

# Untersuchung der netzseitigen Machbarkeit einer entbehrlichkeitsorientierten Einbindung von Lasten in LFSM-U

Masterarbeit von Jakob Ferdinand Staude

Studiengang: Regenerative Energien und Energieeffizienz

Fachbereich 15  
Maschinenbau

Fachbereich 16  
Elektrotechnik und Informatik

Fachgebiet:  
Energiemanagement und Betrieb elektrischer Netze

Erstprüfer:  
Prof. Dr. Ing. Martin Braun

Zweitprüfer:  
Prof. Dr. rer. nat. Clemens Hoffmann

Betreuer:  
M. Sc. Walter Schitteck

Abgabedatum: 3.Juni.2024

Für Veröffentlichung gemeinsam aufbereitet durch Autor und Betreuer.

## **Eigenständigkeitserklärung**

Ich versichere hiermit, dass die Masterarbeit mit dem Thema "Untersuchung der netzseitigen Machbarkeit einer entbehrlichkeitsorientierten Einbindung von Lasten in LFSM-U" von mir selbst und ohne jede unerlaubte Hilfe angefertigt wurde, dass sie noch an keiner anderen Hochschule zur Prüfung vorgelegt wurde, dass sie weder ganz noch in Auszügen veröffentlicht worden ist und dass der Inhalt der Textdatei der digitalen Fassung identisch mit den eingereichten schriftlichen Fassungen ist. Die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Abbildungen usw. –, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall kenntlich gemacht.

Ort, Datum, Unterschrift

# Abstract

This thesis investigates the feasibility and frequency-stabilizing properties of implementing load-side ‘Limited Frequency Sensitive Mode - Underfrequency’ (LFSM-U) in power grids. The research focuses on the aggregated behavior of multiple loads rather than individual ones. Basic characteristics of different kinds of loads participating in LFSM-U have been defined. A stochastic approach was developed to represent the aggregated LFSM-U behavior of many non-controllable loads that can only be switched. A Matlab-Simulink model of the IEEE 14-bus network was developed to simulate critical network situations.

The study’s primary goal was to demonstrate the frequency-stabilizing effects of load-side LFSM-U and assess the impacts of different influencing factors such as LFSM-U penetration, delay times, or largely different shares of loads with differing LFSM-U behaviour. Results indicate that a network with substantial penetration of LFSM-U capable loads can avoid or mitigate underfrequency load shedding during critical situations and maintain grid stability. However, extensive LFSM-U involvement led to moderate to strong transient oscillations in frequency and power, which remained adequately damped even under extreme conditions.

# Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Machbarkeit und frequenzstabilisierenden Eigenschaften einer Implementierung von lastseitigem “Limited Frequency Sensitive Mode - Underfrequency” (LFSM-U) in Stromnetzen untersucht. Der Fokus der Untersuchung liegt auf dem aggregierten Verhalten vieler Lasten anstelle einzelner Lasten. Grundlegende Eigenschaften verschiedener Arten von Lasten, die an LFSM-U teilnehmen, wurden definiert. Ein stochastischer Ansatz wurde entwickelt, um das aggregierte LFSM-U-Verhalten vieler nicht regelbarer Lasten darzustellen, die nur geschaltet werden können. Ein Matlab-Simulink-Modell des IEEE 14-Bus-Netzwerks wurde entwickelt, um kritische Netzsituationen zu simulieren.

Das Hauptziel der Studie war es, die frequenzstabilisierenden Effekte des lastseitigen LFSM-U zu demonstrieren und die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren wie des Anteils an LFSM-U-fähigen Lasten, Schaltverzögerungen oder stark unterschiedlicher Anteile von Lasten mit verschiedenem LFSM-U-Verhalten zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Netzwerk mit erheblichem Anteil an LFSM-U-fähigen Lasten Unterfrequenzlastabwürfe während kritischer Situationen vermeiden oder abschwächen und die Netzstabilität aufrechterhalten kann. Allerdings führte eine umfangreiche Beteiligung von LFSM-U zu mäßigem bis starkem Einschwingverhalten bei Frequenz und Leistung, das auch unter extremen Bedingungen ausreichend gedämpft blieb.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>8</b>
1.1 Motivation . . . . .	8
1.2 Wissenschaftliche Einordnung . . . . .	9
1.3 Aufgabenstellung . . . . .	10
<b>2 Grundlagen</b>	<b>11</b>
2.1 Regelmechanismen im Netz . . . . .	11
2.1.1 Momentanreserve . . . . .	12
2.1.2 Primärregelung . . . . .	12
2.1.3 Sekundärregelung . . . . .	12
2.1.4 Limited Frequency-Sensitive Mode – Underfrequency . . . . .	13
2.2 Unterfrequenzlastabwurf . . . . .	13
2.3 Diskriminierungsfreiheit . . . . .	14
2.4 Per-Unit-Systeme . . . . .	14
2.5 Elektromagnetische transiente Simulation . . . . .	15
<b>3 Methodik</b>	<b>16</b>
3.1 Ziele der Arbeit . . . . .	16
3.2 Modellierung der Lasten . . . . .	16
3.3 Modellierung in Simulink . . . . .	17
3.4 Simulationen . . . . .	18
<b>4 Gegenstand der Untersuchung</b>	<b>19</b>
4.1 Betrachtete Erzeugungseinheiten . . . . .	19
4.2 Regelbare Lasten . . . . .	19
4.3 Schaltende Lasten . . . . .	19
4.3.1 Verteilung auf einem Frequenzband . . . . .	20
4.3.2 Leistungsbereich mit vielen Geräten . . . . .	20
4.3.3 Realisierung mehrerer Schaltvorgänge pro Gerät/Anlage . . . . .	21
4.3.4 Umgang mit großen Einzellasten . . . . .	22
4.3.5 Anzahl an Frequenzbändern . . . . .	23
4.3.6 P(f)-Verhalten in der Simulation . . . . .	24
4.4 Wiedereinschalten schaltender Lasten . . . . .	24
4.4.1 Wiedereinschaltverhalten einzelner schaltender Lasten . . . . .	24
4.4.2 Wiedereinschaltverhalten vieler schaltender Lasten . . . . .	25

<b>5</b>	<b>Bestandteile der Modellierung</b>	<b>26</b>
5.1	Netzplan . . . . .	26
5.2	Passive Komponenten . . . . .	27
5.2.1	Leitungen . . . . .	28
5.2.2	Transformatoren . . . . .	28
5.3	Verwendetes VSM Modell . . . . .	29
5.4	Lasten . . . . .	30
5.4.1	Schaltende Lasten im Modell . . . . .	31
5.4.2	Regelbare Lasten im Modell . . . . .	35
5.4.3	Verzögerungszeiten im Modell . . . . .	36
5.5	Umsetzung Unterfrequenzlastabwurf . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Untersuchungen</b>	<b>39</b>
6.1	Wirkung von lastseitigem LFSM-U . . . . .	39
6.2	Auswirkungen unterschiedlicher Anteile von LFSM-U . . . . .	40
6.3	Unterschiedliche Verzögerungszeiten . . . . .	42
6.4	Wiedereinschalten und Sekundärregelung . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>45</b>
7.1	Wirkung von lastseitigem LFSM-U . . . . .	45
7.2	Auswirkungen unterschiedlicher Anteile von LFSM-U . . . . .	46
7.3	Unterschiedliche Verzögerungszeiten . . . . .	50
7.4	Wiedereinschalten und Sekundärregelung . . . . .	52
<b>8</b>	<b>Auswertung/Diskussion</b>	<b>56</b>
8.1	Grundlegendes Verhalten . . . . .	56
8.2	Unterschiedlich hohe Anteile von LFSM-U . . . . .	57
8.3	Ungleichmäßige Verteilung von LFSM-U . . . . .	58
8.4	Auswirkung der Verzögerungszeiten . . . . .	59
8.5	Wiedereinschaltverhalten der Lasten . . . . .	59
<b>9</b>	<b>Fazit</b>	<b>61</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	61
9.2	Ausblick . . . . .	61
	<b>Anhang</b>	<b>69</b>

# Abkürzungsverzeichnis

**ArF** Anstiegsraten-Faktor

**DFCR** demand as a frequency controlled reserve

**EEG** Erneuerbare-Energien-Gesetz

**ENTSO-E** European Network of Transmission System Operators for Electricity

**FdK** Frequenzdifferenz Korrekturfaktor

**IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change

**LFSM-O** Limited frequency sensitive mode - overfrequency

**LFSM-U** Limited frequency sensitive mode - underfrequency

**p.u.** Per unit

**RoCoF** rate of change of frequency (Frequenzänderungsrate)

**VSM** virtuelle Synchronmaschine

**VWA** Versorgungswiederaufbau

**UFLA** Unterfrequenzlastabwurf

# 1. Einleitung

Mit der Ausbreitung der Industrialisierung steigt die Freisetzung von Treibhausgasen in die Umwelt. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beschreibt in einem Bericht von 2007 einen Zusammenhang zwischen von Menschen freigesetzten Treibhausgasen und den steigenden Temperaturen in Ozeanen und der Atmosphäre [Sol07]. Die Auswirkungen der steigenden Temperaturen sind global spürbar. Dazu zählen gesundheitliche [Sta+09] und psychologische Auswirkungen auf den Menschen [Hun22]. Aber auch soziale Konflikte im globalen Ausmaß sind Folgen des Klimawandels. Um die Freisetzung von Treibhausgasen zu reduzieren, werden erneuerbare Energien immer weiter ausgebaut. In Abbildung 1 des Um-

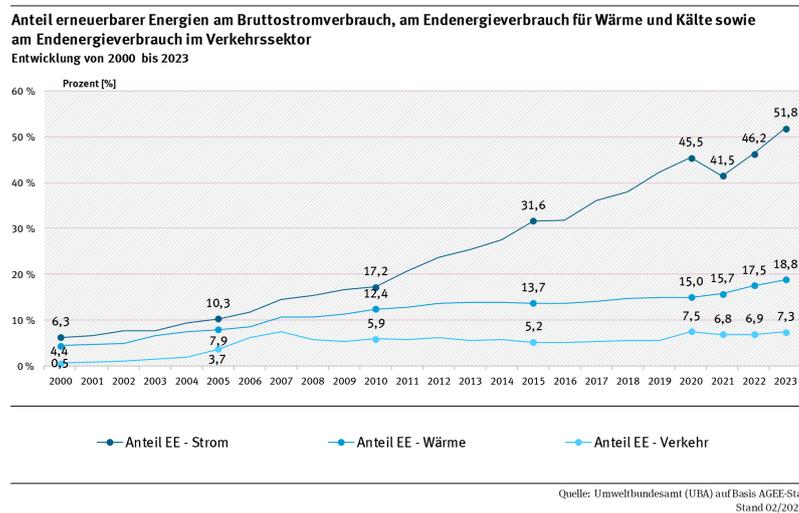


Abbildung 1: Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch

weltbundesamts ist der Anteil erneuerbarer Energien an den jeweiligen Sektoren in Deutschland seit 2005 zu sehen [Umw23]. Dieser hat sich beim Strom von 10,3% im Jahr 2005 auf 51,8% im Jahr 2023 erhöht. Die Dekarbonisierung der Energieerzeugung führt in Deutschland dazu, dass zunehmend konventionelle Kraftwerke abgeschaltet werden und durch dezentrale Erzeuger ersetzt werden, was eine Reduzierung der drehenden Massen im Netz zur Folge hat und das Stomnetz somit anfälliger gegenüber Frequenzschwankungen macht.

## 1.1 Motivation

Mit dem Klimaschutzgesetz von 2023 hat die Bundesregierung die Ziele zur Senkung der Treibhausgasemissionen weiter verschärft. Ziel ist, bis 2030 eine Verringerung der Emissionen um 60% und Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen [Bun23]. Um diese

hoch gesteckten Ziele einzuhalten, muss der Ausbau der erneuerbaren Energien unter anderem im Stromnetz weiter vorangetrieben werden. Im Umkehrschluss führt das dazu, dass der Anteil nicht erneuerbarer Energien (im wesentlichen Kohle und Gas) zurückgeht. Diese Kraftwerke leisten, durch die starr mit dem Netz verbundenen Synchronmaschinen, einen wichtigen Beitrag für die Momentanreserve. Das Ersetzen dieser Kraftwerke durch erneuerbare Energieträger wie Wind und Photovoltaik führt aufgrund der geringeren Momentanreserve der erneuerbaren Energien dazu, dass das Stromnetz anfälliger gegenüber den Auswirkungen eines Leistungsungleichgewichts im Netz ist [LK17]. Extremste Leistungs-Ungleichgewichte entstehen, wenn ein Teil des Stromnetzes vom Verbundnetz getrennt wird (System-Split). Im abgetrennten Teil des Stromnetzes kommt es bei hohen Übertragungsleistungen aus erneuerbarer Einspeisung zu einem hohen Leistungsdefizit und damit zu einer starken negativen rate of change of frequency (RoCoF). Gleichzeitig ist der Unterfrequenzlastabwurf (UFLA), die vorherrschende Sicherheitsvorkehrung bei irregulär starkem Frequenzabfall, in einem Netz mit vielen dezentralen Erzeugungsanlagen weniger effektiv [Sun+21]. Da erneuerbare Energien nicht in der Lage sind, die Einspeiseleistung ohne weiteres zu erhöhen und damit die bei abfallender Frequenz zusätzliche Leistung zu erbringen, wird im Folgenden ein Ansatz vorgestellt bei dem die Lasten im Stromnetz mit in die Frequenzstabilisierung bei Unterfrequenz einbezogen werden. Bezeichnend für den Ansatz ist einerseits, dass auch nicht-regelbare Lasten, die nur in Teilen oder als Ganzes abgeschaltet werden können, einbezogen werden. Andererseits wird durch eine entbehrlichkeitsorientierte Komponente dafür gesorgt, dass leichter entbehrliche Lasten, wie z.B. solche zur Wärmeerzeugung, bei einem Frequenzabfall vorrangig in Anspruch genommen werden.

## 1.2 Wissenschaftliche Einordnung

Das Risiko, dass durch den Ausbau dezentraler Einspeiser Unterfrequenzlastabwürfe immer ineffektiver werden, ist bekannt. Beschrieben wird dies in [Bv17] und [Cai+14]. Es gibt unterschiedliche Ansätze, um UFLA an die sich verändernden Bedingungen anzupassen. In den in [Sun+21] und [Hos+18] verfolgten Ansätzen wird die RoCoF ermittelt und daraus die fehlende Leistung bestimmt und dadurch die Größe von UFLA bestimmt um damit zu verhindern, dass zu viel Leistung vom Netz getrennt wird. Der Ansatz von Limited frequency sensitive mode - overfrequency (LFSM-O) ist dem hier verwendeten Ansatz ähnlich [Sch+22]. Hierbei reduzieren dezentrale Erzeuger abhängig von der Frequenz die Einspeiseleistung, um ein irreguläres Ansteigen der Frequenz zu verhindern. In [ENT19] wird LFSM-U als Sicherheitsvorkehrung bei Unterfrequenz beschrieben. Anders als in dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz ist damit aber herkömmlich die schnelle Bereitstellung von Leistung durch Erzeu-

gung und Speicher gemeint. Weitere erzeugerseitige Ansätze sind in [BMS22; Ber20; VSE15] beschrieben. Eine Einbeziehung von Lasten, insbesondere Speichersystemen, wird in [LK17] vorgenommen. Es wird gezeigt, dass durch Beteiligung von Lasten an LFSM-U Unterfrequenzlastabwürfe vermieden werden können. In [Dou+13] wird der Ansatz demand as a frequency controlled reserve (DFCR) untersucht, welcher im Bereich von 51,1 bis 49,9 Hz ein  $P(f)$ -Verhalten etabliert. Es wird gezeigt, wie Industrielasten durch Leistungsreduktion zur Frequenzstabilisierung beitragen können.

### 1.3 Aufgabenstellung

Der vorliegenden Arbeit zugrunde liegt die Annahme, dass sehr viele Lasten auf allen Spannungsebenen das Potenzial hätten, zu LFSM-U beizutragen, wenn man sie regelungstechnisch adäquat einbinden würde. Aufgabe war, ein Konzept zur Einbindung auch von Lasten zu entwickeln, die nicht regelbar sind und nur in Teilen oder als Ganzes geschaltet werden können. In Verbindung damit wird die Erstellung und Untersuchung eines Ansatzes zur Darstellung des aggregierten  $P(f)$ -Verhaltens aller an lastseitigem LFSM-U beteiligten Lasten erforderlich. Der Ansatz soll, unter Einbeziehung stochastischer Methoden, aggregiert die Wirkung vieler beteiligter Lasten je Netzknotenpunkt zeigen. Dafür sollen die Lasten zunächst sehr oberflächlich entsprechend der Möglichkeiten zur Leistungsreduktion kategorisiert werden. Es sollen Parameter identifiziert werden die für das Frequenzverhalten sowohl der einzelnen Lasten als auch der aggregierten Lasten relevant sind. Weiterhin soll die Robustheit von lastseitigem LFSM-U unter Anwendung des zuvor erstellten Ansatzes untersucht werden. Dafür sollen die unterschiedlichen LFSM-U-Parameter und ggf. weitere Parameter und Regelmechanismen des Netzes variiert werden. Die jeweils erwarteten und tatsächlichen Ergebnisse werden miteinander verglichen, um deren Auswirkungen auf das Frequenzverhalten zu identifizieren. Weitere Untersuchungspunkte sind die Auswirkung von lastseitigem LFSM-U auf den Unterfrequenzlastabwurf und das Zusammenspiel mit weiteren frequenzstabilisierenden Maßnahmen (Primärregelung, Sekundärregelung) im Netz. Ziel der Untersuchungen insgesamt ist es, Aussagen über die Einsetzbarkeit und Robustheit von lastseitigem LFSM-U in einem kleinen Teilnetz zu treffen. Anforderungen und Voraussetzungen an die technische Umsetzung (Frequenzmessung und Schaltverhalten) und die Einbindung der Lasten ins Stromnetz (Verteilung der Lasten) sollen gezeigt werden.

## 2. Grundlagen

Nachfolgend werden für die Simulation relevante Grundlagen beschrieben. Zunächst werden die Regelmechanismen im Netz beschrieben.

### 2.1 Regelmechanismen im Netz

Regelmechanismen halten das Stromnetz stabil und gewähren die Zuverlässigkeit des Netzbetriebs sowie die Qualität der Spannung. Dazu zählt die Einhaltung von Frequenz auf den Sollwert (Europa typischer Weise 50 Hz), das Halten der sinusförmigen Form der Spannung unter Beachtung von Amplitude und Symmetrie. [Cra12]

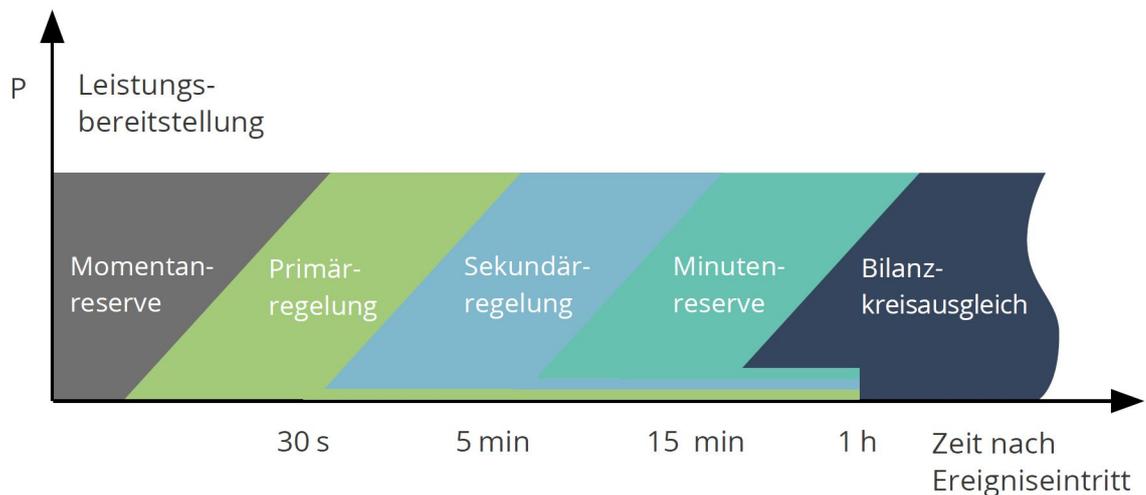


Abbildung 2: Einsatz von Regelleistung zur Frequenzhaltung

In Abbildung 2 [Jül+20] sind die unterschiedlichen Beiträge zur Frequenzstabilität dargestellt. Auf der Ordinate die Leistung, auf der Abszisse die Zeit, die nach Eintritt des auslösenden Ereignisses vergeht. Mit Blick auf Beiträge zur Frequenzstabilität unterscheiden sich konventionelle und erneuerbare Einspeiser zum Teil sehr.

Konventionelle Einspeiser sind in der Regel über eine Synchronmaschine mit dem Netz gekoppelt, welche von einer Turbine angetrieben wird. Um das Leistungsgleichgewicht im Netz zu beeinflussen, wird die mechanische Leistung der Turbine beeinflusst oder die Trägheit des Systems genutzt.

Die Anbindung von erneuerbaren Einspeisern erfolgt über leistungselektronische Umrichter. Dadurch ist die Energieerzeugung, anders als bei konventionellen Einspeisern, von der Netzcharakteristik entkoppelt [Kno+21].

### **2.1.1 Momentanreserve**

Konventionell beschreibt Momentanreserve die natürliche Trägheit des Stromsystems mittels der synchron rotierenden Massen. Vom Charakter her stellt Momentanreserve eine kurzzeitig verfügbare sowie verzögerungsfrei und inhärent einsetzende Leistungsreserve in einem Energieübertragungssystem dar. Dabei handelt es sich um sofort verfügbare Leistungskapazitäten von Kraftwerken und anderen Einspeisern, die bei unvermittelt auftretenden Ungleichgewichten zwischen Stromerzeugung und -verbrauch einsetzen. Diese Reserve ist notwendig, um kurzfristige Schwankungen und unerwartete Ausfälle auszugleichen und so die Netzfrequenz stabil zu halten. Konventionelle Erbringer von Momentanreserve sind vor allem Kohle- und Gaskraftwerke; zukünftig sollen auch dezentrale Erzeugungsanlagen und moderne Batteriespeicher in die Bereitstellung von Momentanreserve einbezogen werden.

### **2.1.2 Primärregelung**

Primärregelung wird auch Frequency Containment Reserve genannt und ist essentiell zu Gewährleistung der Frequenzstabilität. Sie dient der sofortigen Stabilisierung der Netzfrequenz bei kurzfristigen Ungleichgewichten zwischen Stromerzeugung und -verbrauch. Mit einer Reaktionszeit von ca. 10...30 Sekunden spielt die Primärregelung eine wichtige Rolle, indem sie die ersten automatischen Reaktionen auf eine Abweichung der Netzfrequenz vom Sollwert bereitstellt. Erbringer von Primärregelleistung müssen in der Lage sein ihre Leistung schnell zu variieren. Konventionelle Energieerzeuger eignen sich für Primärregelung, da die Turbinen in Gas- und Kohlekraftwerken ihre Leistung, z.B. über Dampf-Zwischenspeicher, schnell anpassen können. Bei erneuerbaren Energieträgern werden für die Primärregelung vor allem Windkraftanlagen und Batteriespeicher eingesetzt. Batteriespeicher können sehr schnell Energie ins Netz einspeisen oder aus dem Netz aufnehmen und eignen sich daher hervorragend für die Bereitstellung von Primärregelleistung. Ihre Bedeutung in diesem Bereich wächst mit der zunehmenden Verbreitung von Energiespeichertechnologien. [MJN20]

### **2.1.3 Sekundärregelung**

Die Sekundärregelung folgt der Primärregelung und hat das Ziel, die Netzfrequenz nach Abweichungen wieder auf ihren Sollwert zu bringen und die Leistungsbilanzen zwischen den verschiedenen Regelzonen eines Stromnetzes auszugleichen. An der Sekundärregelung teilnehmende Kraftwerke bieten sogenannte Sekundärregelleistung an. Diese Leistung kann innerhalb weniger Minuten aktiviert werden, um die Frequenz zu stabilisieren und die Leistungsbilanz auszugleichen. Typischerweise ist die Sekundärregelung ein automatisierter Prozess, der vom Übertragungsnetzbetreiber

gesteuert wird. Zur Bestimmung der Sekundärregelleistung werden kontinuierlich die Frequenzabweichung und die Austauschleistungen zwischen den Regelzonen gemessen. Basierend auf diesen Messungen passt sie die Leistung bestimmter Kraftwerke an, die für die Sekundärregelung vorgesehen sind. Mit einer Reaktionszeit von  $t \leq 5$  Minuten ist die Sekundärregelung langsamer als die Primärregelung. [MJN20]

#### **2.1.4 Limited Frequency-Sensitive Mode – Underfrequency**

Limited Frequency-Sensitive Mode (LFSM) ist ein Betriebsmodus von Frequenzreglern in Stromnetzen, der darauf abzielt, ergänzend zum Arbeitsbereich der herkömmlichen Primärregelung die Stabilität der Netzfrequenz zu gewährleisten, indem die Einspeisung oder Entnahme von Leistung in Abhängigkeit von der gemessenen Frequenz gesteuert wird. LFSM wird unterteilt in 'Limited Frequency-Sensitive Mode - Overfrequency' (LFSM-O) bei erhöhter Frequenz und 'Limited Frequency-Sensitive Mode - Underfrequency' (LFSM-U) was nur solche Mechanismen mit einbezieht, die dazu dienen, Frequenzen unterhalb des Sollwerts (Europa 50 Hz) innerhalb bestimmter Grenzwerte zu halten [ENT18]. Es gibt auch Ansätze, Lasten bei LFSM-U mit einzubeziehen. In [LK17] wird ein Ansatz beschrieben, bei dem Elektroautos während des Ladens einen Beitrag zu Frequenzstabilisierung liefern.

## **2.2 Unterfrequenzlastabwurf**

Die Hauptfunktion des Unterfrequenzlastabwurf (UFLA) besteht darin, bei signifikanten negativen Abweichungen der Netzfrequenz von ihrem Sollwert (in Deutschland 50 Hz) automatisch Lasten vom Netz zu trennen, um einen weiteren Frequenzabfall zu verhindern und letztendlich einen vollständigen Zusammenbruch des Stromversorgungssystems (Blackout) zu vermeiden. Dies geschieht durch das gezielte Abschalten von Mittelspannungsabzweigen in Stufen sobald die Frequenz bestimmte festgelegte Schwellenwerte unterschreitet. Die Schwellenwerte sind so gewählt, dass sie eine gestaffelte Reaktion ermöglichen bevor kritische Situationen erreicht werden. Der Lastabwurf erfolgt in mehreren Stufen so, dass bei Erreichen von definierten Frequenzschwellen automatisch bestimmte Mittelspannungsabzweige vom Netz getrennt werden. Die Systeme müssen hochzuverlässig sein und sehr schnell reagieren, da Frequenzabweichungen häufig eine hohe Dynamik aufweisen. In Deutschland wird seit 2020 laut [VDE20] vorgesehen, dass UFLA in 10 Lastabwurfstufen die Leistung im Netz reduziert. Im Bereich von 49-48,1 Hz sollen in 0,1 Hz Schritten jeweils ca. 4,5% der Leistung vom Netz getrennt werden.

