
Spezifisch für Prozess	26
Pumpen	14
Druckluft	9
Andere Motoren	7
Andere Verbraucher	2

Tabelle 7: Lastverteilung für "Maschinenanlagen" [21]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Lüfter und Ventilatoren	7
HVAC	8
Schmelze, Öfen und Brennöfen	2
Dampfkessel und Dampfsysteme	1
Beleuchtung	3
Kühlung und Tiefkühlung	28
Spezifisch für Prozess	1
Pumpen	17
Druckluft	14
Andere Motoren	18
Andere Verbraucher	1

Tabelle 8: Lastverteilung für "Essen, Trinken und Tabak" [21]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Lüfter und Ventilatoren	7
HVAC	8
Schmelze, Öfen und Brennöfen	2
Dampfkessel und Dampfsysteme	1
Beleuchtung	3
Kühlung und Tiefkühlung	28
Spezifisch für Prozess	1
Pumpen	17
Druckluft	14
Andere Motoren	18
Andere Verbraucher	1

Tabelle 9: Lastverteilung für "Papier und Druck" [21]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Lüfter und Ventilatoren	13
HVAC	3
Schmelze, Öfen und Brennöfen	2
Dampfkessel und Dampfsysteme	2
Beleuchtung	2
Kühlung und Tiefkühlung	1
Spezifisch für Prozess	1
Pumpen	31
Druckluft	19
Andere Motoren	24
Andere Verbraucher	2

Tabelle 10: Lastverteilung für "Bergbau und Steinbruch" [23]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Spezifisch für Prozess	1.5
Beleuchtung	7
Andere Motoren	59
Pumpen	12.5
Ventilation	9
Kühlung	4
Druckluft	7

Textil und Leder: Zum Sektor "Textil und Leder" zählt unter anderem die Garnproduktion, Webstühle, Strickereien, Woldecken- und Teppichmanufakturen, die Kleidungsproduktion sowie lederverarbeitende Gewerbe, wie Gerbereien und Schuhproduktionen. Die Maschinen hierfür sind hauptsächlich motorische Lasten wie Druckluftanlagen, Pumpen, Lüfter und verschiedene Motoren. Für die Trocknung und Dampferzeugung werden elektrische Heizungen verwendet. [22]

Fahrzeugbau: Der Industriesektor "Fahrzeugbau" teilt sich unter anderem in den Automobilzweig, den Flugzeugbau und den Schiffbau auf. Die Endverbraucher werden wieder der Grafik aus [23] entnommen. In Tabelle 11 wird die Lastverteilung für den Sektor Fahrzeugbau angegeben.

Tabelle 11: Lastverteilung für "Fahrzeugbau" [23]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Spezifisch für Prozess	16
Beleuchtung	12
Andere Motoren	45
Pumpen	5
Ventilation	10
Kühlung	0
Druckluft	12

Andere: Alle anderen Industrien sind in diesem Sektor zusammengefasst. Welche dies genau sind, wird in der Statistik von Eurostat nicht erwähnt. Eine Einteilung der Endverbraucher wurde aber der Grafik von [23] entnommen und in der nachfolgenden Tabelle 12 angegeben.

Tabelle 12: Lastverteilung für “Sonstige Industrien” [23]

Verbrauchergruppe	Anteil in %
Spezifisch für Prozess	18
Beleuchtung	6
Andere Motoren	47
Pumpen	5
Ventilation	10
Kühlung	1
Druckluft	13

Werden nun die Tabelle der Industrien und deren Gesamtbedarf an elektrischer Energie mit den Tabellen 3 - 12 kombiniert, ergibt sich daraus der Gesamtverbrauch der elektrischen Last für den Sektor Industrie aufgeteilt auf die Verbrauchergruppen. Diese Lastverteilung wird in der nachfolgenden Tabelle 13 angegeben.

4.2.2 Haushalt

Wie weiter oben bereits beschrieben, können Haushalte über ein Standardlastprofil beschrieben werden. Um das Simulationsmodell zu vereinfachen, ist es ratsam, die Gesamtlast der Haushalte auf die Verbrauchergruppen aufzuteilen. Für alle europäischen Haushalte wurde im Jahr 2009 dafür eine Auflistung durchgeführt und wird in sortierter Reihenfolge in der nachfolgenden Tabelle 14 angegeben [24] [25]. Die Prozentzahlen entsprechen dem Teil an der Gesamtlast im europäischen Verbundnetz.

4.2.3 Kommerzieller und öffentlicher Bereich

Eurostat definiert den Tertiären Sektor als jenen Sektor, der zu den Dienstleistungen zählt. In [25] wurde aber bereits eine Auflistung des Verbrauchs

Tabelle 13: Lastverteilung für den Sektor Industrie Jahr 2012

Lastart	Verbraucher	Anteil in %
Motoren	Lüfter und Ventilatoren	2.679
	HVAC	2.558
	Kühlung und Tiefkühlung	2.657
	Pumpen	5.08
	Druckluft	4.391
	Andere Motoren	7.177
Heizungen	Schmelze, Öfen und Brennöfen	4.074
	Dampfkessel und Dampfsysteme	0.506
Beleuchtung		2.116
Spezifisch für Prozess		2.3307
Andere Lasten		0.327

nach Endverbraucher ausgeführt und die Lasten werden nach dieser Auflistung modelliert. Die Daten stammen, wie die der Haushalte, aus dem Jahr 2009. Die Prozentzahlen der Lasten an der Gesamtlast werden wieder in tabellarischer Form (Tabelle 15) präsentiert.

4.2.4 Transport, Ackerbau und Fischereien

Der elektrische Energieverbrauch des Sektors für Transport wird hauptsächlich vom öffentlichen Verkehr, den Zügen und Straßenbahnen verbraucht. Die Motoren der Verkehrsmittel hängen entweder an einem eigenen Netz (16 2/3 Hz) oder am 50 Hz Verbundnetz. In beiden genannten Fällen wird die Maschine aber über einen gespeisten Umrichter betrieben.[26]

4.2.5 Zusammensetzung der Gesamtlast

Aus den vorigen Kapiteln wird nun die Lastverteilung bestimmt. Für die Gesamtlast werden die Lasten der Industrie, der Haushalte, des öffentlichen Bereichs sowie des Transports in die verschiedenen Lastgruppen unterteilt. Die restlichen Sektoren können aufgrund ihres Anteils am Gesamtverbrauch vernachlässigt werden. Die Unterteilung der Gesamtlast wird in folgende Lasten durchgeführt. Die Motoren werden anhand ihrer Momentenkennlinie unterteilt in konstantes, lineares, quadratisches und indirektes Moment. Eine

Tabelle 14: Lastverteilung für den Sektor Haushalt Jahr 2009

Lastart	Verbraucher	Anteil in %
Motoren	Cold appliances	4.44
	Washing and Drying	2.07
	Dishwasher	0.89
	Vacuum Cleaner	0.89
	Ventilation and air conditioning	1.48
Heizungen	Electric Ovens, Grills	2.07
	Water Heating	2.66
	Heating Systems and Electric Boilers	5.26
Beleuchtung		2.96
Elektronik	Kaffee Maschinen	0.59
	Entertainment	2.38
	Set-top Boxes	0.59
	Büroaustattung	2.07
Andere Lasten		1.18

Tabelle 15: Lastverteilung für den öffentlichen Bereich Jahr 2009

Lastart	Verbraucher	Anteil in %
Motoren	Circulators	2.08
	Air Conditioning	0.86
	Commercial Refrigerator	2.59
	Ventilation	3.76
	Pumps	1.76
Heizungen	Space and Water heating	5.80
	Cooking Appliances	2.66
Beleuchtung	Office Lightning	6.27
	Street Lightning	1.41
Elektronik	Computers	1.41
	Imaging Equipment	0.35
Andere Lasten		2.31

weitere Gruppe ist die der elektrischen Heizungen. Die restlichen Gruppen sind Beleuchtung, Elektronik und sonstige Lasten. Für einzelne Haushaltslasten sind während dieser Diplomarbeit eigene Messungen durchgeführt worden und werden deshalb in der Zusammensetzung der Last einzeln berücksichtigt. Die Industrielast "Sonstige Motoren" wurde nicht weiter spezifiziert. Es wird aber angenommen, dass es sich dabei um Motoren mit linearer Momentenkennlinie handelt. Die Zusammensetzung wird in der nachfolgenden Tabelle 16 angegeben.

Tabelle 16: Zusammensetzung der Gesamtlast Jahr 2012

Lastart	Anteil in %	Kürzel in Matlab
Motoren linear	7.1768	p_{mlit}
Motoren quadratisch	30.7496	p_{msqt}
Heizung elektrisch	18.6713	p_{elhe}
Elektrische Öfen	3.6392	p_{oven}
Kühl- und Gefrierschränke	7.0278	p_{frez}
Geschirrspüler	0.8806	p_{dish}
Beleuchtung	12.814	p_{ligh}
Elektronik	7.391	p_{elec}

4.3 Netzselbstregeleffekt

Im vereinfachten Netzdynamikmodell nach [12] wird der NSRE durch eine Rückführung eines P-Glieds dargestellt. Bei einer Frequenzabweichung Δf entsteht durch das P-Glied eine Leistung, welche noch vom Gesamtverbrauch abgezogen werden muss.

Der Proportionalitätsfaktor ergibt sich durch Normierung auf die Nennnetz-frequenz von 50 Hz auf:

$$k_{pr} = \frac{1 - 2 \frac{\%}{Hz}}{\frac{1}{50Hz}} = \frac{0.01 - 0.02 \frac{1}{Hz}}{\frac{1}{50Hz}} = 0.5 - 1 \quad (11)$$

4.4 Regelungen

Weicht die Netzfrequenz von der Sollnetz-frequenz von 50 Hz ab, setzen Regelungen ein, um das Netz wieder zu stabilisieren. Dazu zählen die Primär-,

Sekundär- und Tertiärregelung. Zuerst wird einige Sekunden nach einem Ausfall in der Primärregelung Regelleistung bereitgestellt, um wieder ein Leistungsgleichgewicht zwischen Erzeugung und Last herzustellen. Aufgrund der Tatsache, dass die Sekundär- und Tertiärregelung nicht augenblicklich einsetzen und nur 60 s nach einem Ausfall betrachtet werden, werden diese beiden Regelungen im weiteren Netzdynamikmodell nicht benötigt[19].

4.4.1 Primärregelung

Ab einer Frequenzabweichung von $\pm 20 \text{ mHz}$ wird die Primärregelung automatisch in den teilnehmenden Kraftwerken aktiviert. Sie setzt in der Regel einige Sekunden nach einem Fehler ein[3]. Durch eine Drosselung oder eine Erweiterung der Stellglieder der Turbinen ist es möglich, Regelenergie bereitzustellen oder zu verringern. Dieser Vorgang wird automatisch anhand von Sensoren und der Netzinformation durchgeführt. Die maximale Regelkapazität der Primärenergie liegt in der Größenordnung des größten Kraftwerks bei 3 GW. Die Regelenergie wird dann innerhalb von 30 Sekunden komplett bereitgestellt. Dies resultiert in einem konstanten Anstieg der Regelenergie. Die Regelenergie muss zusätzlich für eine Zeitdauer von 30 Minuten bereitgestellt werden. [9][12][27].

Im regeltechnischen Ersatzschaltbild müssen nun diese Dynamiken miteinbezogen werden. So kann über eine Anstiegsbegrenzung (in Matlab-Simulink Rate Limiter) der lineare Anstieg modelliert werden.

$$\text{Rising/FallingSlewRate} = \frac{\Delta P_{pr}}{T} = \frac{3\text{GW}}{30\text{s}} = 0.00067 \frac{1}{\text{s}} \quad (12)$$

Die Primärregelung wird die maximale Regelleistung von 3 GW nicht übersteigen und muss durch eine Sättigung (äquivalentes Blockschaltbild Simulink: Saturation) eingestellt werden.

$$\text{Saturation} = \frac{\Delta P_{pr}}{P_0} = \frac{3\text{GW}}{150\text{GW}} = 0.02 \quad (13)$$

Wird nicht die komplette Regelenergie benötigt, tritt die sogenannte Statik δ_r der Primärregelung ein. Bei einer maximalen Frequenzabweichung von $\pm 200 \text{ mHz}$ wird die gesamte Regelenergie von 3 GW bereitgestellt. Dazwischen skaliert die bereitgestellte Regelenergie in Abhängigkeit der Lastsi-

tuation (Stark- oder Schwachlast) sowie der Frequenzabweichung und wird meistens in Prozent angegeben [12]. Für einen ausgefallenen Kraftwerksblock $\Delta P_Z = 3 \text{ GW}$ ergibt sich dann folgende Statik:

$$\delta_r = \frac{\frac{\Delta f}{f_0}}{\frac{\Delta P_Z}{P_0}} = \delta_r = \frac{\frac{200 \text{ mHz}}{50 \text{ Hz}}}{\frac{-3 \text{ GW}}{150 \text{ GW}}} = -0.2 \quad (14)$$

Im regeltechnischen Ersatzschaltbild wird die Statik als P-Glied modelliert. Der Proportionalitätsfaktor der oben beschriebenen Lastsituation wird als Kehrwert von δ_r mit -5 berechnet.

4.5 Regeltechnisches Ersatzschaltbild des Verbundnetzes

Das summarische P/f Netzdynamikmodell besteht aus den regeltechnischen Ersatzmodellen der Primärregelung, der Netzanlaufzeitkonstante und dem Netzselbststreckeffekt und wird in der nachfolgenden Abbildung (5) zusammengefasst dargestellt.

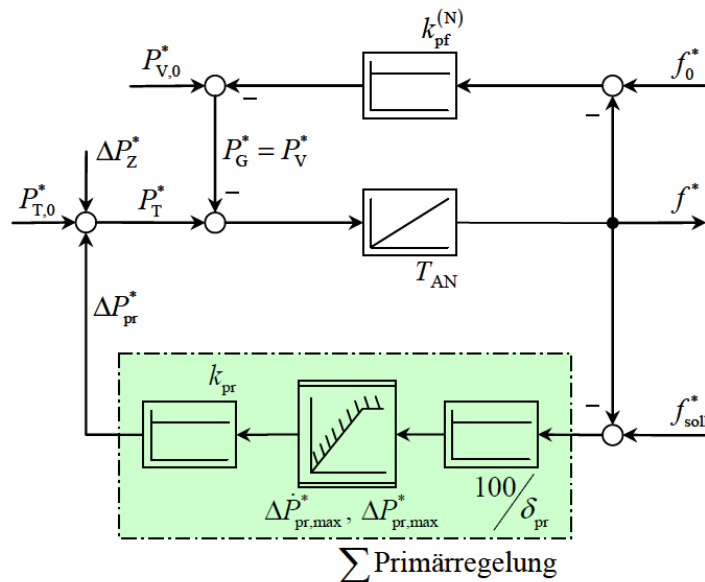


Abbildung 5: Blockschaltbild des vereinfachten Netzdynamikmodells[12]

5 Szenarien für ein zukünftiges Verbundnetz

In diesem Teil der Diplomarbeit werden für das europäische Stromnetz mögliche Szenarien beschrieben, wie zum Beispiel die Veränderung der Last durch den vermehrten Einsatz von Leistungselektronik und die Veränderung der Energieumwandlung durch regenerative Energiesysteme. Um den ökologischen Fußabdruck zu verbessern, ist es zusätzlich noch notwendig, Lasten zu elektrifizieren, was zu einer Veränderung der Lastverteilung im Netz führt.

5.1 Veränderungen der elektrischen Lasten

Im TYNDP 2020 Scenario Report, einer Zusammenarbeit der ENTSO-E und ENTSO-G, wird für die Haushalte und den kommerziellen Bereich folgendes Szenario beschrieben: Eine große Änderung der Last wird im Bereich der Heizungen eintreten, welche im Jahr 2020 größtenteils mit Öl, Gas und Biomasse befeuert worden sind. Im Jahr 2050 werden diese teilweise durch Wärmepumpensysteme (Außenluft und Erdwärme) abgelöst. Dies bedeutet wiederum einen Anstieg der motorischen Lasten im System. Jedoch steigt, wie im nächsten Absatz beschrieben wird, auch die Zahl der Frequenzumrichter in dieser Zeit an[28].

Entwicklung der Verkaufszahlen von Frequenzumrichtern

In [29] geben die Autoren eine Verteilung der Motoren nach Wirkleistung und Marktanteil an. So ist der Hauptverkaufsanteil der elektrischen Motoren bis 0.75 kW und liegt bei 89.66 %. Die zweite Gruppe, die Motoren bis 375 kW beinhaltet, beansprucht 10.31 % aller Motoren. Die kleinste Gruppe sind die Motoren über 375 kW. Die Leistungselektronik und Umrichtertechnik ist, wie die Verkaufszahlen in [29] zeigen, eine stetig wachsende Sparte. Die Zahlen in Tabelle 17 prognostizieren ein lineares Wachstum im Verkauf der Umrichter für Motoren unter 7.5 kW. Diese werden laut den Autoren bei Pumpen und Lüftern sowie im HVAC-Bereich eingebaut.

