



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Regelung von Gleichstromnetzen

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr. Ing. Wolfgang Gawlik
Dipl. Ing. Thomas Kaufmann

eingereicht an der

Technischen Universität Wien
Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe

von
Alexander Winter
Vogtgasse 3/1/5
1140 Wien

Wien, im Januar 2015

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit möglichen Regelstrategien und Regelmethoden von verschiedenen Gleichstromnetzen.

Zunächst werden gängige Regelstrategien zur Spannungs- und Stromregelung recherchiert. Danach wird eine Simulationsumgebung zur Lastflussberechnung in Gleichstromnetzen in MATLAB© programmiert und die recherchierten Regelmethoden implementiert.

Anschließend werden drei Modellnetze entwickelt, die eine möglichst breite Auswahl an Netztypen beinhaltet und verschiedene Netzebenen darstellen. Das erste modellierte Netz ist ein Zusammenschluss von parallelen Erzeugern. Das zweite Modellnetz ist ein weitläufiges, ländliches, radiales Niederspannungsverteilstromnetz. Die Erzeuger in diesem Netz sind auf verschiedene Zweige verteilt. Das dritte und letzte Modell beschreibt ein Haushaltsnetz mit Bussystem, das nach dem Durchschnitt in Österreich modelliert wurde. In diese drei Modellnetze werden Photovoltaikanlagen, Speicher, regelbare Generatoren und regelbare Verbraucher implementiert.

Danach werden Regelstrategien für diese Netze entwickelt, die ihren Schwerpunkt auf verschiedenen Gesichtspunkten haben. Diese sind Spannungsregulation, Lastaufteilung, Reduktion des Energietransportes mit dem übergeordneten Netz und Demand Side Management. Diese Strategien werden mit der programmierten Simulationsumgebung verifiziert und auf ihre Eigenschaften überprüft.

Im ersten Modell, dem Netzmodell mit den parallelen Erzeugern, wird die Spannungsregulation und Lastaufteilung zwischen den Erzeugern untersucht. Ergänzend erfolgt eine kurze Betrachtung von Störeinflüssen auf die Kommunikation der Erzeuger. Beim zweiten Modell, dem ländlichen Niederspannungsverteilstromnetz, werden Strategien zur Spannungsregulation und zum Erreichen von hohem Eigenverbrauch, d.h. möglichst wenig Energieaustausch mit dem übergeordneten Netz, entwickelt. Für das Haushaltsnetz liegt der Schwerpunkt im Untersuchen von Demand Side Management Strategien.

Abstract

This thesis investigates possible control strategies and control methods for several direct current grids.

At first some commonly used control strategies for voltage and current control are researched. Then, a simulation environment for load flow calculations of direct current grids is programmed in MATLAB© and the researched control methods are implemented.

Three grids are developed to provide a diverse choice of grids on different grid levels. The first grid is a parallel connection of three suppliers and one load. The second grid is a spacious, rural and radial low voltage distribution grid. The loads and suppliers are distributed along different branches of the grid. The third and last grid is a household grid, that is modelled after the average Austrian household. To these three grids, photovoltaik facilities, controlable generators, controlable loads and storage devices are connected.

Subsequently, control strategies are developed for these grids to control them with different foci, including voltage regulation, balanced load sharing, reduction of energy transport with the superordinate grid and demand side management. The developed strategies are implemented into the programmed simulation environment. Then, they are verified and their properties are investigated.

With the first model, the grid with parallel supplier, voltage regulation strategies and the load balance between the suppliers is studied. Also, interference is added to the communication of the suppliers to investigate the impact on the voltage quality. With the second model, the rural low voltage grid, strategies for voltage regulation and strategies to reduce energy transport with the superordinate grid are researched. With the household grid the research focus lies on Demand Side Management of cooling devices.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Regelung im DC-Netz	3
2.1	Übersicht der Regelglieder	4
2.2	Spannungsregelung mit Voltage Droop	7
2.3	Spannungs- und Stromregelung	11
2.3.1	Master/Slave Methode	12
2.3.2	Average Current Methode	16
2.4	Implementierung in MATLAB©	20
3	Definition der Modellnetze	25
3.1	Verteilnetz mit parallelen Erzeugern	25
3.2	Niederspannungsnetz	28
3.3	Hausnetz	31
4	Simulationsergebnisse	35
4.1	Verteilnetz mit parallelen Erzeugern	35
4.1.1	Parallele Erzeuger mit Voltage Droop Regelungsverfahren	36
4.1.2	Parallele Erzeuger mit Open Loop Regulation (OLR)	40
4.1.3	Parallele Erzeuger mit Inner Loop Regulation (ILR)	42
4.1.4	Rauschempfindlichkeit der Stromregelmethoden	44
4.1.5	Betrachtung der Verluste	46
4.2	Niederspannungsnetz	47
4.2.1	Strategien zur Spannungsregulation	49
4.2.2	Strategien zum Vermeiden von Energietransporten mit dem übergeordneten Netz	56
4.2.3	Betrachtung der Verluste	60
4.3	Hausnetz	61
4.3.1	ungeregelter Fall	61
4.3.2	Regelung mit Demand Side Management	63
5	Zusammenfassung und Ausblick	66
	Abbildungsverzeichnis	70
	Tabellenverzeichnis	71
	Literaturverzeichnis	72

Abkürzungen

DC	Direct Current / Gleichstrom
AC	Alternate Current / Wechselstrom
OLR	Outer Loop Regulation / Äußere Regelschleife
ILR	Inner Loop Regulation / Innere Regelschleife
DMS	Demand Side Management / Verbraucherseitige Lastregelung

Kapitel 1

Einleitung

Heutzutage ist die komplette Energieversorgung auf den Betrieb mit Wechselstrom ausgelegt. Das ist historisch dadurch begründet, dass die meiste elektrische Energie über Generatoren erzeugt wird und damit direkt Wechselstrom hergestellt wird. Der große Vorteil von Wechselstrom, der seinen Durchbruch als Übertragungsmedium sicherte, ist seine einfache Transformation in verschiedene Spannungsniveaus. Somit kann von geografisch kleinen Niederspannungsnetzen bis zu weitläufigen Hochspannungsnetzen effizient Energie übertragen werden. Bei Gleichstrom wurden solche Spannungstransformationen erst mit moderner und effizienter Leistungselektronik mit Buck- oder Boost-Konverter möglich. Mit diesen DC/DC Stellern kann man sehr effizient Spannungsniveaus wechseln und somit auch den Gleichstrom als Übertragungsmedium interessant machen.

Die Frage, die sich folglich stellt ist, wieso Gleichstrom als Übertragungsmedium genutzt werden sollte. Beinahe alle Haushaltsgeräte werden heutzutage intern mit Gleichstrom betrieben. Jedes dieser Geräte wandelt den Wechselstrom zu Gleichstrom. Elektronische Geräte werden direkt mit Gleichstrom betrieben, während Motoren über einen Gleichstrom-Zwischenkreis angesteuert werden. Doch nicht nur Verbraucher benötigen Gleichstrom, Kleinkraftwerke wie Photovoltaikanlagen oder Speicher arbeiten ebenfalls damit. Ende 2013 wurden vom Fraunhofer Institut im Labor eine Photovoltaikzelle mit 44,7% Wirkungsgrad hergestellt [4]. Dieses Ergebnis ist natürlich noch nicht vergleichbar mit den wirtschaftlichen Solarzellen in der Praxis, die momentan nur die Hälfte dieses Wirkungsgrades aufweisen. Es zeigt jedoch, dass Solaranlagen viel Potenzial aufweisen und ein immer wichtigeres Mitglied des Kraftwerkparcs werden.

Auf Basis diese Überlegung ist es im Rahmen dieser Arbeit interessant, ein Kleinspannungsgleichstromnetz zu modellieren, in dem alle Verbraucher und Erzeuger mit DC/DC Steller angeschlossen sind. Da durch die vermehrte Verwendung erneuerbarer Energiequellen und variabler Lasten eine klassische Netzstruktur, wie sie seit fast 100 Jahren verwendet wird, nicht mehr effizient und verlässlich genug arbeitet, wurde das Smart Grid Konzept entwickelt. In diesem Konzept wird unter anderem durch intensive Kommunikation aller Teilnehmer eine Regelung möglich, die dynamisch und zeitnah den Verbraucher an die Erzeugung im Netz anpassen kann. Im Gleichstromnetz übernehmen die vorher erwähnten DC/DC Steller die Aufgabe der Regler. Aus dem Gleichstromnetz wird folglich ein Gleichstrom-Smart-Grid. Verschiedene intelligente Regelmethode, die unter verschiedenen

Gesichtspunkten arbeiten sollen, werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht und analysiert.

Zunächst werden momentan verfügbare Spannungs- und Stromregelmethoden für Gleichstrom recherchiert. Die meist benützten Methoden werden in Kapitel 2 beschrieben.

Daraufhin wird in MATLAB© eine Simulationsumgebung programmiert, die den Lastfluss eines Gleichstromnetzes berechnet und die vorher recherchierten Regelmethoden anwenden kann. Dies wird in Kapitel 2.4 geschildert.

Danach werden die Modellnetze definiert, die dazu dienen, Regelstrategien unter verschiedenen Gesichtspunkte zu erarbeiten. Die Modellnetze werden in Kapitel 3 beschrieben.

In Kapitel 4 werden verschiedene Regelstrategien erarbeitet und Simulationen an den Modellnetzen durchgeführt.

Kapitel 2

Regelung im DC-Netz

Die Regelung des Stromnetzes, egal ob Wechsel- oder Gleichstrom, dient dazu, den Energiebedarf und die Energieproduktion einander anzugleichen. Das ist notwendig, da im Stromnetz keine Energie gespeichert werden kann und deswegen zu jedem Zeitpunkt die Summe aller eingespeisten Leistungen gleich der Summe aller Netzverluste durch den Transport und entnommenen Leistungen sein muss[1]. Zu einer Abweichung des Gleichgewichtes zwischen Erzeugung und Verbrauch kann es durch fehlerhafte Prognosen, unerwartete Verbrauchsänderungen, oder Kraftwerksausfällen kommen.

Während sich bei einem Wechselstromnetz die Frequenz und Spannung bei ungleicher Erzeugung und Bedarf ändert, so ist bei einem Gleichstromnetz ausschließlich die Spannung die veränderliche Größe. Wenn ein Energieüberschuss im Netz besteht, steigt im Gleichstromnetz die Spannung. Bei einem Energiedefizit hingegen sinkt die Spannung. Deswegen bietet es sich an, den Lastfluss im Gleichstromnetz über die Spannung zu regeln. Das passiert über die DC/DC Steller, über die die Verbraucher beziehungsweise Erzeuger an das Netz angeschlossen sind. Diese steuern, zum Beispiel über Pulsweitenmodulation, die Größe des Stromes und somit den Lastfluss.

Durch die große Anzahl an erneuerbaren Energiequellen und deren schwer prognostizierbare und stark schwankende Energieproduktion, sowie die steigende Anzahl an Speichern und Verbrauchern im Netz, wird die Anwendung einer effizienten Regelung immer wichtiger.

In diesem Kapitel wird das grundlegende Regelungskonzept der Spannungsregelung vorgestellt. Abgesehen von der Regelung der Spannung ist es auch wichtig, dass die Lastaufteilung parallel geschalteter Quellen, Verbraucher oder Speicher gewährleistet wird. Dafür werden kombinierte Spannungs- und Stromregelkonzepte vorgestellt. Diese Konzepte basieren auf intensiver Kommunikation der Regelsysteme.

Nach der theoretischen Einführung wird die Implementierung der Simulationsumgebung in MATLAB© angesprochen.

2.1 Übersicht der Regelglieder

Im Rahmen von Regelsystemen gibt es drei grundsätzliche physikalische Glieder, aus denen Regler zusammengesetzt werden können: einem Proportionalglied (P-Regler), einem Integrator (I-Regler) und einem Differenzierer (D-Regler) [10]. Diese lassen sich durch Parallelschaltung zu einem komplexeren Regelsystem kombinieren, wie zum Beispiel den PI-Regler als eine Kombination aus Integrator und Proportionalregler. Im Folgenden soll ein allgemeines Regelsystem und die wichtigsten Regler kurz vorgestellt und auf deren Verwendung in dieser Arbeit eingegangen werden.

In Abbildung 2.1 ist ein allgemeines Regelsystem mit Rückkopplung dargestellt, wie es in dieser Arbeit verwendet wird.

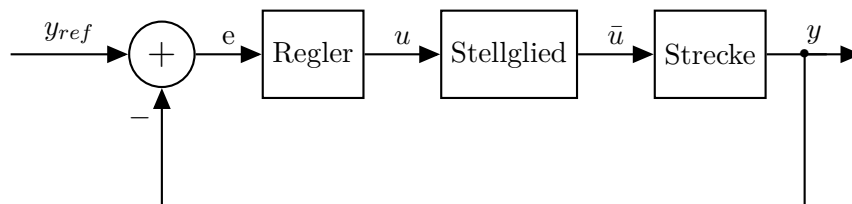


Abbildung 2.1: Blockschaltbild eines rückgekoppelten Regelsystems

Die Regelgröße $y(t)$ wird mit einer Referenzgröße verglichen, indem die Differenz, wie in Formel 2.1 angegeben, gebildet wird. Diese Differenz $e(t)$ wird der Regelfehler oder die Regelabweichung genannt und an den Regler weitergegeben. Ist $y(t)$ größer als y_{ref} , so wird der Regelfehler negativ. Der Regler arbeitet somit dem Fehler entgegen. Bei einer Regelabweichung von Null ist das System ausgeregelt und der Regler muss nicht eingreifen. Die Regelgröße ist in dieser Arbeit die Spannung, da diese möglichst konstant gehalten werden soll, um eine hohe Netzqualität zu erreichen.

$$e(t) = y_{ref} - y(t) \quad (2.1)$$

Der Regler übersetzt die Regelgröße in ein Signal $u(t)$ für das Stellglied, das sich anschließend physikalisch auf die Strecke auswirkt. In den DC Energiesystemen dieser Arbeit ist das Stellglied der DC/DC Wandler, der über Pulsweitenmodulation[21] oder ähnliche Verfahren mit dem Regelsignal $u(t)$ angesteuert wird. In den in dieser Arbeit beschriebenen Regelverfahren wird nur der stationäre Zustand untersucht. Deswegen wird das Kleinsignalverhalten des DC/DC Wandlers nicht berücksichtigt und dieser direkt als Umwandlungsglied von $u(t)$ nach \bar{u} angeschrieben. Dieses Umwandlungsglied ist eine mathematische Umrechnung der Größe $u(t)$, die in dieser Arbeit, wie noch gezeigt wird, physikalisch eine Spannung oder ein Strom ist, in eine Leistung.

Die Strecke ist das Übertragungsnetz mit allen seinen Komponenten, die aus dem erzeugten Strom beziehungsweise der erzeugten Leistung die Spannung, in diesem Fall die Regelgröße $y(t)$, beeinflussen. Diese wird an den Eingang des Regelsystems rückgekoppelt.

Wie anfangs erwähnt gibt es verschiedene Regelglieder. Diese werden in dem folgenden Abschnitt genauer erklärt.

Proportional-Regler

Der Proportional-Regler ist der einfachste aller Regler. Der Name kommt daher, da die Eingangsgröße proportional zur Ausgangsgröße ist, wie in Formel 2.2 ersichtlich ist. Die einstellbare Größe dieses Reglers ist der Verstärkungsfaktor K .

$$u(t) = Ke(t) \quad (2.2)$$

Der Vorteil eines P-Reglers ist, dass er auf Regelabweichungen sofort reagiert und somit eine hohe Geschwindigkeit besitzt. Der Nachteil eines solchen Regelgliedes ist seine bleibende Regelabweichung, das heißt er kann niemals den Regelfehler $e(t)$ auf Null ausregeln.

Integrator

Der Integrator oder I-Regler regelt die Ausgangsgröße durch, wie der Name schon sagt, Integration, wie in Formel 2.3 beschrieben ist. Die einstellbare Größe dieses Reglers ist die Zeitkonstante T_I .

$$u(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad u(0) = 0 \quad (2.3)$$

Der Vorteil des I-Reglers ist, dass die bleibende Regelabweichung mit fortlaufender Zeit durch das Integral immer kleiner wird. Theoretisch verschwindet nach unendlich langer Zeit die Regelabweichung. Der I-Regler ist jedoch relativ langsam.

Differenzierer

Das Ausgangssignal hängt beim Differenzierer proportional von der Steigung des Eingangssignals ab und wird mathematisch mit Formel 2.4 beschrieben. Die einstellbare Größe ist hier die Zeitkonstante T_D .

$$u(t) = T_D \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (2.4)$$

Je größer die Änderung von $e(t)$ ist, desto größer ist die Antwort des Reglers. Dadurch reagiert der Differenzierer schnell auf Änderungen. Hinzuzufügen ist noch, dass die Übertragungsfunktion eines idealen Differenzierers nicht realisierbar ist (siehe [10]).

Proportional-Integral-Regler

Man kann den Proportionalregler und den Integrator durch Parallelschalten kombinieren. Dadurch entsteht ein Regler, der beide Vorteile kombiniert. Die mathematische Beschreibung ist mit Formel 2.5 gegeben. Dieser Regler hat zwei einstellbare Größen, den Verstärkungsfaktor K und die Zeitkonstante T .

$$u(t) = Ke(t) + \frac{K}{T} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad u(0) = Ke(0) \quad (2.5)$$

Dieser Regler ist schnell durch den Proportionalanteil und kann trotzdem die Regelabweichung auf Null ausregeln.

In dieser Arbeit werden P und PI Regler verwendet, wie es auch in der Industrie häufig vorkommt. Der Grund dafür ist, dass bei den Zeiträumen, die in dieser Arbeit betrachtet werden (im Sekunden- oder sogar Minutenbereich), ein schneller Differentialanteil nicht nötig ist. Weiters vereinfacht sich dadurch die Reglerparametrisierung erheblich. Vor allem bei komplexeren Regelsystemen wie kommunikationsbasierte Systeme werden PI-Regler verwendet, da diese keine Regelabweichung aufweisen.

Reglerdimensionierung nach Ziegler/Nichols

Um die Reglerparameter bestimmen zu können, muss die Übertragungsfunktion der Strecke gegeben sein. Ist dies nicht der Fall, oder ist die Strecke zu komplex um die Übertragungsfunktion angeben zu können, so können mit Hilfe des Schwingungsverfahrens nach Ziegler/Nichols die Parameter bestimmt werden [19]. Dieses Verfahren wird in dieser Arbeit angewandt und lieferte stabile Regelsysteme. Die Reglerparameter wurden für jedes Simulationsnetzen neu angepasst, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Das Schwingungsverfahren nach Ziegler/Nichols funktioniert wie folgt:

- 1) Der Regler wird als reiner P-Regler eingestellt.
Ist der Regler bereits ein P-Regler, so muss nichts gemacht werden. Bei einem PI-Regler muss der Integralanteil deaktivieren werden, indem die Zeitkonstante $T = \infty$ gesetzt wird.
- 2) Die Verstärkung K wird erhöht, bis die Regelgröße $y(t)$ (in dieser Arbeit ist das die Spannung) grenzstabil wird und zu schwingen beginnt.
- 3) Die Verstärkung bei dieser Stabilitätsgrenze K_{krit} wird gemessen.
- 4) Die Periodendauer der grenzstabilen Schwingung T_{krit} wird gemessen.
- 5) Die Reglerparameter können mit Hilfe der Tabelle 2.1 berechnet werden.

	K	T
P-Regler	$K = 0.5 K_{krit}$	-
PI-Regler	$K = 0.45 K_{krit}$	$T = 0.85 T_{krit}$

Tabelle 2.1: Berechnungstabelle der Reglerparameter des Schwingungsverfahrens nach Ziegler/Nichols

2.2 Spannungsregelung mit Voltage Droop

Eine ideale Spannungsquelle kann, unabhängig von dem gelieferten Strom, ihre Ausgangsspannung immer auf Nennspannung halten. Wenn mehrere ideale Quellen parallel geschaltet werden, ist unklar, welche Spannungsquelle wie viel zur Gesamterzeugung beiträgt, da theoretisch jede Quelle unabhängig von dem Spannungsniveau die komplette Erzeugung (bis zur Maximalleistung) übernehmen kann. Theoretisch würde die Quelle mit der anfangs höchsten Spannung die komplette Last übernehmen. Aus diesem theoretischen Gedankenspiel folgt, dass parallel geschaltete, ideale Spannungsquellen keine Lastaufteilung bereitstellen können.

Eine reale Spannungsquelle hingegen besitzt einen Innenwiderstand, der die Spannung bei steigendem Strom fallen lässt. Im Normalfall ist das störend, da ein vom Strom unabhängiges Spannungsniveau erwünscht ist. Wenn solche Quellen parallel geschaltet werden, so findet tatsächlich eine Lastaufteilung statt. Diese Lastaufteilung ist abhängig von ihrer Spannungs-Strom-Kennlinie. Wenn die Steilheit dieser Kennlinie absichtlich erhöht wird, wird die Lastaufteilung immer besser. Diese Art der Regelung wird die Voltage Droop Regelung genannt. Zusammengefasst bedeutet das, dass die Ausgangsspannungen der parallel geschalteten Spannungsquellen einen linearen Zusammenhang mit der erzeugten Leistung beziehungsweise des Stromes haben.

Eine Abhängigkeit zwischen Spannung und Strom kann am einfachsten mit einer seriellen Ausgangsimpedanz realisiert werden, was einer Erhöhung des natürlichen Innenwiderstandes der Quelle entspricht [12]. Die Kennlinien einer idealen und mit einem Vorwiderstand versehenen Spannungsquelle sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Diese Kennlinie wird auch U-I-Kennlinie oder die Droop Charakteristik genannt und wird in dieser Arbeit als solche bezeichnet. Bei einer nichtidealen Quelle ist die Droop Charakteristik eine abfallende Gerade, die durch einen Referenzpunkt, im englischen oft Set Point genannt, verläuft. Dieser Punkt gibt an, wie viel Strom beziehungsweise welche Leistung bei Nennspannung erzeugt werden soll. Die Steigung dieser Geraden entspricht dem seriellen Ausgangswiderstand, wie in diesem Kapitel noch gezeigt wird.