## 2.3 Diskriminierungsfreiheit

Die Diskriminierungsfreiheit im deutschen Stromnetz ist ein grundlegendes Prinzip, das sicherstellt, dass alle Netzkunden gleichen Zugang zum Stromnetz und zu den damit verbundenen Dienstleistungen haben. Dieses Prinzip ist in der deutschen und europäischen Energierechtsgebung fest verankert und zielt darauf ab, einen fairen Wettbewerb und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten [Bun24]. Durch diese und weitere Maßnahmen soll im deutschen Stromnetz ein fairer Wettbewerb gefördert, Innovationen unterstützt und letztlich die Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit des Energieversorgungssystems verbessert werden. Die Diskriminierungsfreiheit ist somit ein zentrales Element der Energiemarktregulierung und dient der "Gewährleistung von Transparenz sowie diskriminierungsfreier Ausgestaltung und Abwicklung des Netzbetriebs" [Bun24, §6].

## 2.4 Per-Unit-Systeme

Per-unit-Systeme sind eine standardisierte Methode in der Elektrotechnik, insbesondere im Bereich der elektrischen Energietechnik, zur Vereinfachung und Normierung von elektrischen Größen in Energieübertragungssystemen. Durch die Normierung der elektrischen Größen entsteht ein per-unit (p.u.) System. Die p.u.-Größen stellen gewissermaßen das Verhältnis zwischen einer effektiven Größe zu einer Nenngrößen dar. Die Normierung erfolgt durch die Nenngrößen für die jeweiligen elektrischen Größen [Cra15]. Für die unten in Kapitel 5.3 vorgestellten virtuellen Synchronmaschinen wurde das in Tabelle 1 aufgeführte und in [YI10] beschriebene p.u.-System gewählt.

Nenngröße	Berechnung
Nennleistung	$P_b = \frac{3}{2} V_b I_b$
Spannung	$V_b = \widehat{V}_s$
Strom	$I_b = \frac{2P_b}{3V_b}$
Impedanz	$Z_b = \frac{V_b}{I_b}$
Kapazität	$C_b = \frac{1}{Z_b \omega_b}$
Induktivität	$L_b = \frac{Z_b}{\omega_b}$
Frequenz	$\omega_b = \omega_0$

Tabelle 1: Nenngrößen VSM

Zu sehen ist, dass die Spannung zur Berechnung der anderen Nenngrößen genutzt wird,  $V_b$  ist die Amplitude der nominalen Leiter-Erde Spannung.

## 2.5 Elektromagnetische transiente Simulation

Eine elektromagnetische transiente Simulation (EMT) ist ein wichtiges Werkzeug in der Elektrotechnik, speziell in der Planung und Analyse von Stromübertragungs- und Verteilnetzen. Sie ermöglicht es, das Verhalten elektrischer Systeme unter transienten, also kurzzeitigen und dynamischen, Bedingungen zu untersuchen. Dabei werden die physikalischen und elektrischen Eigenschaften von Netzkomponenten wie Generatoren, Transformatoren, Kabeln, Freileitungen, Schaltgeräten und Lasten sehr detailliert modelliert. Dadurch wird auch die Frequenzabhängigkeit der Komponenten berücksichtigt. Insgesamt bietet die EMT-Simulation ein leistungsstarkes Werkzeug, um die komplexe Dynamik von Stromsystemen zu verstehen und effektive Lösungen für deren Entwurf, Schutz und Betrieb zu entwickeln. [IEE23]

# 3. Methodik

## 3.1 Ziele der Arbeit

Mit der vorliegenden Arbeit soll mittels Simulationen untersucht werden, ob die Einbeziehung von Lasten in LFSM-U in einem sehr viel stärkeren Maße als bisher durchführbar und zielführend erscheint. Desweiteren soll untersucht werden, ob eine Aufteilung der Lasten in leichter und weniger leicht entbehrlich möglich ist, ohne dass Nachteile für die Beherrschbarkeit starker Frequenzabfälle entstehen. Für die geplanten Untersuchungen soll ein Ansatz zur Darstellung von Lasten, die zu LFSM-U beitragen, entwickelt und umgesetzt werden. Die einbezogenen Lasten werden entsprechend ihrer Entbehrlichkeit auf zwei Frequenzbänder verteilt, so dass Lasten, auf die leichter verzichtet werden kann, vor jenen geschaltet werden die weniger entbehrlich sind. Bei schaltenden Lasten (Kapitel 4.3) kann häufig nur die gesamte Leistung auf einmal geschaltet werden. Es soll gezeigt werden, dass das Zusammenwirken vieler schaltender Lasten im verfolgten Ansatz dem Verhalten regelbarer Lasten (Kapitel 4.2) ausreichend ähnlich ist, deren Leistung proportional zur Frequenz reduziert wird. Zur Vermeidung von häufigen Schaltvorgängen bei schwankender Frequenz soll zusätzlich eine Wiedereinschaltverzögerung (Kapitel 4.4.2) in den Ansatz eingebunden werden. Die in Kapitel 6 beschriebenen Untersuchungen dienen zum einen dazu, den Effekt des  $P(f)$ -Verhaltens zu zeigen und zum anderen dazu, Auswirkungen auf die Frequenzstabilität zu ermitteln. Dazu wurden die Effekte einer zunehmenden Ausbreitung von LFSM-U-fähigen Lasten in einem Stromnetz untersucht, da vermutet werden kann, dass durch  $P(f)$ -Mechanismen mit wechselnder, nicht zentral steuerbarer Dimensionierung die Dynamiken im Netz zunehmen. Durch starke Variation verschiedener Parameter des  $P(f)$ -Verhaltens soll zusätzlich die Robustheit des Gesamt-Ansatzes untersucht werden.

## 3.2 Modellierung der Lasten

In den Simulationen muss eine große Anzahl an Lasten, die ohne eine zentrale Steuerung frequenzabhängig die Leistung reduzieren sollen, berücksichtigt werden, ohne jede Last einzeln darzustellen. Dazu wird in Kapitel 4, basierend auf den Eigenschaften der Lasten und unter Einbeziehung stochastischer Methoden, ein Ansatz ausgearbeitet, durch den die Lasten je Netzknoten als eine aggregierte Last mit linearem  $P(f)$ -Verhalten dargestellt werden können. Im Nachgang einer kritischen Netzsituation soll auch bei schwankendem Leistungsungleichgewicht mehrfaches Schalten von LFSM-U-Lasten nach Möglichkeit vermieden werden. Ein Ansatz für das verzögerte Wiedereinschalten schaltender Lasten und dessen aggregierte Modellierung je Netz-

knoten wurde im Rahmen der Arbeit entwickelt und wird in Kapitel 4.4.2 vorgestellt.

### 3.3 Modellierung in Simulink

Die Modellierung und Durchführung der Simulationen erfolgte in Matlab Simulink mit Verwendung der Simscape Bibliothek. Anstelle von Synchronmaschinen werden in dem Modell ausschließlich virtuelle Synchronmaschinen (VSMs) eingesetzt. Das verwendete VSM-Modell wurde vom Fachbereich zur Verfügung gestellt. In der ursprünglichen Vorlage des Netzes werden neben einspeisenden Synchronmaschinen auch Phasenschieber verwendet. Die Rolle der Einspeiser übernehmen einspeisende VSMs. An die Stelle von zwei der drei Phasenschieber treten Last-VSMs als eine neue Gattung zu untersuchender Lasten. Die Verbrauchsleistung an den Knoten der Last-VSMs wird hälftig auf ohmsche Lasten und Last-VSMs aufgeteilt. Der dritte Phasenschieber wird als VSM mit Setpoint von 0 umgesetzt. Zur Darstellung der ohmschen Lasten wurde ein Simulink-Load-Block verwendet, dessen Wirkleistung einem externen Signal folgt. Für das Eingangssignal der Lasten wurde ein Submodell entworfen, das in Kapitel 5.4.1 beschrieben ist. An jedem Knoten wird das Submodell als "referenced submodel" eingebunden. Die Parametrierung der unterschiedlichen aggregierten Lasten erfolgt über ein Array. So ist es nicht notwendig, für jede aggregierte Last ein eigenes Subsystem anzulegen. Auf die gleiche Weise, mit einem separaten Array, wurden die VSMs ins Modell eingefügt und parametrierung. Das verwendete VSM-Modell wurde vom Fachbereich zur Verfügung gestellt und entsprechend den Anforderungen (als Last LFSM-U und UFLA-fähig, als Einspeiser Möglichkeit zur Primär-Sekundärregelung beizutragen, Umbau zu "referenced submodel") modifiziert, siehe Kapitel 5.3. Um eine Annäherung an europäische Verhältnisse zu erreichen, wurde die Netzfrequenz des IEEE-14-Knoten-Netzes von 60 Hz auf 50 Hz reduziert. Zur Darstellung des unterbrochenen Wirkleistungsflusses wird zum Zeitpunkt  $t_0$  eine konstante Spannungsquelle vom Netzabschnitt entfernt. Die Höhe des unterbrochenen Wirkleistungsflusses wurde über die Einspeiseleistung der VSM am Knoten 1 gesteuert. Die Modellierung von UFLA ist in Kapitel 5.5 genau beschrieben. Bei den Lasten wird bei Erreichen einer von insgesamt zwei UFLA-Stufen die Leistung einer Last um 22,5 % reduziert. Bei den Last-VSMs wurde der Unterfrequenzlastabwurf so dargestellt, dass das gemessene Leistungssignal bei Erreichen einer UFLA-Stufe durch  $(1 - 22,5\%)$  dividiert wird, wodurch die VSM die Eigenschaften einer um 22,5 % kleineren VSM annimmt. Jeder Last und jeder Last-VSM sind zwei UFLA-Stufen zugeordnet.

### 3.4 Simulationen

Die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen wurden als Elektromagnetische Transiente (siehe Kapitel 2.5) Simulationen durchgeführt. Es sollen Effekte untersucht werden, die eine frequenzabhängige Leistungsreduktion verursachen. Deswegen ist es notwendig, eine Simulation zu nutzen, bei der die elektrischen und elektromagnetischen Eigenschaften der Netzteilnehmer modelliert sind, um Wechselwirkungen zwischen den Komponenten, einschließlich nicht-linearer Effekte und dynamischer Antworten, berücksichtigen zu können. Als Datengrundlage für die EMT-Simulation diente das IEEE 14-Knoten-Netz [Mil10]; dieses wird in Kapitel 5.1 näher beschrieben. Es wurde sich für ein kleines Netz mit weniger Knoten entschieden da die zu untersuchenden Effekte (Antwortverhalten der Lasten und Frequenzverhalten) in der Netzgröße ausreichend auftreten. In den Abbildungen in Kapitel 7 sind jeweils unterschiedliche Simulationen in einer Grafik dargestellt, da für die Untersuchungen der Vergleich von verschiedenen Netzsituationen und nicht unterschiedlicher Geräte relevant ist. Untersucht wird eine Situation nach einer ungeplanten Trennung vom Verbundnetz und zu wenig verbleibender Einspeiseleistung, wodurch es zu einem kritischen Frequenzabfall kommt. Die genauen Parametrierungen der einzelnen Simulationen sind in Kapitel 6 aufgeführt. In der ersten Untersuchung wird gezeigt, dass LFSM-U unterschiedlich starke RoCoFs aufhalten kann. Dazu wurde, bei konstanter Netzanlaufzeitkonstante  $T_N$  der unterbrochene Wirkleistungsfluss  $\Delta P_{\text{Netz}}$  erhöht. Im gleichen Maß wurde der Anteil von LFSM-U erhöht, um den höheren unterbrochenen Wirkleistungsfluss kompensieren zu können. Die zweite Untersuchung zeigt die Effekte eines steigenden Ausbaus an LFSM-U-Lasten im Netz. Dazu wurde bei konstantem  $T_N$  und konstantem  $\Delta P_{\text{Netz}}$  der Anteil von LFSM-U erhöht. Anschließend wurden die LFSM-U-Lasten nur auf dem unteren bzw. nur auf dem oberen Frequenzband konzentriert, um die Robustheit des Ansatzes zu testen, sollte es zu einer Abweichung von der in Kapitel 4.3.1 gezeigten Gleichverteilung der Lasten kommen. Die genutzten Verzögerungszeiten sind grob orientiert an den Vorschriften für Frequenzmessungen (siehe Kapitel 4) für Netzsicherheitsmechanismen. Bei der Umsetzung ist eine Abweichung von diesen Verzögerungszeiten vorstellbar, insbesondere durch hinzukommende Zeitdauer für den Schaltvorgang. Deswegen wurden in der dritten Untersuchung die Verzögerungszeiten bei ansonsten gleichen Bedingungen erhöht, um Auswirkungen auf das Einschwingverhalten zu untersuchen. In der letzten Untersuchung wird der Kapitel 4.4 aufgeführte Ansatz zum Wiedereinschalten der LFSM-U-Lasten untersucht. Dafür wird eine im Fachgebiet verwendete Variante einer Sekundärregelung für eine einzelne Regelzone eingesetzt, um die Frequenz nach dem Einsetzen von LFSM-U wieder zurückzuführen.

# 4. Gegenstand der Untersuchung

## 4.1 Betrachtete Erzeugungseinheiten

Die in der Arbeit verwendeten Erzeugungseinheiten sind virtuelle Synchronmaschinen (VSM) wie sie in [Hei+22] beschrieben werden. Für diese Arbeit wurden vom Fachbereich Änderungen am Modell vorgenommen um bestimmte Anforderungen (Spannungsstabilität, UFLA, LFSM-U, Sekundärregelung) zu erfüllen. Diese sind in Kapitel 5.3 beschrieben.

## 4.2 Regelbare Lasten

Regelbare Lasten sind solche, die über eine Leistungselektronik ans Stromnetz gekoppelt sind. Zusätzliche müssen die Geräte, die dieser Kategorie zugewiesen werden, in der Lage sein, die Leistungsaufnahme stufenlos zu reduzieren. Die Leistungselektronik solcher Lasten soll für lastseitiges LFSM-U die Leistungsaufnahme im gesamten Frequenzbereich (49,8-49,2 Hz) linear reduzieren. Ein ähnliches lineares  $P(f)$ -Verhalten soll bei den schaltenden Lasten (Kapitel 4.3) insgesamt wirken.

## 4.3 Schaltende Lasten

Nachfolgend werden die Verbraucher dargestellt, die ihre Leistung in Stufen oder nur als Ganzes schalten können und von einer Frequenzmessung abhängig sind. Es soll gezeigt werden, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Leistungsreduktion aller betrachteten schaltenden Lasten näherungsweise als eine lineare  $P(f)$ -Funktion dargestellt werden kann. Zur Veranschaulichung werden die Verbraucher dafür in die in Tabelle 2 dargestellten Leistungsbereiche eingeteilt.

Leistungsbereiche
10 W - 100 W
100 W - 1 kW
1 kW - 10 kW
10 kW - 100 kW
100 kW - 1 MW
> 1 MW

Tabelle 2: Leistungsbereiche schaltender Lasten

Jeder Verbraucher wird, entsprechend der Entbehrlichkeit, einem Frequenzband unterhalb von 49,8 Hz zugewiesen. Sobald die Leistung eines Geräts eingeschaltet wird, legt die Steuerung des Geräts oder eine externe Steuerung mittels Zufallsvariable eine Frequenz innerhalb des Frequenzbandes fest. Wird im Zuge eines

Frequenzabfalls diese Frequenz erreicht, wird die Leistung des Geräts ganz oder teilweise abgeschaltet. Kann die Leistung eines Geräts in mehreren Stufen reduziert werden, werden entsprechend viele Frequenzen zugeordnet, die auch auf mehreren Frequenzbändern liegen können. Zunächst wird in Kapitel 4.3.1 beschrieben, wie sich viele Geräte auf einem Frequenzband verteilen. Diese Verteilung wird in Kapitel 4.3.2 verwendet, um anhand eines gewählten Leistungsbereichs zu zeigen wie das  $P(f)$ -Verhalten vieler Geräte in einem Leistungsbereich bis 1 MW dargestellt wird. In Kapitel 4.3.3 wird dargestellt, wie bei einem Gerät, dessen Leistung in mehreren Stufen geschaltet wird, die einzelnen Schaltstufen auf die Frequenzbänder verteilt werden. Im Kapitel 4.3.4 wird gezeigt, wie die Schaltstufen der Lasten mit einer Gesamtleistung  $> 1$  MW auf die Frequenzbänder verteilt werden können.

### 4.3.1 Verteilung auf einem Frequenzband

Die den Schaltvorgängen zugeordneten Frequenzen werden durch Zufallsgeneratoren ermittelt. Die Zufallsgeneratoren werden so gewählt, dass die ermittelten Zufallszahlen sowohl voneinander unabhängig als auch gleichverteilt über dem Frequenzband sind. Damit hat jeder Schaltvorgang die gleiche Wahrscheinlichkeit, auf einer beliebigen Frequenz im zugewiesenen Frequenzband zu liegen. Die hohe Anzahl an Schaltvorgängen führt zu einer gleichmäßigen Verteilung dieser Schaltvorgänge auf das Frequenzband.

### 4.3.2 Leistungsbereich mit vielen Geräten

Die Leistung jedes Schaltvorgangs kann sehr unterschiedlich ausfallen. Aufgrund der hohen Anzahl an Schaltvorgängen bei fortschreitender Frequenz hat jeder jeweils nur einen kleinen Anteil an der Gesamtleistung, die in einem Frequenzband geschaltet werden kann. Für das Folgende wird angenommen, dass man nicht allzu stark vereinfacht, wenn man schaltbare Lasten im Leistungsbereich 1...10 kW in Haushalten, Gewerbe, Industrie und öffentlichem Sektor zusammen durch eine zufällige Gleichverteilung (siehe Kapitel 4.3.1) von Leistungswerten im Bereich 1...10 kW abbildet. Nachfolgend sind die  $X_j$  unterschiedliche Wirkleistungen einzelner Schaltvorgänge im Bereich von 1...10kW und  $S_n$  die Wirkleistungs-Summe von  $n$  Schaltvorgängen (1).

$$S_n := \sum_{j=1}^n X_j \quad (1)$$

In der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie ist der Erwartungswert einer gleichmäßig verteilten Zufallsvariable der Mittelwert  $E(x) := \bar{X}$  [Tap13, S.39], [Kle20, S.112]. Der Mittelwert ergibt sich aus der Summe der Schaltvorgänge und

der Anzahl an Schaltvorgängen (2). Das Gesetz der Großen Zahlen besagt, dass bei einer Folge  $Y_n$  der arithmetische Mittelwert gegen den Erwartungswert  $E(x)$  konvergiert (3) [Tap13, S.245].

$$\bar{X} = \frac{S_n}{n} \quad (2)$$

$$Y_n := \frac{S_n}{n} \quad (3)$$

Mit steigender Anzahl an Zufallszahlen  $n$  stabilisiert sich  $Y_n$  immer mehr um  $\bar{X}$ . Bei fallender Frequenz steigt die Zahl an angesprochenen Lasten. Zu jeder Frequenz  $f_k$  ergibt sich eine theoretisch geschaltete Wirkleistung von:

$$P(f_k) = \bar{X} * n(f_k) \quad (4)$$

Die tatsächlich zu einer bestimmten Frequenz  $f_k$  geschaltete Leistung ergibt sich aus (3) und (1) wobei  $n = n(f_k)$  gilt. Nach dem Gesetz der Großen Zahlen gilt:

$$Y_n \underset{n \rightarrow \infty}{=} \bar{X} \quad (5)$$

Demzufolge gleichen sich der theoretische und der tatsächliche Wert der insgesamt geschalteten Leistungen bei ausreichend großer Zahl an Schaltvorgängen an. Für den Leistungsbereich von 1...10kW kann der P(f)-Verlauf für eine große Anzahl an Schaltvorgängen  $n$  somit in Form einer Rampe dargestellt werden, ohne dass dadurch zu stark vereinfacht wird. Auf gleiche Weise lassen sich auch die anderen, in Tabelle 2 beschriebenen Leistungsbereiche bis 1 MW abbilden, so dass sich für diese Leistungsbereiche ein ausreichendes lineares P(f)-Verhalten darstellen lässt. Damit ergibt sich auch die Summe dieser Leistungsbereiche zu einem linearen P(f)-Verhalten.

### 4.3.3 Realisierung mehrerer Schaltvorgänge pro Gerät/Anlage

Bei einigen Geräten kann oder muss die Leistung innerhalb eines Frequenzbandes in mehreren Stufen reduziert werden. Wird die Zuweisung der Abschaltfrequenzen nach dem im Folgenden beschriebenen Schema vorgenommen, ergibt sich mit vielen solchen Lasten eine gleichmäßige Verteilung der geschalteten Leistungen auf einem Frequenzband. Um mehrere Schaltvorgänge eines Geräts passend zur jeweils geschalteten Leistung zu verteilen, sollte die  $f$ -Variationsbreite, über die sich die zufällige Ermittlung erstreckt, je Schaltvorgang proportional zur zu schaltenden Leistung sein. Für die zufällige Wahl der Abschaltfrequenzen wird das Frequenzband im Verhältnis der zu schaltenden Wirkleistungen in  $f$ -Variationsbereiche unterteilt. Je Last bestimmt dann eine einzige Zufallszahl mit dem Wert  $x$  (wobei  $0 \leq x \leq 1$ ),

dass die Schaltfrequenzen jeweils am Punkt  $x$  des  $f$ -Variationsbereichs liegen. Das beschriebene Verhalten ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Gesamtlast des dargestell-

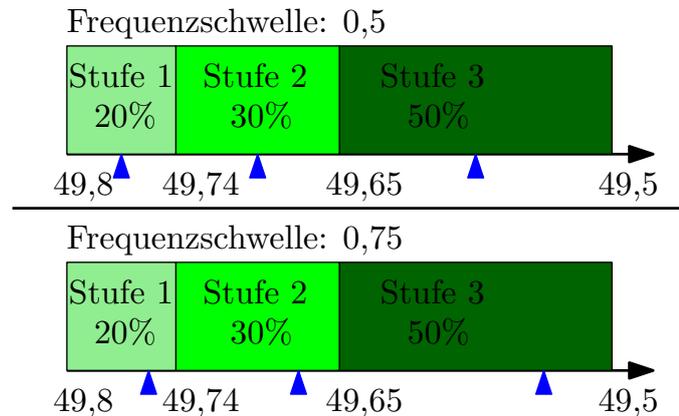


Abbildung 3: Beispiel Schaltstufen einer Last

ten Verbrauchers kann in 3 Stufen geschaltet werden. Die erste schaltet 20%, die zweite weitere 30% der Gesamtlast, und in der letzten Stufe werden die verbliebenen 50% geschaltet. Der Verbraucher wird dem Frequenzband 49,8-49,5 Hz zugewiesen. Jedem Schaltvorgang wird ein Teil des Frequenzbandes zugewiesen, der dem Anteil an der Gesamtleistung entspricht. Der Schaltvorgang liegt mit Zufallszahl 0,5 (Abbildung 3 oben) dementsprechend in der Mitte der jeweiligen Frequenzbereiche, mit Zufallszahl 0,75 (unten) bei 3/4 der jeweiligen Frequenzbereiche.

Schaltvorgang	Frequenzbereich	Beispiel-Schaltfrequenz mit Zufallszahl 0,5
Stufe 1 (20%)	49,8 Hz - 49,74 Hz	49,77 Hz
Stufe 2 (30%)	49,74 Hz - 49,65 Hz	49,695 Hz
Stufe 3 (50%)	49,65 Hz - 49,5 Hz	49,575 Hz

Tabelle 3: Beispiel für Frequenzschwellen schaltender Lasten mit mehreren Schaltstufen

In Tabelle 3 sind beispielhaft die Schaltstufen und die zugewiesenen Schaltfrequenzen einer Last mit drei Schaltstufen zu sehen, entsprechend Abbildung 3 oben. Die erste Spalte gibt die Schaltstufe und den Anteil dieser Schaltstufe an der Gesamtlast an. In der zweiten Spalte ist der jeweilige Frequenzbereich zu sehen. Die rechte Spalte zeigt beispielhaft die Abschaltfrequenz, wenn der Zufallsgenerator, der dem Verbraucher zugewiesen ist, die Zahl 0,5 ausgibt.

#### 4.3.4 Umgang mit großen Einzellasten

Im Folgenden werden einige sinnvoll erscheinende Vorgaben dargestellt, um ein möglichst unkritisches Verhalten großer schaltender Lasten zu erreichen. Auf die

Modellierung und die Simulationen in dieser Arbeit haben diese aber keine direkten Auswirkungen.

Lasten mit einer Leistung  $> 1$  MW müssen nach dem in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Prinzip ihre Gesamtleistung in mehreren Schritten reduzieren. Um mit geringstmöglicher Zahl an Schaltstufen eine möglichst gleichmäßige Verteilung zu erreichen, werden die Lasten noch in zwei weitere Kategorien unterteilt. Der Ansatz dabei ist, dass Schaltvorgänge  $> 1$  MW entweder unter 2 MW bleiben sollen oder je Last entsprechend Kapitel 4.3.3 auf  $f$ -Variationsbereiche von je max. 50 mHz verteilt werden; bei letzterem Vorgehen gibt es keine Wirkleistungsgrenze je Schaltvorgang. Das Folgende geht davon aus, dass mehrere Schaltvorgänge einer großen Last in einem Frequenzband von 0,3 Hz verteilt werden sollen, wobei jede Stufe typischerweise eine Leistungskapazität von 1-2 MW aufweist. Die Gesamtleistung dieser Schaltvorgänge wird über das gesamte Frequenzband, in diesem Fall 300 mHz, verteilt. Die einzelnen Schaltvorgänge werden wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben auf dem Frequenzband verteilt. Die einzelnen Schaltstufen der Anlage fügen sich in die relativ gleichmäßige Verteilung der Lasten über das Frequenzband und tragen dazu bei, dass das bisher beschriebene lineare  $P(f)$  aus Kapitel 4.3.2 näherungsweise bestehen bleibt. Nicht regelbare Lasten mit einer Gesamtleistung von  $> 10$  MW treten in einem Netz nur in geringer Stückzahl auf, können aufgrund der hohen Last und des Schaltverhaltens aber einen starken Einfluss auf die Frequenz haben. Diese großen Verbraucher sollen so gesteuert werden, dass die insgesamt abschaltbare Leistung jeder Last in Schaltvorgänge unterteilt wird, die einen Frequenzabstand von höchstens 50 mHz aufweisen. Von dem in Kapitel 4.3.3 beschriebenen Vorgehen für Geräte mit mehreren Schaltvorgängen soll hier eine Modifikation festgelegt werden, da der Einfluss einzelner Schaltvorgänge gegebenenfalls sehr groß ist: Statt einer Zufallszahl wird eine vom Netzbetreiber individuell mitgeteilte Zahl im gleichen Prozentbereich verwendet. Dies ermöglicht eine gezielte Steuerung und Positionierung der Schaltvorgänge im Frequenzband, was eine präzisere Handhabung der Lastverteilung zur Folge hat.