Energiesparende Verbraucher

Damit in Zukunft weniger elektrische Energie verbraucht wird, tendiert die Europäische Union zu effizienteren Motoren und Lasten [29]. Diese effizienteren Versionen der Haushaltslasten werden mit Leistungselektronik versehen, um die Leistungsaufnahme niedriger zu halten. In einem Bericht des deutschen Umweltbundesamtes "Marktbeobachtungen für die Umweltpoli-

Tabelle 17: Verkaufsanteile von Frequenzumrichtern (< 7.5 kW) [29]

Jahr	Anteile [%]
2000	8
2012	20
2020	44

„tik“ werden die Verkaufszahlen der energieeinsparenden Haushaltslasten für das Jahr 2015 angegeben[30]. Die Marktanteile für diese Haushaltgeräte werden in der nachfolgenden Tabelle 18 angeführt.

Tabelle 18: Marktanteile der Effizientklassen A+++ und A++ in 2015 [30]

Verbraucher	Anteile [%]
Geschirrspüler	73
Kühlgeräte	75
Gefriergeräte	85
Waschmaschinen	89

Für die Lastverteilung im Jahr 2050 werden diese Verkaufszahlen als Richtwerte für die Anzahl der effizienten Haushaltsgeräte angenommen.

5.2 Veränderung der Energieversorgung

Der Trend in der Energieversorgung tendiert in Richtung erneuerbare Energiesysteme. Wird das Angebot von Sonneneinstrahlung durch Photovoltaik-Anlagen voll ausgenützt, verdrängt diese Form der Energieumwandlung Kraftwerke, welche die benötigte Leistung mithilfe von Turbinen und Generatoren ins Netz eingespeist haben. Diese Entwicklung hat negative Auswirkungen auf die Netzanlaufzeitkonstante und den erzeugerabhängigen NSRE.

Aufgrund der Stromwende werden konventionelle Kraftwerke stetig vom Netz genommen und durch regenerative Energiesysteme ersetzt. In [8] gehen die Autoren davon aus, dass bis 2050 der Anteil dieser konventionellen Kraftwerke auf 20% des Jahresmittels sinken muss, um die Energieziele der Europäischen Union zu erreichen. Dies bedeutet, dass die Netzanlaufzeitkonstante ebenfalls auf circa 20% sinken wird. Bei einer momentanen Netzan-

laufzeitkonstante von 10 s wären es 2 s.

In "Entwicklung des Bedarfs an schneller Regelleistung im europäischen Verbundsystem" geben die Autoren für die Mitglieder der ENTSO-E für das Jahr 2030 einzelne Trägheitskonstanten an. Die Trägheitskonstante im gesamten Verbundnetz variiert zwischen 2 und 4 s und wird in der nachfolgenden Abbildung 6 dargestellt[18].

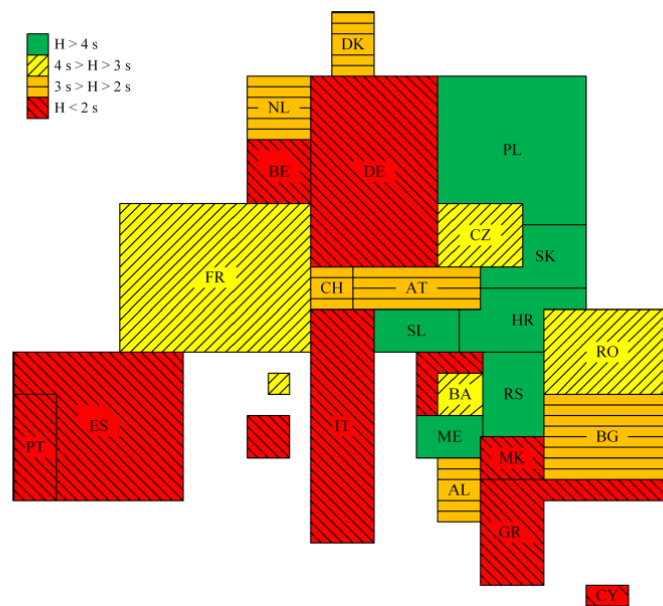


Abbildung 6: Mögliche Entwicklungen für die Trägheitskonstante H im Europäischen Verbundnetz (2030)[18]

Die Netzanlaufzeitkonstante hat keinen Einfluss auf den NSRE. Jedoch ist es bei der Untersuchung des zukünftigen NSRE wichtig, diese einzubeziehen, um eine Beurteilung der Netzstabilität in ihrer Gesamtheit durchzuführen. Die Reduzierung der konventionellen Kraftwerke hat einen direkten Einfluss auf den erzeugerabhängigen NSRE, der ein Drittel des NSRE ausmacht.

5.3 Veränderung des Energiebedarfs

Für die Beschreibung des zukünftigen Energieverbrauchs wurden zwei Berichte näher betrachtet. Der Bericht "EU Reference Scenario 2020" der Europäischen Kommission sowie "The POTEnCIA Central Scenario", ein Bericht der JRC kommt zum Ergebnis, dass der gesamte Primärenergieverbrauch die nächsten Jahrzehnte sinken wird; der Bedarf an elektrischer Energie jedoch ansteigen wird. Der Grund dafür ist, dass durch die Elektrifizierung von Motoren der Bedarf an elektrischer Energie steigt. Aufgrund der Tatsache, dass diese Motoren effizienter sind als Motoren, welche fossile Brennstoffe als Quelle benutzen, sinkt der Gesamtenergiebedarf [31] [32]. In der nachfolgenden Tabelle 19, welche aus [32] entnommen worden ist, wird der prognostizierte Energiebedarf für 2050 dargestellt .

Tabelle 19: Energiebedarf der Sektoren in Europa 2050[32]

Sektor	Energieverbrauch [Mtoe]	%
Industrie	108.33	36.42
Haushalte	72	24.21
Kommerziell und öffentlich	73	24.54
Transport	43.969	14.77

5.3.1 Industrie

In [32] werden im Gegensatz zu 2012 keine Daten für den Gesamtverbrauch dargestellt, stattdessen werden die Daten für den Gesamtumsatz der Branche in % angegeben. Die Zahlen aus dem Jahr 2012 werden somit mit dem Wachstum der Branche auf das Jahr 2050 hochgerechnet, indem die Änderung am Gesamtumsatz im Jahr 2012 über das Wachstum der Branche aufgerechnet wird. Die Änderung der Industriesparte Eisen und Stahl erfährt einen Rückgang von 0.5 %. Es wird angenommen, dass sich durch das Einsparen von Produktionsstätten der Energiebedarf verändert. Für die Lastverteilung wird angenommen, dass sie gleich bleibt. Die Industrien Bau und Bergbau wurden in diesem Bericht zu den anderen Industrien hinzugefügt.

Aus der Tabelle 20 für den Energiebedarf im Jahr 2050 und den Lastverteilungen der einzelnen Industrien (Tabellen 3 - 12) wurde für die Industrie eine Lastverteilung (Tabelle 21) erstellt.

Tabelle 20: Energiebedarf der Industrien in Europa 2050[32]

Sektor	2015	2050	Bedarf [Mtoe]
iron and steel	2.3	1.8	12.639
chemicals industry	13.3	13.6	20.185
non ferrous metals	1.3	1.2	67.679
non-metallic minerals	3.6	3.4	74.684
transport equipment	14.9	17.4	56.562
machinery equipment	31.2	29.3	12.808
food and beverages	14	15.8	12.033
pulp, paper and print	4.2	3.6	13.124
wood and wood produktion	1.7	1.8	2.292
textiles and leather	3.6	2.9	2.297
other industries	9.8	9.3	12.971

Tabelle 21: Lastverteilung für den Sektor Industrie Jahr 2050

Lastart	Verbraucher	Anteil in %
Motoren	Lüfter und Ventilatoren	2.705
	HVAC	2.861
	Kühlung und Tiefkühlung	2.673
	Pumpen	5.122
	Druckluft	4.547
	Andere Motoren	7.468
Heizungen	Schmelze, Öfen und Brennöfen	4.109
	Dampfkessel und Dampfsysteme	0.511
Beleuchtung		1.115
Process Specific		3.461
Andere Lasten		0.330

5.3.2 Haushalte

Der größte Anteil des Energieverbrauchs wird auch im Jahr 2050 wieder für die Raumheizung aufgebracht werden müssen jedoch mit dem Unterschied, dass vermehrt fossile Brennstoffe durch elektrische Wärmepumpen ersetzt werden. Eine genaues Szenario liefert der Bericht der JRC [32]. Dieser gibt den elektrischen Endverbrauch im Bereich Haushalt mit 72 Mtoe an. Eine Auflistung des Endverbrauchs wird in der nachfolgenden Tabelle 22 dargestellt. Ein Rückgang des elektrischen Energieverbrauchs verschiedener motorischer Lasten ergibt sich laut den Autoren aus der Tatsache, dass trotz der steigenden Anzahl der Haushalte diese Haushaltslasten effizienter werden und dadurch weniger Energieverbrauch am Gesamtverbrauch aufweisen. Im Vergleich zur Lastverteilung der Haushalte im Jahr 2009 werden aufgrund des Anstiegs der Wärmepumpen in den Haushalten nun mehr motorische Lasten vorzufinden sein.

Tabelle 22: Lastverteilung für Haushalte 2050 [32]

Verbrauchergruppe	Bedarf [Mtoe]
thermal uses	36
lightning	1.5
ICT equipment	2.5
TV and multimedia	11
dishwasher	3
clothes dryer	3
washing machine	3
refrigerator and freezers	8
other appliances	4

In dem Bericht werden die Raumheizung und -kühlung, Warmwasseraufbereitung und Kochanwendungen zu einer Kategorie "thermal uses" zusammengefasst. Aus [28] wird eine Grafik entnommen, die die Anteile der zukünftigen Technologien in der Raumheizung zeigt. Der größte Anteil der Technologien (53 %) werden elektrische Heizungen und Wärmepumpen sein. Um auf eine ähnliche Verteilung wie im Jahr 2012 zu kommen, wird auf die entsprechenden Kategorien umgerechnet, indem die Anteile für Kochen und Kühlung zuerst von der Kategorie "thermal uses" subtrahiert werden und dann entsprechend der Anteile aus [28] umgerechnet werden. Die elektrischen Heizungen be-

sitzen einen Anteil von 6 % der gesamten Heiztechnologien, während die Wärmepumpen 47 % einnehmen werden. Zu den "other appliances" zählen Verbraucher wie Bügeleisen, Staubsauger und Lüfter. Eine Aufschlüsselung der Haushaltslasten am Gesamtverbrauch wird in der nachfolgenden Tabelle 24 dargestellt.

5.3.3 Kommerzieller und öffentlicher Bereich

Der tertiäre Sektor entwickelt sich ähnlich dem der Haushalte. So werden laut [32] 73 Mtoe für den Gesamtenergieverbrauch angegeben. Der Großteil (50 %) der elektrischen Energie wird wieder für die Kategorie "thermal uses" aufgebracht, wie der Tabelle 23 zu entnehmen ist. Um die genaue Aufschlüsselung der Verbraucher zu erhalten, wird der gleiche Ansatz wie bei den Haushalten gewählt. Bei der Verteilung der elektrischen Heizungen (17 %) und Wärmepumpen (40 %) sind verschiedene Anteile angegeben. Zu der Gruppe "building technologies" zählen folgende Verbraucher: Aufzüge, Staubsauger, Krankenhausausrüstung usw. Aufgrund der Annahme, dass die Lastaufzüge vermehrt in dieser Verbrauchergruppe auftreten, wird sie den Motoren mit konstantem Lastmoment zugeschrieben. In der nachfolgenden Tabelle 25 wird wieder der Endverbrauch nach Lasten angegeben.

Tabelle 23: Lastverteilung für den öffentlichen Bereich 2050 [32]

Verbrauchergruppe	Bedarf [Mtoe]
thermal uses	36
ICT equipment	4
building technologies	11
refrigeration	7
building lightning	3
street lightning	3
ventilation	9

5.3.4 Transport, Ackerbau, Fischerei und Sonstige

Der elektrische Energiebedarf für den Transport-Sektor hat im Vergleich zu 2012 stark zugenommen und beträgt nun 14.87 % des elektrischen Gesamtverbrauchs [32]. Das ist darauf zurückzuführen, dass ein Großteil der europäischen PKW-Flotte elektrifiziert wurde und dafür nun mehr elektrische

Tabelle 24: Lastverteilung für den Sektor Haushalt Jahr 2009

Lastart	Verbraucher	Anteil in %
Motoren	heat pumps	7.472
	washing and drying	2.017
	dishwasher	1
	refrigerators and freezers	2.690
	ventilation and air conditioning	1.48
	other appliances	1.344
Heizungen	water heating	2.069
	electric heating	0.953
	ovens	1.609
Beleuchtung		0.504
Elektronik	ICT equipment	0.841
	TV and multimedia	3.698

Tabelle 25: Lastverteilung für den öffentlichen Bereich Jahr 2009

Lastart	Verbraucher	Anteil in %
Motoren	circulators	1.680
	air conditioning	0.699
	commercial refrigerator	2.353
	ventilation	3.026
	pumps	1.426
	heat pumps	4.933
Heizungen	electric heating	2.097
	cooking appliances	1.268
Beleuchtung	office lightning	1.009
	street lightning	1.009
Elektronik	ICT and multimedia	1.344
	building technologies	3.698

Energie benötigt wird. Zusätzlich wird das Angebot der öffentlichen Verkehrsmittel weiter ausgebaut und führt demnach auch zu einer Erhöhung der benötigten elektrischen Energie. Die Ladestationen der Elektrofahrzeuge haben keine frequenzabhängige Wirkleistungsaufnahme und haben somit auf den NSRE keinen direkten Einfluss.

Für die restlichen Sektoren (Ackerbau, Fischerei und Sonstige) wird in [32] erwähnt, dass der elektrische Energiebedarf um 25 % zugenommen hat. Jedoch wird dieser im Bericht der JRC [32] im Gesamtverbrauch nicht eingerechnet.

5.3.5 Lastverteilung 2050

Bei Addition der Prozentzahlen der Tabellen 21 - 25 ergibt sich die Lastverteilung des Verbundnetzes für das Jahr 2050. Die Lasten für Transport, Process Specific und die anderen Lasten werden nur der Vervollständigung halber der Liste hinzugefügt. Da diese Lasten keine bzw. keine genau spezifizierbare Frequenzabhängigkeit aufweisen, werden sie im Matlab-Simulink Modell nicht beachtet.

Tabelle 26: Zusammensetzung der Gesamtlast Jahr 2050

Lastart	Anteil in %	Kürzel in Matlab
Motoren m. konstantem Moment	3.698	<i>Pmco</i>
Motoren m. linearem Moment	7.468	<i>Pmlt</i>
Motoren m. quadratischem Moment	42.049	<i>Pmsq</i>
Heizung elektrisch	9.739	<i>Pehe</i>
Elektrische Öfen	2.879	<i>Poven</i>
Kühl- und Gefrierschränke	5.043	<i>Pfrez</i>
Geschirrspüler	1	<i>Pdish</i>
Beleuchtung	3.639	<i>Pligh</i>
Elektronik	5.884	<i>Pelec</i>
Transport	14.773	
Process Specific	3.461	
Andere Lasten	0.329	

6 Messung der Lasten im Labor

6.1 Aufbau und Messgeräte

Es werden verschiedene elektrische Lasten mithilfe einer Leistungsmessung analysiert. Eine schematische Darstellung des Messaufbaus ist in der nachfolgenden Abbildung 7 zu sehen.

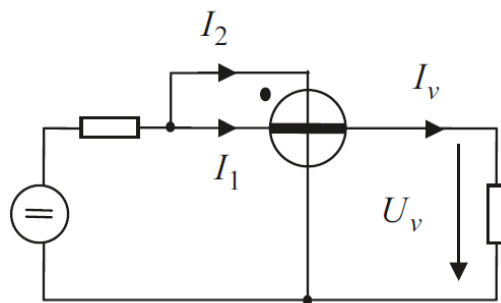


Abbildung 7: Schematische Messanordnung einer stromrichtigen Leistungsmessung [33]

Die Spannungsquelle / der Spannungsgenerator ist die dreiphasige Netzsimulationseinrichtung Typ DM 15000/PAS von Spitzenberger und Spies. Mithilfe dieses Generators ist es möglich, einen Ausfall und das Zuschalten der Erzeugung zu simulieren, indem die Frequenz sprunghaft verändert wird.

Als Wattmeter wird die PQ-Box 300 genutzt. Dieses Messgerät besitzt unter anderem die Möglichkeit, zeitliche Leistungsverläufe und Frequenzverläufe aufzuzeichnen, welche dann später an einem Desktop-PC oder in MATLAB ausgewertet werden können. Das kleinste Messintervall der PQ-Box 300 liegt bei einer Sekunde[34]. Deshalb handelt es sich bei den später gezeigten Graphen um Messpunkte mit interpolierten Kennlinien. Während des Umschaltens der Frequenz wurden Leistungsspitzen gemessen. Diese entstehen aber nicht durch die Frequenzabhängigkeit der Last, sondern sind darauf zurückzuführen, dass der Spannungsgenerator keine konstante Spannung bei den Sprüngen liefert. Deshalb sind für diese Leistungsmessung die stationären Erkenntnisse aussagekräftiger als die transienten.

In [8] fordern die Autoren eine Absenkung der Ansprechgrenze im gesamten Verbundnetz für den Lastabwurf von 49.0 Hz auf 48.6 Hz. Dies ist zurückzuführen auf den stabilen Betrieb des Westberliner Inselnetzes. Zusätzlich nimmt der Effekt der frequenzabhängigen Wirkleistungsaufnahme mit steigender Frequenzabweichung zu. Für die Messungen der Lasten wird daher diese neue Ansprechgrenze als Wert für den Frequenzsprung angenommen.