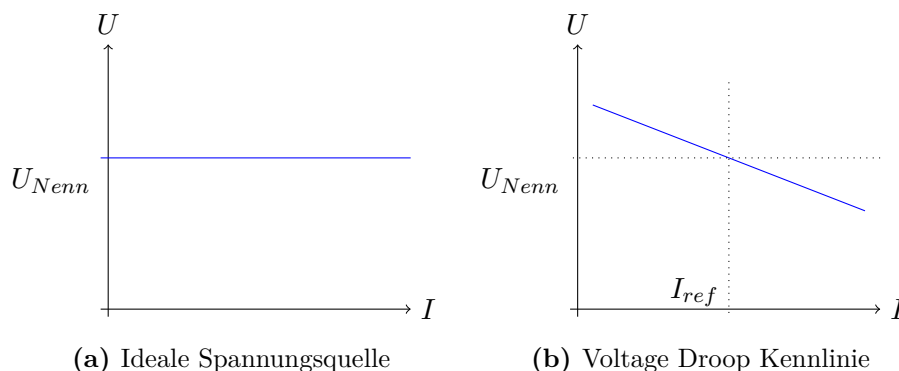


Abbildung 2.2: U-I Kennlinien einer idealen und einer mit Droop Charakteristik versehenen Spannungsquelle.

Um die natürliche Lastaufteilung mehrerer paralleler Erzeuger mit steiler Droop Charakteristik genauer zu erklären, wird ein einfaches Beispielnetz wie in Abbildung 2.3 herangezogen. Es besteht aus zwei Generatoren *Gen1* und *Gen2*, die parallel zueinander an eine Sam-

melschiene angeschlossen sind. Die Spannung auf der Sammelschiene ist U_0 . An derselben Sammelschiene ist auch ein *Last* angeschlossen, die den Strom $I_0 = \frac{P_{Last}}{U_0}$ benötigt. Leitungswiderstände werden in diesem einfachen Beispiel vernachlässigt.

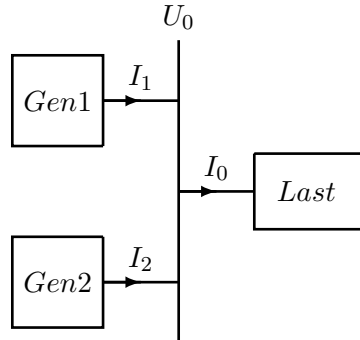


Abbildung 2.3: Zwei parallel geschaltete Spannungsquellen

Wenn beide Spannungsquellen exakt die gleiche Droop Charakteristik besitzen, so werden beide bei Belastung den gleichen Strom $\frac{I_0}{2}$ liefern. Ist die Droop Charakteristik jedoch unterschiedlich, zum Beispiel bei verschiedenen Arbeitspunkten der Quellen, so ergibt sich eine Lastaufteilung, wie in Abbildung 2.4 dargestellt ist.

Auf Grund der ungleichen Referenzleistung, das ist die erzeugte Leistung bei Nennspannung, entsteht eine Verschiebung der Droop Charakteristiken der Quellen zueinander. Dadurch kommt es in diesem Beispiel bei der Spannung U_0 zu einer ungleichen Aufteilung der gelieferten Ströme. Außerdem ist in Abbildung 2.4 ersichtlich, dass die Steigung der Droop Charakteristik ausschlaggebend für die Lastaufteilung ist. Je steiler sie ist, desto enger liegen die Ströme I_1 und I_2 zusammen. Eine steile Droop Charakteristik hat aber auch Nachteile: auf Grund der Steilheit wird die Spannungsregulation der Quellen schlechter[7]. Aus dieser Überlegung folgt, dass bei der Voltage Droop Regelung einen Kompromiss zwischen Spannungsregulation und Lastaufteilung machen muss.

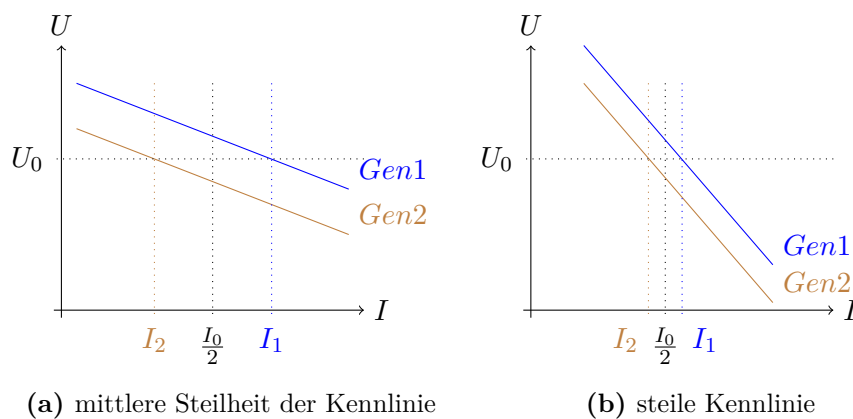


Abbildung 2.4: Zwei parallele Spannungsquellen mit unterschiedlichem Arbeitspunkt bei verschiedenen Steilheiten der Droop Charakteristik

Wie schon erwähnt, lässt sich die Droop Charakteristik physikalisch mit einem Vorwiderstand realisieren. Dies ist jedoch nur für kleine Leistungen interessant, da sonst der

zusätzliche Widerstand zu großen Verlusten führt [12]. Besser ist die Verwendung von Leistungselektronik in Form eines DC/DC Wandlers und einem Regelkreis, der diesen Wandler steuert. Dafür muss die mathematische Beschreibung der Droop Regelung hergeleitet werden. Diese findet sich mit Formel 2.6. Die Spannung U und der Strom I sind die Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom, U_0 ist die Nennspannung und R die Steigung der Droop Charakteristik, die physikalisch einem Widerstand entspricht und somit als solches bezeichnet wird.

$$U = U_0 - I \cdot R \quad (2.6)$$

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Droop Regelung mit einem Regelsystem zu realisieren [7] [13] [11]. In dieser Arbeit wird der Strom I als Ausgangsgröße und die Spannung U als Eingangsgröße des Regelsystems definiert, da der Strom mit DC/DC Wandlern einfach zu steuern ist.

Mit der Abweichung der Ausgangsspannung von der Nennspannung $U_0 - U$ kann die Übertragungsfunktion des Reglers in Formel 2.7 angeschrieben werden. Diese entspricht einem Proportionalregler mit dem Verstärkungsfaktor von $K = \frac{1}{R}$.

$$\frac{I}{U_0 - U} = \frac{1}{R} \quad (2.7)$$

Da ein Proportionalregler immer eine bleibende Regelabweichung aufweist, kann auch ein Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) verwendet werden[8]. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass bei parallel geschalteten PI-Reglern auf Grund des Integrators der Startwert der Regelabweichung einen großen Einfluss auf die Regelung hat. Das führt dazu, dass der stationäre Zustand des Regelsystems abhängig von den Regelparametern, den Leitungswiderständen und dem Rauschen ist. Das äußert sich in ungleich verteilten Lastflüssen. Um dieses Problem zu umgehen, kann im Regelsystem nur ein PI-Regler und sonst P-Regler implementiert werden. Genauere Untersuchungen dazu können im Kapitel 4.1 nachgelesen werden. Zu erwähnen ist noch, dass die kombinierten Spannungs- und Stromregelsysteme definierte stationäre Zustände besitzen, auch bei Verwendung von PI-Reglern, da bei diesen Regelmethode, wie der Name schon sagt, sowohl der Strom (beziehungsweise die Leistung), als auch die Spannung reguliert werden.

Das Blockschaltbild eines Erzeugers mit Voltage Droop Regelung ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

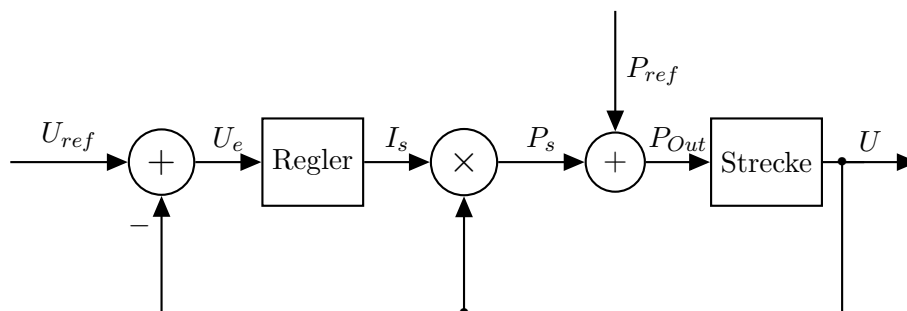


Abbildung 2.5: Blockschaltbild der Droop Regelung eines Erzeugers

Die Regelabweichung $U_e = U_{ref} - U$ wird an den Regler weitergegeben, der als Antwort die Steuergröße I_s erzeugt. Diese Größe wird hier als Strom dargestellt, da der Verstärkungsfaktor des Reglers (egal ob Proportional- oder PI-Regler) einer Division mit einem Widerstand entspricht. Dieser Strom wird mit der Ausgangsspannung U und der Referenzleistung P_{ref} (Set Point der Leistung) des Erzeugers in die Ausgangsleistung P_{Out} umgewandelt. Diese Umrechnung wird deswegen gemacht, da die Implementierung der Lastflussrechnung in dieser Arbeit die Leistung jedes Verbrauchers beziehungsweise Erzeugers benötigt. Dieser Schritt erfolgt im Stellglied, in diesem Fall ein DC/DC Wandler, der hier nicht konkret angegeben wurde, da kein Kleinsignalverhalten untersucht wird. Die Spannung am Erzeuger wird nun durch die Strecke, in diesem Fall das Netz, bestimmt. Sie wird zur Berechnung der Regelabweichung rückgekoppelt.

Bei der Voltage Droop Regelung müssen die einzelnen Teilnehmer des Netzes nicht gesondert miteinander kommunizieren. Die Regelung erfolgt ausschließlich über die Anschlussspannung. In diesem Fall handelt es sich aus der Sicht des Gesamtsystems um eine offene Regelschleife (Open Loop Regelung) [12].

Die Voltage Droop Regelung kann auch mit Kommunikation erfolgen. Diese findet aber nicht unter den Regelteilnehmer statt, sondern es wird die Referenzspannung U_{ref} von einem beliebigen Knotenpunkt bezogen. Dies wird in den Simulationen angewandt.

Die folgende Zusammenfassung von Vor- und Nachteile der Voltage Droop Regelung sollen einen schnellen Überblick über diese Regelmethode geben:

Vorteile:

- einfach
- günstig
- leicht erweiterbar
- keine Kommunikation notwendig, somit weitgehend robust

Nachteile:

- Die U-I-Kennlinien der Spannungsquellen werden absichtlich verschlechtert
- Kompromiss zwischen Lastflussaufteilung und Spannungsregulation
- parallel geschaltete Quellen müssen möglichst ähnliche Steigung der Droop Charakteristik besitzen

2.3 Spannungs- und Stromregelung

Die Voltage Droop Regelung hat den Nachteil, dass eine gute Spannungsregulierung mit einer schlechten Lastaufteilung einher geht. Der Grund dafür ist, dass die Regelteilnehmer nicht wissen, welche Produktion die anderen fahren, sondern nur nach der eigenen Anschlussspannung regeln. Wenn die Regelteilnehmer hingegen untereinander kommunizieren können, so können sie ihre Erzeugung aneinander anpassen. Dieses Kapitel stellt die in dieser Arbeit untersuchten Spannungs- und Stromregelungsmethoden vor. Diese Regelungsmethoden basieren auf zwei ineinander verschachtelten Regelkreise für die Spannung und den Strom. Je nach der Art dieser Verschachtelung wird in dieser Arbeit zwischen der Outer Loop Regelung (OLR) und Inner Loop Regelung (ILR) unterschieden[12]. Der Unterschied zwischen diesen beiden Regelungsstrukturen liegt in der Spannungsregulation. Bei der OLR regelt jeder Regelteilnehmer die Spannung an seinem Knotenpunkt, während bei der ILR die Spannung an einem Referenzknoten reguliert wird. Der Vorteil der ILR liegt darin, dass die Spannung am Referenzknoten immer auf die Sollspannung geregelt wird. Dafür werden alle anderen Anschlussspannungen dementsprechend erhöht oder verringert. Bei der OLR hingegen werden alle Regelteilnehmer versuchen, möglichst nahe an die Sollspannung heranzukommen. Durch die Leitungswiderstände und die damit verbundenen Verluste und Spannungsabfälle können sie nicht exakt den Sollwert erreichen.

Die Spannungsregelung kann jeder Regelteilnehmer selbst durchführen oder wird, im Falle der ILR, in einem zentralen Regelsystem durchgeführt. Die Stromregelung erfolgt im Allgemeinen durch Kommunikation der Regelteilnehmer.

Probleme bei der Kommunikation

Die Kommunikation der Regelteilnehmer ist eine sensible Aufgabe. Sie erfordert, dass mit ausreichender Bandbreite und Geschwindigkeit Daten über teilweise große Entfernungen geschickt werden, idealerweise ohne dass es zu Ausfällen oder Störungen kommt. Außerdem ist hier die Frage der Datensicherheit wichtig, denn von außen darf die Übertragung nicht manipuliert und wegen dem Datenschutz auch nicht mitgelesen werden können. In dieser Arbeit wird die Kommunikation nur hinsichtlich des Einflusses von Rauschen auf die Regelung untersucht. Auf Grund der Wichtigkeit dieses Themas sollen hier einige Probleme aufgelistet werden, die bei der Kommunikation entstehen können:

- **Verfügbarkeit:** Übertragungsnetzwerke sind nicht überall verfügbar. Ist das nicht der Fall, müssen sie nachgerüstet werden.
- **Zuverlässigkeit:** Das Netzwerk, über das die Kommunikation durchgeführt wird, darf nicht ausfallen. Das heißt, dass intelligente Watchdog-System implementiert werden müssen, die bei einem Ausfall sofort eingreifen und den Betriebszustand wiederherstellen. Unter Umständen ist auch eine Netzwerkredundanz erforderlich. Dasselbe gilt für die Elektronik der Regelteilnehmer. Ein Watchdog System muss diese ständig überwachen und im Notfall eingreifen.
- **Datenqualität:** Es muss garantiert werden, dass die Daten plausibel sind. In einem Echtzeitsystem mit großen Zeitkonstanten sind kurze Datenverluste weniger gefährlich als in schnellen Systemen. Außerdem dürfen die Daten nur mit wenig Rauschen überlagert sein.

- Sicherheit: Es soll nicht möglich sein, das System abzuhören. Weiters muss ein unautorisiertes Eingreifen verhindert werden. Dabei soll die Verschlüsselung jedoch so einfach wie möglich sein, um komplizierte Wartungsarbeiten zu vermeiden.

In den folgenden Kapiteln werden zwei Stromregelungskonzepte vorgestellt, die jeweils mit OLR und ILR implementiert werden. Daraus ergeben sich vier verschiedene Regelungsmethoden mit ihren Vor- und Nachteilen, die zur weiteren Untersuchung zur Verfügung stehen.

2.3.1 Master/Slave Methode

Bei der ersten untersuchten Spannungs- und Stromregelungsmethode handelt es sich um die sogenannte Master-Slave Regelung. Bei dieser Regelungsmethode wird aus allen Teilnehmern des Regelsystems ein Master gewählt. Dieser Master hat die Aufgabe, die Spannung an einem, je nach Regelungsmethode (OLR oder ILR) abhängigen, Knotenpunkt zu regulieren. Der dafür erforderliche Strom wird über ein Kommunikationssystem an die anderen Teilnehmer, die Slaves, weitergegeben, damit diese ihre Stromproduktion auf diese Vorgabe regeln können. Die Slaves folgen somit in ihrer Erzeugung dem Master. Deswegen ist eine weitere Bezeichnung dieser Regelungsmethode in aktueller Literatur Leader / Follower. Da diese Bezeichnung aber nicht häufig verwendet wird, wird in dieser Arbeit weiter von der Master/Slave Regelung gesprochen.

Es wird eine reine Spannungsregelung des Masters und, durch die Kommunikation, eine Stromregelung der Slaves erzielt. Die Slaves sind in der OLR Methode auch in der Lage, die Spannung zu regeln, werden jedoch von der Stromregelung maßgeblich beeinflusst. Das führt dazu, dass die Spannung an dem Knotenpunkt, die der Master regelt, auf Nennspannung gehalten wird, während die Slaves ihre Leistung anpassen und somit Lastaufteilung gegeben ist.

Die Auswahl des Masters fällt nicht willkürlich, sondern muss mit Bedacht getroffen werden. Die Qualität der Regulierung hängt stark von dieser Wahl ab. Besonders wichtig ist, dass der Master niemals oder sehr spät sein Leistungslimit erreicht. Wenn das passiert, folgen alle Slaves der Erzeugung des Masters, selbst wenn sie ihr Limit noch nicht erreicht haben. Dadurch wird die Gesamtleistung des Systems erheblich reduziert. Es muss somit darauf geachtet werden, dass ein leistungsfähiger Master gewählt wird. Mit einer automatischen Auswahl des Master kann dieses Problem auch im laufenden Betrieb behoben werden. Der Master muss in Echtzeit nach seiner Leistungsgrenze oder Erzeugung ausgewählt werden. Dafür ist weitere Kommunikation notwendig. Ein mögliches Automatic Master/Slave Konzept wird am Ende dieses Abschnittes vorgestellt.

Damit die Regelung funktioniert, wird ein unidirektionales Kommunikationssystem zwischen dem Master und den Slaves benötigt. Das heißt, dass die Slaves keine Daten an den Master schicken können, sie folgen nur seinen Befehlen. Weiters wird an das Kommunikationssystem hohe Anforderungen gestellt. Es muss schnell, robust und ausfallsicher sein. Sollte diese Kommunikation gestört werden, so versagt die Regelung. Das ist vor allem auch deswegen eine Schwachstelle des Systems, da ein Rauschen der Übertragungsleitung des Masters Fehler in der Regelung der Slaves hervorrufen kann.

Beim klassischen Master/Slave System darf außerdem der Master-Teilnehmer niemals ausfallen oder fehlerhaft sein. Diese Anforderungen sind vor allem im Rahmen der Netzsicherheit problematisch. Die Gefahr des Ausfalls des Masters kann jedoch mit automatischer Master-Auswahl zur Laufzeit behoben werden. Ein mögliches Konzept wird, wie vorher schon erwähnt, im Kapitel 2.3.1 vorgestellt. Sollte hingegen ein Slave ausfallen, so kann das System, so lange die anderen Erzeuger genug Leistung haben, problemlos weiterarbeiten.

Die Vor- und Nachteile dieser Regelmethode werden wie folgt zusammengefasst:

Vorteile:

- einfache Planung, da um den Master herum das System aufgebaut wird
- gute Lastaufteilung
- Ausfall eines Teilnehmers unkritisch (bei Automatic Master/Slave)

Nachteile:

- rauschanfällig
- hohe Anforderungen an Kommunikationsmedium
- Außer zur Bestimmung des Masters bei der automatischen Master-Wahl ist eine Kommunikation zwischen den Slaves nicht vorgesehen

Die untersuchten Implementierungen der Master/Slave Regelung mit OLR und ILR wird in den folgenden zwei Unterkapiteln beschrieben.

Master/Slave Regelung mit Outer Loop Regulation (OLR)

Bei der Outer Loop Regelung regeln sowohl der Master, als auch die Slaves nach der Spannung an ihrem Knotenpunkt U_{Master} and U_{Slave} . Die Spannungsregelung der Slaves wird allerdings durch den Master-Strom beeinflusst. Das Blockschaltbild der Master/Slave Regelung mit OLR ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Der Master vergleicht seine Anschlussspannung U_{Master} mit der Referenzspannung $U_{Ref,M}$ und bildet die Differenz $u_{e,M}$. Diese wird, wie bei der Voltage Droop Regelung, an den Regler weitergegeben. Im Grunde handelt es sich hier um eine Spannungsregelung nach der Droop Methode. Der Regler erzeugt ein Stromsignal $i_{e,M}$, welches an das Stellglied weitergegeben wird. Das Stellglied besteht hier aus einer Multiplikation mit der Knotenspannung U_{Master} und einer Addition der Referenzleistung $P_{Ref,M}$. Wenn keine Regelabweichung existiert, wird diese Referenzleistung geliefert. Die resultierende Leistung P_M liefert der Master an das Netz. Durch das Netz wird die Knotenspannung U_{Master} angepasst und zurückgekoppelt. Der Strom I_{Master} , den der Master erzeugt, wird am Anschlusspunkt gemessen und an die Slaves weitergegeben.

