

Diplomarbeit

**Entwicklung eines verteilten
Koordinierungsverfahrens
für Leistungsflussregler in
Energieübertragungsnetzen**

Thomas Fürst

Diplomarbeit
am Fachbereich Informatik
der Technischen Universität Dortmund

Februar 2009

Gutachter:
Prof. Dr. Horst F. Wedde
Prof. Dr. Christian Rehtanz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziel der Arbeit	2
1.2	Verwandte Arbeiten	2
1.3	Gliederung	4
2	Elektrische Energieversorgung	5
2.1	Energieversorgungsnetze	5
2.2	Elektrotechnische Grundlagen zur Wechselstromtechnik	6
2.2.1	Sinusförmige Wechselgrößen	6
2.2.2	Effektivwerte periodisch zeitabhängiger Größen	8
2.2.3	Zeigerdarstellung von Sinusgrößen	8
2.2.4	Komplexe Darstellung von Sinusgrößen	9
2.2.5	Leistung im Wechselstromkreis	11
2.3	Leistungsflussregler	13
2.3.1	Begriffsdefinitionen	14
2.3.2	Elektrotechnische Grundlagen zur Leistungsflussregelung	14
2.3.3	Regeltransformatoren	19
2.3.4	Flexible Alternating Current Transmission Systems - FACTS	20
3	Modellbildung	21
3.1	Netzknotten	21
3.2	Erzeuger und Verbraucher	21
3.3	Leitungen	21
3.4	Leistungsflussregler	22
3.4.1	Einflussbereiche der Regler	23
3.4.2	Richtung des Einflusses auf die Netzelemente	24
3.4.3	Entstandenes Netzmodell	24
3.5	Zeitverhalten und Zeitsynchronisation	24
3.5.1	Aktions- und Reaktionsintervalle	24
3.5.2	Zentrale Zeitsynchronisation	25
4	Kommunikationsmodell	27
4.1	Eigenschaften von Netzelementen	27
4.2	Vereinfachung der Netzstruktur	27
4.2.1	Parallelbetrieb identischer Leitungen	27
4.2.2	Parallelbetrieb identischer Leistungsflussregler auf identischen Leitungen	28
4.3	Kommunikation zwischen den Netzelementen	28
4.3.1	Grundlagen der Kommunikation	28
4.3.2	Parameter zur Begrenzung des Kommunikationsaufwandes	29
4.3.3	Durchführung der Kommunikation	30
4.3.4	Erweiterung der Zustandsinformationen	31
4.4	Bestimmung von Regelungspfaden	31

4.5	Aufbereitung der Daten für Leistungsflussregler	32
4.5.1	Identifikation von Pfaden	32
4.5.2	Bestimmung der Beeinflussungsrichtung	34
4.5.3	Bestimmung der Sensitivitäten	35
4.6	Ausfall von Netzelementen	37
4.7	Zusammenfassung	38
5	Das Agentenframework - Distributed PowerGrid	39
5.1	Struktur des Agentensystems	39
5.2	Netzelemente	40
5.2.1	Leitungen	40
5.2.2	Leistungsflussregler	40
5.2.3	Erzeuger und Verbraucher	41
5.3	Die Schnittstelle zur Zustandsermittlung	41
5.4	Nachrichten	42
5.4.1	StateInformMessage	42
5.4.2	Regelungspfadnachrichten	43
5.4.3	Nachrichtenübertragung	44
5.5	Erweiterung zu einem getakteten System	44
5.5.1	Taktung des MessageService	46
6	Experimentelle Untersuchungen	47
6.1	Arbeitsweise des Algorithmus	47
6.1.1	Beispiel einer nicht abwendbaren Überlastsituation	47
6.1.2	Beispiel einer abwendbaren Überlastsituation	47
6.1.3	Zeitbedarf für die Abwendung von Überlasten	49
6.2	Beeinflussende Parameter	51
6.2.1	Parameter zur Bewertung des Netzzustandes	51
6.2.2	Parameter für die Kommunikation	52
6.3	Simulationen	52
6.3.1	Ausfall eines Netzelementes	52
6.3.2	Auftretende Überlasten bei mehreren benachbarten Reglern	58
6.3.3	Netzmodell Deutschland	63
6.3.4	Zusammenfassung der Simulationen	75
7	Fazit	77
8	Ausblick	79

Kapitel 1

Einleitung

Große Stromausfälle, wie am 4. November 2006 im europäischen Verbundnetz oder der Blackout am 14. August 2003 in den USA, zeigen, wie unzureichend vorhandene Energieübertragungsnetze gegen Störungen abgesichert sind. Abschaltungen oder Ausfälle einzelner Leitungen oder Kraftwerke können unter ungünstigen Bedingungen zu einer Kettenreaktion führen, in deren Verlauf ganze Versorgungsgebiete vom Netz getrennt werden. Gerade in großen, stark vermaschten Netzen wie dem europäischen Verbundnetz, in dem sich Energieübertragungsnetzbetreiber aus 24 Ländern in der Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE) zusammengeschlossen haben, kann durch dynamische Lastflussveränderungen die Netzstabilität gefährdet werden. In diesem Netz befinden sich mehr als 4300 Übertragungsleitungen, 2700 Transformatoren zur Spannungswandlung zwischen 380 kV und 220 kV, 600 Synchrongeneratoren und 400 Windparks [?]. Die UCTE hat es sich zur Aufgabe gemacht, in diesem Verbundnetz eine sichere und effiziente Zusammenarbeit zwischen den angeschlossenen Netzbetreibern zu gewährleisten. Der wachsende Energiekonsum und die Liberalisierung des Strommarktes, welche den Energiehandel innerhalb des Verbundnetzes erhöht, stellt dabei genauso eine Herausforderung dar, wie der steigende Anteil regenerativer Energien. Alternative Energiequellen, wie beispielsweise Windenergie, können aufgrund nicht vorhersagbarer Erzeugungsprofile innerhalb kürzester Zeiträume kritische Situationen in einigen Netzabschnitten hervorrufen.

Um diesen Herausforderungen in Zukunft gewachsen zu sein, müssen Wege gefunden werden, die Übertragungskapazitäten der Netze zu erhöhen. Durch Netzausbaumaßnahmen können die Leitungskapazitäten gesteigert werden. Derartige Maßnahmen setzen lange Planungs-, Genehmigungs- und Bauphasen voraus und sind daher nur als langfristige Lösungen relevant. Eine weitere Möglichkeit besteht in der sogenannten Netzertüchtigung. Das bedeutet, dass zur Erhöhung der Übertragungskapazität lastflussregelnde Elemente im Netz installiert werden. Neben konventionellen Querregeltransformatoren zur Leistungsflussregelung in Energienetzen, sind auf Leistungselektronik basierende FACTS-Geräte sowie Hochspannungsgleichstromübertragungen eine weitere Option zur Steuerung des Leistungsflusses.

Der Betrieb von Energieübertragungsnetzen mit n Elementen muss in der Elektrotechnik immer nach dem $(n-1)$ -Kriterium stattfinden. Das bedeutet, dass ein beliebiges Element im Netz (bspw. eine Leitung, ein Transformator oder ein Kraftwerk) ausfallen darf, ohne dass es zu Überlastungen und Ausfällen anderer Netzelemente kommt. Erst bei Eintreten zweier unabhängiger Ereignisse kann die Netzstabilität nicht mehr garantiert werden. Durch die oben beschriebenen Probleme, von erhöhten und schwankenden Lastflüssen, kann dieses Kriterium nicht immer garantiert werden. Leistungsflussregler stellen eine Möglichkeit dar, das $(n-1)$ -Kriterium auf der vorhandenen Netzstruktur zu erhalten, indem Leistungsflüsse umgelenkt werden. Durch diese Leistungsflussverschiebungen kommt es zu erhöhten Leitungsverlusten im Netz, da aufgrund der Leistungsverschiebung Ströme über längere Wege fließen. Weiterhin besteht die Gefahr, dass durch die Entlastung einer Leitung andere Elemente im Netz überlastet werden. Beeinflussen sich mehrere Leistungsflussregler gegenseitig, müssen diese Zusammenhänge bei der Leistungsflussregelung beachtet werden. Daher besteht Forschungsbedarf bei der Entwicklung, dem Einsatz und der Koordinierung von leistungsflussregelnden Betriebsmitteln in elektrischen Energieübertragungsnetzen.

1.1 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die verteilte Koordinierung von Leistungsflussreglern einen zulässigen Betrieb von Energieübertragungsnetzen bei hohen Netzauslastungen sicherzustellen. Die Grenzen für eine zulässige Betriebsführung werden durch die maximalen thermischen Belastungen der Betriebsmittel definiert. Neben der reinen Vermeidung von Überlastsituationen auf einzelnen Netzelementen, können weitere Ziele definiert werden, welche in [?] folgendermaßen formuliert sind:

„Ein in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht optimaler Betrieb eines Energieversorgungsnetzes liegt dann vor, wenn der Kraftwerkseinsatz kleinste Erzeugungskosten der Energie ergibt und alle Knotenspannungen möglichst wenig von ihrem Nennwert abweichen bzw. die Netzverluste so klein wie möglich sind. Dabei muss sichergestellt sein, dass keine physikalisch-technischen Grenzwerte verletzt, d.h. über- oder unterschritten werden.“

Ziele dieser Arbeit bezüglich der Sicherheit von Übertragungsnetzen sind die folgenden:

- Erhaltung des (n-1)-Kriteriums, indem Lastflüsse so verschoben werden, dass auch nach einem Leitungsausfall keine Überlasten auftreten oder schnell behoben werden.
- Anpassung der Regelemente im Netz an variierende Leistungsflüsse, um Überlasten zu vermeiden.
- Neben der Vermeidung von Überlasten auf Netzelementen soll auch die Minimierung der Verlustleistung im Netz betrachtet werden.

In dieser Arbeit wird ein verteilter Ansatz verfolgt, bei dem Informationen zwischen den als Agenten modellierten Netzelementen ausgetauscht werden. Welche Informationen das sind, muss untersucht werden. Alle relevanten Netzelemente sollen als Agenten modelliert werden. Die Kommunikation findet zwischen Agenten statt, die direkt miteinander verbundenen Netzelementen zugeordnet sind. Dennoch soll es möglich sein, auf Basis dieses lokalen Informationsaustausches, die oben beschriebenen Ziele zu erreichen. Aufgabe dieser Arbeit ist die Modellierung eines den Anforderungen entsprechenden Agentensystems sowie die Erforschung und Evaluierung der für die Koordinierung nötigen Aktionen und Reaktionen der einzelnen Agenten. Dazu wird einerseits die benötigte Kommunikation zwischen den Agenten betrachtet, andererseits werden Algorithmen entwickelt, mit deren Hilfe, auf Basis der lokal ausgetauschten Informationen, Regelaktionen bestimmt werden können.

1.2 Verwandte Arbeiten

Zur Erhöhung der Übertragungskapazität von Energieübertragungsnetzen stehen im Allgemeinen, neben der Anpassung der Kraftwerksleistung (*Redispatch*), zwei Ansätze zur Verfügung. Zum einen kann durch Netzausbaumaßnahmen neue Übertragungskapazität hinzugefügt werden, zum anderen besteht die Möglichkeit, das Netz um Komponenten zu erweitern, welche die Kapazität des vorhandenen Netzes durch Lenkung des Leistungsflusses sowie Kompensationsmaßnahmen erhöhen. Abhandlungen im Bereich der Netzleitung und Leistungsflusslenkung befassen sich mit der Platzierung von Leistungsflussreglern zur Optimierung der Netzauslastung und mit der Koordinierung und Regelung der Leistungsflüsse.

Einfachste Ansätze zur Leistungsflussregelung bestehen darin, überlastete Leitungen mit einem Leistungsflussregler auszurüsten. Sobald es auf der Leitung zu einer Lastüberschreitung kommt, wird der Leistungsfluss durch den Regler reduziert. Der Einfluss dieser Regelaktion auf andere Netzelemente wird nicht berücksichtigt, so dass diese eventuell überlastet werden können. Weiterhin ist es möglich, dass die Regelaktion eines Reglers eine Gegenaktion eines anderen, in der Nähe befindlichen Reglers verursacht, so dass mehrere Regler gegeneinander regeln.

In [?] stellen G. Glanzmann und G. Anderson eine Methode vor, Leistungsflussregler durch Optimierung der Leistungsflüsse zu koordinieren. Die betrachteten Optimierungskriterien sind die Überlastungen auf Leitungen, die Spannungsgrenzen der einzelnen Netzelemente sowie die Verluste auf den Übertragungsleitungen. Dabei wird auf die Mängel lokaler Betrachtungen, bei denen ein Regler nur ein einzelnes Netzelement überwacht, eingegangen. Durch eine lokale Betrachtung werden gegenseitige

Beeinflussungen mehrerer Leistungsflussregler eventuell nicht bedacht oder negative Beeinflussungen nicht berücksichtigter Netzelemente ignoriert. Darum wird eine globale Kontrollinstanz vorgeschlagen. Anhand dieses globalen Wissens wird für verschiedene FACTS-Geräte untersucht, welchen Einfluss sie auf die verschiedenen zu regelnden Größen haben. Die einzelnen Regelelemente werden koordiniert, indem auf Basis des globalen Wissens möglichst gute Einstellungen aller Regelelemente im Netz, gesucht werden. Das widerspricht der Idee einer verteilten Koordinierung.

Becker und Rehtanz stellen in [?] einen Ansatz vor, FACTS-Geräte mit Fuzzyregelung netztopologieabhängig zu koordinieren. Dieser Ansatz basiert auf einer lokalen Regelung der FACTS-Geräte in Abhängigkeit davon, ob parallele Pfade vorhanden oder ausgefallen sind. Jeder Regler kennt seine Parallelpfade und seine Regelungspfade. Diese Pfade werden überwacht, um abhängig von ihrer Lastsituation zu intervenieren. Um die Regelaktionen bestimmen zu können, muss stets bekannt sein, welche Elemente sich auf den Regelungspfaden und Parallelpfaden eines Leistungsflussreglers befinden. Dazu wird in einer Datenaufbereitungsphase eine Topologieanalyse durchgeführt. Das Netz wird als Adjazenzmatrix der Netzknoten dargestellt, in der die Verbindungen zwischen den Netzknoten eingetragen sind. Mit Hilfe eines Backtracking-Algorithmus werden, nachdem der Regelungspfad zu einem Leistungsflussregler bestimmt wurde, alle Parallelpfade zu diesem Regelungspfad ermittelt. Stehen die Topologieinformationen zur Verfügung, werden Regelbasen für diese Netztopologie erzeugt. Bei Ausfall einzelner Netzelemente muss die Topologie neu bestimmt werden, um die Regelbasen anzupassen. Die von Becker und Rehtanz vorgestellte Fuzzyregelung führt lokal Regelvorgänge aus, die von den Elementen auf den Regelungspfaden oder Parallelpfaden abhängen. Dazu werden diese Pfade mit Hilfe einer Adjazenzmatrix, welche die Netztopologie beschreibt, bestimmt. Diese Matrix stellt globales Wissen dar, welches in einem verteilten System, wie es für diese Diplomarbeit vorgesehen ist, nicht verwendet werden soll.

Verboomen befasst sich in [?] umfassend mit Phasenschiebertransformatoren zur Beeinflussung der Wirkleistungsflüsse in Energieübertragungsnetzen. Dabei wird die Platzierung und Einstellung der Regler für ein bis zwei benachbarte Regionen betrachtet. Es werden verschiedene Verfahren untersucht, um Regler so einzustellen, dass Überlastungen von Netzelementen vermieden werden. Dabei wird stets nur eine begrenzte Netzregion betrachtet, deren Zustand jedoch für die Entscheidungsfindung global bekannt ist. Es wird darauf eingegangen, dass durch die begrenzte Betrachtung und Regelung der Leistungsflüsse in ein oder zwei Regionen negative Effekte in nicht betrachteten Regionen entstehen können. Für weitere Arbeiten wird vorgeschlagen eine netzregionsübergreifende Koordinierung zu verwenden oder eine lokale Koordinierung zu entwickeln, um diese Probleme zu überwinden. Die Entwicklung einer solchen lokalen Koordinierung ist Ziel dieser Arbeit.

Ein agentenbasierter Ansatz zur Koordinierung von FACTS-Geräten wird in [?] vorgestellt. Es wird ein System vorgestellt, bei dem sich gleichartig aufgebaute autonome Komponenten, die Agenten, auf verschiedenen Hierarchieebenen im Energieübertragungsnetz befinden. Auf der untersten Ebene, der Einzelleiteebene, wird der Zustand der Netzelemente bestimmt, um so den autonomen Komponenten auf der nächsthöheren Ebene, der Gruppenleitebene, Informationen zur Verfügung zu stellen. Die Gruppenleitebene übernimmt koordinierende Aufgaben und gibt wiederum Handlungsvorschriften an die Einzelleiteebene weiter. Die oberste Ebene ist die Prozessleitebene, welche in der Energienetzstruktur einer Leitwarte zugeordnet werden kann. Durch die verschiedenen Hierarchieebenen können zeitkritische Aufgaben auf der untersten Ebene unmittelbar bearbeitet werden, während weniger zeitkritische Aufgaben auch auf höheren Ebenen bearbeitet werden können, um so bessere Ergebnisse auf Basis globaler Informationen zu erhalten. Der agentenbasierte Ansatz stellt eine Koordinierung des Netzes durch autonome Komponenten vor. Allerdings werden Hierarchien eingefügt, so dass durch die Prozessleitebene ebenfalls eine globale Sicht auf das Netz gegeben ist. In dieser Diplomarbeit soll globales Wissen vollständig vermieden werden, um Regelaktionen nur durch Kommunikation zwischen den Netzelementen, welche als autonome Agenten modelliert werden, zu bestimmen. Diese Netzelementagenten befinden sich, angelehnt an die Netzstruktur selbst, auf einer Hierarchieebene.

1.3 Gliederung

Im folgenden Kapitel 2 wird die Entwicklung der Energieversorgung und der Aufbau von Energieversorgungsnetzen erklärt. Elektrotechnische Grundlagen zur Wechselstromtechnik im Allgemeinen und zur Leistungsflussregelung im Speziellen werden aufgearbeitet. In Kapitel 3 wird ein Modell des Energieübertragungsnetzes erstellt, welches die Grundlage für die in dieser Arbeit zu entwickelnde verteilte Koordinierung bildet. Wann und auf Basis welcher Informationen Eingriffe in die Leistungsflüsse in Energieübertragungsnetzen nötig sind wird in Kapitel ?? erklärt. Die Modellierung aller Netzelemente als Agenten wird in Kapitel 4 behandelt. Die Kommunikationsvorgänge zwischen den Netzelementen als auch die Informationsaufbereitung der einzelnen Regelagenten werden dort beschrieben. Das Kapitel 5 beschreibt das in dieser Arbeit entwickelte Agentenframework zur Simulation des Agentensystems. Experimentelle Untersuchungen des entwickelten verteilten Systems werden in Kapitel 6 durchgeführt, um abschließend in Kapitel ?? ein Fazit dieser Arbeit sowie einen Ausblick auf weitere Arbeiten zu geben.

Kapitel 2

Elektrische Energieversorgung

Die öffentliche Elektrizitätsversorgung begann weltweit gegen Ende des 19. Jahrhunderts [?] und hat sich seitdem zu einem zentralen Bestandteil unserer Zivilisation entwickelt. Da sich elektrische Energie aus vielen Primärenergieformen erzeugen lässt, dank großer Verbundnetze überall verfügbar ist, über große Distanzen transportiert werden kann, sich in alle Nutzenergieformen umwandeln lässt und für die Industrie sowie Kommunikationstechnik unentbehrlich ist, ist sie gegenwärtig und auch zukünftig die wichtigste Energieform.

2.1 Energieversorgungsnetze

Abbildung 2.1: Hierarchie des Energieversorgungsnetzes

Anfänglich bestand die Elektrizitätsversorgung vor allem aus kleinen Inselnetzen die begrenzte Regionen versorgt haben. Im Laufe der Zeit wurden diese Netze miteinander verbunden, wodurch ein länderübergreifendes Netz, das Verbundnetz, entstand. Dieses Verbundnetz ist in verschiedene Spannungsebenen aufgeteilt, welche in Abbildung 2.1 dargestellt sind. Die unterste Ebene ist die Niederspannungsebene mit einer Spannung von $0,4\text{ kV}$ um Kleinverbraucher wie einzelne Haushalte zu versorgen. Darüber liegt die lokale Verteilebene mit Spannungen von 10 kV oder 20 kV , die als Mittelspannungsnetz bezeichnet wird. Die regionale Verteilebene bzw. Hochspannungsebene hat eine Betriebsspannung von 110 kV ; ihr überlagert ist die Höchstspannungsebene mit Spannungen von 220 kV oder 380 kV . Die Höchstspannungsebene dient der Energieübertragung über größere Distanzen und stellt die Verbundebene verschiedener Netzbetreiber dar. Zwischen den verschiedenen Ebenen befinden sich Transformatoren zur Umsetzung der Spannungen auf das jeweilige Spannungsniveau. Alle Spannungsebenen unter der Höchstspannungsebene sind meist als Strahlennetze oder in seltenen Fällen

als Ringnetze aufgebaut. Das bedeutet, dass das Teilnetz einer Spannungsebene aus einem Leitungsstrang besteht, der an einer Stelle mit der nächsthöheren Spannungsebene verbunden ist. Über diesen einen Leitungsstrang sind über Transformatoren mehrere Netze der nächstkleineren Spannungsebene angeschlossen. Ringnetze bieten gegenüber Strahlennetzen den Vorteil, dass durch eine Versorgungsunterbrechung auf dem Ring nicht alle Abnehmer hinter der Fehlerstelle unversorgt sind. Lediglich auf dem Höchstspannungsnetz liegt eine Vermaschung der Übertragungsleitungen vor. Dadurch entsteht eine Redundanz, die bei Ausfall einzelner Leitungen weiterhin die Versorgung aller Abnehmer mit Energie sicherstellen soll. Das gesamte Verbundnetz ist ein synchrones Drehstromnetz mit einer Frequenz von 50 Hz . Netze mit Drehstrom, welcher auch als Dreiphasen-Wechselstrom bezeichnet wird, werden mit drei stromführenden Leitern betrieben. Diese Leiter führen Wechselspannungen, welche je um 120° phasenverschoben sind.

2.2 Elektrotechnische Grundlagen zur Wechselstromtechnik

Bevor näher auf Leistungsflussregler und deren Funktionsweise eingegangen wird, werden im folgenden Abschnitt die elektrotechnischen Grundlagen, die für das Verständnis der folgenden Kapitel benötigt werden, aufgearbeitet. Die Ausführungen sind [?] entnommen und können dort ebenfalls nachvollzogen werden.

In allen elektrischen Netzen treten die beiden Größen Strom und Spannung auf. Der elektrische *Strom* ist eine gerichtete Bewegung freier Ladungsträger. Ursache für diese Bewegung ist die elektrische *Spannung*. Sind diese beiden Größen zeitlich konstant, werden sie als Gleichstrom bzw. Gleichspannung bezeichnet. Ein Gleichstrom wird mit dem Symbol I eine Gleichspannung mit U gekennzeichnet. In Energieübertragungsnetzen sind diese Größen jedoch nicht zeitlich konstant. Im Gegensatz zu Gleichspannungen bzw. Gleichströmen werden sie durch kleine Buchstaben dargestellt. Den Strom bzw. die Spannung zu einem bestimmten Zeitpunkt t bezeichnet man als *Momentanwert* oder *Augenblickswert*. Tritt dieser Wert nach einer bestimmten Zeit, der *Periodendauer* (T), erneut auf, ist die entsprechende Größe periodisch zeitabhängig. Es gilt dann für einen periodisch zeitabhängigen Strom

$$i(t) = i(t + T) = i(t + nT)$$

bzw. für eine periodisch zeitabhängige Spannung

$$u(t) = u(t + T) = u(t + nT).$$

Hierbei ist n eine beliebige ganze Zahl. Ist der zeitliche Mittelwert einer solchen Größe gleich Null, wird sie als *Wechselgröße* bezeichnet.

Definition 1 (Wechselgröße). Wechselgrößen sind dadurch gekennzeichnet, dass sich der Augenblickswert periodisch ändert und der zeitliche Mittelwert Null ist.[?]

2.2.1 Sinusförmige Wechselgrößen

Bis hierher wurden keine Annahmen über die Kurvenformen von Wechselgrößen getroffen. Da sowohl Strom als auch Spannung im Energieübertragungsnetz sinusförmige Verläufe haben, werden im Folgenden sinusförmige Wechselgrößen genauer betrachtet.

Eine sinusförmige Wechselspannung kann beispielsweise durch die in Abbildung 2.2(a) dargestellte Anordnung erzeugt werden. Eine Leiterschleife rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit ω in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte B . Durch die rotierende Leiterschleife wird der in Abbildung 2.2(b) dargestellte Spannungsverlauf erzeugt. Die physikalischen Grundlagen zur Erzeugung von Wechselspannungen durch bewegte Leiterschleifen in Magnetfeldern können in [?] nachgelesen werden. Sie sollen hier nicht näher behandelt werden. Die sich in Abbildung 2.2(b) ergebende Kurve wird als *Liniendiagramm* bezeichnet. Auf der waagerechten Achse ist die Zeit t und die dazu proportionale Winkelgeschwindigkeit ωt aufgetragen. Den größten möglichen Momentanwert der Spannung (u) bezeichnet man als *Scheitelwert* (\hat{u}). Der Momentanwert ergibt sich zu

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t). \quad (2.1)$$

(a) Leiterschleife im Magnetfeld zur Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung

(b) zeitlicher Verlauf der Wechselspannung

Abbildung 2.2: Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung [?]

Für einen Strom i gilt gleichermaßen

$$i(t) = \hat{i} \sin(\omega t). \quad (2.2)$$

Fällt der Anfang einer Wechselperiode nicht auf den Zeitpunkt $t = 0$, wie in Abbildung 2.3(a) dargestellt, wird der Winkel φ_u bzw. φ_i , der zwischen dem Beginn der positiven Halbperiode und dem Beginn der Zeitählung liegt, als *Nullphasenwinkel* bezeichnet. Spannung und Strom ergeben sich zu

(a) Erläuterung des Nullphasenwinkels

(b) Erläuterung des Phasenverschiebungswinkels

Abbildung 2.3: Erläuterung der Begriffe Nullphasenwinkel und Phasenverschiebungswinkel [?]

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \varphi_u) \quad \text{und} \quad (2.3)$$

$$i(t) = \hat{i} \sin(\omega t + \varphi_i). \quad (2.4)$$

Abbildung 2.4: Zeigerdarstellung (links) und zeitlicher Verlauf (rechts) einer sinusförmigen Spannung [?]

Die zwischen Strom und Spannung bestehende Phasenverschiebung ergibt sich wie in Abbildung 2.3(b) zu

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i. \quad (2.5)$$

Der Winkel φ wird als *Phasenverschiebungswinkel* bezeichnet.

2.2.2 Effektivwerte periodisch zeitabhängiger Größen

Von großer Bedeutung für periodisch zeitabhängige Größen ist deren *Effektivwert*. Dieser wird in [?] für einen Strom folgendermaßen definiert.

Definition 2 (Effektivwert des Stromes). Erzeugt ein periodisch zeitabhängiger Strom in einem Widerstand im Mittel die gleiche Wärmeleistung wie ein Gleichstrom, so ist der Effektivwert des Stromes gleich dem Wert des Gleichstromes [?].