Für die Leistungsmessung wurden ein einphasiger und ein dreiphasiger Aufbau verwendet, welche beide mithilfe der PQ-Box 300 möglich sind. Die nachfolgenden Abbildungen 8 und 9 zeigen jeweils die Anschlusskonfiguration der PQ-Box 300 bei einer einphasigen und einer dreiphasigen Leistungsmessung.

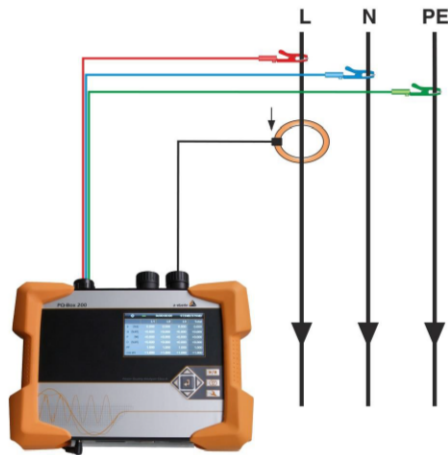


Abbildung 8: Anschluss der Messklemmen der PQ-Box bei einphasiger Lastmessung [34]

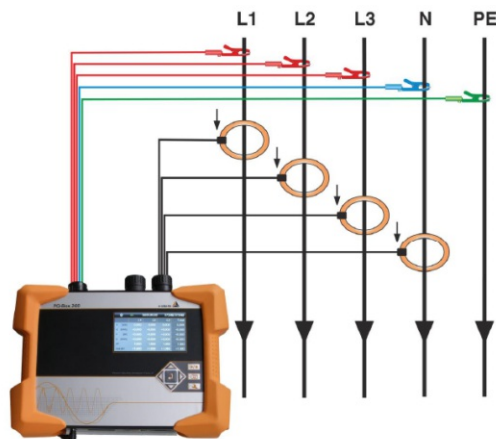


Abbildung 9: Anschluss der Messklemmen der PQ-Box bei dreiphasiger Lastmessung [34]

6.2 Gemessene Lasten

6.2.1 Ventilator

Der Ventilator zählt zu den motorischen Lasten. Die Messung in Abbildung 10 zeigt, dass der Ventilator eine stark kapazitive parasitäre Komponente besitzt. Bei einem negativen Sprung der Frequenz steigt die Wirkleistung nämlich sprunghaft an. Der direkt proportionale Effekt der motorischen Lasten tritt hier nicht auf. In den nachfolgenden Verbrauchern (Heizlüfter und Backrohr) tritt der Ventilator auch als Teilkomponente auf.

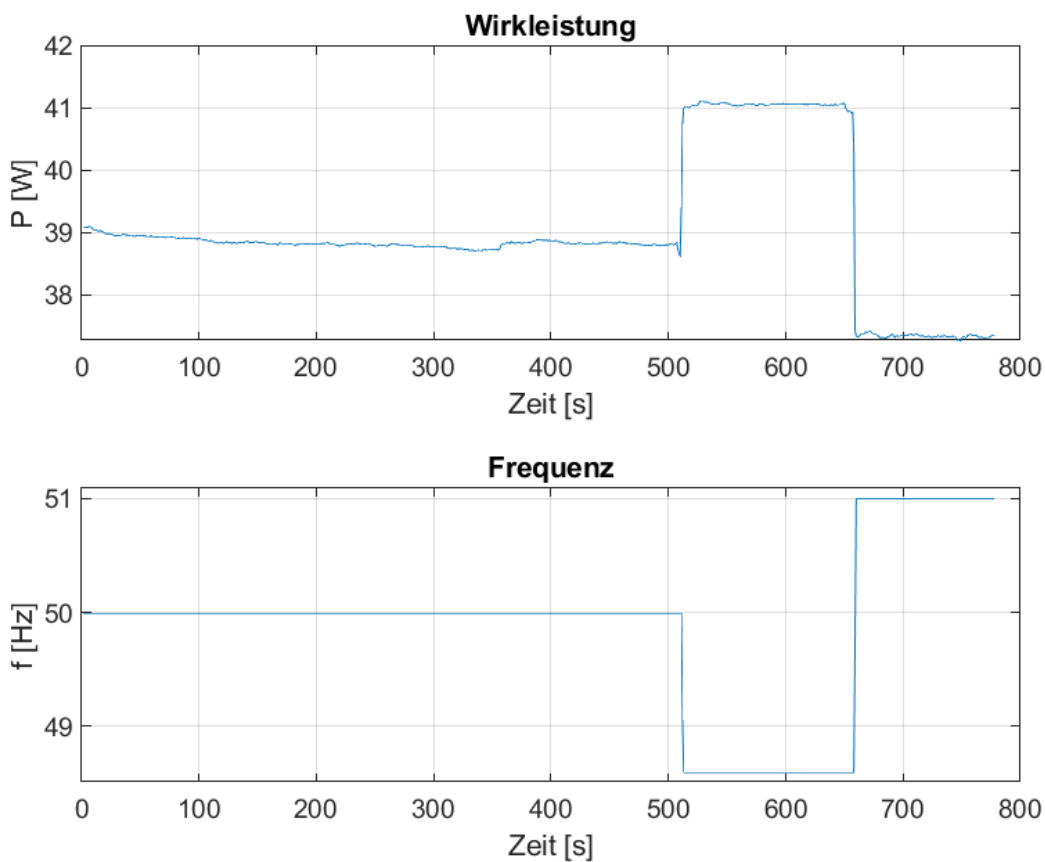


Abbildung 10: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Ventilators im Labor

6.2.2 Wasserkocher

Im Wirkleistungsverbrauch konnte keine Frequenzabhängigkeit der Last gemessen werden. Der Wasserkocher zählt zu den ohmsch-induktiven Verbrauchern und verbraucht zusätzlich Blindleistung. Dadurch, dass der Blindleistungsanteil mit 40 VAr im Vergleich zu 2 kW sehr gering ist, ist der Einfluss des induktiven Anteils vernachlässigbar.

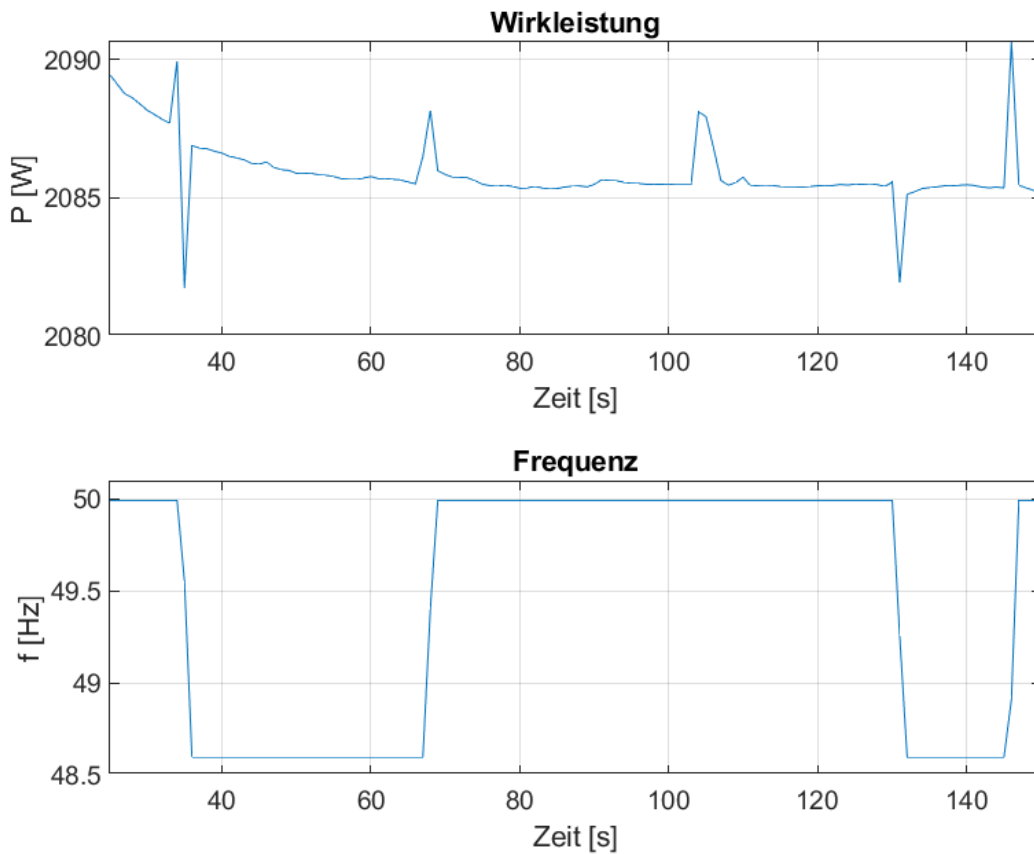


Abbildung 11: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Wasserkochers

6.2.3 Geschirrspüler

Im Standard-Geschirrspüler sind folgende motorische Lasten eingebaut: Das wären zum einen eine Umwälzpumpe und zum anderen die Ablaufpumpe. In einem vorprogrammierten Ablauf werden die Verbraucher einzeln geschaltet. Aus der Abfolge des Geschirrspülers (Beko DSS 05011 X) erkennt man, dass die Ablaufpumpe zuerst eingeschaltet wird. Nachdem das Restwasser abgepumpt wurde, wird über den Zulauf die Maschine mit Wasser gefüllt und die Umwälzpumpe beginnt. Die Umwälzpumpe benötigt für den Betrieb eine Nennwirkleistung von ca 45 W. Die Wirkleistung der Ablaufpumpe wird mit 25 W angegeben. Um das Wasser auf Betriebstemperatur zu bringen, wird ein Heizstab mit einer Leistung von 1950 W eingesetzt.

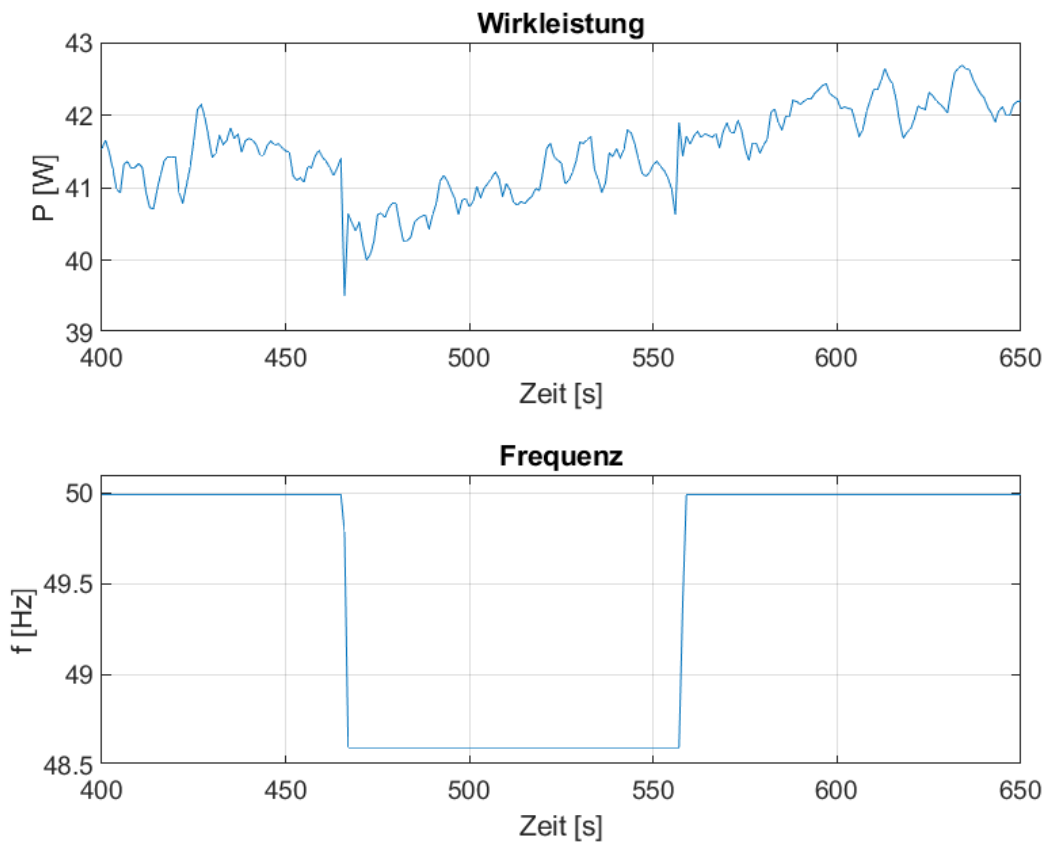


Abbildung 12: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Geschirrspülers im Labor

Ein gemessener Spülvorgang wird in Abbildung 12 dargestellt. Während des Vorspülvorgangs ist nur die Umwälzpumpe im Einsatz und kann durch die Frequenzsprünge separat beschrieben werden. Die Wirkleistung sinkt bei einem negativen Sprung von 41.5 W auf 40 W. Dies entspricht einer Reduktion um 3.75 %. Während des Aufheizvorgangs sinkt die Wirkleistung bei einem gleichen Sprung von 1920.8 W auf 1918 W.

6.2.4 Elektro-Heizlüfter

Der Elektro-Heizlüfter kann zu den ohmschen Lasten gezählt werden. Das bedeutet, dass der Leistungsverbrauch bei Frequenzänderungen konstant ist. Beim Messen des Radiators wird aber ein gewisses integratorisches Verhalten bemerkbar. Dies ist aber auf höhere Verluste durch Wärmeentwicklung im Radiator zurückzuführen. Deshalb wurde der Heizlüfter im stationären Betrieb gemessen.

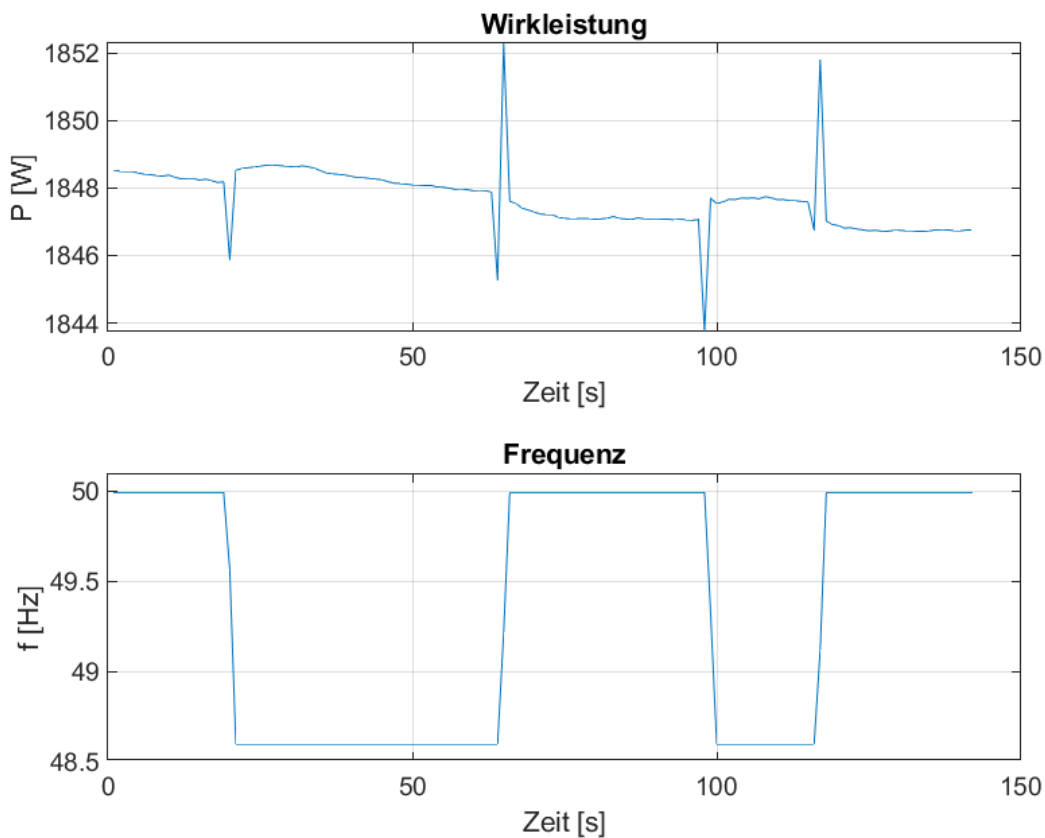


Abbildung 13: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Heizradiator im Labor

Maßgebend für die Funktion des Heizlüfters sind zwei Komponenten, einerseits das Heizelement und andererseits der Ventilator. Das Heizelement wird als ohmscher Widerstand ausgeführt. Der Ventilator zählt zu den motorischen

Lasten, besitzt aber in dieser Größenform eine parasitäre Kapazität, wie in der Messung des Ventilators bereits beschrieben worden ist. In Abbildung 14 wird nur der gemessene motorische Anteil des Heizlüfters dargestellt.