Die Slaves vergleichen den Strom des Masters mit ihrem eigenen und bilden die Regelabweichung $i_{e,S}$. Mit einem Stromregler wird das Spannungssignal $u_{e,S}$ erzeugt, dass an die

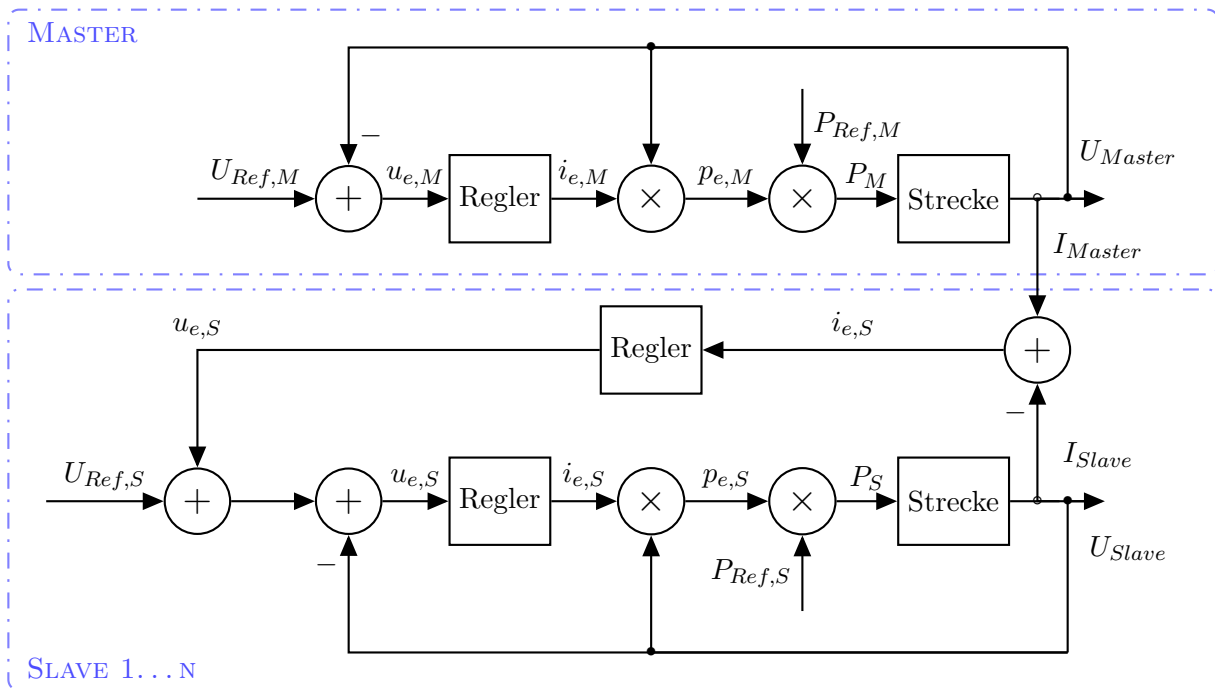


Abbildung 2.6: Blockschaltbild der Master/Slave Regelung mit äußerer Regelschleife

Spannungsregelung weitergegeben wird. Dabei wird es mit der Anschlussspannung des Slaves durch Addition mit der Referenzspannung $U_{Ref,S}$ überlagert. Mit dieser Spannung, die die Stromregelung durch den Master berücksichtigt, wird mit der Anschlussspannung des Slaves die Regelabweichung der Spannung $u_{e,S}$ berechnet. Der Regler versucht der Abweichung entgegenzuwirken, indem er das Stellsignal $i_{e,S}$ erzeugt. Diese Größe ist physikalisch ein Strom, der Regler entspricht somit einer Division durch einen Widerstand. Die Steuergröße wird zu einer Leistung umgerechnet, indem der Strom mit der Anschlussspannung U_{Slave} multipliziert und zu der Referenzleistung $P_{Ref,S}$ addiert wird.

Master/Slave Regelung mit Inner Loop Regulation (ILR)

Der Unterschied der Inner Loop Regelung zur Outer Loop Regelung (OLR) ist der, dass die Spannung an einem gewünschten Punkt des Netzes geregelt wird und nicht zwangsläufig an den Anschlusspunkten der Erzeuger. Das Blockschaltbild der Master/Slave Regelung mit ILR ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

Das Blockschaltbild ist in die drei Bereiche Spannungsregulation, Master und Slave unterteilt. Das soll zeigen, dass die Spannungsregulation sowohl im Master als auch in den Slaves gleich ist. Deswegen kann sie theoretisch auch entkoppelt in einem zentralen System realisiert werden.

Die Spannungsregulation regelt die Differenz der tatsächlichen Spannung an dem zu regelnden Knotenpunkt U_{ist} zu Null. Das passiert über ein Voltage Droop Schema, bei dem die Regelabweichung aus der Referenzspannung U_{Ref} und der tatsächlichen Spannung U_{ist} gebildet wird. Das vom Regler erzeugte Stellsignal i_e ist physikalisch gesehen ein Strom. Dieser wird in eine Leistung umgewandelt, indem er mit U_{ist} multipliziert wird.

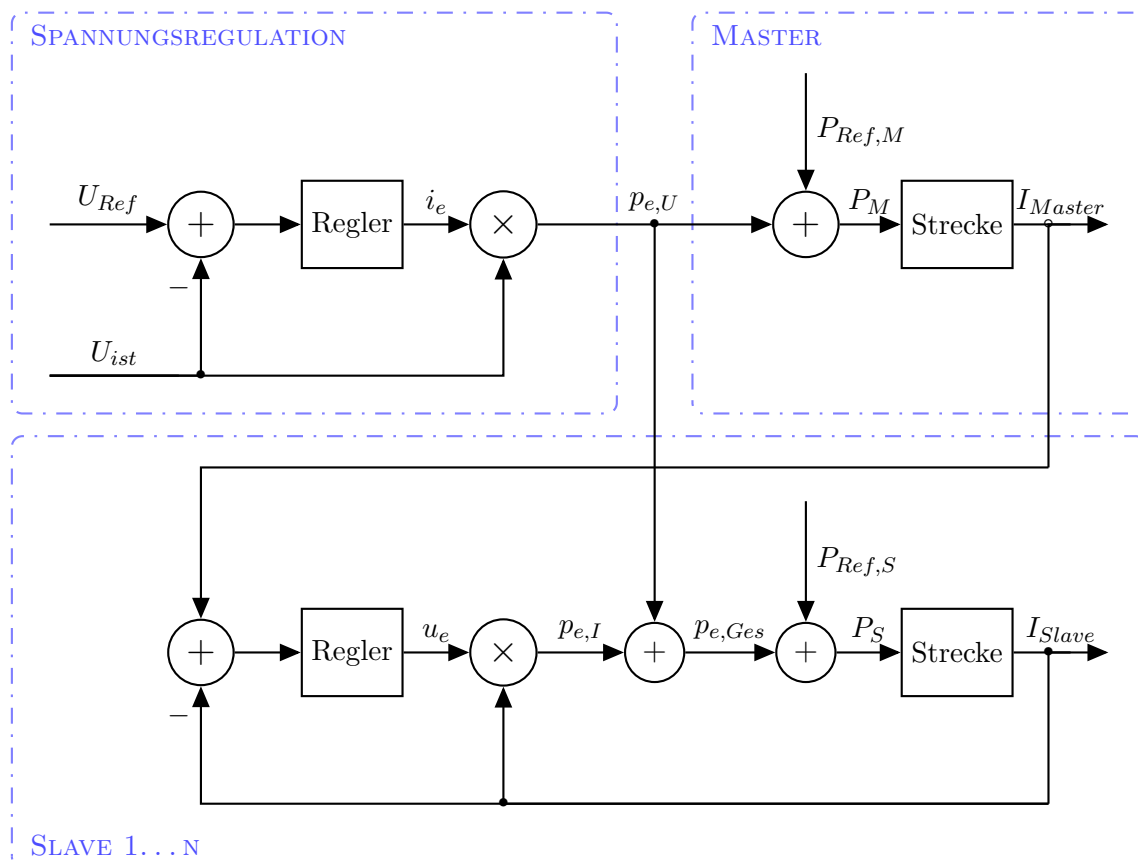


Abbildung 2.7: Blockschaltbild der Master/Slave Regelung mit innerer Regelschleife

Das Ergebnis ist die Steuergröße der Spannungsregelung $p_{e,U}$. Dieses Signal wird sowohl an den Master, als auch an die Slaves übermittelt.

Der Master erzeugt mit dieser Vorgabe direkt die zu erzeugende Leistung P_M . Dadurch ist ersichtlich, dass der Master eine reine Spannungsregelung der Spannung U_{ist} durchführt. Der erzeugte Strom des Masters I_{Master} wird am Anschlusspunkt gemessen und an die Slaves über die Kommunikationsleitung weitergegeben.

Wie bei der OLR berechnen die Slaves mit einer Stromregelung die Antwort auf die Regelabweichung $I_{Master} - I_{Slave}$. Diese wird zu der Steuergröße der Spannungsregelung $p_{e,U}$ addiert und ergibt die kombinierte Steuergröße $p_{e,Ges}$. Diese wird zu der Referenzleistung addiert und an das Netz weitergegeben.

Bei dieser Regelmethode entsteht mehr Kommunikationsaufwand. Es muss sowohl die Steuergröße der Spannungsregulation, als auch der Strom des Masters an die Slaves gesendet werden. Das erfordert eine höhere Bandbreite als mit der OLR. Der Vorteil der ILR ist die nahezu perfekte Spannungsstabilität der zu regelnden Spannung, wie in den nachfolgenden Simulationen dieser Arbeit gezeigt wird.

Automatic Master/Slave

Bei dieser Erweiterung des Master/Slave Konzeptes wird der Master während der Laufzeit automatisch ausgewählt. Die Auswahl kann nach verschiedenen Parametern erfolgen, wie das Spannungsniveau oder die Leistung[15]. In dieser Arbeit hängt die Auswahl des Masters vom erzeugten Strom ab. Derjenige Regelknoten, der den größten Strom erzeugt, wird zum Master gewählt. Dadurch wird sichergestellt, dass ein Master, der in seine Leistungsgrenze fährt, die Leistung aller Slaves nicht auf seine eigene Maximalleistung reduziert. In diesem Fall wird ein anderer Slave zum Master gewählt, der die Kontrolle übernimmt. Ein weiterer Vorteil dieses Konzeptes ist, dass der Master ausfallen kann und das Gesamtsystem durch Wahl eines neuen Masters regelbar bleibt.

Um eine Automatic Master/Slave Regelung zu realisieren, müssen die erzeugten Leistungen beziehungsweise Ströme ständig miteinander verglichen werden. Das führt zu großen Ansprüchen an das Kommunikationssystem, da dieses bidirektional wird. Das heißt, dass die Slaves untereinander kommunizieren können. Die Kommunikation beschränkt sich jedoch auf die Auswahl des Masters, es werden keine zusätzlichen Regelschleifen implementiert.

2.3.2 Average Current Methode

Die zweite untersuchte kombinierte Spannungs- und Stromregelungsmethode ist die Average Current Regelung. Während bei der Master/Slave Regelung die Stromreferenz der Stromregelung durch den Master vorgegeben wird, wird bei der Average Current Regelung der Mittelwert aller erzeugten Ströme der Regelteilnehmer als Referenz festgelegt. Dadurch hat jeder Teilnehmer Einfluss auf den Lastfluss. Außerdem entfällt die Auswahl des Masters, denn alle Regelteilnehmer sind auf derselben hierarchischen Ebene. Deswegen wird diese Regelung auch die demokratische Regelung genannt.

Die Stromregulation erfolgt in jedem Regler über eine Mittelwertbildung, wie in Abbildung 2.8 dargestellt ist.

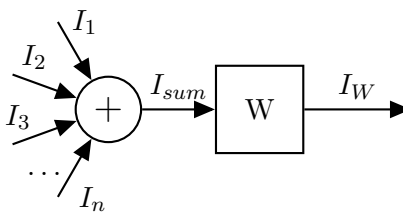


Abbildung 2.8: Bildung der Stromreferenz bei der Average Current Regelung

Zunächst werden die erzeugten Ströme der Teilnehmer miteinander addiert zu I_{sum} . Dieser Wert wird mit dem Faktor W multipliziert, der für jeden Teilnehmer anders sein kann. Dadurch kann eine gewünschte Gewichtung oder Mittelwertbildung durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Berechnung des Faktors W bei der Modellierung durchgeführt und ist für den n -ten Teilnehmer des Regelsystems mit N Teilnehmern mit Formel 2.8 definiert.

$$W_n = \frac{P_{Nenn,n}}{\sum_{i=1}^N P_{Nenn,i}} \quad (2.8)$$

Die Gewichtungsfaktoren müssen gemeinsam auch Bedingung Formel 2.9 genügen.

$$\sum_{i=1}^N W_i \stackrel{!}{=} 1 \quad (2.9)$$

Da die Regelteilnehmer keine Hierarchie untereinander besitzen, kann es passieren, dass durch Ausfall eines Regelteilnehmers, das heißt sein erzeugter Strom wird Null, alle anderen Teilnehmer ebenfalls auf einen Strom von Null regeln. Um das zu verhindern müsste die Bildung der Stromreferenz in Echtzeit angepasst werden. Das kann zum Beispiel gemacht werden, indem der Gewichtungsfaktor W aller Teilnehmer neu berechnet wird.

Etwas Ähnliches tritt auf, wenn ein Teilnehmer seine Leistungsgrenze erreicht. Alle Teilnehmer regeln in diesem Fall auf die Leistungsgrenze und reduzieren so die mögliche maximale Gesamtleistung des Systems. Die Teilnehmer sollten demzufolge ähnliche Leistungsgrenzen haben. Dieser Effekt macht das System sensibel auf Ausfälle.

Die einzelnen Regelteilnehmer teilen ihre Ströme auf einer gemeinsamen Kommunikationsleitung. Um die Komplexität zu minimieren, kann hier eine Busverbindung verwendet werden, bei der jeder Regelteilnehmer einen festen Zeitschlitz zur Übermittlung seiner Daten bekommt. Dadurch erhöht sich die Bandbreite. Eine hohe Bandbreite zu gewährleisten ist vor allem über große Entfernungen problematisch.

Ein großer Vorteil dieser Regelungsmethode ist, dass durch die Mittelwertbildung der Ströme ein in der Übertragung einkoppelndes Rauschen implizit reduziert wird. Das wird in den Simulationen genauer untersucht.

Vorteile:

- gute Lastaufteilung
- relativ immun gegen Rauschen

Nachteile:

- Ausfall eines Teilnehmers führt zu Gesamtausfall
- Leistungsgrenze eines Teilnehmers beeinflusst Gesamtleistung
- hohe Anforderungen an Kommunikationsmedium

Die untersuchten Implementierungen der Average Current Regelung mit OLR und ILR werden in den folgenden zwei Unterkapiteln beschrieben.

Average Current Regelung mit Outer Loop Regulation (OLR)

Bei der Outer Loop Regelung regeln die Regelteilnehmer die Spannungen ihrer jeweiligen Anschlusspunkte auf die Referenzspannung. Das Blockschaltbild der Average Current Regelung mit OLR ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Dieses Regelsystem gilt für jeden Teilnehmer. Es wäre möglich, die Berechnung der Stromreferenz auf ein zentrales Regelsystem auszugliedern. Das wurde hier nicht gemacht.

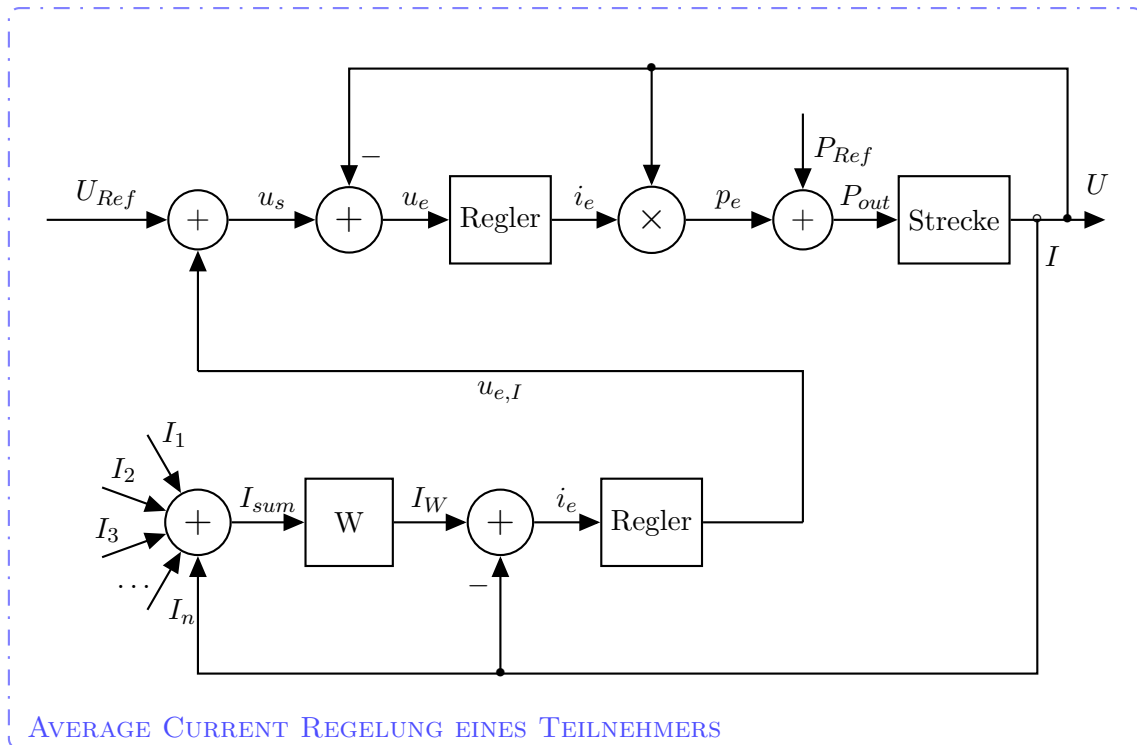


Abbildung 2.9: Blockschaltbild der Average-Current Regelung mit äußerer Regelschleife eines Teilnehmers

Die Stromregulation berechnet über den Gewichtungsfaktor W und die Summe aller Ströme aller Teilnehmer den mittleren Strom. Dieser dient dem Stromregler zur Berechnung der Regelabweichung i_e . Der Stromregler antwortet auf die Regelabweichung mit der Steuergröße $u_{e,I}$, die an die Spannungsregelung weitergegeben wird. Der Stromregler entspricht somit, wie bei der Master/Slave Regelung, einer Division durch einen Widerstand. Die Steuergröße $u_{e,I}$ wird zur Nennspannung addiert, damit mit der tatsächlichen Spannung U die Regelabweichung der Spannung u_e so berechnet werden kann, dass sie durch die Stromregulation ebenfalls beeinflusst wird. Die restliche Regelung ist dieselbe wie bei der Voltage Droop Regelung.

Average Current Regelung mit Inner Loop Regulation (ILR)

Wie bereits bei der Master/Slave Regelung erwähnt wurde, ist der Unterschied der ILR zur OLR, dass bei der ILR nur eine bestimmte Spannung an einem Knotenpunkt gesteuert

wird. Dadurch lässt sich das Blockschaltbild einteilen in eine Spannungsregulation und eine Stromregulation. Das Blockschaltbild dieser Regelmethode von einem Regelteilnehmer ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

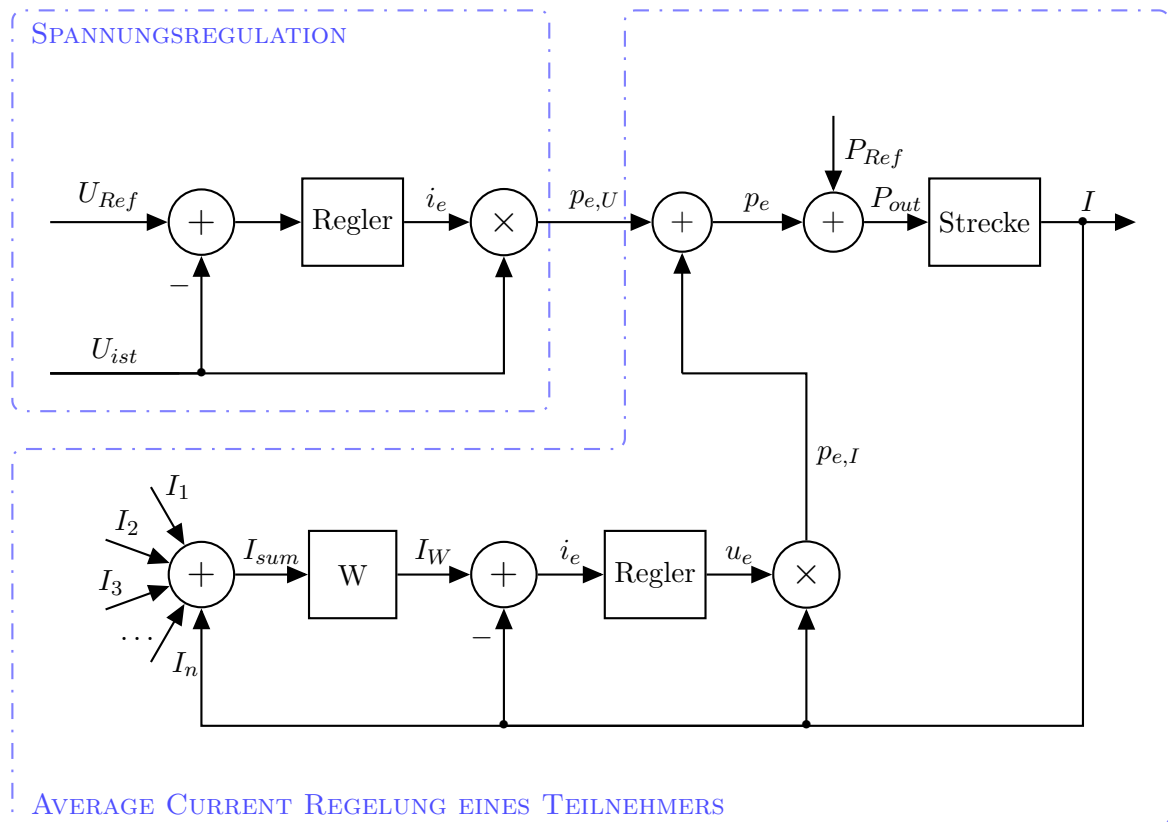


Abbildung 2.10: Blockschaltbild der Average-Current Regelung mit innerer Regelschleife eines Teilnehmers

Die Spannungsregulation erzeugt die Stellgröße $p_{e,U}$, die der Reglerantwort auf die Regelabweichung zwischen der Nennspannung und der tatsächlichen Spannung proportional ist. Zu Dieser Größe wird die Steuergröße der Stromregulation addiert. Die resultierende Leistung wird zur Referenzleistung addiert und an den Ausgang gelegt.

Die Stromregulation erfolgt wie bei der OLR schon besprochen. Der Unterschied ist nur, dass die Steuergröße u_e nach dem Stromregler bei der OLR direkt an die Spannungsregulation übergeben wurde, während hier noch eine Umrechnung auf die Leistung $p_{e,I}$ erfolgt.

2.4 Implementierung in MATLAB©

Die Simulationsumgebung wurde von Grund auf in MATLAB© geschrieben. In diesem Kapitel werden die diskreten Algorithmen für die Regler beschrieben und Informationen zur Lastflussrechnungen bereitgestellt.