Der Effektivwert einer periodisch zeitabhängigen Spannung kann genauso beschrieben werden. Für einen Strom i wird der Effektivwert mit dem Großbuchstaben I gekennzeichnet, gleichermaßen ist für eine Spannung u der Effektivwert U . Die Effektivwerte ergeben sich aus den Scheitelwerten der jeweiligen Wechselgrößen zu

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \text{ und} \quad (2.6)$$

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}. \quad (2.7)$$

Die genaue Herleitung kann in [?] nachvollzogen werden und wird hier nicht näher erläutert.

2.2.3 Zeigerdarstellung von Sinusgrößen

Die Darstellung von sinusförmigen Wechselgrößen in Liniendiagrammen als auch die Verwendung der entsprechenden Gleichungen (vgl. Formel 2.3 und 2.4) erweist sich bei der Berechnung von Wechselstromkreisen als aufwendig. Das hat dazu geführt, zu der im Folgenden beschriebenen Zeigerdarstellung überzugehen. Abbildung 2.4 enthält ein vom Mittelpunkt M ausgehenden Strahl der Länge \hat{u} . Diese Länge entspricht dem Scheitelwert der beispielhaft betrachteten Wechselspannung u . Dieser Strahl wird als Zeiger bezeichnet und mit dem unterstrichenen Symbol $\underline{\hat{u}}$ gekennzeichnet. Der Zeiger rotiert mit der Winkelgeschwindigkeit ω , welche gleich der Kreisfrequenz der Wechselspannung ist, entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn um den Mittelpunkt M . Im Zeitpunkt t_1 hat der Zeiger den Winkel ωt_1 zurückgelegt und im Zeitpunkt t_2 den Winkel ωt_2 . Die senkrechte mit Z gekennzeichnete Linie heißt *Zeitlinie*. Wird in der rechten Abbildung der zurückgelegte Winkel ωt waagrecht und die Projektion des Zeigers $\underline{\hat{u}}$ auf die Zeitlinie senkrecht aufgetragen, entsteht die dargestellte Sinuskurve. Die Wiedergabe von Wechselgrößen als drehende Zeiger wird als *Zeigerdarstellung* bezeichnet.

Werden mehrere Zeiger in einem gemeinsamen Bild dargestellt spricht man von einem *Zeigerdiagramm*.

Abbildung 2.5: Zeigerdiagramm (links) und zeitlicher Verlauf (rechts) einer Spannung u und eines Stromes i [?]

Ein solches ist in Abbildung 2.5 für einen Strom i und eine Spannung u dargestellt. Der Strom i hat einen negativen Nullphasenwinkel φ_i . Im Zeigerdiagramm ist \hat{i} daher um diesen Winkel verschoben. Der Phasenverschiebungswinkel ist durch $\varphi = -\varphi_i$ gegeben. Da die Momentanwerte der Wechselgrößen im Allgemeinen nicht benötigt werden, ist die Darstellung der zugehörigen Sinuskurven überflüssig. Somit wird auch das Achskreuz des Zeigerdiagramms nicht mehr benötigt. Es werden wie in Abbildung 2.6 nur die Zeiger der Wechselgrößen und der Phasenverschiebungswinkel dargestellt. In dieser Darstellung

(a) Zeigerdiagramm entsprechend Abbildung 2.5	(b) gedrehtes Zeigerdiagramm	(c) Parallelverschiebung eines Zeigers	(d) Effektivwertdarstellung der Zeiger
---	------------------------------	--	--

Abbildung 2.6: Verschiedene Zeigerdiagramme der gleichen Wechselgrößen [?]

ist es möglich das gesamte Zeigerdiagramm zu drehen (vgl. Abbildung 2.6(b)) oder einzelne Zeiger parallel zu verschieben (vgl. Abbildung 2.6(c)). In Abbildung 2.6(d) sind die Effektivwerte der Größen dargestellt, wodurch die Länge der Zeiger verändert wird.

2.2.4 Komplexe Darstellung von Sinusgrößen

Durch die Zeigerdarstellung kann die Addition phasenverschobener Wechselgrößen gleicher Frequenz auf einfache Art grafisch durchgeführt werden. Mit Hilfe der komplexen Rechnung ist es möglich, eine mathematische Beschreibung des Zeigerdiagramms vorzunehmen.

Zusätzlich zu den reellen Zahlen werden für die komplexe Rechnung imaginäre Zahlen verwendet. Deren Einheit wird mit j bezeichnet und ist durch

$$j = \sqrt{-1} \quad (2.8)$$

gegeben. Die Summe einer reellen und einer imaginären Zahl ist eine komplexe Zahl. Jede komplexe Zahl lässt sich durch einen Punkt auf der Gauß'schen Zahlenebene wiedergeben und ist durch

$$\underline{Z} = R + jX \quad (2.9)$$

definiert. Zur Kennzeichnung dient ein Zeiger vom Ursprung der Zahlenebene zum betreffenden Punkt. Das ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Der Realteil von \underline{Z} ist durch

Abbildung 2.7: Darstellung einer komplexen Zahl in der Gauß'schen Zahlenebene [?]

$$\operatorname{Re}\{\underline{Z}\} = R \quad (2.10)$$

und der Imaginärteil durch

$$j \operatorname{Im}\{\underline{Z}\} = jX \quad (2.11)$$

definiert. Die Darstellung entsprechend Gleichung 2.9 wird als *Komponentenform* bezeichnet. Der Betrag einer komplexen Zahl ergibt sich durch

$$|\underline{Z}| = Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (2.12)$$

Weiterhin können Realteil und Imaginärteil durch

$$R = Z \cos \varphi \quad \text{und} \quad (2.13)$$

$$X = Z \sin \varphi \quad (2.14)$$

beschrieben werden, so dass sich

$$\underline{Z} = Z(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (2.15)$$

ergibt. Nach dem Euler'schen Satz

$$\cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi} \quad (2.16)$$

kann die komplexe Zahl dann als

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi} \quad (2.17)$$

wiedergegeben werden. Diese Form wird als *Polarform* bezeichnet.

Um eine Wechselgröße mit komplexen Zahlen darzustellen, wird der Spannungszeiger in die komplexe Ebene eingetragen, wie beispielhaft in Abbildung 2.8 dargestellt. Es ist ein Zeiger \underline{U} dargestellt, dessen Länge dem Effektivwert U einer sinusförmigen Spannung

$$u = \hat{u} \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (2.18)$$

entspricht. Dieser, mit der Winkelgeschwindigkeit ω , rotierende Zeiger kann im Zeitpunkt t durch

$$\underline{U} = U e^{j(\omega t + \varphi_u)} \quad (2.19)$$

bzw. in Komponentenform durch

$$\underline{U} = U \cos(\omega t + \varphi_u) + jU \sin(\omega t + \varphi_u) \quad (2.20)$$

beschrieben werden. Werden die Momentanwerte außer Acht gelassen, ergeben sich die Formeln 2.19 bzw. 2.20 zu

$$\underline{U} = U e^{j(\varphi_u)} \quad \text{bzw.} \quad (2.21)$$

$$\underline{U} = U \cos(\varphi_u) + jU \sin(\varphi_u) \quad (2.22)$$

Durch Eliminieren des *Drehfaktors* $e^{j\omega t}$ ist aus dem *Drehzeiger* aus Gleichung 2.19 der in Gleichung 2.21 dargestellte *Festzeiger* geworden. Im Weiteren werden ausschließlich Festzeiger verwendet.

Abbildung 2.8: Darstellung eines Spannungszeigers in der komplexen Ebene [?]

2.2.5 Leistung im Wechselstromkreis

Zur Einführung des Begriffes der elektrischen Leistung soll zuerst die Leistung im Gleichstromkreis betrachtet werden. Liegt an einem Widerstand R eine Spannung U an, wird dem Widerstand eine Energie oder Arbeit (W) von

$$W = UQ$$

zugeführt. Q stellt die durch den Widerstand fließende Ladung dar. Mit

$$Q = It,$$

wobei I die Stromstärke und t die Dauer des Stromflusses ist, ergibt sich die Arbeit zu

$$W = UIt. \quad (2.23)$$

Die pro Zeiteinheit übertragene Energie bezeichnet man als Leistung mit dem Symbol P . Sie ergibt sich folgendermaßen:

$$P = \frac{W}{t} \quad (2.24)$$

Aus den Gleichungen 2.23 und 2.24 folgt mit

$$P = UI \quad (2.25)$$

die Leistung, die dem Widerstand zugeführt wird.

Für die Betrachtungen in einem Wechselstromkreis, wie Abbildung 2.9 ihn zeigt, werden eine Spannung

Abbildung 2.9: Einfacher Wechselstromkreis [?]

$$u = \hat{u} \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.26)$$

und ein Strom

$$i = \hat{i} \sin(\omega t) \quad (2.27)$$

angenommen. Die Spannungsquelle, welche die Spannung u erzeugt, ist mit einem Wechselstromverbraucher \underline{Z} verbunden. Der Momentanwert der Leistung wird mit p bezeichnet und ergibt sich zu

$$p = ui \stackrel{2.26, 2.27}{=} \hat{u}\hat{i} \sin(\omega t) \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.28)$$

Die Verläufe der Spannung u , des Stromes i und der Leistung p sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Gleichung 2.29 kann durch trigonometrische Umformungen zu

Abbildung 2.10: Erklärung der Wirkleistung [?]

$$p = \frac{1}{2} \hat{u}\hat{i} [\cos(\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)] \quad (2.29)$$

umgewandelt werden. Werden statt der Scheitelwerte die Effektivwerte eingesetzt, ergibt sich

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \quad (2.30)$$

Der Ausdruck $UI \cos \varphi$ ist der zeitliche Mittelwert, um den der Augenblickswert der Leistung schwingt. Dieser wird als *Wirkleistung* (P) bezeichnet. Diese ist ebenfalls in Abbildung 2.10 enthalten.

Wird für den Phasenverschiebewinkel φ ein Wert von $+/- 90^\circ$ angenommen, ergibt sich der Momentanwert der Leistung zu

$$p = -UI \cos(2\omega t + / - 90^\circ). \quad (2.31)$$

Abbildung 2.11 zeigt diese Situation. Der zeitliche Mittelwert und damit die Wirkleistung ist in diesem

Abbildung 2.11: Einführung der Blindleistung [?]

Fall Null. Es fließt dauernd eine Energie zwischen der Spannungsquelle und dem Verbraucher hin und her. Die dabei auftretende Leistung wechselt periodisch ihre Richtung. Diese Leistung wird als *Blindleistung* (Q) bezeichnet. Sie ist durch

$$Q = UI \sin \varphi \quad (2.32)$$

definiert. Multipliziert man lediglich die Effektivwerte des Stromes und der Spannung miteinander, ergibt sich die *Scheinleistung* (S) folgendermaßen:

$$S = UI \quad (2.33)$$

Scheinleistung, Wirkleistung und Blindleistung sind über folgende Zusammenhänge verbunden:

$$P = S \cos \varphi \quad (2.34)$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (2.35)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.36)$$

Das Verhältnis zwischen Wirkleistung und Scheinleistung, welches sich nach Gleichung 2.34 durch

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.37)$$

ergibt, wird als *Leistungsfaktor* ($\cos \varphi$) bezeichnet.

Durch komplexe Rechnung kann die Scheinleistung aus der anliegenden Spannung und dem anliegenden Strom berechnet werden. Dazu sei eine Spannung

$$\underline{U} = U e^{j\varphi_u} \quad (2.38)$$

und ein Strom

$$\underline{I} = I e^{j\varphi_i} \quad (2.39)$$

gegeben. Der Phasenverschiebungswinkel ergibt sich zu:

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad (2.40)$$

Aus dem Produkt der Spannung und des komplex konjugierten Stromes kann die Scheinleistung bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \underline{S} &= \underline{U} \underline{I}^* \\ &= UI e^{j\varphi_u} e^{-j\varphi_i} \\ &= UI e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} \\ &= UI e^{j\varphi} \end{aligned} \quad (2.41)$$

In Komponentenform dargestellt ergibt sich die Scheinleistung zu:

$$\underline{S} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi \stackrel{2.34, 2.35}{=} P + jQ \quad (2.42)$$

2.3 Leistungsflussregler

Das elektrische Energienetz dient zum Transport von Leistung von den Erzeugern zu den Verbrauchern. Die gesamte übertragene Leistung wird als Scheinleistung \underline{S} bezeichnet. Diese setzt sich aus der Wirkleistung P und der Blindleistung Q zusammen. Lediglich der Wirkleistungsanteil kann in andere Energieformen umgesetzt werden. Mit der Blindleistung kann keine nutzbare Arbeit verrichtet werden. Blindleistungsflüsse entstehen, wenn Leistung aus dem Netz aufgenommen und zeitversetzt wieder in das Netz zurück gespeist wird. Das geschieht beispielsweise, wenn elektrische Bauelemente wie Spulen oder Kondensatoren an das Netz angeschlossen sind. Der Blindleistungsanteil dient zum Auf- und Abbauen von magnetische Feldern in diesen Bauelementen. Es entsteht eine Leistungspendelung zwischen

dem Erzeuger und dem Verbraucher, welche das Netz zusätzlich beansprucht. Induktive und kapazitive Anteile befinden sich in nahezu allen Netzelementen, auch in den Übertragungsleitungen selbst. Daher sind Blindleistungsflüsse in Drehstromnetzen nicht vermeidbar. Je mehr Blindleistung transportiert werden muss, umso weniger Leitungskapazität steht für den Transport von Wirkleistung zur Verfügung.

Leistungsflussregler sind Netzelemente, die es ermöglichen Einfluss auf die Lastflüsse im Energieübertragungsnetz zu nehmen. Dabei kann zwischen querregelnden Elementen zur Wirkleistungsregelung, längsregelnden Elementen zur Blindleistungsregelung bzw. Spannungsstabilisierung sowie Schrägreglern, welche beide Funktionen vereinen, unterschieden werden. Jeder Eingriff eines Reglers in die Lastverhältnisse eines Energieübertragungsnetzes hat einen räumlich begrenzten Einfluss [?]. Durch einen Regelvorgang verändert ein Regler den Lastfluss. Diese Lastflussänderung teilt sich auf die umliegenden Netzelemente, die auf einem zu dem Lastflussregler parallelen Pfad liegen, auf. Die Last wird sinngemäß vom Regler weggeschoben oder zum Regler hingezogen. Als Leistungsflussregler stehen verschiedene technische Realisierungen zur Verfügung, welche nach einer grundlegenden Einführung in die Funktionsweise von Leistungsflussreglern kurz erläutert werden.

2.3.1 Begriffsdefinitionen

Bevor in den folgenden Abschnitten genauer auf leistungsflussregelnde Betriebsmittel eingegangen wird, werden einige grundlegende Begriffe definiert.

Definition 3 (Regelungspfad). Leitungszug, der zwischen seinem Anfangs- und Endknoten ein leistungsflussregelndes Betriebsmittel enthält und nur an seinem Anfangs- und Endknoten Verzweigungen aufweist [?].

Der Begriff des Parallelpfades wird für diese Arbeit allgemeiner als in [?] definiert.

Definition 4 (Parallelpfad). Ein Parallelpfad ist ein Pfad, der Anfangs- und Endknoten eines Regelungspfades miteinander verbindet, jedoch nicht der Regelungspfad selbst ist.

Ein Parallelpfad darf nach dieser Definition auch leistungsflussregelnde Elemente enthalten. Dies ist nötig, da in dem in dieser Arbeit entwickelten verteilten System auch Parallelpfade, die Leistungsflussregler enthalten, in die Regelung einbezogen werden. Diese Parallelpfade können in geregelte und ungeregelte Pfade unterteilt werden.

Definition 5 (geregelter Parallelpfad). Ein geregelter Parallelpfad ist ein Pfad der Anfangs- und Endknoten eines Regelungspfades miteinander verbindet, wobei sich mindestens ein zusätzlicher Leistungsflussregler auf dem Pfad befindet.

Definition 6 (ungeregelter Parallelpfad). Ein ungeregelter Parallelpfad ist ein Leitungszug der Anfangs- und Endknoten eines Regelungspfades miteinander verbindet, jedoch kein leistungsflussregelndes Betriebsmittel enthält.

Die Definition des unregulierten Parallelpfades entspricht der Definition des Parallelpfades in [?].

2.3.2 Elektrotechnische Grundlagen zur Leistungsflussregelung

Die Regelung von Leistungsflüssen über Netzelemente soll im Folgenden anhand eines Regeltransformators erklärt werden. Ein *Regeltransformator* ermöglicht es, die Spannung an einem Anschluss gegenüber der Spannung am anderen Anschluss zu verändern. Die Funktionsweise von Regeltransformatoren ist in [?] beschrieben. Die Spannungsänderung kann auch so verstanden werden, dass zur Spannung an einem Anschluss des Transformators eine Zusatzspannung addiert wird. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Zur Spannung \underline{U}_1 am Anschluss 1 des Transformators wird die Spannung $\underline{\Delta U}$ addiert, so dass sich die Spannung \underline{U}_2 am Anschluss 2 des Transformators einstellt. Zwischen den beiden Spannungen \underline{U}_1 und \underline{U}_2 stellt sich der Winkel φ ein.

Normalerweise wird ein Transformator dazu eingesetzt, die Spannung zwischen zwei Spannungsebenen

Abbildung 2.12: Zeigerdiagramm der Spannungen an den Anschlüssen eines Leistungsflussreglers

zu übersetzen. Die Spannungsumsetzung durch einen Transformator hat keinen Einfluss auf die übertragene Scheinleistung, da aufgrund der Leistungsinvarianz, abgesehen von Verlustleistung im Transformator, die Eingangsscheinleistung gleich der Ausgangsscheinleistung sein muss.

$$\begin{aligned}\underline{S}_1 &= \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* \\ \underline{S}_2 &= \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* \\ \underline{S}_1 &= \underline{S}_2\end{aligned}$$

Existiert neben dem Regelungspfad des Transformators ein Parallelpfad, kann der Transformator zur Beeinflussung der Leistungsflüsse in dem Netz genutzt werden. Ist die addierte Zusatzspannung rechtwinklig zur vorhandenen Spannung, also in Querrichtung, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, wird eine Beeinflussung des Wirkleistungsflusses bewirkt. Eine Zusatzspannung, welche in Phase zur vorhandenen Spannung ist, bewirkt eine Veränderung des Blindleistungsflusses. Durch unterschiedliche Spannungswinkel ist es möglich, sowohl die Blindleistung als auch die Wirkleistung zu beeinflussen. Die grundlegenden Zusammenhänge werden im Folgenden hergeleitet.

(a) Netzmasche

(b) Idealisierte Darstellung

Abbildung 2.13: Anschauungsbeispiel für die Wirkungsweise eines Leistungsflussreglers

In Abbildung 2.13(a) ist ein Netzausschnitt dargestellt, in dem ein Leistungsflussregler über zwei Leitungen mit einem externen Netz verbunden ist. Durch das externe Netz wird der betrachtete Ausschnitt mit Spannung versorgt. Da keine Verbraucher vorhanden sind, liegt an allen Netzknoten die gleiche Spannung an. Abgesehen von Verlustströmen fließt auf den Leitungen ebenfalls kein Strom. Zur Vereinfachung werden die kapazitiven und ohmschen Anteile der Leitungsimpedanzen vernachlässigt, da diese gegenüber der Leitungsinduktivität sehr gering sind. Die Leitungen können so vereinfacht als Induktivitäten dargestellt werden. Für den Leistungsflussregler werden aus dem gleichen Grund ebenfalls die ohmschen Anteile vernachlässigt, so dass die innere Impedanz des Transformators nur aus der Induktivität X_{LFR} besteht. Der Transformator kann somit vereinfacht als Reihenschaltung eines idealen Übersetzers, welcher eine Spannungsdifferenz erzeugt, und einer Induktivität betrachtet werden. Abbildung 2.13(b) zeigt das betrachtete Netz nach Anwendung dieser Vereinfachungen. Es ist eine

idealisierte Darstellung entstanden. Der Netzknoten zwischen der Transformatorinduktivität und dem Übersetzer wird mit T bezeichnet. Auf Basis dieser idealen Darstellung soll die Wirkungsweise eines Leistungsflussreglers erklärt werden.

Befindet sich der Leistungsflussregler und damit der ideale Übersetzer in Nullstellung, haben alle Knoten in dem dargestellten Netz die gleiche vom externen Netz erzeugte Spannung. Wird durch den idealen Übersetzer eine zusätzliche Spannung am Knoten T addiert, erzwingt dies einen Leistungsfluss im Uhrzeigersinn. Dieser wird nachfolgend begründet.

Die Spannungen an den Knoten U und T seien durch \underline{U}_T und \underline{U}_1 gegeben.

$$\underline{U}_T = U_T e^{j\varphi_T} = U_T \cos(\varphi_T) + jU_T \sin(\varphi_T) \quad (2.43)$$

$$\underline{U}_1 = U_1 e^{j\varphi_1} = U_1 \cos(\varphi_1) + jU_1 \sin(\varphi_1) \quad (2.44)$$

Die Winkel φ_T und φ_1 sind die Nullphasenwinkel der Spannungen \underline{U}_T und \underline{U}_1 . Da für die folgenden Betrachtungen der Unterschied der Spannung \underline{U}_T am Knoten T relativ zur Spannung \underline{U}_1 am Knoten 1 relevant ist, kann der Nullphasenwinkel von \underline{U}_1 zu Null gesetzt werden. Damit ergeben sich die folgenden Werte für die Spannungen an den Knoten:

$$\underline{U}_T = U_T e^{j\varphi} = U_T \cos(\varphi) + jU_T \sin(\varphi) \quad (2.45)$$

$$\underline{U}_1 = U_1 \quad (2.46)$$

Der betrachtete Leistungsflussregler hat eine interne Induktivität von X_{LFR} . Die Leitungen besitzen eine Induktivität von X_{L1} und X_{L2} . Daraus ergibt sich die Impedanz \underline{Z} , über die die Spannungsdifferenz $\underline{\Delta U}$ zwischen \underline{U}_1 und \underline{U}_T abfällt zu:

$$\underline{Z} = j(X_{LFR} + X_{L1} + X_{L2}) = jX \quad (2.47)$$

Die Scheinleistung \underline{S} an einem Anschluss eines Netzelementes kann nach den ohmschen Gesetzen mit der folgenden Abhängigkeit ermittelt werden:

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* \quad (2.48)$$

Wobei \underline{U} die Spannung an dem Anschluss des Netzelementes beschreibt und \underline{I}^* den komplex konjugierten Strom an diesem Anschluss. Nach der Kirchhoff'schen Maschenregel ist die Summe aller Spannungen in einem Maschenumlauf Null. Somit ist die durch den Übersetzer erzeugte Spannungsdifferenz im Beispiel aus Abbildung 2.13(b) gleich der Summe der Spannungen, die über den Induktivitäten der Leitungen und des Leistungsflussreglers abfällt. Die Spannungsdifferenz $\underline{\Delta U}$ ergibt sich zu:

$$\underline{\Delta U} = \underline{U}_T - \underline{U}_1. \quad (2.49)$$

Der Strom \underline{I} durch die Impedanz \underline{Z} ergibt sich aus der eingepprägten Spannungsdifferenz $\underline{\Delta U}$ nach dem ohmschen Gesetz.

$$\underline{I} = \frac{\underline{\Delta U}}{\underline{Z}} \quad (2.50)$$

$$\stackrel{2.47, 2.49}{=} \frac{U_T - U_1}{jX}$$

$$\stackrel{2.45, 2.46}{=} \frac{U_T \cos(\varphi) + jU_T \sin(\varphi) - U_1}{jX}$$

$$= \frac{-jU_T \cos(\varphi) + U_T \sin(\varphi) + jU_1}{X}$$

$$\underline{I}^* = \frac{jU_T \cos(\varphi) + U_T \sin(\varphi) - jU_1}{X} \quad (2.51)$$

Der komplex konjugierte Strom \underline{I}^* aus Gleichung 2.51 kann in Formel 2.48 eingesetzt werden, um die übertragene Scheinleistung \underline{S} zu ermitteln.

$$\underline{S} = \frac{(U_T \cos(\varphi) + jU_T \sin(\varphi))(jU_T \cos(\varphi) + U_T \sin(\varphi) - jU_1)}{X} \quad (2.52)$$

$$= \frac{jU_T^2 - jU_T U_1 \cos(\varphi) + U_T U_1 \sin(\varphi)}{X}$$

Wirkleistung und Blindleistung getrennt ergeben sich zu:

$$P = \frac{U_T U_1 \sin(\varphi)}{X} \quad (2.53)$$

$$Q = \frac{U_T^2 - U_T U_1 \cos(\varphi)}{X}. \quad (2.54)$$

Eine Zusatzspannung in Querrichtung an Knoten T verändert vor allem den Phasenwinkel φ zwi-

(a) Zeigerdiagramm mit zugefügter Querspannung

(b) Zeigerdiagramm mit zugefügter Längsspannung

Abbildung 2.14: Zeigerdiagramme für verschiedene Zusatzspannungen

schen den Spannungen an den Knoten 1 und T (vgl. Abbildung 2.14(a)). Die Beträge der Spannungen werden nur wenig beeinflusst. Nach Gleichung 2.53 besteht ein starker Zusammenhang zwischen den Phasenwinkeln der Spannungen und dem Wirkleistungsfluss. Die Blindleistung wird nur geringfügig beeinflusst.

Eine Zusatzspannung in Längsrichtung an Knoten T, wie sie in Abbildung 2.14(b) dargestellt ist, beeinflusst den Phasenwinkel nicht. Daher ist die Wirkleistungsänderung nach Gleichung 2.53 Null. Zwischen Spannungsbetrag und Blindleistung besteht hingegen nach Gleichung 2.54 ein starker Zusammenhang.

Aus den hergeleiteten Zusammenhängen wird klar, dass ein Leistungsflussregler einen Leistungsfluss erzwingt, sofern es einen Parallelpfad zum Regelungspfad des Reglers gibt. Existiert kein paralleler Pfad, kann ein Leistungsflussregler den Leistungsfluss nicht beeinflussen, da der Ausgleich der Leistungsbilanz zwischen Erzeugung und Verbrauch nicht verhindert werden kann. Es ist also nur eine Verschiebung des Leistungsflusses von einem Leitungszug auf einen anderen Leitungszug möglich [?]. Das ist in Abbildung 2.15 dargestellt. In diesem Beispiel gibt es zwischen einem Erzeuger und einem Verbraucher nur eine Verbindung. Befindet sich auf dieser Verbindung ein Leistungsflussregler, kann dieser den Lastfluss nicht beeinflussen, egal wie stark der Regler versucht durch Regelvorgänge einzugreifen. Es würde sich lediglich eine komplexe Spannungsdifferenz zwischen den beiden Anschlüssen einstellen, da diese durch den Leistungsflussregler selbst erzeugt wird. Gibt es einen parallelen Pfad kann der Leistungsflussregler

Abbildung 2.15: Leistungsflussregler, der keinen Einfluss auf den Lastfluss auf seinem Regelungspfad ausüben kann, da es keinen parallelen Pfad gibt.

den Lastfluss verschieben, auch dann, wenn sich auf diesem Pfad ebenfalls ein Leistungsflussregler befindet. In Abbildung 2.16 ist dies dargestellt. Es ist möglich, dass der Effekt der Regelaktion des

Abbildung 2.16: Darstellung zwei paralleler Leistungsflussregler.

einen Reglers durch eine darauffolgende Regelaktion des anderen Reglers aufgehoben wird, so dass nachdem beide Regler jeweils einmal geregelt haben, eventuell die gleiche Auslastungssituation wie vor den Regelvorgängen vorliegt.