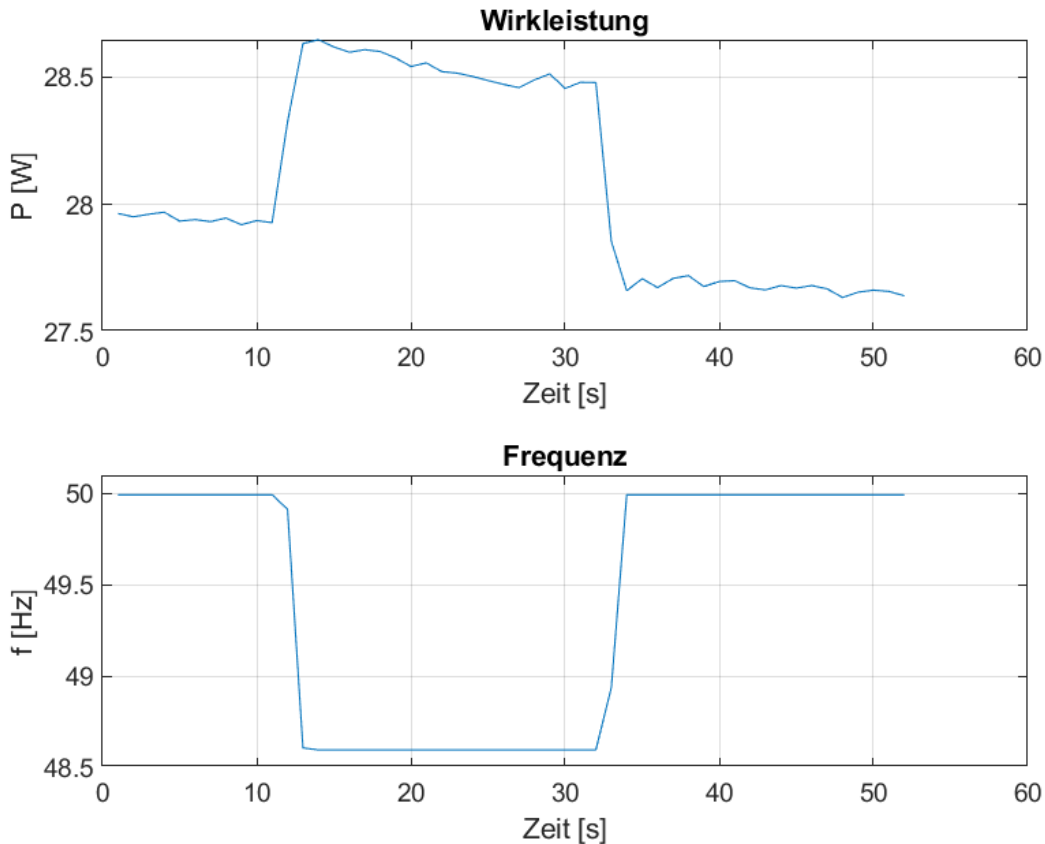


Abbildung 14: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz des Lüfters eines Heizradiator im Labor

Bei einem Frequenzsprung von 50 Hz auf 48.6 Hz verbraucht der Lüfter nun circa 28.6 W. Im Vergleich dazu hat dieser nur 28 W verbraucht. Dieser Unterschied von 0.6 W ist auch messbar, wenn beide Elemente in Betrieb sind (Abbildung 13). Die Frequenzabhängigkeit des Heizlüfters kommt dadurch nur durch den motorischen Teil alleine zustande.

6.2.5 Backrohr

Die wichtigsten Komponenten des Backrohrs sind die Heizspirale und der Heißluftventilator. Aufgrund dieser beiden Komponenten besitzt das Backrohr eine ohmsche motorische Last. Es wurden verschiedene Einstellungen durchgemessen, um einerseits den ohmschen Anteil, sowie den motorischen Anteil der Last zu bestimmen.

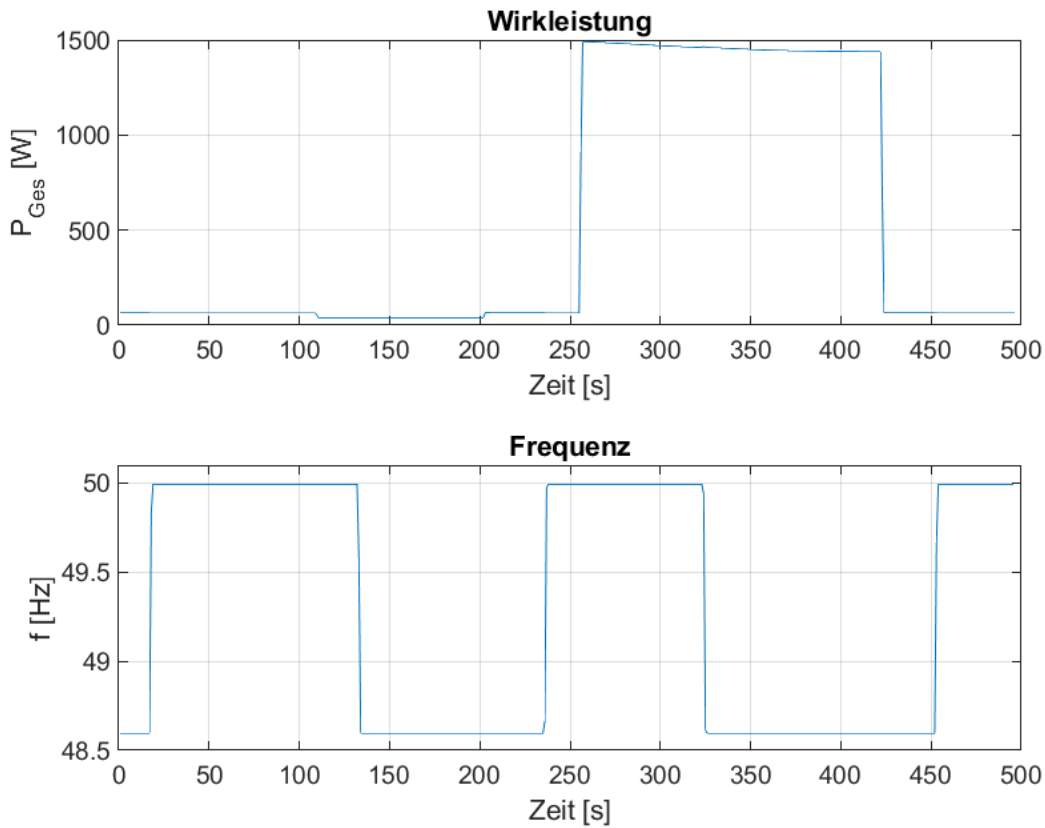


Abbildung 15: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Backrohrs

Der motorische Teil des Backrohrs zeigt die gleiche kapazitive Parasitat wie der Lufte des elektrischen Heizlufte. So andert sich bei dem Ofenprogramm "Ober-/Unterhitze" bei einem Sprung von 50 Hz auf 48.6 Hz die Wirkleistung von 39 W auf 39.6 W. Wird das Ofenprogramm "Heißluft mit Unterhitze" fur die Belufteung benutzt, werden anstatt der 64.5 W nach einem Sprung

von 48.6 Hz auf 50 Hz nur noch 63.3 W verbraucht. Abbildung 16 stellt den zweiten Fall dar.

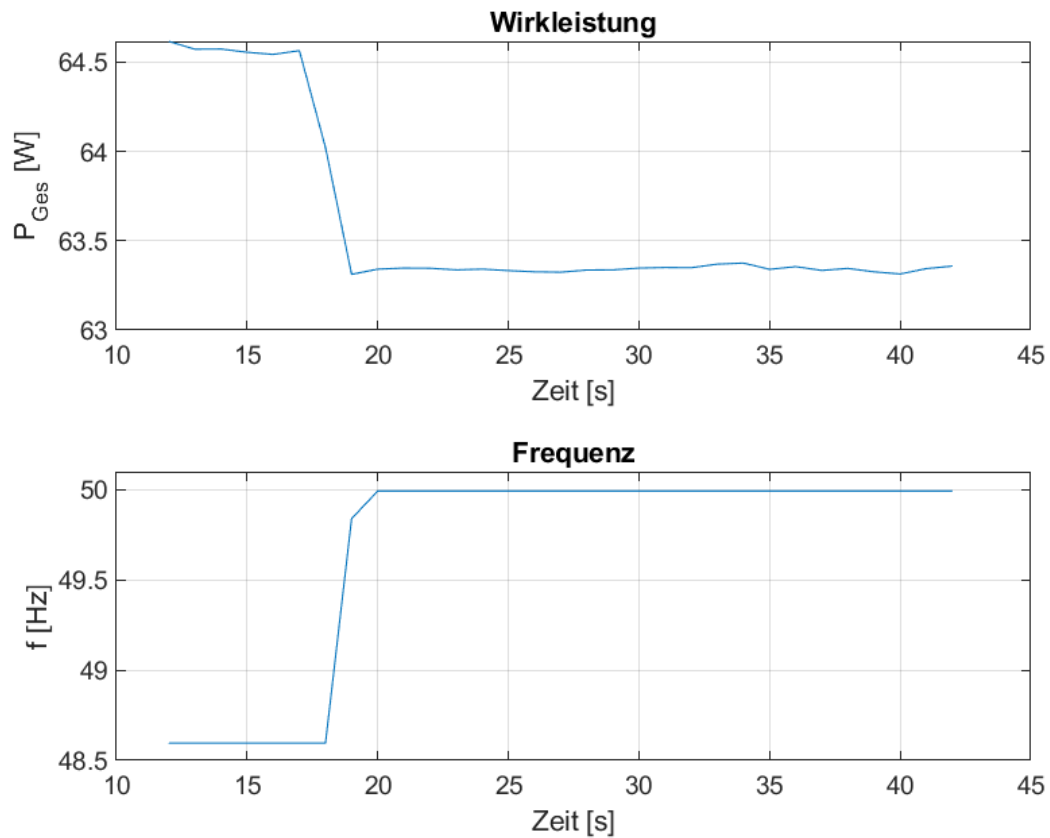


Abbildung 16: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Backrohres bei Umluft und ohne Temperatureinstellung

6.2.6 Waschmaschine

Die untersuchte Waschmaschine (OWM 15012 A1) zeigte während der Frequenzsprünge keine Änderungen im Lastverbrauch. Das ist ein Zeichen dafür, dass in der getesteten Maschine Leistungselektronik verbaut worden ist.

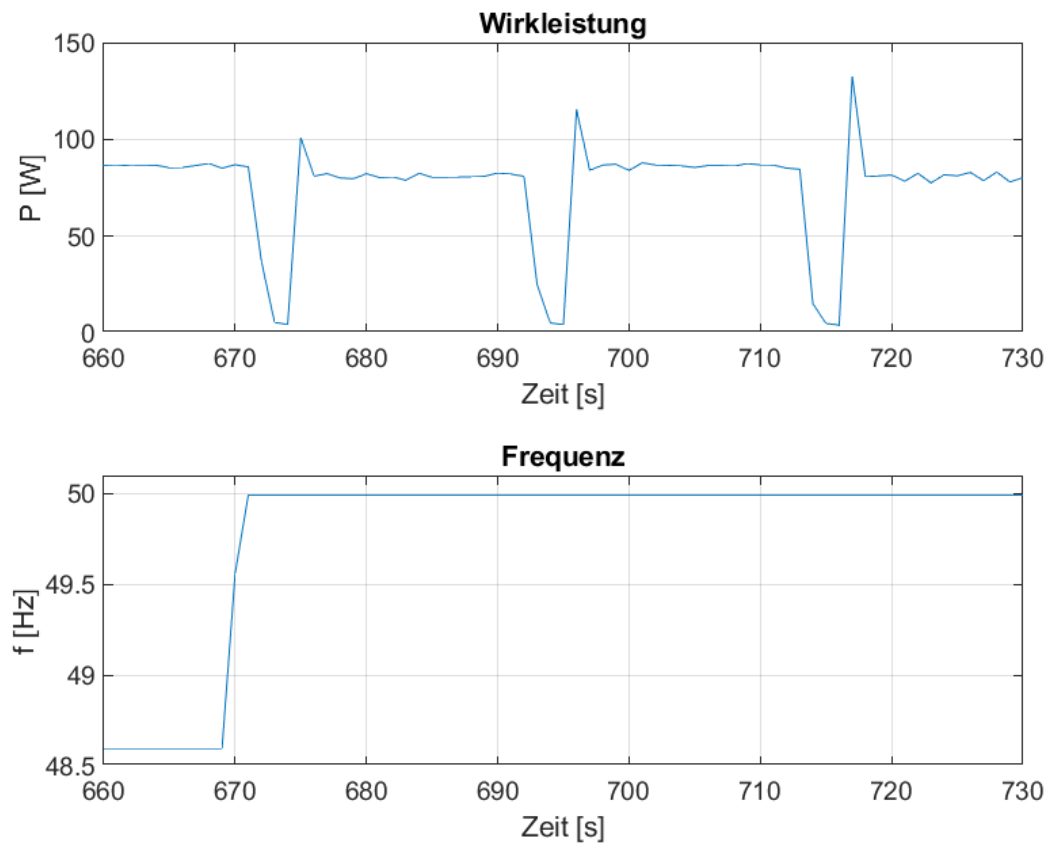


Abbildung 17: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer Waschmaschine

6.2.7 Kühlschranks

Beim Messen des Kühlschranks konnte bis auf Spitzen beim Frequenzsprung keine Leistungsänderung festgestellt werden. Eine Erklärung hierfür wäre, dass es sich bei dem zu messenden Verbraucher um einen energiesparenden Kühlschrank handelt, welcher mit Leistungselektronik angesteuert wird, um den Leistungsverbrauch gering zu halten.

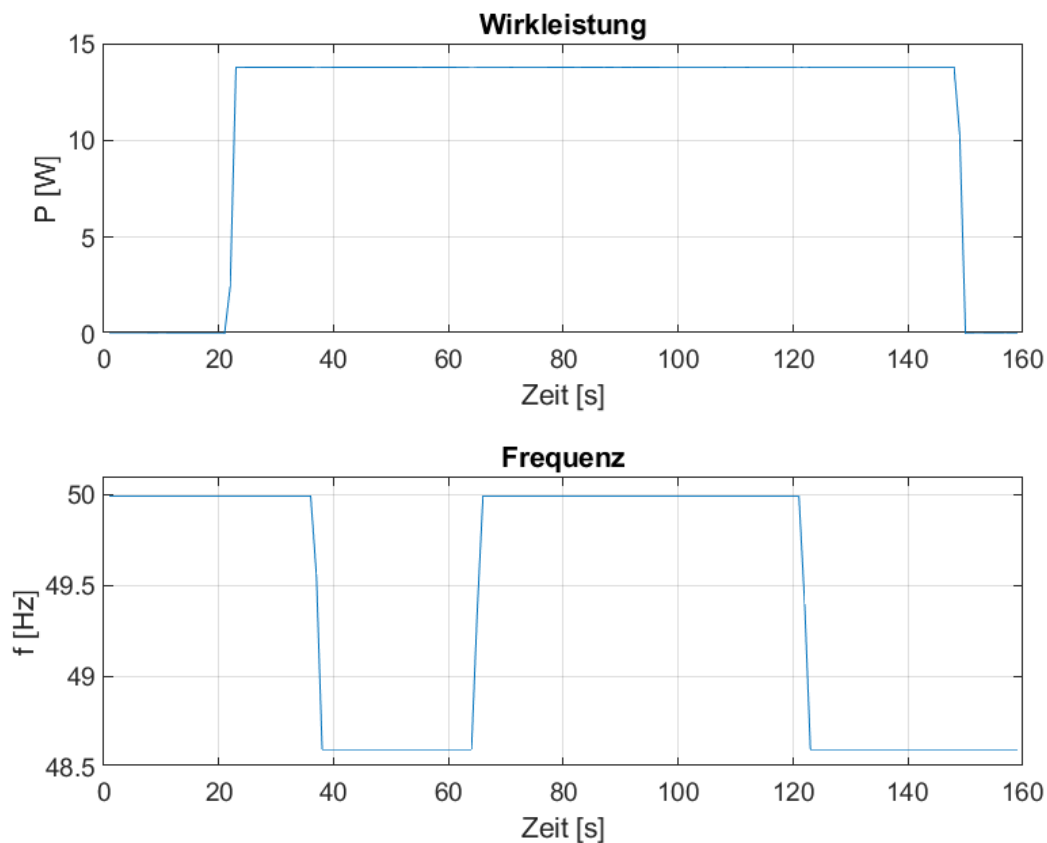


Abbildung 18: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Kühlschranks

6.2.8 Laptop

Während eines Ladevorgangs hängt der Laptop über das entsprechende Netzteil am Stromnetz. Jedoch ist der Wirkleistungsverbrauch durch die Leistungselektronik unabhängig von Frequenzsprüngen. Dieses Verhalten wird in Abbildung 19 dargestellt. Der gleiche Effekt tritt auch in einem Desktop-PC auf, denn durch das Computernetzteil verlieren die verbauten Lüfter im PC ihre Frequenzabhängigkeit. Der Frequenzsprung auf 41 Hz kam durch einen Eingabefehler zustande und war nicht beabsichtigt.