Regleralgorithmen

Da im Rahmen dieser Arbeit der stationäre Zustand der Netze untersucht wird, wurde auf eine dynamische Betrachtung im Frequenzbereich verzichtet und die Algorithmen im Zeitbereich implementiert. Das hat zwei grundlegende Vorteile. Der erste ist, dass die Implementierung der Regelalgorithmen direkt in echte Steuereinheiten übernommen werden können. Der zweite Vorteil ist, dass keine Übertragungsfunktion des Netzes aufgestellt werden muss und somit ohne großem Aufwand beliebige Netze berechnet werden können.

Da bei der Kalkulation die Zeit in diskrete Schritte unterteilt wird, müssen die Algorithmen der Regelglieder ebenso diskret programmiert werden.

Der Algorithmus für den P-Regler ist in Formel 2.10 gegeben. e_t ist hier die Regelabweichung in einem Zeitschritt und K der Proportionalfaktor.

$$y_t = K \cdot e_t \quad (2.10)$$

Für den PI-Regler muss, wegen dem zeitabhängigen Integrators, ein etwas komplizierter Algorithmus implementiert werden. Dieser ist mit Formel 2.12 gegeben. Da die Zeitschritte, in denen die Simulation rechnet, vorgegeben und konstant sind, kann die Integration zu einer Summe aller Regelabweichungen e_{sum} und einer anschließenden Multiplikation mit dem Zeitschritt der Simulation t_a durchgeführt werden. Der Anfangswert von e_{sum} wird mit Null festgelegt. K und T sind der Proportionalitätsfaktor und die Zeitkonstante des Integrators.

$$e_{sum} = e_{sum} + e_t \quad (2.11)$$

$$y_t = \frac{K}{T} \cdot t_a \cdot e_{sum} \quad (2.12)$$

Die oben genannten Algorithmen werden für jeden Zeitschritt in den Reglern ausgeführt.

Ergänzungen zur Lastflussrechnung

Zur Berechnung des Lastflusses wurde das Programm aus [9] erweitert. Das Programm basiert auf den Untersuchungen von Haileselassie und Uhlen [6] und arbeitet auf Basis des Newton-Raphson Verfahrens. In diesem Kapitel wird nicht genau auf den Ablauf der Lastflussberechnung eingegangen, da der in den obigen Quellen nachgelesen werden kann. Das Programm wurde so erweitert, dass es in Form von Matrizen beliebige Netze akzeptiert. In diesem Kapitel soll auf diese Ergänzungen eingegangen werden, die für das Verständnis des Programms wichtig sind.

Lastflussberechnung mit Newton-Raphson Verfahren in Matrixform

Zur Lösung von nichtlinearen Gleichungen wird in dieser Arbeit das Newton-Raphson Verfahren verwendet. Angepasst auf die Berechnung des Lastflusses in Gleichstromnetzen und in Matrixform ist es wie folgt definiert[6]:

$$\vec{U}_{n+1} = \vec{U}_n + \text{inv}(\mathbf{J}) \cdot \vec{Err} \quad (2.13)$$

mit

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial \vec{U}} \quad (2.14)$$

$$\vec{P}_{ist} = \vec{U} \circ \mathbf{Y} \cdot \vec{U} \quad (2.15)$$

$$\vec{Err} = \vec{P}_{soll} - \vec{P}_{ist} \quad (2.16)$$

wobei \circ das Hadamard-Produkt beziehungsweise das komponentenweise Produkt ist.

\vec{U}_{n+1} sind die Potenziale an den Knotenpunkten für die nächste Iteration und sind abhängig von den Spannungswerten der letzten Iteration n , der Jacobimatrix \mathbf{J} und dem Fehlervektor \vec{Err} .

Das Newton-Raphson Verfahren wurde in einem Algorithmus implementiert, der zunächst mit den Startwerten der Spannungen an den Knotenpunkten \vec{U} die Leistungen an den Knotenpunkten \vec{P}_{ist} mit Formel 2.15 berechnet. Danach wird mit dem Fehlervektor \vec{Err} aus Formel 2.16 und der Jacobimatrix \mathbf{J} aus Formel 2.14 der Spannungsvektor der nächsten Iteration mit Formel 2.13 berechnet.

Das wird so lange wiederholt, bis alle Elemente des Fehlervektors einen Grenzwert unterschreiten.

Da es sich beim Newton-Raphson Verfahren um ein iteratives Verfahren handelt, hängt seine Konvergenz von der Wahl der Anfangswerte ab. Generell konvergiert das Newton-Raphson Verfahren zwar für eine breite Wahl an Startwerten, aus Gründen der Konvergenzgeschwindigkeit ist eine geschickte Wahl jedoch vorteilhaft. Die Anfangswerte der Spannungen an den Knotenpunkten werden der Nennspannung des Netzes gleichgesetzt. Dies führt zu einer schnellen Konvergenz des Verfahrens, unabhängig ob eine Last oder ein Erzeuger am Knotenpunkt hängt.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Matrizen genauer beschrieben.

Impedanz- und Admittanzmatrix

Die Impedanzmatrix ist eine quadratische $n \times n$ Matrix und bestimmt den Aufbau des Netzes.

Sie liegt in folgender Form vor:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 0 & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Aus dieser Matrix kann man zwei Eigenschaften ablesen: Zum einen ist ihre Hauptdiagonale immer Null, da der Knoten selbst keinen Widerstand hat. Zum anderen ist sie im Normalfall symmetrisch, das heißt, dass sie um die Hauptdiagonale spiegelbar ist. Das lässt sich dadurch begründen, dass die Widerstände vom Knoten 1 nach 2 und vom Knoten 2 nach 1 gleich sind. Das gilt nicht mehr, wenn aus einem bestimmten Grund eine Leitung mit Dioden ausgestattet ist. Das ist in einem Übertragungsnetz sinnlos und wird deswegen nicht weiter berücksichtigt.

Die Admittanzmatrix kann ebenfalls verwendet werden, um das Netz zu beschreiben. Sie ist eine quadratische $n \times n$ Matrix und hat folgende Form:

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

Wie die Impedanzmatrix ist die Admittanzmatrix symmetrisch, solange der bidirektionale Stromfluss nicht verhindert wird. Die Hauptdiagonale dieser Matrix ist jedoch nicht Null.

Jacobimatrix

Die Jacobimatrix in einem allgemeinen Netz mit n Knoten und n vorgegebenen Leistungen hat die Form

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial U_1} & \frac{\partial P_1}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial U_n} \\ \frac{\partial P_2}{\partial U_1} & \frac{\partial P_2}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial U_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_1} & \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Da die Leistungen von der Impedanzmatrix oder Admittanzmatrix des Netzes abhängen, stellt sich die Frage, ob eine allgemeine Formel zur Berechnung der Differenziale der Jacobimatrix hergeleitet werden kann.

Zunächst wird die Definition der Leistung P_i an einem Knotenpunkt i durch die Definition aus Formel 2.15 hergeleitet. Als Summe angeschrieben ergibt das

$$P_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j U_i \quad (2.20)$$

Um die Jacobimatrix zu bilden, muss man die Lösung für $\frac{\partial P_i}{\partial U_m}$ für alle $m, i \leq n$ finden. Durch Ableiten bekommt man folgende Lösung:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} U_j + Y_{ii} U_i \quad , m = i \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = Y_{im} U_i \quad , m \neq i \quad (2.22)$$

Durch Formel 2.21 und Formel 2.22 kann man die Jacobimatrix bilden. Die Hauptdiagonale wird mit Formel 2.21 gebildet, alle anderen Elemente mit Formel 2.22.

Berechnung der Ergebnismatrizen

Nachdem die Spannungen an den Knotenpunkten mit dem Newton-Raphson Verfahren iterativ bestimmt wurden, können die Matrizen mit den Spannungen, Leistungen und Strömen an und zwischen den Knotenpunkten aufgestellt werden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass n die Anzahl der Knoten im Netz ist und der berechnete Spannungsvektor \vec{U} aus dem Newton-Raphson Verfahren ein Spaltenvektor mit n Elementen ist. Jeder der Ergebnismatrizen ist eine $n \times n$ Matrix.

Spannungsmatrizen

$$\mathbf{U}_d = \vec{\mathbf{1}}_n \cdot \vec{U}^\top - \vec{U} \cdot \vec{\mathbf{1}}_n^\top \quad (2.23)$$

$$U_{d,ij} = U_j - U_i, \quad (2.24)$$

Mit Formel 2.23 werden die Spannungsdifferenzen zwischen den Knotenpunkten berechnet. $\vec{\mathbf{1}}_n$ entspricht einem Eins-Spaltenvektor mit n Elementen. Da \vec{U} ebenfalls ein Spaltenvektor mit n Elementen ist, wird \mathbf{U}_d eine $n \times n$ Matrix.

Die Hauptdiagonale dieser Matrix muss Null sein, da eine Spannungsdifferenz nur zwischen zwei Knotenpunkten und nicht am Knotenpunkt direkt entstehen kann.

Formel 2.24 gibt die direkte Berechnung der einzelnen Elemente der Matrix an. Man sieht auch hier, dass die Elemente der Hauptdiagonale ($i = j$) gleich Null sind.

Mit Hilfe der Differenzspannungsmatrix \mathbf{U}_d kann die in dieser Arbeit verwendete Ergebnisspannungsmatrix \mathbf{U}_e wie folgt berechnet werden:

$$\mathbf{U}_e = \mathbf{U}_d + \text{diag}(\vec{U}) \quad (2.25)$$

$$U_{e,ii} = U_i, \quad (2.26)$$

$$U_{e,ij} = U_j - U_i, \quad i \neq j \quad (2.27)$$

wobei \mathbf{E} die $n \times n$ Einheitsmatrix ist. Der Operator $\text{diag}()$ von Formel 2.25 dient dazu, eine Diagonalmatrix zu erstellen, wobei die Elemente des Vektors \vec{U} die Hauptdiagonale bilden. Dies ist mit MatLab mit der Funktion $\text{diag}()$ möglich, man kann diese Diagonalmatrix auch explizit berechnen: $\text{diag}(\vec{U}) = \mathbf{E} \circ (\vec{\mathbf{1}}_n \cdot \vec{U}^\top)$

Formel 2.26 und Formel 2.27 geben direkt das Bildungsgesetz der Elemente der Ergebnisspannungsmatrix an.

Strommatrix

$$\mathbf{I} = \mathbf{U}_d \circ \mathbf{Y} + \text{diag}(\mathbf{Y} \cdot \vec{U}) \quad (2.28)$$

Der erste Teil von Formel 2.28 zeigt, wie man sich die Strommatrix berechnen kann. Der erste Term $\mathbf{U}_d \circ \mathbf{Y}$ gibt die Ströme zwischen den Knotenpunkten an, der zweite Term $\text{diag}(\mathbf{Y} \cdot \vec{U})$ gibt die Summe aller ab- und zulaufenden Ströme an den Knotenpunkten an und bildet die Hauptdiagonale.

Leistungsmatrizen

$$\mathbf{P} = \vec{U} \cdot \vec{1}_n^\top \circ \mathbf{I} \quad (2.29)$$

$$\mathbf{P}_V = \mathbf{U}_d \circ \mathbf{U}_d \circ \mathbf{Y} \quad (2.30)$$

Formel 2.29 berechnet die Matrix mit dem Leistungsfluss des Netzes. In der Hauptdiagonale finden sich die Leistungen der Verbraucher beziehungsweise Erzeuger an den Knotenpunkten.

Um die Verlustleistungen auf den Leitungen zu berechnen, wird Formel 2.30 angewandt.

Mit Hilfe dieser Matrizen konnten die stationären Zustände der Simulationen dieser Arbeit ermittelt werden.

Kapitel 3

Definition der Modellnetze

In diesem Kapitel werden die untersuchten Netze definiert und erklärt. Es gibt mehrere Schwerpunkte der Regelung, die in dieser Arbeit untersucht werden sollen. Dafür wurden drei verschiedene Netze konstruiert, die möglichst alle Gesichtspunkte abdecken und auf einfache Weise die Arbeitsweise der Algorithmen demonstrieren sollen.

Das Netz mit parallelgeschalteten Erzeugern aus Kapitel 3.1 dient zum Überprüfen der Lastaufteilung und des Einflusses von Rauschen auf die Spannungs- und Stromregulation paralleler Erzeuger.

Das Niederspannungsnetz Kapitel 3.2 soll Strategien für die Spannungsregulation und für hohen Eigenverbrauch der im Netz erzeugten Leistung, bereitstellen.

Im Haushaltsnetz Kapitel 3.3 sollen Strategien bezüglich Demand Side Management mit Kühlgeräten betrachtet werden.

Die Netze decken dabei zwei Netzebenen, dem Verteilnetz und dem Haushaltsnetz, ab.

3.1 Verteilnetz mit parallelen Erzeugern

Um die Aufteilung der Last zwischen Erzeugern zu simulieren, wird ein Netz erstellt, dem ein kleines, ländliches Niederspannungsnetz mit drei Erzeugern und einem Verbraucher entspricht. Außerdem kann durch die Einfachheit dieses Netzes die Regelmethode genauer auf ihre Eigenschaften untersucht werden.

Dieses Netz ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die drei Erzeuger *Gen1*, *Gen2* und *Gen3* sind mit dem Verbraucher über eine Sammelschiene verbunden. An der Sammelschiene ist auch ein Bilanzknoten angeschlossen, der zum Beispiel ein übergeordnetes Netz darstellt.

Um die Leitungswiderstände zu berechnen, müssen die geografischen Begebenheiten des Netzes genauer spezifiziert werden. Es soll ein Kleinspannungsnetz im ländlichen Bereich realisiert werden. In solchen Gegenden kommen zum Beispiel Freileitungen aus dem Material StAlu mit 95 mm^2 Kabelquerschnitt zum Einsatz. Diese dürfen maximal mit $I_{th} = 185 \text{ A}$ belastet werden. Die durchschnittliche Leitungslänge beträgt 288 Meter und der längenbezogene Widerstand einer solchen Leitung beträgt $r' = 0.32 \frac{\Omega}{\text{km}}$ [14].

Aus diesen Daten lassen sich die Leitungswiderstände berechnen, die in Tabelle 3.1 aufgelistet sind. Zu beachten ist, dass Hin- und Rückleiter benötigt werden. Das bedeutet, dass

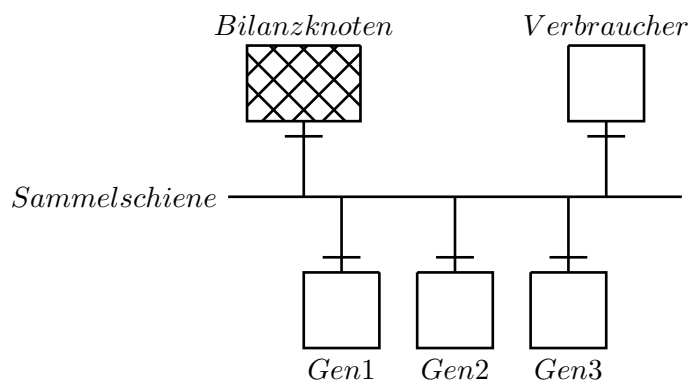


Abbildung 3.1: Einfach Verteilnetz zum Testen und anfängliche Untersuchungen der Regelalgorithmen

der Längswiderstand der Leitung in der Tabelle verdoppelt werden muss, um den Ersatzwiderstand für die Simulation zu gewinnen.

	Bilanzknoten	Generator 1	Generator 2	Generator 3	Verbraucher
Distanz in m	300	100	50	150	70
R in Ohm	0.096	0.032	0.016	0.048	0.0224

Tabelle 3.1: Anschlusswiderstände der Erzeuger und Verbraucher mit 95mm^2 StAlu Freileitung im Modellnetz für parallele Erzeugung

Erzeuger

Die Leistungsdaten der drei Generatoren sind in Tabelle 3.2 ersichtlich. Alle drei Generatoren haben unterschiedliche Maximalleistungen. Das wurde deswegen so gewählt, um zu demonstrieren, wie die Regler auf einen Generator reagieren, der seine Leistung nicht weiter erhöhen kann und in der Regelung somit ausfällt. Die Referenzleistung ist die Leistung, die bei Nennspannung, das heißt wenn kein Regelfehler existiert, erzeugt werden soll. Diese Leistung wurde auf 80% der Nennleistung gesetzt. Der Grund dafür war, dass dadurch insgesamt eine Leistung von 18 kW bei Nennspannung erzeugt wird und diese mit der Last, die, wie noch in diesem Kapitel erklärt wird, zwischen 15 kW und 25 kW liegt, zusammenpasst. Die gesamte Maximalleistung aller Erzeuger beträgt 22.5 kW.

	Generator 1	Generator 2	Generator 3
P_{Ref} in W	5600	6000	6400
P_{Max} in W	7000	7500	8000
P_{Min} in W	0	0	0

Tabelle 3.2: Anschlussleistungen der Erzeuger im Modellnetz für parallele Erzeugung

Die Erzeuger haben kein spezielles Erzeugungsprofil vorgegeben. Somit können sie durch die Regelung innerhalb ihrer Grenzen P_{max} und P_{min} beliebige Zustände erreichen.

Verbraucher

Der Verbraucher hat das in Abbildung 3.2 abgebildete Lastprofil. Die Last ist hier mit einer negativen Leistung angegeben, da das Erzeugerzählpeilsystem verwendet wird. Das Lastprofil wurde so gewählt, um die Qualität der Regelmethode bestmöglich zu testen. Zunächst wird Last von 20 kW angelegt, die Nahe am Nennpunkt der Generatoren liegt. Nach kurzer Zeit erfolgt ein Lastsprung auf 15 kW. Danach steigt die Last linear an bis zu einer Leistung von 25 kW. Hier erreichen alle Erzeuger ihr Leistungsmaximum.

Das Spannungsniveau wird auf 400 Volt festgelegt. Es ist momentan noch kein erlaubtes Spannungsband für den DC Betrieb normiert. Nach Niederspannungsrichtlinie 2006/95/EG der EU ist die Bezeichnung DC Niederspannung für Spannungen im Bereich < 1500 V gültig. Das Spannungslevel von 400 Volt stammt aus den Untersuchungen aus [9].

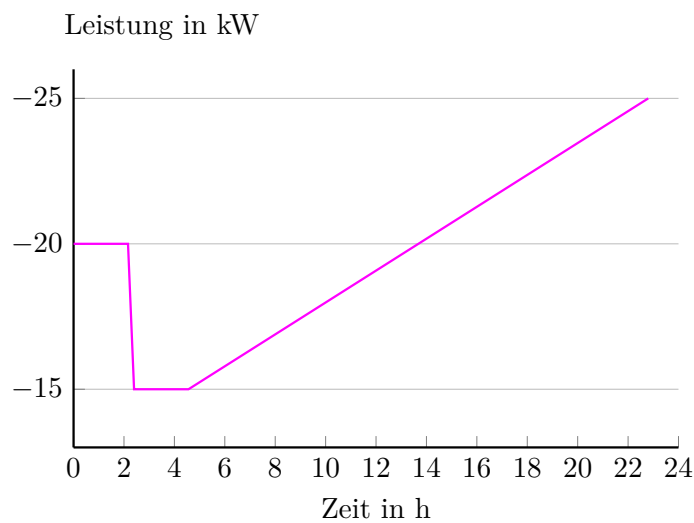


Abbildung 3.2: Lastverlauf des Verbrauchers

3.2 Niederspannungsnetz

Dieses Modellnetz soll ein Niederspannungsverteilstromnetz darstellen, das an ein übergeordnetes Netz angeschlossen ist. Die Anordnung des Netzes ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Das Verteilnetz ist ein Strahlnetz und besteht aus zwei miteinander verbundenen Zweigen, an denen verschiedene Verbraucher und Erzeuger angeschlossen sind.

An den Knoten 6, 7 und 11 sind Erzeuger angeschlossen, die restlichen Knoten sind Verbraucher.

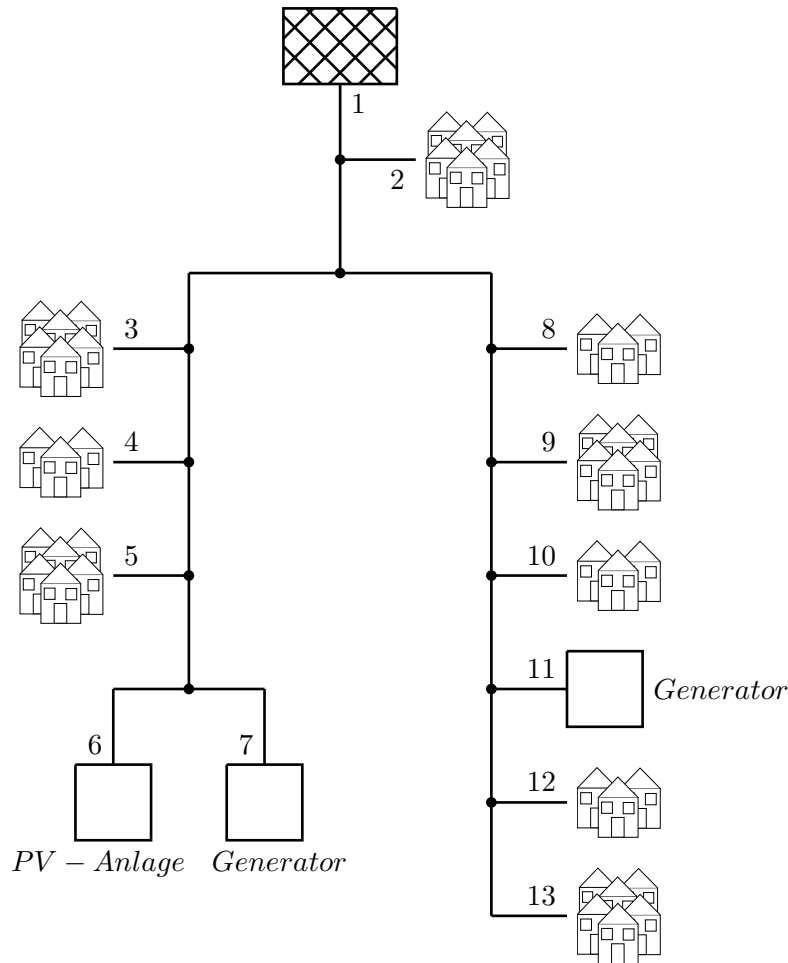


Abbildung 3.3: Anordnung des Niederspannungsverteilstromnetzes

Die Distanz zwischen den Haushalten beziehungsweise Erzeugern wurden, wie bei dem ersten Modellnetz, auf die durchschnittliche Distanz für ländliche Gegenden, 288 Meter, gesetzt[14].