#### 4.3.5 Anzahl an Frequenzbändern

Im Folgenden seien obere Frequenzbänder jene, die nah an 50 Hz sind, und untere jene, die weiter entfernt sind. Für die Betriebsführung eines Stromnetzes ist es sinnvoll, wenn die Netzmechanismen ein klares Schema aufweisen; aus diesem Grund soll durch Verbraucher bereitgestelltes LFSM-U eine möglichst konstante Statik über den gesamten Wirkungsbereich (hier: 49,8 Hz-49,2 Hz) aufweisen, vgl. [VDE23]. Weiterhin soll der Ansatz aus [Sch19] berücksichtigt werden, dass Verbraucher entsprechend ihrer Entbehrlichkeit zu LFSM-U beitragen. Dort werden Lasten, je nach Entbehrlichkeit, auf 6 Frequenzbänder zu je 0,1 Hz aufgeteilt. Dabei kann

es, aufgrund ungleich verteilter Gesamtleistungen, zu einer ungleichmäßigen Statik kommen. Um den Aufwand für eine konstantere Statik gering zu halten, werden die Geräte in dem hier betrachteten Ansatz nur auf 2 Frequenzbänder von je 0,3 Hz aufgeteilt. Entbehrlichkeitsaspekte werden über die Zuordnung zu einem der beiden Frequenzbänder und über das Wiedereinschaltverhalten (Kapitel 4.4) berücksichtigt. Die Lasten werden nach ihrer Entbehrlichkeit kategorisiert und entsprechend zugeordnet: Lasten, die eine hohe Entbehrlichkeit aufweisen, werden typischerweise dem oberen Frequenzband (49,8-49,5 Hz) zugeordnet. Beispiele für leicht entbehrliche Lasten sind thermische Lasten da diese häufig eine ausreichend hohe Trägheit im Bezug auf den Energiebedarf haben.

#### **4.3.6 P(f)-Verhalten in der Simulation**

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie Lasten, deren Leistung nur durch einen Schaltvorgang reduziert werden kann, unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen und Voraussetzungen im Bezug auf die Eigenschaften, aggregiert dargestellt werden können. Dazu wurde durch die Verwendung von Zufallszahlen eine gleichmäßige Verteilung von Schaltvorgängen auf einem Frequenzband erreicht. Unter Berücksichtigung von stochastischen Methoden wurde dann gezeigt, dass sich die summierte Leistung der Schaltvorgänge in guter Näherung durch einen linearen P(f)-Verlauf darstellen lässt. Anschließend wurden Ansätze und Möglichkeiten für den Umgang mit sehr großen Einzellasten vorgestellt, so dass diese sich in den linearen P(f)-Verlauf gliedern. Zuletzt wurde aufgeführt, warum sich dafür entschieden wurde, die Lasten auf zwei Frequenzbänder zu verteilen.

### **4.4 Wiedereinschalten schaltender Lasten**

Der Abschaltvorgang der schaltenden Lasten wird in der Simulation, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, durch ein lineares P(f)-Verhalten dargestellt. Um beim Wiedereinschalten zusätzliche Stabilität zu gewährleisten, kommt eine zusätzliche zufällige Verzögerung zum Einsatz. In Kapitel 4.4.1 ist beschrieben, wie der Wiedereinschaltvorgang bei einer einzelnen Last realisiert wird. Anschließend wird in Kapitel 4.4.2 das theoretische Zusammenspiel aller schaltenden Lasten eines Frequenzbandes beim Wiedereinschalten beschrieben. Kapitel 5.4.1 zeigt, wie der Wiedereinschaltvorgang der schaltenden Lasten in der Simulation umgesetzt wird.

#### **4.4.1 Wiedereinschaltverhalten einzelner schaltender Lasten**

Die Verzögerung beim Wiedereinschalten soll zum einen entbehrlichkeitsabhängig sein, zum anderen sollen, je schneller die Frequenz nach dem Abschalten wieder

steigt, desto schneller auch die Geräte wieder einschalten. Beabsichtigt wird, dadurch Frequenzschwingungen beim Wiedereinschalten nach Möglichkeit zu vermeiden. Um das gewünschte Verhalten zu modellieren, wird jede schaltende Last, die zu LFSM-U beiträgt, mit einem Integrator – im folgenden 'Einzel-Integrator' – und einem zufälligen Wiedereinschaltwert (0...1) versehen. Bei fallender Frequenz ist die Frequenzschwelle, die Frequenz bei der ein Gerät abschaltet. Bei wieder ansteigender Frequenz wird ab Überschreiten derselben geräteindividuellen Frequenzschwelle die überschreitende Frequenzdifferenz über die Zeit aufintegriert. Erreicht der Integratorausgang den geräteindividuell festgelegten Wiedereinschaltwert, wird das Gerät wieder eingeschaltet. Der Wertebereich, aus dem der Wiedereinschaltwert zufällig bestimmt wird, kann dabei aus der Entbehrlichkeit des Geräts abgeleitet werden. Ein Wiedereinschaltwert nahe 0 führt dazu, dass ein Gerät schneller wieder eingeschaltet wird (geringe Entbehrlichkeit), ein Wiedereinschaltwert nahe 1 führt dazu, dass ein Gerät später wieder eingeschaltet wird (hohe Entbehrlichkeit).

#### **4.4.2 Wiedereinschaltverhalten vieler schaltender Lasten**

Die Abschaltfrequenzen aller LFSM-U-Geräte sind im betrachteten Frequenzband gleichverteilt; Gleiches gilt näherungsweise für die abgeschalteten Leistungen wie in Kapitel 4.3 beschrieben. Aufgrund der hohen Anzahl an betrachteten Geräten kann vereinfacht angenommen werden, dass ein beliebiges Gerät bei einem Integratorausgang von 0,5 schaltet. Beim Erreichen der ersten Abschaltfrequenz des betrachteten Frequenzbandes beginnt der erste Integrator zu integrieren. Je mehr Abschaltfrequenzen bei positiver Frequenzentwicklung erreicht werden, desto mehr Integratoren beginnen zu integrieren. Aus diesem Grund ist bei einer konstanten oder beschleunigten positiven Frequenzentwicklung mit einem beschleunigenden Zuschalten der Geräte zu rechnen. Im  $P(f)$ -Verhalten lässt sich das durch eine Funktion mit zunehmenden Anstieg beschreiben. Bei verringerter RoCoF in positiver Richtung werden die Geräte immer langsamer aktiviert, da die Eingangssignale der Einzel-Integratoren in den LFSM-U-Geräten immer kleiner werden. Dies hat eine Abnahme des Anstiegs im  $P(f)$ -Verhalten zur Folge.

# 5. Bestandteile der Modellierung

Das Modell, welches für die Simulationen genutzt wurde, wurde in Matlab/Simulink<sup>1</sup> erstellt. Simulink ist eine Blockdiagrammumgebung zur Simulation von technischen Modellen. Neben der Standardbibliothek steht eine Vielzahl von Bibliotheken mit vorgefertigten Blöcken für unterschiedliche Anwendungen zur Verfügung. Bei der Erstellung des Modells wurden bei elektrischen Signalen Blöcke aus der "Matlab/Simulink/Simscape-Electrical" Bibliothek verwendet. Das Modell basiert auf den Daten des IEEE 14-Knoten-Netz aus [Mil10]. Die Untersuchungen zeigen das Frequenzverhalten bei einer ungeplanten Unterversorgung in einem Stromnetz nach der Trennung vom Verbundnetz. Dazu wurde der Anschluss des IEEE 14-Knoten-Netzes an das übergeordnete Netz als konstante Spannungsquelle modelliert, welche im stabilen Netzzustand vom betrachteten Netz getrennt wird. Alle hier interessierenden Fälle werden so parametrisiert, dass durch die Trennung ein Wirkleistungsfluss ins betrachtete Netz unterbrochen wird. Der spezifische Aufbau des Netzes ist in 5.1 beschrieben. Jede Synchronmaschine wurde in dem Modell durch eine virtuelle Synchronmaschine (VSM) ersetzt; das Modell der VSM wird in Kapitel 5.3 beschrieben. Für die Lasten wurde ein Modell erstellt, welches das aggregierte Verhalten aller an einem Knotenpunkt angeschlossenen Lasten darstellt.

## 5.1 Netzplan

Als Datengrundlage für den in der Simulation genutzten Netzabschnitt dient das IEEE-14-Knoten-Netz aus [Mil10, S.27]. Die Frequenz des gesamten Systems wurde von 60 Hz auf 50 Hz gesetzt. Die Daten mussten für die Einbindung in Simulink zum Teil umgerechnet werden, da die Simulink-Blöcke mit anderen Werten arbeiten als in Milano angegeben. Teilweise ist das nur die Umrechnung von p.u.-Größen in physikalische Größen. Bei den Transformatoren muss gerade beim Übersetzungsverhältnis mehr umgerechnet werden. Dies ist für die jeweiligen Geräte in den folgenden Kapiteln beschrieben. Abbildung 4 zeigt den Netzaufbau der Simulink-Simulation. Der abgebildete Netzplan umfasst 5 virtuelle Synchronmaschinen (VSM), 3 Transformatoren, 12 Leitungen, 11 Lasten mit einer Gesamtlast von 259 MW, eine Kondensatorbank (Bus 9), eine konstante Spannungsquelle und einen Schalter, der die Spannungsquelle mit dem Knoten 1 verbindet. Der obere Teil des Netzes hat eine Nennspannung von 13,8 kV, der untere Bereich 69 kV und der Bus 8 18 kV. Damit entspricht das Netz im Wesentlichen den Vorgaben aus Milano [Mil10, S.27]. Die VSMs ersetzen die Synchronmaschinen. Die Synchronmaschinen an den Bussen 2, 6 und 8 sind im IEEE 14-Knoten Netz Phasenschieber; diese wurden in der

---

<sup>1</sup><https://mathworks.com/products/simulink.html>

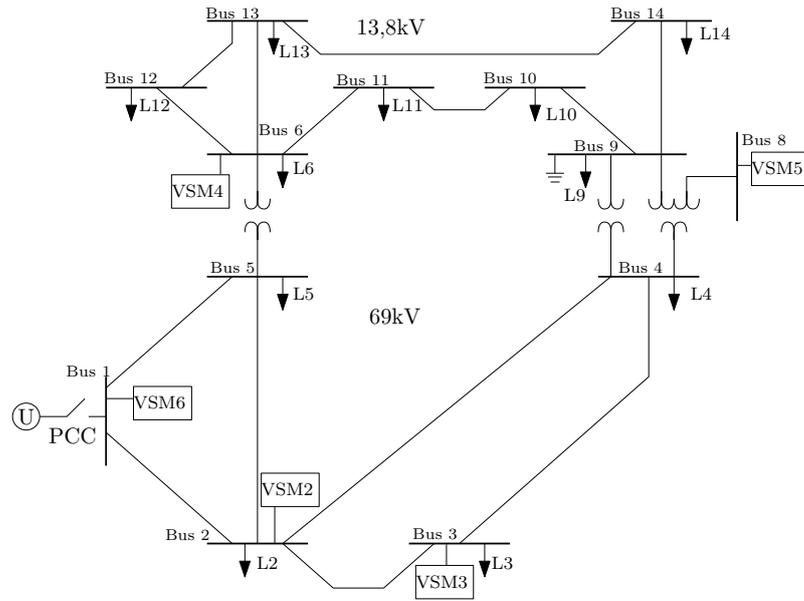


Abbildung 4: Netzplan Matlab

Simulink-Simulation abweichend parametrisiert, um weiteres Verhalten zu abbilden. Die VSM3 und VSM4 wurden als Last-VSMs parametrisiert, dazu wurde die Hälfte der Wirkleistung der Lasten an den jeweiligen Bussen den VSMs zugeschrieben. Die VSM5 am Bus 8 hat einen Setpoint von 0 und speist infolge dessen weder Leistung ein noch wird Leistung aus dem Netz bezogen und dient dementsprechend nur zur Bereitstellung von Momentanreserve. Die konstante Spannungsquelle, die mit dem Schalter an Knoten 1 angeschlossen ist, simuliert den Anschluss an ein übergeordnetes Netz. Bei den Simulationen wird das betrachtete Netz durch Öffnen des Schalters vom übergeordneten Netz getrennt. Über die Einspeiseleistung der VSM6 wird das nach der Trennung im Netz herrschende Leistungsungleichgewicht festgelegt. Aus diesem Grund entspricht die Parametrisierung der VSM6 auch nicht der aus Milano, sondern wird für den jeweils zu untersuchenden Fall angepasst. In dem in Abbildung 4 dargestellten Netz ist der Bus 7 nicht zu sehen. Das liegt daran, dass dieser in der Vorlage im Inneren des 3-Wicklungs-Transformators liegt. Aus diesem Grund beschreibt Milano das IEEE 14-Knoten-Netz als ein 13+1 Knoten-Netz. Das hier vorliegende Netz ist wieder als 14-Knoten-Netz zu verstehen, da die Spannungsquelle und der Schalter an Bus 1 hinzugefügt wurden. Nachfolgend werden die einzelnen Netzkomponenten beschrieben.

## 5.2 Passive Komponenten

Die folgenden Komponenten sind Verbindungselemente zwischen den Bussen. Die Blöcke werden mit festen, für Komponenten relevanten Werten parametrisiert, die zwischen den einzelnen Untersuchungen nicht geändert werden.

### 5.2.1 Leitungen

Die Leitungen wurden mit dem 'Transmission Line (Three-Phase)' Block aus der Simscape/electrical Bibliothek simuliert. Im IEEE-14-Knoten Netz sind für die Leitungen p.u.-Werte für den Wirkwiderstand, die Induktivität und beim 69 kV-Netz auch für die Betriebskapazität gegeben. Der verwendete Simulink-Block benötigt Werte für eine Leiter-Leiter (Kopplungskapazität) und für eine Leiter-Erde Kapazität (Erdkapazität). Für das 13,8 kV-Netz sind keine Kapazitäten gegeben und es konnten auch keine Leitungen bestimmt werden, die vergleichbare Leitungsbeläge aufweisen, aus diesem Grund wurden hier ersatzweise sehr kleine Werte verwendet. Im 69 kV-Netz sind Betriebskapazitäten gegeben; diese wurden entsprechend [Cra15, S.187 ff.] umgerechnet. Demnach gilt für ein Mehrleitersystem allgemein:

$$C'_1 = C'_0 + mC'_k \quad (6)$$

mit der Betriebskapazität  $C_1$ , der Erdkapazität  $C_0$ , der Koppelkapazität  $C_k$  und der Anzahl der Leiter  $m$ . Für ein 3-Phasen-System ( $m = 3$ ) ergibt sich mit (6)  $C'_1 = C'_0 + 3C'_k$ . Der Simulink-Block wird über die Erdkapazität und die Koppelkapazität parametrisiert, innerhalb des Modells wird aus diesen die Betriebskapazität berechnet. Da für die Erdkapazität und die Koppelkapazität keine Werte gegeben sind und für die Parametrisierung relevant ist, dass Betriebskapazität  $C_1$  in Simulink mit der Betriebskapazität  $C_{\text{Milano}}$  übereinstimmt, wurden für die Erdkapazität und die Koppelkapazität die Werte  $C_0 = C_{\text{Milano}} * 0,4$  und  $C_k = C_{\text{Milano}} * 0,2$  gewählt. Damit ergibt sich für das 3-Phasen-System:  $C_1 = C_{\text{Milano}} * 0,4 + 3 * C_{\text{Milano}} * 0,2 = C_{\text{Milano}}$ .

### 5.2.2 Transformatoren

In dem Netzmodell werden zwei 2-Wicklungs- und ein 3-Wicklungs-Transformator verwendet. Die Schaltvarianten der Transformatoren sind in Milano nicht weiter angegeben. Allerdings werden Dreieck-Dreieck-Transformatoren nicht oft verwendet, und in Kombination mit einer Sternschaltung führt eine Dreieckverschaltung immer zu einer Phasenverschiebung. Da im Milano keine Phasenverschiebung erwähnt wird, wird eine Stern-Sternschaltung angenommen [Cra15, S. 133 ff.]. Die Nennleistung der Transformatoren ist  $P_{\text{Base}}$  (100MVA) [Mil10, S.523]. Mit  $m$  'tap ratio' wird aus dem theoretischen Spannungsverhältnis das Spannungsverhältnis nach Milano bestimmt. Sekundärseitig werden für die Spannungen die Nennwerte (13,8 kV und 18 kV) angenommen. Die Spannung auf den Primärseiten für einen Transformator zwischen den Knoten  $x$  und  $y$  wird aus 'tap ratio'  $m$  und der Nennspannung auf der Primärseite  $U_{\text{Prim}}$  über  $U_{\text{Prim},x-y} = U_{\text{Prim,nen}} \cdot m$  ermittelt. Beispiel: Bei dem Transformator zwischen den Knoten 5 und 6 ist  $U_{\text{Prim,nen}} = 69 \text{ kV}$  und  $m_{5-6} = 0,932$  damit ist  $U_{\text{Prim},5-6} = 69 \text{ kV} \cdot 0,932 = 64,308 \text{ kV}$ .

”Die Annahme gleicher Primär- und Sekundärimpedanzen trifft in der Praxis oft zu” [Cra15, S137]. Deswegen werden die Impedanzen in p.u. zu gleichen Teilen auf die Primär und Sekundärseite aufgeteilt. Die Berechnung der Induktivitäten erfolgt mit den Unterspannungen (13,8 kV und 18 kV) und dem Verhältnis der Widerstände unter Berücksichtigung des Spannungsverhältnisses das sich aus  $m$  ergibt. In den Simulink-Modellen der Transformatoren wird zur Berücksichtigung der Reaktanzen ’leakage reactance’ eingeschaltet. Die Reaktanzen der Sekundärseite haben den Wert  $X_{\text{Sek}} = 0.5 * X_{\text{Milano}}$ , bei der Primärseite wird  $X_{\text{Base}}$  bei Nennspannung durch anzeigen der ’base values’ des Transformators ermittelt und  $X_{\text{Base,neu}}$  (base values) unter Berücksichtigung des zuvor ermittelten Spannungsverhältnisses. Aus

$$X_{\text{Pr}} = 0.5 * X_{\text{Milano}} * \frac{X_{\text{Base}}}{X_{\text{Base,neu}}} \quad (7)$$

wird die Reaktanz auf der Primärseite bestimmt. Der 3-Wicklungs-Transformator wird, anders als im 14-Knoten-Netz, nicht aus zwei 2-Wicklungs-Transformatoren konstruiert, sondern es wird das Simulink Modell des 3-Wicklungs Transformators verwendet. An dem Transformator liegen die Nennspannungen 13,8 kV, 18 kV und 69 kV an. Für ’leakage reactance’ an der Sekundärseite wird, wie bei den 2-Wicklungs-Transformatoren verfahren, an der Seite 18 kV wird der Reaktanz-Wert der zwischen den Knoten 7-8 angegeben ist verwendet und bei 69 kV wird wie bei den Oberspannungen der 2-Wicklungs Transformatoren verfahren, nur dass nicht der halbe Wert genommen wird sondern der Wert zwischen den Knoten 7-9 aus Milano.

### 5.3 Verwendetes VSM Modell

Das für die Simulation verwendete Modell der VSM wurde vom Fachbereich zur Verfügung gestellt und basiert auf dem Modell, welches in [Hei+22] verwendet wurde. Zusätzlich wurden vom Fachbereich Änderungen vorgenommen, die für die Untersuchungen benötigt wurden, insbesondere die rein auf Frequenzabweichung basierende Sekundärregelung und eine Primärregelung. Die VSMs werden in Simulink mit einem ’referenced Submodel’ dargestellt, die über ein Array parametrisiert werden. Jeder VSM-Instanz des Submodels wird über den ’instance parameter’ eine Spalte des Parameter-Arrays zugeordnet. Dadurch kann jede VSM individuell parametrisiert werden, ohne dass viele einzelne Variablen benötigt werden. Die Synchronmaschinen werden von Milano über die Scheinnennleistung  $S_n$  beschrieben. Das verwendete VSM Modell wird über die Wirknennleistung  $P_n$  parametrisiert. Der Zusammenhang zwischen Schein- und Wirkleistung wird über den Kosinus des Phasenverschiebungswinkels mit  $\cos(\phi) = S_n/P_n$  beschrieben. Da in dem Buch von Milano keine Angaben zu den  $\cos(\phi)$  gemacht werden, wurde zur Bestimmung der Wirkleistung VSMs

$\cos(\phi) = 0,8$  angenommen. <sup>2</sup> Die  $T_A$ -Werte der VSMs wurden für die jeweils untersuchte Situation angepasst.

## 5.4 Lasten

Die Lasten stellen im Simulink-Modell je Hoch- bzw. Mittelspannungs-Netzknoten das aggregierte Wirken des untergeordneten Netzes dar, welches nicht explizit abgebildet wird. Für jede dieser aggregierten Lasten wird der Simulink-Block 'Wye-Connected Variable Load (lagging)<sup>3</sup>' verwendet, dessen Leistungswert bei Nennspannung per Steuereingang vorgegeben wird. Jedem Block werden über ein 'referenced Submodel' und ein 'instance parameter', wie bei den VSMs, Wirk- und Blindleistungswerte zugeordnet, die der jeweiligen Last entsprechen. Der Wirkleistungswert ergibt sich aus dem in Abbildung 5 dargestellten Schema.

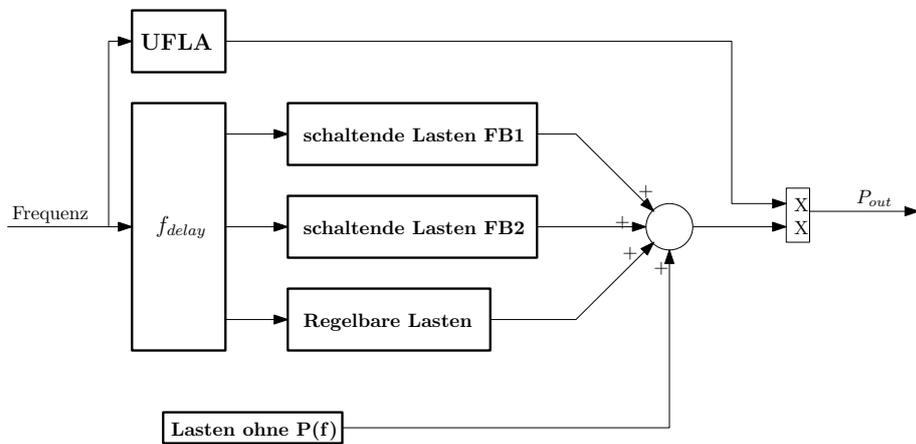


Abbildung 5: Ermittlung Leistungssignal Simulink

Der Wirkleistungswert setzt sich (ohne Unterfrequenzlastabwürfe) aus den vier Teilen 'schaltende Lasten Frequenzband 1', 'schaltende Lasten Frequenzband 2', 'regelbare Lasten' und 'Lasten ohne P(f)' zusammen. Schaltende Lasten sind die in Kapitel 4.3 aufgeführten Lasten, 'regelbare Lasten' werden in Kapitel 4.2 beschrieben und 'Lasten ohne P(f)' sind solche Lasten deren Leistung nicht durch eine Frequenzänderung beeinflusst wird. Die Blöcke 'schaltende Lasten Frequenzband 1', 'schaltende Lasten Frequenzband 2' und 'regelbare Lasten' sollen das P(f)-Verhalten für LFSM-U darstellen. Jeder Block in Abbildung 5 repräsentiert ein Submodell, welches das aggregierte Verhalten aller Lasten, die in die jeweilige Kategorie fallen, darstellt. Die Summe der Anteile entspricht bei Nennspannung für jeden Knoten den Werten aus dem IEEE 14-Knoten-Netz. Zwischen dem Erreichen einer Frequenz und der Leistungsänderung durch LFSM-U bei den Lasten wurden Verzögerungszeiten

<sup>2</sup>Dabei handelt es sich um einen Erfahrungswert innerhalb der Arbeitsgruppe an der Universität Kassel.

<sup>3</sup><https://de.mathworks.com/help/sps/ref/wyeconnectedvariableloadlagging.html>

eingebaut, welche die Verzögerungen, die durch Frequenzmessung und Abschaltvorgang auftreten, darstellen. Die Umsetzung findet im Block  $f_{\text{delay}}$  statt und wird in Kapitel 5.4.3 beschrieben. Das verzögerte Frequenzsignal dient zur Bestimmung der Leistungswerte der schaltenden und regelbaren Lasten, deren Umsetzung in Kapitel 5.4.1 und Kapitel 5.4.2 beschrieben ist. Das Gesamtwirkleistungssignal wird noch mit einem Faktor  $\leq 1$  für die Unterfrequenzlastabwürfe multipliziert, wodurch eine Reduzierung der Leistung simuliert wird. Die Simulation ist so designt, dass jede aggregierte Last zwei UFLA-Stufen bedienen kann; die Funktionsweise ist im Detail in Kapitel 5.5 beschrieben.

#### 5.4.1 Schaltende Lasten im Modell

Um viele einzelne Lasten in dem Modell darzustellen, soll das in Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4.2 beschriebene Verhalten mit Hilfe möglichst weniger Elemente dargestellt werden. Dafür erhält jede aggregierte Last für jedes Frequenzband  $\Delta f_{\text{FB}}$  einen Integrator, im Folgenden Gesamt-Integrator genannt, dessen Ausgangssignal möglichst nah an den in Kapitel 4.4.2 dargestellten Eigenschaften sein soll.