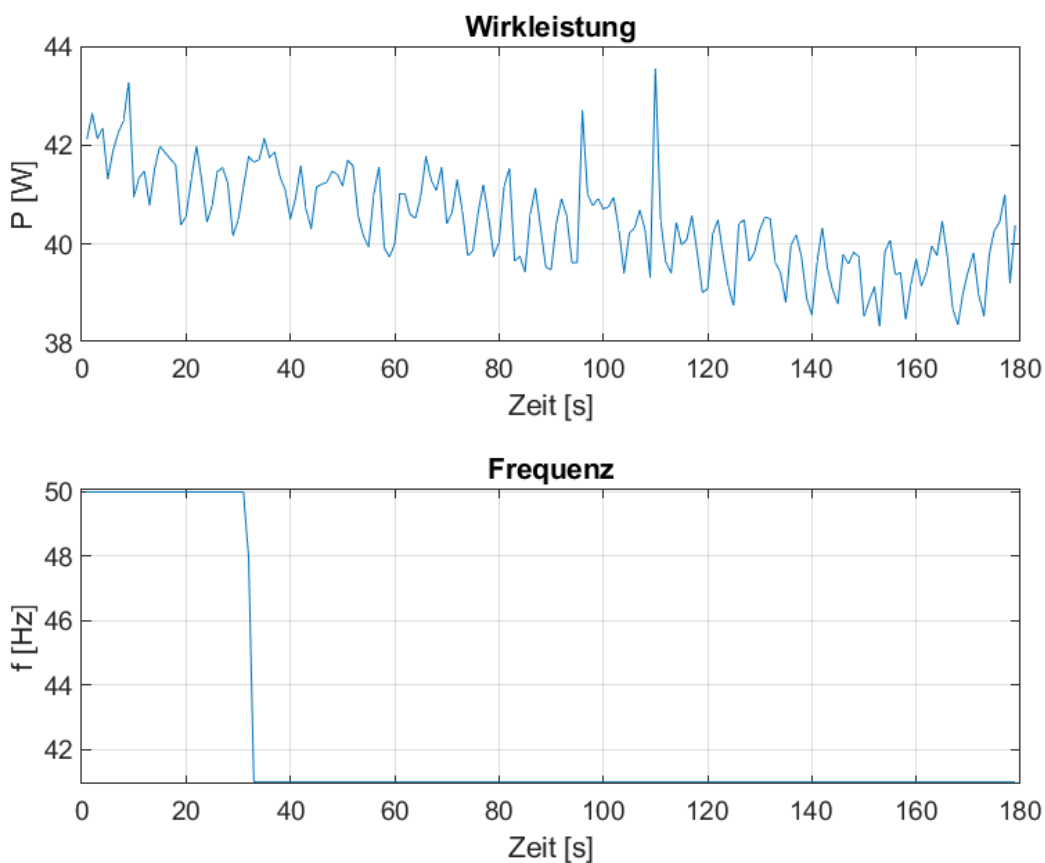


Abbildung 19: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Laptops

6.2.9 LCD-Bildschirm

Der LCD-Bildschirm zeigte bei den Frequenzsprüngen keine Änderung im Wirkleistungsverbrauch. Dies ist auf das Netzteil und die darin verbaute Leistungselektronik zurückzuführen. Der LCD-Bildschirm ist auch stellvertretend für andere TV-Geräte.

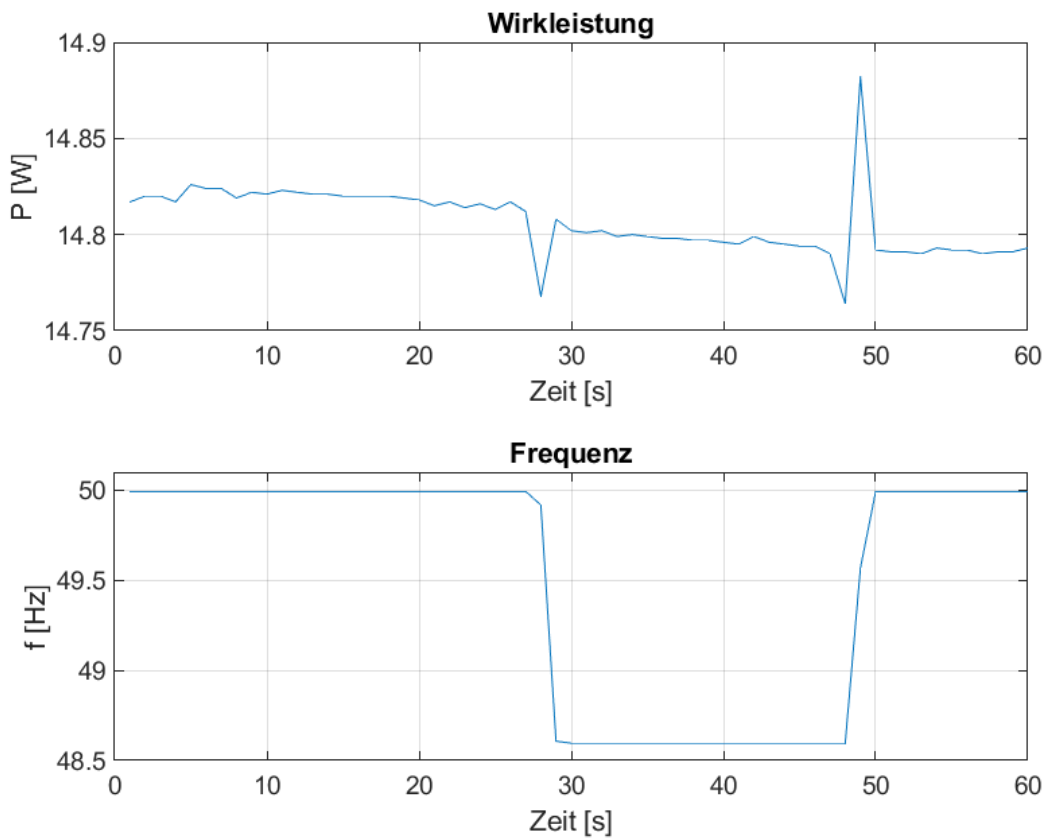


Abbildung 20: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Bildschirms

6.2.10 Aufladegerät für elektronische Zahnbürste

Beim Ladevorgang der elektronischen Zahnbürste wird in der Regel wenig Wirkleistung benötigt. So hat die Messung gezeigt, dass im Durchschnitt nur 0.55 W verbraucht werden. Nach einem Frequenzsprung werden nur noch 0.53 W verbraucht. Der Einbruch am Ende der Messung kommt daher, dass die Zahnbürste kurz vom Ladesockel genommen worden ist.

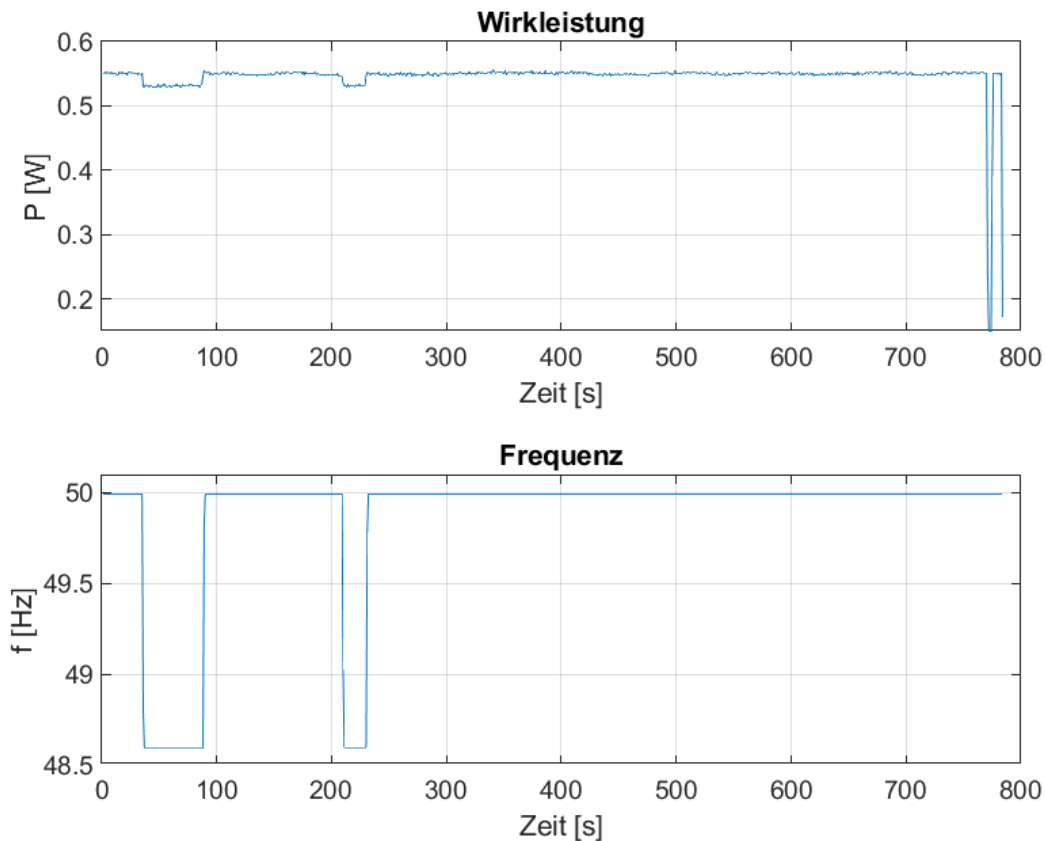


Abbildung 21: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Aufladegeräts für elektronische Zahnbürsten

6.2.11 Glühlampe

Die Glühlampe zeigt während der Frequenzsprünge Veränderungen im Wirkleistungsverbrauch. Grund hierfür sind parasitäre Induktivitäten im Glühdraht der Lampe. Die Parasitäten sind jedoch nicht sehr stark ausgeprägt, denn die gemessene Wirkleistung lag bei 60.494 W und der Wert vor dem Sprung lag bei 60.502 W . Der Unterschied beträgt demnach 0.0132% und kann somit vernachlässigt werden.

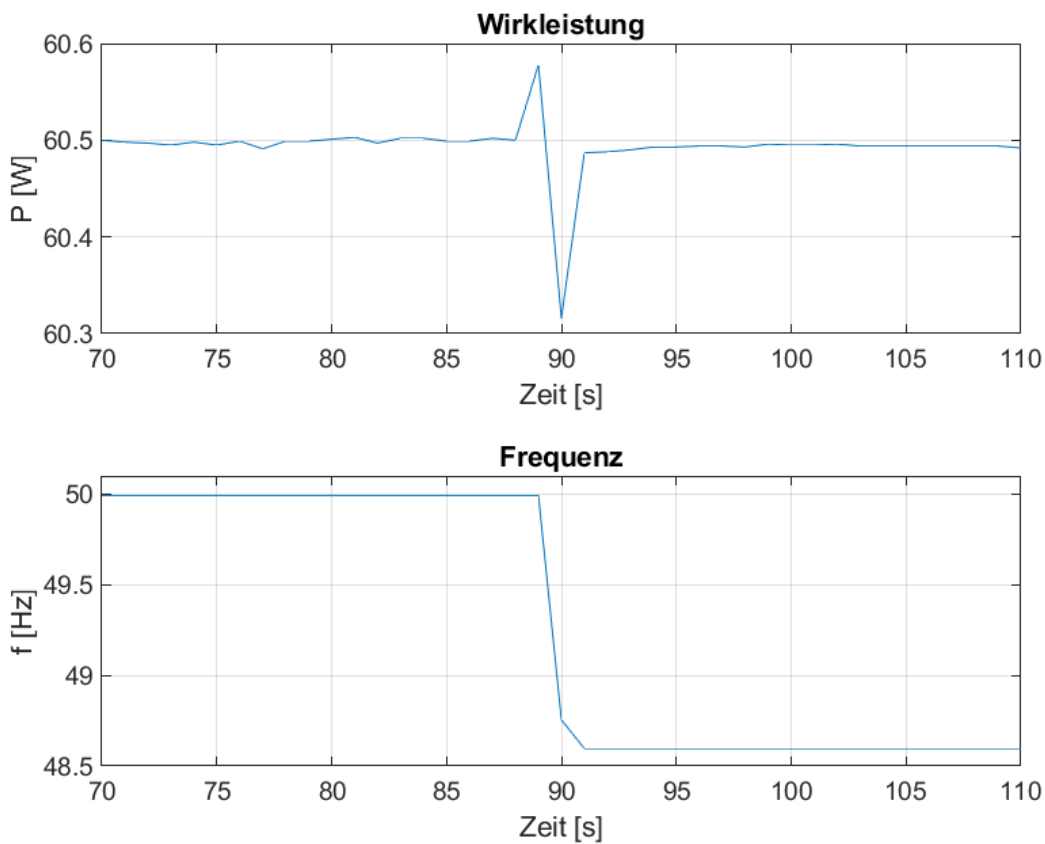


Abbildung 22: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer Glühlampe

6.2.12 LED-Lampe

In der Messung der LED-Lampe wurde eine direkte Frequenzabhängigkeit der Wirkleistung festgestellt. Dies kann ebenfalls in Abbildung 23 gezeigt werden. Nach Inbetriebnahme der LED-Lampe steigt die aufgenommene Wirkleistung zuerst über die angegebene Nennwirkleistung an. Die Wirkleistung der LED-Lampe sinkt aber mit der Zeit ab, bis die Nennwirkleistung erreicht ist.

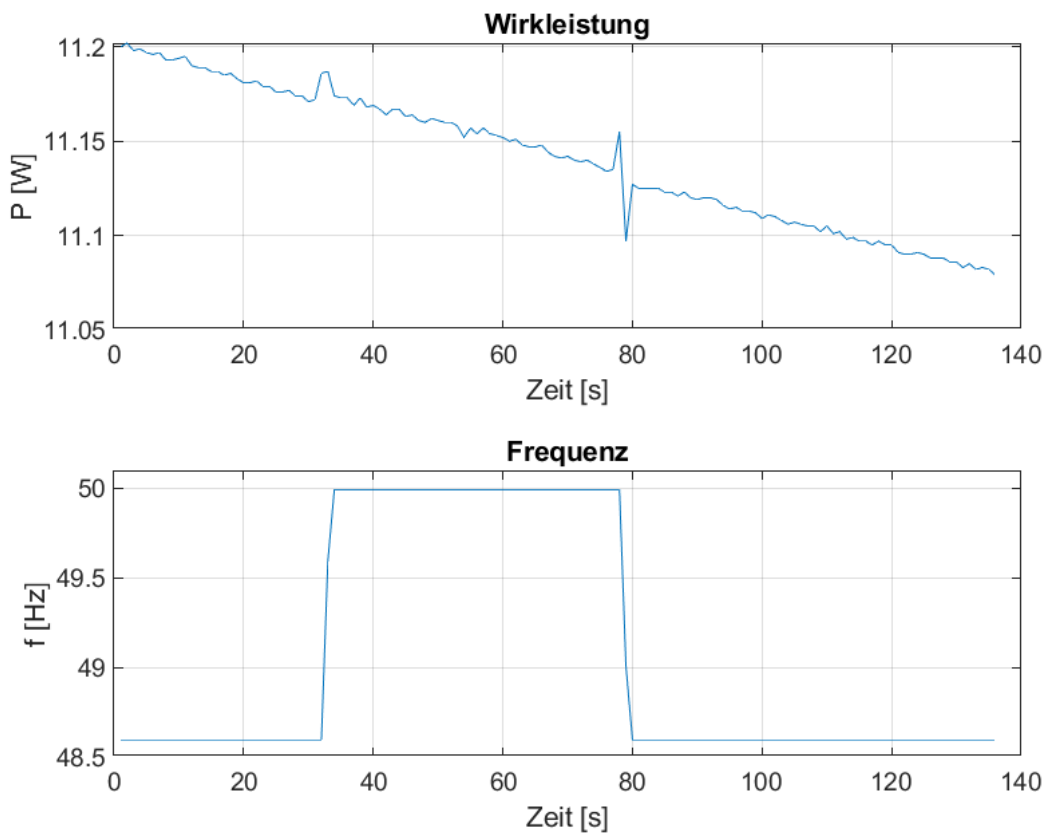


Abbildung 23: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer LED-Lampe

Aufgrund der direkten Proportionalität der Frequenz kann die LED-Lampe im Ersatzschaltbild als ein P-Glied modelliert werden.

6.2.13 LED-Lampe 2

Bei Messung einer zweiten LED-Lampe wurde wieder eine direkte Frequenzabhängigkeit der Wirkleistung festgestellt. Der Wirkleistungsverbrauch dieser Lampe hat ergeben, dass nur 5.26 W im Durchschnitt verbraucht werden. Jedoch ist der Blindleistungsverbrauch aufgrund der verbauten Spulen höher als in der vorherigen Messung. Der frequenzabhängige Effekt ist aber im Vergleich zu Messung 1 niedriger. Interessant ist, dass bei einem Sprung auf die Nennnetzfrequenz weniger Wirkleistung als zuvor benötigt wird.