In Abbildung 2.17 ist dargestellt, wie sich ein Lastfluss, der durch Regler r_2 verschoben wird, auf die alternativen Pfade verschiebt. Durch den Leistungsflussregler wird eine Lastverschiebung von ΔP_2 vorgenommen. Die Verteilung des Lastflusses hängt vorwiegend von den Leitungsinduktivitäten X_i ab, da in Höchstspannungsnetzen $X \gg R$ gilt [?]. Daher ist $\Delta P_1 = \frac{X_3}{X_1+X_3} \Delta P_2$ und $\Delta P_3 = \frac{X_1}{X_1+X_3} \Delta P_2$.

Abbildung 2.17: Aufteilung der Lastflüsse auf andere Pfade

Bei nicht idealisierter Betrachtung der Netzelemente setzt sich der Widerstand von Leitungen aus induktiven, kapazitiven und ohmschen Anteilen zusammen. Aufgrund der ohmschen Anteile kommt es zu Wirkleistungsverlusten auf Leitungen. Die entstehenden Verluste ergeben sich, wie in Gleichung 2.55 dargestellt, aus dem Quadrat des Leitungsstromes und dem ohmschen Anteil des Leitungswiderstandes.

$$P_v = RI^2 \quad (2.55)$$

Jede Leistungsverschiebung durch Leistungsflussregler hat Einfluss auf die Verlustleistung im Netz. Im Folgenden wird gezeigt, dass die Verlustleistung minimal ist, wenn sich der Lastfluss entsprechend dem natürlichen Leistungsausgleich verteilen kann.

In Abbildung 2.18 sind zwei parallele Leitungen dargestellt. Beide Leitungen verbinden einen Erzeuger im Norden mit einem Verbraucher im Süden. Die Widerstandsbeläge und Induktivitätsbeläge beider Leitungen seien gleich, so dass X proportional zu R ist. Der Strom teilt sich entsprechend der Stromteilerregel auf die Leitungen l_r und l_p auf.

$$I_r = \frac{X_p}{X_r + X_p} I = \frac{R_p}{R_r + R_p} I \quad (2.56)$$

$$I_p = \frac{X_r}{X_r + X_p} I = \frac{R_r}{R_r + R_p} I \quad (2.57)$$

Die einzelnen Verlustleistungen beider Leitungen ergeben die Gesamtverlustleistung.

$$P_v = R_r I_r^2 + R_p I_p^2 = \frac{R_r R_p}{R_r + R_p} I^2 \quad (2.58)$$

Durch einen Regelvorgang des Leistungsflussreglers wird ein zusätzlicher Strom ΔI erzeugt, welcher den Strom auf einer der beiden Leitungen erhöht auf der anderen hingegen verringert. Wie in den

Abbildung 2.18: Aufteilung des Lastflusses auf zwei parallele Pfade

folgenden Formeln zu sehen ist, ist die Verlustleistung für jeden Strom ΔI ungleich Null, größer als die Verlustleistung, die sich bei natürlicher Lastflussausbreitung ergibt.

$$\begin{aligned}
 P_v(\Delta I) &= \left(\frac{R_p}{R_r + R_p} I - \Delta I\right)^2 R_r + \left(\frac{R_r}{R_r + R_p} I + \Delta I\right)^2 R_p & (2.59) \\
 &= \left(\frac{R_p^2}{(R_r + R_p)^2} I^2 - 2\frac{R_p}{R_r + R_p} I \Delta I + \Delta I^2\right) R_r + \\
 &\quad \left(\frac{R_r^2}{(R_r + R_p)^2} I^2 + 2\frac{R_r}{R_r + R_p} I \Delta I + \Delta I^2\right) R_p \\
 &= \frac{R_r R_p^2 + R_r^2 R_p}{(R_r + R_p)^2} I^2 + (R_r + R_p) \Delta I^2 \\
 &= \frac{R_r R_p}{R_r + R_p} I^2 + (R_r + R_p) \Delta I^2 \\
 &> I^2 \frac{R_r R_p}{R_r + R_p}
 \end{aligned}$$

Aus diesem Zusammenhang wird klar, dass es wichtig ist, keine unnötigen Regelvorgänge im Netz vorzunehmen. Wann ein Regelvorgang unnötig ist, hängt vom jeweiligen Regelungsziel ab. Besteht das Ziel einer Regelung in der Überlastvermeidung, sollten Regler stets nur Eingriffe in die Lastflussverteilung vornehmen, wenn Leitungsüberlastungen eingetreten sind oder drohen einzutreten. Befindet sich ein Regler nicht in der neutralen Position, liegt ein Eingriff in die Lastflussverteilung vor. Ist ein solcher Eingriff nicht mehr nötig, da eine Überlast nicht mehr auftritt, auch wenn der Regler nicht in die Lastflussverteilung eingreifen würde, muss die Reglerauslenkung rückgängig gemacht werden.

2.3.3 Regeltransformatoren

Transformatoren werden hauptsächlich zur Umsetzung der Spannungen zwischen verschiedenen Spannungsebenen im Energienetz verwendet. Eine weitere Anwendung besteht darin, die Transformatoren für die Beeinflussung der Lastflüsse im Netz einzusetzen. Diese Regeltransformatoren können als Längsregler, Querregler oder Schrägregler ausgelegt sein.

Längsregeltransformatoren dienen dazu, die Spannungsstabilität zu gewährleisten und dadurch Blindleistungsflüsse zu beeinflussen. Das wird erreicht, indem eine zusätzliche Spannung in das System eingepreßt wird, um den Spannungsbetrag zu verändern.

Die Aufgabe von Querregeltransformatoren besteht darin, den Wirkleistungsfluss zu regeln. Diese Regelung wird derart realisiert, dass an einem Anschluss des Transformators eine um 90° gedrehte Zusatzspannung addiert wird. Diese Spannung erzeugt einen Phasenversatz zwischen den Anschlüssen, wodurch ein Leistungsfluss durch den Transformator erzwungen wird. Regeltransformatoren sind mit

Stufenschaltern ausgestattet, über welche die Zusatzspannung verändert werden kann [?]. Eine Stufe ist dabei jeweils nur um einen Schritt möglich. Die Schaltzeiten von konventionellen Regeltransformatoren betragen mehrere Sekunden.

2.3.4 Flexible Alternating Current Transmission Systems - FACTS

FACTS-Geräte sind leistungselektronische Systeme, die wie Regeltransformatoren, eine Zusatzspannung in Längs- und/oder Querrichtung einkoppeln können. Der Vorteil gegenüber konventionellen Transformatoren besteht darin, dass durch FACTS Geräte wesentlich schneller geregelt werden kann. Die Zeitbedarf für eine Stufenstellung liegt im Bereich weniger Vielfacher von 10 ms [?]. Im Weiteren kann bei FACTS-Geräten davon ausgegangen werden, dass die verschiedenen Stufenstellungen frei einstellbar sind und nicht nur Inkremente oder Dekremente möglich sind.

Kapitel 3

Modellbildung

Im Folgenden soll ein Modell entwickelt werden, auf dessen Basis es möglich ist, eine koordinierte Regelung von leistungsflussbeeinflussenden Betriebsmitteln vorzunehmen. Grundlage dieser Arbeit ist ein realistisches Energieübertragungsnetz. Dieses Netz ist zum einen vermascht und enthält zum anderen Leistungsflussregler, welche auf dem Netz verteilt sind. Wie diese Regler auf dem Netz verteilt werden sollen, wird beispielsweise in [?] behandelt.

Zurzeit werden Regelungsvorschriften für solche Regler, die auf dynamische Lastflussänderungen reagieren, auf statischen Topologieinformationen aufgesetzt. Der Nachteil besteht darin, dass bei Topologieänderungen, beispielsweise bei Abschaltungen oder Ausfällen von Leitungen, diese Regeln falsifiziert werden können. Regelvorgänge können nicht mehr durchgeführt werden oder erzeugen einen Falschregelleffekt, der die Belastung des Netzes erhöht. Es soll daher ein verteiltes System entwickelt werden, das fähig ist, die Topologieinformationen des Netzes selbstständig zu ermitteln und aktuell zu halten. Weiterhin müssen dynamische Verhaltensregeln definiert werden, die es den Leistungsflussreglern ermöglichen für beliebige Topologien und Topologieänderungen richtig auf Überlasten zu reagieren. In diesem Kapitel werden die Verhaltensregeln für Leistungsflussregler dargestellt und das benötigte reglerinterne Wissen wird erarbeitet.

3.1 Netzknoten

Die Verbindung zwischen Netzelementen wird durch Schaltanlagen wie beispielsweise Sammelschienen realisiert. In dieser Arbeit wird jede Stelle, die zwei oder mehrere Netzelemente verbindet als Netzknoten bzw. Knoten bezeichnet.

3.2 Erzeuger und Verbraucher

Erzeuger sind Netzelemente die Leistung in das Energieübertragungsnetz einspeisen. Verbraucher hingegen nehmen Leistung aus dem Netz auf. Die Regelung der Erzeuger zur Frequenz- und Spannungserhaltung im Netz wird beispielsweise in [?] und [?] beschrieben.

3.3 Leitungen

Jedes Energieübertragungsnetz setzt sich aus Leitungen zusammen. Leitungen transportieren Leistung von den Erzeugern zu den Verbrauchern. Durch diesen Leistungstransport stellt sich ein gerichteter Leistungsfluss auf den Leitungen ein. Dieser Leistungsfluss erzeugt eine Auslastung der Leitung. Die Auslastung ist abhängig von der Auslegung und Belastbarkeit der Leitung. Sie ist für jede Leitung bekannt. In dieser Arbeit wird die Koordinierung von Wirkleistungsreglern behandelt, daher wird vereinfachend angenommen, dass die Auslastung einer Leitung vorwiegend durch Wirkleistungsflüsse verursacht wird. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da die Leistungsfaktoren von Energieübertragungsnetzen einen Wert

von $\cos \varphi = 0,85$ üblicherweise nicht unterschreiten [?]. Eine Leitung ist somit ein Übertragungselement, auf dem ein gerichteter Leistungsfluss vorliegt. Dieser Leistungsfluss erzeugt eine Auslastung die durch Veränderung der Wirkleistung beeinflusst werden kann.

3.4 Leistungsflussregler

Die elektrotechnischen Grundlagen zur Funktionsweise von Leistungsflussreglern wurden bereits in Abschnitt 2.3 erläutert. Für das in dieser Arbeit verwendete Modell werden die Regler abstrakt behandelt. Leistungsflussregler sind Netzelemente, die den Leistungsfluss - in diesem Fall den Wirkleistungsfluss - beeinflussen können. Jeder Leistungsflussregler ist stufbar, das heißt, er hat einen Stufungsbereich, in dem er Einfluss auf den Lastfluss nehmen kann. Dieser Bereich erstreckt sich symmetrisch zur Nullauslenkung von $-max$ bis $+max$ und muss an dieser Stelle nicht genau festgelegt werden. Das Ausmaß der Leistungsflussänderung durch eine Änderung der Stufung ist, neben den physikalischen Parametern des Leistungsflussreglers, auch durch die umliegende Netzstruktur gegeben. Ein Absolutwert, wie stark der Lastfluss auf dem Leistungsflussregler durch eine Regelaktion verändert wird, kann deshalb nicht bestimmt werden. Durch eine Veränderung der Stufenstellung wird eine Veränderung des Lastflusses auf dem Regelungspfad des Leistungsflussreglers erreicht. Da es sich bei Lastflussregelungen um Verschiebungen handelt, hat eine Aktion eines Leistungsflussreglers nur dann einen Effekt, wenn die Last verschoben werden kann. Es wurde bereits in Abschnitt 2.3.2 erklärt, dass wenn kein weiterer Pfad, außer der geregelte Pfad selbst, existiert, die Regelaktion keine Auswirkungen auf den Lastfluss hat. Es muss stets bekannt sein, ob Pfade vorhanden sind, auf die der Lastfluss verschoben werden kann. In Abbildung 3.1(a) ist der Lastverlauf einer Leitung dargestellt. Erreicht die Auslastung der Leitung

(a) Lastverlauf einer Leitung

(b) Verlauf des Stufenstellers

Abbildung 3.1: Zusammenhang zwischen dem Lastverlauf einer geregelten Leitung und der Stufenstellung ihres Reglers

100%, wird durch einen Regler eingegriffen. Abbildung 3.1(b) stellt demgegenüber die Auslenkung des Reglers dar. Der erste Lastverlauf in Abbildung 3.1(a) zeigt die Belastung der Leitung, wenn kein Eingriff in den Lastfluss vorgenommen wird. Die zweite Kurve stellt den Lastverlauf dar, wenn er durch den in Abbildung 3.1(b) dargestellten Leistungsflussregler beeinflusst wird. Die Beeinflussung durch den Leistungsflussregler verschiebt die Lastkurve nach unten, ändert aber nichts an der Steigung. Würde der Regler, wie in diesem Beispiel, nur maximal bis zur Position plus drei auslenken können, wird die Auslastung der Leitung danach 100% überschreiten.

3.4.1 Einflussbereiche der Regler

Der Effekt, der durch einen Regelvorgang eines Leistungsflussreglers verursacht wird, beeinflusst nicht nur die Leitung, die sich auf seinem Regelungspfad befindet, sondern auch Leitungen in seiner Umgebung. Die Entlastung einer oder mehrerer Leitungen im Netz hat immer die Belastung anderer Leitungen zur Folge. Genau betrachtet, werden durch eine Regelaktion eines beliebigen Leistungsflussreglers alle Elemente im Netz beeinflusst. Der Einfluss auf weiter entfernte Netzelemente ist jedoch vernachlässigbar gering, so dass dieser nicht beachtet werden muss. Für die Modellbildung muss der relevante Einflussbereich festgelegt werden, in dem ein Regler Einfluss auf die Auslastung von Leitungen hat. Dieser Einflussbereich eines Reglers ergibt sich aus der *Sensitivität* zu den ihn umgebenden Netzelementen. Die Sensitivität ist der Quotient aus der Leistungsflussänderung auf der beeinflussten Leitung und der Leistungsflussänderung auf dem Regelungspfad des Reglers. Wenn ein Regler r_j durch eine Regelaktion eine Lastflussänderung von ΔP_{r_j} auf seinem Regelungspfad erzeugt und dadurch auf einer Leitung l_i ein Lastflussänderung von ΔP_{l_i} hervorgerufen wird, ergibt sich die Sensitivität von l_i zu r_j folgendermaßen:

$$\text{Sensitivität}_{l_i} = \frac{\Delta P_{l_i}}{\Delta P_{r_j}}$$

Wird der minimale Grenzwert der Sensitivität auf 10% festgelegt, bedeutet das, wenn durch den Regelvorgang eines Reglers eine Lastflussänderung auf dem Regelungspfad erzeugt wird, muss sich auf den Netzelementen mindestens eine Lastflussänderung einstellen, die einem Zehntel der Lastflussänderung auf dem Regelungspfad des Leistungsflussreglers entspricht. Der *Einflussbereich* eines Reglers setzt sich aus allen Netzelementen zusammen, die mindestens die minimale Sensitivität zum Regler aufweisen.

Die Bestimmung der Sensitivität ist in vermaschten Netzen nicht ohne Weiteres möglich. Die exakte Sensitivität kann durch Simulationen ermittelt werden. Diese sind jedoch in einem verteilten Echtzeitbetrieb nicht durchführbar, da diese Simulationen iterative Lastflussberechnungen erfordern würden [?]. Die fehlende Möglichkeit, die Sensitivität der Netzelemente untereinander durch Messungen zu ermitteln, stellt ein Problem dar, da nicht festgelegt werden kann, welche Aktion zu welchem Anteil für eine Beeinflussung des Lastflusses auf einer Leitung verantwortlich ist. Eine Lastflussänderung auf den einzelnen Netzelementen kann durch Eingriffe von Leistungsflussreglern, aber auch durch Topologieänderungen, Einspeiseänderungen oder Laständerungen verursacht werden. Eine exakte Zuordnung jeder Lastflussänderung zu einer bestimmten Ursache ist mit lokalen Informationen nicht immer möglich. Darüber hinaus kann die Sensitivität über die Impedanzverhältnisse aller im Netz vorhandenen Leitungen bestimmt werden. Diese Impedanzverhältnisse sind jedoch in einem vermaschten Netz nicht direkt ermittelbar, da es nicht möglich ist, das Netz durch Anwendung von Netzvereinfachungen in einfache Reihen- und Parallelschaltungen von Impedanzen zu zerlegen. Eine exakte Bestimmung ist daher nicht möglich. Festgelegt hingegen ist die Sensitivität einer Leitung l_i , die auf dem Regelungspfad eines Reglers r_j liegt. Sie beträgt stets eins. Die Lastflussänderung ist auf dem Regelungspfad immer genau so groß, wie die Lastflussänderung durch den Leistungsflussregler selbst.

$$\forall l_i \in \text{Regelungspfad} : \text{Sensitivität}_{l_i} = \frac{\Delta P_{l_i}}{\Delta P_{r_j}} = 1$$

Dennoch sollen die Impedanzen der Netzelemente genutzt werden, um wenigstens ungefähre Sensitivitätsinformationen zur Verfügung zu stellen. Die ungefähre Sensitivität kann aus den Impedanzen der Netzelemente ermittelt werden, die einen Parallelpfad zu einem Leistungsflussregler bilden. Die Summe der Impedanzen aller Elemente auf einem Pfad, sowie die vorhandenen Parallelpfade selbst, ergeben ein Maß für die Sensitivität jedes Elementes. Diesen Sensitivitätswert muss jeder Regelagent für die Elemente in seiner Umgebung bestimmen. Der minimale Sensitivitätsgrenzwert legt fest, ob eine Leitung zum Einflussbereich eines Reglers gehört. Ein geeigneter Wert wird in Kapitel 6 untersucht.

Da die Sensitivitätswerte aufgrund von Topologieänderungen (Leitungsausfälle, etc.) ihre Gültigkeit verlieren, müssen sie ständig neu bestimmt werden. Eine statische Festlegung von Einflussbereichen in einem Preprocessing ist aufgrund der dynamischen Netztopologie nicht sinnvoll.

Die Bestimmung der Sensitivität erfolgt wie die Topologiebestimmung auf Basis von Informationen, die

durch Kommunikation zwischen Agenten von physikalisch benachbarten Netzelementen weitergereicht werden. Eine genaue Beschreibung erfolgt im Kommunikationsmodell in Kapitel 4.

3.4.2 Richtung des Einflusses auf die Netzelemente

Jeder Regelagent hat zur Veränderung der Lastflüsse zwei Handlungsmöglichkeiten. Er kann den Leistungsfluss auf seinem Regelungspfad erhöhen oder senken. Neben der Information, wie stark eine Regelaktion ein Netzelement beeinflusst, muss einem Regelagenten bekannt sein, auf welche Art ein benachbartes Element beeinflusst wird. Das heißt, durch welche Regelaktion das Element entlastet oder belastet wird. Diese Information kann aus den Lastflussverhältnissen auf den Leitungen im Einflussbereich und der Netzstruktur ermittelt werden. Das entsprechende Verfahren wird in Abschnitt 4.5.2 vorgestellt.

Jeder Regler besitzt eine Menge von Elementen in seinem Einflussbereich. Der Regelagent kennt das Ausmaß des Einflusses einer Regelaktion (Sensitivität) auf diese Elemente sowie die Beeinflussungsrichtung (Entlastung oder Belastung) durch ein Inkrement oder Dekrement des Stufenstellers. Die Menge der Elemente, welche durch eine Erhöhung der Stufenstellung entlastet werden, wird im Folgenden als *TapIncreaseZone* bezeichnet, die Menge aller Elemente, die durch eine Senkung der Stufenstellung entlastet werden, ist die *TapDecreaseZone*. Der Einflussbereich eines Reglers setzt sich aus den Elementen der *TapIncreaseZone* und *TapDecreaseZone* zusammen.

$$\begin{aligned} \text{Einflussbereich} &= \text{TapIncreaseZone} \cup \text{TapDecreaseZone} \\ \text{TapIncreaseZone} \cap \text{TapDecreaseZone} &= \emptyset \end{aligned}$$

Ein Regelvorgang, der durch einen Leistungsflussregler durchgeführt wird, ist in jeder Aktion auf ein Inkrement oder Dekrement des Stufenstellers beschränkt, um nicht absehbare, netzgefährdende Folgen zu vermeiden.

3.4.3 Entstandenes Netzmodell

Nach dieser Strukturierung besteht das Energieübertragungsnetz aus einer Menge von Reglern und Leitungen. Jedem Regler sind Leitungen zugeordnet, die er durch eine Regelaktion entlasten oder belasten kann. Durch die Sensitivitäten ist festgelegt, wie stark eine Leitung beeinflusst wird. Eine Leitung kann sich im Einflussbereich mehrerer Regler befinden, folglich kann sich auch ein Regler im Einflussbereich anderer Regler befinden. Jeder Regler besitzt mindestens eine Leitung, die sich auf seinem Regelungspfad befindet. Die Sensitivität zu dieser Leitung ist eins. Ein Regler kann durch eine Regelaktion seine Stufung maximal um ein Inkrement oder Dekrement verändern.

3.5 Zeitverhalten und Zeitsynchronisation

3.5.1 Aktions- und Reaktionsintervalle

In Abschnitt 2.3 wurde bereits erwähnt, dass eine Stufung von Regeltransformatoren mehrere Sekunden benötigt, die Stelldauer von FACTS-Geräten sich aber nur im Bereich weniger Vielfacher von 10 ms aufhält. Die Stellgeschwindigkeit von FACTS-Geräten bildet die Grundlage für die Annahmen zum Zeitverhalten von Leistungsflussreglern in dem verteilten Systemmodell. Das minimale Zeitintervall, in dem ein Regler technisch im Stande ist, eine Aktion durchzuführen, wird auf 10 ms festgelegt. Innerhalb dieses Zeitintervalls ist es möglich, den Regler um eine Position zu verstellen.

Der Effekt einer Regelaktion tritt durch die Verschiebung der Lastflüsse physikalisch sofort auf den Leitungen auf. Unter Umständen stellt sich die erwartete Lastflussänderung nicht ein, da umliegende Netzelemente, durch die gegenseitige Beeinflussung, auf die Auswirkung der Regelung reagieren. Weiterhin ist es möglich, dass verschiedene Regler zeitgleich versuchen dem selben Problem zu begegnen. Daher ist es sinnvoll, dass ein Regler nach seiner Regelaktion einen Zeitraum wartet, bevor die nächste Regelaktion durchgeführt wird. Dieses Warteintervall wird auf die doppelte Schaltzeit eines Reglers

festgelegt und beträgt 20 ms . Nach dieser Zeit kann ein Regler erneut den Zustand der Leitungen in seinem Einflussbereich feststellen und gegebenenfalls eine weitere Aktion einleiten.

3.5.2 Zentrale Zeitsynchronisation

Die Schaltzeit von Reglern beträgt 10 ms . Wurde eine Regelaktion durchgeführt, wartet der Regler 20 ms . Diese Zeitvorgaben können benutzt werden, um das Modell zeitsynchronisiert zu gestalten. Es wird ein zentrales Zeitraster von 10 ms eingeführt. Die Netzelemente prüfen in Intervallen von 10 ms ihren Zustand. Die Bewertung des Netzzustandes und die Bestimmung einer neuen Regelaktion wird in vernachlässigbar kurzer Zeit ($t \ll 10\text{ ms}$) vollzogen, so dass sie hier außer Acht gelassen wird.

Der Lastverlauf aufgrund verschiedener Regelaktionen wird in Abbildung 3.2 dargestellt. Zum Zeit-

Abbildung 3.2: Änderung der Last auf einer Leitung als Folge einer Regelaktion

punkt $t = 90\text{ ms}$ beginnt der Regler die Regelaktion zur Entlastung der Leitung. Nach der Schaltzeit von 10 ms ist im Zeitpunkt $t = 100\text{ ms}$ die Last auf der Leitung von 100% auf 90% gesenkt. Als Folge dieser Regelaktion nehmen andere Regler ihrerseits eine Lastflussverschiebung vor. Bevor der Regler eine weitere Aktion ermittelt, müssen diese Einflüsse abgewartet werden. Der nächste Zeitpunkt, zu dem eine neue Aktion ermittelt wird, liegt bei $t = 120\text{ ms}$, so dass nach der Schaltzeit von weiteren 10 ms zum Zeitpunkt $t = 130\text{ ms}$ der Effekt dieser neuen Regelaktion auf den Leitungen messbar ist.

Kapitel 4

Kommunikationsmodell

Das in Kapitel 3 erarbeitete Modell repräsentiert das Energieübertragungsnetz auf einer abstrakten Ebene. Um dieses Modell auf ein reales Netz zu übertragen und ständig dynamisch anzupassen, werden Kommunikationsregeln benötigt, die es ermöglichen, jedem Regler bzw. dem entsprechenden Agenten, die benötigten Informationen zur Bestimmung von Regelaktionen zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen sind die Sensitivitäten zu anderen Netzelementen, die Beeinflussungsrichtung sowie die Auslastung der beeinflussten Netzelemente. Im folgenden Abschnitt wird ein Kommunikationsmodell erstellt, das es ermöglicht, durch Kommunikation zwischen den als Agenten modellierten Netzelementen die benötigten Informationen zur Verfügung zu stellen.

4.1 Eigenschaften von Netzelementen

Alle Elemente des Energieübertragungsnetzes, also Leitungen sowie Regelemente sind Agenten. Jeder Agent kennt vorerst nur die unmittelbar benachbarten Netzelemente, das heißt die Elemente, mit denen das jeweils zum Agenten gehörende Netzelement physikalisch direkt verbunden ist. Jedes Netzelement besitzt genau zwei Anschlüsse. Zwischen diesen beiden Anschlüssen tritt ein gerichteter Wirkleistungsfluss auf. Durch diesen Leistungsfluss wird eine Auslastung der Leitung erzeugt, die durch ihre physikalisch thermischen Grenzen gegeben ist. Zusätzlich muss von jedem Element die Leitungsimpedanz bekannt sein. Fällt ein Netzelement aus oder wird durch Schalthandlungen vom Netz getrennt, ist es aus Sicht des Agentensystems inaktiv. Jedes Netzelement ist somit durch folgende Parameter beschrieben.

- Lastflussrichtung
- Auslastung
- Impedanz (Induktivität)
- Element aktiv oder inaktiv

4.2 Vereinfachung der Netzstruktur

4.2.1 Parallelbetrieb identischer Leitungen

Befinden sich zwischen zwei Netzknoten mehrere identische, parallele Leitungen, wie in Abbildung 4.1(a) dargestellt, sind diese immer exakt gleich ausgelastet. Das kann mit den ohmschen Gesetzen gezeigt werden und wird nicht näher erläutert. Um die Struktur des Energieübertragungsnetzes zu vereinfachen, werden Parallelschaltungen identischer Leitungen für die Modellierung als eine Leitung betrachtet. Dementsprechend werden n parallele Leitungen, die jeweils eine Leitungsimpedanz von \underline{Z} haben, zu einer logischen Leitung mit einer Impedanz von $\frac{\underline{Z}}{n}$ zusammengefasst. Die Auslastung der logischen

Leitung ist gleich der Auslastung der einzelnen Leitungen. Für die Umsetzung im Agentensystem werden folglich die parallelen Leitungen durch einen Agenten repräsentiert. Fällt eine Leitung in diesem Verbund aus, muss die Leitungsimpedanz der logischen Leitung aktualisiert werden. Sind nur noch $n-1$ Leitungen aktiv, erhöht sich die Impedanz auf $\frac{Z}{n-1}$.