Für die Energieübertragung wird eine Freileitung aus St/Alu mit 95 mm^2 Leiterquerschnitt verwendet. Mit dem längenbezogenen Widerstand von dieser Leitung von $r' = 0.32 \frac{\Omega}{\text{km}}$ und der oben genannten mittleren Distanz errechnet sich der Leiterwiderstand zu 0.09216Ω . Um ein möglichst weiträumiges Netz zu modellieren, wurde diese durchschnittliche Leitungslänge als Abstand zwischen jedem Knoten verwendet. Da es einen Hin- und Rückleiter gibt, muss der Leitungswiderstand für die Simulation verdoppelt werden.

Die Nennspannung wurde, wie bei dem ersten Modellnetz, auf 400 Volt festgelegt.

Bilanzknoten

Dem Bilanzknoten wurde eine leistungsabhängige Spannung zugeordnet, damit im Netz keine definierte Spannung herrscht und ein reales übergeordnetes Netz simuliert wird. Die Spannung-Leistung-Kennlinie des Bilanzknotens ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

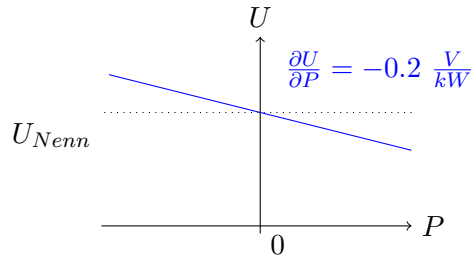


Abbildung 3.4: U-P Kennlinien des Bilanzknotens im Niederspannungsverteilstetzes

Der Bilanzknoten hat einen Spannungsfall von $-0.2 \frac{V}{kW}$. Das wurde deswegen so gewählt, weil bei erwarteten Leistungen am Bilanzknoten von etwa 20 kW die Spannungsänderung 4 Volt beträgt. Diese Abweichung ist, wie in den Simulationen gezeigt wird, für dieses Netzmodell groß und wird die Stabilität des Regelsystems herausfordern.

Erzeuger

Im Verteilnetz ist eine Photovoltaikanlage an Knoten 6 und Generatoren an Knoten 7 und 11 angeschlossen. Der Photovoltaikanlage wird ein generisches Erzeugungsprofil über ein Jahr zugeordnet. Die beiden Generatoren hingegen sind frei regelbar bis zu ihren Maximalgrenzen.

Die PV-Anlage und der Generator an Knoten 7 stehen Nahe beieinander. Damit soll getestet werden, wie sich die entwickelten Regelstrategien mit der fixen Erzeugung der PV-Anlage verhalten.

Die Leistungswerte der Erzeuger sind in Tabelle 3.3 aufgelistet. Die maximale Leistung der PV-Anlage in der Tabelle beschreibt die maximale Leistung im generischen Erzeugungsprofil. Diese verändert sich je nach betrachtetem Monat.

	Generator K7	Generator K11	PV-Anlage
P_{Ref} in kW	15	15	-
P_{Max} in kW	20	20	10
P_{Min} in kW	0	0	0

Tabelle 3.3: Anschlussleistungen der Erzeuger im Niederspannungsverteilstetz

Verbraucher

Die Verbraucher in diesem Netz sind Haushalte. An jedem Knotenpunkt eines Verbrauchers wurden jeweils drei oder sechs Haushalte angeschlossen. In Abbildung 3.3 des Netzes wurde dies mit der unterschiedlichen Menge an Häusern dargestellt. Den Haushalten wurde das dynamisierte Standardlastprofil H0 der E-Control zugewiesen[2]. Der Jahresverbrauch pro Haushalt wurde auf den durchschnittlichen österreichischen Jahresverbrauch pro Haushalt aus dem Jahr 2012 von 4187 kWh festgelegt [16]. Das Profil hat eine Schrittweite von 15 Minuten und es sind Daten für ein Jahr vorhanden. Die maximale Last aller Verbraucher beträgt 30 kW.

3.3 Hausnetz

Das Hausnetz wurde aus dem Projekt Smart DC Grid[21] übernommen. Das Hausnetz wurde als modernes Busnetz mit strahlenförmiger Topologie entworfen. Diese Netztopologie ist vor allem für Hausautomationstechnologie vorteilhaft. Der Grundriss des Haushaltes ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Die Geräte werden alle direkt mit der zentralen Steuereinheit verbunden, in der auch die AC/DC und DC/DC Wandler eingebaut sind.

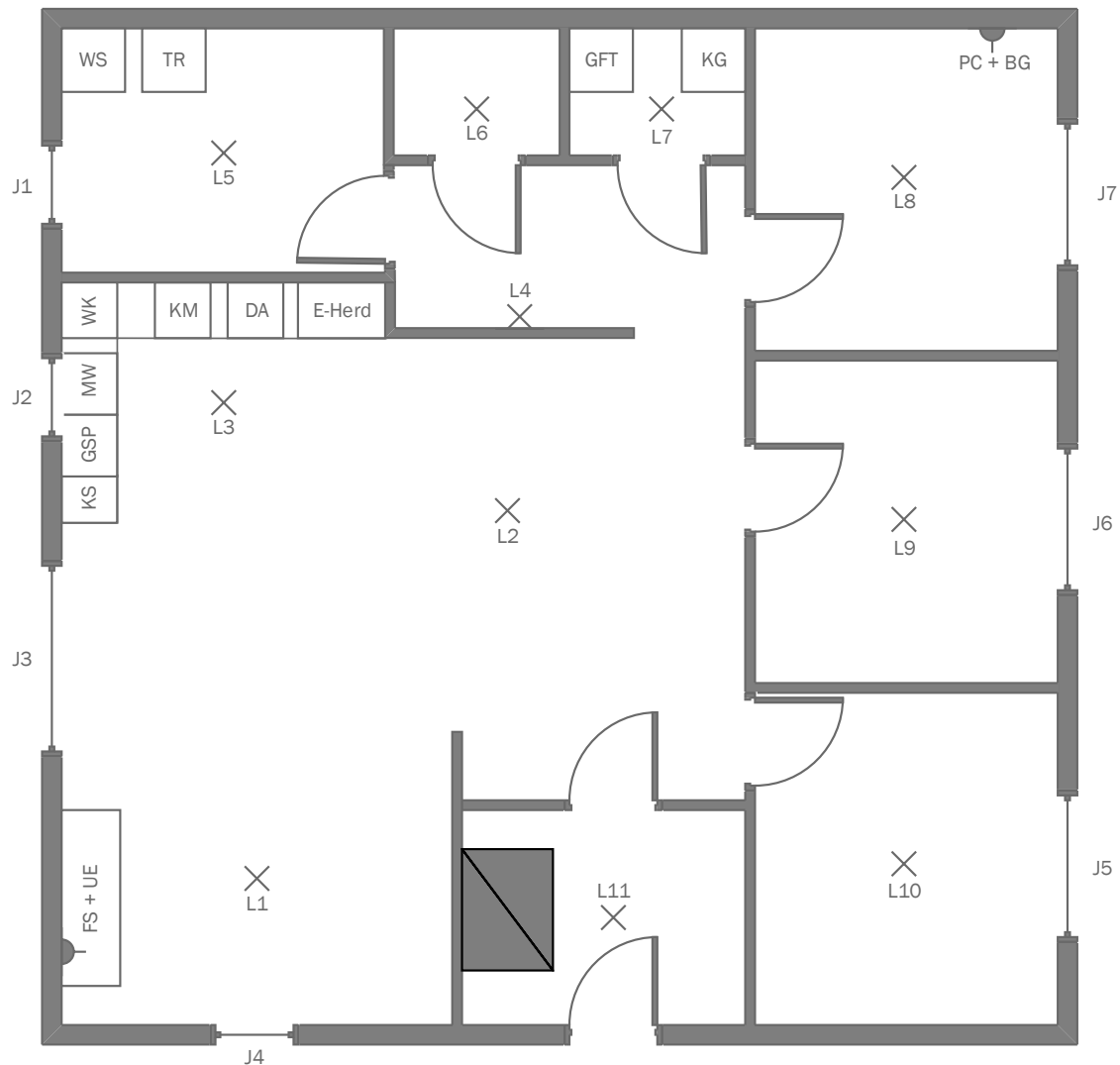


Abbildung 3.5: Grundriss des modellierten Hausnetzes

Die Größe des Haushaltes beträgt 100 m^2 , entsprechend der durchschnittlichen österreichischen Haushaltgröße[17]. Im Haushaltsnetz werden zwei Spannungsniveaus verwendet, die aus dem Projekt Smart DC Grid übernommen wurden. Die Spannungsniveaus betragen 380 Volt für Geräte mit hoher Leistung und 48 Volt für Geräte mit geringer Leistung.

Um größtmögliche Kompatibilität zu heutigen Hausnetzen zu gewährleisten, werden, wie schon heute, Leitungen mit einem Querschnitt von 2.5 mm^2 verwendet. Die Leitungswiderstände berechnen sich mit der Leitungslänge und dem verwendeten Material nach Formel 3.1.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.1)$$

wobei ρ der spezifische Widerstand des Materials, l die Leitungslänge und A der Leiterquerschnitt ist.

Es werden Kupferkabel verwendet, die eine Leitfähigkeit von $57 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2}$ besitzen [3]. In Tabelle 3.4 sind die spezifischen Widerstände und Leitwerte für einige Materialien aufgelistet.

Material	Leitfähigkeit (bei 20°C) in $\frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2}$	spezifischer Widerstand ρ in $\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$
Kupfer	57	0.0175
Aluminium	35.3	0.0283
Gold	41	0.0244
Silber	60.4	0.0166
Eisen	9.7	0.1032

Tabelle 3.4: Elektrische Eigenschaften einiger Materialien im Vergleich [3]

Mit dem spezifischen Widerstand für Kupfer und einem Leiterquerschnitt von 2.5 mm^2 wurden die Widerstandswerte der Leitungen für dieses Netz berechnet. Da es einen Hin- und Rückleiter gibt, müssen diese Widerstandswerte in der Simulation verdoppelt werden.

Verbraucher

Die im Haushalt verwendeten Geräte wurden aus statistischen Erhebungen entnommen[16]. Sie wurden weiters in Gruppen zusammengefasst, die mit Abkürzungen versehen wurden und die Leitung zum Hausanschluss besitzen. In Tabelle 3.5 sind alle Verbraucher und ihre Anschlussspannung aufgelistet.

Die Lastprofile der Verbraucher wurden aus den synthetischen Lastprofilen aus der Arbeit über aktives Demand Side Management[18] übernommen. Die Lastprofile des Kühlschranks, der Gefriertruhe und des Klimagerätes wurden gesondert modelliert. Dies ist im nächsten Abschnitt erklärt.

Abkürzung	Spannungsebene	Geräte
KS	48 V	Kühlschrank
GSP	380 V	Geschirrspüler
MW	380 V	Mikrowelle
WK	380 V	Wasserkocher
KM	380 V	Kaffeemaschine
E-Herd	380 V	Elektrokochstelle, Backofen
DA	48 V	Dampfabzug
FS+UE	48 V	Fernseher, HiFi-Anlage, Spielekonsole, Laptop
WS	380 V	Waschmaschine
TR	380 V	Trockner
GFT	48 V	Gefriertruhe
KG	48 V	Kühlgerät / Klimaanlage
PC+BG	48 V	PC, Monitor, Drucker
L1-L11	48 V	Beleuchtung

Tabelle 3.5: Anschlussspannungen und Abkürzungen der Erzeuger im Haushaltsnetz

Modellierung der Kühlgeräte

Um eine Demand Side Management Strategie zu untersuchen werden regelbare Verbraucher benötigt. In dem Hausnetz bieten sich hier vor allem die Kühlgeräte als Speicher an. Dafür muss für diese Geräte ein Modell erstellt werden, das eine Leistungsanpassung erlaubt. In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Modelle für Kühlgeräte implementiert.

- kontinuierliche Leistungsanpassung: Das Kühlgerät regelt seine Leistung so, dass eine bestimmte Temperatur des Systems erreicht wird. Dies geschieht in diesem Modell kontinuierlich mit einem PI-Regler, der die Abweichung der Temperatur in eine Anschlussleistung umwandelt.
- binäre Leistungsanpassung: Das Kühlgerät verbraucht entweder Maximalleistung oder ist abgeschaltet. Wenn die Temperatur im System ein Maximum erreicht, so wird das Kühlgerät so lange aktiviert, bis die Minimaltemperatur erreicht wird. Danach schaltet es sich ab und erwärmt sich langsam wieder. Dadurch schwingt das System langsam um die Solltemperatur.

Das Klimagerät im Haushalt wurde mit kontinuierlicher Leistungsanpassung modelliert, dem Kühlschrank und der Gefriertruhe werden das binären Modell hinterlegt.

Die Maximal- und Minimaltemperaturen, bei denen sich der Kühlschrank und die Gefriertruhe aktivieren beziehungsweise deaktivieren sollen, werden in Prozent der Solltemperatur in Kelvin angegeben. In diesem Modell wurden $\pm 0.25\%$ der Solltemperatur in Kelvin angenommen, damit sich die Kühlgeräte ähnlich wie die in den synthetischen Lastprofilen verhalten.

Die eingestellten Maximal- und Minimaltemperaturen sowie die Solltemperaturen in Kelvin und umgerechnet auf Grad Celsius der Kühlgeräte sind in Tabelle 3.6 eingetragen. Die Umrechnung zwischen Kelvin und Grad Celsius ist gerundet $Wert\ in\ ^\circ C = Wert\ in\ Kelvin - 273$.

<i>Gerät</i>	<i>T_{Soll} in K</i>	<i>T_{Soll} in °C</i>	<i>T_{Max} in °C</i>	<i>T_{Min} in °C</i>
<i>Klimagerät</i>	295	22	-	-
<i>Kühlschrank</i>	279	6	6.7	5.3
<i>Gefriertruhe</i>	258	-15	-14.35	-15.65

Tabelle 3.6: Eingestellte Sollwerte der Kühlgeräte

Die obigen Einstellungen der Maximal- und Minimaltemperaturen gelten im normalen Betrieb der Kühlgeräte. Mit Implementierung von Demand Side Management können diese Grenzen verschoben werden. Das wird im Simulationskapitel genau beschrieben.

Die Leistungen des Kühlschranks und der Gefriertruhe sind aus den schon bei den Verbrauchern erwähnten synthetischen Profilen entnommen worden. Das Klimagerät soll nur einen Raum kühlen und wird mit einer Leistung von 1000 Watt angenommen. Diese sind in Tabelle 3.7 aufgelistet.

<i>Gerät</i>	<i>P_{Max} in W</i>
<i>Klimagerät</i>	1000
<i>Kühlschrank</i>	180
<i>Gefriertruhe</i>	140

Tabelle 3.7: Eingestellte Leistungswerte der Kühlgeräte

Die Erwärmung der Kühlgeräte erfolgt linear. Da die Isolationswerte nicht bekannt sind, wurde die Erwärmung so angepasst, dass die entstehenden Aktivitätszyklen des Kühlschranks und der Gefriertruhe der synthetischen Profile entsprechen.

Der Kühlschrank ist einmal pro Stunde aktiv, deswegen wurde eine Erwärmung von 1.4 Kelvin pro Stunde eingestellt. Anfangs steigt in einer halben Stunde der Temperaturwert vom Sollwert auf die eingestellte Maximaltemperatur, bei der sich der Kühlschrank aktivieren soll. Daraufhin wird auf die Minimaltemperatur heruntergekühlt. Da diese 1.4 Kelvin vom Maximalwert entfernt ist, dauert es eine Stunde, bis dieser wieder erreicht ist. Der Aktivitätszyklus ist also auf einmal pro Stunde eingestellt.

Die Gefriertruhe ist nach den synthetischen Lastprofilen nur etwa alle zwei Stunden aktiv. Deswegen wurde die Erwärmung auf 0.65 Kelvin pro Stunde eingestellt. Analog zum Kühlschrank ist der Abstand zwischen Minimal- und Maximaltemperatur 1.3 Kelvin. Es dauert also zwei Stunden, bis die Gefriertruhe wieder gekühlt werden muss.

Für das Klimagerät gibt es kein synthetisches Lastprofil. Es kann innerhalb seiner Leistungsgrenzen nach dem oben beschriebenen Modell geregelt werden. Die Erwärmung des zu klimatisierenden Raumes wurde auf 3 Kelvin pro Stunde festgelegt. Dies wurde deswegen so gewählt, damit sich der Raum schnell erwärmt und der Regelalgorithmus das Kühlgerät nicht über einen langen Zeitraum deaktivieren kann. Der erlaubte Temperaturbereich des Raumes wird in den Simulationen in 4.3 definiert.

Kapitel 4

Simulationsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse für die in Kapitel 3 definierten Modellnetze beschrieben.

4.1 Verteilnetz mit parallelen Erzeugern

Die Simulationen des Verteilnetzes aus Kapitel 3.1 soll Fragen über die Lastaufteilung unter parallelen Erzeugern und deren Spannungsregulation klären. Diese Ergebnisse sind auch für Speicher und Verbraucher übertragbar. Die Parallelschaltung von Erzeugern ist insofern wichtig, da es gerade bei erneuerbaren Energien zu verteilter Erzeugung und vielen Kleinkraftwerken kommt, die sich die Last effizient aufteilen sollen.

Außerdem wird bei den Spannungs- und Stromregelmethoden ein Rauschen in den Kommunikationskanal eingekoppelt, um zu prüfen wie sich dieses auf das Regelverhalten auswirkt.

Zunächst soll das System unregelt betrachtet werden. Das heißt die drei Generatoren erzeugen ihre eingestellte Leistungen von 5600 kW, 6000 kW und 6400 kW. In Abbildung 4.1 ist das Simulationsergebnis für die Leistungen und Spannungen bei einer Nennspannung von 400 Volt dargestellt. Durch die konstante Erzeugung der Generatoren folgt der Bilanzknoten der Verbraucherleistung.

Die Spannung an der Last befindet sich im Bereich von 393.6 Volt bis fast 400 Volt. Bei hoher Last entspricht das einem maximalen Spannungsfall von 1.5% der Nennspannung.

An den unregelten Generatoren ist die Spannung erwartungsgemäß höher mit maximal 402.9 Volt und minimal 397 Volt. Das entspricht einer Spannungsüberhöhung von 0.75% der Nennspannung.

Da bei Gleichstromnetzen noch keine Norm existiert, welche die maximale Abweichung der Spannung festlegt, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob diese Abweichungen zulässig sind. Im Rahmen dieser Untersuchungen soll die Spannungsstabilität mit passenden Regelmethoden verbessert werden.

Der maximal auftretende Strom liegt mit 63.5 Ampere weit unter dem thermisch erlaubten Maximalstrom von 185 Ampere[14] und ist deswegen unbedenklich. Die Verluste aller Systeme werden am Ende dieses Kapitels verglichen.

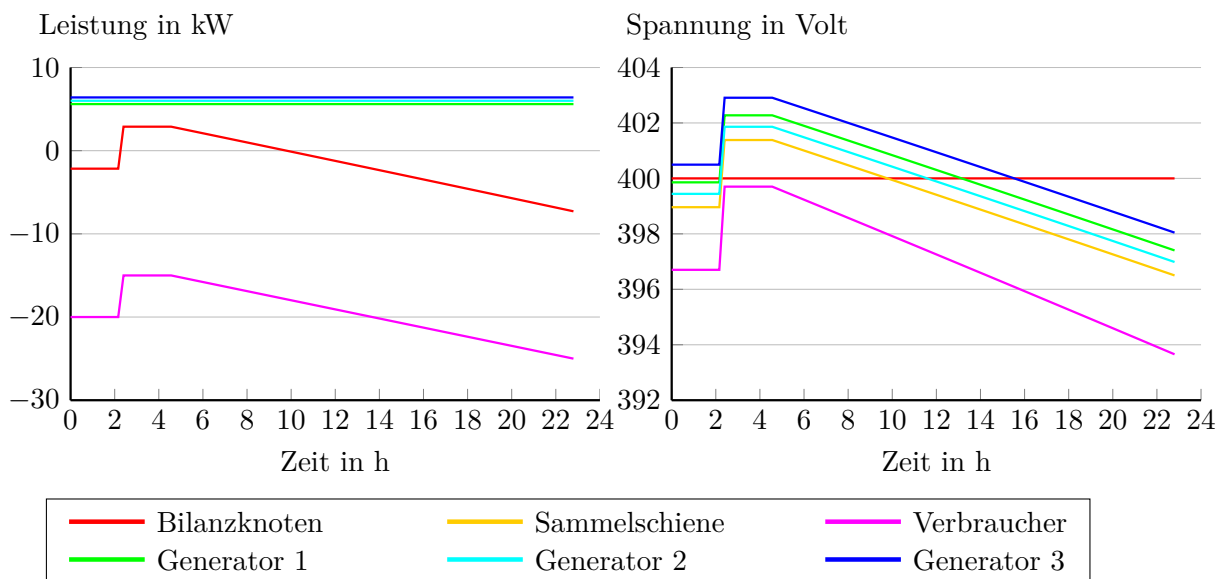


Abbildung 4.1: Veteilnetz mit parallelen Erzeugern im unregulierten Zustand

4.1.1 Parallele Erzeuger mit Voltage Droop Regelungsverfahren

In diesem Abschnitt werden die Voltage Droop Methoden ohne Kommunikation auf ihre Eignung in diesem Testnetz untersucht. Zunächst werden die zwei einfacheren Voltage Droop Methoden untersucht, bei denen jeder Erzeuger mit entweder ausschließlich P-Reglern oder PI-Reglern arbeitet. Danach werden kombinierte Regler verwendet. In keinem der durchgeführten Simulationen wurden Überschreitungen der maximal erlaubten Ströme gemessen. Deswegen werden diese nicht gesondert erwähnt.