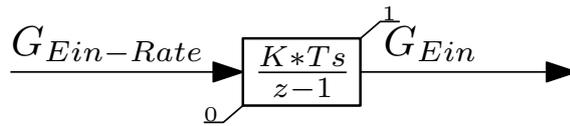


Abbildung 6: Gesamt-Integrator Wiedereinschalten

In Abbildung 6 ist der Gesamt-Integrator dargestellt. Das Ausgangssignal  $G_{\text{Ein}}$  gibt bei fallender, steigender oder stagnierender Frequenz an, welcher Anteil der schaltenden LFSM-U-Lasten momentan eingeschaltet sind. Zu diesem Zweck ist  $G_{\text{Ein}}$  in dem Bereich  $(0..1)$  begrenzt. Bei fallender Frequenz wird der Gesamt-Integrator mit einem Reset überbrückt und das Ausgangssignal  $G_{\text{Ein}}$  entspricht dem normierten Frequenzsignal  $f_{\text{norm}(0..1)}$  (siehe Abbildung 9). Das Signal beschreibt, wie hoch der Anteil an Einzellasten auf einem Frequenzband ist, deren gemessene Frequenz noch oder wieder oberhalb ihrer jeweils individuellen Frequenzschwelle liegt. Alles Folgende bezieht sich auf das Wiedereinschaltverhalten. Das Eingangssignal  $\text{Ein} - \text{Rate}$  des Gesamt-Integrators macht eine Momentaussage über die Wiedereinschaltrate der ausgeschalteten Einzel-Integratoren. Das normierte Signal hat die gedachte Einheit  $1/s$  und kann einen Wert  $> 1$  annehmen. Um zu erreichen, dass der Gesamt-Integrator das Wiedereinschaltverhalten der Einzel-Integratoren widerspiegelt (wobei Zufälligkeiten durch Gleichverteilung ersetzt werden), wird das Eingangssignal bei ansteigender Frequenz wie im Folgenden beschrieben aufbereitet. Das genormte Frequenzsignal  $f_{\text{norm}}$  beschreibt die Frequenzdifferenz zwischen dem untersten Ende des Frequenzbandes und der aktuellen Netzfrequenz, wobei ein Wert 0 das unte-

re Ende und 1 das obere Ende des Frequenzbandes markiert. Einzel-Integratoren, die bereits eingeschaltet haben, sollen nicht betrachtet werden, deswegen wird das Ausgangssignal des Gesamt-Integrators  $G_{\text{Ein}}$  von  $f_{\text{norm}}$  abgezogen. Das Signal, das aus  $f_{\text{norm}} - G_{\text{Ein}}$  entsteht, beschreibt entsprechend die Frequenzdifferenz des untersten Einzel-Integrators, der noch nicht eingeschaltet ist, zur Netzfrequenz und ist damit auch ein Indikator für die Wiedereinschaltrate gleich parametrierter Einzel-Integratoren. Um alle Einzel-Integratoren zu berücksichtigen, deren Frequenzschwelle erreicht ist und die noch nicht geschaltet haben, muss dieses Signal weiter modifiziert werden. Das komplette Schema ist nachfolgend dargestellt.

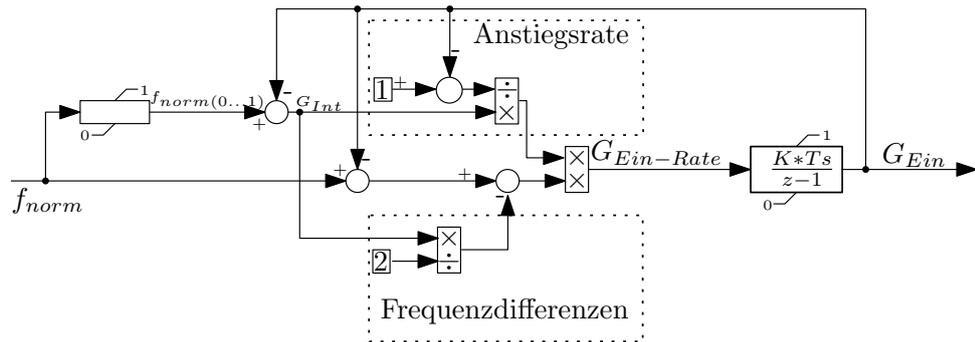


Abbildung 7: Wiedereinschaltenschema schaltender Lasten

Abbildung 7 zeigt das komplette Wiedereinschaltenschema der schaltenden Lasten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Frequenzdifferenzen und Anstiegsraten der Einzel-Integratoren. Alle beteiligten LFSM-U-Geräte können in drei Gruppen eingeteilt werden.

Gruppe	Beschreibung
$G_{\text{Ein}}$	Bereits eingeschaltet
$G_{\text{Int}}$	Einzel-Integrator aktiv, Last ausgeschaltet
$G_{\text{Aus}}$	Einzel-Integrator inaktiv, Last ausgeschaltet

Tabelle 4: Übersicht der schaltenden Lasten beim Wiedereinschalten

Tabelle 4 zeigt die Einteilung der LFSM-U-Geräte nach einer Frequenzänderung  $\Delta f$ . Die erste Spalte zeigt die Abkürzung, die der jeweiligen Gruppe zugeordnet ist, und die zweite Spalte beschreibt, wie sich die Geräte nach  $\Delta f$  verhalten. Die Summe der Anteile aus allen Gruppen ergibt sich immer zu 100%. Der zu 1 verbleibende Teil jedes Anteils gibt also die Anteile der anderen beiden Gruppen an. Das aus  $f_{\text{norm}}$  gebildete genormte und zwischen  $(0..1)$  begrenzte Frequenzsignal  $f_{\text{norm}(0,1)}$  gibt den Anteil der Einzel-Integratoren an, die bei der aktuellen Frequenz die Frequenzschwelle erreicht haben. Dieser Anteil ist gleichzusetzen mit  $G_{\text{Ein}} + G_{\text{Int}}$ :

$$G_{\text{Int}} = f_{\text{norm}(0..1)} - G_{\text{Ein}} \quad (8)$$

In Gleichung (8) wird das Ausgangssignal  $G_{\text{Ein}}$  des Integrators vom normierten und begrenzten Frequenzsignal abgezogen und man erhält demzufolge die Geräte der Gruppe  $G_{\text{Int}}$ . Um das Signal  $G_{\text{Ein-Rate}}$  korrekt zu erzeugen, müssen zum einen die Anstiegsraten aller Einzel-Integratoren und zum anderen die aus den unterschiedlichen Frequenzschwellen resultierenden Frequenzdifferenzen der Einzel-Integratoren berücksichtigt werden. Die Anstiegsrate aller Einzel-Integratoren zusammen kann als Anstiegsrate des Mittelwerts der Ausgangssignale aller Einzel-Integratoren verstanden werden und ist ein Indikator dafür, wie schnell die noch nicht wieder eingeschalteten Geräte den individuellen Wiedereinschaltwert erreichen. Ist die Anstiegsrate gering, sind nur wenige der Einzel-Integratoren aktiv (entsprechend  $G_{\text{Int}}$ ) und pro Zeiteinheit schalten nur wenige der LFSM-U-Geräte. Eine hohe Anstiegsrate bedeutet viele LFSM-U-Geräte schalten ein. Die Anstiegsrate wird durch den "Anstiegsraten-Faktor" (ArF) mit einem Wertebereich von (0...1) berücksichtigt.

$$\text{ArF} = \frac{f_{\text{norm}(0...1)} - G_{\text{Ein}}}{1 - G_{\text{Ein}}} \quad (9)$$

Die Funktion (9) zeigt wie der Anstiegsraten-Faktor gebildet wird. Der Zähler stellt die Geräte  $G_{\text{Int}}$  aus (8) und der Nenner die Geräte aus den  $G_{\text{Int}}$  und  $G_{\text{Aus}}$  dar. Damit beschreibt der Faktor den Anteil der ausgeschalteten Geräte, die seit der letzten Frequenzänderung angefangen haben zu integrieren. Aus (8) und (9) ergibt sich:

$$\text{ArF} = \frac{G_{\text{Int}}}{1 - G_{\text{Ein}}} \quad (10)$$

Die Frequenzdifferenz  $\Delta f$ , die an einem Einzel-Integrator anliegt, ergibt sich aus der Frequenzschwelle des LFSM-U-Geräts und der aktuellen Netzfrequenz. An einem Einzel-Integrator-Gerät, dessen Schaltfrequenz nur knapp unter der aktuellen Frequenz liegt, liegt ein kleineres  $\Delta f$  an als an einem Einzel-Integrator dessen Schaltfrequenz weiter unterhalb der aktuellen Netzfrequenz ist. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Frequenzdifferenzen  $\Delta f$  müssen zwei unterschiedliche Fälle beachtet werden.

In Abbildung 8 sind die Frequenzschwellen der schaltenden Lasten im Frequenzband (49,8 Hz-49,5 Hz) und die beiden zu beachtenden Fälle abgebildet. Bei einer Frequenzänderung innerhalb des Frequenzbandes ( $f_1 \rightarrow f_2$ , Abbildung 8 links), entspricht die vom Netz kommende Frequenzänderung dem  $\Delta f_1$  des ersten Integrators, der bei dieser Frequenzänderung schaltet. Über das Frequenzband und damit auch über jeden Teil des Frequenzbandes sind die Schaltfrequenzen wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben gleichmäßig verteilt. Die mittlere Frequenzdifferenz  $\Delta f_2$  aller Einzel-Integratoren, die bei einer Frequenzänderung im Netz anfangen zu integrieren, ist demzufolge halb so groß wie die Frequenzänderung im Netz. Anteile einer

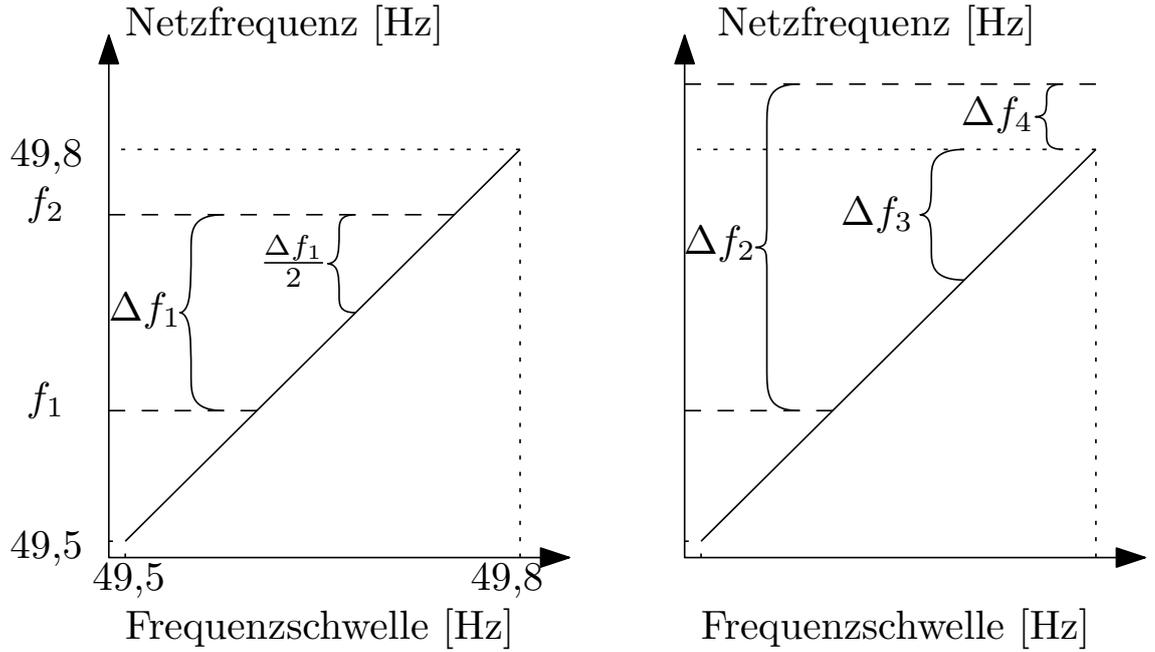


Abbildung 8: Frequenzdifferenzen Wiedereinschalten

Frequenzänderung, die über das Frequenzband hinaus gehen (Abbildung 8 rechts), wirken auf alle aktiven Integratoren gleich und werden entsprechend nicht reduziert ( $\Delta f_3$ ). Zur Berücksichtigung der Frequenzdifferenzen wird ein 'Frequenzdifferenz Korrekturfaktor' (FdK) eingeführt.

$$\text{FdK} = \frac{f_{\text{norm}(0\dots1)} - G_{\text{Ein}}}{2} \quad (11)$$

Gleichung (12) zeigt, wie mit den unterschiedlichen Frequenzdifferenzen umgegangen wird. Unter Berücksichtigung von (8) ergibt sich:

$$\text{FdK} = \frac{G_{\text{Int}}}{2} \quad (12)$$

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Frequenzdifferenzen wird der Wert von FdK von der Frequenzdifferenz des untersten Einzel-Integrators ( $f_{\text{norm}} - G_{\text{Ein}}$ ) abgezogen. Das resultierende Signal beschreibt die mittlere Frequenzdifferenz aller tatsächlich integrierenden Einzel-Integratoren. Der Faktor ArF berücksichtigt nachgelagert, wie viele der verfügbaren Einzel-Integratoren gerade integrieren. Wird das Signal der mittleren Frequenzdifferenz mit dem Faktor ArF multipliziert, erhält man die Einschalttrate aller Einzel-Integratoren  $G_{\text{Ein-Rate}}$  (Siehe: Abbildung 7).

Abbildung 9 zeigt wie das Verhalten der schaltenden Lasten in Simulink umgesetzt wird. Der Integrator aus Abbildung 7 wird über einen Reset überbrückt, damit bei fallender Frequenz das normierte Frequenzsignal direkt das Ausgangssignal des

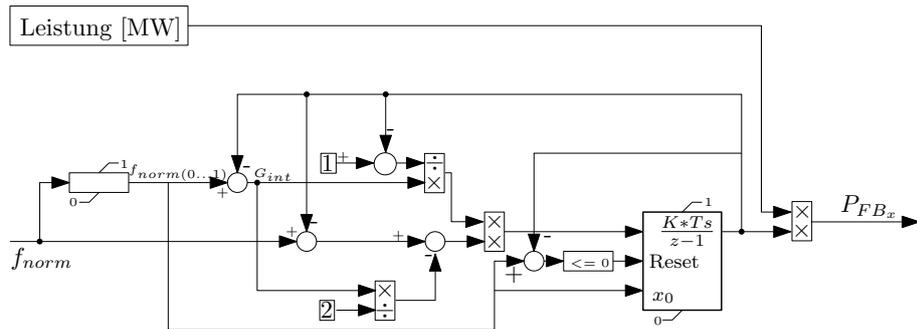


Abbildung 9: Schema schaltende Lasten

Integrators bestimmt. Der Reset ist aktiv solange das Ausgangssignal des Integrators höher ist als das Eingangssignal. Der Wert des Ausgangssignals ist ein Wert mit dem Wertebereich (0...1) und gibt an, wie viele der an dem jeweiligen Knoten angeschlossenen schaltenden Lasten eingeschaltet sind. Das Ausgangssignal wird anschließend mit dem Leistungswert der an dem Knoten angeschlossenen schaltenden Lasten des jeweiligen Frequenzbandes multipliziert und entsprechend Abbildung 5 mit den anderen Leistungswerten zu einem Gesamtleistungswert der aggregierten Last addiert.

#### 5.4.2 Regelbare Lasten im Modell

Die regelbaren Lasten haben über den gesamten Frequenzbereich (49,8-49,2 Hz) ein lineares P(f)-Verhalten. Das Schaltschema ist in Abbildung 10 dargestellt.

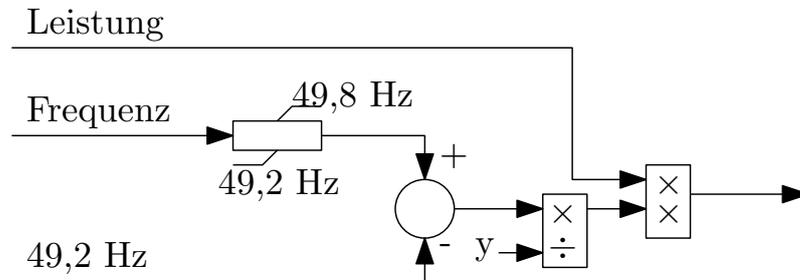


Abbildung 10: Schema regelbare Lasten

Das Eingangssignal der Frequenz ist das verzögerte Frequenzsignal. Durch den Limiter wird dieses auf den Bereich 49,8-49,2 Hz begrenzt. Anschließend wird die untere Frequenz (49,2 Hz) von diesem Signal abgezogen, so dass ein Signal mit Wertebereich (0...0,6) entsteht. Dieses Signal wird durch  $y = 0,6$  dividiert. Nach der Division ergibt sich damit ein normiertes Frequenzsignal (0...1), das im Bereich von 49,8-49,2 Hz Werte zwischen 0 und 1 annimmt. Eine Frequenz größer oder gleich 49,8 Hz bekommt den Wert 1, eine Frequenz von 49,2 Hz oder kleiner den Wert 0. Dieses Signal gibt an, wie viel Prozent der regelbaren Lasten bei der aktuellen Netzfrequenz Leistung aus dem Netz beziehen. Das normierte Frequenzsignal wird

anschließend mit dem Wirkleistungswert der regelbaren Lasten an dem jeweiligen Knoten multipliziert. Der daraus resultierende Wert gibt an, wie viel Leistung in Watt die regelbaren Lasten bei der aktuellen Frequenz aus dem Netz beziehen.

### 5.4.3 Verzögerungszeiten im Modell

Die Vorlage zur Umsetzung der Verzögerungszeiten wurde vom Fachbereich zu Verfügung gestellt. In dem Submodel  $f_{\text{delay}}$  in Abbildung 5 werden drei Verzögerungszeiten dargestellt, die Gerätegruppen mit unterschiedlichen technischen Eigenschaften abbilden. Jeder Verzögerungszeit kann ein Anteil zugewiesen werden, der angibt, wie viele (anteilig) der betrachteten Geräte die jeweilige Verzögerungszeit haben. Das Ausgangssignal je Verzögerungszeit ist ein verzögertes Frequenzsignal, das zusätzlich durch den Anteil der Verzögerungszeit gewichtet ist.

## 5.5 Umsetzung Unterfrequenzlastabwurf

Unterfrequenzlastabwürfe (UFLA) wurden für Lasten und für Last-VSMs (VSM3 und VSM4) modelliert. Bei der Umsetzung von UFLA gibt es bei Lasten und VSMs geringe Unterschiede. Bei beiden Umsetzungen werden dem Modell zwei Frequenzstufen zugewiesen, welche das Modell so modifizieren, dass die Wirkleistung in zwei Stufen reduziert wird. Bei der ersten Stufe wird die aktuelle Wirkleistung um 22,5 % reduziert, bei Erreichen einer zweiten Frequenzstufe um weitere 22,5 %. In Tabelle 5 sind die Frequenzstufen und die verbleibende Leistung der Lasten bzw. VSMs gezeigt. Damit wird erreicht, dass alle Lasten gemeinsam nach Schalten aller 10 UFLA-Stufen ihre Leistung um 45 % reduziert haben, wie es sein soll.

UFLA-Stufe	Anteil Wirkleistung
Keine UFLA-Stufe	1
1. Stufe	0.775
2. Stufe	0.55

Tabelle 5: Werte UFLA-Faktor

Zur Umsetzung wird ein Submodel verwendet, dessen Ausgangssignal bei Erreichen der zugewiesenen Frequenzstufen die Werte aus der zweiten Spalte von Tabelle 5 annimmt. In Abbildung 11 ist zu sehen wie das UFLA-Signal erzeugt wird. Dazu wird der Simulink-Block 'Switch' eingesetzt, dieser schaltet zwischen dem ersten und dem dritten Eingang, basierend auf dem Wert des zweiten Eingangs. Der Wert, mit dem verglichen wird, wird parametrisiert. Das Eingangssignal des Submodels ist die Frequenz am Bus der Last bzw. VSM. Der Wert  $Z$  gibt an, ob an dem entsprechenden Gerät UFLA aktiv ist. Bei  $Z > 1$  ist UFLA aktiv bei  $Z \leq 1$  ist UFLA nicht aktiv und es wird nur der untere Eingangswert (50) des ersten Switch-Blocks aktiv,

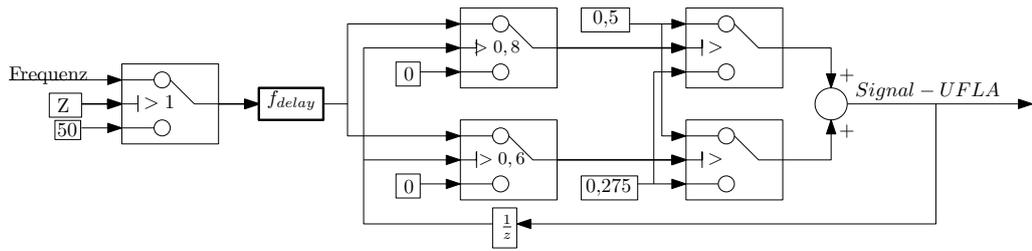


Abbildung 11: Schema UFLA

der einen konstanten Submodel-Ausgangswert von 1 zur Folge hat. Der Block  $f_{delay}$  verzögert das Frequenzsignal um insgesamt 150 ms, wobei 80 ms für eine möglichst sichere Frequenzmessung und 70 ms für das anschließende Schalten angesetzt werden. Der obere der beiden folgenden Pfade beschreibt das Schaltverhalten der ersten UFLA-Stufe und der untere das der zweiten Stufe. Bei den übereinander liegenden Switches in der Mitte des Submodells wird überprüft, ob bereits eine UFLA-Stufe aktiv ist. Die Switch-Blöcke vergleichen den aktuellen Ausgangswert und schalten ggf. vom ersten Eingang, der Frequenz, auf den zweiten Eingang mit dem Wert 0 um. Dadurch wird gewährleistet, dass eine einmal geschaltete Stufe bei wieder ansteigender Frequenz nicht wieder zurückgenommen wird. Solange keine UFLA-Stufe aktiv ist (Gesamtausgang = 1), schalten die mittleren Switch-Blöcke das Frequenzsignal nach hinten durch. Die hinteren Switch-Blöcke überprüfen, ob die aktuelle Frequenz die parametrisierte Schaltstufe für UFLA erreicht. Ist die Frequenz geringer als die Schaltstufe, schaltet der 'Switch-Block' vom ersten zum dritten Eingang, und der Ausgang wechselt von 0,5 zu 0,275. Die Ausgänge der beiden hinteren Switches ergeben addiert die in Tabelle 5 angegebenen Werte. Für die Lasten wird das UFLA-Ausgangssignal, wie in Abbildung 5 zu sehen, mit dem Wirkleistungswert multipliziert. Dadurch reduziert sich die aktuelle Wirkleistung auf den Anteil des UFLA-Ausgangssignals, was einer Reduzierung der Wirkleistung um 22,5 % je UFLA-Stufe entspricht. Bei den VSMs werden die Leistungs-Messwerte erhöht, indem durch das UFLA-Ausgangssignal dividiert wird. Dadurch reduziert die VSM ihre tatsächlich umgesetzte Leistung auf den Anteil, den das UFLA-Ausgangssignal angibt. Das Prinzip ist im Anhang in Abbildung 26 zu sehen.

Um zu bestimmen, welche Lasten bzw. VSMs bei welcher Frequenz schalten, wurde eine Funktion genutzt, die jeder VSM und jeder Last zwei Frequenzen im Bereich von 49-48,1 Hz in 0,1 Hz Schritten zuweist. Die Frequenzen werden in die Gruppen [49; 48,9; 48,8; 48,7; 48,6] und [48,5; 48,4; 48,3; 48,2; 48,1] eingeteilt. So werden mit einer Position zwei Frequenzen zugeteilt. Wenn eine Last die erste Stufe bei 49 Hz schaltet, schaltet die zweite Stufe der Last bei 48,5 Hz, usw. Damit die im gesamten Netz bei den 10 UFLA-Stufen geschalteten Leistungen möglichst gleichgroß sind, wird betrachtet, wie viel Leistung insgesamt durch UFLA geschal-

tet werden kann, und jeder der fünf Gruppen wird ca. 1/5 davon zugeordnet. Bei der Ermittlung der durch UFLA schaltbaren Leistungen ist mehreres zu beachten. Es ist davon auszugehen, dass die Leistungsänderung durch LFSM-U beim Einsetzen von UFLA bereits vollständig realisiert wurde, weswegen nur der Anteil der Wirkleistung ohne den Anteil an LFSM-U mit einbezogen wird. VSMs erbringen bei negativer RoCoF zusätzlich Momentanreserve, wobei bei Erreichen von Frequenzen  $\leq 49$  Hz eine geringere RoCoF anzusetzen ist als direkt nach dem System Split. Es wurde angenommen, dass bei Einsetzen von UFLA noch eine RoCoF von ca. -1 Hz/s im Netz herrscht und die Leistungen der VSMs entsprechend verringert.

# 6. Untersuchungen

Die Untersuchungen werden in einem 14-Knoten-Netz, bestehend aus einer Hochspannungsebene 69 kV und einer Mittelspannungsebene 13,8 kV durchgeführt (siehe Kapitel 5.1). Im Netz immer aktiv sind Erbringer von Momentanreserve. Zusammen mit dem zu untersuchenden LFSM-U wird immer auch eine Primärregelung und ein Unterfrequenzlastabwurf-Mechanismus vorgehalten. In Untersuchung 4 (Kapitel 6.4) wird zusätzlich eine Sekundärregelung aktiviert. Um die in Kapitel 1.3 beschriebenen Eigenschaften zu untersuchen, werden die nachfolgend beschriebenen Simulationen durchgeführt.

## 6.1 Wirkung von lastseitigem LFSM-U

Bei dieser Untersuchung wird die grundlegende Wirkung von lastseitigem LFSM-U gezeigt. Im ersten Schritt wird dafür in dem Netzabschnitt der unterbrochene Wirkleistungsfluss und der Anteil von LFSM-U-Lasten im gleichen Verhältnis variiert. Die LFSM-U-Lasten sollen dabei gerade eben in der Lage sein, das durch die Trennung vom Netz auftretende Leistungsungleichgewicht durch Reduzierung ihrer Wirkleistung auszugleichen. Dadurch sollen Leistungsungleichgewichte, die ohne LFSM-U und UFLA RoCoFs im Bereich von -1 Hz/s bis -4 Hz/s auslösen, ausgeglichen werden.