4.2.2 Parallelbetrieb identischer Leistungsflussregler auf identischen Leitungen

Identische Leistungsflussregler, die wie in Abbildung 4.1(b) auf identischen, parallelen Leitungen installiert sind, können im Agentensystem ebenfalls durch einen Regler repräsentiert werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Stufensteller der Regler stets gleich eingestellt sind. Diese Voraussetzung muss immer erfüllt werden, da andernfalls die Regelungspfade der Regler unterschiedlich stark belastet werden. Höhere Leitungsverluste wären die Folge (vgl. Abschnitt 2.3.2).

(a) Vereinfachung für unregelte Mehrfachleitungen

(b) Vereinfachung für geregelte Mehrfachleitungen

Abbildung 4.1: Vereinfachungen für identische parallele Leitungszüge

4.3 Kommunikation zwischen den Netzelementen

Die Kommunikationsinfrastruktur ist unabhängig von der Struktur des Energieübertragungsnetzes. Das heißt, jedes Netzelement bzw. der entsprechende Agent kann mit jedem anderen Netzelementagenten direkt kommunizieren. Ein Nachrichtenaustausch kann auch zwischen Agenten von physikalisch nicht benachbarten Netzelementen stattfinden. Die Kommunikation zwischen den Netzelementagenten wird nachfolgend erklärt.

4.3.1 Grundlagen der Kommunikation

Im Folgenden wird beschrieben, wie ein Regelagent die Informationen, die zur Bestimmung einer Regelaktion benötigt werden, erhält. Die Aktualisierung der Zustandsinformationen wird durch *Zustandsnachrichten* realisiert, die entlang der Energienetztopologie versendet werden. Diese Nachrichten werden von den Netzelementagenten jeweils an die Netzelementagenten versendet, welche direkt angeschlossenen Elementen entsprechen. Jedes Netzelement und jede Nachricht besitzt eine eindeutige Kennung und ist durch diese identifizierbar. Weiterhin wird in jeder Zustandsnachricht gespeichert, welche Agenten diese versendet und weitergeleitet haben. Da Netzelementagenten ihre direkten Nachbarlemente kennen, können empfangene Zustandsnachrichten einem Anschluss zugeordnet werden, über den diese empfangen wurden. In Abbildung 4.2 ist zur Veranschaulichung ein einfacher Netzausschnitt dargestellt. Nachfolgend soll daran erklärt werden, wie der Agent des Leistungsflussreglers r_1 Zustandsinformationen erhält, die durch den Leitungsgagenten der Leitung l_3 versendet werden.

Abbildung 4.2: Beispielszenario für die Bestimmung der Netztopologie

Der Leitungsagent versendet über die beiden Anschlüsse je eine Zustandsnachricht. Die zwei Nachrichten enthalten mehrere Informationen. Zum einen die Leitungsimpedanz der Leitung l_3 und zum anderen den Anschluss, über den die Nachricht versendet wurde. Diese Nachrichten werden an die Nachbarelemente am jeweiligen Anschluss versendet. Diese empfangen die Nachrichten an einem Anschluss und addieren ihre eigene Leitungsimpedanz zu der übermittelten Impedanz. Die Summe dieser Impedanzen bildet die *Pfadimpedanz* einer Nachricht. Anschließend leiten diese Netzelemente die Nachricht an alle Elemente, die sich an dem anderen Anschluss befinden, weiter. Am Ende erhält der Leistungsflussregler an seinen Anschlüssen je eine Nachricht von der Leitung l_3 , die die Summe aller Leitungsimpedanzen der Elemente, welche die Nachricht weitergeleitet haben, beinhaltet. Durch Auswertung beider Nachrichten kann der Regelagent folgern, dass die Leitung l_3 auf einem Pfad liegt, der die Anschlüsse des Leistungsflussreglers verbindet und welche Impedanz dieser Pfad hat. Ein Regelagent beachtet eine Leitung nur bei der Regelung, wenn von dem entsprechenden Leitungsagenten zwei Nachrichten von unterschiedlichen Anschlüssen an unterschiedlichen Anschlüssen des Leistungsflussreglers empfangen werden. Das Versenden und die Behandlung von Zustandsnachrichten wird durch einen angepassten Flooding-Algorithmus realisiert. Das genaue Verhalten aller Netzelemente wird in den folgenden Abschnitten erklärt.

4.3.2 Parameter zur Begrenzung des Kommunikationsaufwandes

Um Regelagenten die für die Regelung benötigten Informationen zur Verfügung zu stellen, müssen alle Leitungsagenten bei Bedarf Zustandsnachrichten versenden. Entsprechend den in der Modellbildung in Abschnitt 3.5 beschriebenen Zeitintervallen könnte ein Agent eine solche Nachricht alle 10 *ms* versenden. Der dadurch entstehende Kommunikationsaufwand ist allerdings sehr hoch. Daher wird ein minimaler Grenzwert festgelegt, um den sich die Auslastung einer Leitung wenigstens ändern muss, um eine neue Zustandsnachricht zu versenden. Dieser Grenzwert hängt davon ab, wie stark Leistungsflussregler durch eine einzelne Regelaktionen in den Leistungsfluss eingreifen. Konkrete Grenzwerte und deren Einfluss auf die Lastflussregelung werden in den experimentellen Untersuchungen in Kapitel 6 betrachtet.

Empfängt ein Netzelementagent eine Zustandsnachricht an einem Anschluss, wird diese an alle Netzelementagenten am anderen Anschluss versendet. Um Nachrichten nicht unbegrenzt weiterzuleiten, werden Grenzwerte eingeführt, die das verhindern.

Durch ein *maximales Hoplimit* wird die Anzahl der Elemente, die eine Nachricht kopieren und weiterleiten, bestimmt. Dieses Hoplimit wird global festgelegt, und ist jedem Netzelementagenten bekannt. Die Zustandsnachrichten enthalten einen Hopzähler. Jeder Agent der eine Zustandsnachricht weiterleitet, erhöht diesen Zähler. Hat der Hopzähler einer Zustandsnachricht das maximale Hoplimit erreicht, wird

diese durch den Agenten, bei dem dieses Limit erreicht wird, verworfen.

Eine andere Begrenzung der Weiterleitung von Zustandsinformationen wird durch die *maximale Pfadimpedanz* erreicht. Diese wird ebenfalls global festgelegt. Die Pfadimpedanz wird durch jeden Agenten, der eine Nachricht weiterleitet, erhöht. Überschreitet die aufsummierte Pfadimpedanz einer Nachricht die maximale Pfadimpedanz, wird die Nachricht durch den Agenten, bei dem die Überschreitung auftritt, nicht weitergeleitet.

Diese Parameter, die die Reichweite von Zustandsinformationen beschränken, dienen zur Reduzierung des Kommunikationsaufwandes im Agentensystem. Zu stark beschränkende Parameter verhindern jedoch einen ausreichenden Austausch von Zustandsinformationen. Durch das Hoplimit wird weiterhin nur sehr begrenzt Rücksicht auf die Netztopologie genommen. Befinden sich beispielsweise in einem Ballungsgebiet viele kurze Übertragungsleitungen mit entsprechend geringen Leitungsimpedanzen, wird ein geringes Hoplimit schnell erreicht. Nachrichten werden eventuell nicht weitergeleitet, obwohl diese noch nicht alle Regelagenten erreicht haben, die die Informationen der Nachrichten benötigen. Daher wird in dieser Arbeit die Pfadimpedanz als begrenzender Parameter verwendet. Wann ein ausreichender Informationsaustausch zustande kommt, wird für mehrere Netzbeispiele in Kapitel 6 betrachtet.

4.3.3 Durchführung der Kommunikation

Nachfolgend werden die für die Kommunikation der Netzelementagenten benötigten Regeln beschrieben.

Kommunikationsregeln für Leitungsagenten

Empfängt ein Leitungsagent eine Zustandsnachricht an einem Anschluss, wird nach folgenden Regeln verfahren.

- Ist die Nachrichtenennung unbekannt, da noch keine Kopie dieser Nachricht empfangen wurde, speichert der Leitungsagent die Nachricht sowie den Anschluss, über den diese Nachricht empfangen wurde. Die Agent trägt die Kennung seines Elementes in die Nachricht ein und fügt seine Leitungsimpedanz der Pfadimpedanz hinzu. Anschließend wird die aktualisierte Nachricht an alle Nachbarelemente, die sich am anderen Anschluss befinden, gesendet.
- Eine Nachricht mit dieser Kennung wurde bereits an diesem Anschluss empfangen und die zu dieser Nachrichtenennung gespeicherte Pfadimpedanz ist größer als die Pfadimpedanz der neuen Nachricht. In diesem Fall wird die bereits gespeicherte Nachricht durch die neu empfangene Nachricht ersetzt. Anschließend werden die Pfadinformationen, wie bei der Behandlung einer unbekanntes Nachricht, aktualisiert und an alle Nachbarelemente am anderen Anschluss versendet.
- Eine Nachricht mit dieser Kennung wurde bereits an diesem Anschluss empfangen und die gespeicherte Pfadimpedanz ist kleiner oder gleich der Pfadimpedanz der neuen Nachricht. In diesem Fall, existiert für das Absenderelement bereits eine mindestens gleichwertige Information. Deshalb wird die neue Nachricht verworfen.
- Wurde die Nachricht von diesem Element selbst versendet, hat sie eine Schleife durchlaufen und wird verworfen.
- Ist die Pfadimpedanz größer als die maximal erlaubte Pfadimpedanz, wird die Nachricht verworfen.
- Überschreitet die Anzahl der Netzelemente, über die diese Nachricht weitergeleitet wurde, das maximale Hoplimit, wird die Nachricht verworfen.

Kommunikationsregeln für Regelagenten

Regelagenten handeln nach den gleichen Vorschriften wie Leitungsagenten. Im Unterschied zu diesen werden die erhaltenen Nachrichten regelmäßig durch die Regelagenten ausgewertet. Die Informationen

über den Einflussbereich und die Netzelemente im Einflussbereich werden so aktualisiert. Die Auswertungen finden entsprechend der in Abschnitt 3.5 beschriebenen Taktung alle 10 *ms* statt, bzw. nach 30 *ms* (10 *ms* Stellzeit plus 20 *ms* Wartezeit), wenn eine Regelung durchgeführt wurde.

4.3.4 Erweiterung der Zustandsinformationen

Leistungsflussrichtung

Den Netzzustandsnachrichten wird die Information über die Leistungsflussrichtung hinzugefügt. Dazu erhält jede Nachricht ein zusätzliches Attribut. Dieses Attribut beschreibt, auf welche Art sich die Belastung der Leitung ändern würde, wenn an dem Anschluss, über den diese Nachricht versendet wurde, der Lastzufluss erhöht oder gesenkt werden würde. Dieser Zusammenhang kann an Abbildung 4.2 erklärt werden. Die dargestellte Leitung l_3 hat einen Lastfluss von Anschluss 1 zu Anschluss 2. Eine Senkung des Lastzuflusses an Anschluss 1 oder eine Erhöhung des Lastzuflusses an Anschluss 2 bewirken eine Entlastung der Leitung. Erreichen zwei unterschiedliche Nachrichten des Leitungsagenten der Leitung l_3 den Leistungsflussregler auf unterschiedlichen Anschlüssen, kann er daraus bestimmen, welche Regelaktion im Bedarfsfall nötig ist. Wie diese Bestimmung erfolgt, wird in Abschnitt 4.5 erklärt.

Auslastung der Netzelemente

Den Zustandsnachrichten wird die Information über die Auslastung des Absenderelementes als weiteres Attribut hinzugefügt.

4.4 Bestimmung von Regelungspfaden

Durch die Zustandsnachrichten, die ein Regelagent empfängt, kann er feststellen, welche Netzelemente sich auf einem Leitungszug befinden, der die Anschlüsse des Leistungsflussreglers verbindet. Es liegen keine Informationen darüber vor, ob sich ein Netzelement auf dem Regelungspfad oder einem Parallelpfad des Leistungsflussreglers befindet.

Um die Regelungspfade zu ermitteln, wird in [?] vorgeschlagen, von den Anschlüssen des Leistungsflussreglers bis zur ersten Verzweigung zu iterieren. Alle auf diesem Pfad befindlichen Elemente vor der Verzweigung gehören zum Regelungspfad des Leistungsflussreglers. Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, welches an dieses Vorgehen angelehnt ist.

Globale Zustandsinformationen stehen für die Ermittlung der Regelungspfade nicht zur Verfügung. Die Bestimmung geschieht, wie in verteilten Agentensystemen üblich, durch Nachrichtenübertragung. Ein Regelagent sendet über einen Anschluss eine *Regelungspfadnachricht*, wenn genau ein Nachbarlement an diesem Anschluss aktiv ist. Der empfangende Agent hat zwei Handlungsmöglichkeiten:

- *Weiterleiten der Anfrage*
Ein Leitungsagent, der eine Regelungspfad-anfrage an einem Anschluss erhält, muss diese Nachricht weiterleiten, wenn sich am anderen Anschluss genau ein aktives Nachbarlement befindet. Befinden sich mehrere aktive Nachbarlemente an diesem Anschluss, handelt es sich um eine Verzweigung. Jeder Leitungsagent, der eine Regelungspfad-anfrage weiterleitet, aktualisiert vorher die Pfadinformation der Nachricht. Der Leitungsagent trägt die eigene Kennung und die Leitungsimpedanz in die Nachricht ein.
- *Beantworten der Anfrage*
Ist ein Netzelement das letzte Element vor einer Verzweigung, beantwortet der Agent die erhaltene Regelungspfad-anfrage. Zuvor pflegt der Agent die eigenen Daten in die Pfadinformationen der Nachricht ein. Die Antwort wird an den Regelagenten gesendet, welcher die Anfrage initiiert hat.

Auf Basis dieser Regeln wird der Regelungspfad eines Leistungsflussreglers bestimmt. Eine Aktualisierung des Regelungspfades ist nötig, wenn sich Topologieänderungen ergeben. Durch den Ausfall eines

Elementes auf dem Regelungspfad gibt es keinen Pfad, auf den der Regler Last verschieben kann. Insofern ist eine Neubestimmung des Regelungspfades hinfällig.

Eine andere Situation ergibt sich, wenn ein Netzelement außerhalb des Regelungspfades ausfällt oder zugeschaltet wird. Diese Situation ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Bei der dargestellten Netztopologie

Abbildung 4.3: Änderung des Regelungspfades aufgrund einer Topologieänderung im Einflussbereich des Reglers

liegt ausschließlich die Leitung l_1 auf dem Regelungspfad des Leistungsflussreglers. Fällt die Leitung l_3 aus, liegt auch die Leitung l_2 auf dem Regelungspfad. Wird die Leitung l_3 wieder zugeschaltet, befindet sich die Leitung l_2 nicht mehr auf dem Regelungspfad. Ändert sich die Netztopologie im Einflussbereich eines Regler muss der Regelungspfad neu bestimmt werden.

4.5 Aufbereitung der Daten für Leistungsflussregler

Durch die Modellbildung in Kapitel 3 wurde festgeschrieben, welche Regelvorgänge im Energieübertragungsnetz durchgeführt werden (Erhöhung oder Senkung der Stufenstellung) und auf Basis welcher Informationen dies geschieht (Sensitivität, Beeinflussungsrichtung und Auslastung). Es wurde in Abschnitt 4.3 beschrieben, wie die benötigten Daten durch Kommunikation zwischen den Netzelementen zu den Regelagenten gelangen. Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Aufbereitung der Informationen, die jeder Regelagent durch die Zustandsnachrichten erhalten hat. Diese Informationen stellen die Wissensbasis eines Regelagenten dar und ermöglichen die Durchführung von zielführenden Regelvorgängen.

4.5.1 Identifikation von Pfaden

Empfangene Nachrichten ermöglichen es einem Regelagenten die Netzelemente zu bestimmen, die auf dem Regelungspfad oder einem Parallelpfad seines Reglers liegen. Bei der Bestimmung der Pfade aus den Nachrichten müssen zwei Sonderfälle beachtet werden.

Der erste Sonderfall liegt vor, wenn die beiden Nachrichten einer Leitung, die ein Leistungsflussregler erhält, gemeinsame Netzknoten in den Zustandsinformationen enthalten. Der Leistungsflussregler hat keinen Einfluss auf die Leitung, da sie weder auf dem Regelungspfad noch auf einem Parallelpfad liegt. Ein Beispielszenario ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Alle Zustandsinformationen, die der Leistungsflussregler von den Leitungen l_3 , l_4 , l_5 oder l_6 erhält, durchlaufen einen gemeinsamen Knoten. Deshalb kann der Leistungsflussregler diese Netzelemente nicht regeln.

Das Beispiel in Abbildung 4.5 stellt den zweiten Sonderfall dar. Verschiedene Kopien der gleichen Nachricht werden vom Leistungsflussregler empfangen. Es sei angenommen, dass alle Leitungen, außer

Abbildung 4.4: Beispiel für eine Netztopologie, in der Leitungen nicht durch den Leistungsflussregler beeinflusst werden können

die Leitungen l_{3_1} und l_{3_2} die gleiche Impedanz haben. Die Impedanz der Leitungen l_{3_1} und l_{3_2} ist größer.

Abbildung 4.5: Beispiel für Nachrichtenpfade, die auf die Regelbarkeit von Leitungen durch einen Regler schließen lassen

Der Regelagent des Leistungsflussreglers r_1 erhalte beispielsweise Informationen vom Agenten der Leitung l_6 . In Tabelle 4.1 sind die beim Regler eintreffenden Nachrichten aufgelistet. Der Regelagent

Empfangsseite Regler	Sendeseite l_6	Pfadimpedanz	Nachricht
1	1	$R(l_5, l_2)$	$Nachricht_{1,1}$
1	2	$R(l_{3_1}, l_2)$	$Nachricht_{1,2}$
2	1	$R(l_{3_2}, l_4)$	$Nachricht_{2,1}$
2	2	$R(l_7, l_4)$	$Nachricht_{2,2}$

Tabelle 4.1: Verschiedene Nachrichten bei komplexer Netzstruktur

erhält insgesamt vier Nachrichten. Er kann aus jeweils zwei Nachrichten, die nicht vom selben Leistungsanschluss versendet wurden, einen Rückschluss auf die Parallelpfade ziehen.

$$Nachricht_{1,1} \wedge Nachricht_{2,2} \Rightarrow \text{Pfad mit Pfadimpedanz } R(l_2, l_5, l_6, l_7, l_4) \quad (4.1)$$

$$Nachricht_{1,2} \wedge Nachricht_{2,1} \Rightarrow \text{Pfad mit Pfadimpedanz } R(l_2, l_{3_1}, l_6, l_{3_2}, l_4) \quad (4.2)$$

Da die Pfadimpedanz des ersten Pfades geringer ist, wird dieser Pfad durch den Leistungsflussregler als Parallelpfad klassifiziert. $Nachricht_{1,2}$ und $Nachricht_{2,1}$ werden verworfen. Nachdem alle Pfade ermittelt wurden, müssen diese gespeichert werden. Die Informationen werden später benötigt, um die

Sensitivitäten zu den Leitungen zu ermitteln. Da jedes Element im Netz eindeutig identifizierbar ist, kann jeder Pfad eindeutig durch seine Elemente identifiziert werden. Somit sind Pfade bekannt, welche die Anschlüsse des Leistungsflussreglers verbinden. Weiterhin sind zu jedem Pfad alle Netzelemente und die Pfadimpedanz bekannt.

In Listing 4.1 ist der Pseudocode für die Aktualisierung der Pfadinformationen dargestellt.

```

for(alle empfangenen Nachrichten n1 an Anschluss 1){
  for(alle empfangenen Nachrichten n2 an Anschluss 2){
    if( Absender(n1) == Absender(n2) AND
       Absenderanschluss(n1) != Absenderanschluss(n2) ){
      if( Schnittmenge(Pfadknoten(n1), Pfadknoten(n2)) == leere Menge ){
        Pfadimpedanz_neu = Pfadimpedanz(n1) + Pfadimpedanz(n2)
                          + Impedanz(Absender) - Regelungspfadimpedanz;
        if(Pfadimpedanz_neu < Pfadimpedanz(Absender)){
          Pfadimpedanz(Absender) = Pfadimpedanz_neu;
          // eindeutige Identifikation des Pfades ermöglichen
          berechne aus allen PfadelementIDs eine Kennung;
          speichere alle ElementeIDs unter dieser Kennung;
        } } } } }

```

Listing 4.1: Aktualisierung der Pfadinformationen eines Reglers

4.5.2 Bestimmung der Beeinflussungsrichtung

Jedes Element im Einflussbereich eines Reglers muss durch den entsprechenden Regelagenten in die *TapIncreaseZone* oder *TapDecreaseZone* eingeordnet werden. Werden die Elemente einer Menge durch eine Regelaktion entlastet, bedeutet das, dass die Elemente der anderen Menge belastet werden. Da Nachrichten zur Topologiebestimmung auch Informationen über die Lastflussrichtung jedes Netzlementes übermitteln, ist die Beeinflussungsrichtung für jedes Netzelement bestimmbar. Die Informationen der Zustandsnachrichten müssen so zugeordnet werden, dass der Regelagent daraus die Beeinflussungsrichtung ermitteln kann.

Es wurde bereits erklärt, dass ein Regler zwei Nachrichten von einer Leitung erhalten muss, um die Pfadimpedanz zu bestimmen. Jede Nachricht enthält die Information, ob der Lastfluss an dem Anschluss, über den diese Nachricht versendet wurde, gesenkt oder erhöht werden muss. Die beiden Nachrichten enthalten folglich genau gegensätzliche Informationen zur Lastflussrichtung. Das ist beispielhaft in Abbildung 4.6 dargestellt. Es sei angenommen, dass eine Erhöhung des Stufenstellers eine

(a) Bedingungen für ein Inkrement des Stufenstellers:
Anfrage zur Leistungsflusssenkung an Anschluss 1 und
Leistungsflusserhöhung an Anschluss 2

(b) Bedingungen für ein Dekrement des Stufenstellers:
Anfrage zur Leistungsflusserhöhung an Anschluss 1 und
Leistungsflusssenkung an Anschluss 2

Abbildung 4.6: Zusammenhang zwischen Anfragen zur Leistungsflussänderung an den Anschlüssen und der entsprechenden Reaktion durch Ändern der Stufenschalterstellung

Lastflusserhöhung von Anschluss 1 zu Anschluss 2 erzeuge. Es können zwei Situationen auftreten.

- Der Regler erhält zwei Anfragen von einer Leitung, den Lastfluss an Anschluss 1 zu senken und an Anschluss 2 zu erhöhen. Das ist in Abbildung 4.6(a) dargestellt. Die Leitung kann durch ein Inkrement des Stufenstellers entlastet werden.

- Der Regler erhält eine Anfrage, den Lastfluss an Anschluss 1 zu erhöhen und eine Anfrage den Lastfluss an Anschluss 2 zu senken. Das ist in Abbildung 4.6(b) dargestellt. Die Leitung kann durch ein Dekrement des Stufenstellers entlastet werden.

Das Absenderelement aus dem Beispiel in Abbildung 4.6(a) wird in die *TapIncreaseZone* eingeordnet, das Absenderelement aus Abbildung 4.6(b) hingegen in die *TapDecreaseZone*.

An dieser Stelle wird nochmals auf das Beispiel aus Abbildung 4.5 eingegangen. In Tabelle 4.2 sind die beiden Nachrichten aus Tabelle 4.1 eingetragen, die bei der Pfadbestimmung nicht verworfen wurden.

Empfangsseite Regler	Sendeseite l_6	Pfadimpedanz	Leistungsänderung	Nachricht
1	1	$R(l_5, l_2)$	senken	<i>Nachricht</i> _{1,1}
2	2	$R(l_7, l_4)$	erhöhen	<i>Nachricht</i> _{2,2}

Tabelle 4.2: Zustandsnachrichten, die bei der Pfadbestimmung nicht verworfen wurden und zur Bestimmung der Beeinflussungsrichtung herangezogen werden.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Nachricht}_{1,1} \wedge \textit{Nachricht}_{2,2} \\
 & \Rightarrow \textit{Anschluss1 senken} \wedge \textit{Anschluss2 erhoehen} \\
 & \Rightarrow \textit{Stufensteller erhoehen um die Leitung zu entlasten} \\
 & \Rightarrow l_6 \textit{ in TapIncreaseZone einordnen}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Aus diesen zwei erhaltenen Nachrichten kann der empfangende Regelagent, wie in Formel 4.3 gezeigt, schließen, dass eine Erhöhung der Stufenstellerposition die Leitung l_6 entlasten würde. Somit wird diese Leitung der *TapIncreaseZone* zugeordnet.

4.5.3 Bestimmung der Sensitivitäten

Durch die erhaltenen Zustandsinformationen kennt ein Regelagent Leitungen, die sich auf einem Parallelpfad oder dem Regelungspfad seines Leistungsflussreglers befinden. Durch die in den Zustandsnachrichten enthaltenen Informationen sind deren Auslastungen und Leitungsimpedanzen bekannt. Es muss ermittelt werden, wie stark der Einfluss eines Reglers auf eine Leitung ist. Dies stellt die Sensitivität einer Leitung zu einem Regler dar. Aus der Sensitivität ist der Einflussbereich eines Reglers bestimmbar. Es ist nicht möglich die Sensitivitäten exakt zu ermitteln (vgl. Abschnitt 3.4.1). Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, auf dessen Basis annähernd genaue Sensitivitätsinformationen bestimmt werden können.

Um nicht alle Pfade aller Elemente zu betrachten, die sich in Beziehung zu einem Leistungsflussregler befinden, wird ein oberer Grenzwert für die Pfadimpedanz der zu betrachtenden Parallelpfade festgelegt. Dieser Grenzwert ist nicht statisch, sondern hängt davon ab, welche Impedanz der Parallelpfad, mit der geringsten Impedanz, aufweist. Diese Impedanz ist der Referenzwert für die Beachtung oder Verwerfung von weiteren Parallelpfaden. Jeder Pfad, dessen auf diese Art ermittelte Pfadimpedanz, um mehr als einen bestimmten Faktor Z_{pfad} höher als die Referenzimpedanz ist, wird verworfen. Die Festlegung des Faktors Z_{pfad} soll an dieser Stelle nicht geschehen, da seine Wahl die Qualität der Sensitivitätsinformationen beeinflusst. Unterschiedliche Werte für Z_{pfad} werden in den Experimenten in Kapitel 6 betrachtet.

Für die Beachtung oder Verwerfung von Pfaden stellt die Pfadimpedanz bereits ein gutes Kriterium dar. In vermaschten Netzen kann es aber mitunter vorkommen, dass Pfade aufgrund der Pfadimpedanz durch einen Regelagenten nicht verworfen werden, obwohl deren Sensitivität zum entsprechenden Regler nur sehr gering ist. Daher wird für alle ermittelten Pfade eine zweite Überprüfung durchgeführt. Zur Durchführung dieser Überprüfung wird ein zweiter Parameter $Z_{parallel}$ eingeführt. Für alle paarweisen Kombinationen von ermittelten Parallelpfaden wird geprüft, ob sie gemeinsame Elemente haben.

Liegen gemeinsame Elemente vor, werden die Impedanzen der nicht gemeinsamen Elemente, die also ausschließlich in jeweils einem Pfad vorhanden sind, ermittelt. Die erhaltenen Werte werden miteinander verglichen. Der Pfad mit den Elementen mit der größeren Impedanz wird verworfen, wenn die Impedanz um den Faktor $Z_{parallel}$ größer ist, als die ermittelte Impedanz der Elemente des anderen Pfades.