Aufgrund der leicht unterschiedlichen Referenzleistungen der Erzeuger sind die Droop Charakteristiken zueinander verschoben, ähnlich wie in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Steigung ist gleich gewählt worden. Die Einstellungen der Regler wurden nach dem Verfahren nach Zieger/Nichols aus Kapitel 2.1 ermittelt und sind in Tabelle 4.1 ersichtlich. Bei höherer Verstärkung wurde das System instabil.

	K	T
P-Regler	$1.2 \Omega^{-1}$	
PI-Regler	$1 \Omega^{-1}$	$2 s$

Tabelle 4.1: Eingestellte Reglerparameter bei paralleler Erzeuger mit Voltage Droop Spannungsregulation

Es wird angenommen, dass die Voltage Droop Methoden nicht die besten Ergebnisse liefern, da keine Kommunikation zwischen den Erzeugern statt findet. Dies soll nun untersucht werden.

Verwendung von ausschließlich P-Reglern

Das Simulationsergebnis der Droop Regelung mit P-Reglern ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Spannung wird am Anschlusspunkt der Erzeuger reguliert und liegt im Bereich von 398.5 Volt bis 401.8 Volt. Im Gegensatz zum unregulierten Fall mit einem Spannungsbereich von 397 Volt bis 402.9 Volt ergibt das eine Reduktion der Abweichung von der Nennspannung auf 50% bis 62%.

Die Spannung an der Last bewegt sich im Bereich von 398.78 Volt bis 394.7 Volt. Verglichen mit dem unregulierten Fall liegt hier die Spannung immer relativ weit unter 400 Volt, da die Regler, wie schon erwähnt, nur die Spannungen an ihren Knotenpunkten regeln. Durch die Annäherung dieser Spannungen an Nennspannung verringert sich auch die Spannung an der Last, da auf dem Leiter zur Last ein Spannungsfall auftritt. Der Endwert der Spannung an der Last ist jedoch größer als im unregulierten Fall.

An der Leistungskurve ist erkennbar, dass die P-Regelung nur kleine Änderungen der gelieferten Leistung hervorruft, die um die Referenzleistung der Erzeuger gelegen sind. Die Leistungsverläufe der Erzeuger sind nahezu identisch. Die Abweichungen lassen sich durch die leicht unterschiedlichen Arbeitspunkte in der Droop Charakteristik und den Leitungswiderständen erklären.

Die Last wird bei dieser Regelungsmethode gut aufgeteilt, die Spannungsregulation hingegen ist verbesserungswürdig. Um diese zu verbessern werden im nächsten Abschnitt PI-Regler verwendet.

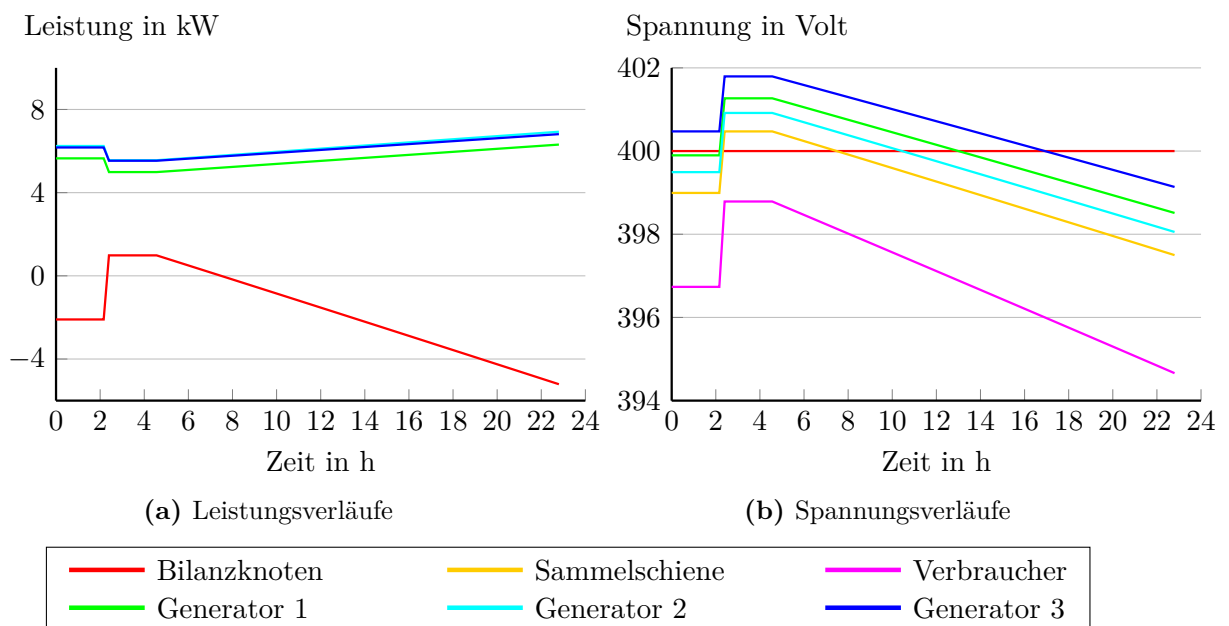


Abbildung 4.2: Parallele Erzeuger: Spannungsregulation mit P-Reglern

Verwendung von ausschließlich PI-Reglern

In Abbildung 4.3 ist das Simulationsergebnis bei ausschließlicher Verwendung von PI-Reglern dargestellt.

Der Endzustand der Regelung hängt hier von den Leitungswiderständen ab. *Generator3* hat den größten Leitungswiderstand, gefolgt von *Generator1* und *Generator2* mit dem kleinsten Widerstand. Genau diese Aufteilung ist auch in der Grafik ersichtlich. Der Generator mit dem kleinsten Leitungswiderstand, *Generator2*, übernimmt die meiste Last, bis er seine Leistungsgrenze erreicht. In diesem Fall erreicht er seine Leistungsgrenze von 7.5 kW sofort, deswegen kann der Regler den Spannungsfall seiner Anschlussspannung ab Stunde 6 nicht mehr korrigieren. Die Spannung an *Generator3* ist durchgehend Nennspannung, da er im betrachteten Bereich sein Leistungslimit nie erreicht und somit seine Regelbarkeit nicht verliert.

Die Spannung an der Last liegt immer unter 400 Volt. Trotzdem liegt sie mit einem Bereich von 395.4 Volt bis 397.7 Volt über dem unregulierten Fall von 393.6 Volt.

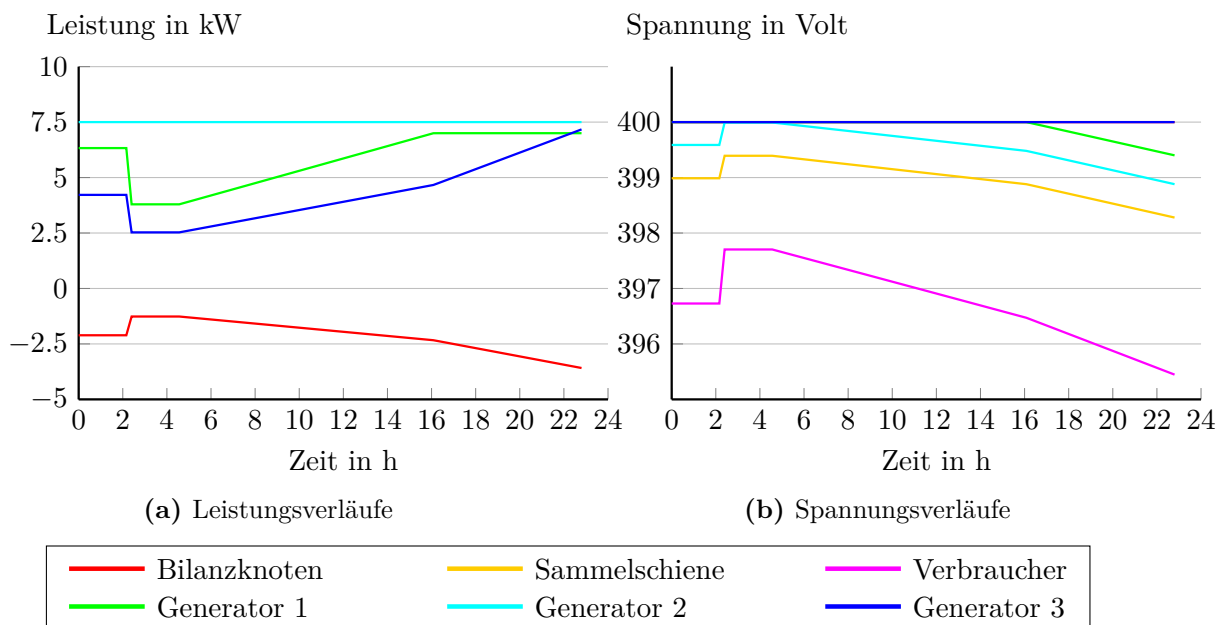


Abbildung 4.3: Parallele Erzeuger: Spannungsregulation mit PI-Reglern

Diese Regelmethode liefert zwar gute Spannungsregulation an den zu regelnden Erzeugern, hat jedoch eine schlechte Leistungsaufteilung. Diese hängt außerdem von den Leitungswiderständen und den Anfangswerten der Integratoren ab und ist somit in einem komplexen Netz nur schwer definierbar. Deswegen ist diese Art der Regelung nicht empfehlenswert, solange die Erzeuger parallel geschaltet sind. Sind die Erzeuger in unterschiedlichen Zweigen eines Netzes und nicht mehr parallel, so kann es sehr wohl sinnvoll sein, PI-Reglern zu verwenden. Dies wird im zweiten untersuchten Netz, dem Niederspannungsverteilstromnetz, gezeigt.

Kombination aus PI- und P-Reglern

Es bietet sich an, eine Mischung aus PI- und P-Reglern zu verwenden, damit die Vorzüge beider Reglereigenschaften kombiniert werden. Es soll nur ein Erzeuger mit einem PI-Regler arbeiten, die anderen mit P-Reglern. Der Generator mit PI-Regler ist *Generator3*, da dieser die größte Nennleistung besitzt und somit in diesem Netz den weitesten Leistungsbereich ausregeln kann.

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 4.4 dargestellt.

In den Spannungsverläufen ist ersichtlich, wie der PI-Regler von *Generator3* seine Anschlussspannung bis zu seinem Leistungslimit auf Nennspannung hält. Dadurch bleiben die verschiedenen Spannungsniveaus der Erzeuger durchgehend in einem engen Spannungsbereich von ca. 1.5 Volt.

Die Spannung am Verbraucher liegt zwischen 395 Volt und 397.7 Volt. Man erreicht am Verbraucher nahezu denselben Spannungsverlauf wie bei Verwendung von ausschließlich PI-Reglern, hat aber, bis auf den mit PI-Regler geregelten Generator, ähnliche Leistungsverläufe der übrigen Erzeuger.

Mit dieser Art der Regelung wird ein Kompromiss eingegangen. Die Spannungsregelung und die Lastaufteilung ist gut, bis auf den Generator, der mit PI-Regler ausgestattet ist. Für bessere Regelung müssen die Erzeuger untereinander kommunizieren, was in den nächsten Abschnitten untersucht wird.

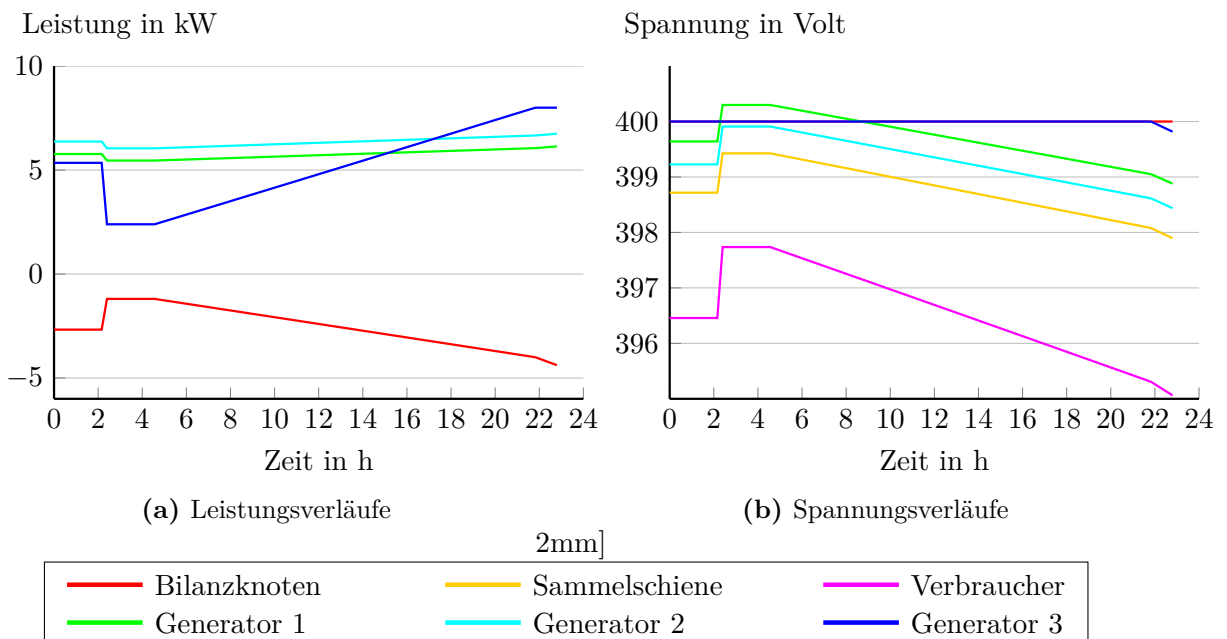


Abbildung 4.4: Parallele Erzeuger: Spannungsregulation mit P- und PI-Reglern

4.1.2 Parallele Erzeuger mit Open Loop Regulation (OLR)

Im folgenden Kapitel sollen die Regelmethode mit offener Regelschleife untersucht werden. Bei dem Konzept der offenen Regelschleife wird die Spannung am Anschlusspunkt des Erzeugers geregelt. Die Parameter der PI-Regler der Spannungs- und Stromregelung wurden mit der Schwingungsmethode aus Kapitel 2.1 auf die Werte in Tabelle 4.2 eingestellt.

	K	T
Spannungsregler	$0.2 \Omega^{-1}$	$2 s$
Stromregler	1Ω	$2 s$

Tabelle 4.2: Eingestellte Reglerparameter bei paralleler Erzeuger mit Outer Loop Regulation

OLR mit Master/Slave Regelung

Bei der Master/Slave Regelung wird die Spannung hauptsächlich vom Master geregelt. Als Master wurde der Erzeuger mit der größten Maximalleistung (Generator 3) festgelegt, damit das Regelsystem nicht durch die Leistungsbeschränkung des Masters beeinflusst wird. In Abbildung 4.5 ist gut ersichtlich, wie die Spannung von Generator 3, dem Master, exakt auf 400 Volt gehalten wird. Die Spannungen der anderen Erzeuger (Slaves) liegen darunter, weil die Masterspannung nicht überschritten werden kann. Die Spannung am Verbraucher liegt zwischen 395.4 Volt und 397.3 Volt.

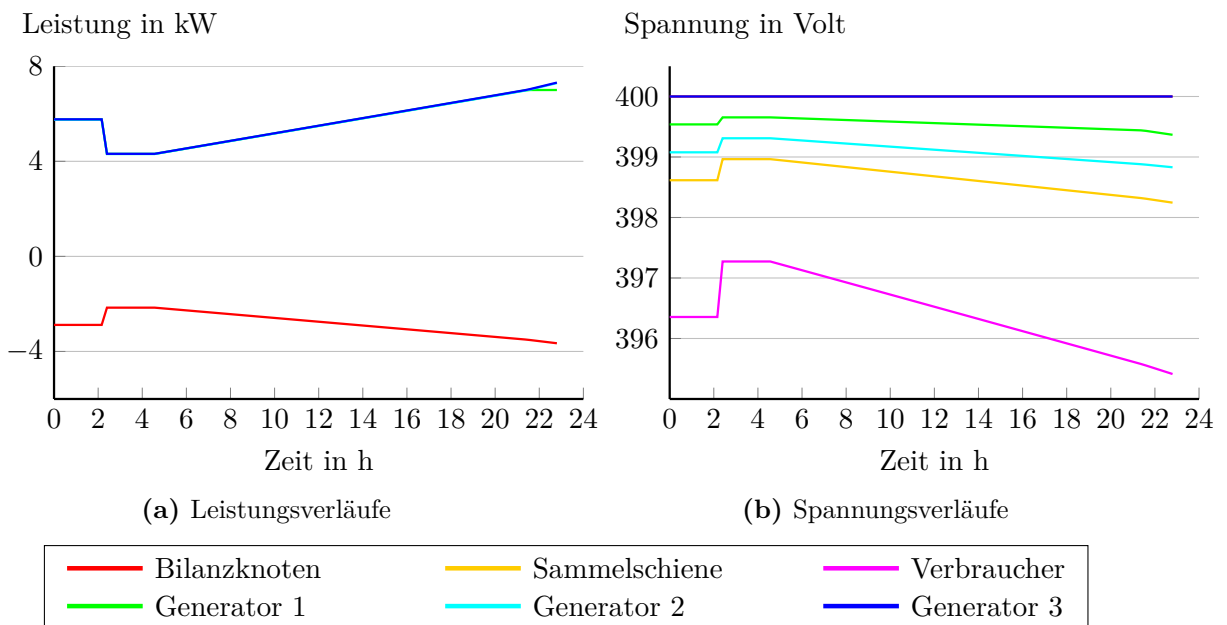


Abbildung 4.5: Parallele Erzeuger: Vergleich der OLR mit Master/Slave Regelung

Die Lastverläufe der Erzeuger liegen übereinander, wodurch ersichtlich ist, dass die Master/Slave Regelung die Last gleichmäßig aufteilt. Durch die Spannungsregulation auf den

Master wird das Spannungsniveau der Last durch den Spannungsfall an der Leitung abgesenkt. Man erreicht bei dieser Regelmethode eine sehr gute Lastaufteilung. Die Spannungsregulation der Erzeuger ist sehr gut, die Spannung am Verbraucher ist vergleichbar mit der reinen Spannungsregulation mit kombinierten P- und PI-Reglern.

OLR mit Average Current Regelung

In Abbildung 4.6 ist das Simulationsergebnis mit Average Current Regelung dargestellt. Bei der Average Current Regelung werden die Ströme der Erzeuger untereinander geteilt, gemittelt und als Stromreferenz zur Regelung verwendet. Das bedeutet, dass die Stromproduktion aller Erzeuger gleich ist. Da das Niveau der Anschlussspannungen der Erzeuger jedoch unterschiedlich ist, liegen die Leistungsverläufe nicht übereinander.

Die Spannungen der Erzeuger liegen wegen der Strom-Mittelung um die Nennspannung verteilt. Die Spannungsniveaus können somit auch größer als Nennspannung werden. Die Spannung am Verbraucher erhöht sich und liegt zwischen 395.8 Volt und 397.6 Volt.

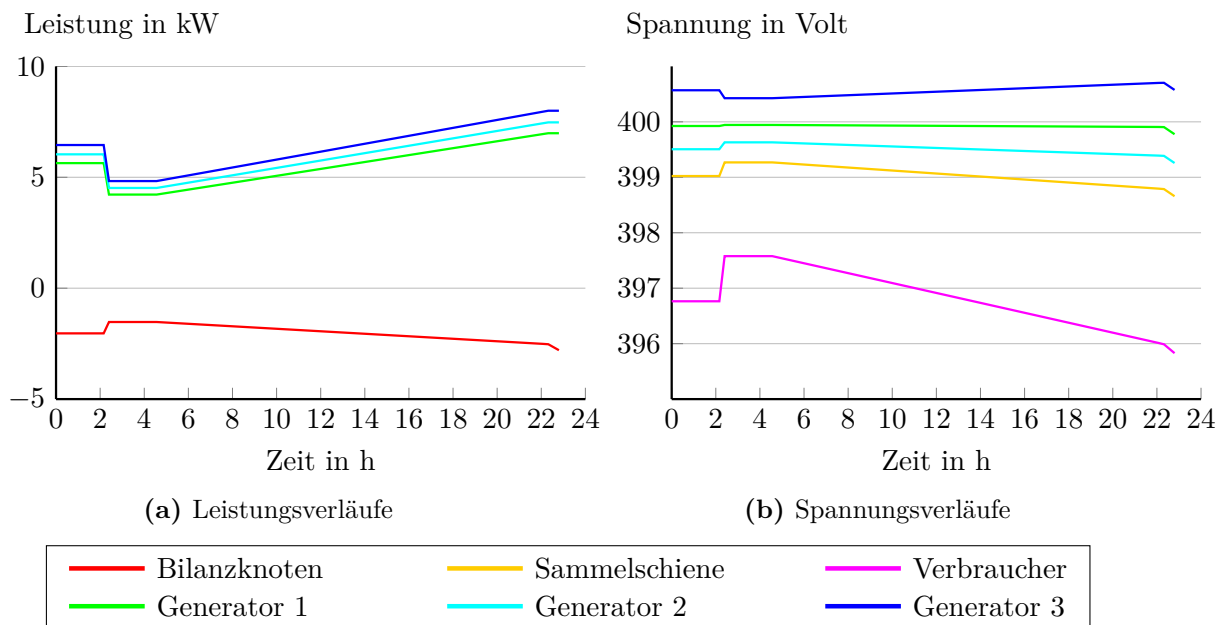


Abbildung 4.6: Parallele Erzeuger: Vergleich der OLR mit Average Current Regelung

Bei beiden Regelmethoden sinkt die Spannung an der Last stark ab. Das ist prinzipbedingt dadurch zu begründen, dass bei der OLR die Spannung am Anschlusspunkt des Reglers geregelt wird. Durch die Leitungswiderstände reduziert sich demnach die Spannung am Verbraucher. Soll die Spannung am Verbraucher immer auf Nennspannung gehalten werden, so ist die innere Regelschleife (ILR) besser geeignet.