Simulation	1.1	1.2	1.3
RoCoF [Hz/s]	-1	-2	-4
Setpoint VSM6	0,68	0,58	0,38
Leistung VSM6 [MW]	204	174	114
$T_N$ [s]	6	6	6
$\Delta P_{\text{Netz}}$ [MW]	-30	-60	-120
LFSM-U [%]	10,5	21	42
LFSM-U [MW]	27,195	54,39	108,78

Tabelle 6: Auswahl Parameter Untersuchung 1

In Tabelle 6 ist ein Teil der Parameter dieser Untersuchung gezeigt. Bei dieser und allen folgenden Parameter-Tabellen sind die Simulationsnummern auf die jeweilige Untersuchung bezogen. Beispiel: 1.1 ist die erste Simulation der Untersuchung 1 usw. Eine ausführliche Auflistung der Parameter findet sich im Anhang C. In Tabelle 6 ist in der oberen Zeile die RoCoF zu sehen, die im Netz herrscht, wenn nur Momentanreserve aktiv ist. Der Setpoint stellt den Arbeitspunkt der VSM6 in p.u. dar, und die Leistung entspricht der Wirkleistung der VSM6 bei diesem Arbeitspunkt. Die Netzanlaufzeitkonstante  $T_N$ , die aus den  $T_A$ -Werten der VSMs und der im Netz installierten Leistung berechnet wird, bleibt bei allen Simulationen gleich.

$\Delta P_{\text{Netz}}$  ist die Änderung der Wirkleistungsbilanz, die sich im simulierten Teilnetz durch die Trennung von der Spannungsquelle ergibt. Die Werte von LFSM-U geben an, wie viel Prozent [%] und absolute Leistung [MW] der Gesamtleistung (259 MW) im Netz für LFSM-U zur Verfügung steht.

## 6.2 Auswirkungen unterschiedlicher Anteile von LFSM-U

In Untersuchung 2 soll gezeigt werden, dass durch den Einsatz von LFSM-U Unterfrequenzlastabwürfe vermieden werden können. Dazu wird in dem betrachteten Teilnetz zunächst gezeigt, dass ohne oder mit nur geringem Einsatz von LFSM-U mehrere Unterfrequenzlastabwurf-Stufen ansprechen. Der Anteil der LFSM-U-Lasten wird daraufhin immer weiter erhöht, bis dieser hoch genug ist, um alle UFLA-Stufen zu vermeiden. Daraufhin wird der Anteil an LFSM-U weiter erhöht, um weitere Effekte zu ermitteln. Ein höherer Anteil an LFSM-U-fähigen Lasten führt dazu, dass bei einer Frequenz im Bereich von 49,8...49,2 Hz bei gleicher Frequenz die Leistung durch die Lasten stärker reduziert wird. Es ist damit zu rechnen, dass die Wirkung von LFSM-U bei einem höheren Anteil stärker ist. Einerseits ist zu erwarten, dass sich die Frequenz auf einem höheren Wert stabilisiert, da die zum Abfangen der RoCoF benötigte Leistung schneller reduziert wird. Für  $P_{\%,\text{LFSM-U}2} > P_{\%,\text{LFSM-U}1}$  ist zu erwarten:  $f_{\text{End,LFSM-U}2} > f_{\text{End,LFSM-U}1}$ . Weiterhin kann es zu einer deutlichen Überreaktion der reduzierten Leistung nach Erreichen des f-Nadir und damit anschließend zu einem stärkeren Rückschwingen der Frequenz kommen, da bei unveränderten Verzögerungszeiten relativ mehr Leistungsreduzierung erst nach Erreichen des Nadirs umgesetzt wird. Im letzten Abschnitt dieser Untersuchung wird dann bewusst maximal von der Gleichverteilung der LFSM-U-Lasten im Frequenzbereich 49,8-49,2 Hz abgewichen. Damit soll die Robustheit bezüglich extremer Abweichungen von der eigentlich anzustrebenden gleichmäßigen Verteilung über die Frequenzbänder demonstriert werden.

Bei der Untersuchung 2a wird untersucht, wie sich Unterfrequenzlastabwürfe bei steigendem Anteil von LFSM-U im Netz verhalten. Beginnend mit einem Anteil an LFSM-U von 5 % wird der Anteil an LFSM-U in 10 % Schritten bis auf 45 % erhöht.

Simulation	2a.1	2a.2	2a.3	2a.4	2a.5
Setpoint VSM6	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Leistung VSM6	114	114	114	114	114
$T_N$ [s]	11	11	11	11	11
$\Delta P_{\text{Netz}}$ [MW]	-123	-123	-123	-123	-123
LFSM-U [%]	5	15	25	35	45
LFSM-U [MW]	12,95	38,85	64,75	90,65	116,55

Tabelle 7: Auswahl Parameter Untersuchung 2a

Die veränderten Parameter und daraus resultierende Werte sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die VSM6 (Setpoint und Leistung), sowie die die RoCoF bestimmenden Parameter ( $T_N$  und  $\Delta P$ ) sind bei den Simulationen von Untersuchung 2a und Untersuchung 2b gleich. Die Variation des Anteils an LFSM-U ist in den untersten beiden Zeilen zu sehen.

Simulation	2b.1	2b.2	2b.3	2b.4	2b.5	2b.6	2b.7
Setpoint VSM6	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Leistung VSM6	114	114	114	114	114	114	114
$T_N$ [s]	11	11	11	11	11	11	11
$\Delta P_{\text{Netz}}$ [MW]	-123	-123	-123	-123	-123	-123	-123
LFSM-U [%]	45	50	60	70	80	90	100
LFSM-U [MW]	116,55	129,5	155,4	181,3	207,2	233,1	259

Tabelle 8: Auswahl Parameter Untersuchung 2b

In Untersuchung 2b wurde der Anteil an LFSM-U weiter bis auf 100% erhöht. In Tabelle 8 sind die Parameter aufgeführt. Abgesehen vom Anteil an LFSM-U werden zwischen den Simulationen keine Parameter verändert.

In der Untersuchung 2c wird die Verteilung der LFSM-U-Lasten auf dem Frequenzband variiert. Bei der Variation der Verteilung wird der Anteil VSM-Lasten an LFSM-U ausgeschaltet.

Simulation	2c.1	2c.2	2c.3	2c.4	2c.5	2c.6
Setpoint VSM6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$T_N$ [s]	11	11	11	11	11	11
$\Delta P_{\text{Netz}}$ [MW]	-117	-117	-117	-117	-117	-117
LFSM-U [MW]	129,5	129,5	129,5	259	259	259
davon FB1 [%]	33	100	0	33	100	0
davon FB2 [%]	33	0	100	33	0	100
davon reg. Lasten [%]	33	0	0	33	0	0
Anteil VSMs [%]	0	0	0	0	0	0

Tabelle 9: Auswahl Parameter Untersuchung 2c

In Tabelle 9 sind die Parameter der Untersuchung 2c aufgeführt. Bei den Simulationen 1-3 beträgt der Anteil an LFSM-U-Lasten im Netz 50% (129,5 MW). Bei den Simulationen 4-6 ist dieser Anteil auf 100% (259 MW) erhöht wurden. Da sich die Leistungsänderung der regelbaren Lasten über den gesamten Frequenzbereich verteilt, werden sie aus dem LFSM-U herausgenommen, wenn Leistungsänderungen durch LFSM-U nur auf das obere bzw. untere Frequenzband konzentriert werden sollen.

### 6.3 Unterschiedliche Verzögerungszeiten

In Untersuchung 3 sollen die Auswirkungen unterschiedlich starker Verzögerungszeiten gezeigt werden. Dazu werden die Verzögerungszeiten der Lasten in mehreren Stufen erhöht. Höhere Verzögerungszeiten haben ein späteres Einsetzen von LFSM-U zur Folge. Durch eine höhere Reaktionszeit ist mit einem stärkeren Einschwingverhalten der Frequenz zu rechnen, da die Lasten verzögert auf die Frequenz reagieren. Die Verzögerungszeiten sollen so weit erhöht werden, dass ein Teil der Lasten so verzögert reagiert, dass es trotz ausreichendem Verhältnis zwischen  $\Delta P$  und Anteil LFSM-U (vgl. Untersuchung 1) zu UFLA kommt. Erwartet wird, dass übermäßig lange Verzögerungszeiten bei den LFSM-U-Geräten zu einem verschlechterten Dämpfungsmaß führen und dadurch die stabilisierende Wirkung von LFSM-U etwas verzögert greift.

Bei der Untersuchung 3 ist der Anteil an LFSM-U gleichmäßig auf Frequenzband 1 & 2 sowie die schaltenden Lasten verteilt. Die VSM-Lasten leisten keinen Beitrag zu LFSM-U, da diese anhand der VSM-internen Frequenz LFSM-U erbringen und nicht von den Verzögerungszeiten beeinflusst werden.

Verzögerungszeit	1-fach	2-fach	3-fach	4-fach
gering	0,05s	0,1s	0,15s	0,2s
mittel	0,1s	0,2s	0,3s	0,4s
hoch	0,15s	0,3s	0,45s	0,6s

Tabelle 10: Verzögerungszeiten Untersuchung 3)

In Tabelle 10 sind die Verzögerungszeiten der regelbaren und schaltenden Lasten aufgeführt. In den Untersuchungen 3a und 3b hat Simulation 1 (Bsp.: 3a.1) eine einfache Verzögerungszeit, Simulation 2 (Bsp.: 3a.2) eine zweifache usw. Die hohe, mittlere und geringere Verzögerungszeit wird jeweils für die regelbaren und für die schaltenden Lasten verwendet.

Simulation	3a.1	3a.2	3a.3	3a.4
Verzögerungszeit	1-fach	2-fach	3-fach	4-fach
Setpoint VSM6	0,4	0,4	0,4	0,4
$T_N$ [s]	11	11	11	11
$\Delta P_{\text{Netz}}$ [MW]	-117	-117	-117	-117
LFSM-U [MW]	129,5	129,5	129,5	129,5
Anteil FB1 [%]	33	33	33	33
Anteil FB2 [%]	33	33	33	33
Anteil reg. Lasten [%]	33	33	33	33
Anteil VSMs [%]	0	0	0	0

Tabelle 11: Auswahl Parameter Untersuchung 3a

In Untersuchung 3a ist der Anteil an LFSM-U-Lasten 50 % (129,5 MW); das ist

ausreichend, um das Leistungsungleichgewicht  $\Delta P_{\text{Netz}} = -117 \text{ MW}$  auszugleichen. Abgesehen von den Verzögerungszeiten sind die Parameter bei allen Simulationen gleich. Eine Auswahl ist in Tabelle 11 zu sehen. Die Leistung von LFSM-U ist gleichmäßig auf die schaltenden Lasten in Frequenzband 1 & 2 und die regelbaren Lasten verteilt. Mit den Netzparametern in den ersten beiden Zeilen ergibt sich, wenn nur Momentanreserve im Netz aktiv ist, eine RoCoF von ca.  $-2 \text{ Hz/s}$ .

Simulation	3b.1	3b.2	3b.3	3b.4
Verzögerungszeit	1-fach	2-fach	3-fach	4-fach
Setpoint VSM6	0,4	0,4	0,4	0,4
$T_N$ [s]	11	11	11	11
$\Delta P_{\text{Netz}}$ [MW]	-117	-117	-117	-117
LFSM-U [MW]	181,3	181,3	181,3	181,3
Anteil FB1 [%]	33	33	33	33
Anteil FB2 [%]	33	33	33	33
Anteil reg. Lasten [%]	33	33	33	33
Anteil VSMs [%]	0	0	0	0

Tabelle 12: Auswahl Parameter Untersuchung 3b

In der Untersuchung 3b wird der Anteil von LFSM-U auf 70% erhöht. Durch einen höheren Anteil an LFSM-U erhöhen sich die Dynamiken im Netz, da mehr Leistung durch LFSM-U eingesetzt wird und es dadurch zu einer stärkeren Reaktion von LFSM-U kommt. Die anderen in Tabelle 12 aufgeführten Parameter gleichen denen von Untersuchung 2a aus Tabelle 11.

## 6.4 Wiedereinschalten und Sekundärregelung

In Untersuchung 4 soll das Wiedereinschaltverhalten der Lasten gezeigt werden. Dafür kommt – anders als in allen vorhergehenden Untersuchungen – zusätzlich zu LFSM-U, Primärregelung und UFLA eine Sekundärregelung zum Einsatz. Die Sekundärregelung wurde um ein Vielfaches stärker ausgelegt und spricht deutlich schneller an als üblich, damit die großen Leistungsunterschiede nach einem System-Split durch sie ausgeglichen werden können und die Simulationen in einer sinnvollen Zeitskala dargestellt werden können. Simulationen, in denen kein UFLA nötig wird, und solche, in denen UFLA auftritt, werden über einen längeren Zeitraum dargestellt. Nach Einsetzen der Sekundärregelung steigt die Frequenz an. Infolgedessen werden auch die abgeschalteten Lasten immer weiter zugeschaltet. Erwartet wird ein monotoner Wiederanstieg der Gesamtleistung der Lasten im Netz.

Die Parameter für Untersuchung 4 sind in Tabelle 13 aufgeführt. Ein 'SetpointVSM6' von 0,38 hat ein  $\Delta P = -123 \text{ MW}$  zur Folge. Aus den die RoCoF bestimmenden Parametern  $\Delta P$  und  $T_N$  ergibt sich eine RoCoF von ca.  $-2 \text{ Hz/s}$ . Variiert

Simulation	4.1	4.2
Setpoint VSM6	0,38	0,38
$\Delta P_{\text{Netz}}$ [MW]	-123	-123
$T_N$ [s]	11	11
LFSM-U [%]	42	21
LFSM-U [MW]	108,78	54,39

Tabelle 13: Parameter Untersuchung 4

wird zwischen den beiden Simulationen der Anteil an LFSM-U-Lasten da es nur in der zweiten Simulation zu Unterfrequenzlastabwürfen kommen soll.

# 7. Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der in Kapitel 6 beschriebenen Simulationen gezeigt. In einer Abbildung werden bei den Untersuchungen 1-3 jeweils mehrere Variationen einer Netzsituation miteinander verglichen. Bei der 4. Untersuchung wird eine Netzsituation über einen längeren Zeitraum untersucht. Der obere Plot jeder Abbildung stellt die Frequenz am Knoten 1 dar. Da die Frequenzverläufe an den unterschiedlichen Netzknoten auch in dynamischen Situationen sehr einheitlich sind, ist es nicht notwendig die Frequenzen aller Busse darzustellen, da dies die Übersichtlichkeit der Darstellungen sehr beeinträchtigen würde. Im zweiten und ggf. dritten Plot jeder Abbildung ist zu den Frequenzverläufen ein dazugehöriger Wirkleistungsverlauf dargestellt. Der zweite Plot stellt in jedem Fall die summierte Leistung aller Lasten ohne VSM-Lasten dar (siehe Kapitel 4). Die Wirkleistungs-Plots sind im Erzeugerzählpfeilsystem dargestellt; negative Leistungswerte stehen für eine Leistungsaufnahme. Unterschiedliche Farben bei den Plots zeigen jeweils eine Variation einer zu vergleichenden Netzsituation mit abweichender Parametrierung. Die gepunkteten Linien geben in jeder Untersuchung den Frequenzverlauf an, der sich ergibt, wenn in dem Netzabschnitt nur Momentanreserve zum Einsatz kommt.

## 7.1 Wirkung von lastseitigem LFSM-U

In der ersten Untersuchung wird gezeigt, dass lastseitiges LFSM-U in der Lage ist, eine fallende Frequenz zu stabilisieren. Dazu wurde in drei Simulationen der unterbrochene Wirkleistungsfluss und der Anteil an LFSM-U-fähigen Lasten im gleichen Verhältnis zueinander verändert. Die Parameter der Simulation sind in Kapitel 6.1 und umfassender in Anhang C aufgeführt.

Bei den drei in Abbildung 12 dargestellten Netzsituationen herrschte im betrachteten Netz die gleiche Netzanlaufzeitkonstante  $T_N$ . Sie unterscheiden sich aber in der Höhe des durch die Abtrennung unterbrochenen Wirkleistungsflusses. Im obersten Plot ist der Frequenzverlauf bei unterschiedlich starken unterbrochenen Wirkleistungsflüssen zu sehen; die Frequenzentwicklungen ohne LFSM-U und UFLA werden durch die gepunkteten Linien in den jeweiligen Farben dargestellt und liegen bei ca.  $-1 \text{ Hz/s}$  (blau),  $-2 \text{ Hz/s}$  (grün) und  $-4 \text{ Hz/s}$  (rot). Die durchgezogenen Linien zeigen den Frequenzverlauf bei eingesetztem LFSM-U. Im zweiten Plot ist zu sehen, wie sich bei fallender Frequenz die Gesamtleistung der Lasten reduzierte, d.h. weniger negativ wurde. Je höher der unterbrochene Wirkleistungsfluss war, desto mehr Verbrauchsleistung musste reduziert werden, um die fehlende Leistung zu kompensieren. Die Größe des unterbrochenen Wirkleistungsflusses ist in der Legende und außerdem in der untersten Grafik als Anfangswert dargestellt. 1 p.u. entspricht 100 MW. Die

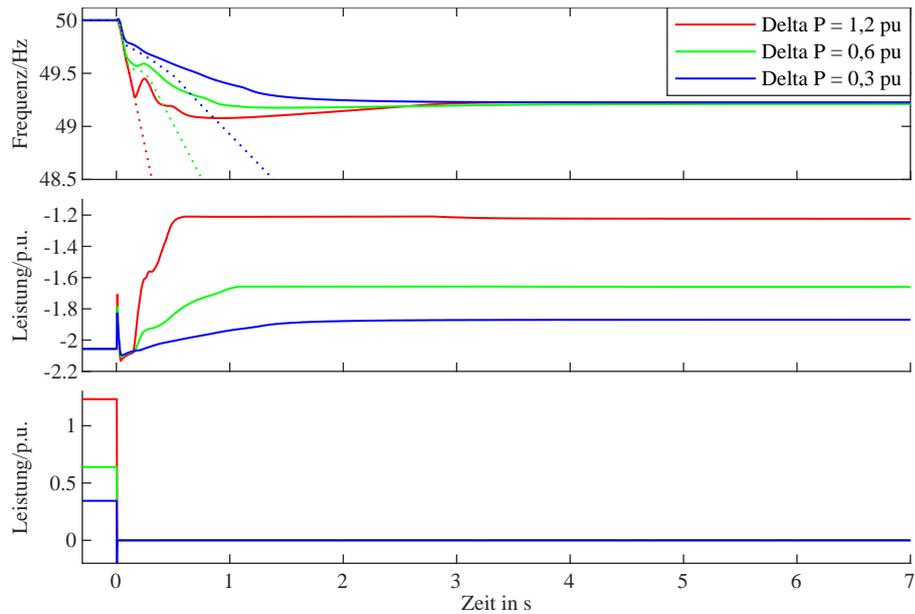


Abbildung 12: Ergebnis Untersuchung 1: Frequenz, Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten und Leistungsfluss aus dem übergeordneten Netz

Variation des unterbrochenen Wirkleistungsflusses führte bei den drei Simulationen ohne LFSM-U und UFLA zu sehr unterschiedlichen RoCoFs. Im oberen Plot ist zu sehen, dass unabhängig davon durch das lastseitige LFSM-U die Frequenz immer auf dem gleichen Wert stabilisiert wurde, denn das Verhältnis zwischen unterbrochenem Wirkleistungsfluss und Anteil an LFSM-U blieb immer gleich.

## 7.2 Auswirkungen unterschiedlicher Anteile von LFSM-U

Bei Untersuchung 2 wurde der Anteil an LFSM-U-fähigen Lasten variiert, bei einheitlicher Netzanlaufzeitkonstante  $T_N$  und einheitlichem unterbrochenem Wirkleistungsfluss (Parametrierung siehe Kapitel 6.2). Dabei wurde in der Untersuchung 2a der Anteil an LFSM-U zunächst so gering gehalten, dass Unterfrequenzlastabwürfe greifen mussten, um die fallende Frequenz zu bremsen, so dass es anschließend zu einer positiven Frequenzentwicklung kam.

In Abbildung 13 oben sind farbige die Frequenz und Leistungsverläufe von fünf unterschiedlichen Simulationen zu sehen (siehe: Kapitel 6.2). Der gepunktete schwarze Verlauf zeigt den Frequenzverlauf mit deaktivierten Mechanismen LFSM-U, Primärregelung und UFLA. Die Abweichung der farbigen Frequenzverläufe von dem gepunkteten Verlauf zeigt die Wirkung der frequenzstabilisierenden Maßnahmen. Beim roten Verlauf ist bis etwa 0,7 Sekunden nur eine geringe Abweichung zu erkennen, diese ist auf die Primärregelung und das geringe LFSM-U von 5 % zurückzuführen. Mit zunehmendem Anteil an LFSM-U-fähigen Lasten ergab sich eine immer stärkere Abweichung von dem gepunkteten Verlauf. Ab etwa 0,7 Sekunden setzten beim roten

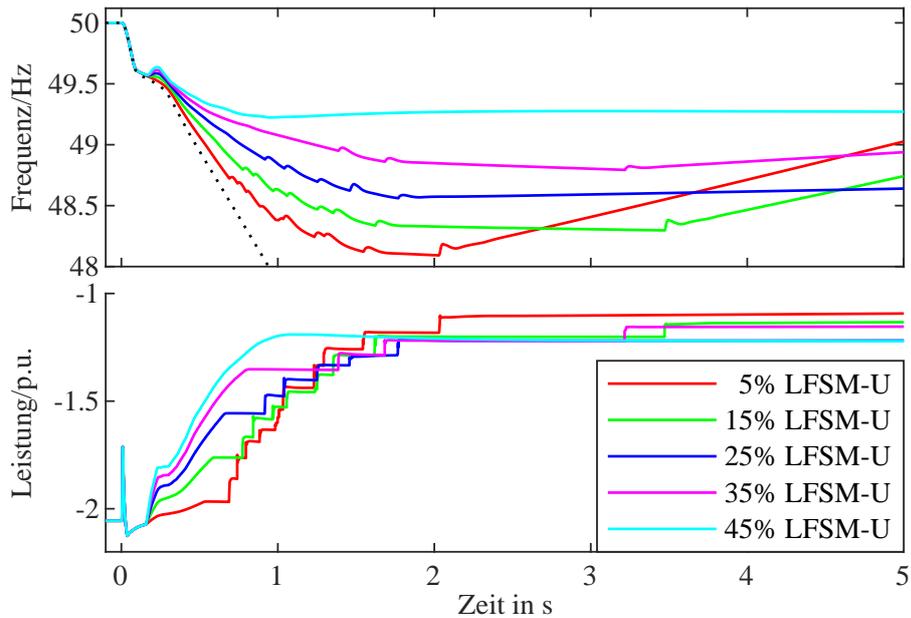


Abbildung 13: Ergebnis Untersuchung 2a: Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten

Verlauf (5 % LFSM-U) Unterfrequenzlastabwürfe ein, was in der Frequenzentwicklung als teils kleine Sprünge erkennbar ist. Eindeutiger sind die UFLA-Stufen im Leistungsverlauf der nicht-VSM-Lasten in der unteren Grafik zu sehen. Jede sprunghafte Änderung in der unteren Grafik steht für eine UFLA-Stufe. Der Unterfrequenzlastabwurf wird ab einer Netzfrequenz von 49 Hz aktiviert. Dass die erste sprunghafte Leistungsänderung jeweils unterhalb von 49 Hz Netzfrequenz stattfand, ist auf die für Messen und Schalten angesetzten 150 ms Verzögerung zurückzuführen (siehe Kapitel 5.5). Je geringer die RoCoF zwischen dem Erreichen von 49 Hz und dem Schaltvorgang der ersten UFLA-Stufe war, desto näher blieb die erste UFLA-Stufe an den 49 Hz. Es ist zu erkennen, dass bei steigendem Anteil an LFSM-U-fähigen Lasten weniger UFLA-Stufen benötigt wurden, um eine positive Frequenzentwicklung zu erreichen, da das im Netz herrschende Ungleichgewicht durch LFSM-U bereits soweit reduziert wurde, dass eine geringere Anzahl an UFLA-Stufen ausreichte. Die unterschiedlich starken positiven Frequenzentwicklungen kommen daher, dass mit jedem Unterfrequenzlastabwurf ein fast gleichgroßer Anteil der im Netz verbleibenden Leistung abgeschaltet wurde. War das im Netz herrschende Leistungsungleichgewicht vor einem letzten Unterfrequenzlastabwurf bereits sehr gering, hatte dieser eine stärkere positive Frequenzentwicklung zur Folge.

Bei den in Abbildung 14 gezeigten Simulationen wurde der Anteil an LFSM-U-fähigen Lasten, ausgehend von den Simulationen aus Abbildung 13, weiter bis 100 % erhöht, weshalb sich keine Unterfrequenzlastabwürfe ergaben. Da die Frequenz sich in Folge dessen auf immer höheren Werten stabilisierte, wurde der Frequenzmaßstab bei der oberen Grafik im Vergleich zu Abbildung 13 angepasst. Zu sehen ist,

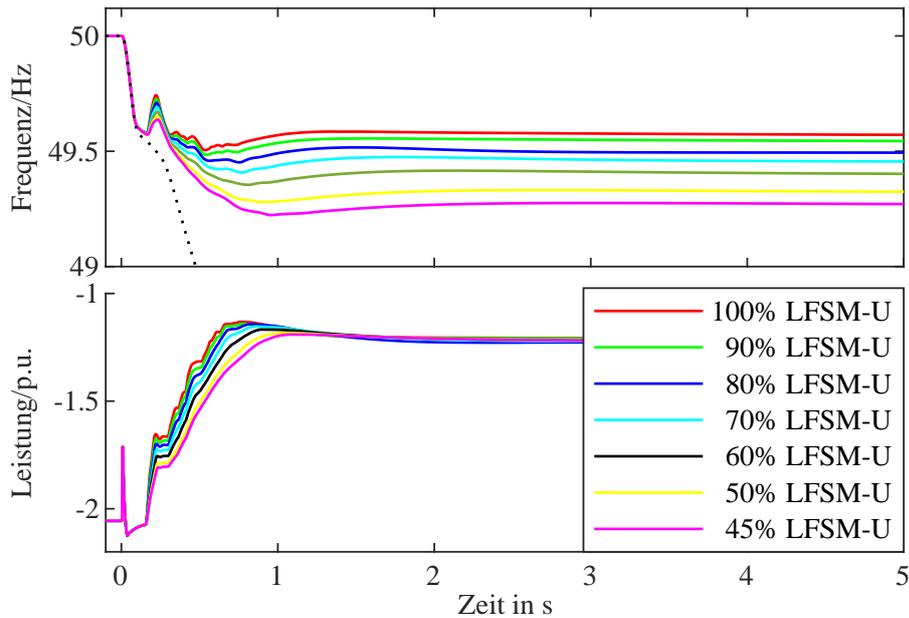


Abbildung 14: Ergebnis Untersuchung 2b: Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten

dass die Frequenz sich mit steigendem Anteil an LFSM-U-Lasten auf immer höheren Werten stabilisierte. Im unteren Plot ist zu sehen, dass sich unabhängig vom Anteil an LFSM-U bei jeder Simulation die Leistung auf dem gleichen Wert stabilisierte. Grund dafür ist, dass durch LFSM-U prinzipbedingt letztlich immer nur die Leistung abgeschaltet bzw. reduziert wurde, die nötig war, um die negative RoCoF aufzuhalten. Weswegen im Gegensatz zu Untersuchung 2a in dieser Untersuchung auch keine positive RoCoF einsetzen konnte.