In dem in Abbildung 4.7 dargestellten Netzausschnitt ist ein Regler abgebildet, der durch die Topologiebestimmung drei Parallelpfade, bestehend aus folgenden Leitungen, ermittelt hat:

1. l_1, l_2, l_3
2. l_4, l_5, l_6
3. $l_4, l_7, l_8, l_9, l_{10}, l_6$

Abbildung 4.7: Beispiel für die Bestimmung der Sensitivitäten

Jede Leitung in diesem Netzausschnitt habe die gleiche Impedanz Z , welche zur Vereinfachung nur aus der Induktivität X bestehe. Wenn alle Pfade paarweise verglichen werden, hat der Pfad 1 keine gemeinsamen Elemente mit den Pfaden 2 und 3. Diese haben die gemeinsamen Elemente l_4 und l_6 . Die Differenzmengen sind jeweils $\{l_5\}$ für Pfad 2 und $\{l_7, l_8, l_9, l_{10}\}$ für Pfad 3 mit den Impedanzen $X(\{l_5\}) = X$ und $X(\{l_7, l_8, l_9, l_{10}\}) = 4X$. Ist der Faktor $Z_{parallel}$ kleiner vier, wird der Pfad 3 aus den relevanten Parallelpfaden des Reglers entfernt. Es bleiben die Pfade 1 und 2 übrig.

Zu den Elementen der ermittelten Pfade sind die Sensitivitäten zu ermitteln. Die Sensitivität wird mit Hilfe der Impedanzen der Elemente eines Pfades bestimmt. Jedes Element, das auf einem Pfad liegt, erhält die Sensitivität zugewiesen, die dieser Pfad hat. Liegt ein Element auf mehreren Pfaden, ergibt sich die Sensitivität des Elementes aus der Summe der Sensitivitäten aller Pfade, auf denen das Element liegt. Die Bestimmung der Sensitivität findet folgendermaßen statt:

Für alle Parallelpfade, welche durch den Regelagenten ermittelt wurden, werden die Pfadimpedanzen zu einer Gesamtimpedanz aufsummiert. Um den Anteil des Lastflusses zu bestimmen, der durch eine Regelaktion auf jeden einzelnen Pfad verschoben wird, wird für jeden Pfad die Gesamtimpedanz durch die Pfadimpedanz dividiert. Anschließend werden die so ermittelten Werte normiert, so dass die Summe aller Lastflussanteile der einzelnen Pfade eins ergibt. Für jeden Pfad ist nun eine Sensitivität bestimmt. Die Sensitivität der einzelnen Netzelemente auf den Pfaden setzt sich aus der Summe der Sensitivitäten aller Pfade zusammen, auf denen das jeweilige Netzelement enthalten ist. Die Berechnung der Sensitivität soll anhand des Beispiels aus Abbildung 4.7 durchgeführt werden. Die Sensitivität wird durch das Symbol S , die Impedanzen der einzelnen Leitungen werden als Induktivitäten (X) dargestellt.

Die nicht entfernten Pfade 1 und 2 haben die gleiche Impedanz und keine gemeinsamen Elemente. Die ermittelte Sensitivität teilt sich unter diesen Bedingungen zu gleichen Teilen auf die beiden Pfade auf. Die Sensitivität ergibt sich für die Leitungen l_1, l_2 und l_3 auf Pfad 1 und für die Leitungen l_4, l_5 und l_6 auf Pfad 2 zu 0,5. Die dabei entstehende Ungenauigkeit ist minimal. Dies wird im folgenden

gezeigt.

$$S_{l_7} = S_{l_8} = S_{l_9} = S_{l_{10}} = \frac{X}{X + 4X} S_{l_4} = \frac{1}{5} S_{l_4} \quad (4.4)$$

$$S_{l_5} = \frac{4X}{X + 4X} S_{l_4} = \frac{4}{5} S_{l_4} \quad (4.5)$$

Die Induktivität der Parallelschaltung der Leitung l_5 mit der Reihenschaltung der Leitungen l_7 , l_8 , l_9 und l_{10} beträgt

$$X_{l_5 || (l_7 + l_8 + l_9 + l_{10})} = \frac{4}{5} X. \quad (4.6)$$

Die Induktivität aller Leitungen auf der rechten Seite des Reglers ergibt sich zu

$$X_{l_4 + (l_5 || (l_7 + l_8 + l_9 + l_{10})) + l_6} = \frac{14}{5} X. \quad (4.7)$$

Die Sensitivitäten der Leitungen ergeben sich folgendermaßen:

$$S_{l_4} = S_{l_6} = \frac{3X}{\frac{14}{5}X + 3X} = \frac{15}{29} \approx 0,517 \quad (4.8)$$

$$S_{l_7} = S_{l_8} = S_{l_9} = S_{l_{10}} = \frac{1}{5} S_{l_4} \approx 0,103 \quad (4.9)$$

$$S_{l_5} = \frac{4}{5} S_{l_4} \approx 0,412 \quad (4.10)$$

$$S_{l_1} = S_{l_2} = S_{l_3} = 1 - S_{l_4} \approx 0,483 \quad (4.11)$$

Bei diesem Vorgehen wird akzeptiert, dass der Pfad 3, der eine Sensitivität von 0,103 (vgl. Formel 4.9) zu dem Regler aufweist, nicht beachtet wird. Für die Leitung l_3 , die eine Sensitivität von 0,412 (vgl. Formel 4.10) hat, wird eine Sensitivität von 0,5 ermittelt.

In in Kapitel 6 wird gezeigt, dass dieses Vorgehen zur Sensitivitätsbestimmung auch für größere Netze gute Ergebnisse liefert, wenn die Grenzwertparameter Z_{pfad} und $Z_{parallel}$ geeignet gewählt werden.

4.6 Ausfall von Netzelementen

Netzelemente können aufgrund von Störfällen oder Schaltmaßnahmen ausfallen. Kommt es zu einem solchen Ausfall im Energieübertragungsnetz, hat das Konsequenzen für die Lastflussverteilung. Da der Leistungsausgleich zwischen Erzeugern und Verbrauchern nicht verhindert werden kann, es sei denn es gibt keine Verbindung zwischen den Elementen, teilt sich der Lastfluss, der über das ausgefallene Element verlief, auf umliegende Netzelemente auf. Weiterhin ist das Wissen der Regelagenten, in deren Einflussbereich sich das ausgefallene Element befand, nicht mehr aktuell, da sich durch den Ausfall sämtliche Informationen wie Regelungspfade, Sensitivitäten, Beeinflussungsrichtungen und Auslastungen möglicherweise geändert haben. Diese müssen daher neu ermittelt werden. Fällt ein Netzelement aus, werden alle Regelagenten, zu deren Einflussbereich dieses Element gehörte, informiert. Ein Netzelementagent, dessen Netzelement inaktiv ist, kann weiterhin im Agentensystem kommunizieren. Der Agent teilt den Ausfall seines Netzelementes den Nachbarelementagenten in Form einer Zustandsnachricht mit. Diese Nachricht wird, wie alle Zustandsinformationen, entlang der Netztopologie versendet. Erhält ein Regelagent eine solche Zustandsnachricht, werden alle Pfade, auf denen sich das inaktive Netzelement befindet, aus dem Reglerwissen entfernt. Aufgrund der neuen Informationslage werden neue Sensitivitäten, Einflussbereiche und Beeinflussungsrichtungen bestimmt. Fällt ein Netzelement auf dem Regelungspfad des Reglers aus, ist der Regler solange inaktiv, bis dieses Element wieder aktiv ist. Der Agent eines inaktiven Netzelementes leitet keine Zustandsinformationen weiter. So ist sichergestellt, dass keine Pfadinformationen weitergeleitet werden, die dieses Element beinhalten.

Ein Sonderfall liegt vor, wenn Netzelemente so ausfallen, dass es für eine Anordnung von Reglern mit parallelen Regelungspfaden keinen ungeregelten Parallelpfad mehr gibt. Folgende Situationen können dann vorliegen:

Solange es möglich ist, alle auftretenden Lastflüsse auf die Regelungspfade der Regler zu verteilen, ohne dass alle Regelungspfade überlastet sind, stellt der Ausfall kein Problem dar. Jeder Regler entlastet entsprechend dem entwickelten Algorithmus bevorzugt seinen Regelungspfad, so dass kein Element überlastet ist. Der Regelungspfad von mindestens einem Regler ist nicht überlastet. Ist ein überlastfreier Betrieb nicht mehr möglich, beginnen die Regler gegeneinander zu regeln. Das bedeutet, jeder Regler entlastet seinen Regelungspfad und belastet dadurch die Regelungspfade der anderen Regler. Aufgrund der Bevorzugung des Regelungspfades bei der Lastflussverschiebung, setzt sich dieser Effekt fort bis einer der Regler seine maximale Stufenstellung erreicht hat. Dessen Regelungspfad ist ab diesem Moment ungeregelt, so dass für die anderen Regler wieder ein nicht geregelter Parallelpfad vorliegt. Das kann jedoch bei Wiedereinschalten des ausgefallenen Pfades zu starken Regelaktionen führen. Um diesen Effekt zu verhindern, wird in [?] vorgeschlagen, im Vorfeld die Regelemente zu bestimmen, die in einer solchen Situation deaktiviert werden.

4.7 Zusammenfassung

Durch die Auswertung der erhaltenen Zustandsnachrichten durch die in Abschnitt 4.5 beschriebene Datenaufbereitung stehen einem Regelagenten die folgenden Informationen zur Verfügung.

- Jeder Regelagent hat ermittelt, ob es Parallelpfade gibt, auf die Leistung verschoben werden kann.
- Die ungefähre Sensitivität zu den Netzelementen, die sich auf Parallelpfaden oder dem Regelungspfad des Reglers befinden, wurde ermittelt.
- Auf Basis der Sensitivitäten kann jeder Regelagent die Netzelemente identifizieren, die zum Einflussbereich des Reglers gehören.
- Von jedem Element im Einflussbereich ist bekannt, durch welche Regelaktion es entlastet werden kann.
- Die Auslastung jedes Elementes im Einflussbereich ist bekannt.

Mit diesen Informationen steht einem Regelagenten das benötigte Wissen, um auf Basis des in Kapitel ?? erstellten Algorithmus Leistungsflussregelungen durchzuführen, zur Verfügung.

Kapitel 5

Das Agentenframework - Distributed PowerGrid

Für die Umsetzung der verteilten Koordinierung der Elemente eines Energieübertragungsnetzes durch autonome Agenten soll ein Agentensystem zum Einsatz kommen. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen dieser Arbeit das *Distributed PowerGrid (DPG)* erstellt. Das *DPG* ist ein Framework, das es ermöglicht, alle benötigten Agenten sowie die Kommunikationsvorgänge zwischen den Agenten zu simulieren. Auf eine bestehende Implementierung eines Agentenframeworks wurde aus folgenden Gründen nicht zurückgegriffen:

Alle Simulationen werden mit der Software *DigSILENT PowerFactory* durchgeführt. *PowerFactory* ist ein etabliertes Standardwerkzeug zur Simulation der Vorgänge in Energieversorgungsnetzen, bietet aber nicht die Möglichkeit, verteilte Kontrollmechanismen zu simulieren. Informationen über einen berechneten Netzzustand können nur zentral exportiert werden. Der Import neuer Stellparameter für Netzelemente ist ebenfalls nur zentral möglich. Eine Anbindung an ein bestehendes Agentenframework, wie beispielsweise dem Open Source Projekt *JADE*, ist daher nicht sinnvoll. Aus diesen Gründen wurde ein monolithisches Simulationsframework implementiert, um ein verteiltes Agentensystem zu simulieren.

5.1 Struktur des Agentensystems

Die grundlegende Struktur des Agentensystems ist einfach gehalten. Es gibt das Interface *Agent*, welches für jedes Netzelement implementiert wird. Die für die Kommunikation wichtige Aufgabe jedes Netzelementagenten besteht im Empfangen von Nachrichten und wird durch die Methode *receiveMessage()* realisiert. Weiterhin besitzt jeder Agent eine global eindeutige Kennung, die *AgentID*. Diese Kennung kann durch die Methode *getID()* abgefragt werden. Für die Kommunikation zwischen den Agenten werden Nachrichten versendet. Jede Nachricht, ist eindeutig anhand ihrer *MessageID* identifizierbar und enthält die eindeutige Kennung des Empfängers.

Neben der Methode *receiveMessage()* werden für die Initialisierung noch weitere Methoden benötigt. Diese Methoden dienen zur Beschreibung der unmittelbaren Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Netzelementen. Da jeder Netzelementagent seine direkten Nachbarn kennt, werden ihm, getrennt nach den beiden Anschlüssen (Elemente, mit mehr als zwei Anschlüssen werden nicht, betrachtet), die IDs der direkt verbundenen Elemente übergeben. Die Methoden *addNeighbourBus1(AgentID)* und *addNeighbourBus2(AgentID)* stehen dafür zur Verfügung. Da für die Pfadbestimmung die Netzknoten benötigt werden, mit denen ein Element verbunden ist, wird den Agenten durch die Methoden *setNodeBus1(NodeID)* und *setNodeBus2(NodeID)* mitgeteilt, welche Kennungen die Knoten an den jeweiligen Anschlüssen haben. Jeder Netzknoten im Energienetz besitzt daher ebenfalls eine eindeutige Kennung, die *NodeID*, obwohl Knoten nicht als Agenten modelliert werden. Damit sind alle Topologieinformationen, die ein Netzelementagent besitzen muss, vorhanden.

5.2 Netzelemente

Zurzeit sind drei Netzelemente im *DPG* als Agenten implementiert. Leitungen, als passive Netzelemente, in der Klasse *Line*, Regelemente in der Klasse *PowerFlowController* sowie Erzeuger bzw. Verbraucher in der Klasse *Device*.

Abbildung 5.1: Klassendiagramm der Netzelemente im Distributed PowerGrid

5.2.1 Leitungen

Leitungsagenten haben zwei Aufgaben. Sie müssen den Zustand der ihnen zugeordneten Leitung überwachen und die Nachrichten von Nachbar-elementen bzw. den entsprechenden Agenten bearbeiten. Ändert sich der Zustand der zugeordneten Übertragungsleitung, müssen Nachrichten versendet werden, um benachbarte Netzelementagenten zu informieren. Jeder Leitungsagent führt dazu, entsprechend den in Abschnitt 3.5 festgelegten Zeitvorgaben, alle *10 ms* die Methode *readNewState()* aus, um den Zustand der zugeordneten Leitung abzufragen. Nachdem der neue Zustand ermittelt wurde, wird in Abhängigkeit von der Änderung der Auslastung überprüft, ob es nötig ist, neue Zustandsinformationen an die Nachbar-elemente zu versenden (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Das statische Attribut *LOAD_DELTA_VALUE* beschreibt die minimale Laständerung auf einer Leitung in Prozent, nach der eine neue Zustandsinformationen versendet wird.

5.2.2 Leistungsflussregler

Regelagenten nehmen, wie Leitungsagenten, Nachrichten entgegen. Im Gegensatz zu Leitungsagenten müssen sie Nachrichten nicht nur filtern und weiterleiten, sondern sie sammeln die erhaltenen Informationen und ermitteln daraus Regelaktionen. Entsprechend dem in Kapitel 3.5 festgelegten Zeitverhalten, geschieht dies alle *10 ms*, ausgenommen der Leistungsflussregler hat eine Regelaktion durchgeführt. In diesem Fall werden erst nach *30 ms* alle Informationen aktualisiert (vgl. Abschnitt 3.5). Danach wird der Algorithmus zur Bestimmung einer neuen Regelaktion durchgeführt.

Leistungsflussregler stellen eine Erweiterung einer Leitung dar. Die Klasse *PowerFlowController* erweitert die Klasse *Line*. Zusätzlich gibt es die Methode *calculateNextAction()*, welche eine neue Regelaktion bestimmt. In dieser Methode wird der Netzzustand anhand der Informationen aus allen

empfangenen Nachrichten aktualisiert und der Algorithmus zur Bestimmung einer Regelaktion ausgeführt.

In der Klasse *PowerFlowController* sind statische Attribute definiert, die für die Regelung oder das Kommunikationsmodell benötigt werden.

- *CRITICAL_LOAD_VALUE* legt die kritische Auslastung einer Leitung fest.
- *LOAD_FACTOR_LOWER_BOUND* ist ein Wert zwischen 0 und 1. Dieser legt in Abhängigkeit der kritischen Auslastung die untere Auslastungsgrenze für Regeleinriffe fest.
- *LOAD_FACTOR_UPPER_BOUND* ist ein Wert größer 1, der in Abhängigkeit von der kritischen Auslastung die in Abschnitt ?? beschriebene Bewertungsfunktion f_{load} beeinflusst.
- *NEUTRAL_LOAD_OFFSET* beschreibt die verwendete Lastdifferenz zur Überprüfung, ob der Stufensteller um eine Position zur neutralen Position bewegt kann.
- *MIN_SENSIVITY* legt die minimale Sensitivität fest.
- Der *IMPEDANCE_FACTOR* entspricht dem Wert Z_{pfad} , welcher in Abschnitt 4.5.3 erläutert wird.
- Der *PARALLEL_IMPEDANCE_FACTOR* entspricht dem Wert $Z_{parallel}$, welcher in Abschnitt 4.5.3 erläutert wird.
- *ATTENUATION* legt fest, ob die in Abschnitt ?? beschriebene Dämpfung verwendet wird.
- *F_LOAD_EXPONENT* gibt den Exponenten an, mit dem die Bewertungsfunktion f_{load} potenziert wird. Die Möglichkeit die Bewertungsfunktion durch Potenzieren zu beeinflussen, wurde in Abschnitt ?? diskutiert.

5.2.3 Erzeuger und Verbraucher

Auf Basis des entwickelten Netzmodells werden Erzeuger und Verbraucher nicht betrachtet. Um eine Erweiterbarkeit des Systems zu gewährleisten und bereits eine Grundstruktur für Erweiterungen des Modells vorzugeben, ist die Klasse *Device* implementiert. Diese Klasse kann je nach Bedarf erweitert werden.

5.3 Die Schnittstelle zur Zustandsermittlung

Jeder Agent benötigt bei der Initialisierung eine Schnittstelle, welche ihm während der Simulation die Zustandsdaten seines ihm zugeteilten Netzelementes zur Verfügung stellt und darüberhinaus bei Regelementen Regelvorgaben entgegennimmt. Diese Schnittstelle liefert folgende Informationen, welche mit den entsprechenden Methoden zur Verfügung gestellt werden. Jeder Methode wird als Parameter die Kennung des anfragenden Agenten übergeben:

- Leistungsfluss an beiden Anschlüssen
getPowerflowBus1(AgentID), getPowerflowBus2(AgentID)
- Auslastung des Elementes
getLoad(AgentID)

Wenn es sich bei dem Element um einen Regler handelt, sind weitere Informationen relevant.

- maximal und minimal mögliche Stufenstellung
getMaxTapPosition(AgentID), getMinTapPosition(AgentID)
- aktuelle Stufenstellung
getTapPosition(AgentID)

Um Regelvorgänge an das Netzelement zu übermitteln, werden Methoden benötigt, die den physikalischen Reglern neue Sollwerte vorgeben.

- Erhöhung der Stufenstellerposition
setLfrSwitchIncrease(AgentID)
- Senkung der Stufenstellerposition
setLfrSwitchDecrease(AgentID)
- Setzen der Stufenstellerposition auf einen bestimmten Wert (bspw. bei FACTS-Geräten möglich)
setLfrSwitch(AgentID, newTapPosition)

5.4 Nachrichten

Für sämtliche Koordinierungsvorgänge in einem verteilten System autonomer Agenten werden Nachrichten versendet. In Kapitel 4 wurde dargestellt, dass die Nachrichten zur Bestimmung der Einflussbereiche, Sensitivitäten, Regelungspfade und Beeinflussungsrichtungen von Leitungen in Bezug zu Reglern dienen.

Jede Nachricht im Agentensystem muss minimale Anforderungen erfüllen. Daher wurde das Interface *Message* definiert. Dieses Interface enthält folgende Methoden, die für jede Nachrichtenklasse zu implementieren sind.

- Jede Nachricht hat einen eindeutigen Nachrichtentyp. Dieser Nachrichtentyp kann mit der Methode *getMessageType()* ermittelt werden. Im bisherigen Modell sind drei Nachrichtentypen enthalten: Zustandsnachrichten, Regelungspfadfragen und Regelungspfadantworten.
- Jede Nachricht hat eine eindeutige Kennung, die sie von allen anderen Nachrichten (vor allem Nachrichten gleichen Typs) unterscheidet. Die Methode *getMessageID()* liefert diese Kennung.
- Jede Nachricht kann eindeutig einem Absender zugeordnet werden. Die Kennung dieses Absenders kann mit der Methode *getSenderID()* abgefragt werden.
- Das Nachbarelement von dem eine Nachricht empfangen wurde, wird mit der Methode *getLastForwarderID()* ermittelt.
- Durch die Methode *getAllForwardersIDs()* wird eine Liste aller Netzelemente zurückgegeben, die die Nachricht weitergeleitet haben.

Das Klassendiagramm des Interface *Message* sowie der implementierten Nachrichtentypen, welche im Folgenden erklärt werden, ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

5.4.1 StateInformMessage

Ein Leitungsagent informiert die Agenten seiner Nachbarelemente regelmäßig über den Zustand der ihm zugeordneten Leitung. Dieser Informationsaustausch wird über Zustandsnachrichten, die *StateInformMessages*, realisiert. Regelagenten erhalten dadurch die Informationen, die benötigt werden, um die aktuelle Netzsituation in ihrer Umgebung zu beurteilen. Die Zustandsnachrichten beinhalten folgende Informationen, welche mit den angegebenen Methoden abgefragt werden können.

- Liste aller Knoten, die diese Nachricht durchlaufen hat.
getAllNodeIDs()
- Auslastung des Absenders.
getLoad()

Abbildung 5.2: Klassendiagramm der Nachrichten im DPG

- Leistungsentnahme oder -abgabe an dem Anschluss, über den diese Nachricht versendet wurde.
isDecrease()
Diese Methode gibt *TRUE* zurück, wenn der Leistungsfluss gesenkt werden muss, um das Absenderelement zu entlasten und andernfalls *FALSE*.
- Impedanz des Pfades, den diese Nachricht durchlaufen hat.
getPathImpedance()
- Jedes Element, das eine *StateInformMessage* weiter leitet, trägt seine Impedanz mit *addPathImpedance()* in die Nachricht ein. Diese wird zu der vorhandenen Pfadimpedanz der Nachricht addiert.
- Anschluss, über den diese Nachricht versendet wurde (Anschluss 1 oder 2).
getBus()
- Leitungsimpedanz des Absenders.
getImpedance()

Die Attribute *MAX_HOPS_STATE_INFORM* und *MAX_PATH_IMPEDANCE* legen die maximale Anzahl an Hops und die maximale Pfadimpedanz einer Nachricht fest (vgl. Abschnitt 4.3.2)

5.4.2 Regelungspfadnachrichten

Neben der Ermittlung der Einflussbereiche und Sensitivitäten ist es weiterhin wichtig, den Regelungspfad eines Reglers zu bestimmen. Dazu gibt es die *ControlPathRequestMessage* und die *ControlPathAnswerMessage*. Die Anfragenachricht wird von Regelagenten versendet, wenn Topologieänderungen im Netz aufgetreten sind. Jeder Leitungsagent, der eine solche Nachricht erhält, verfährt nach den in Abschnitt 4.4 vorgeschriebenen Regeln. Die Nachricht wird weitergeleitet, solange es keine Verzweigungen der Netzstruktur gibt. Andernfalls werden die Informationen der Anfragenachricht in eine Antwortnachricht kopiert und an den Regelagenten zurückgesendet. Dieser ermittelt anhand der Elemente, die die Anfragenachricht weitergeleitet haben, seinen Regelungspfad.

5.4.3 Nachrichtenübertragung

Die Nachrichtenübertragung im *DPG* ist abstrakt umgesetzt. Da keine näheren Annahmen über die Kommunikationsinfrastruktur vorliegen, wurde vorerst ein zentraler *MessageService* eingerichtet, der zur Nachrichtenübertragung verwendet wird. Jeder Agent kann an diesen *MessageService* Nachrichten übergeben. Dazu steht die statische Methode *sendMessage(receiverID, Message)* zu Verfügung. Der *MessageService* übermittelt die Nachrichten an die entsprechenden Empfänger. Soll durch spätere Erweiterungen eine reale, beispielsweise auf *TCP/IP* basierende, Kommunikationsinfrastruktur implementiert werden, muss nur der *MessageService* angepasst werden.

Der *MessageService* enthält Referenzen zu allen aktiven Agenten im *DPG*, so dass er für jedes Element die Methode *receiveMessage()* aufrufen kann, um eine Nachricht an den Agenten zu übermitteln. Da an keiner anderen Stelle als bei der Nachrichtenvermittlung ein Kenntnis aller Agenten im System nötig ist, ist der *MessageService* derzeit die zentrale Instanz zur Verwaltung aller aktiven Agenten im *DPG*. Soll eine realistische Kommunikationsinfrastruktur umgesetzt werden, ist diese zentrale Instanz überflüssig. Jeder Agent könnte selbstständig ausgeführt werden.

5.5 Erweiterung zu einem getakteten System

In Abschnitt 3.5 wurde das Zeitverhalten der Netzelementagenten beschrieben. Die dort beschriebene Zeitsynchronisation wird im *DPG* umgesetzt. Für jede Entität wird, neben dem Interface *Agent*, das Interface *CyclicElement* implementiert. Dieses Interface schreibt zwei Methoden vor, welche verschiedene Ausführungsschritte innerhalb eines Taktes vorgeben.

- *calculatePreStep()*
In diesem Schritt wird der neue Zustand des Netzelementes von der Schnittstelle gelesen. Wenn der Agent nach dem Auswerten des neuen Zustandes Handlungsbedarf aufgrund veränderter Lastflüsse festgestellt hat, versendet er in diesem Schritt neue Nachrichten. Für Leitungsagenten als auch Regelagenten wird im PreStep die Methode *readNewState()* aufgerufen.
- *calculatePostStep()*
Der PostStep dient zur Durchführung einer Regelaktion. Leistungsflussregler werten in diesem Schritt alle gesammelten Nachrichten aus, bereiten die erhaltenen Netzinformationen auf und bestimmen eine Regelaktion, indem sie den in Abschnitt ?? beschriebenen Algorithmus ausführen. Diese Aktionen werden durch die Methode *calculateNextAction()* der Klasse *PowerFlowController* eingeleitet. Leitungsagenten machen in diesem Schritt nichts.

Um das grundlegende Agentenmodell von der getakteten Umsetzung zu trennen, wird für jedes Netzelement eine Klasse erstellt, in welcher die Methoden des Interface *CyclicElement* implementiert sind und die jeweiligen Agentenklassen erweitert werden. Die daraus entstehende Struktur ist im Klassendiagramm in Abbildung 5.3 dargestellt. Für die Klassen *Line*, *PowerFlowController* und *Device* wurde eine getaktete Erweiterung *CyclicLine*, *CyclicPowerFlowController* und *CyclicDevice* hinzugefügt.