4.1.3 Parallele Erzeuger mit Inner Loop Regulation (ILR)

Bei den Regelmethoden mit inneren Schleife wird die Spannung an einem Referenzknoten geregelt. In dem Beispielnetz bietet es sich an, die Spannung am Lastknoten zu regeln, sodass diese auf Nennspannung gehalten wird.

In Tabelle 4.3 sind die verwendeten Reglerparameter dargestellt.

	K	T
Spannungsregler	$0.2 \Omega^{-1}$	$2 s$
Stromregler	1Ω	$2 s$

Tabelle 4.3: Eingestellte Reglerparameter bei paralleler Erzeuger mit Inner Loop Regulation

ILR mit Master/Slave Regelung

Als Master wird *Generator3* gewählt, der wie bei der OLR Simulation, die größte Maximalleistung hat. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

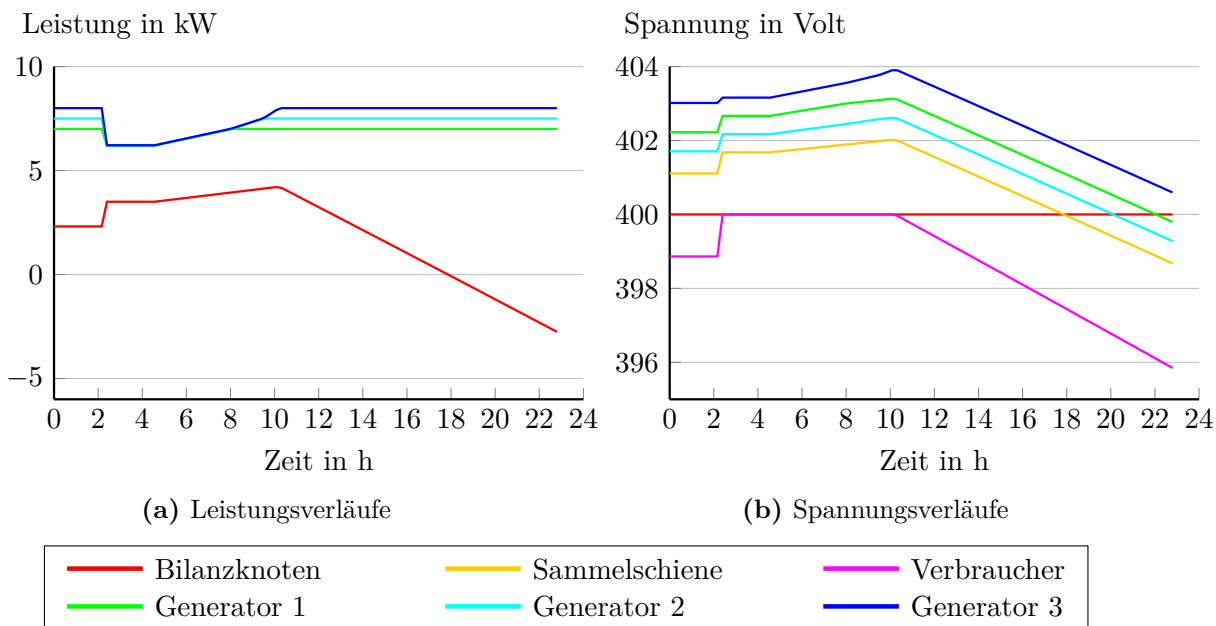


Abbildung 4.7: Parallele Erzeuger: Vergleich der ILR mit Master/Slave Regelung

Die Spannung am Verbraucher ist, wie bei ILR erwartet, exakt Nennspannung. Erst wenn alle Leistungsgrenzen der Erzeuger erreicht werden, fällt sie ab. Die Erzeuger erreichen ihr Maximum früher, was daran liegt, dass sie mehr Energie liefern müssen. Der Grund dafür ist, dass alle Spannungen im System erhöht werden müssen, damit die Spannung am Verbraucher Nennspannung erreicht. Das geht nur durch Erhöhung der Produktion. Am Bilanzknoten ist erkennbar, dass die Energiebilanz im System positiv ist. Das heißt, dass mehr Energie im System erzeugt als verbraucht und diese in das übergeordnete Netz eingespeist wird. Dadurch kommt es auch zu höheren Verlusten an den Leitungswiderständen. Dies wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels dargestellt.

ILR mit Average Current Regelung

Bei der Average Current Regelung findet sich ein ähnliches Bild wie bei der Master/Slave Regelung. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 4.8 dargestellt. Der Unterschied zur Master/Slave Regelung ist, dass die Erzeuger eine unterschiedliche Leistung produzieren. Der Grund dafür sind, wie bei der OLR mit Average Current Regelung, die unterschiedlichen Anschlussspannungen.

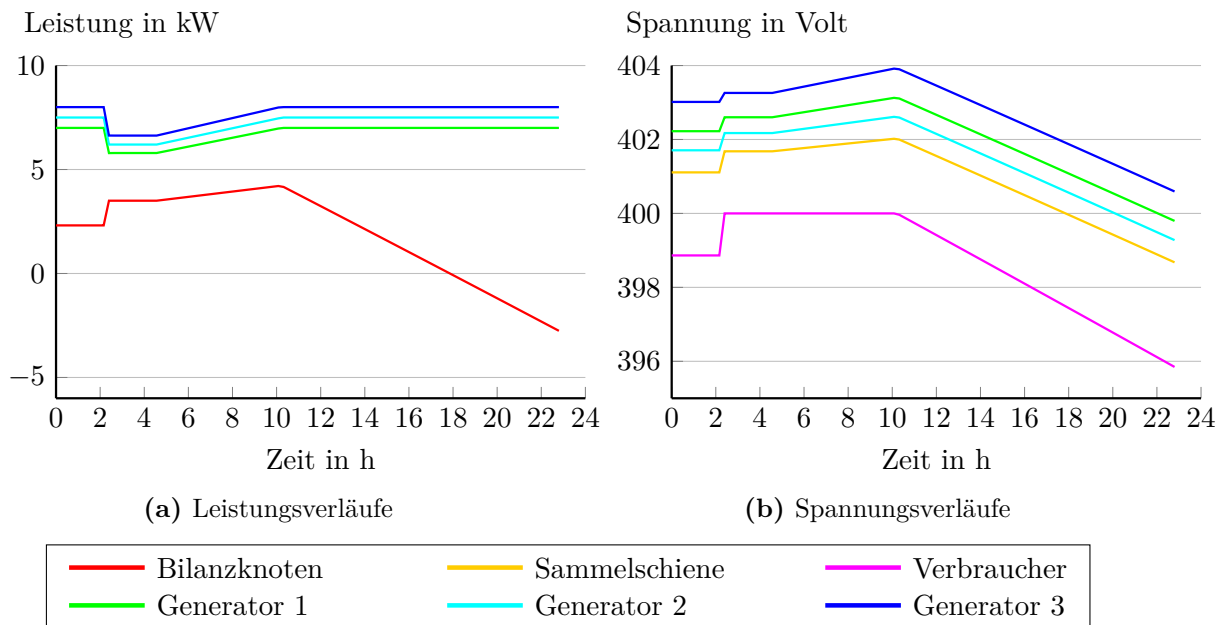


Abbildung 4.8: Parallele Erzeuger: Vergleich der ILR mit Average Current Regelung

Für ein Verteilnetz, bei dem ein Knotenpunkt eine stabile Spannung haben soll, ist diese Art der Regelung am besten geeignet. Der Verbraucher hat, so lange die Erzeuger ihre Leistungsgrenzen nicht erreichen, durchgehend eine stabile Spannung zur Verfügung. Der Nachteil dieser Methode sind die hohen erzeugten Leistungen und damit verbundenen Verluste. Ein Vergleich der Verluste wird am Ende dieses Kapitels durchgeführt.

4.1.4 Rauschempfindlichkeit der Stromregelmethoden

Da die Regelteilnehmer in der Master/Slave und der Average Current Regelmethode Informationen austauschen, ist noch interessant zu untersuchen, wie sich ein Rauschen auf diesem Informationskanal auf die Regelung auswirkt. Dafür wird die Master/Slave und die Average Current Regelung mit OLR als Basis herangezogen. Die Regelparameter sind in Tabelle 4.2 des OLR Abschnittes zu finden. Im Kommunikationskanal wird ein weißes Rauschen mit einer Amplitude von maximal 5% der Amplitude des Kommunikationssignals überlagert.

In Abbildung 4.9 ist das Simulationsergebnis für die Master/Slave Regelung abgebildet. Bei dieser Methode sendet der Master die Stromreferenz an seine Slaves. Dieses Signal wurde mit den oben genannten weißen Rauschen überlagert. Der Master ist in dieser Simulation *Generator3*. Das ist unter anderem auch daran erkennbar, dass der Leistungsverlauf von *Generator3* am wenigsten rauscht. Der Grund dafür ist, dass die Slaves *Generator1* und *Generator2* durch das Kommunikationssignal direkt ein Rauschen in ihre Leistungsverläufe einkoppeln, während *Generator3* dieses Rauschen nur als Auswirkung auf seine Anschlussspannung mitbekommt. Das Rauschen in der Spannung hat eine Amplitude von ca. einem fünftel Volt und würde sich auch in den Verbraucher einkoppeln, wie am Spannungsverlauf des Verbrauchers zu sehen ist. Da das nicht gewünscht ist, muss bei der Master/Slave Regelung sichergestellt werden, dass der Kommunikationskanal rauschfrei ist.

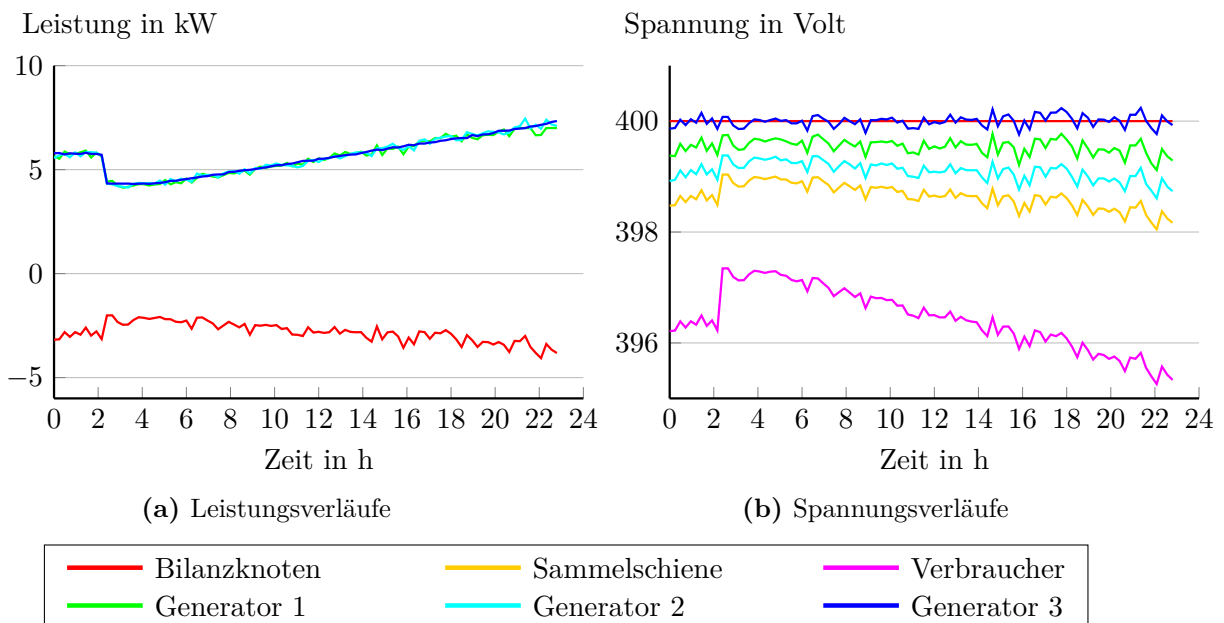


Abbildung 4.9: Parallele Erzeuger: Rauschempfindlichkeit der Master/Slave Regelung

Die Simulation mit der Average Current Regelung ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Bei der Average Current Regelung wirkt sich das Rauschen im Vergleich mit der Master/Slave Regelung kaum aus. Der Grund dafür ist, dass der Referenzstrom für die Stromregelung aus dem Mittelwert aller Ströme der Erzeuger generiert wird. Da das Rauschen alle Erzeuger betrifft und zufällig ist, wird es bei der Mittelwertbildung größtenteils gefiltert. Für rauschanfällige Kommunikationswege ist diese Art der Regelung vorteilhaft, da sie implizit eine Rauschfilterung enthält.

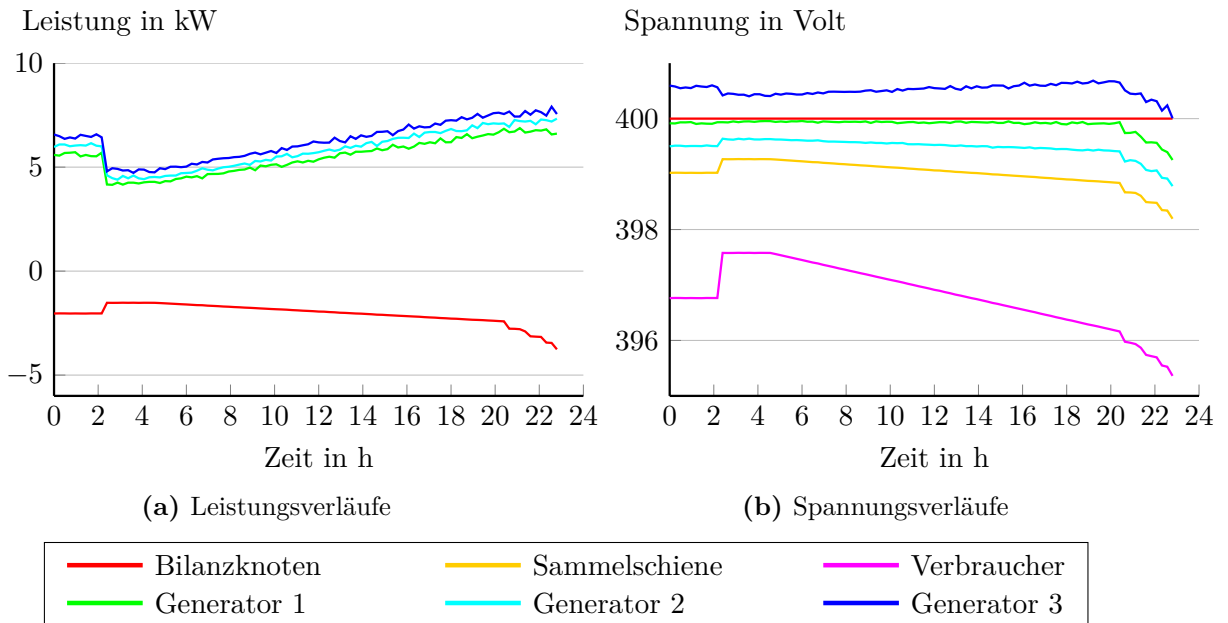


Abbildung 4.10: Parallele Erzeuger: Rauschempfindlichkeit der Average Current Regelung

4.1.5 Betrachtung der Verluste

Wichtig ist auch, die Leistungsverluste zu beachten. Diese, über den Tag betrachtet, sind in Abbildung 4.11 aufgelistet.

Am wenigsten Verluste hat die reine Spannungsregulation mit ausschließlich PI-Reglern. Da diese keine Lastaufteilung beherrscht, ist sie für Netze dieser Art nicht geeignet. Die OLR Verfahren sind hier am interessantesten, da sie sowohl gute Lastaufteilung, gute Spannungsregulation und wenig Verluste haben. Die ILR Methoden haben die größten Verluste, da sie, um die Spannung am Verbraucher zu heben, mehr Leistung produzieren müssen.

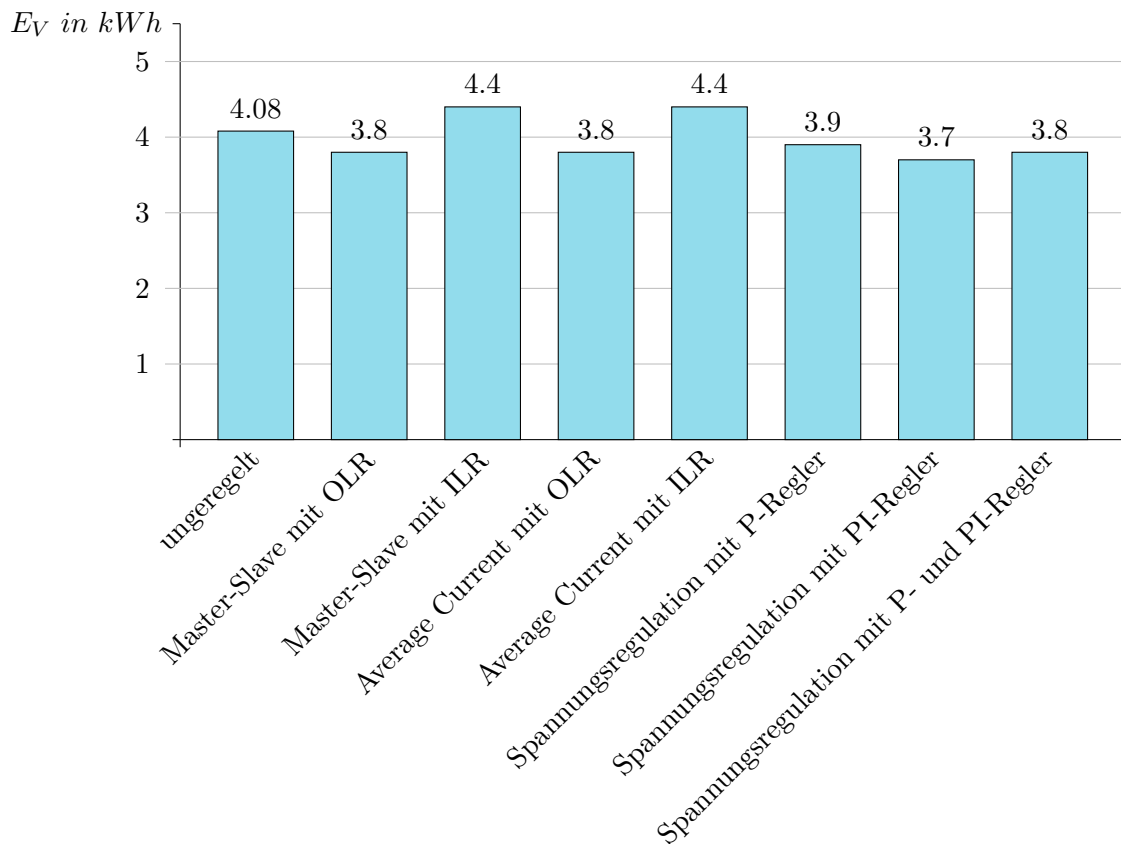


Abbildung 4.11: Parallele Erzeuger: Vergleich der aufsummierten Verluste des Tages

4.2 Niederspannungsnetz

In diesem Kapitel werden Strategien entwickelt, um das Niederspannungsverteilstromnetz aus Kapitel 3.2 unter verschiedenen Gesichtspunkten zu regeln. Zunächst werden Strategien entwickelt, um die Spannungen im Netz so gut wie möglich auf Nennspannung von 400 Volt zu halten. Danach wird die Frage geklärt, wie das Netz so geregelt werden kann, dass möglichst wenig Energie mit dem übergeordneten Netz ausgetauscht wird.

Simuliert wird in den folgenden Beispielen immer ein Tag. So kann noch ein Überblick über das komplexe, dynamische Verhalten des Netzes bewahrt werden. Der Tag, der simuliert wird ist der 194. Tag des Jahres, der dem 13. Juli entspricht (kein Schaltjahr). An diesem Tag produziert die Photovoltaikanlage viel elektrische Energie.

Da die Erzeuger geografisch weit entfernt und viele Verbraucher zwischen ihnen angeschlossen sind, ist es hier nicht notwendig, die Ströme zwischen den Erzeugern zu koordinieren. Deswegen wird eine reine Spannungsregulation verwendet, die keine Kommunikation zwischen den Erzeugern benötigen. Das heißt nicht, dass generell keine Kommunikation im Netz stattfindet. Die Spannungen von speziellen oder allen Netzknoten werden in den meisten Strategien kommuniziert.

Eine unregelmäßige Betrachtung des Netzes hat wenig Sinn, da die Haushalte ihr Lastprofil fahren und eine Regelung zwingend notwendig ist. Deswegen wird zunächst das Netz mit einer einfachen Voltage Droop Spannungsregelung ohne spezielle Regelstrategien betrachtet. Als Regler werden PI-Regler verwendet. Anders als bei der Simulation der parallelen Erzeuger sind hier mehrere PI-Regler kein Problem, da zwischen den Erzeugern viele Verbraucher angeschlossen und diese somit nicht parallel geschaltet sind. Die Ergebnisse dieser Simulation werden als Referenz für die entwickelten Regelstrategien verwendet, da eine kommunikationslose, reine Spannungsregelung als einfachste Regelmethode gilt.

Die verwendeten Regelparameter sind in Tabelle 4.4 aufgelistet.

	K	T
PI-Regler	$0.1 \Omega^{-1}$	$2 s$

Tabelle 4.4: Parameter der Regler der Droop Regelungsverfahren

Die simulierten Leistungsverläufe sind in Abbildung 4.12 dargestellt.

Es ist gut ersichtlich, wie während der Mittagszeit, wenn am meisten Sonne vorhanden ist, die Photovoltaikanlage einen großen Teil des Gesamtbedarfs deckt. Der Erzeuger K7 neben der PV-Anlage schaltet sich in dieser Zeit komplett ab. Die Leistung am Bilanzknoten und die produzierte Leistung des Erzeugers am Knotenpunkt 11 wird in diesem Zeitraum ebenfalls reduziert. Wenn wenig oder keine Sonnenenergie mehr gewonnen wird, aktiviert sich der Erzeuger K7 um den Energiebedarf zu decken.