In den Untersuchungen 2a und 2b war der Anteil der LFSM-U-fähigen Lasten gleichmäßig über den Frequenzbereich von 49,8-49,2 Hz verteilt. In der folgenden Untersuchung 2c wurde simuliert, wie sich eine starke Abweichung von der in Kapitel 4 getroffenen Annahme der Gleichverteilung der LFSM-U-Leistungsreduzierungen über die Frequenz auswirkt. Hierbei wurde der Anteil an LFSM-U auf 50 % und 100 % gesetzt, da bei einem höheren Anteil an LFSM-U-Lasten ein stärkerer Effekt zu erwarten ist. Die Parameter der Simulationen sind in Kapitel 6.2 aufgeführt.

In Abbildung 15 sind die Frequenz und Leistungsverläufe für drei unterschiedliche Simulationen mit jeweils 50 % LFSM-U-fähigen Lasten zu sehen. Der grüne Graph zeigt das Frequenzverhalten bei Gleichverteilung von LFSM-U über den gesamten Bereich und dient als Orientierung um die Abweichungen der anderen beiden Simulationen zu verdeutlichen. Beim roten Graphen liegt das gesamte LFSM-U im oberen Frequenzband (49,8-49,5 Hz). Innerhalb dieses Frequenzbandes zeigten die Lasten das für schaltende Lasten in Kapitel 4.3.3 ermittelte Verhalten. Es ist zu erkennen, dass die Frequenz bei ca. 49,5 Hz, nahe dem unteren Ende des oberen Frequenzbandes, stabilisiert wurde, da durch die ungleichmäßige Verteilung die ge-

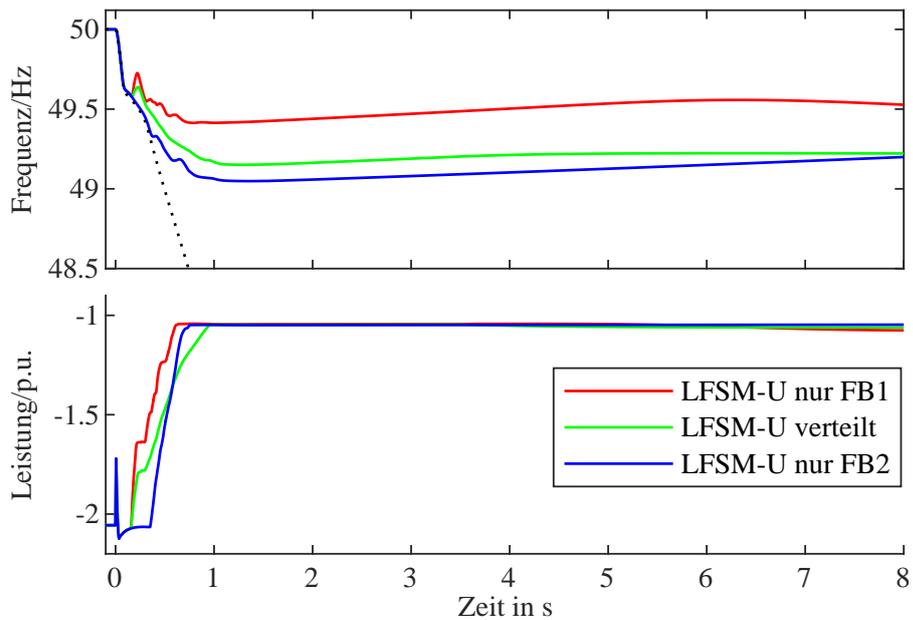


Abbildung 15: Ergebnis Untersuchung 2c mit LFSM-U 50 %: Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten

samte LFSM-U-Leistung innerhalb des ersten Frequenzbandes schaltete. Der blaue Graph zeigt dementsprechend die Verläufe von Frequenz und Leistung für das im unteren Frequenzband (49,5-49,8 Hz) konzentrierte LFSM-U. Die Abweichungen des blauen vom grünen Graphen sind hier geringer. Es ist aber zu erkennen, dass der blaue Frequenzverlauf zu Beginn deutlich unterhalb des grünen blieb, bevor er auf einen nahezu identischen Wert zustrebte. Dieses Verhalten ist damit zu begründen, dass LFSM-U erst bei Erreichen des zweiten Frequenzbandes einsetzte, weswegen die Frequenz zunächst nicht gebremst wurde und in Folge dessen stärker abfiel.

Bei den in Abbildung 16 dargestellten Simulationen lag der Anteil an LFSM-U-Lasten bei 100 %. Bei den Simulationen mit dem ungleichmäßig verteilten LFSM-U ist ein starkes aber gut gedämpftes Einschwingen der Frequenz zu erkennen. Dieses ist bei der Simulation, bei der die Leistungsänderung nur auf dem unteren Frequenzband lag (blau), stärker als bei der Simulation mit Leistungsänderung nur auf dem oberen Frequenzband (rot). Beim gleichverteilten LFSM-U (grün) fand nur ein schwaches Einschwingen statt. Weiterhin ist in der unteren Grafik zu sehen, dass die Wirkleistung beim Einschwingen deutlich schwankte, ganz im Gegensatz zu den in Abbildung 15 dargestellten Simulationen mit 50 % LFSM-U.

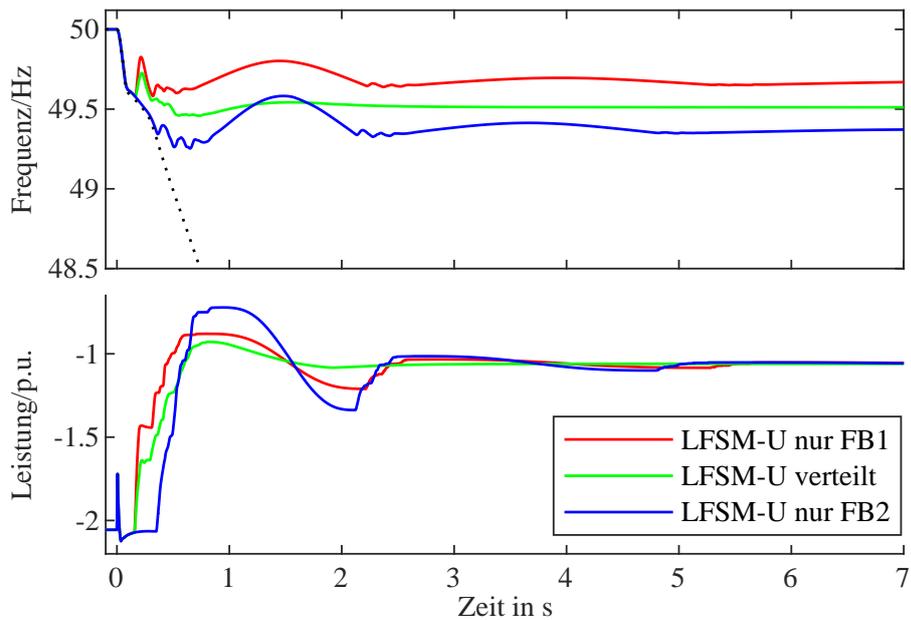


Abbildung 16: Ergebnis Untersuchung 2c mit LFSM-U 100 %: Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten

### 7.3 Unterschiedliche Verzögerungszeiten

Der Fokus der dritten Untersuchung lag auf den Verzögerungszeiten zwischen Erreichen einer Frequenzschwelle und der Leistungsreduktion. In Kapitel 6.3 ist die Parametrierung der einzelnen Simulationen aufgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 und in Abbildung 18 gezeigt. Die in Abbildung 17 aufgeführten Simulationen hatten einen Anteil an LFSM-U-fähigen Lasten von 50 %. Die zweite (hier: mittlere) Grafik zeigt den Wirkleistungs-Verlauf der Lasten ohne VSM-Lasten. Zusätzlich ist in dieser Abbildung der Leistungsverlauf der Last-VSM3, die anders als die Lasten der mittleren Grafik auch Momentanreserve erbringt, im unteren Plot dargestellt. In der mittleren Grafik ist ein waagerechter Leistungsverlauf bevor der Einschwingvorgang von Frequenz und Leistung beendet ist ein Indikator dafür, dass die Leistung nicht weiter reduziert werden konnte, d.h. dass LFSM-U voll ausgeschöpft war. Die beiden größten Verzögerungszeiten 3-fach (blau) und 4-fach (lila) waren so groß, dass UFLA aktiv wurde. Beim Verlauf der 3-fachen Verzögerungszeit (blau) ist bei der Leistung von VSM3 bei ca. einer Sekunde eine sprunghafte Änderung zu sehen, was eine UFLA Stufe markiert. Der Verlauf mit der 4-fachen Verzögerungszeit (lila) zeigt zwei UFLA Stufen. Die erste ist im Leistungsverlauf der VSM3 (unterer Plot) bei ca. 0,8 Sekunden als sprunghafte Änderung zu sehen, die zweite als sprunghafte Änderung bei ca. 1,1 Sekunden im Verlauf der nicht-VSM-Lasten (mittlerer Plot). In den jeweiligen Frequenzverläufen sind die UFLA-Stufen nicht ganz so eindeutig als Zacken zu erkennen.

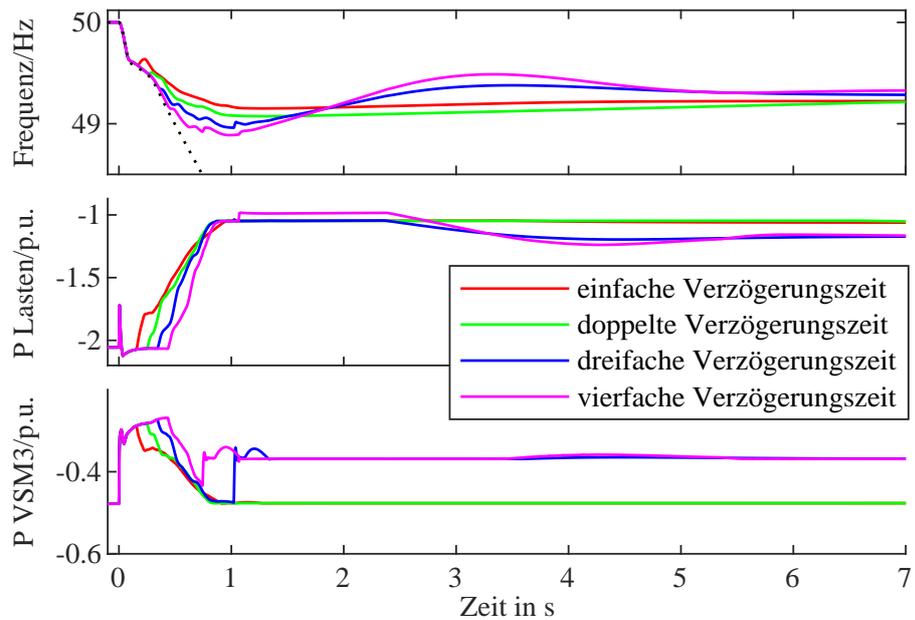


Abbildung 17: Ergebnis Untersuchung 3 mit LFSM-U 50%: Frequenz, Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten und Leistung VSM3

Die Frequenz- und Leistungsverläufe in Abbildung 18 weisen verglichen mit der vorherigen Abbildung höhere Dynamiken auf. Allerdings kam es hier bei keiner Verzögerungszeit zu einem Unterfrequenzlastabwurf. Grund dafür war, dass durch den höheren Anteil von LFSM-U der Effekt stärker war und die RoCoF stärker gebremst wurde.

Bis etwa 0.7 Sekunden gleichen die Leistungs- und Frequenzverläufe in Abbildung 18 denen aus Abbildung 17, da LFSM-U und damit auch die Effekte des stärkeren LFSM-U erst danach mit einem signifikanten Beitrag einsetzten. Danach zeigen die Simulationen mit 70% Anteil LFSM-U ein deutlich stärkeres aber immer noch gut gedämpftes Einschwingverhalten.

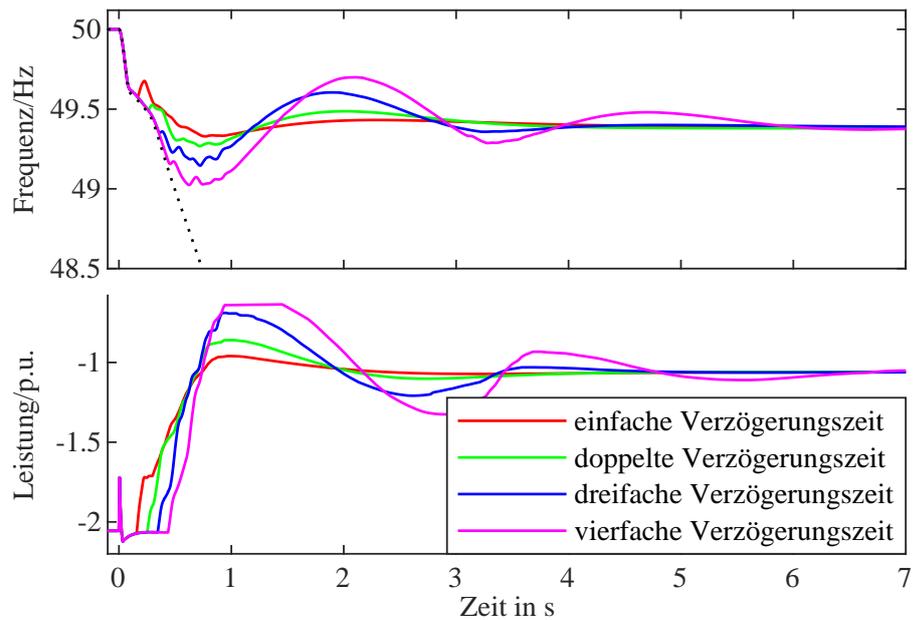


Abbildung 18: Ergebnis Untersuchung 3 mit LFSM-U 70%: Frequenz und Gesamtleistung nicht-VSM-Lasten

## 7.4 Wiedereinschalten und Sekundärregelung

Untersuchung 4 konzentriert sich auf das Wiedereinschaltverhalten der Lasten. Dazu wurden unter den in Kapitel 6.4 aufgeführten Voraussetzungen zwei Situationen simuliert. In der ersten war der Anteil an LFSM-U hoch genug, dass es nicht zu Unterfrequenzlastabwürfen kommt.

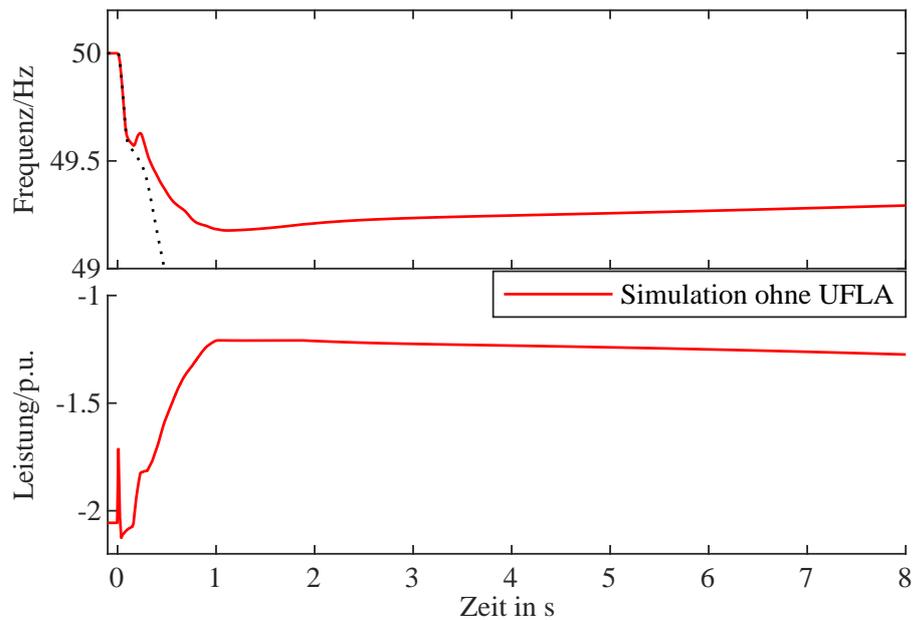


Abbildung 19: Ergebnis Untersuchung 4 ohne Notwendigkeit von UFLA: Erste Sekunden Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten

Abbildung 19 zeigt die ersten 8 Sekunden des Simulationsergebnisses. Der gepunktete Verlauf entspricht einer RoCoF von ca.  $-2\text{Hz/s}$ . Das Verhalten von Frequenz und Leistung war ähnlich dem der bisherigen Simulationen. Allerdings stabilisierte sich die Frequenz hier nicht gleich auf einem bestimmten Wert, sondern stieg stetig an, was auf das Einsetzen der Sekundärregelung zurückzuführen war. Bei der Wirkleistung der Lasten (unterer Plot) ist auch zu sehen, dass sich kein stabiler Wert einstellte, sondern der Wert stetig negativer wurde, was ein fortschreitendes Wiedereinschalten der Lasten bedeutet.

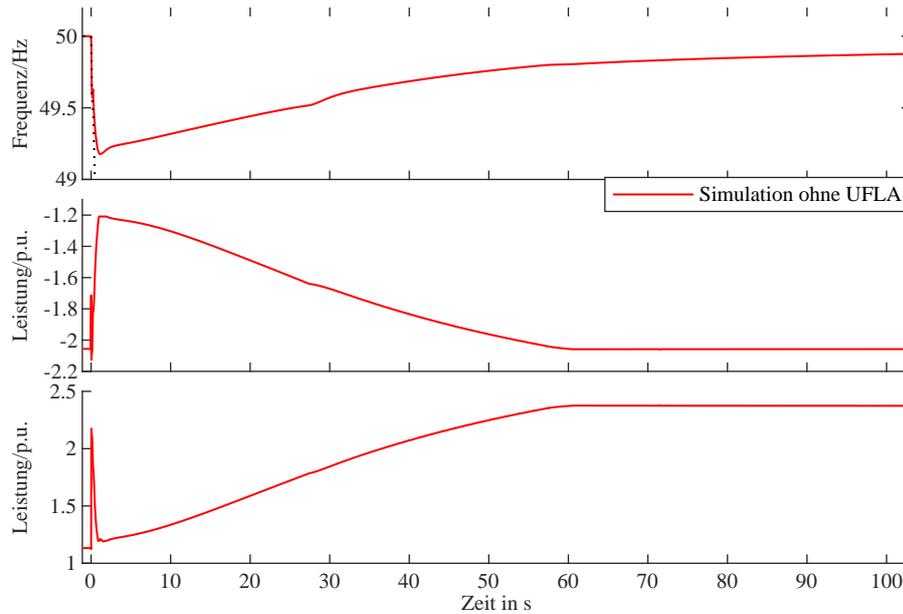


Abbildung 20: Ergebnis Untersuchung 4 ohne Notwendigkeit von UFLA: Frequenz, Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten und Leistung VSM6

Der gesamte Verlauf der Simulation wird in Abbildung 20 gezeigt. Im dritten Plot ist dort, zusätzlich zu den beiden Verläufen, deren Anfänge in Abbildung 19 zu sehen sind, der Wirkleistungsverlauf der VSM6 dargestellt. VSM6 sorgte in dieser Untersuchung für die Bereitstellung von Sekundärregelleistung (siehe Kapitel 6.4). Es ist zu erkennen, dass die Leistung der VSM6 stetig zunahm (Erzeugerzählpeilsystem). Eine Ungleichmäßigkeit ist – deutlich im oberen und mittleren Plot – im Bereich von 49,5 Hz (ca. 30 Sekunden) zu erkennen. Der Grund dafür liegt in den Eigenschaften des verzögerten Wiedereinschaltens beim Übergang vom unteren zum oberen Frequenzband. Die bei Eintritt in das obere Frequenzband zunächst geringere Wiedereinschaltrate und damit der kurzzeitig etwas schnellere Frequenzanstieg erklärt sich durch eine prinzipbedingte Anlaufverzögerung/Tiefpassverhalten bei der Umsetzung des in den Kapiteln 4.4.2 und 5.4.1 beschriebenen Wiedereinschaltverfahrens. Nach Überschreiten der Frequenz 49,8 Hz (ab ca. 60 Sekunden) blieb die Leistungsabgabe der VSM6 konstant, und die Frequenz wurde im Zuge der Ablösung der Primär- durch die Sekundärregelung (beide nur auf VSM6) nur noch sehr langsam zurückgeführt. In der mittleren Grafik ist das Wiedereinschaltverhalten der nicht-VSM-Lasten zu sehen. Der Graph nimmt immer negativere Werte an und ab einer Frequenz knapp oberhalb von 49,8 Hz (ca. 60 Sekunden) fand erwartungsgemäß keine weitere Änderung der Leistung der nicht-VSM-Lasten mehr statt.

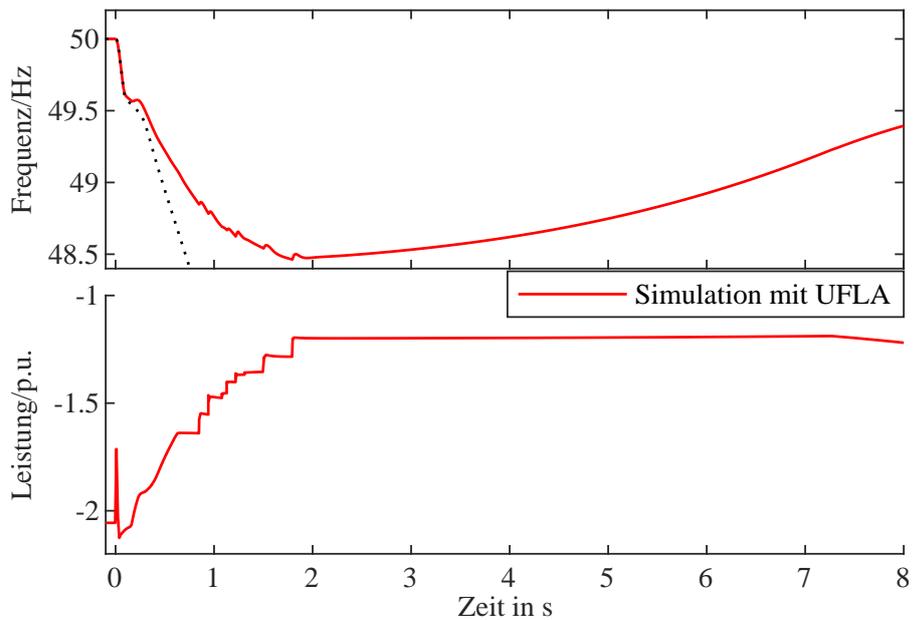


Abbildung 21: Ergebnis Untersuchung 4 mit UFLA: Erste Sekunden Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten

In der Simulation 2 von Untersuchung 4 war der Anteil an LFSM-U geringer als in Simulation 1 (siehe Kapitel 6.4), weshalb es zu Unterfrequenzlastabwürfen kam. Abbildung 21 zeigt den Abschaltvorgang und die UFLA-Stufen. Jede Stufe im Leistungsverlauf (untere Grafik) steht für eine Unterfrequenzlastabwurfstufe. In Abbildung 22 ist unten der Leistungsverlauf der VSM6 zusätzlich zum Frequenzverlauf (oben) und zum Leistungsverlauf der nicht-VSM-Lasten (Mitte) zu sehen.

Die durch UFLA abgeworfenen Lasten wurden prinzipbedingt beim Wiedereinschalten im Gegensatz zu den LFSM-U-Lasten nicht zeitnah wieder eingeschaltet. Dadurch kehrte der Endwert der Wirkleistung in der mittleren Grafik von Abbildung 22 bei Weitem nicht zum Anfangswert vor der Trennung vom Netz zurück, anders als bei der Simulation in Abbildung 20. Im Vergleich von beiden Simulationen fällt außerdem auf, dass VSM6 (untere Grafik) in Abbildung 22 einen viel geringeren Beitrag zur Sekundärregelung leisten musste als in Abbildung 20, da in Abbildung 22 nur noch eine sehr viel geringere Gesamtlast zu versorgen war. In der Simulation ohne UFLA hatte VSM6 eine Endleistung von ca. 2,48p.u., bei der Simulation mit UFLA lag die Leistung bei ca. 1,5 p.u.

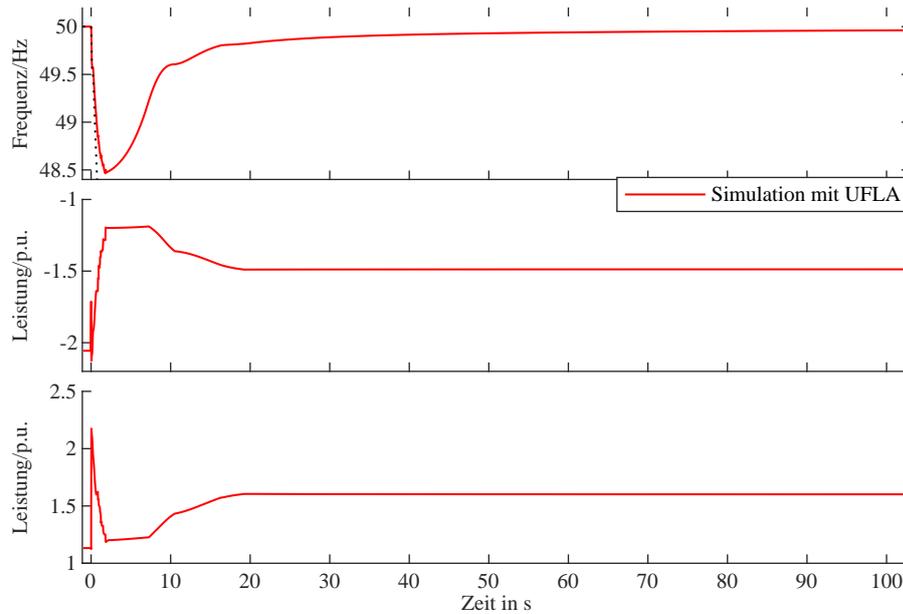


Abbildung 22: Ergebnis Untersuchung 4 mit UFLA: Frequenz, Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten und Leistung VSM6

## 8. Auswertung/Diskussion

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus Kapitel 7 untersucht und Aussagen in Bezug auf die Ziele aus Kapitel 3 getroffen. Bei den Untersuchungen wird ein Netz untersucht, in dem nach der Trennung vom übergeordneten Netz eine Unterversorgung im Netz herrscht.