Abbildung 5.3: Klassendiagramm der Entitäten im DPG

5.5.1 Taktung des MessageService

Da die Nachrichtenweiterleitung in das getaktete Modell integriert wird, erhält der *MessageService* die Methode *subStep()*. Jede Nachricht, die von einem Agenten an den *MessageService* übergeben wird, wird vorerst in einer internen Messagequeue gespeichert. Erst durch die Ausführung der Methode *subStep()* werden alle Nachrichten zugestellt. Ein Simulationszyklus des getakteten *DPG* ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Im PreStep fragen die Agenten den Zustand ihrer Netzelemente von der ihnen

Abbildung 5.4: Die Ausführungsstufen des DPG Frameworks

zugeordneten Schnittstelle ab und versenden gegebenenfalls neue Nachrichten. Diese werden in den SubSteps an die Empfänger weiter geleitet, dort verarbeitet und eventuell ebenfalls weitergeleitet. Im PostStep ermittelt jeder Regelagent auf Basis der erhaltenen Nachrichten den Netzzustand in seiner Umgebung und führt eine passende Regelaktion aus.

Kapitel 6

Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel soll analysiert werden, wie sich das in dieser Arbeit entwickelte Agentensystem bei verschiedenen Lastsituationen verhält. Dazu wird einerseits die Arbeitsweise des Algorithmus in schematischen Beispielnetzen untersucht und andererseits werden Simulationen mit Beispielen realistischer Energieübertragungsnetze durchgeführt.

6.1 Arbeitsweise des Algorithmus

Nachfolgend wird an zwei konkreten Beispielen vorgeführt, wie Überlastsituationen durch die Anwendung des Algorithmus zur Leistungsflussregelung behandelt werden. Es befinden sich Leistungsflussregler nach der in Abbildung 6.1 dargestellten Anordnung im Netz. Ein Leistungsflussregler bzw. der Regelagent muss anhand der Leitungen in seinem Einflussbereich ermitteln, ob zur Entlastung der *TapIncreaseZone* eine Erhöhung des Stufenstellers, zur Entlastung der *TapDecreaseZone* eine Senkung des Stufenstellers oder keine Aktion nötig bzw. möglich ist (vgl. Abschnitt 3.4.2). Diese Entscheidung wird auf Basis des in Abschnitt ?? beschriebenen Algorithmus getroffen.

6.1.1 Beispiel einer nicht abwendbaren Überlastsituation

In der Abbildung 6.1(a) ist eine Situation dargestellt, in der es keine Einstellung aller Regler ohne überlastete Leitungen gibt. In diesem Szenario befinden sich drei Regler r_1 , r_2 und r_3 , deren Einflussbereiche sich überlappen. Die Leitungen l_1 , l_2 , l_3 und l_4 sind gleich stark überlastet. Jeder Regler hat zwei überlastete Leitungen in seinem Einflussbereich, welche durch die Bewertungsfunktion f_{line} (vgl. Abschnitt ??) jeweils gleich bewertet werden. Die Lastflussrichtung auf den Leitungen ist durch Pfeile angedeutet. Der Regler r_1 beispielsweise bewertet die Leitungen l_1 und l_2 gleich. Eine Änderung der Stufenstellerposition zur Entlastung der Leitung l_1 würde die Leitung l_2 stärker belasten und andersherum. Deshalb wird durch Anwendung des Algorithmus für den Regler r_1 keine Regelaktion ermittelt. Gleiches gilt für die Regler r_2 und r_3 , da es für keinen dieser Regler eine Regelaktion gibt, die eine Leitung entlastet, ohne eine andere Leitung im jeweiligen Einflussbereich stärker zu belasten.

6.1.2 Beispiel einer abwendbaren Überlastsituation

Im Folgenden wird das Beispiel in Abbildung 6.1(b) betrachtet. Es ist eine ähnliche Situation wie in Abbildung 6.1(a) gegeben. Der Unterschied besteht darin, dass in diesem Beispiel die Leitung l_5 nicht überlastet ist und durch den Regler r_4 Last von der Leitung l_4 auf die Leitung l_5 verschoben werden kann, ohne eine andere Leitung zu überlasten. Es wird angenommen, dass alle Regler beliebig viel Last verschieben können, so dass die technischen Auslegungen der Regler keine Einschränkungen darstellen. Im Folgenden wird beschrieben, wie durch die Anwendung des Algorithmus die Überlast in diesem Beispiel beseitigt wird.

(a) Nicht abwendbare Überlastsituation

(b) Abwendbare Überlastsituation

Abbildung 6.1: Nicht abwendbare und abwendbare Überlastsituation

Die Regler r_1 , r_2 und r_3 führen vorerst keine Regelaktion aus, da eine Entlastung einer Leitung im jeweiligen Einflussbereich eine andere Leitung im Einflussbereich stärker belasten würde. Der Regelagent des Reglers r_4 kann eine Regelaktion bestimmen, da die Leitung l_5 nicht überlastet ist. Folglich gilt für die Bewertungsfunktion f_{line,r_4} des Reglers r_4 :

$$f_{line,r_4}(l_4) < f_{line,r_4}(l_5)$$

Nach dem Algorithmus wird der Pfad mit der Leitung l_4 durch den Regler r_4 zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ ms}$ entlastet. Nach 10 ms ist der Effekt dieser Regelaktion im Netz messbar. Für den Regler r_3 galt zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ ms}$:

$$f_{line,r_3}(l_4) = f_{line,r_3}(l_3)$$

Da der Regler r_4 die Leitung l_4 entlastet hat, gilt zum Zeitpunkt $t = 10 \text{ ms}$:

$$f_{line,r_3}(l_4) < f_{line,r_3}(l_3)$$

Der Regler r_3 , der vorher keine Regelaktion durchführen konnte, da er die Leitung l_4 genauso bewertet hat wie die entgegengesetzte Leitung l_3 , kann nun eine Regelaktion durchführen, da auf der Leitung l_4 der Lastfluss gesenkt wurde. Zum Zeitpunkt $t = 20 \text{ ms}$ stellt sich die Situation für den Regler r_2 , der aufgrund der Leitung l_3 und der entgegengesetzten Leitung l_2 keine Aktion durchführen konnte, folgendermaßen dar:

$$f_{line,r_2}(l_3) < f_{line,r_2}(l_2)$$

Auch dieser Regler kann nun eine Regelaktion durchführen. Letztendlich kann auch der Regler r_1 eine Regelaktion durchführen, da sich dieser Effekt fortsetzt. Frühestens zum Zeitpunkt $t = 30 \text{ ms}$ kann der Regler r_4 erneut eine Regelaktion bestimmen (vgl. Abschnitt 3.5).

Durch die Anwendung des Algorithmus wird in diesem einfachen Beispiel eine Entlastung aller überlasteten Leitungen erreicht, da genug Übertragungskapazität im Netz und Leistungsflussregler, welche die benötigten Lastflussverschiebungen ermöglichen, vorhanden sind. Die Verkettung der Regler über deren Einflussbereiche bewirkt eine Entlastung entlang dieser „Kette“. Zuerst werden die Leitungen entlastet, die sich nahe der nicht überlasteten Leitung befinden. Erst durch diese Entlastungen ist es anderen Reglern, die weiter entfernt vom nicht überlasteten Bereich liegen, ebenfalls möglich Regelaktionen durchzuführen. Eine simulative Betrachtung solcher Effekte wird in Abschnitt 6.3.2 vorgenommen.

6.1.3 Zeitbedarf für die Abwendung von Überlasten

Bei den eben betrachteten, überlasteten „Ketten“ war der Zeitbedarf für die Abwendung von Überlasten abhängig von der Größe des überlasteten Bereiches. Steigt die Größe des überlasteten Bereiches steigt auch die Zeit, die für die Abwendung aller Überlasten benötigt wird. Es soll im Folgenden betrachtet werden, ob die Entlastung aller Leitungen immer in einer angemessenen Zeit, das heißt bevor die Leitungen vom Netz getrennt werden müssen (vgl. Abschnitt ??), geschieht. Es wurde bisher keine genaue Aussage darüber getroffen, wann alle Überlasten behoben sind. Die Regler in dem eben betrachteten Beispiel führen in der Reihenfolge r_4 , r_3 , r_2 und r_1 nacheinander die Regelaktionen aus, so dass nach 40 ms eine erste aktive Entlastung der Leitung l_1 stattfindet.

Befinden sich in einem überlasteten Netzbereich mehrere Regler mit überschneidenden Einflussbereichen, so wurde bereits im vorhergehenden Abschnitt beispielhaft vorgeführt, wie Regler Regelaktionen durchführen. Sind die überschneidenden Einflussbereiche nicht kettenartig angeordnet, sondern haben komplexere Strukturen, bei denen sich mehr als zwei Einflussbereiche überschneiden, ist es möglich, dass eine Regelaktion eines Reglers mehreren anderen Reglern neue Regelmöglichkeiten eröffnet. Eine Abwendung der Überlastsituation ist in diesem Fall schneller möglich, da eine Regelaktion mehrere gleichzeitige Reaktionen zur Folge hat. Der Fall, dass überlastete Leitungen vorhanden sind und keine Regelaktion zur Entlastung einer Leitung möglich ist, ohne eine andere Leitung stärker zu belasten, soll hier nicht betrachtet werden. Daher existiert mindestens ein Regler, der aufgrund der neuen Lastsituation regeln kann. Wenn sich diese Situation fortsetzt, entsteht wieder eine kettenartige Struktur. Eine kettenartige Struktur stellt daher den Worst-Case dar und wird der folgenden Abschätzung zugrunde

gelegt.

Es soll abgeschätzt werden, wie viele Regler nach dem in Abbildung 6.2 dargestellten Schema angeordnet sein müssten, um eine rechtzeitige Überlastvermeidung, das heißt bevor Leitungen durch Schutzelemente vom Netz getrennt werden, nicht mehr erreichen zu können.

Abbildung 6.2: Anordnung von Reglern für die Betrachtung des Zeitbedarfs zur Abwendung von Überlasten

Beispielhaft werden die Sicherheitsparameter der E.ON Netz GmbH für die Höchstspannungsleitung Landesbergen-Wehrendorf herangezogen, welche in [?] zu finden sind. Diese Leitung ist für einen Dauerstrom von 2000 A ausgelegt und wird bei einem *Abschaltstrom* von 3000 A vom Netz getrennt. Eine Belastung von 2550 A , das entspricht 85% des Abschaltstromes, darf für maximal eine Stunde auf der Leitung anliegen [?]. Ein Strom von 2550 A entspricht einer Auslastung von $127,5\%$, wenn der Dauerstrom mit 100% festgelegt wird. Für die folgenden Betrachtungen werden diese Leitungsparameter angenommen.

Für die verwendeten Leistungsflussregler wird angenommen, dass jede Regelaktion eine Lastverschiebung von 10 MW bewirkt. Die Aussage, dass alle Regler die gleiche Lastflussverschiebung verursachen, kann nicht allgemeingültig getroffen werden, da die Lastflussverschiebung neben den Parametern des Leistungsflussreglers auch von der Netztopologie abhängt (vgl. Abschnitt 2.3.2). Da die hier betrachtete Netztopologie sehr gleichmäßig ist, ist diese Vereinfachung jedoch gerechtfertigt.

Für die folgenden Betrachtungen werden Leitungen mit einem zulässigen Dauerstrom von 2000 A angenommen. Die Auslastung der überlasteten Leitungen sei einheitlich $127,5\%$. Das entspricht, wenn vereinfachend angenommen wird, dass die Blindleistungsflüsse wesentlich kleiner sind als die Wirkleistungsflüsse, in etwa einer Überlast von 360 MW auf jeder Leitung. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

maximaler Dauerstrom auf Leitungen	2000 A
Abschaltstrom	3000 A
erlaubte Überlast für maximal eine Stunde	$2550\text{ A} = 127,5\% = 550\text{ A}$ zusätzlich $\approx 360\text{ MW}$ zusätzlich
Lastflussänderung durch Leistungsflussregler	10 MW

Tabelle 6.1: Parameter der Netzelemente für die Betrachtung des Zeitbedarfs zur Abwendung von Überlasten.

In Abbildung 6.1(b) sind vier überlastete Leitungen zu sehen. Diese können durch Regelaktionen der vier vorhandenen Regler entlastet werden. Da jede Leitung laut Annahme mit etwa 360 MW Wirkleistung überlastet ist und diese Wirkleistung entlang der Kette weiter gegeben wird, bedeutet das, dass von der Leitung l_4 insgesamt $360\text{ MW} \cdot 4 = 1440\text{ MW}$ verschoben werden müssen. Alle weiteren Regler können erst Lastflussverschiebungen vornehmen, wenn der Grenzbereich (in diesem Fall die Leitung

l_4) entlastet wurde. Über die Betrachtungen der Regelvorgänge, die unmittelbar diesen Grenzbereich betreffen, ist eine Abschätzung für den Zeitbedarf zur Entlastung aller Leitungen möglich. In dem in Abbildung 6.1(b) dargestellten Szenario muss der Regler r_4 1440 MW verschieben. Bei 10 MW je Stufenstellung müssen daher 144 Stellschritte durchgeführt werden. Da alle 30 ms eine Stufenstellung durchgeführt werden kann, ergibt sich ein Zeitbedarf von 4,32 Sekunden.

Um auf allen Leitungen innerhalb einer Stunde eine Überlast von 127,5 % nicht auf unter 100 % reduzieren zu können, müssten zur Entlastung der letzten Leitung folglich $\frac{60 \cdot 60 \cdot 1000 \text{ ms}}{30 \text{ ms}} = 120000$ Reaktionen nötig sein. Das bedeutet eine Leistungsverschiebung von $120000 \cdot 10 \text{ MW} = 1200000 \text{ MW}$. Bei einer Überlast von 360 MW auf jeder Leitung, bedeutet das eine Aneinanderreihung von etwa 3333 Leitungen bzw. Reglern. Das Netz der UCTE enthält etwa 4300 Übertragungsleitungen [?], so dass über die Hälfte aller Leitungen Parallelpfade zueinander sein müssten, um die eben hergeleitete Situation zu erreichen. Die Installation von über 3000 Reglern ist ebenfalls unrealistisch. Phasenschiebertransformatoren sind derzeit beispielsweise auf wenigen Leitungen in den Niederlanden und Belgien installiert, drei weitere sind im Süden Österreichs im Einsatz. Von mehreren hundert oder gar tausend Leistungsflussreglern kann keine Rede sein. Eine Ausstattung des Netzes mit derart vielen leistungsflussregelnden Betriebsmitteln ist auch aus wirtschaftlichen Gründen derzeit nicht sinnvoll, da für jedes Megawatt installierter Wirkleistung, je nach Bauart des Leistungsflussreglers, 10.000 bis 40.000 Euro Investitionskosten eingeplant werden müssen.

Ein derartig hohes Aufkommen sowohl an leistungsflussregelnden Betriebsmitteln als auch an Leitungen, auf denen voneinander abhängige Überlasten auftreten, ist nicht realistisch. Vielmehr sind die maximal verschiebbaren Leistungen, und damit die technischen Einschränkungen der Regler, begrenzende Faktoren, wie in den folgenden realistischen Experimenten zu sehen sein wird.

6.2 Beeinflussende Parameter

In den Kapiteln ?? und 4 wurden parametrisierte Bewertungsfunktionen, zur Bewertung der Leitungen im Einflussbereich eines Reglers, und Grenzwerte, zur Beschränkung des Kommunikationsaufwandes, eingeführt. Konkrete Parameter und Grenzwerte wurden bisher nicht festgelegt. In den im nächsten Abschnitt vorgestellten Simulationen werden unterschiedliche Parametersätze überprüft. Nachfolgend sind die benötigten Modell- und Kommunikationsparameter zusammengefasst.

6.2.1 Parameter zur Bewertung des Netzzustandes

Im Abschnitt ?? werden zwei Funktionen beschrieben, deren Ausgabewerte durch Parameter beeinflusst werden. Zum einen die Bewertungsfunktion f_{load} für die Auslastung einer Leitung und die Funktion f_{sens} , welche einen Sensitivitätsgrenzwert berechnet, so dass auch Leitungen entlastet werden, die noch nicht kritisch ausgelastet sind. Folgende Parameter beeinflussen diese Funktionen:

- *kritischer Lastwert*
Dieser Wert liegt bei 100% und definiert die kritische Auslastung einer Leitung. Wird er überschritten, muss die Leitung entlastet werden.
- *minimaler Sensitivitätswert*
Dieser Grenzwert legt fest, welche minimale Sensitivität eine Leitung zu einem Regler aufweisen muss, um zum Einflussbereich dieses Reglers zu gehören.
- *unterer Lastgrenzwert*
Dieser Wert legt fest, ab welcher Auslastung bereits erste Lastflussverschiebungen stattfinden sollen. Der Wert ist folglich kleiner als die kritische Auslastung.
- *oberer Lastgrenzwert*
Durch diesen Auslastungswert wird festgelegt, wann eine Leitung im Einflussbereich eines Reglers, die die minimale Sensitivität zu dem Regler aufweist, durch die Bewertungsfunktion f_{line} genauso bewertet wird, wie eine genau kritisch ausgelastete Leitung auf dem Regelungspfad des Reglers. Der obere Lastgrenzwert ist stets größer als die kritische Auslastung und beeinflusst die

Behandlung von Überlasten. Je kleiner dieser Faktor gewählt wird, umso steiler ist der Verlauf der in Abschnitt ?? beschriebenen Bewertungsfunktion f_{load} . Bei der Überprüfung dieses Parameters ist es sinnvoll zu untersuchen, ob sich die Regelung verbessert, wenn statt der linearen Steigung eine Steigung höheren Grades für f_{load} gewählt wird, indem diese Funktion potenziert wird.

6.2.2 Parameter für die Kommunikation

Das Kommunikationsmodell wird maßgeblich von zwei Parametern bestimmt (vgl. Abschnitt 4.5.3):

- Der Impedanzfaktor Z_{pfad} bestimmt, wann ein Parallelpfad zum Regelungspfad eines Leistungsflussreglers, der ein Vielfaches der Impedanz des Parallelpfades mit der geringsten Pfadimpedanz aufweist, nicht mehr beachtet wird.
- Der Faktor $Z_{parallel}$ bestimmt, welche Parallelpfade, die parallele Elemente zu einem anderen Parallelpfad haben, nicht beachtet werden.

Neben den beiden genannten Parametern sind weitere Parameter wichtig (vgl. Abschnitt 4.3.2):

- Die Anzahl der Hops bestimmt, über wie viele Netzelemente eine Zustandsnachricht weitergeleitet wird.
- Die maximale Pfadimpedanz bestimmt, wann eine Zustandsnachricht aufgrund einer zu hohen aufsummierten Pfadimpedanz nicht weitergeleitet wird.
- Die minimale Laständerung bestimmt, wann eine Leitung aufgrund einer Laständerung eine neue Zustandsnachricht initiiert. Ist die Differenz zwischen der aktuellen Auslastung und der Auslastung, bei der die letzte Zustandsnachricht versendet wurde, kleiner als dieser Grenzwert wird keine Nachricht erstellt.

Eine Nachricht, die mit ihrer aufsummierten Pfadimpedanz die maximale Pfadimpedanz überschreitet wird wie eine Nachricht, die das gegebene Hoplimit erreicht hat, verworfen. Beide Parameter sollten groß gewählt werden, um umfassende Informationen sammeln zu können. Andererseits wird durch wenige Hops und kleine Pfadimpedanzen der Kommunikationsaufwand reduziert. Wird die Anzahl der Hops oder die Pfadimpedanz zu klein gewählt, werden Nachrichten, die wichtige Informationen enthalten, nicht weitergeleitet. So erhalten die Regelagenten nicht genug Informationen, um daraus die Zustandsinformationen und Topologieinformationen des umliegenden Netzes zusammenzustellen.

Abhängig von der Laständerung auf einer Leitung werden Zustandsnachrichten versendet. Überschreitet die Laständerung einer Leitung die minimale Laständerung, wird eine neue Nachricht erzeugt (vgl. Abschnitt 4.3.2). Dieser Schwellwert sollte klein genug gewählt werden, um jede Laständerung mitzuteilen. Dem steht der steigende Kommunikationsaufwand entgegen.

6.3 Simulationen

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Netzszenarien betrachtet. Die Beispielnetze bestehen aus Erzeugern, Verbrauchern, Leitungen und Reglern. Durch die Erzeuger und Verbraucher werden die Lastverhältnisse vorgegeben. Die verteilte Leistungsflussregelung reagiert auf die daraus resultierenden Leitungsauslastungen. Anhand dieser Szenarien erfolgt die Evaluierung des in dieser Arbeit entwickelten verteilten Systems autonomer Agenten, das nach den Regeln des in Kapitel 4 beschriebenen Kommunikationsmodells arbeitet. Die Bestimmung von Regelaktionen erfolgt auf Basis des in Abschnitt ?? erstellten Algorithmus.

6.3.1 Ausfall eines Netzelementes

In diesem Abschnitt wird ein Beispiel betrachtet das [?] entnommen ist. Es ist ein Netzbeispiel mit fünf Leitungen, die einen Engpass zwischen einer Region mit Erzeugungsüberschuss und einer Region

mit Erzeugungsmangel darstellen. Derartige Engpässe können auch in realen Netzen auftreten. Nachfolgend wird für verschiedene Parametersätze des Kommunikationsmodells überprüft, wie zuverlässig die Sensitivitäten der Netzelemente im Einflussbereich eines Reglers ermittelt werden. Mit einem geeigneten Parametersatz wird die Abwendung von Überlasten durch Anwendung des Algorithmus gezeigt. Aufgrund der einfachen Netztopologie dieses Beispiels, kann gut nachvollzogen werden, wann Regelaktionen aufgrund welcher Leitungsauslastungen durchgeführt werden.

Simulationsaufbau

Die Netztopologie dieses Beispiels ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Die Parameter der einzelnen Leitungen sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Die Leitungen, welche die Knoten im Norden direkt miteinander verbinden (l_{AB} bis l_{DE}), sind ausreichend dimensioniert, um in keinem Fall überlastet zu werden.

Abbildung 6.3: Ausschnitt eines Netzengpasses

Leitung	Länge	Stromtragfähigkeit
l_1	35 km	2,6 kA
l_2	30 km	2,6 kA
l_3	35 km	2,6 kA
l_4	45 km	1,3 kA
l_5	40 km	2,6 kA

Tabelle 6.2: Parameter der Übertragungsleitungen

An den Knoten A, B, C, D und E werden jeweils 2000 MW Wirkleistung sowie die Blindleistung, die zur Spannungserhaltung benötigt wird, erzeugt. Weiterhin wird an jedem Knoten Wirkleistung von 900 MW bei einem Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) = 0,92$ entnommen. Am Knoten F wird eine Wirkleistung von 5500 MW mit einem Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) = 0,92$ verbraucht.

In diesem Szenario fällt zum Zeitpunkt $t = 5s$ die Leitung 3 aus. Es kommt zu Überlastungen auf den parallel verlaufenden Leitungen 2 und 4. Der unregelmäßige Lastverlauf der Leitungen ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

Bestimmung der Kommunikationsparameter

Das in Abbildung 6.4 gezeigte Netz ist sehr klein und bereits mit wenigen Hops ist die Topologie vollständig ermittelbar. Die längsten möglichen Nachrichtenpfade beinhalten sieben Elemente. Für

Abbildung 6.4: Verlauf der Leitungsauslastungen ohne Lastflussregelung

den Regler r_1 besteht der längste Pfad aus l_{AB} , l_{BC} , l_{CD} , l_{DE} , r_5 , l_5 und l_1 . Gleiches gilt für den Regler r_5 . Alle anderen Pfade sind kürzer. Für den Test des Szenarios werden die Anzahl der Hops und die maximale Pfadimpedanz so gewählt, dass keine Nachrichten verworfen werden. Die minimale Lastdifferenz, um eine neue Zustandsnachricht zu versenden, ist null. Es wird durch jeden Leitungsagenten alle 10 *ms* eine Zustandsnachricht versendet.

- Hoplimit > 7
- Für die maximalen Pfadimpedanz wird der größte darstellbare Wert gewählt.
- Minimale Lastdifferenz = 0

Ermittlung der Sensitivitäten

Die Zustandsinformationen, die zwischen den Netzelementagenten vermittelt werden, dienen den Reglagenten zur Bestimmung der Sensitivitäten, Auslastungen und Beeinflussungsrichtungen von Leitungen. Für das in Abbildung 6.3 gegebene Netz wird im Folgenden überprüft, wie gut die Sensitivitäten durch die Topologiebestimmung approximiert werden. Durch den Ausfall der Leitung l_3 änderte sich die Netztopologie und in der Folge die Sensitivitäten. In den Diagrammen in Abbildung 6.5 sind jeweils auf der linken Seite jedes Diagramms die Sensitivitäten vor dem Ausfall der Leitung l_3 zu sehen. Auf der rechten Seite ist die Situation nach dem Ausfall dargestellt. Die Abbildung 6.5(a) enthält die realen Sensitivitäten. Diese wurden ermittelt, indem in der Netzsimulation in *DlgSILENT PowerFactory* die Stufenstellung jedes einzelnen Reglers variiert wurde und die Lastflussänderung auf dem Regelungspfad mit der Lastflussänderung auf den Parallelpfaden verglichen wurde. Die durch die verteilte Topologiebestimmung ermittelten Sensitivitätswerte sind für zwei Parameter aufgetragen. Zum einen der Parameter Z_{pfad} , der den Faktor festlegt, um den die Pfadimpedanz eines Parallelpfades maximal größer sein darf, als die geringste Parallelpfadimpedanz eines Reglers. Zum anderen der Faktor $Z_{parallel}$, welcher festlegt, wann Pfade entfernt werden, die aufgrund parallel verlaufender Pfadelemente eine zu hohe Pfadimpedanz haben. Das Vorgehen zur Entfernung der Pfade ist in Kapitel 4 beschrieben.

Die Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsermittlung durch die verteilte Topologiebestimmung für verschiedene Werte von $Z_{parallel}$ und Z_{pfad} .

Die Variation von Z_{pfad} , wenn $Z_{parallel} \gg Z_{pfad}$ ist, ist in den Abbildungen 6.5(b), 6.5(d) und 6.5(f) dargestellt. Bei kleiner Wahl des Parameters ($Z_{pfad} = 2$) werden viele Netzelemente mit niedriger Sensitivität nicht erfasst (vgl. Abbildung 6.5(b)). Wird der Wert groß gewählt ($Z_{pfad} = 5$), werden in diesem Szenario keine Pfade verworfen (vgl. Abbildung 6.5(f)). Leitungen mit einer sehr geringen

(a) Referenzwerte für die Sensitivitäten

(b) Sensitivitäten bei $Z_{pfad} = 2$

(c) Sensitivitäten bei $Z_{parallel} = 3$

(d) Sensitivitäten bei $Z_{pfad} = 3$

(e) Sensitivitäten bei $Z_{parallel} = 5$

(f) Sensitivitäten bei $Z_{pfad} = 5$

(g) Sensitivitäten bei $Z_{parallel} = 7$

Abbildung 6.5: Sensitivitäten der Leitungen zu den Reglern für verschiedene Impedanzparameter

Sensitivität zu einem Regler werden, verglichen mit den Referenzwerten, zu hoch bewertet (Leitung l_1 für Regler r_4 und r_5).