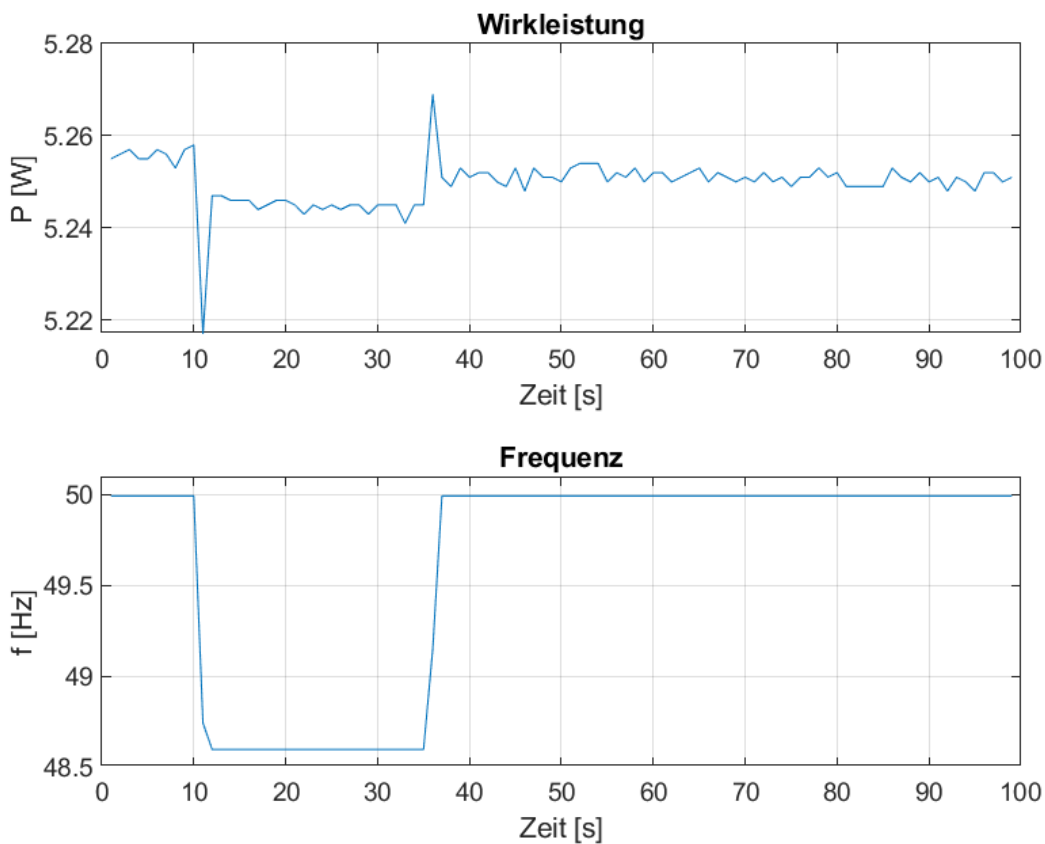


Abbildung 24: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer LED-Lampe

6.2.14 Kompaktleuchtstofflampe

Die Kompaktleuchtstofflampe, auch Energiesparlampe genannt, wird über eine Elektronik angesteuert und erhält dadurch eine Frequenzunabhängigkeit im Wirkleistungsverbrauch.

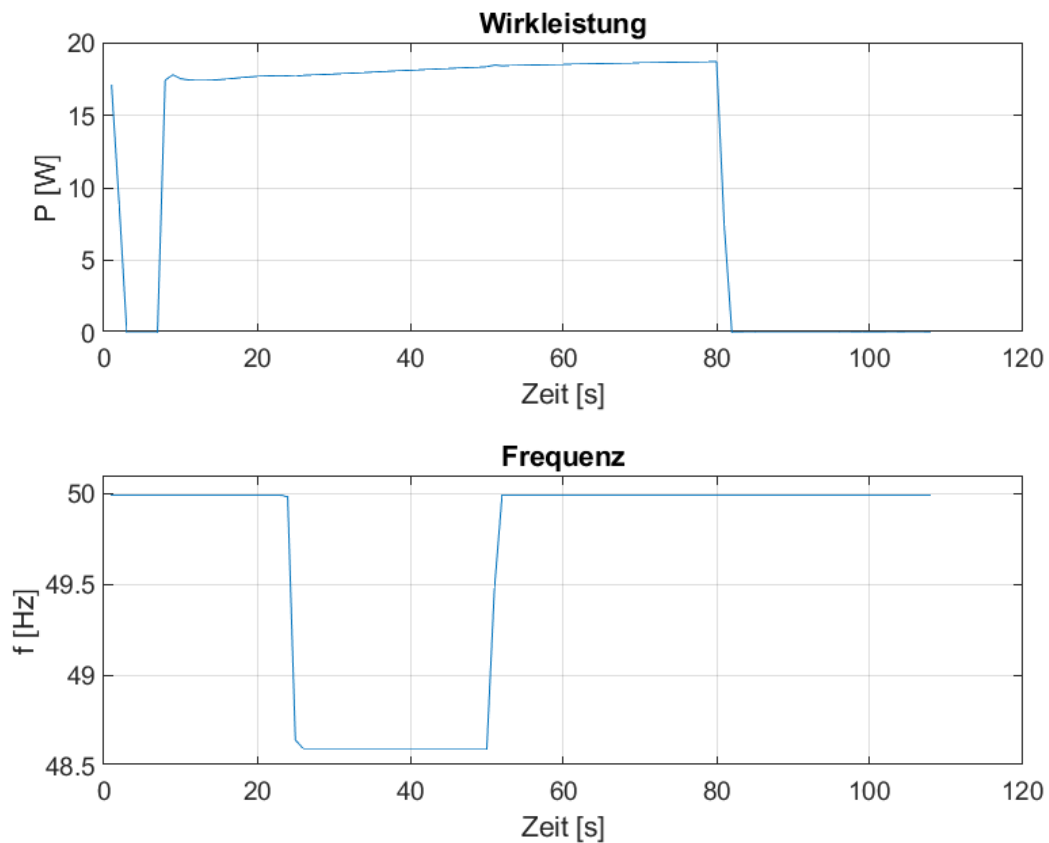


Abbildung 25: Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer Energiesparlampe

7 Simulationen und Modelle

7.1 Modellierung der Verbraucher

Für die Modellierung der einzelnen Verbraucher sind mehrere Modellvarianten möglich. Dazu zählen unter anderem das statische Lastmodell, das dynamische Lastmodell, das Composite Load Model (CLM), das Artificial Neural-Network Model, das Niederspannungsmodell, das Active Distribution Network (AGN) und das Microgrids (MG)[35].

Aus den Messungen ist ersichtlich, dass die stationäre Wirkleistung bei den meisten Lasten in den ersten zwei bis drei Sekunden bereits erreicht ist. Zusätzlich werden nur Frequenzsprünge im Bereich von max. 2.8 % der Nennfrequenz simuliert. Kleine Abweichungen um den Arbeitspunkt (Nennfrequenz 50 Hz) lassen sich durch eine Linearisierung der Wirkleistungskennlinie durch eine Tangente durch den Arbeitspunkt annähern. Deswegen lag die Wahl der Modellierung bei einem statischen Lastmodell.

In einer Dissertation aus dem Jahre 1996 [36] wird bereits über eine Lastmodellierung der Verbraucher in Schweden geschrieben. Zu diesen Verbrauchern zählten unter anderem Motoren mit konstantem, linearem und quadratischem Momentenverlauf. Während die Koeffizienten für die Modelle der Haushaltslasten für die vorliegende Arbeit aus den Messungen im Labor (siehe Kapitel 6) ermittelt worden sind, sind die Koeffizienten für die Modelle der Motoren mit konstantem, linearem und quadratischem Momentenverlauf aus der Dissertation von Agneholm E. [36] übernommen worden, weil die ursprüngliche Wissenschaftliche Arbeit "Frequency Dependence of the Load in the Nordic Power System" von Holmer, A. und Le Dous, G. nicht digital verfügbar ist.

Die Frequenzabhängigkeit der Wirklast der gemessenen Verbraucher kann aufgrund des linearen Modells folgendermaßen dargestellt werden:

$$Faktor = [1 + a_f \cdot (f - f_0)] \quad (15)$$

Die Gleichung 15 beschreibt ursprünglich nur eine Erweiterung durch Multiplikation des Faktors mit dem ZIP Modell oder dem Exponentiellen Modell. Diese beiden Modelle beschreiben eine spannungsabhängige Wirklast, welche nicht Teil der Diplomarbeit ist. Es wird die frequenzabhängige Wirkleistung der gemessenen Lasten folgendermaßen modelliert:

$$P(f) = P_0 \cdot [1 + a_f \cdot (f - f_0)] \quad (16)$$

Der Index 0 in den Gleichungen 15 und 16 entspricht der Nennleistung und der Nennnetzfrequenz bei 50 Hz. Der Linearitätsfaktor a_f wird zunächst bestimmt durch Umformen und Gleichsetzen mit der gemessenen stationären Wirkleistung nach einem Frequenzsprung. In Tabelle 27 werden die Faktoren für die verschiedenen Messungen dargestellt. Der Variablenname in Matlab dient dazu, um den Aufbau der Simulation dynamischer zu gestalten.

Tabelle 27: Berechnete Faktoren a_f der gemessenen Verbraucher

Verbraucher	Wert	Variable in Matlab
Ventilator	-0.0414	a_{fv}
Geschirrspüler	0.015	a_{fdw}
Heizlüfter	-0.0002	a_{fh}
Backrohr	-0.0002	a_{fov}
Aufladegerät Zahnbürste	0.0259	a_{fzb}
Glühlampe	0.000094	a_{fgl}
Elektrische Heizung	0	a_{felh}
Elektronik	0	a_{fel}
Led1	0.000532	a_{fled1}
Led2	0.0019	a_{fled2}

Die bereits durchgeführten Messungen zur Frequenzabhängigkeit der Wirkleistung der Lasten wurde anhand eines statischen polynomischen Lastmodells durchgeführt. Damit nur ein Modell in der Simulation vorkommt, wurde das polynomische Lastmodell in ein lineares umgerechnet. Als Ausgangspunkte wurden die Nennfrequenz und die gewählte Sprungfrequenz von 48.6 Hz genommen. Für diese Messpunkte gibt es keine Unterschiede zwischen den beiden gewählten Lastmodellen. Dazwischen kommt es jedoch zu Abweichungen, diese sind aber zu gering um einen Einfluss auf das Gesamtverhalten zu haben. Die größte Abweichung wurde bei 49.3 Hz nachgewiesen und beträgt normiert -0,0196. Die berechneten Werte für das lineare Modell werden in Tabelle 28 gezeigt.

Tabelle 28: Berechnete Faktoren a_f der schwedischen Verbraucher

Verbraucher	Wert	Variable in Matlab
ASM (constant load Torque)	0.0086	a_{fclt}
ASM (linear load Torque)	0.0329	a_{fllt}
ASM (square load Torque)	0.0490	a_{fstt}
Refrigerator	0.0098	a_{fref}

7.2 Simulation des Verbundnetzes

Das Frequenzverhalten des Verbundnetzes und das daraus folgende Ersatzschaltbild wird in Kapitel 3 erläutert. In diesem Unterkapitel wurde nun aus diesem Ersatzschaltbild eine Simulation in Matlab Simulink erstellt, um den NSRE zu untersuchen. Im Ersatzschaltbild, dargestellt wie in Unterkapitel 4.5, wird der NSRE als P-Glied modelliert. In dieser Simulation wird, um eine gewisse Übersicht zu gewährleisten, der NSRE in mehrere Subsysteme unterteilt.

Folgend wird die Ausführung der Simulation in MATLAB beschrieben. In der Simulation werden normierte Parameter mit einem (*) gekennzeichnet. Die Parameter Verbraucher und Generatoren werden somit durch ihre jeweilige Nennwirkleistung dividiert. Für die Simulation wurde eine Lastsituation von 150 GW und ein Ausfall der Generatoren mit 3 GW angenommen. Bei einem Kraftwerksausfall von 3 GW nimmt der Parameter Kraftwerksausfall nach der eingestellten Zeit von einer Sekunde den normierten Wert -0.02 an. Dieser Wert wird mit der Erzeugung und der Primärregelung addiert. Im Regelschaltbild werden Additionen durch einen Summierer dargestellt.

Das Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Last wird durch einen weiteren Summierer dargestellt, jedoch wird die Last von der Erzeugung abgezogen. Im Regelschaltbild kann durch einen Vorzeichenwechsel im Summierer eine Subtraktion durchgeführt werden. Der folgende Teil der Simulation, das Proportionalglied und der Integrator, entspricht einem I-Glied in Matlab Simulink. Mit diesem I-Glied ist die Netzanlaufzeitkonstante einstellbar als Kehrwert im Proportionalitätsfaktor. Der Ausgang des Integrators bildet physikalisch den normierten Frequenzunterschied Δf^* ab.

Im einfachen Ersatzschaltbild des Verbundnetzes wurde der NSRE als P-Glied modelliert. Der erzeugerabhängige NSRE wird in der Simulation für das Jahr 2012 als P-Glied mit einem Proportionalitätsfaktor von 0.5 %/Hz modelliert. In bezogenen Größen beträgt dieser Faktor 0.25 und wird über die Variable k_e in Matlab eingegeben. Im Jahr 2050 nimmt der Anteil der konventionellen Kraftwerke um 80 % ab. Diese Reduktion ist direkt auf den erzeugerabhängigen NSRE übertragbar und dieser beträgt nun in bezogenen Größen 0.05. In dieser Simulation wird der verbraucherabhängige NSRE über die Gesamtheit der modellierten Lasten zu einem Subsystem zusammengefasst. Die Lastverteilung für die Simulation des Verbundnetzes für das Jahr 2012 wird der Tabelle 16 entnommen. Die Lastverteilung für die Simulation des Verbundnetzes für das Jahr 2050 wird der Tabelle 26 entnommen. Im Subsystem der gesamten Last werden dann die Prozentanteile durch ein P-Glied realisiert und nach dem Subsystem für die Frequenzabhängigkeit eingefügt. Die Anzahl der Energiespargeräte oder Motoren mit FUs werden ebenfalls über ein P-Glied modelliert. Der Proportionalitätsfaktor entspricht dann der Anzahl der Verbraucher ohne Leistungselektronik in %. Das Subsystem der Lastverteilung wird in der nachfolgenden Abbildung 27 dargestellt.

Im linearen Modell findet sich ein konstanter Term und der frequenzabhängige Term. Der konstante Teil des Modells wird bereits über den normierten Parameter Verbraucher abgebildet und muss deshalb nicht mehr in diesem Subsystem betrachtet werden. Der frequenzabhängige Term wird über folgendes Subsystem dargestellt (Abbildung 26). Das Subsystem besitzt zwei Eingänge und einen Ausgang. Der erste Eingang entspricht Δf^* während der zweite Eingang die Konstante a_f repräsentiert. Dadurch lassen sich alle Verbraucher, welche über das stationäre lineare Modell modelliert worden sind, darstellen. Die Konstante 50 tritt noch als Multiplikation auf, weil sie einen Teil der Normierung der Frequenz darstellt. Der Faktor a_f besitzt die Einheit 1/Hz. Nach Auflösen des Doppelbruchs ergibt sich dadurch eine Multiplikation mit der Nennnetzfrequenz f_0 . Abschließend wird in Abbildung 28 noch die gesamte Simulation dargestellt.

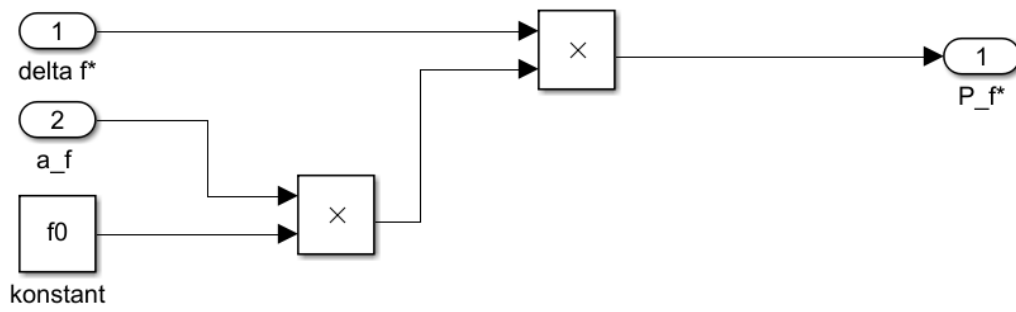


Abbildung 26: Modell für Lasten mit linearer Frequenzabhängigkeit in Matlab Simulink