### 8.1 Grundlegendes Verhalten

Die erste Untersuchung zeigt in Abbildung 12, dass lastseitiges LFSM-U in der Lage ist, unterschiedlich starke negative RoCoFs in einem Netz abzufangen. Voraussetzung ist, dass im Netz mindestens so viel LFSM-U-fähige Verbrauchsleistung aktiv ist, dass durch Abschalten bzw. Reduzieren der Leistung das Leistungsungleichgewicht im Netz ausgeglichen werden kann.

Simulation	1.1	1.2	1.3
RoCoF [Hz/s]	-2	-3	-4
$\Delta P$ [MW]	-30	-60	-120
LFSM-U [%]	10,5	21	42
stabile Frequenz	49,23	49,21	49,23

Tabelle 14: Anteil LFSM-U,  $\Delta P$  und stabile Frequenz

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse aus Untersuchung 1 aufgeführt. In der vierten Zeile 'stabile Frequenz' ist die Frequenz eingetragen, die sich im Netz nach dem

Einschwingvorgang einstellte. Zu sehen ist, dass bei gleichem Verhältnis zwischen dem Anteil an LFSM-U und dem unterbrochenen Wirkleistungsfluss  $\Delta P$  unabhängig von der RoCoF im Netz die Frequenz durch LFSM-U auf etwa dem gleichen Wert stabilisiert wurde.

## 8.2 Unterschiedlich hohe Anteile von LFSM-U

Bei der Untersuchung 2 wurden bei unveränderten Netzparametern die LFSM-U-Parameter verändert. In Untersuchung 2a wurde untersucht, wie Unterfrequenzlastabwürfe durch LFSM-U vermieden werden können. In Abbildung 23 ist zu sehen,

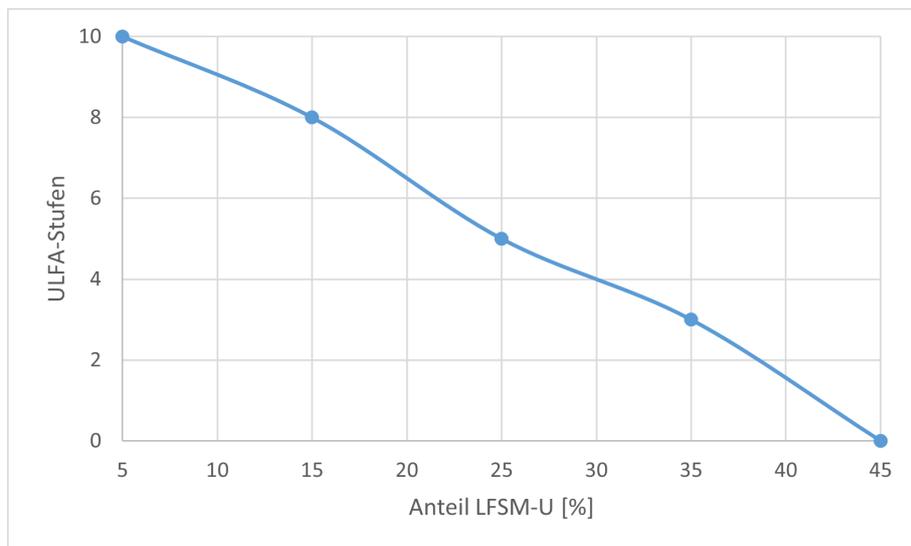


Abbildung 23: Ergebnis Untersuchung 2a - UFLA-Stufen und Anteil LFSM-U

wie viele UFLA-Stufen bei zunehmendem Anteil an LFSM-U schalteten. Zu sehen ist, dass bei steigendem Anteil an LFSM-U die Anzahl der benötigten UFLA-Stufen abnahm. In der Abbildung ist in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen der Abnahme der UFLA-Stufen und der Zunahme von LFSM-U zu erkennen. Dies ist auch das zu erwartende Verhalten, da die durch LFSM-U hervorgerufene Verbrauchsreduktion das Leistungsungleichgewicht bei einer Unterversorgung reduziert. Ein geringeres Leistungsungleichgewicht bedeutet, dass weniger UFLA-Stufen für eine positive Frequenzentwicklung nötig sind. Mit der Untersuchung 2a konnte gezeigt werden, dass durch eine zunehmende Ausbreitung von LFSM-U Unterfrequenzlastabwürfe vermieden werden können.

In Untersuchung 2b wurde das Frequenzverhalten bei zunehmendem Anteil von LFSM-U untersucht. Dazu wurde ermittelt, welche Frequenz sich im Netz nach dem Einschwingen einstellte. Schwang sich die Frequenz auf einem höheren Wert ein, war der zwischenzeitliche Abfall der Netzfrequenz ebenfalls nicht so stark. Eine höhere eingeschwingene Frequenz ist damit ein Indikator dafür, dass der stabilisierende

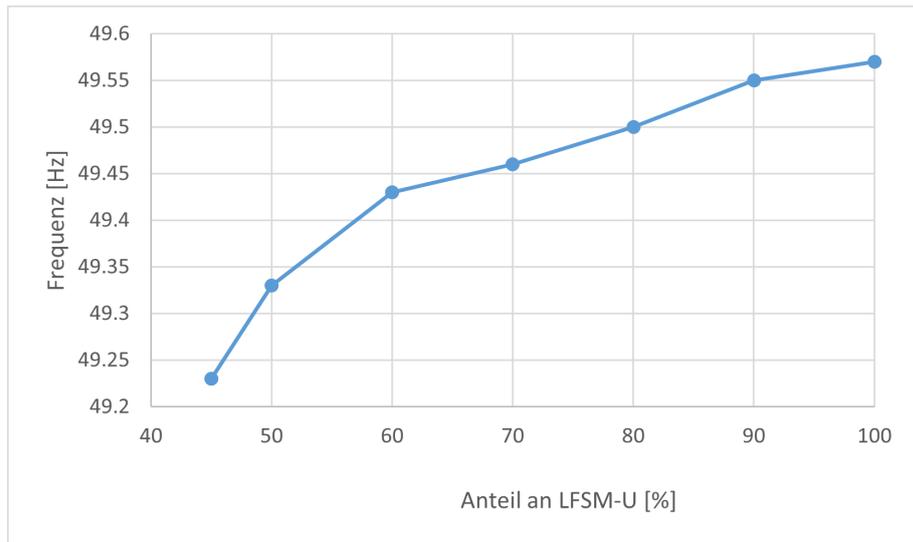


Abbildung 24: Ergebnis Untersuchung 2b - Eingeschwungene Frequenz und Anteil LFSM-U

Effekt von LFSM-U stärker ist. In Abbildung 24 ist die eingeschwungene Frequenz über dem Anteil an LFSM-U im Netz aufgetragen. Zu sehen ist, dass die Frequenz bei zunehmenden LFSM-U auf immer höheren Werten stabilisiert wurde. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Effekt nicht linear ist und dass bei steigendem Anteil an LFSM-U die weitere Steigerung der Frequenz immer geringer wurde.

### 8.3 Ungleichmäßige Verteilung von LFSM-U

Nachfolgend werden die Effekte einer starken Abweichung vom direkt proportionalen  $P(f)$ -Verhalten diskutiert. Zur Beurteilung der Auswirkungen der ungleichmäßigen Verteilung der LFSM-U-Lasten von Untersuchung 2c werden die Frequenzverläufe in den Abbildungen 15 und 16 untersucht. Die Beurteilung der beiden Grafiken erfolgt durch Einordnung der Abweichungen vom verteilten LFSM-U. Bei der Untersuchung mit dem Anteil von 50 % LFSM-U ist in jedem Fall ein sehr gut gedämpftes Einschwingen zu erkennen. Bei der Untersuchung mit 100 % LFSM-U war das Einschwingen der Frequenz ebenfalls in allen Fällen ausreichend gedämpft, aber beim verteilten LFSM-U ist die bessere Dämpfung sehr deutlich erkennbar. Zur Einordnung der Untersuchung sollte beachtet werden, dass die abgebildeten Simulationen einen maximal ungünstigen Fall darstellen, da eine sehr starke Abweichung vom direkt proportionalen  $P(f)$ -Verhalten gewählt wurde. Eine in der Realität erwartbare Abweichung vom direkt proportionalen  $P(f)$ -Verhalten würde zu geringeren Einschwingeffekten führen. Deutlich zu erkennen ist aber, dass eine Ungleichverteilung von LFSM-U auf die Frequenzbänder nur bei insgesamt hohen LFSM-U-Anteilen zu starkem (und trotzdem noch stabilen) Einschwingen führte. Selbst bei sehr forciertem Einsatz von LFSM-U durch Lasten werden diese Effekte vermutlich nicht vor

Mitte des Jahrhunderts eine Rolle spielen.

## 8.4 Auswirkung der Verzögerungszeiten

Das Einschwingverhalten des  $P(f)$ -Ansatzes wurde auch in Untersuchung 3 analysiert. Hier wurde die Schaltverzögerung der LFSM-U-Lasten erhöht. In Abbildung 17 ist der Anteil von LFSM-U 50 % gerade ausreichend um das Leistungsungleichgewicht auszugleichen. Bei den Simulationen mit der dreifachen und vierfachen Verzögerungszeit erfolgten durch das verspätete Abschalten der Lasten Unterfrequenzlastabwürfe. Was bei einer Umsetzung von lastseitigen LFSM-U nachvollziehbarer Weise zu vermeiden ist. Wie schnell die Frequenz die UFLA-Stufen erreicht, hängt von der RoCoF und damit von den Netzeigenschaften ab. Bei einer Umsetzung muss beachtet werden, dass die Verzögerungszeiten, mit denen die Lasten die Leistung reduzieren, ausschlaggebend dafür sind, bis zu welcher RoCoF der Ansatz wirkungsvoll ist. Bei der Untersuchung herrschte eine RoCoF von ca.  $-2\text{Hz/s}$ , und bei gerade ausreichendem LFSM-U war schon die 3-fache Verzögerungszeit so hoch, dass Unterfrequenzlastabwürfe nicht vermieden werden konnten. Das Einschwingverhalten der Simulationen von Untersuchung 3a mit 50 % LFSM-U war relativ stabil. Bei der Simulation mit 70 % LFSM-U (Untersuchung 3b) war der mögliche Leistungshub deutlich stärker als das Leistungsungleichgewicht, weswegen im Vergleich bei 3- und 4-facher Verzögerungszeit ein stärkeres Einschwingen zu beobachten war, das allerdings selbst bei vierfacher Verzögerungszeit erkennbar ausreichend gedämpft war. Dies unterstützt die Aussage aus Untersuchung 2c, dass bei hohem Anteil an LFSM-U-Lasten unter ungünstigsten Umständen stärkere Dynamiken auftreten können. Trotz des stärkeren Einschwingens kam es bei höherem Anteil von LFSM-U nicht zu Unterfrequenzlastabwürfen, da die Schwingungen in der Frequenz ausreichend stark gedämpft waren. Für das Netz bedeutet das eine bessere Handhabbarkeit extremer Ereignisse. Insgesamt ist der Einfluss des  $P(f)$ -Verhaltens von LFSM-U, insbesondere bei höherem Anteil von LFSM-U, als positiver Einfluss auf die Netzstabilität zu beurteilen.

## 8.5 Wiedereinschaltverhalten der Lasten

In der letzten Untersuchung (Untersuchung 4) wurde das Wiedereinschaltverhalten der Lasten durch das Wirken von Frequenzregelmechanismen (Sekundärregelung) untersucht. In Abbildung 25 sind die Frequenz- und Leistungsverläufe aus Abb. 22 und Abb. 20 zu sehen. Abgesehen von der Ungleichmäßigkeit nahe 49,5 Hz, dem Übergang vom unteren zum oberen Frequenzband, zeigt Abbildung 25 stabile Verläufe ohne Schwankungen, die auf instabilisierendes Verhalten hinweisen könnten. Die genannte Ungleichmäßigkeit beruht auf der einheitlichen Modellierung des Ver-

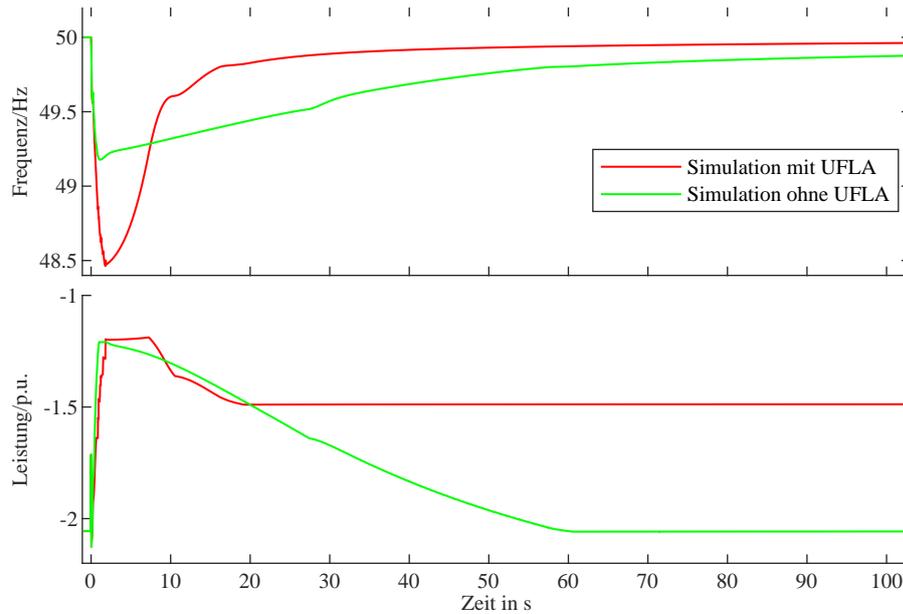


Abbildung 25: Ergebnis Vergleich Untersuchung 4 mit und ohne UFLA

haltens geschalteter Lasten für beide Frequenzbänder, wobei der Einstieg ins (obere) Frequenzband nicht vollständig komplementär zum Ausstieg (aus dem unteren) modelliert werden konnte. Eine weitere Auffälligkeit hat eine einfache Erklärung: Im Vergleich der Frequenzverläufe in Abbildung 25 wurde mit hohem Anteil LFSM-U vom Frequenz-Nadir ca. 49,2 Hz aus der Wert 49,6 Hz erst nach ca. 30 s erreicht, während mit geringerem Anteil LFSM-U vom viel tieferen Nadir ca. 48,5 Hz aus der gleiche Frequenzwert bereits nach knapp 10 s erreicht wurde. Der schnellere Anstieg erklärt sich aus dem temporären Wirkleistungsüberangebot nach Ansprechen der letzten UFLA-Stufe und der geringeren Bremswirkung des schwächeren LFSM-U auf den den Frequenzanstieg. Auch oberhalb von 49,6 Hz setzte sich aus gleichen Gründen der im Vergleich deutlich beschleunigte Frequenzanstieg bei der Simulation mit geringerem Anteil LFSM-U fort, der in beiden Fällen erst ab ca. 49,8 Hz nur noch von der Sekundärregelung bestimmt wurde. Damit entsprechen die Simulationen dem bei der vorgenommenen Parametrierungen zu erwartenden Verhalten.

# 9. Fazit

Nachfolgend wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst dargestellt, die Ergebnisse eingeordnet und ein Ausblick auf weiterführende Untersuchungen gemacht, die auf Grundlage dieser Arbeit durchgeführt werden könnten.

## 9.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob eine Umsetzung von lastseitigem LFSM-U möglich ist und welche frequenzstabilisierenden Eigenschaften daraus für ein Netz entstehen können. Der Fokus der Arbeit lag bei den Lasten; die verwendeten VSMS wurden grundsätzlich erläutert und die vorgenommenen Änderungen funktionell beschrieben. Bei den Lasten wurde der Fokus auf das Wirken vieler Lasten gemeinsam gelegt und nicht auf die Umsetzung bei einer einzelnen Last. Für die einzelne Last wurden Eigenschaften festgelegt, die diese im Falle einer Umsetzung mitbringen muss (siehe Kapitel 4.3 und 4.2). Für die Untersuchungen wurde ein Matlab-Simulink-Modell eines kleinen Teilnetzes erstellt, in dem kritische Netzsituationen simuliert wurden. Zur Darstellung der schaltenden, nicht regelbaren Lasten wurde mittels stochastischer Mittel ein Ansatz erstellt, der das aggregierte Verhalten vieler LFSM-U-fähiger Lasten darstellt (siehe Kapitel 5.4). Ziel der Untersuchungen (Kapitel 6) war es, die frequenzstabilisierenden Eigenschaften von lastseitigem LFSM-U und Auswirkungen einer zunehmenden Ausbreitung von LFSM-U im Netz zu zeigen und Auswirkungen unterschiedlich hoher Verzögerungszeiten und Abweichungen von der Gleichverteilung der Lasten im Hinblick auf die Stabilität im Netz zu untersuchen. Die Ergebnisse in Kapitel 7 zeigen, dass in einem Netz, in dem LFSM-U hinreichend ausgebaut ist, bei kritischen Netzsituationen Unterfrequenzlastabwürfe vermieden werden können und das Netz weniger Tendenzen hat, in einen kritischen Netzzustand zu geraten. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass eine umfassende Einbeziehung von Lasten in LFSM-U unter sehr ungünstigen Bedingungen zwar zu mittlerem bis starkem Einschwingverhalten bei Frequenz und Leistung führen kann, dieses jedoch im IEEE-14-Knoten-Netz auch mit extremen Annahmen völlig ausreichend gedämpft blieb.

## 9.2 Ausblick

Zwischen dieser Arbeit und einer tatsächlichen Umsetzung in einem realen Stromnetz stehen noch einige wichtige Untersuchungen. Die rechtlichen und gesellschaftlichen Richtlinien, die für eine Umsetzung und Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung notwendig wären, werden hier nicht betrachtet, da diese noch zu weit in der Zukunft

liegen und kaum abschätzbar sind. Bedeutend ist eine Untersuchung und Kategorisierung der Lasten in einem Netz, auch nach Entbehrlichkeits-Gesichtspunkten. Dabei sollte geklärt werden, welche Lasten zu unterschiedlichen Zeiten im Netz aktiv sind und wie weit dies die Gleichverteilung und damit das proportionale  $P(f)$ -Verhalten beeinflussen könnte. Im Zuge dessen ist auch die Einteilung der Lasten in schaltende und regelbare Lasten und deren Anteile an der Gesamtlast interessant, um die Verteilung der Leistung auf den Frequenzbändern zu prüfen. In diesem Zusammenhang kann auch geprüft werden, ob sich einzelne industrielle oder gewerbliche Lasten bereits jetzt schon für eine LFSM-U-fähige Aufrüstung eignen. Vorstellbar sind Lasten wie zum Beispiel Kühlhäuser und andere Großverbraucher. Aus Ressourcengründen konnten die in 4.3.3 beschriebenen Vorschläge für das Schalten sehr großer Lasten nicht simulativ untersucht und bewertet werden; das sollte bei auf dieser Arbeit aufbauenden Untersuchungen vorgesehen werden.

Auch beim Versorgungswiederaufbau (VWA) nach einem Blackout können LFSM-U-Lasten einen positiven Effekt haben. Betrachtet werden soll ein inaktiver Netzabschnitt nach einem Blackout, in dem ein Schwarzstart durchgeführt wird. Hierfür wird ein schwarzstartfähiger Einspeiser verwendet, welcher in der Lage ist, abrupte Lastschwankungen von etwa 10 MW zu kompensieren. Im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken ist dieser Einspeiser nicht auf eine Mindestlast angewiesen. Im Verlauf des Netzwerkaufbaus werden sukzessive Mittelspannungsabzweige mit Verbrauchern und Erzeugern zugeschaltet. Mit wachsendem Netz wächst auch die benötigte frequenzproportionale Regelleistung, wobei der schwarzstartfähige Einspeiser irgendwo an seine Grenzen stößt. In diesem Kontext können sich LFSM-U-Lasten als relevante Technologie erweisen. Sie können komplementär zum LFSM-O bei Einspeisern Leistungsschwankungen bei Unterfrequenz mit Reaktionszeiten von 100...200 ms ausgleichen und somit auch starke Wirkleistungsschwankungen kompensieren. Hierdurch wird effektiv verhindert, dass während des Netzwerkaufbaus unerwünschte Phänomene wie der Unterfrequenz-Lastabwurf (UFLA) ausgelöst werden. Auch die technische Umsetzung bei den Lasten muss entworfen und geprüft werden. Dabei ist insbesondere wichtig, wie eine grobe Gleichverteilung und das Wiedereinschalten in der Praxis unter unterschiedlichsten Umständen umgesetzt werden können.

## Literatur

- [Ber20] Andreas Berger. „Analysis on limited frequency sensitive mode capabilities of power generating modules“. In: (2020).

- [BMS22] Tadeja Babnik, Bojan Mahkovec und Srdan Subotic. „Centralised system for overfrequency real-time dynamic settings for generators“. In: *2022 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA)*. Hrsg. von IEEE. IEEE, 2022, S. 1–5. ISBN: 978-1-6654-9823-4. DOI: 10.1109/SGSMA51733.2022.9805855.
- [Bun23] Bundesregierung. *Generationenvertrag für das Klima*. 2023. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (besucht am 02.01.2024).
- [Bun24] Bundesrepublik Deutschland/ Bundesamt für Justiz. *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung: EnWG*. 2024. URL: [https://www.gesetze-im-internet.de/enwg\\_2005/index.html#BJNR197010005BJ-NE031903377](https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/index.html#BJNR197010005BJ-NE031903377) (besucht am 27.05.2024).
- [Bv17] Steven de Boeck und Dirk van Hertem. „Effects of Renewable Energy on Frequency Stability: A Proposed Case Study of th Kenyan Grid“. In: (2017), S. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232605.
- [Cai+14] Deyu Cai u. a. „Smart frequency control schemes in distribution network with renewable resources“. In: (2014). DOI: 10.1109/APPEEC.2014.7066089.
- [Cra12] Valentin Crastan. *Elektrische Energieversorgung 2*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 978-3-642-19855-7. DOI: 10.1007/978-3-642-19856-4.
- [Cra15] Valentin Crastan. *Elektrische Energieversorgung 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 978-3-662-45984-3. DOI: 10.1007/978-3-662-45985-0.
- [Dou+13] Philip J. Douglass u. a. „Smart Demand for Frequency Regulation: Experimental Results“. In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 4.3 (2013), S. 1713–1720. ISSN: 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2013.2259510.
- [ENT16] ENTSO-E. „Frequency Stability Evaluation Criteria for the Synchronous Zone of Continental Europe“. In: (2016).
- [ENT18] ENTSO-E. „Limited frequency sensitive mode“. In: (2018).
- [ENT19] ENTSO-E. *Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC): ENTSO-E guidance document for national implementation for network codes on grid connection*. ENTSO-E, 2019. ISBN: 978-1-7281-4930-1.
- [Hei+22] Johannes Heid u. a. „Unsymmetrische Beiträge zur Momentanreserve durch Erzeugung, Verbrauch und Speicher“. In: (2022). DOI: 10.17170/KOBRA-202202015686.

- [Hos+18] Hossain, S. S. u. a. „Design and analysis of an UFLS scheme for low-inertia based power grid“. In: (2018).
- [Hun22] Marcel Hunecke. „Psychologie und Klimakrise“. In: (2022). DOI: 10.1007/978-3-662-66260-1.
- [IEE23] IEEE. „Table of Contents“. In: *IEEE Electrification Magazine* 11.4 (2023), S. 1. ISSN: 2325-5897. DOI: 10.1109/MELE.2023.3319891.
- [Jül+20] Jülich u. a. „Jüli2020 - Roadmap\_Systemdienstleistungen\_WEB“. In: (2020).
- [Kle20] Achim Klenke. „Wahrscheinlichkeitstheorie“. In: (2020). DOI: 10.1007/978-3-662-62089-2.
- [Kno+21] Fanny Knoll u. a. „Momentanreserve in einem überwiegend EE-basierten Stromsystem – Eine interdisziplinäre Einführung unter Berücksichtigung technischer, ökonomischer und juristischer Aspekte“. In: (2021).
- [LK17] Joachim Lehner und Georg Kerber. „Necessary Contribution of Electric Vehicles to Limited Frequency Sensitive Mode“. In: (2017).
- [Mil10] Federico Milano. *Power System Modelling and Scripting*. Bd. 0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 978-3-642-13668-9. DOI: 10.1007/978-3-642-13669-6.
- [MJN20] Richard Marenbach, Johann Jäger und Dieter Nelles. *Elektrische Energietechnik: Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik*. 3., aktualisierte Auflage. Lehrbuch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. ISBN: 978-3-658-29491-5.
- [Sch+22] Christian Schoell u. a. „Abschaltung von dezentralen Erzeugungsanlagen infolge von Unterspannungen im Kontext von LFSM-O: Konferenz: Transformation der Stromversorgung – Netzregelung und Systemstabilität - 14. ETG/GMA-Fachtagung“. In: (2022).
- [Sch19] Walter Schitteck. *Strom – fit für die Zukunft?* 2019. DOI: 10.17170/kobra-20200212997.
- [Sol07] Susan Solomon. *CLIMATE change 2007. The physical science Basis*. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN: 978-0-521-70596-7.
- [Sta+09] K. Stark u. a. „Die Auswirkungen des Klimawandels. Welche neuen Infektionskrankheiten und gesundheitlichen Probleme sind zu erwarten?“ In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 52.7 (2009), S. 699–714. DOI: 10.1007/s00103-009-0874-9.

- [Sun+21] Mingyu Sun u. a. „Underfrequency Load Shedding Using Locally Estimated RoCoF of the Center of Inertia“. In: *IEEE Transactions on Power Systems* 36.5 (2021), S. 4212–4222. ISSN: 0885-8950. DOI: 10.1109/TPWRS.2021.3061914.
- [Tap13] Stefan Tappe. „Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie“. In: (2013). DOI: 10.1007/978-3-642-37544-6.
- [Umw23] Umweltbundesamt. *Erneuerbare Energien in Zahlen*. 2023. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick> (besucht am 08.01.2024).
- [VDE20] VDE. *Automatische Letztmaßnahmen (VDE-AR-N 4142)*. 2020.
- [VDE23] VDE. *Netzbildendes und Systemstützendes Verhalten von Erzeugungsanlagen*. 2023.
- [VSE15] Til Kristan Vrana, Harald G. Svendsen und Atsede G. Endegnanew. „Wind Power Grid Codes“. In: (2015).
- [YI10] Amirnaser Yazdani und Reza Iravani. *Voltage-sourced converters in power systems: Modeling, control, and applications*. Hoboken, NJ und Piscataway, NJ: Wiley und IEEE Press, 2010. ISBN: 978-0-470-52156-4.