Die Variation des Parameters $Z_{parallel}$ ($Z_{pfad} \gg Z_{parallel}$) ist in den Abbildungen 6.5(c), 6.5(e) und 6.5(g) dargestellt. Netzelemente mit kleinen Sensitivitäten, wie beispielsweise die Leitungen l_4 und l_5 werden durch den Regler r_1 verworfen, wenn $Z_{parallel} = 3$ ist. Liegt eine größere Sensitivität vor, wird diese zuverlässiger ermittelt, wie beispielsweise bei der Leitung l_4 für den Regler r_5 und der Leitung l_5 für den Regler r_4 . Je größer $Z_{parallel}$ gewählt wird, umso weniger Elemente mit kleiner Sensitivität werden verworfen. In Abbildung 6.5(e) ist zu sehen, dass die Leitungen, welche bei kleiner Wahl des Parameters verworfen wurden, nun gegenüber den Referenzwerten zu hoch bewertet sind. Dieser Effekt ist beispielsweise bei der Leitung l_1 in Bezug auf die Regler r_4 und r_5 beobachtbar. Elemente, die eine große Sensitivität haben, werden hingegen zu gering bewertet. Die Leitung l_4 in Bezug zum Regler r_5 zeigt dieses Resultat. Der Abbildung 6.5(g) ist zu entnehmen, dass für $Z_{parallel} = 7$ alle Elemente erfasst werden, da kein Pfad verworfen wird. Die Sensitivitäten der Regelungspfadelemente werden in allen Fällen richtig mit dem Wert 1 bestimmt.

Die Sensitivitätsbestimmung liefert bei kleinen Werten, sowohl für Z_{pfad} als auch für $Z_{parallel}$ zuverlässig die Sensitivitäten von Netzelementen, die eine große Sensitivität zu einem Regler aufweisen. Wird Z_{pfad} oder $Z_{parallel}$ größer gewählt, werden Elemente, die eine geringe Sensitivität besitzen, zu hoch und Elemente mit einer hohen Sensitivität zu gering bewertet.

Werden durch einen Regler alle Leitungen des Beispiels erfasst ($Z_{pfad} = 5$ und $Z_{parallel} = 7$), so beachten die Regelagenten auch Leitungen, die sie wenig beeinflussen können (vgl. Abbildung 6.5(f) für den Regler r_1 und die Leitung l_5). Bei Wahl des Parameters $Z_{parallel} = 3$ sind die Sensitivitäten der Leitungen mit einer Sensitivität $> 0,3$ ausreichend genau erfasst. Die Elemente mit kleiner Sensitivität von $\leq 0,1$ werden meist verworfen. Die überschneidenden Einflussbereiche der Regler ergeben, durch die ermittelten Sensitivitäten (vgl. Abbildung 6.5(c)), einen zusammenhängenden Bereich, wenn die minimale Sensitivität $\leq 0,3$ gewählt wird. Ein Wert von $Z_{parallel} = 3$ erzielt somit zuverlässige Ergebnisse in diesem Szenario und wird für dessen weitere Simulationen verwendet. Z_{pfad} wird so gewählt, dass keine Pfade durch diesen Parameter verworfen werden.

Werden die Parameter Z_{pfad} oder $Z_{parallel} \leq 1$ gewählt, wird jeweils nur der beste Parallelpfad eines Reglers beachtet. Die beachteten Einflussbereiche sind sehr klein und überschneiden sich unter Umständen nicht. Für die verteilte Koordinierung ist die Überschneidung der Einflussbereiche der Regler wichtig. Im Abschnitt 6.3.3 werden unterschiedlich große Einflussbereiche untersucht.

Betrachtung der Regelvorgänge

Für die Simulation der Regelung des hier betrachteten Engpasses zwischen zwei Zonen werden folgende Parameter verwendet:

- Für die Bewertungsfunktion f_{load} wird ein oberer Lastwert von 105 % verwendet.
- Minimale Sensitivität = 0,1
- Unterer Lastgrenzwert = 95 %
- $Z_{parallel} = 3$
- $Z_{pfad} \geq 5$

Der Lastverlauf der Leitungen 1 bis 5 sowie die Stellverläufe der Regler 1, 4 und 5 sind in der Abbildung 6.6 dargestellt.

Zu Beginn der Simulation hat die Leitung l_4 eine leichte Überlast. Diese Leitung liegt auf dem Regelungspfad des Reglers r_4 und im Einflussbereich des Reglers r_5 . Der Algorithmus bestimmt für den Regler r_4 die Leitung zu entlasten und der Regler nimmt entsprechende Regelaktionen vor. Der Regler r_5 entlastet ebenfalls die Leitung l_4 , da der Sensitivitätsgrenzwert f_{sens} für diese Leitung aufgrund der Überlast minimal ist (vgl. Abschnitt ??). Nach wenigen 10 ms ist die Auslastung der Leitung l_4 , durch die Regelaktionen der Regler r_4 und r_5 , auf unter 100 % reduziert. Nach Unterschreiten der kritischen Auslastung der Leitung l_4 bewertet der Regler r_5 diese aufgrund des Sensitivitätsgrenzwertes mit null.

(a) Lastverlauf bei Ausfall von Leitung 3

(b) Stellverlauf der Regler

Abbildung 6.6: Lastverlauf und Stufenstellerpositionen bei verteilter Koordinierung

Da sich im Einflussbereich des Reglers r_5 keine weitere Leitung befindet, die überlastet ist, wird er auf die Nullposition zurückgestellt. Der Regler r_4 führt weitere Regelaktionen aus, bis die Leitung l_4 den unteren Lastgrenzwert von 95 % erreicht hat. Danach verbleibt er in dieser Position.

Nach 5 Sekunden fällt die Leitung l_3 aus. Die Leitungen l_2 und l_4 sind überlastet (vgl. Abbildung 6.6(a)). Folgende Regelaktionen werden durchgeführt:

- Der Regler r_4 mindert den Lastfluss auf der Leitung l_4 , da diese auf seinem Regelungspfad liegt. Die überlastete Leitung l_2 befindet sich ebenfalls im Einflussbereich des Reglers. Da die Leitung l_4 jedoch stärker ausgelastet ist und eine größere Sensitivität zu dem Regler aufweist, wird diese höher bewertet und demzufolge entlastet.
- Der Regler r_5 entlastet ebenfalls die Leitung l_4 , da diese überlastet ist. Der Regelungspfad des Reglers r_5 hingegen hat noch Kapazitäten.
- Der Regler r_1 entlastet die Leitung l_2 , indem er Leistung auf seinen Regelungspfad verschiebt.

Innerhalb von einer Sekunde wird die Last auf allen Leitungen auf unter 100 % reduziert.

Zum Zeitpunkt $t = 6 \text{ s}$ sind die Auslastungen der Leitungen etwa gleich. Die Regler r_4 und r_5 entlasten vorrangig ihre Regelungspfade, so dass sich die Stufenstellung der Regler und die Last auf den Leitungen folgendermaßen ändert:

- Der Regler r_5 entlastet die Leitung l_5 , indem die Stufenstellung erhöht wird.
- Der Regler r_1 entlastet weiterhin die Leitung l_2 , indem die Stufenstellung gesenkt wird.
- Der Regler r_4 entlastet die Leitung l_4 durch Erhöhung seiner Stufenstellung.

Nach etwa $6,5 \text{ s}$ werden keine Regelaktionen mehr durchgeführt. Da alle Leitungen nahezu gleich ausgelastet sind, kann der Gesamtzustand nicht verbessert werden. Jede weitere Regelaktion würde eine direkte Gegenaktion zur Folge haben. Dieser Effekt wurde in Abschnitt ?? behandelt und wird durch die dort beschriebene Dämpfung verhindert.

Es wurde gezeigt, dass durch die verteilte Koordinierung auf Überlasten reagiert wird und dass diese abgewendet werden. Der Ausfall der Leitung l_5 hatte eine Topologieänderung des Netzes zur Folge, welche einige Leitungen überlastete. Auch in dieser Situation wurden Regelaktionen so bestimmt, dass letztendlich keine Leitung überlastet war.

6.3.2 Auftretende Überlasten bei mehreren benachbarten Reglern

In den folgenden drei Netzbeispielen sollen Effekte, die sich durch die überschneidenden Einflussbereiche verschiedener Regler ergeben, analysiert werden. Dazu werden Netztopologien betrachtet, bei denen die Regler und die Leitungen kettenartig hintereinander angeordnet sind. Folgende Parameter verwendet:

- Hoplimit = 10
- Für die maximale Pfadimpedanz wird der größte darstellbare Wert gewählt.
- Minimale Lastdifferenz = 0

Die Kommunikationsparameter sind so gewählt, dass durch sie keine Einschränkungen beim Informationsaustausch entstehen. Das Hoplimit von 10 stellt bei den betrachteten Netztopologien sicher, dass ein Regelagent alle Nachrichten erhält, die für ihn relevant sein können.

- Für die Bewertungsfunktion f_{load} wird ein oberer Lastwert von 105 % verwendet.
- minimale Sensitivität = 0,1
- unterer Lastgrenzwert = 95 %
- $Z_{parallel} = 3$
- Z_{pfad} wird ≥ 20 gewählt, um durch diesen Parameter keine eventuell relevanten Pfade zu verwerfen.

Anordnung fünf paralleler Regler

In dem in Abbildung 6.7 dargestellten Szenario, sind fünf Regler parallel zueinander angeordnet. Ähnlich dem Beispiel aus Abschnitt 6.3.1 sind eine Zone mit Erzeugungsüberschuss und eine Zone mit Erzeugungsmangel verbunden. Die Anordnung der Leitungen ist sehr gleichmäßig, so dass die Regelaktionen der einzelnen Regler gut nachvollzogen werden können.

An den Knoten im oberen Bereich befinden sich Erzeuger, welche Verbraucher im unteren Netzbereich versorgen. Die Verbraucher an den Knoten F, G und H benötigen jeweils 2200 MW Wirkleistung. Die Generatoren an den Knoten A, B und C erzeugen jeweils 2200 MW Wirkleistung. Der Verbraucher an Knoten I benötigt 3500 MW Wirkleistung. Diese Wirkleistung wird durch den Erzeuger am Knoten D zur Verfügung gestellt. Die Leitungen l_1 , l_2 , l_3 und l_4 haben eine Stromtragfähigkeit von 2,6 kA und sind jeweils 20 km lang. Diese Leitungen sind aufgrund der gegebenen Situation von Erzeugung und Verbrauch überlastet. Die Leitungen l_5 und l_6 haben eine Stromtragfähigkeit von 5,2 kA bei einer Länge von 40 km. Die Querverbindungen zwischen den Knoten haben jeweils eine Stromtragfähigkeit von 10,4 kA und stellen keine Engpässe dar. Die Regler r_1 bis r_5 können durch eine Erhöhung der Stufenstellung jeweils ihren Regelungspfad entlasten. Die Leitung l_6 ist als einzige Leitung nicht direkt geregelt. Die Leitungen l_1 bis l_4 sind zu Beginn der Simulation gleich stark überlastet. Die Leitungen l_5 und l_6 weisen keine Überlast auf (vgl. Abbildung 6.8(a)).

Abbildung 6.7: Netzbeispiel für eine Kette paralleler, geregelter Leitungen

In Abbildung 6.8(a) ist der Verlauf der Leitungsauslastungen aufgetragen. Abbildung 6.8(b) zeigt die entsprechenden Einstellungen der Regler. Folgende Regelaktionen werden zu Beginn der Simulation durchgeführt:

- Die Regler r_1 bis r_4 erhöhen ihre Stufenstellung, um ihren jeweiligen Regelungspfad zu entlasten. Diese Aktionen werden so lange wiederholt, bis die Bewertung f_{line} eines Parallelpfades höher ist, als die Bewertung des jeweiligen Regelungspfades.
- Der Regler r_5 belastet seinen Regelungspfad indem die Stufenstellung gesenkt wird, um Leitung l_4 zu entlasten.

Nach etwa 0,6 s wird folgende Regelaktion durchgeführt:

- Der Regler r_4 entlastet erstmals nicht seinen Regelungspfad, da die Bewertung f_{line} der Leitung l_3 größer ist, als die Bewertung des ebenfalls überlasteten Regelungspfades.

Folgende Regelaktionen werden nach etwa 1 s durchgeführt:

- Der Regler r_3 entlastet ebenfalls erstmals nicht seinen Regelungspfad, da die Bewertung f_{line} der Leitung l_2 größer ist, als die Bewertung des Regelungspfades.

Die gleiche Situation ergibt sich nach etwa 1,3 s auch für den Regler r_2 .

Da durch die Leitungen l_5 und l_6 genug Übertragungskapazität gegeben ist, um alle Überlasten abzuwenden, ist nach etwa 1,8 s keine Leitung mehr über 100 % ausgelastet. Der Sensitivitätsgrenzwert f_{sens} jeder Leitung steigt aufgrund der sinkenden Auslastungen der Leitungen. Dies führt dazu, dass einige Regler erste Parallelpfade nicht mehr beachten, obwohl diese noch über dem unteren Lastgrenzwert von 95 % belastet sind. Aus dieser Situation ergeben sich folgende Regelaktionen:

(a) Lastverlauf der Leitungen

(b) Stellverlauf der Regler

Abbildung 6.8: Lastverlauf und Stufenstellerpositionen bei verteilter Koordinierung von fünf parallelen Reglern

- Der Regler r_5 regelt zur neutralen Position, da die Leitung l_4 nicht mehr beachtet wird.
- Der Regler r_4 erhöht seine Stufenstellung weiter, da sein Regelungspfad durch das Zurückstellen des Reglers r_5 belastet wird.
- Der Regler r_3 erhöht ebenfalls seine Stufenstellung, da eine zusätzliche Belastung auf der Leitung l_3 durch die Regelung des Reglers r_4 entsteht.
- In gleicher Weise setzt sich dieser Effekt für die Regler r_2 und r_1 fort.

In Abbildung 6.8 ist zu sehen, dass der Regler r_5 nach ca. 3,5 s die neutrale Position erreicht hat. Seine Parallelpfade, insbesondere die Leitung l_4 , wurden durch das Zurückstellen belastet und die entsprechenden Regler regelten durch Erhöhungen der Stufensteller dagegen. Da der Regler r_5 keine weiteren Regelaktionen durchführt, werden die Parallelpfade nicht weiter belastet. Die Leitungen l_1 bis l_4 sind knapp unter dem unteren Lastgrenzwert belastet. Sie halten ihre Stufenstellerposition, da eine Erhöhung nicht nötig ist und eine Senkung eine Überschreitung des unteren Lastgrenzwertes auf dem Regelungspfad zur Folge hat (vgl. Abschnitt ??).

Die Abbildung 6.8(a) zeigt, dass die Leitung l_6 anfänglich entlastet wird, obwohl sie nicht überlastet ist. Durch die Regelung des Reglers r_5 zur Entlastung der Leitung l_4 wird auch Leistung von der Leitung l_6 abgezogen. Diese Verschiebung erzeugt unnötige Verlustleistung auf der Leitung l_5 . Diese wird vermieden, indem der Regler r_5 , nachdem alle Überlasten in seinem Einflussbereich behoben sind, wieder auf seine neutrale Position gestellt wird.

Im Vergleich zur unkoordinierten Regelung, wie in Abbildung 6.9 dargestellt, wird die Überlast auf den Leitungen in kürzerer Zeit unter die kritische Auslastung von 100 % gesenkt. Grund hierfür ist der Regler r_5 , welcher bei koordinierter Regelung ebenfalls die Leitung l_4 entlastet. Bei unkoordinierter Regelung betrachtet jeder Regler nur seinen Regelungspfad.

Anordnung von vier Reglern zwischen parallelen Leitungen

In diesem in Abbildung 6.10 dargestellten Beispiel ist die Erzeugungs- und Lastsituation gleich der Situation im vorhergehenden Szenario. Die Leitungen l_1 bis l_4 besitzen eine Stromtragfähigkeit von 2,6 kA und die Leitung l_5 weist eine Stromtragfähigkeit von 10,4 kA auf. Die Regler hingegen befinden sich nicht auf den überlasteten Leitungen, sondern jeweils als Querverbindung zwischen zwei Leitungen. Die Lastverläufe der Leitungen und die Stufenstellerverläufe der Regler sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Durch eine Senkung der Stufenstellerposition erzeugen die Regler jeweils eine Lastverschiebung von links nach rechts. Die Leitungen l_1 , l_2 , l_3 und l_4 sind mit 130 % überlastet (vgl. Abbildung 6.11(a)). Die Leitung l_5 ist mit unter 20 % belastet. Die Abbildung 6.11(b) zeigt, dass die Regler r_1 , r_2 und r_3 zu Beginn der Simulation keine starken Regelaktionen durchführen. Der Regler r_4 , welcher eine Lastverschiebung von der Leitung l_4 auf die Leitung l_5 durchführen kann, führt diese aus, da die Leitung l_5 nicht überlastet ist. Wenn die Last auf der Leitung l_4 gesenkt wurde, verschiebt der Regler r_3 die Last von der Leitung l_3 auf die Leitung l_4 . Dieser Effekt setzt sich fort, das heißt, alle weiteren Regler verschieben jeweils dann Last, wenn die rechte benachbarte Leitung weniger stark belastet ist als die linke Leitung. Da die Leitung l_4 durch die Regelaktionen der Regler r_1 bis r_3 belastet wird, senkt der Regler r_4 die Stufenstellerposition zur Entlastung der Leitung l_4 bis diese durch die anderen Regler nicht weiter belastet wird. Aus diesem Grund ist die Auslenkung des Reglers r_4 wesentlich größer als die Auslenkung der anderen Regler. In diesem Szenario ist die Auslastung aller Leitungen nach etwa zwei Sekunden auf unter 100 % reduziert.

Anordnung zehn paralleler Regler

In diesem Szenario, sind wie in Abbildung 6.12 dargestellt, zehn parallele Regler angeordnet. Die Parameter der Leitungen sowie die Belastung durch die Verbraucher und die Erzeugung durch die Generatoren ist identisch zu dem Szenario, in dem fünf parallele Regler angeordnet sind. Die Abbildung 6.13(a) zeigt, dass zu Beginn der Simulation die Leitungen l_1 bis l_9 gleich stark ausgelastet sind. Die Leitungen l_{10} und l_{11} können weitere Leistung aufnehmen, ohne überlastet zu werden.

Die Entlastung der einzelnen Leitungen findet analog zum Beispiel der fünf parallelen Regler statt.

(a) Lastverlauf der Leitungen

(b) Stellverlauf der Regler

Abbildung 6.9: Lastverlauf und Stufenstellerpositionen bei unkoordinierter Regelung von fünf parallelen Reglern

Abbildung 6.10: Netzbeispiel für eine Kette paralleler, geregelter Leitungen

(a) Lastverlauf der Leitungen

(b) Stellverlauf der Regler

Abbildung 6.11: Lastverlauf und Stufenstellerpositionen bei verteilter Koordinierung von vier Reglern

Abbildung 6.12: Netzbeispiel für eine Kette von zehn parallelen, direkt geregelten Leitungen

Der Unterschied besteht darin, dass eine längere Zeit benötigt wird, bis alle Überlasten beseitigt sind. Je länger eine Kette von Reglern mit überlappenden Einflussbereichen wird, umso länger dauert es alle Überlasten abzuwenden. In dem hier vorgestellten Beispiel wird ein weiteres Problem sichtbar. Je mehr Regler mit überlasteten Leitungen kettenartig über ihre Einflussbereiche verbunden sind, umso mehr müssen einige Regler in dieser Kette aussteuern, um die Überlast abzuwenden. Leistungsflussregler können, aufgrund begrenzter Stufenstellungen, Lastflüsse nicht unbegrenzt verschieben.

An den drei eben betrachteten Szenarien, in denen überlastete Leitungen kettenartig angeordnet waren, konnte eine Eigenschaft der hier entwickelten Koordinierung sehr gut gezeigt werden. Jeder einzelne Regelagent hat jeweils nur Wissen über die Netzelemente, die sich in seiner Nähe befinden. Dennoch war es möglich, die Überlasten auf den Leitungen abzuwenden. Regelagenten in solchen Netzregionen, in denen noch Last auf nicht überlastete Pfade verschoben werden konnte, haben diese Verschiebungen vorgenommen, und so Regelagenten in Regionen, die vorerst keine Regelaktionen durchführen konnten, diese zu ermöglichen. Durch dieses auf lokalem Wissen basierende Handeln konnte dennoch eine globale Entlastung erzielt werden, ohne dabei einzelne Netzelemente stärker zu belasten.

6.3.3 Netzmodell Deutschland

Vor dem Hintergrund der geplanten Installation von Offshore-Windparks in der Nord- und Ostsee kommt es zu einer verstärkten Leistungserzeugung im Norden Deutschlands. Die Verbrauchszentren liegen weiter südlich, so dass die erzeugte Leistung über das Höchstspannungsnetz von Norden nach Süden transportiert werden muss. Aufgrund dieser erhöhten Leistungsflüsse kommt es zu Leitungsüberlastungen auf Höchstspannungsleitungen. In Abbildung 6.14 ist ein vereinfachter Ausschnitt des deutschen Energieübertragungsnetzes dargestellt, in dem es zu Überlasten kommt, wenn viel Windenergie eingespeist wird. Es soll im Folgenden überprüft werden, ob durch die verteilte Koordinierung von Leistungsflussreglern trotz der steigenden Leistungsflüsse auf den Leitungen sichere Netzzustände erhalten werden können.

(a) Lastverlauf der Leitungen

(b) Stellverlauf der Regler

Abbildung 6.13: Lastverlauf und Stufenstellerpositionen bei verteilter Koordinierung von zehn parallelen Reglern

Simulationsaufbau

Ab dem Zeitpunkt $t = 20$ s steigt die Energieerzeugung im Norden kontinuierlich an. Dies simuliert eine steigende Windenergieeinspeisung. Andere Kraftwerke im Netz müssen ihre Erzeugung drosseln, um das Leistungsgleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch zu erhalten. Die Leistungserzeugung an den in Abbildung 6.14 dargestellten Knoten ist in Abbildung 6.15 zu sehen. Es ergibt sich ein Lastfluss von Norden nach Süden. Die Leitungen 2003-1, 2003-3, 0219-1 und 0609-1 sind zum Zeitpunkt $t = 120$ s überlastet (vgl. Abbildung 6.16). Auf den Leitungen 2003-1, 2003-3, 0219-1 und 0604-1 befinden sich Leistungsflussregler.

Der Lastverlauf ohne Regeleingriffe ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Im unregulierten Fall ist die Leitung 2003-1 nach 120 s mit 180 % ausgelastet. Bereits vor Erreichen dieser hohen Überlast würde sie durch automatische Schaltmaßnahmen vom Netz getrennt werden. Die Last würde sich auf andere Leitungen, wie beispielsweise Leitung 2003-3 verlagern, welche ab diesem Zeitpunkt ebenfalls stark überlastet wären und in der Konsequenz vom Netz getrennt werden würden. Dieser Effekt kann sich fortsetzen und möglicherweise zu einem Blackout führen. Ohne Leistungsflussregelung könnte die erzeugte Leistung nicht übertragen werden.

Bestimmung der Kommunikationsparameter

Die Kommunikationsparameter für das Netzmodell Deutschland werden im Folgenden festgelegt. Das Hoplimit wird auf 10 gesetzt. Mit diesem Grenzwert sind große Umläufe im gegebenen Netzmodell möglich, so dass relevante Zustandsnachrichten nicht verworfen werden. Die maximale Pfadimpedanz verhindert, dass Nachrichten weitergeleitet werden, deren aufsummierte Pfadimpedanz die maximale Pfadimpedanz überschreitet (vgl. Abschnitt 4). Sie wird bei den folgenden Simulationen auf 200 Ω gesetzt. Dieser Wert ist ein Vielfaches der Impedanzen der jeweils besten Parallelpfade jedes Reglers, so dass aufgrund der maximalen Pfadimpedanz keine relevanten Zustandsinformationen verworfen werden. Die minimale Lastdifferenz, bevor eine neue Zustandsnachricht versendet wird, wird auf 0,25 % gesetzt. Dies stellt ein angemessenes Mittelmaß zwischen Kommunikationsaufwand und Aktualisierungsrate der Netzinformationen dar. Zusammengefasst werden folgende Kommunikationsparameter verwendet:

- Hoplimit = 10
- maximale Pfadimpedanz = 200 Ω
- minimale Lastdifferenz = 0,25 %

Abbildung 6.14: Betrachteter Netzausschnitt im Netzmodell Deutschland

(a) Wirkleistungserzeugung an den Netzknoten im Norden Deutschlands
(b) Verlauf der Leistungserzeugung an den Netzknoten
Brunsbüttel, Hamburg Ost, Dollern, Bremen, Rostock und Diele

Abbildung 6.15: Gesamtverlauf der Leistungserzeugung im Norden Deutschlands

Abbildung 6.16: Leitungsauslastungen ohne Leistungsflussregelung

Ermittlung der Sensitivitäten

Die Parameter Z_{pfad} und $Z_{parallel}$ wurden bereits in dem Szenario in Abschnitt 6.3.1 überprüft. Gleichartige Untersuchungen werden an diesem Netzmodell durchgeführt. Beide Parameter werden auch für dieses Netzbeispiel variiert, um deren Einfluss auf die Sensitivitätsbestimmung zu untersuchen. In Abbildung 6.17 sind die ermittelten Sensitivitäten für verschiedenen Werte von Z_{pfad} und $Z_{parallel}$ dargestellt. Die Abbildung 6.17(a) zeigt die realen Sensitivitäten.

Die ermittelten Sensitivitäten für einen Faktor $Z_{pfad} = 2$ sind in Abbildung 6.17(b) dargestellt. Die Ergebnisse sind gegenüber den realen Werten, welche in Abbildung 6.17(a) dargestellt sind, nicht zufriedenstellend. Der Regelagent 2003-3 beispielsweise erkennt als einzigen Parallelpfad die Leitung 2003-1. Die Leitungen L798177 und 0219-1 werden von diesem nicht beachtet. Die erkannten Leitungen werden durch die jeweiligen Regelagenten gegenüber den Referenzwerten meist zu hoch bewertet.

Für $Z_{pfad} = 3$ werden alle Elemente mit einer Sensitivität $> 0,3$ erkannt (vgl. Abbildung 6.17(d)). Die Sensitivität dieser Elemente wird richtigerweise mit $> 0,3$ bestimmt. Die Sensitivitätswerte der erkannten Leitungen sind etwas zu hoch.

Für $Z_{pfad} = 5$ werden weitere Elemente mit einer Sensitivität von $\leq 0,1$ erkannt (vgl. Abbildung 6.17(f)). Diese Elemente, die eine geringe Sensitivität besitzen, werden jedoch ungenau bestimmt. Für die Leitung 0519-1 beispielsweise wird durch den Regelagent 2003-1 eine Sensitivität von $> 0,2$ bestimmt, obwohl der reale Wert $\ll 0,1$ ist.

Für $Z_{parallel} = 3$ ähneln die Ergebnisse den Resultaten für $Z_{pfad} = 3$ (vgl. Abbildung 6.17(c) und 6.17(d)). Es werden ebenfalls alle Elemente mit einer Sensitivität $> 0,3$ erkannt.

Wird der Wert $Z_{parallel} = 4$ gewählt, werden zusätzlich Elemente mit einer geringeren Sensitivität erkannt (vgl. Abbildung 6.17(e)). Die Leitung L798177 wird beispielsweise durch die Regelagenten 0604-1 und 2003-3 erkannt.

Bei der Wahl von $Z_{parallel} = 5$ werden weitere Leitungen mit einer Sensitivität $\leq 0,1$ erkannt (vgl. Abbildung 6.17(g)). Die Leitungen 0609-1 und 1921-1 werden durch den Regelagenten 2003-3 erkannt, die Leitungen 0604-1 und 0609-1 durch den Regler 0219-1. Für die bereits bei $Z_{parallel} = 4$ erkannten Elemente tritt jedoch bei $Z_{parallel} = 5$ keine Verbesserung der Ergebnisse ein.