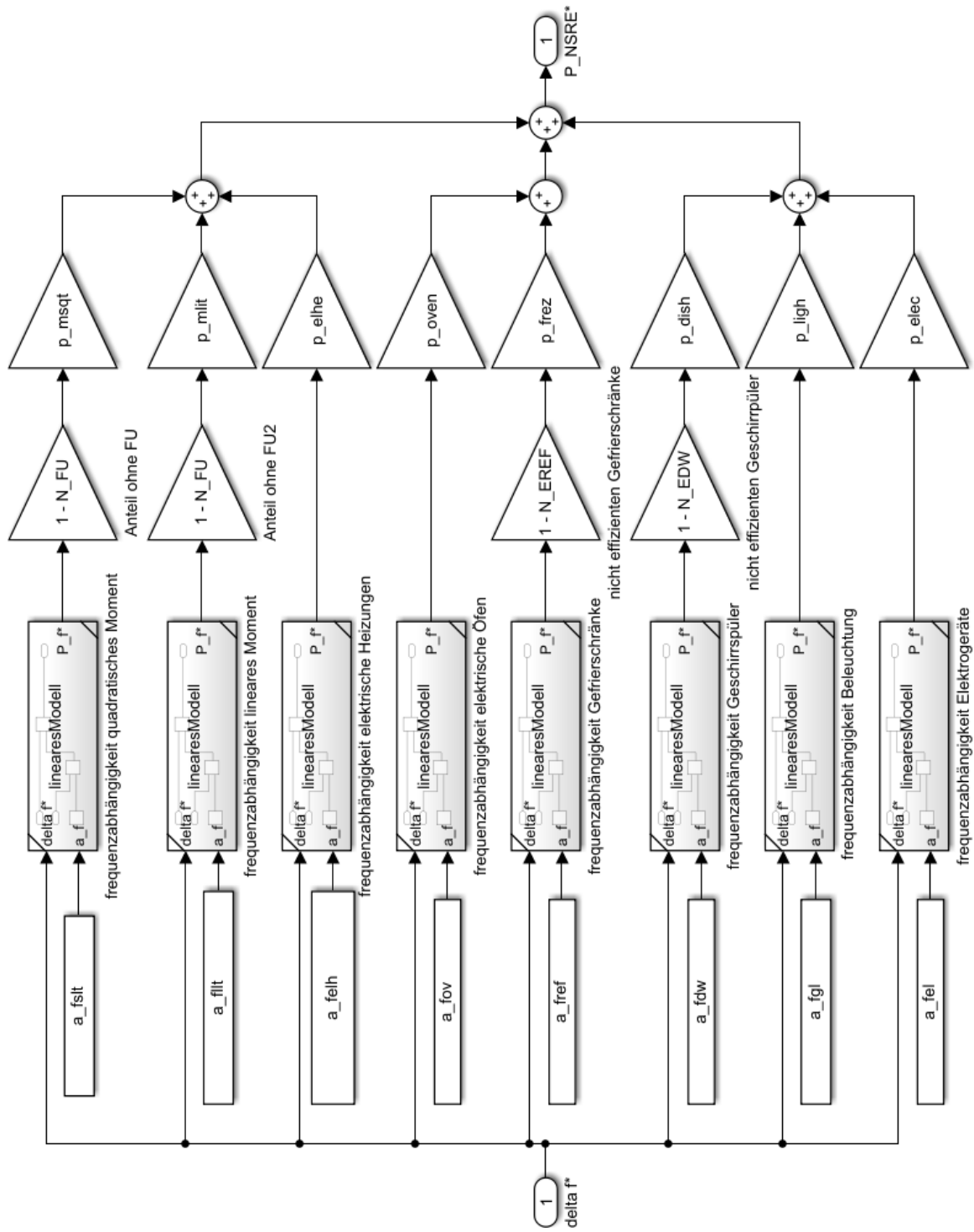


Abbildung 27: Subsystem der Lastverteilung in MATLAB Simulink

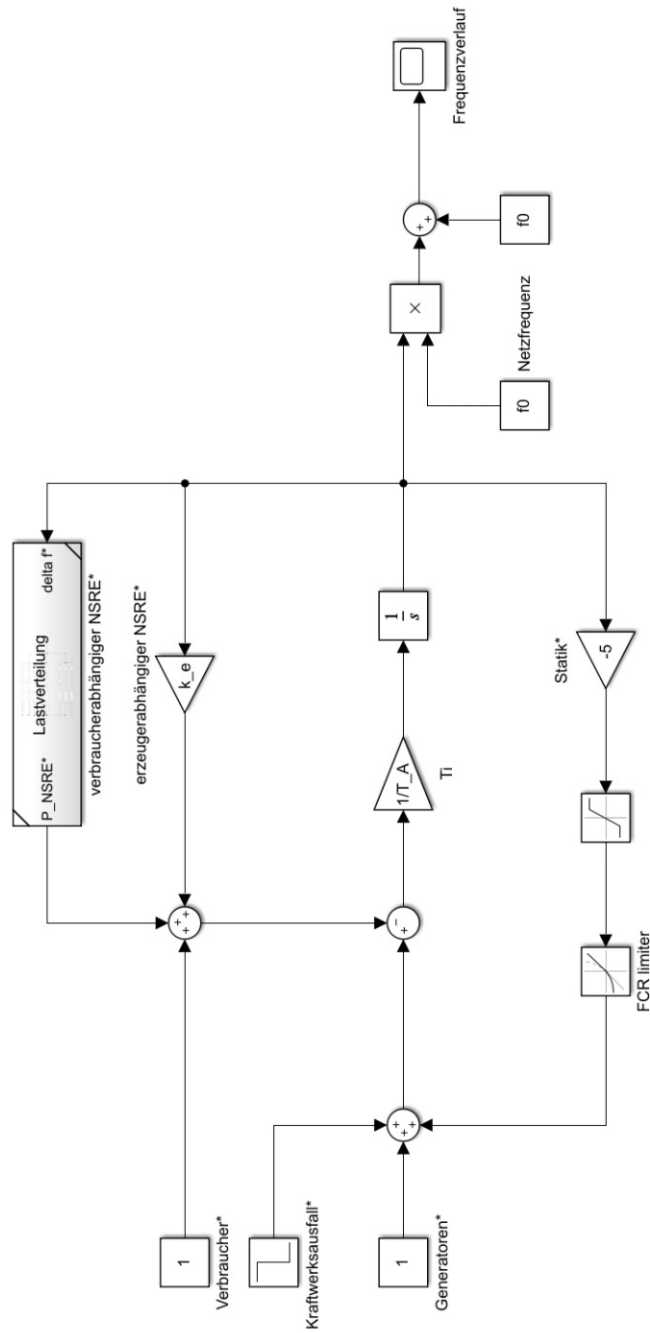


Abbildung 28: Gesamte Simulation des Verbundnetzes in MATLAB Simulink

7.3 Frequenzantwort des Verbundnetzes Jahr 2012

Die Simulation der Lastverteilung 2012 soll hier als Orientierung und Richtwert für die späteren Lastsimulationen in dieser Diplomarbeit dienen. Für die Netzanlaufzeitkonstante wurden 10 s eingestellt. Die Last- und Erzeugungssituation wurden jeweils mit 150 GW angenommen. Der Ausfall eines 3 GW Kraftwerks erfolgt nach einer Sekunde. Die Parameter für die Simulation des Verbundnetzes wurden von [18] übernommen. Für die Prozentzahl der Motoren mit Umrichterbetrieb werden 20 % angenommen.

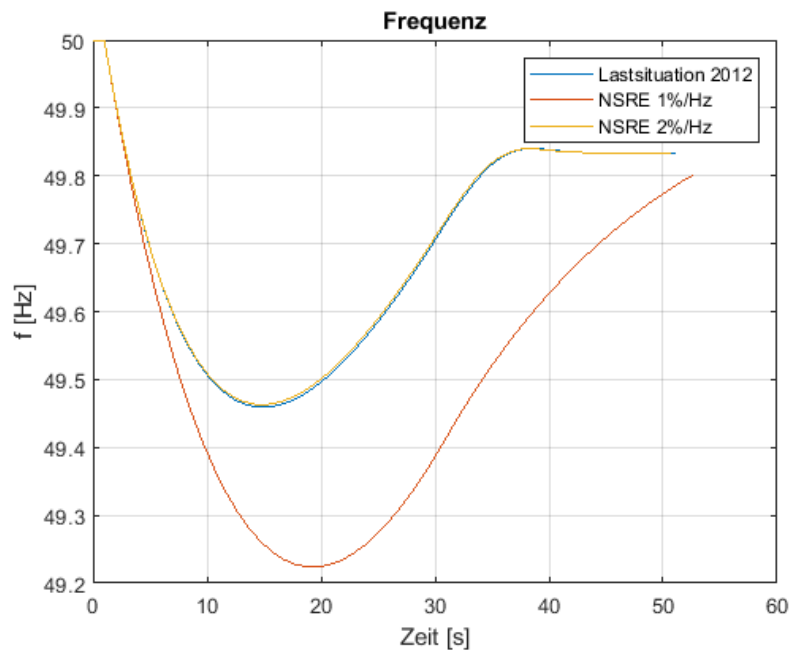


Abbildung 29: Frequenzantwort des Verbundnetzes (2012) auf einen 3 GW Ausfall

Anhand der Frequenzantwort des Verbundsystems sind nun folgende Werte interessant: Während des Vorgangs wird kein Lastabwurf ($f > 49.0$ Hz) durchgeführt. Die tiefste Frequenz während des transienten Vorgangs liegt bei 49.46 Hz. Es bleibt eine Frequenzdifferenz von ca 0.170 Hz im stationären Zustand. Zum direkten Vergleich werden die Frequenzantworten mit P-Glied in der Abbildung 29 gezeigt. Die gelbe Frequenzantwort beschreibt das Verbundnetz mit einem NSRE von 2 %/Hz. Die orange Frequenzantwort beschreibt das Verhalten des Verbundnetzes bei einem NSRE von 1 %/Hz.

In dieser Abbildung wird sehr gut ersichtlich, dass sich die Zeit, welche das Verbundnetz benötigt, bis ein Gleichgewicht zwischen der Erzeugung und der Last erreicht ist, mit sinkendem NSRE, erhöht. Durch den sinkenden NSRE wird mehr Regelenenergie der Primärregelung benötigt. Da diese zeitlich begrenzt ist, entsteht diese erhöhte Zeitdauer. Eine gewisse stationäre Frequenzabweichung bleibt jedoch immer erhalten. Diese wird zwar mit sinkendem NSRE später erreicht, bleibt aber konstant. Aus der Lastsituation 2012 lässt sich zusätzlich schließen, dass der NSRE mit ungefähr 2 %/Hz angenommen werden kann.

Der Proportionalitätsfaktor des NSRE hat in den ersten 5 bis 7 Sekunden nach dem Ausfall keine große Auswirkung auf den transienten Verlauf der Frequenz. Große Unterschiede im Frequenzverlauf werden erst 10 bis 15 Sekunden nach einem Ausfall ersichtlich.

7.4 Frequenzantwort des Verbundnetzes im Jahr 2050

Für die Simulation des Verbundnetzes im Jahr 2050 werden die gleichen Voraussetzungen an das Verbundnetz gestellt wie im Jahr 2012. Die Erzeugung und die Last werden mit jeweils 150 GW angenommen. Der Erzeugungsausfall wird wieder 3 GW betragen. Es ergeben sich deutliche Unterschiede zur Lastsituation des Verbundnetzes im Jahre 2012. Diese zeigen sich durch eine Netzanlaufzeitkonstante von 2 s, durch eine Steigerung der FU auf 70 % und eine Zunahme effizienter Geräte der gesamten Haushaltsgeräte auf 65 %.

Die Frequenzantwort des Verbundnetzes (Abbildung 30, Blau) zeigt, dass sich die Frequenz unter die 49 Hz - Grenze bewegt und es somit zu einem Lastabwurf kommen müsste, um das System wieder zu stabilisieren. Das Gleichgewicht der Erzeugung, der Last und der Primärregelung ist nach 10 s erreicht und die Netzfrequenz beträgt zu diesem Zeitpunkt 48.32 Hz. Nach 40 s hat sich das Netz stabilisiert, jedoch bleibt eine stationäre Frequenzabweichung von 185 mHz.

Die orange Kurve stellt die Frequenzantwort des Verbundnetzes 2012 mit einem NSRE von 1 %/Hz dar und sollte hier als unterer Richtwert dienen. Es liegt nahe, dass der NSRE im Jahr 2050 kleiner als 1 %/Hz anzunehmen ist. Für die händische Berechnung des verbraucherabhängigen NSRE (17) wurden die Prozentzahlen der Verbraucher mit ihrem linearen Modell-

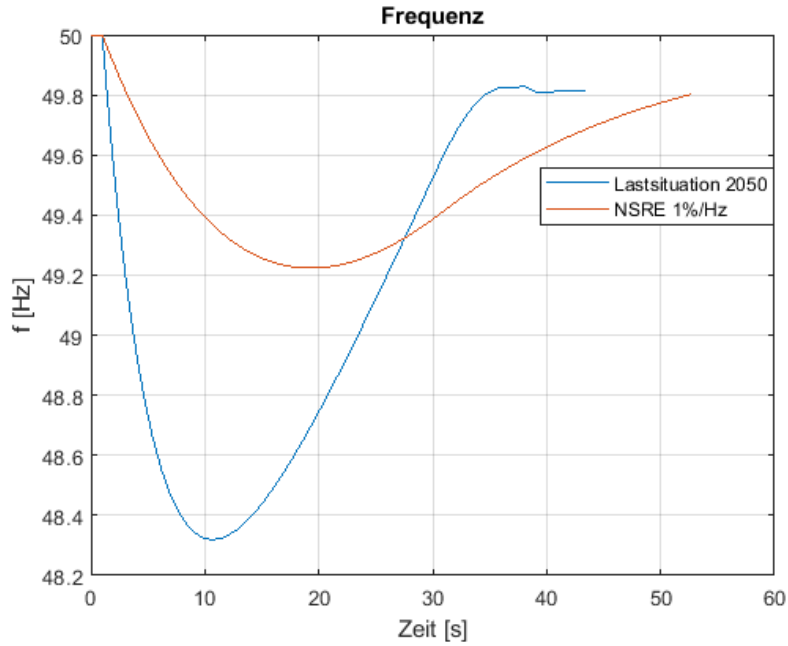


Abbildung 30: Frequenzantwort des Verbundnetzes (2050) auf einen 3 GW Ausfall

koeffizienten multipliziert. Im Falle von verbauter Leistungselektronik sollte diese noch durch eine weitere Multiplikation einbezogen werden. Der Proportionalitätsfaktor für den erzeugerabhängigen NSRE ergibt sich durch Multiplikation des ursprünglichen Faktors von 0.5 %/Hz und dem Anteil konventioneller Kraftwerke. Für die Lastsituation im Jahr 2050 ergibt sich ein erzeugerabhängiger NSRE von 0.1 %/Hz. Der Proportionalitätsfaktor des NSRE sollte nach diesem Szenario 0.8 %/Hz betragen.

$$K_{nsre} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot a_i \cdot (1 - N_i) + K_{nsre,e} = 0.8 \frac{\%}{Hz} \quad (17)$$

Bei Variation der Netzanlaufzeitkonstante T_A bei konstantem verbraucherabhängigem NSRE von 0.7 %/Hz entsteht die nachfolgende Abbildung 31. Aus dieser wird ersichtlich, dass das Verbundnetz bei verringertem Koeffizienten für den verbraucherabhängigen NSRE, nur bei einem T_A von 10 s ohne Lastabwurf sich von dem Ausfall der Generation erholt. Jene Zeit, wel-

che für einen Ausgleich des Ungleichgewichts zwischen Erzeugung und Last benötigt wird, sinkt mit abnehmender Netzanlaufzeitkonstante. Jedoch verringert sich auch die Netzfrequenz, welche zu diesem Zeitpunkt erreicht wird.

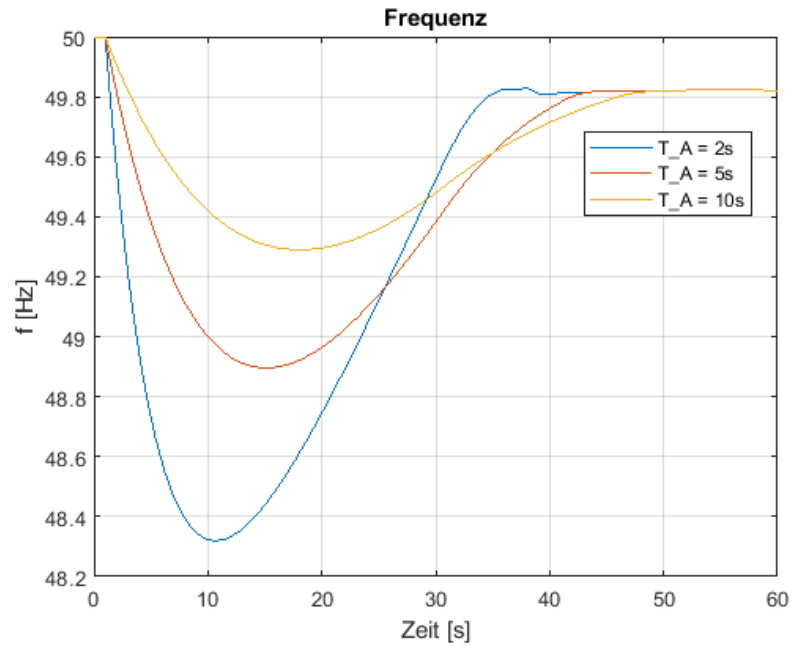


Abbildung 31: Frequenzantwort des Verbundnetzes (2050) bei variablem T_A und einem verbraucherabhängigen NSRE von 0.7 %/Hz

8 Ergebnisse und Ausblick

Zum Abschluss wird in diesem Kapitel auf die Simulationsergebnisse eingegangen. Welche Erkenntnisse können nun aus der Lastverteilung gezogen werden und welche Konsequenzen müssen wir daraus für das Verbundnetz folgern?

8.1 Veränderung des Verbundnetzes

In den nächsten Jahren wird das Verbundnetz großen Veränderungen ausgesetzt werden. Zum einen wird durch die Umstellung der Bereitstellung der elektrischen Energie die Netzanlaufzeitkonstante und damit der erzeugerabhängige NSRE sinken. Zum anderen wird durch die Elektrifizierung der Lasten im Bereich der Industrie, der Haushalte, im kommerziellen Bereich sowie im Transportbereich die Anzahl der elektrischen Motoren am Netz und damit der elektrische Energiebedarf steigen. Eine höhere Anzahl an motorischen Lasten ist eine positive Entwicklung für den NSRE. Jedoch wird eine Großzahl dieser motorischen Lasten nun über einen FU betrieben. Die Gruppe der effizienten Haushaltslasten, wie Kühl- und Gefrierschränke, Waschmaschinen und Geschirrspüler, haben aufgrund ihres Anteils an der Gesamtlast und ihres Linearitätsfaktors keinen großen Einfluss auf den NSRE. Durch ein Umstellen der Beleuchtung von Glühbirnen und Energiesparlampen auf LEDs kann ein positiver Effekt zum NSRE beigetragen werden, solange diese nicht gedimmt werden. Der Anteil an der Gesamtlast ist aber im Vergleich zu den motorischen Lasten gering. In Summe wird daher der NSRE weiter absinken.