# Abbildungsverzeichnis

1	Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch . . . . .	8
2	Einsatz von Regelleistung zur Frequenzhaltung . . . . .	11
3	Beispiel Schaltstufen einer Last . . . . .	22
4	Netzplan Matlab . . . . .	27
5	Ermittlung Leistungssignal Simulink . . . . .	30
6	Gesamt-Integrator Wiedereinschalten . . . . .	31
7	Wiedereinschaltschema schaltender Lasten . . . . .	32
8	Frequenzdifferenzen Wiedereinschalten . . . . .	34
9	Schema schaltende Lasten . . . . .	35
10	Schema regelbare Lasten . . . . .	35
11	Schema UFLA . . . . .	37
12	Ergebnis Untersuchung 1: Frequenz, Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten und Leistungsfluss aus dem übergeordneten Netz . . . . .	46
13	Ergebnis Untersuchung 2a: Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten . . . . .	47
14	Ergebnis Untersuchung 2b: Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten . . . . .	48
15	Ergebnis Untersuchung 2c mit LFSM-U 50 %: Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten . . . . .	49
16	Ergebnis Untersuchung 2c mit LFSM-U 100 %: Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten . . . . .	50
17	Ergebnis Untersuchung 3 mit LFSM-U 50 %: Frequenz, Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten und Leistung VSM3 . . . . .	51
18	Ergebnis Untersuchung 3 mit LFSM-U 70 %: Frequenz und Gesamtleistung nicht-VSM-Lasten . . . . .	52
19	Ergebnis Untersuchung 4 ohne Notwendigkeit von UFLA: Erste Sekunden Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten . . . . .	53
20	Ergebnis Untersuchung 4 ohne Notwendigkeit von UFLA: Frequenz, Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten und Leistung VSM6 . . . . .	54
21	Ergebnis Untersuchung 4 mit UFLA: Erste Sekunden Frequenz und Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten . . . . .	55
22	Ergebnis Untersuchung 4 mit UFLA: Frequenz, Gesamtleistung der nicht-VSM-Lasten und Leistung VSM6 . . . . .	56
23	Ergebnis Untersuchung 2a - UFLA-Stufen und Anteil LFSM-U . . . . .	57
24	Ergebnis Untersuchung 2b - Eingeschwungene Frequenz und Anteil LFSM-U . . . . .	58

25	Ergebnis Vergleich Untersuchung 4 mit und ohne UFLA . . . . .	60
26	Ausschnitt VSM Model . . . . .	71

# Tabellenverzeichnis

1	Nenngrößen VSM . . . . .	14
2	Leistungsbereiche schaltender Lasten . . . . .	19
3	Beispiel für Frequenzschwellen schaltender Lasten mit mehreren Schaltstufen . . . . .	22
4	Übersicht der schaltenden Lasten beim Wiedereinschalten . . . . .	32
5	Werte UFLA-Faktor . . . . .	36
6	Auswahl Parameter Untersuchung 1 . . . . .	39
7	Auswahl Parameter Untersuchung 2a . . . . .	40
8	Auswahl Parameter Untersuchung 2b . . . . .	41
9	Auswahl Parameter Untersuchung 2c . . . . .	41
10	Verzögerungszeiten Untersuchung 3) . . . . .	42
11	Auswahl Parameter Untersuchung 3a . . . . .	42
12	Auswahl Parameter Untersuchung 3b . . . . .	43
13	Parameter Untersuchung 4 . . . . .	44
14	Anteil LFSM-U, $\Delta P$ und stabile Frequenz . . . . .	56
15	VSM_calc Sim1.1 . . . . .	70
16	Parameter VSM Bsp.: Sim1.1 . . . . .	70
17	Parameter Lasten Bsp.: Sim 1.1 . . . . .	72
18	Parameter VSM Sim 1.2 . . . . .	73
19	Parameter VSM Sim 1.3 . . . . .	73
20	Parameter vsm_calc Sim1.2 . . . . .	73
21	Parameter vsm_calc Sim1.3 . . . . .	74
22	Parameter VSM Sim2a.1 . . . . .	74
23	Parameter VSM_calc Sim2a.1 . . . . .	74
24	Parameter VSM Sim2c.1 . . . . .	75
25	Parameter VSM_clac Sim2c.1 . . . . .	75
26	Auswahl Parameter Lasten Hochspannung 2c . . . . .	75
27	Parameter VSM Sim3 . . . . .	76
28	VSM_calc Sim3 . . . . .	76
29	Parameter VSM Sim4 . . . . .	76
30	Parameter VSM_calc Sim4.1 . . . . .	77
31	Parameter VSM_calc Sim4.2 . . . . .	77

# Anhang

## Anhang A: Verfahren zur Parametrierung der VSMs

Nachfolgend ist aufgeführt, wie das Modell der VSM parametrierung wurde und wie die Zeitkonstante  $T_A$  indirekt über die gewünschte Netzanlaufzeitkonstante  $T_N$  bestimmt wurde. Die Gleichungen (13) und (14) aus [ENT16] dienen zur Berechnung der Netzanlaufzeitkonstante  $T_N$  und der  $RoCoF_{\max}$  in auf die eine VSM regieren kann.

$$T_N = \frac{\sum_1^n T_{A,SG,n} * P_{Nom,SG,n}}{P_{Load}} \quad (13)$$

$$RoCoF_{\max} = \frac{\Delta P}{P_{Nenn}} * \frac{f_0}{T_A} \quad (14)$$

Bei der Parametrierung der VSMs wird ein  $T_N$  im Netz für eine Netzsituation vorgegeben. Bei Betrachtung im p.u.-System der jeweiligen VSM gilt:  $f_0 = 1$  und  $P_{Nenn} = 1$ , wodurch (14) auf  $RoCoF_{\max} := \frac{\Delta P}{T_A}$  reduziert wird.  $\Delta P$  ist je nach Vorzeichen der RoCoF die Leistungsreserve die die VSM aufbringen kann. Damit wird innerhalb der VSM die  $T_{a\_rise}$  für steigende Frequenzen und  $T_{a\_fall}$  für fallende Frequenzen berechnet. Bei der Modellierung der Simulationen wurden für einen Netzsituation ein beabsichtigtes  $T_N$  bestimmt. Aus (13) und [(14)], mit der Gesamtlast des Netzes  $P_{Load}$ , den Nennleistungen der VSMs  $P_{Nenn}$  und der Annahme das jede VSM mit dem gleichen Wert für  $RoCoF_{\max,min}$  arbeiten soll wurden die Werte für  $RoCoF_{\max,min}$  mittels Solver in Excel bestimmt. Die Werte in Tabelle 15 sind Rechengrößen die zu Bestimmung der  $T_a$ -Werte in Tabelle 16 dienen. Der Wert 'f\_area\_lfsmu\_pu' gibt in p.u. an wie groß der Frequenzbereich ist in dem LFSM-U bei der VSM wirksam sein soll. Mit 'p-part\_lfsm-u' wird angegeben wie hoch der Anteil der VSM an LFSM-U ist. 'lfsm-u-gain' ist der Wert der in der VSM zu Umsetzung von LFSM-U genutzt wird. Der Anteil und die Größe des Frequenzbereichs werden vorgegeben und dienen mit:

$$lfsm-u-gain = \frac{p-part\_lfsm-u}{f\_area\_lfsmu\_pu} \quad (15)$$

zur Berechnung des im Modell benötigten Werts.

In Tabelle 16 ist ein Ausschnitt des ParameterArrays zur Parametrierung der VSMs dargestellt und zeigt relevante Parameter aus Simulation 1.1. In Abbildung 26 ist zu ein Ausschnitt der VSM zu sehen und wie für die Untersuchungen relevante Parameter umgesetzt wurden. In der ersten Spalte von Abb. 16 ist die Parameternummer 'Prm\_Nr' abgebildet. Dass die Nummerierung bei 'Prm\_Nr' nicht

Prm_Nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	max_rocof_pu	0.1108	0.1108	0.1108	0.1108	0.1108
2	min_rocof_pu	-0.1575	-0.1575	-0.1575	-0.1575	-0.1575
4	f_area_lfsmu_pu	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
5	p_part_lfsm-u	0	0.1	0.1	0	0
6	lfsm-u-gain	0	8.33	8.33	0	0

Tabelle 15: VSM\_calc Sim1.1

durchgängig ist, liegt zum einen daran, dass einige der Parameter nicht aufgeführt sind da sie zwischen allen Simulationen nicht geändert wurden. Weiterhin kommt es bei der Entwicklung des Modells dazu, dass Parameter nicht mehr genutzt und aus dem Array entfernt werden. Bei den Zuweisungen im Modell (siehe Abb. 26) ist 'Prm\_Nr' die Nummer und gibt an welcher Parameter an der jeweiligen Stelle eingesetzt werden soll. Der zweite Wert 'nr\_vsm' ist der 'reference parameter' 2...6, der mit der Nummer der VSM in Tabelle 16 übereinstimmt und für die Zuweisung des richtigen Werts zur gewählten VSM sorgt. In Abbildung 26 ist weiterhin die in Kapitel 5.5 beschriebene Umsetzung von UFLA bei VSMs zu sehen. Das Submodell 'UFLS' ist identisch mit dem in Kapitel 5.5 gezeigten Schema.

Prm_Nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	sp_P	0.77	-0.857	-0.231	0	0.68
2	uplim_P	0.77	0	0	0.5	1
3	downlim_P	0	-0.857	-0.231	-0.5	0
4	upreserve_P	-0.77	0	0	-0.5	-0.68
5	downreserve_P	0	0.857	0.231	0.5	0.32
7	xvfactor	1.709	1.620	2.739	2.739	1.819
8	Ta_rise	6.952	0.000	0.000	4.514	3.611
9	Ta_fall	0.000	5.441	1.466	3.174	3.807
10	Ta_max	6.952	5.441	1.466	4.514	3.807
46	UFLS_state	0	1	1	0	0
50	seccontrol_gain	0	0	0	0	0
51	seccontrol_DeltaPmax	0	0	0	0	0
52	seccontrol_DeltaPmin	0	0	0	0	0
53	LFSM-O_gain	0	0	0	0	0
54	primcontrol_gain	0	0	0	0	9.52
55	LFSM-U_gain	0	8.33	8.33	0	0

Tabelle 16: Parameter VSM Bsp.: Sim1.1

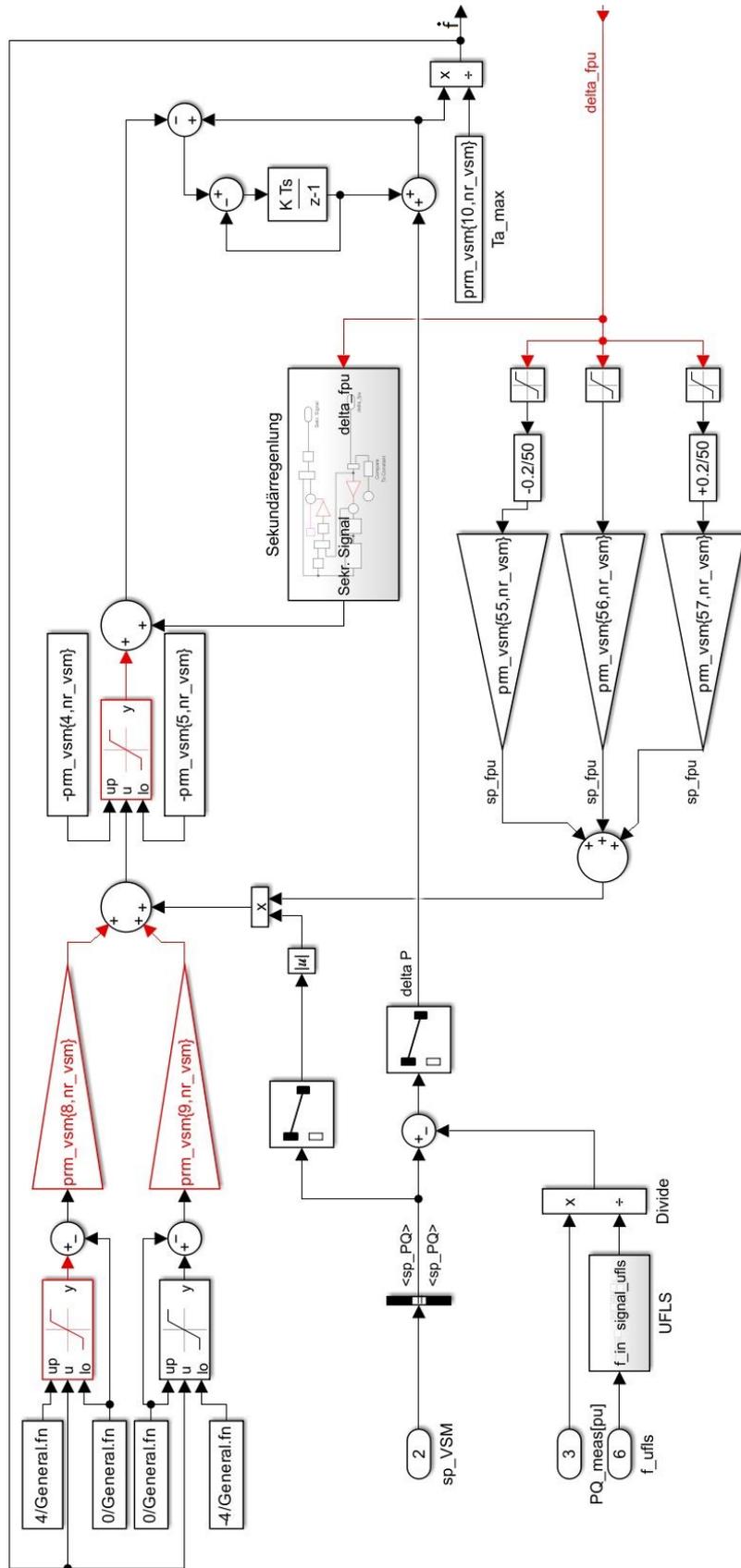


Abbildung 26: Ausschnitt VSM Model

## Anhang B: Verfahren zur Parametrierung der Lasten

In Tabelle 17 ist beispielhaft das ParameterArray für Simulation 1.1 dargestellt. Die Zuweisung innerhalb der 'Referenced Submodel' erfolgt analog zu der Zuweisung bei den VSMs. Bei den Namen der Parameter ist 'step' ein Parameter für schaltende Lasten, 'var' für regelbare Lasten, 'del' sind Verzögerungszeiten, 'UFLS-state' gibt an ob UFLA an der Last aktiv ist und 'Vnom' gibt die Nennspannung der Last an. Die ersten vier Zeilen, zu Prm\_Nr 1-3 und 5, sind Leistungswerte in p.u. und geben für jede Last die schaltende, regelbare und konstante Leistung an. Der p.u.-Basiswert ist 100 MW. 'pu\_bus' ist die gesamte Leistung einer Last. Die Wert in den Zeilen 10-18 geben den Anteil der regelbaren und schaltenden Lasten an den unterschiedlichen Verzögerungszeiten an. Zeile 20-25 gibt die Verzögerungszeiten in Sekunden an. Die Verzögerungszeiten werden nur in Untersuchung 3 verändert, die Werte für Untersuchung 3 sind in Tabelle 10 aufgeführt. Für alle anderen Simulationen werden die in Tabelle 17 aufgeführten Verzögerungszeiten verwendet.

Prm_Nr	Prm_name	Last 2	Last 3	Last 4	Last 5	Last 6	Last 9	Last 10	Last 11	Last 12	Last 13	Last 14
1	pu_fb1_step	0.00723	0.01570	0.01593	0.00253	0.00187	0.00983	0.00300	0.00117	0.00203	0.00450	0.00497
2	pu_fb2_step	0.00723	0.01570	0.01593	0.00253	0.00187	0.00983	0.00300	0.00117	0.00203	0.00450	0.00497
3	pu_var	0.00723	0.01570	0.01593	0.00253	0.00187	0.00983	0.00300	0.00117	0.00203	0.00450	0.00497
5	pu_konst	0.1953	0.4239	0.4302	0.0684	0.0504	0.2655	0.081	0.0315	0.0549	0.1215	0.1341
6	pu_Q	0.127	0.19	-0.039	0.016	0.075	0.166	0.058	0.018	0.016	0.058	0.05
7	pu_bus	0.217	0.471	0.478	0.076	0.056	0.295	0.09	0.035	0.061	0.135	0.149
10	part_step_fb1_low	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
11	part_step_fb1_med	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
12	part_step_fb1_high	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
13	part_step_fb2_low	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
14	part_step_fb2_med	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
15	part_step_fb2_high	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
16	part_var_low	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
17	part_var_med	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
18	part_var_high	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
20	del_step_load_low	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
21	del_step_load_med	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
22	del_step_load_high	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
23	del_var_load_low	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
24	del_var_load_med	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
25	del_var_load_high	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
32	UFLS_state	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	Vnom	69000	69000	69000	69000	13800	13800	13800	13800	13800	13800	13800

Tabelle 17: Parameter Lasten Bsp.: Sim 1.1

Da die Parametrierung der Lasten sich in erster Linie um den Anteil an LFSM-U dreht, sind abgesehen von den Parametern von Simulation 1.1 in Tabelle 17 nur noch die Parameter von Simulation 2c aufgeführt, um zu zeigen wie die Abweichung von der Gleichverteilung realisiert wurde. Ist bei anderen Simulationen ein Anteil LFSM-U von z.B. 50% angegeben verteilt dieser sich für jede aggregierte Last zu je einem Drittel von 50% auf schaltende Frequenzband 1 (pu\_fb1\_step), schaltende Frequenzband 2 (pu\_fb2\_step) und regelbare Lasten (pu\_var).

## Anhang C: Parametrierung je Simulation

Im Folgenden sind die Parameter der VSMs (bei 2c auch die der Lasten) und die Berechnungswerte (vsm\_calc) zu den einzelnen Simulationen aufgelistet. Zu jeder Untersuchung ist dabei einmal eine umfassendere Tabelle aufgeführt. Zu jeder weiteren Simulation zur selben Untersuchung wird dann nur noch aufgeführt was im Vergleich zur ersten Simulation verändert wurde.

Die Parameter für Simulation 1.1 sind in Anhang A aufgelistet und werden aus diesem Grund hier nicht separat aufgeführt.

Prm_Nr	Prm_name	VSM 3	VSM 4	VSM 6
1	sp_P	-0.857	-0.231	0.58
2	uplim_P	0	0	1
3	downlim_P	-0.857	-0.231	0
4	upreserve_P	0	0	-0.58
5	downreserve_P	0.857	0.231	0.42
7	xvfactor	1.71	1.62	2.74
57	LFSM-U_gain	16.67	16.67	0

Tabelle 18: Parameter VSM Sim 1.2

Prm_Nr	Prm_name	VSM 3	VSM 4	VSM 6
1	sp_P	-0.857	-0.231	0.38
2	uplim_P	0	0	1
3	downlim_P	-0.857	-0.231	0
4	upreserve_P	0	0	-0.38
5	downreserve_P	0.857	0.231	0.62
7	xvfactor	1.62	2.74	2.43
57	LFSM-U_gain	35	35	0

Tabelle 19: Parameter VSM Sim 1.3

Prm_Nr	Prm_name	VSM 3	VSM 4	VSM 6
1	max_rocof_pu	0.11076	0.11076	0.11076
2	min_rocof_pu	-0.15752	-0.15752	-0.15752
4	f_area_lfsmu_pu	0.012	0.012	0.012
5	p_part_lfsm-u	0.2	0.2	0
6	lfsm-u-gain	16.67	16.67	0

Tabelle 20: Parameter vsm\_calc Sim1.2

Prm_Nr	Prm_name	VSM 3	VSM 4	VSM 6
1	max_rocof_pu	0.11076	0.11076	0.11076
2	min_rocof_pu	-0.15752	-0.15752	-0.15752
4	f_area_lfsmu_pu	0.012	0.012	0.012
5	p_part_lfsm-u	0.42	0.42	0
6	lfsm-u-gain	35	35	0

Tabelle 21: Parameter vsm\_calc Sim1.3

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	sp_P	0.77	-0.857	-0.231	0	0.38
2	uplim_P	0.77	0	0	0.5	1
3	downlim_P	0	-0.857	-0.231	-0.5	0
4	upreserve_P	-0.77	0	0	-0.5	-0.38
5	downreserve_P	0	0.857	0.231	0.5	0.62
7	xvfactor	1.709	1.620	2.739	2.739	2.433
8	Ta_rise	11.586	0.000	0.000	7.523	6.881
9	Ta_fall	0.000	9.065	2.443	5.289	7.210
10	Ta_max	11.586	9.065	2.443	7.523	7.210
48	UFLS_state	0	1	1	0	0
52	seccontrol_gain	0	0	0	0	0
53	seccontrol_DeltaPmax	0	0	0	0	0
54	seccontrol_DeltaPmin	0	0	0	0	0
55	LFSM-O_gain	0	0	0	0	0
56	primcontrol_gain	0	0	0	0	17.039
57	LFSM-U_gain	0	4.167	4.167	0	0

Tabelle 22: Parameter VSM Sim2a.1

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	max_rocof_pu	0.06646	0.06646	0.06646	0.06646	0.06646
2	min_rocof_pu	-0.09454	-0.09454	-0.09454	-0.09454	-0.09454
4	f_area_lfsmu_pu	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
5	p_part_lfsm-u	0	0.05	0.05	0	0
6	lfsm-u-gain	0	4.167	4.167	0	0

Tabelle 23: Parameter VSM\_calc Sim2a.1

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	sp_P	0.77	-0.857	-0.231	0	0.4
2	uplim_P	0.77	0	0	0.5	1
3	downlim_P	0	-0.857	-0.231	-0.5	0
4	upreserve_P	-0.77	0	0	-0.5	-0.4
5	downreserve_P	0	0.857	0.231	0.5	0.6
7	xvfactor	1.709	1.62	2.739	2.739	2.372
8	Ta_rise	11.586	0	0	7.523	6.881
9	Ta_fall	0	9.065	2.443	5.289	7.21
10	Ta_max	11.586	9.065	2.443	7.523	7.21
52	seccontrol_DeltaPmax	0	0	0	0	0
53	seccontrol_DeltaPmin	0	0	0	0	0
54	LFSM-O_gain	0	0	0	0	0
55	primcontrol_gain	0	0	0	0	16.188
56	LFSM-U_gain	0	0	0	0	0

Tabelle 24: Parameter VSM Sim2c.1

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	max_rocof_pu	0.0665	0.0665	0.0665	0.0665	0.0665
2	min_rocof_pu	-0.0945	-0.0945	-0.0945	-0.0945	-0.0945
4	f_area_lfsmu_pu	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
5	p_part_lfsm-u	0	0.5	0.5	0	0
6	lfsm-u-gain	0	41.6667	41.6667	0	0

Tabelle 25: Parameter VSM\_clac Sim2c.1

Simulation	Prm_nr	Prm_name	Last 2	Last 3	Last 4	Last 5
2c.2	1	pu_fb1_step	0.1085	0.2355	0.239	0.038
2c.2	2	pu_fb2_step	0	0	0	0
2c.2	3	pu_var	0	0	0	0
2c.2	5	pu_konst	0.1085	0.2355	0.239	0.038
2c.3	1	pu_fb1_step	0	0	0	0
2c.3	2	pu_fb2_step	0.1085	0.2355	0.239	0.038
2c.3	3	pu_var	0	0	0	0
2c.3	5	pu_konst	0.1085	0.2355	0.239	0.038
2c.5	1	pu_fb1_step	0	0	0	0
2c.5	2	pu_fb2_step	0.217	0.471	0.478	0.076
2c.5	3	pu_var	0	0	0	0
2c.5	5	pu_konst	0	0	0	0
2c.6	1	pu_fb1_step	0.217	0.471	0.478	0.076
2c.6	2	pu_fb2_step	0	0	0	0
2c.6	3	pu_var	0	0	0	0
2c.6	5	pu_konst	0	0	0	0

Tabelle 26: Auswahl Parameter Lasten Hochspannung 2c

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	sp_P	0.77	-0.857	-0.231	0	0.4
2	uplim_P	0.77	0	0	0.5	1
3	downlim_P	0	-0.857	-0.231	-0.5	0
4	upreserve_P	-0.77	0	0	-0.5	-0.4
5	downreserve_P	0	0.857	0.231	0.5	0.6
6	sp_Q	0	0	0	0	0
7	xvfactor	1.709	1.62	2.739	2.739	2.372
8	Ta_rise	11.586	0	0	7.523	6.881
9	Ta_fall	0	9.065	2.443	5.289	7.21
10	Ta_max	11.586	9.065	2.443	7.523	7.21
52	seccontrol_DeltaPmax	0	0	0	0	0
53	seccontrol_DeltaPmin	0	0	0	0	0
54	LFSM-O_gain	0	0	0	0	0
55	primcontrol_gain	0	0	0	0	16.188
56	LFSM-U_gain	0	0	0	0	0

Tabelle 27: Parameter VSM Sim3

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	max_rocof_pu	0.0665	0.0665	0.0665	0.0665	0.0665
2	min_rocof_pu	-0.0945	-0.0945	-0.0945	-0.0945	-0.0945
4	f_area_lfsmu_pu	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
5	p_part_lfsm-u	0	0.5	0.5	0	0
6	lfsm-u-gain	0	41.6667	41.6667	0	0

Tabelle 28: VSM\_calc Sim3

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	sp_P	0.77	-0.857	-0.231	0	0.38
2	uplim_P	0.77	0	0	0.5	1
3	downlim_P	0	-0.857	-0.231	-0.5	0
4	upreserve_P	-0.77	0	0	-0.5	-0.38
5	downreserve_P	0	0.857	0.231	0.5	0.62
7	xvfactor	1.709	1.62	2.739	2.739	2.433
8	Ta_rise	11.586	0	0	7.523	6.881
9	Ta_fall	0	9.065	2.443	5.289	7.21
10	Ta_max	11.586	9.065	2.443	7.523	7.21
52	seccontrol_DeltaPmax	0	0	0	0	0.5
53	seccontrol_DeltaPmin	0	0	0	0	-0.5
54	LFSM-O_gain	0	0	0	0	0
55	primcontrol_gain	0	0	0	0	17.039
56	LFSM-U_gain	0	17.5	17.5	0	0

Tabelle 29: Parameter VSM Sim4

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
1	max_rocof_pu	0.06646	0.06646	0.06646	0.06646	0.06646
2	min_rocof_pu	-0.09454	-0.09454	-0.09454	-0.09454	-0.09454
5	p_part_lfsm-u	0	0.21	0.21	0	0
6	lfsm-u-gain	0	17.5	17.5	0	0

Tabelle 30: Parameter VSM\_calc Sim4.1

Prm_nr	Prm_name	VSM 2	VSM 3	VSM 4	VSM 5	VSM 6
5	p_part_lfsm-u	0	0.42	0.42	0	0
6	lfsm-u-gain	0	35	35	0	0

Tabelle 31: Parameter VSM\_calc Sim4.2