Durch die Wahl des Faktors $Z_{parallel} = 3$ werden gute Ergebnisse für Elemente mit großer Sensitivität erzielt. Wird $Z_{parallel} = 4$ gewählt, werden weitere Elemente mit geringerer Sensitivität beachtet. Eine größere Wahl von $Z_{parallel}$ verbessert die Ergebnisse nicht. Durch Variation des Faktors $Z_{parallel}$ werden ausreichend gute Ergebnisse erzielt, so dass Z_{pfad} so gewählt wird, dass dieser die Sensitivitäts-

(a) Reale Sensitivitäten zwischen Reglern und Leitungen

(b) Sensitivitäten für $Z_{pfad} = 2$

(c) Sensitivitäten für $Z_{parallel} = 3$

(d) Sensitivitäten für $Z_{pfad} = 3$

(e) Sensitivitäten für $Z_{parallel} = 4$

(f) Sensitivitäten für $Z_{pfad} = 5$

(g) Sensitivitäten für $Z_{parallel} = 5$

Abbildung 6.17: Vergleich zwischen den ermittelten und realen Sensitivitäten

bestimmung nicht beeinflusst ($Z_{pfad} \gg Z_{parallel}$). Für die folgenden Simulationen wird ein Wert von $Z_{parallel} = 4$ verwendet. Z_{pfad} wird ≥ 20 gewählt, um keine eventuell relevanten Pfade durch diesen Parameter zu verwerfen.

Ermittlung der minimalen Sensitivität

Über den minimalen Sensitivitätsgrenzwert wird festgelegt, wie groß der Einflussbereich eines Reglers ist. Der maximale Grenzwert von 1 führt dazu, dass ein Regelagent nur die Elemente auf seinem Regelungspfad beachtet. In diesem Fall liegt eine unkoordinierte Regelung vor. Je kleiner der Grenzwert ist, desto größer wird der Bereich, den jeder Regelagent bei der Regelung berücksichtigt. Bei zu großer Wahl des Parameters gibt es möglicherweise keine überschneidenden Einflussbereiche. Die Regelung wird für drei Sensitivitätsgrenzwerte unter Verwendung der koordinierten Regelung überprüft. Folgende Parameter werden dazu verwendet:

- Bewertungsfunktion f_{load} mit linearer Steigung und oberem Lastwert von 105 %
- unterer Lastgrenzwert = 95 %
- $Z_{parallel} = 4$
- $Z_{pfad} \geq 20$

Bei einer verteilten Koordinierung mit einem minimalen Sensitivitätsgrenzwert von 0,5 kommt es auf der Leitung L798177 zu einer Überlast (vgl. Abbildung 6.18(a)), die durch keinen Regelagenten beachtet wird. Die Auslastung der Leitung 2003-1 überschreitet nach etwa 100 s die kritische Auslastung von 100 %. Ursache ist, dass der Regelagent 2003-1 seine maximale Stufenposition erreicht hat (vgl. Abbildung 6.19(a)). Die Leitung 2003-1 ist ab diesem Moment unregelt, da der Regler 2003-1 sie nicht mehr entlasten kann. Die Überlast der Leitung 2003-1 wird von keinem anderen Regelagenten beachtet. Für den Fall, dass der Sensitivitätsgrenzwert bei 0,5 liegt, zerfällt das Beispielnetz in Einflussbereiche, die sich nicht überschneiden. Die meisten Regelagenten beachten neben ihrem Regelungspfad keine Elemente, die auf einem Parallelpfad liegen. Das Sensitivitätsdiagramm in Abbildung 6.17(e) zeigt, dass die meisten Sensitivitäten der Elemente, die nicht auf dem Regelungspfad eines Reglers liegen, kleiner sind als 0,5. Jeder Regelagent sollte aber wenigstens den Parallelpfad beachten, der die geringste Pfadimpedanz aufweist. Das ist mit einem minimalen Sensitivitätsgrenzwert von 0,5 nicht möglich. Dieser Wert ist daher zu hoch gewählt.

Mit einem minimalen Sensitivitätsgrenzwert von 0,3 stellt sich die Situation in Abbildung 6.18(b) so dar, dass die Leitung L798177 weniger stark ausgelastet ist, da nun der Regelagent 0219-1 diese Leitung bei der Regelung beachtet (vgl. Abbildung 6.17(e)). Da der Regelungspfad des Reglers 0219-1 bereits kritisch belastet ist, wird die Leitung L798177 auch überlastet. Die Überlast ist jedoch geringer als bei einem minimalen Sensitivitätsgrenzwert von 0,5. Die Auslastung von Leitung 2003-1 steigt nicht mehr über 120 %, da diese Leitung durch die Regelagenten 2003-3 und 0219-1 beachtet wird. Dennoch zerfällt das Netz, bei einem minimalen Sensitivitätsgrenzwert von 0,3 mit den gegebenen Reglern in zwei getrennte Regelbereiche. Leitung 0420-1 wird nur von dem Regelagent 0604-1 beachtet. Dies beschreibt einen Regelbereich. Der andere geregelte Bereich ergibt sich aus den Leitungen 2003-1, 2003-3, 0219-1, 0519-3 sowie L798177.

Bei einem minimalen Sensitivitätsgrenzwert von 0,1 ist die Auslastung der Leitungen L798177 und 2003-1 nicht wesentlich besser (vgl. Abbildung 6.18(c)). Sie ist aber auch nicht schlechter. Insofern ergibt sich kein Vor- oder Nachteil gegenüber einem minimalen Sensitivitätsgrenzwert von 0,3. Der gesamte Netzausschnitt der Nord-Süd-Verbindungen ist jedoch durch die sich nun überschneidenden Einflussbereiche aller vorhandenen Regler verbunden. Die Abbildung 6.17(e) zeigt, dass für diesen minimalen Grenzwert die Leitung 0420-1 neben dem Regelagenten 0604-1 durch weitere Regelagenten beachtet wird.

Erst wenn der minimale Sensitivitätsgrenzwert sehr gering gewählt wird, ergeben sich große überschneidende Regelbereiche. Aus diesem Grund wird für die weiteren Simulationen ein minimaler Sensitivitätsgrenzwert von 0,1 verwendet.

(a) Sensitivitätsgrenzwert 0,5

(b) Sensitivitätsgrenzwert 0,3

(c) Sensitivitätsgrenzwert 0,1

Abbildung 6.18: Vergleich der Leitungsauslastungen bei Regelung mit verschiedenen minimalen Sensitivitätsgrenzwerten

(a) Sensitivitätsgrenzwert 0,5

(b) Sensitivitätsgrenzwert 0,3

(c) Sensitivitätsgrenzwert 0,1

Abbildung 6.19: Reglerverlauf bei Regelung mit verschiedenen minimalen Sensitivitätsgrenzwerten

Auswirkungen verschiedener Bewertungsfunktionen

Trotz eines sehr geringen minimalen Sensitivitätsgrenzwertes ist Abbildung 6.18(c) zu entnehmen, dass einige Leitungen wesentlich stärker ausgelastet sind als andere. So ist beispielsweise die Leitung 2003-1 wesentlich stärker belastet als die anderen Leitungen, obwohl sie durch mehrere Regelagenten beachtet wird. Dazu kommt es, wenn sich bereits überlastete Leitungen mit hoher Sensitivität im Einflussbereich dieser Regler befinden.

Die Bewertungsfunktion f_{load} für die Leitungsauslastungen ist linear. Sie wird durch die Funktion f_{line} mit der Sensitivität der jeweiligen Leitung gewichtet. f_{load} ist so gewählt, dass für eine gegebene obere Auslastung die Bewertung f_{line} einer Leitung gleich der Bewertung des Regelungspfades ist. f_{line} ist für eine Leitung l folgendermaßen definiert (vgl. Abschnitt ??):

$$f_{line}(l) = \begin{cases} f_{load}(load(l)) \cdot sensitivity(l) & , load(l) > crit \\ f_{load}(load(l)) \cdot sensitivity(l) & , low < load(l) < crit \ \& \\ & sensitivity(l) < f_{sens}(load(l)) \\ 0 & , sonst \end{cases}$$

Für die Betrachtungen in diesem Beispiel ist ausschließlich der Auslastungsbereich über der kritischen Auslastung relevant ($load(l) > crit$).

In Abbildung 6.20(a) sind Kurvenscharen der Bewertungsfunktion f_{line} als Funktion der Auslastung des Regelungspfades dargestellt. Abhängig von der Auslastung des Regelungspfades eines Reglers, sind die Auslastungen aufgetragen, die ein Element im Einflussbereich haben muss, um durch f_{line} gleich dem Regelungspfad bewertet zu werden. In jeder Grafik sind neun Kurven zu sehen, welche die Auslastung für Sensitivitäten zwischen 0,1 und 0,9 zeigen. Die Kurve mit der größten Steigung steht jeweils für die Sensitivität 0,1. In den Abbildungen 6.20(b), 6.20(c) und 6.20(d) sind die Kurvenscharen dargestellt, wenn die Bewertungsfunktion potenziert wird.

Für die lineare Bewertungsfunktion ist zu erkennen, dass, wenn der Regelungspfad eines Reglers mit 105 % ausgelastet ist, ein Element, das die minimale Sensitivität von 0,1 zu dem Regler hat, erst bei einer Auslastung von über 150 % gleich bewertet wird. Wird die Bewertungsfunktion mit 8 potenziert, wird das gleiche Element bei einer Auslastung von etwa 107 % gleich bewertet (vgl. Abbildung 6.20(d)). Die Auslastungen der Leitungen liegen dichter beieinander, wenn der Grad der Bewertungsfunktion höher ist.

Der Einfluss der verschiedenen Potenzen der Bewertungsfunktion auf die Regelung ist in Abbildung 6.21 für das Beispiel aus Abbildung 6.18, mit einem minimalen Sensitivitätsgrenzwert von 0,1, dargestellt. Die Leitung 2003-1 wird weniger stark belastet, wenn eine Bewertungsfunktion mit höherer Potenz gewählt wird. Die Leitung 2003-1 stellt zu den Regelungspfaden der Regler 0219-1 und 2003-3 einen Parallelpfad in ihrem Einflussbereich dar. Bei einer linearen Bewertungsfunktion wird der Regelungspfad der Regler auch bei relativ großer Lastdifferenz bevorzugt entlastet. Je höher der Grad der Bewertungsfunktion ist, umso stärker wird versucht, die Auslastungen der Netzelemente, zu denen ein Regler nur eine geringe Sensitivität hat, anzugleichen. Die Regelagenten nehmen bereits bei geringerer Auslastung der Parallelpfade Rücksicht auf diese. Umgekehrt verschieben die Regler die Last weniger stark von ihren überlasteten Regelungspfaden auf stärker belastete Parallelpfade. Für eine Bewertungsfunktion achten Grades sind die Unterschiede gegenüber der Bewertung vierten Grades bereits sehr gering. Für die weiteren Untersuchungen wird daher eine Bewertungsfunktion vierten Grades verwendet.

Rekonfiguration des Energieübertragungsnetzes

Die Abbildung 6.21(c) zeigt die Auslastungen der Leitungen bei verteilter Koordinierung. Bei dieser Simulation wurde ein minimaler Sensitivitätsgrenzwert von 0,1 und eine Bewertungsfunktion vierten Grades verwendet. Nachfolgend wird untersucht, wie die Auslastungssituation durch weitere Leistungsflussregler verbessert wird.

(a) Lineare Bewertungsfunktion

(b) Quadratische Bewertungsfunktion

(c) Bewertungsfunktion 4. Grades

(d) Bewertungsfunktion 8. Grades

Abbildung 6.20: Auslastungen von Leitungen mit verschiedenen Sensitivitäten im Einflussbereich eines Reglers als Funktion der Auslastung des Regelungspfades für verschiedene Verläufe von f_{load} .

(a) Lineare Bewertungsfunktion

(b) Quadratische Potenz der Bewertungsfunktion

(c) Vierte Potenz der Bewertungsfunktion

(d) Achte Potenz der Bewertungsfunktion

Abbildung 6.21: Änderung der Regelung durch Variation der Bewertungsfunktion

Die Leitung 0420-1 ist im Vergleich zu den anderen Nord-Süd-Verbindungen relativ schwach ausgelastet. Durch eine stärkere Belastung dieser Leitung könnten andere Leitungen entlastet werden. Eine Lastverschiebung ausschließlich auf dieser Leitung ist nicht möglich, da sie nicht auf dem Regelungspfad eines Reglers liegt.

Durch einen zusätzlichen Regler auf der Leitung 0420-1 kann Last auf die Leitung 0420-1 gezogen werden, ohne dass parallele Leitungen wie die Leitung 2003-1 oder die Leitung 0604-1 belastet werden, vielmehr werden diese entlastet. Für andere Regler, in deren Einflussbereich sich diese Leitungen befinden, ergeben sich dadurch wieder Regelungsmöglichkeiten. Ein zusätzlicher Regler auf der Leitung 0420-1 kann somit die Übertragungskapazität des Netzes erhöhen. Bei dieser Konfiguration bleibt die Auslastung der Leitung 2003-1, welche am stärksten ausgelastet ist, im Vergleich zur Simulation ohne den Regler 0420-1 unter 115 % (vgl. Abbildung 6.22(a) mit 6.21(c)).

Die Leitung L798177 ist überlastet und befindet sich nicht auf einem Regelungspfad. Alle Leitungen, die stärker belastet sind (vgl. Abbildung 6.21(c)), befinden sich bereits auf einem Regelungspfad. Wird ein Regler auf der Leitung L798177 installiert, kann dieser eventuell eine Überlast von der Leitung L798177 direkt abwenden bzw. einen Ausgleich mit anderen Leitungen im Einflussbereich erzielen. Für die Leitung L798177 hat sich keine wesentliche Verbesserung ergeben. Die Leitung 2003-1 jedoch wird leicht entlastet (vgl. Abbildung 6.22(b) mit 6.21(c)). Wird ein Regler auf der Leitung 0420-1 installiert, zeigt sich ein besserer Lastverlauf gegenüber einem Regler auf der Leitung L798177.

Beide Simulationen verbessern die Lastflusssituation nicht deutlich. Im Folgenden wird überprüft, wie sich diese verändert, wenn sowohl der Regler 0420-1 als auch der Regler L798177 verwendet werden. Die Lastverläufe für diese Konfiguration sind in Abbildung 6.22(c) dargestellt. Die Auslastung der am stärksten ausgelasteten Leitung 2003-1 wurde weiter reduziert. Insgesamt liegen die Auslastungen aller Leitungen dichter beieinander, so dass eine weitere Angleichung und damit Verbesserung der Auslastungssituation erreicht wird.

In der Abbildung 6.22 sind Schwingungen der dargestellten Lastverläufe zu erkennen. Diese Schwin-

(a) Leistungsflussregler auf Leitung 0420-1

(b) Leistungsflussregler auf Leitung L798871

(c) Leistungsflussregler auf Leitung 0420-1 und Leitung L798871

Abbildung 6.22: Lastflüsse bei unterschiedlicher Reglerausstattung des Netzes

gungen werden durch die simulierten Erzeuger und Lasten im Netzmodell erzeugt und sind größtenteils durch die Reglermodelle der Erzeuger und Lasten in den Simulationen zu begründen. Die Verläufe zeigen aber auch, dass schnelle leistungsflussregelnde Betriebsmittel Einfluss auf die Schwingungen im Energieübertragungsnetz haben können.

Ein weiterer Aspekt bei der Installation zusätzlicher Leistungsflussregler sind die Überschneidungen der Einflussbereiche aller Regler. Bei wenigen Reglern muss ein sehr kleiner Sensitivitätsgrenzwert gewählt werden, um überschneidende Einflussbereiche zu erhalten. Befinden sich viele Regler im Netz, kann dieser Wert größer gewählt werden. Dem Problem, dass die Erkennung von Netzelementen mit einer kleinen Sensitivität zu einem Regler meist ungenauer ist, wird dadurch begegnet.

Die Leitung 0420-1 hat beispielsweise eine relativ kleine Sensitivität zu anderen Reglern (vgl. Abbildung 6.17(e)). Sie ist für den Regler 2003-1 etwa 0,2. Durch die Sensitivitätsbestimmung wurde diese Sensitivität zusätzlich unterbewertet. Aus diesem Grund ergeben sich erst zusammenhängende Einflussbereiche, wenn der minimale Sensitivitätsgrenzwert sehr klein (bspw. 0,1) gewählt wird. Durch einen zusätzlichen Regler auf der Leitung 0420-1 stellt sich die Situation anders dar. Die Sensitivitäten zu diesem Regler sind in Abbildung 6.23 dargestellt. Durch die hohe Sensitivität zu den Leitungen

Abbildung 6.23: Sensitivitäten der Leitungen zu Regler 0420-1

0604-1 und 2003-1 ergibt sich auch ein zusammenhängender Bereich, wenn der minimale Sensitivitätsgrenzwert größer gewählt wird. Die fehlerhafte Ermittlung bei Leitungen mit sehr kleinen Sensitivitäten zu einem Regler stellt kein Problem mehr dar.

6.3.4 Zusammenfassung der Simulationen

In Abschnitt 6.3.1 wurde ein Szenario betrachtet, in dem fünf parallel verlaufende Leitungen eine Region mit Erzeugungsüberschuss mit einem Knoten mit Erzeugungsmangel verbanden. In diesem Engpass kam es zu einem Leitungsausfall, so dass es auf einzelnen Netzelementen zu Überlasten kam.

Der Ausfall der Leitung hatte eine Änderung der Netztopologie zur Folge. Mit der verteilten Koordinierung war es möglich, die neue Netzsituation zu erfassen. Das Wissen der Regelagenten über die Netztopologie wurde durch die Kommunikation von Zustandsinformationen zwischen den Netzelementagenten aktualisiert. Anhand dieses Wissens konnte jeder Regelagent Regelaktionen auf Basis des in Abschnitt ?? erstellten Algorithmus bestimmen. Durch die verteilte Leistungsflussregelung war es möglich die Überlast auf den Leitungen, die durch den Leitungsausfall überlastet wurden, abzuwenden. Auf diese Weise wurde das $(n - 1)$ -Kriterium (vgl. Kapitel 1) erfüllt, da trotz des Ausfalls eines Elementes der Betrieb des Netzes ohne eine anhaltende Überlastung weiterer Netzelemente möglich war.

Situationen, in denen ein größerer Netzbereich überlastet war, wurden in Abschnitt 6.3.2 behandelt. In allen Szenarien waren mehrere parallel verlaufende Leitungen überlastet. Die Verteilung der Leistungsflussregler war so gegeben, dass sich überschneidende Einflussbereiche ergaben. Durch die verteilte Leistungsflussregelung war es bei den untersuchten Szenarien möglich, die Überlasten auf den Leitungen abzuwenden. Obwohl die Regelagenten jeweils nur Kenntnis über die Netzelemente in ihrem

Einflussbereich haben, war es durch die koordinierte Regelung möglich, alle Überlasten abzuwenden. Für große überlastete Bereiche zeigten sich Probleme, da die Regler aufgrund technischer Begrenzungen nur begrenzt Lastflüsse verschieben können.

Ein an die Realität angelehntes Beispiel wurde in Abschnitt 6.3.3 behandelt. Anhand dieses Szenarios wurde gezeigt, wie die verteilte Koordinierung auf variierende Lastflüsse (z.B. Leistungserzeugung durch Windparks im Norden Deutschlands) reagiert. In diesem Beispiel wurde eine Lastsituation des Netzes untersucht, bei der ab einem bestimmten Zeitpunkt ein überlastfreier Betrieb aller Netzelemente nicht mehr möglich war. Dennoch wurde durch die verteilte Lastflussregelung die Auslastung so verteilt, dass keine Leitung wesentlich stärker ausgelastet war als alle anderen parallelen Leitungen. Auftretende Überlasten wurden gleichmäßig auf die zur Verfügung stehenden Übertragungsleitungen verteilt, um automatischen Abschaltungen von Netzelementen aufgrund zu hoher Überlast vorzubeugen. Weiterhin wurde für das betrachtete Netz überprüft, welche Auswirkungen auf die Lastsituation das Einfügen weiterer Regler hat.

Kapitel 7

Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Modell für Energieübertragungsnetze und der darin enthaltenen Elemente (Übertragungsleitungen, Wirkleistungsregler) erstellt. Auf Basis dieses Modells wurde ein lokaler Algorithmus entwickelt, der im Netz vorhandene Regler so koordiniert, dass Überlasten im Netz vermieden bzw. behoben werden. Dieser Algorithmus benötigt Informationen über die Einflüsse, die ein Regler auf andere Elemente im Netz ausübt. Um diese Informationen bereitzustellen, wurde eine Kommunikationsmodell entworfen, in dem alle Netzelemente als kommunizierende Agenten modelliert sind. Durch Kommunikation zwischen Agenten von benachbarten Netzelementen erhalten die Regelagenten die Informationen die zur Bestimmung neuer Regelaktionen. Diese Modelle wurden im Agentenframework *Distributed PowerGrid* umgesetzt. Mit diesem Framework ist es möglich, in Verbindung mit der Netzberechnungssoftware *Digsilent PowerFactory*, Simulationen durchzuführen.

Es wurde gezeigt, dass es mit dem entwickelten Algorithmus, den jeder Regler lokal ausführt, möglich ist Überlasten auf Netzelementen abzuwenden. Es kann nicht garantiert werden, innerhalb welcher Zeit diese Ausregelung geschieht. Der Vorteil von FACTS-Geräten, welche die Grundlage für diese Arbeit darstellen, ist jedoch gerade die schnelle Schaltgeschwindigkeit. Meist sind Einschränkungen in der Auslegung der Regelelemente, wie beispielsweise die maximale Reglerauslenkung, die begrenzenden Faktoren bei der Überlastvermeidung. Weiterhin kann mit dem gegebenen Algorithmus, welcher ausschließlich lokale Informationen über den aktuellen Lastzustand der ihn umgebenden Leitungen nutzt, nicht sichergestellt werden, dass eine Überlast zuverlässig und dauerhaft abgewendet wird. Es wurde gezeigt, dass es für eine stationäre Lastsituation in endlicher Zeit möglich ist Überlasten abzuwenden. Voraussetzung dafür ist es, dass eine Reglerverteilung und Reglereinstellung existiert, mit der das möglich ist. Auch bei Szenarien mit Leitungsausfällen oder sich ändernder Einspeisung wurde gezeigt, dass es möglich ist, Leitungsbelastungen unter einem kritischen Niveau zu halten, solange die entsprechende Reglereinstellungen das ermöglichen. Auch wenn bereits alle Leitungen zwischen zwei Zonen überlastet sind, werden diese wenigstens gleichmäßig ausgelastet. So kann Ausfall der einer stark überlasteten Leitung und die daraus eventuell resultierenden Folgen verhindert werden.

Mit dem Kommunikationsmodell wurde ein Verfahren vorgestellt, dass auf Basis lokaler Kommunikation zwischen den als Agenten modellierten Netzelementen Zustandsinformationen verbreitet. Dazu werden von den Netzelementen regelmäßig Nachrichten entlang der Netztopologie versendet. Auf Basis dieses Verfahrens ist es jedem Regelagenten möglich, definierte Informationen über die Netzelemente zu sammeln, die sich in seiner Umgebung befinden. Ein Regelagent weiß, ob es einen Parallelpfad gibt, auf den Leistungsflüsse verschoben werden können. Liegt ein solcher Pfad nicht vor, nimmt der Agent keine Reglungen vor. Die Auslastung aller Netzelemente, die die Grundlage für die Regelung darstellt, wird ebenfalls kommuniziert. Jeder Regler ermittelt auf Basis der Nachrichten, die während der Vermittlung entlang des Netzes, mit Topologieinformationen versehen wurden, welche Elemente auf dem Regelungspfad oder den Parallelpfaden dieses Reglers liegen. Jeder dieser Pfade wird anhand der Widerstände aller Pfadelemente bewertet, um so Informationen darüber zu ermitteln, wie stark Netzelemente durch den Regler beeinflusst werden.

Es wurde anhand von Simulationen gezeigt, dass es durch diese Kommunikation möglich ist, die Sensitivitäten von Netzelementen und damit die Einflussbereiche von Reglern zu bestimmen. Die Richtung

der Beeinflussung wird ebenfalls bestimmt, um auch bei Umkehr der Lastflussrichtung auf Netzelementen, richtig zu reagieren. In verwandten Arbeiten werden die Topologieinformationen des Netzes als gegeben vorausgesetzt oder werden durch eine globale Instanz, wie beispielsweise die Netzleitebene, ermittelt. Alle Elemente, die zum Einflussbereich eines Reglers gehören werden vorher festgelegt. Die Bestimmung von Pfaden erfolgt anhand grafentheoretischer Betrachtungen [?]. Die in dieser Arbeit verwendete Kommunikation benachbarter Agenten ermittelt ebenfalls zuverlässig, ob Parallelpfade vorhanden sind. Zusätzlich wird die Qualität dieser Pfade bestimmt um so die Stärke der Beeinflussung (Sensitivität) zu ermitteln. Mit Hilfe dieser Sensitivätsinformationen ist es möglich, autonom und verteilt jeweils durch die Regler eine Lastflussverschiebung vorzunehmen, die eine überlastete Leitung bestmöglich entlasten können.

Im Zusammenspiel mit dem entwickelten Algorithmus war es möglich, die maximale Transferkapazität eines Engpasses, die mit einer gegebenen Reglerverteilung möglich ist, zu erreichen. Gegenseitige Wechselwirkungen benachbarter Regler stellen, kein Problem dar, sondern sind aufgrund des Einflussbereiches jedes Regler bedacht und erwünscht.

Kapitel 8

Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Wirkleistungsfluss auf Netzelementen betrachtet und es wurde unterstellt, dass dieser vorwiegend für die Auslastung einer Leitung verantwortlich ist. Die hier vorgestellten Koordinierungsmechanismen können so erweitert werden, dass auch Blindleistungsflüsse geregelt werden.

Bisher werden durch die Koordinierung nur Fehlerfälle abgedeckt, bei denen Leitungen ausfallen. Aufgrund von Kurzschlüssen und Erdschlüssen auf Leitungen kommt es ebenfalls zu sehr großen Lasten auf Übertragungsleitungen. Derartige Fälle werden beispielsweise in [?] und [?] behandelt. Es wird vorgeschlagen in diesen Fällen die Regelung der FACTS-Geräte zu verlangsamen um starke Schwankungen im Netz zu verhindern. Die Kommunikation zwischen den Agenten muss erweitert werden, um solche Situationen zu erkennen. Die lokalen Regelvorschriften müssen so angepasst werden, dass auch in diesen Fällen angemessen reagiert wird.

Erzeuger und Verbraucher die an das Netz angeschlossen sind wurden bereits in der Implementierung bedacht. Es wurde erwähnt, dass die Gefahr besteht, dass aufgrund von Wechselwirkungen zwischen den Leistungsflussregeln und den internen nicht koordinierten Regeln der Erzeuger

dass durch die Eingriffe in die Lastflüsse die Gefahr besteht, Netzelemente, wie beispielsweise Kraftwerksgeneratoren, in Schwingungen zu versetzen. Solche Elemente haben ebenfalls. Wie sehr die verteilte Koordinierung unter Einbeziehung dieser Elemente verbessert werden kann, ist eine interessante Frage für folgende Arbeiten.

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Thomas Fürst
Matrikel-Nummer: 103168

Dortmund, den 23. Dezember 2008