8.2 Simulationen

Ein direkter Vergleich der zwei Szenarien des Verbundnetzes zwischen dem Jahr 2012 und dem Jahr 2050 (Abbildung 32) zeigt, dass die Frequenz nach demselben Kraftwerksausfall unterschiedlich verläuft. So bewirkt die Reduzierung der Netzanlaufzeitkonstante über die Jahre eine reduzierte Trägheit, womit die Frequenz schneller abfällt. Zudem ist durch den reduzierten Proportionalitätsfaktor des NSRE die Dauer des Stabilisierungsvorgangs erhöht.

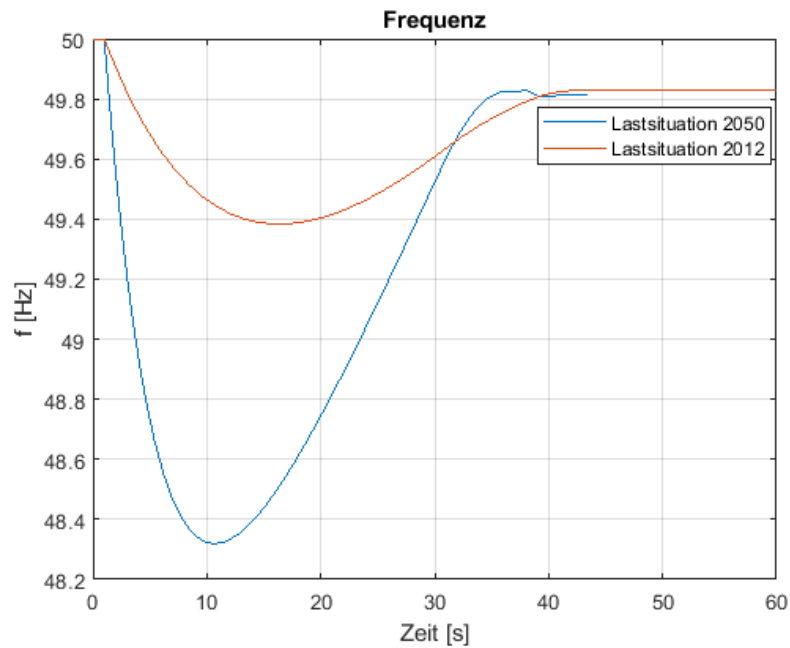


Abbildung 32: Vergleich der Frequenzantworten des Verbundnetzes (2012) und (2050)

8.3 Ausblick

Für das gesamte Verbundnetz hat eine Reduzierung des NSRE gravierende Folgen. Durch die Veränderungen am Verbundsystem können Ausfälle in der Größenordnung der Primärregelung bereits zu einem Lastabwurf führen. Es wird in Zukunft ein hoher Bedarf an schneller oder höherer Primärregelung benötigt, um Ausfälle im Verbundnetz zu vermeiden. Während der Literaturrecherche sind mögliche Lösungsvarianten am Verbundnetz gefunden worden, welche eine Verbesserung der Dynamik des Verbundnetzes bringen könnten.

W. Gawlik und seine Mitautoren beschreiben in [18], dass durch eine schnellere Primärregelung einem raschen Absinken entgegengesteuert werden kann. Meines Erachtens könnte sich dadurch das Verbundnetz ohne einen Lastabwurf stabilisieren.

Die Autoren Welfonder, Lens und Schöll raten die Ansprechfrequenz für den Lastabwurf auf 48.6 Hz abzusenken. Aufgrund der Tatsache, dass die Wirk-

weise des NSRE mit zunehmender Frequenzabweichung steigt, sollte der Frequenzbereich bis kurz vor der Ansprechgrenze für den Lastabwurf voll nutzbar sein. Als Beispiel nennen sie dafür den zuverlässigen stabilen Betrieb des Berliner Inselnetzes[8]. Bei einer verringerten Ansprechfrequenz für den Lastabwurf könnte sich das simulierte Verbundnetz im Jahr 2050 in meiner Diplomarbeit ohne Lastabwurf stabilisieren. Denn aus meinem Szenario des Verbundnetzes im Jahr 2050 wird ersichtlich, dass sich die Frequenz über dieser neuen Grenze für den Lastabwurf befindet und sich die Frequenz auch ohne einen Lastabwurf stabilisieren könnte.

Aus den zeitlichen Leistungsverläufen der einzelnen gemessenen Verbraucher zeigt sich, dass bei sprunghafter Frequenz die Wirkleistung ebenfalls sprunghaft verändert wird. Das gewählte statistische lineare Modell gibt diese Eigenschaft sehr gut wieder. Dadurch lassen sich auch im Jahr 2050 die gemessenen Haushaltsverbraucher durch ein P-Glied darstellen. Für Arbeitsmaschinen wie Lüfter, Wärmepumpen, Verdichter usw. wurden keine eigenen Messungen durchgeführt und dadurch lässt sich für diese Verbraucher auch keine Aussage tätigen.

9 Abkürzungsverzeichnis

ADN	active distribution network
CLM	composite load model
DVG	Deutsche Verbundgesellschaft e.V.
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ENTSO-G	European Network of Transmission System Operators for Gas
FCR	frequency containment reserve
FU	Frequenzumrichter
HVAC	heating, ventilation and air conditioning
ICT	Informations- und Kommunikationstechnik
JRC	Joint Research Centre
LCD	liquid crystal display
LED	light-emitting diode
MG	microgrids
NSRE	Netzselbstregeleffekt
PKW	Personenkraftwagen
TV	television
VDN	Verband der Netzbetreiber

10 Literaturverzeichnis

- [1] C. Schöll, J. Lehner und C. Lens H. „Bedeutung des Netzselbststreckeffekts“. In: 13. ETG/GMA-Fachtagung „Netzregelung und Systemführung“ (2019), S. 104–109.
- [2] B. Hall. *Experimentelle Untersuchung zur frequenz- und spannungsabhängigen Leistungsaufnahme elektrischer Verbraucherteilnetze*. ger. 1993.
- [3] Univ. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik. *Energieversorgung*. Skriptum zur Vorlesung 370.002. 2018.
- [4] T. Laible. „Abhängigkeit der Wirk- und Blindleistungsaufnahme passiver Netze von Spannungs- und Frequenzschwankungen“. In: *Bulletin ASE* 59.2 (1968), S. 49–65.
- [5] A. Binder. *Elektrische Maschinen und Antriebe : Grundlagen, Betriebsverhalten*. ger. 2. Aufl. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 3662532417. URL: 10.1007/978-3-662-53241-6.
- [6] R. Fischer. *Elektrische Maschinen*. ger. 16., aktualisierte Aufl.. München: Hanser, 2013. ISBN: 3446438130.
- [7] E. Welfonder, H. Weber und B. Hall. „Investigations of the frequency and voltage dependence of load part systems using a digital self-acting measuring and identification system“. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 4.1 (1989), S. 19–25. DOI: 10.1109/59.32452.
- [8] E. Welfonder, L. Hendrik und C. Schöll. „Bedeutung des Netzselbststreckeffekts“. In: *EW : Magazin für die Energie-Wirtschaft* 7-8 (2018), S. 46–55.
- [9] ENTSO-E. *P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C]*. 2009. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/oh/Policy1_final.pdf (besucht am 14.06.2021).
- [10] E. Welfonder u. a. „Study of the dependence of consumer subsystems on frequency and voltage“. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS*. Bd. 2. 1994, S. 39–11.

- [11] M. Kurth und E. Welfonder. „IMPORTANCE OF THE SELFREGULATING EFFECT WITHIN POWER SYSTEMS“. In: *IFAC Proceedings Volumes* 39.7 (2006). 5th IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control, S. 345–352. ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20060625-4-CA-2906.00064>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016461112>.
- [12] T. Weißbach. „Verbesserung des Kraftwerks- und Netzregelverhaltens bezüglich handelsseitiger Fahrplanänderungen“. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart, 2009.
- [13] A. Prechtl. *Vorlesungen über die Grundlagen der Elektrotechnik*. ger. Zweite, überarbeitete Auflage. Vienna: Springer Vienna, 2007. ISBN: 3211724567. URL: 10.1007/978-3-211-72456-9.
- [14] Europäische Kommission. URL: https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/energy-efficient-products/electric-motors_de (besucht am 10.09.2021).
- [15] A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler. *Elektromobilität: Grundlagen Einer Zukunftstechnologie*. ger ; eng. 2. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2018. ISBN: 9783662531365.
- [16] J. Specovius. *Grundkurs Leistungselektronik : Bauelemente, Schaltungen und Systeme ; mit 33 Tabellen*. ger. 2., aktualisiert u. erw. Aufl.. Studium Technik. Wiesbaden: Vieweg, 2008. ISBN: 3834802298.
- [17] 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, T TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH. *Auswirkungen reduzierter Schwungmasse auf einen stabilen Netzbetrieb*. 2014.
- [18] W. Gawlik u. a. „Entwicklung des Bedarfs an schneller Regelleistung im europäischen Verbundsystem“. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 135 (Nov. 2018). DOI: 10.1007/s00502-018-0674-8.
- [19] A. J. Schwab. *Elektroenergiesysteme : Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. ger. 5. Aufl. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 3662553163. URL: 10.1007/978-3-662-55316-9.
- [20] Eurostat. *Energy balance sheets - 2011-2012 - 2014 edition*. Publications Office of the European Union, 2014. ISBN: 978-92-79-37858-4.

- [21] ICF International. *Study on energy efficiency and energy saving potential in industry and on possible policy mechanisms*.
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/151201%20DG%20ENER%20Industrial%20EE%20study%20-%20final%20report_clean_stc.pdf. 2015.
- [22] E. Agneholm und J. Daalder. „Load recovery in different industries following an outage“. In: *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution* 149.1 (2002), S. 76–82.
- [23] M. Altmann u. a. *Overview of Energy Efficiency measures of European industry*. Dez. 2010.
- [24] C. Wimmeler u. a. „Impacts of Load Shifting on Renewable Energy Integration“. In: *Energy Procedia* 107 (2017). 3rd International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2016, 7-11 September 2016, Barcelona, Spain, S. 248–252. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.142>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216317313>.
- [25] P. Bertoldi, B. Hirl und N. Labanca. *Energy Efficiency Status Report 2012*. Publications Office of the European Union, 2012. ISBN: 978-92-79-25604-2.
- [26] Z. Filipovic. *Elektrische Bahnen: Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*. eng. Springer, 2005. ISBN: 9783540213109.
- [27] D. Oeding und B. R Oswald. *Elektrische Kraftwerke und Netze*. ger. 8. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 3662527030. URL: 10.1007/978-3-662-52703-0.
- [28] ENTSO-E und ENTSOG. URL: <https://2020.entsos-tyndp-scenarios.eu/visualisation-platform-final-use-input/> (besucht am 10. 09. 2021).
- [29] A. T. de Almeida u. a. „Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017), S. 1275–1286. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.112>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117301223>.
- [30] M. Steinemann u. a. *Marktbeobachtungen für die Umweltpolitik*. Umweltbundesamt Fachgebiet III 1.1 – Übergreifende Aspekte des Produktbezogenen Umweltschutzes, Nachhaltige Konsumstrukturen, Innovationsprogramm, 2017.

- [31] A. Deppermann u. a. *EU reference scenario 2020*. Publications Office of the European Union, 2017. ISBN: 978-92-76-39356-6. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/96c2ca82-e85e-11eb-93a8-01aa75ed71a1/language-en>.
- [32] M. Rózsai u. a. *The POTEnCIA central scenario*. Publications Office of the European Union, 2019. ISBN: 978-92-76-12010-0. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a3c2af84-facf-11e9-8c1f-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-search>.
- [33] T. Mühl. *Elektrische Messtechnik: Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen*. ger. 6. Aufl. 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 9783658291150.
- [34] a-eberle. *Bedienungsanleitung - Netzanalysator / Transientenrekorder PQ-Box 200 & 300*. A. Eberle GmbH & Co. KG Frankenstraße 160 D-90461 Nürnberg, 2020.
- [35] A. Arif u. a. „Load Modeling—A Review“. In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 9.6 (2018), S. 5986–5999. DOI: 10.1109/TSG.2017.2700436.
- [36] E. Agneholm. „The restoration process following a major breakdown in a power system“. Department of Electric Power Engineering, 1996.

11 Abbildungsverzeichnis

1	Drehmoment M_{el} und Ständerstrom I_s in Abhängigkeit der Drehzahl n/n_{syn} bzw. des Schlupfs s ($R_s/X_s = 1/100$, $R_r/X_r = 1.3/100$, $\sigma = 0.067$, $X_s = X'_r = 3Z_N$)[5]	9
2	Darstellung der verschiedenen Momentenkennlinien von Arbeitsmaschinen[5]	10
3	Darstellung des Verbraucherselbstregeleffekts bei Kopplung von Antriebs- und Arbeitsmaschine [8]	11
4	Simulierte Frequenzantworten bei einem Kraftwerksausfall für verschiedenen Szenarien[1]	14
5	Blockschaltbild des vereinfachten Netzynamikmodells[12]	30
6	Mögliche Entwicklungen für die Trägheitskonstante H im Europäischen Verbundnetz (2030)[18]	33
7	Schematische Messanordnung einer stromrichtigen Leistungsmessung [33]	41
8	Anschluss der Messklemmen der PQ-Box bei einphasiger Lastmessung [34]	43
9	Anschluss der Messklemmen der PQ-Box bei dreiphasiger Lastmessung [34]	43
10	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Ventilators im Labor	44
11	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Wasserkochers	45
12	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Geschirrspülers im Labor	46
13	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Heizradiators im Labor	48
14	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz des Lüfters eines Heizradiators im Labor	49
15	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Backrohres	50
16	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Backrohres bei Umluft und ohne Temperatureinstellung	51
17	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer Waschmaschine	52

18	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Kühlschranks	53
19	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Laptops	54
20	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Bildschirms	55
21	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz eines Aufladegeräts für elektronische Zahnbürsten	56
22	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer Glühlampe	57
23	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer LED-Lampe	58
24	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer LED-Lampe	59
25	Messung der Wirkleistung bei sprunghafter wechselnder Frequenz einer Energiesparlampe	60
26	Modell für Lasten mit linearer Frequenzabhängigkeit in Matlab Simulink	65
27	Subsystem der Lastverteilung in MATLAB Simulink	66
28	Gesamte Simulation des Verbundnetzes in MATLAB Simulink	67
29	Frequenzantwort des Verbundnetzes (2012) auf einen 3 GW Ausfall	68
30	Frequenzantwort des Verbundnetzes (2050) auf einen 3 GW Ausfall	70
31	Frequenzantwort des Verbundnetzes (2050) bei variablem T_A und einem verbraucherabhängigen NSRE von 0.7 %/Hz	71
32	Vergleich der Frequenzantworten des Verbundnetzes (2012) und (2050)	73

12 Tabellenverzeichnis

1	Verbrauch der Sektoren in Europa 2012[20]	18
2	Verbrauch der Teilindustrien in Europa 2012[20]	19
3	Lastverteilung für "Eisen und Stahl"[21]	20
4	Lastverteilung für "Chemie und Petroleum"[21]	21
5	Lastverteilung für "Nichteisen Metalle"[21]	21
6	Lastverteilung für "Nichtmetallische Werkstoffe"[21]	22
7	Lastverteilung für "Maschinenanlagen" [21]	22
8	Lastverteilung für "Essen, Trinken und Tabak"[21]	23
9	Lastverteilung für "Papier und Druck"[21]	23
10	Lastverteilung für "Bergbau und Steinbruch"[23]	24
11	Lastverteilung für "Fahrzeugbau"[23]	24
12	Lastverteilung für "Sonstige Industrien"[23]	25
13	Lastverteilung für den Sektor Industrie Jahr 2012	26
14	Lastverteilung für den Sektor Haushalt Jahr 2009	27
15	Lastverteilung für den öffentlichen Bereich Jahr 2009	27
16	Zusammensetzung der Gesamtlast Jahr 2012	28
17	Verkaufsanteile von Frequenzumrichtern (< 7.5 kW) [29]	32
18	Marktanteile der Effizientklassen A+++ und A++ in 2015 [30]	32
19	Energiebedarf der Sektoren in Europa 2050[32]	34
20	Energiebedarf der Industrien in Europa 2050[32]	35
21	Lastverteilung für den Sektor Industrie Jahr 2050	35
22	Lastverteilung für Haushalte 2050 [32]	36
23	Lastverteilung für den öffentlichen Bereich 2050 [32]	37
24	Lastverteilung für den Sektor Haushalt Jahr 2009	38
25	Lastverteilung für den öffentlichen Bereich Jahr 2009	38
26	Zusammensetzung der Gesamtlast Jahr 2050	40
27	Berechnete Faktoren a_f der gemessenen Verbraucher	62
28	Berechnete Faktoren a_f der schwedischen Verbraucher	63

13 Einverständniserklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

Wien, 19. Oktober 2021

Unterschrift



Thomas Pfeifer