Die Spannungsverläufe sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Die Spannung an der Photovoltaikanlage erreicht bei Spitzenproduktion etwas unter 408 Volt. Da sie direkt neben dem Erzeuger K7 angeschlossen ist, erhöht sich auch dessen Anschlussspannung auf 404 Volt. Im normalen Betrieb verringert der Erzeuger K7 seine Leistungsproduktion, wenn seine Anschlussspannung 400 Volt überschreitet. Erst wenn seine Produktion bei Null angelangt

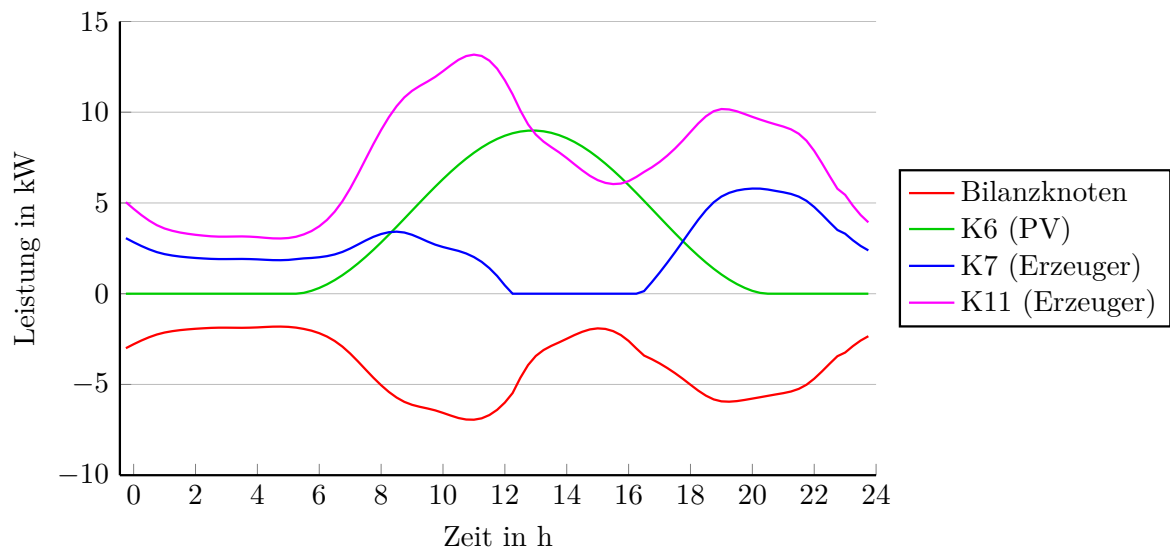


Abbildung 4.12: Niederspannungsnetz: Leistungsverläufe bei Spannungsregulation mit Voltage Droop Regelung

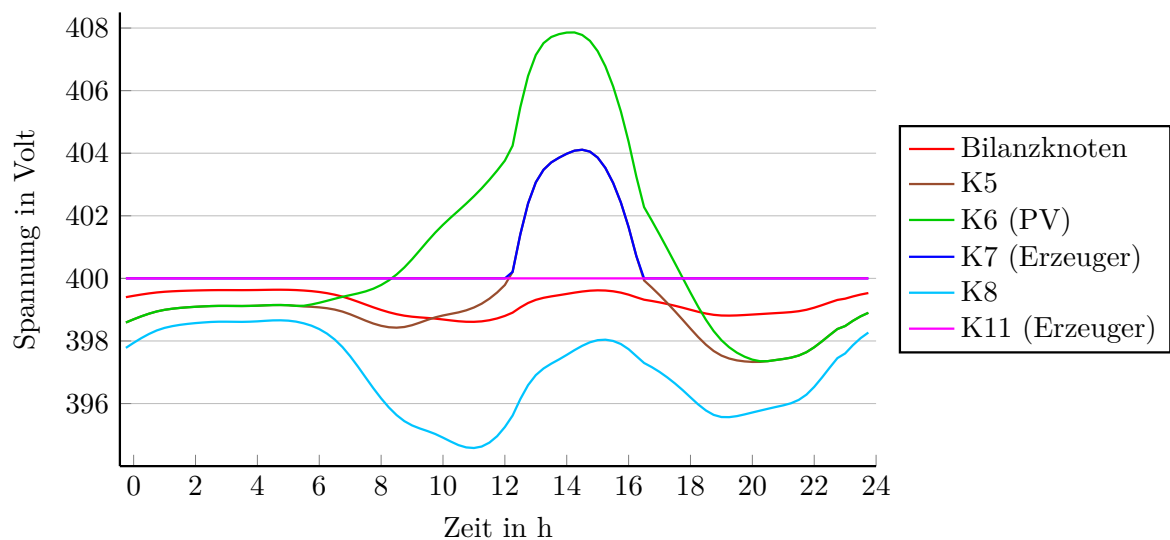


Abbildung 4.13: Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei Spannungsregulation mit Voltage Droop Regelung

ist, verliert er seine Regelbarkeit und die Spannung erhöht sich an seinem Knotenpunkt. Das ist zwischen den Stunden 12 und 17 der Fall, an denen die PV-Anlage maximale Leistungsproduktion aufweist. Die Anhebung des Spannungsniveaus der Photovoltaikanlage wirkt sich bis auf den Bilanzknoten und den anderen Netzzweig aus, was der Grund dafür ist, warum die Leistungsproduktion des Erzeugers 11 und des Bilanzknotens in diesem Zeitraum reduziert wird. Die Spannung am Erzeuger K11 bleibt den ganzen Tag über auf 400 Volt.

Die geringste Spannung im System liegt am Verbraucher K8 an. Diese fällt bis auf 395.4 Volt ab. Das ist eine Abweichung von 1,15%. Die größte Spannung an einem Verbraucher

liegt an Verbraucher K5 an, der Nahe der PV-Anlage angeschlossen ist. Seine Spannung ist im Graphen nicht eingetragen, da sie beinahe identisch mit der des Erzeuger K7 ist. Somit lässt sich zusammenfassen, dass sich die Spannungen der Verbraucher im System zwischen der von K7 und der von K5 bewegen. Das heißt, sie liegen in einem Bereich von 395.4 Volt bis 404.1 Volt, das entspricht eine Abweichung von der Nennspannung von -4.6 Volt bis +4.1 Volt. Es gibt jedoch, wie schon im Verteilnetz mit parallelen Erzeugern erwähnt, noch keine Normen für maximal zulässige Spannungsabweichungen. Deswegen lässt sich schwer eine Aussage darüber treffen, ob dieser Wert erlaubt ist.

Der maximale Strom, der die Leitungen belastet, ist relativ gering mit nur 22.1 Ampe-re. Das ist weit unter dem erlaubten Wert von 185 Ampere[14]. Die Verluste bei dieser einfachen Regelmethode betragen, über den Tag gesehen, 3.09 kWh.

4.2.1 Strategien zur Spannungsregulation

Es ist wichtig, die Spannungen an den Verbrauchern so gut wie möglich auf Nennspannung zu halten. Nur so kann ein ordnungsgemäßer Betrieb der Verbraucher gewährleistet werden. Somit ist die Frage nach einer optimalen Spannungsregulation gerechtfertigt und wird in diesem Abschnitt untersucht.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierfür zwei Strategien entwickelt:

- 1) Die Optimierung erfolgt durch Erhöhung oder Verringerung der Referenzspannung der Regler. Hierfür sind Kenntnisse über das Netz und vorangehende Simulationen notwendig.
- 2) Die Regelung erfolgt, indem nicht auf die Spannung am Reglerknoten, sondern auf eine virtuelle Spannung geregelt wird. Diese Spannung wird nach verschiedenen Kriterien berechnet. Dafür muss das Netz in Regelcluster aufgeteilt werden. Jeder Erzeuger regelt die Spannungen in seinem Cluster nach einer bestimmten Vorschrift.

Diese beiden Strategien werden im Folgenden erläutert.

Strategie 1: Ändern der Referenzspannung der Regler

Die Erhöhung der Referenzspannung ist eine einfache Möglichkeit, um die Spannungsqualität an den Verbrauchern zu verbessern, ohne zusätzliche Kommunikation beziehungsweise Sensoren zu benötigen.

Die Idee ist, die Spannungsreferenz der Regler auf 401.5 Volt zu erhöhen, sodass die Spannung an den regelbaren Erzeugern konstant diesen Wert annimmt. Die Verbraucher sollten so auch eine Spannungserhöhung erfahren, die ihre Spannungen um die Nennspannung von 400 Volt verteilt. Die beiden Erzeuger kommunizieren dabei nicht miteinander.

In Abbildung 4.14 sind die Spannungsverläufe aus der Simulation bei einer Referenzspannung von 401.5 Volt dargestellt. Es wurden nur jene Knotenspannungen dargestellt, die am weitesten von der Nennspannung abweichen.

Die Spannungen an den Erzeugern K7 und K11 bleiben konstant auf 401.5 Volt. Nur zwischen den Stunden 12 und 17, bei viel Photovoltaik-Produktion, kommt es zu einer Spannungserhöhung von Erzeuger K7, da er keine Leistung mehr erzeugt und seine Regelbarkeit

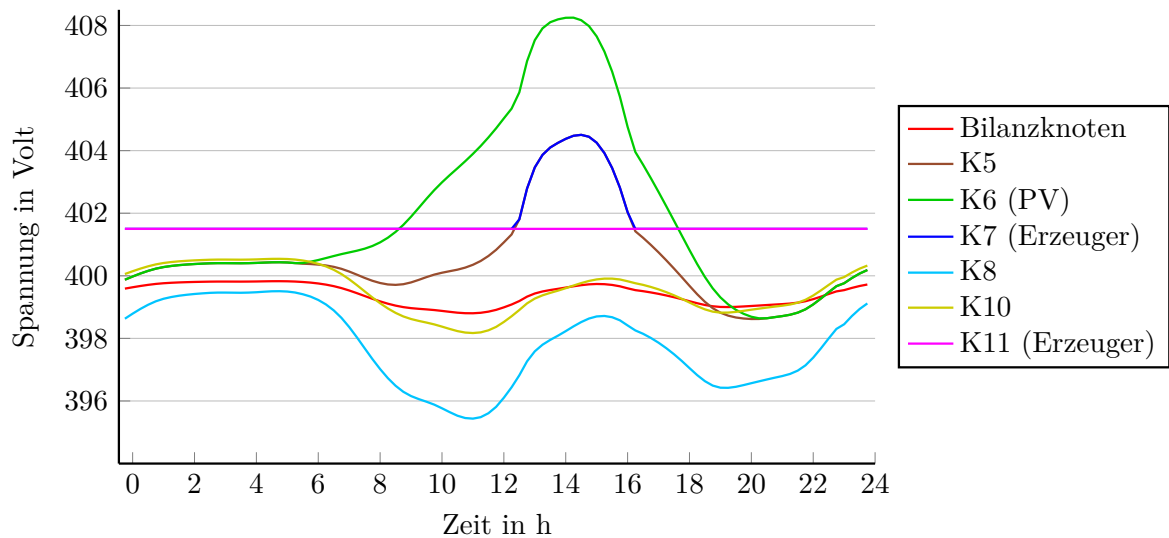


Abbildung 4.14: Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei Spannungsregulation mit Referenzspannungserhöhung von 1.5 Volt

verliert. Die Spannungsniveaus an den Verbrauchern liegen zwischen 395.7 Volt und 404.5 Volt. Das Spannungsband hat sich somit um ca 0.3 Volt verschoben. Die Abweichung von der Nennspannung liegt nun bei -4.3 bis +4.5 Volt. Die maximale Abweichung von der Nennspannung hat sich somit, abgesehen von der Spannung an Knoten K6, um 0.3 Volt gebessert.

Wenn die Verbraucher am Knoten K6 nicht berücksichtigt werden, da deren Spannungsüberhöhung durch den Verlust der Regelbarkeit bei viel PV-Produktion zurückzuführen ist, so wird ein Spannungsband zwischen K8 und K10 mit 395.7 Volt bis 400.5 Volt erreicht. Das entspricht einer Abweichung von der Nennspannung von -4.3 bis 0.5 Volt.

Eine weitere Anhebung der Referenzspannung würde zu schlechteren Ergebnissen führen, da es dadurch zu stärkeren Spannungsüberhöhungen im System kommt.

Um die Spannungsniveaus anzuheben muss die Leistungsproduktion erhöht werden. Dadurch vergrößert sich auch der Lastfluss und der erzeugte Strom, was die Verluste auf den Leitungen, über den Tag gesehen, auf 3.23 kWh erhöht. Die maximal auftretenden Ströme haben sich nicht stark geändert mit 22.08 Ampere.

Diese Regelstrategie kann komplett ohne Kommunikation durchgeführt werden. Dafür müssen die möglichen, auftretenden Lasten im Netz im Vorhinein bekannt sein. Mit den Ergebnissen der Lastflusssimulation kann die Referenzspannung eingestellt werden.

Die Referenzspannung kann theoretisch auch zur Laufzeit eingestellt werden, um die Spannungsregulierung weiter zu verbessern. Das benötigt eine robuste Reglertechnologie, damit das Netz stabil bleibt, da sowohl Soll-Spannung als auch Ist-Spannung des Reglers in Echtzeit geändert wird. In der folgenden Strategie wird ein ähnlicher Ansatz gewählt, bei dem jedoch die Soll-Spannung nicht geändert wird.

Strategie 2: Regelung mit Regel-Cluster

Bei dieser Regelstrategie wird ein virtueller Knoten im Netz erzeugt, an dem die Spannung auf Referenzspannung geregelt werden soll. Dafür ist intensive Kommunikation notwendig. Die Kommunikation findet dabei nicht zwischen den Erzeugern statt, sondern die Spannungsniveaus an jedem Knoten im Netz werden gemessen und an eine zentrale Steuereinheit gesendet.

Zunächst wird das Netz in Teilbereiche, die Cluster, gegliedert. Einem Cluster werden beliebig viele Regler zugewiesen. Diese können, müssen aber nicht zur Lastaufteilung untereinander kommunizieren. Außerdem können sich die Cluster auch überschneiden, das heißt Knotenpunkte des Netzes werden in mehreren Clustern referenziert. Einem Cluster wird durch bestimmte Kriterien ein virtuelles Spannungsniveau, folgend die Cluster-Spannung genannt, zugeordnet. Diese Spannung wird über bestimmte Kriterien aus den gemessenen Spannungen innerhalb des Clusters berechnet. Alle Regler, die diesem Cluster zugeordnet sind, versuchen die Cluster Spannung auf die Referenzspannung zu regeln.

In dem hier untersuchten Netz gibt es zwei Zweige mit jeweils einem regelbaren Erzeuger. Deswegen wird das Netz in zwei Cluster unterteilt. Dies ist in Abbildung 4.15 dargestellt.

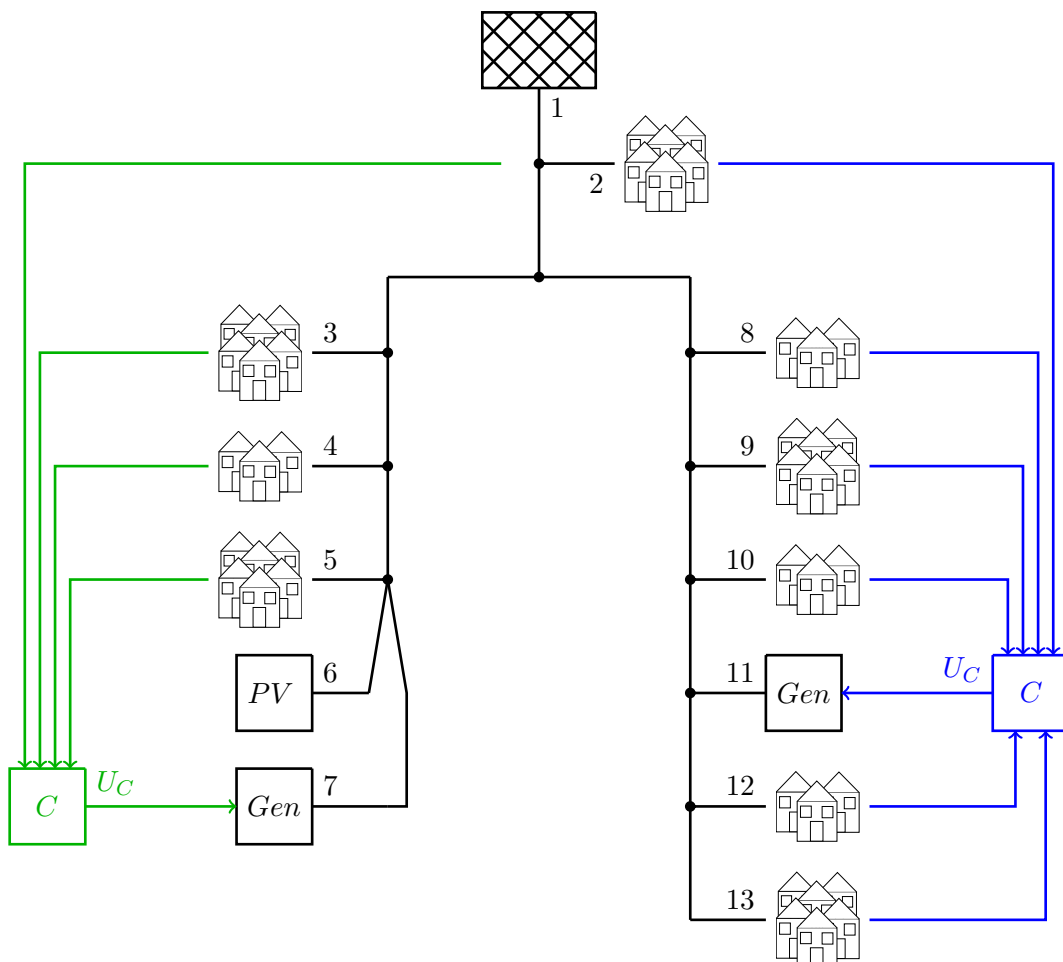


Abbildung 4.15: Aufteilung des Niederspannungsnetzes in Cluster

Die Spannungen an den Knotenpunkten werden an einen zentralen Regler übergeben. Dieser Regler ist durch den Block *C* dargestellt und bewertet die Spannungen nach einem bestimmten Kriterium. Daraus berechnet er die Referenzspannung, die an die Regler des Clusters übergeben wird.

Die Kriterien zur Bestimmung der Cluster-Spannung sind vielfältig. In dieser Arbeit wurden die Folgenden verwendet:

- 1) Minimum: Die niedrigste Spannung der Knoten im Cluster wird als Cluster-Spannung festgelegt. Die Regler versuchen diese auf Nennspannung zu bringen.
- 2) Mittelwert: Der Mittelwert aller Spannungen im Cluster wird als Cluster-Spannung festgelegt. Alle gemessenen Spannungen werden gleich gewichtet. Die Regler versuchen die Cluster-Spannung auf Nennspannung zu bringen.

Für die optimale Spannungsregulation wird als Kriterium der Berechnung der Cluster-Spannung die Mittelwertmethode verwendet. Das sollte zu einer gleichmäßigen Aufteilung der Spannungen in den Netzclustern um die Nennspannung führen.

Die Simulationsergebnisse der Spannungsverläufe sind in Abbildung 4.16 dargestellt. Um die Übersicht zu wahren, werden nur jene Spannungen, die am weitesten von der Nennspannung abweichen, abgebildet.

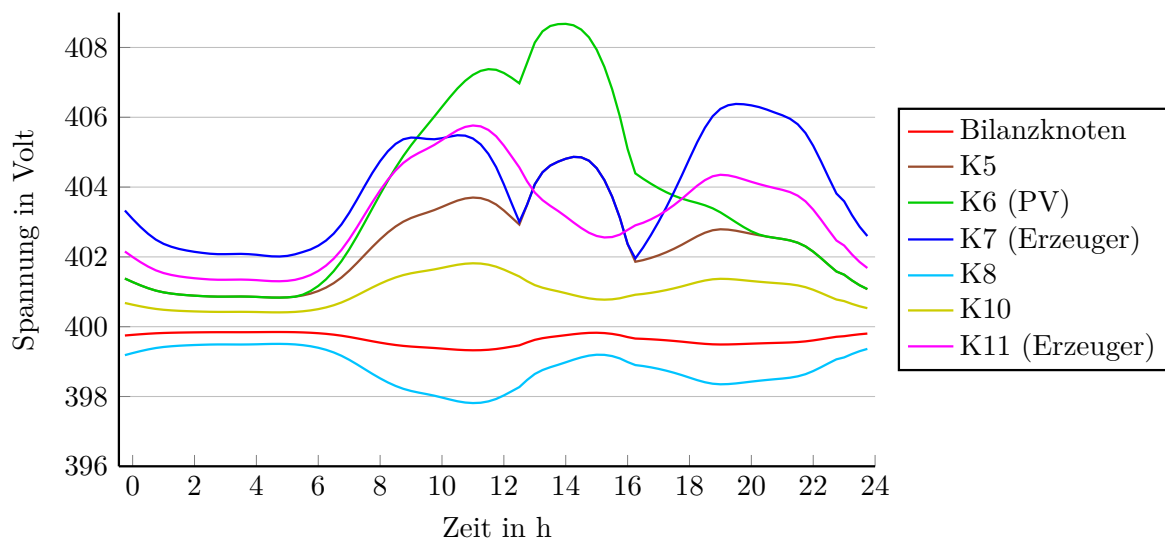


Abbildung 4.16: Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei Spannungsregulation mit Regel-Cluster

Es ist gut ersichtlich, wie sich mit der hier verwendeten Mittelwertmethode die Spannungen der Verbraucher um die Nennspannung von 400 Volt verteilen. Die Spannung von Verbraucher K5 ist ähnlich der Spannung von K7 und deswegen nicht abgebildet. Dadurch liegen alle Verbraucherspannungen in einem Spannungsband von 398 Volt bis 404.8 Volt. Wenn der Knoten K5 nicht berücksichtigt wird, da seine Spannungsüberhöhung durch die starke PV-Erzeugung verursacht wird, dann wird ein Spannungsband der Verbraucher zwischen

K8 und K10 von 398 bis 401.4 Volt erreicht. Die Abweichung von der Nennspannung beträgt somit nur mehr maximal 2 Volt, das sind 0.5% der Nennspannung.

Diese gute Spannungsregulation wird allerdings durch höhere Leistungsproduktion erkauft. Die Leistungsverläufe an den Knotenpunkten sind in Abbildung 4.17 dargestellt.

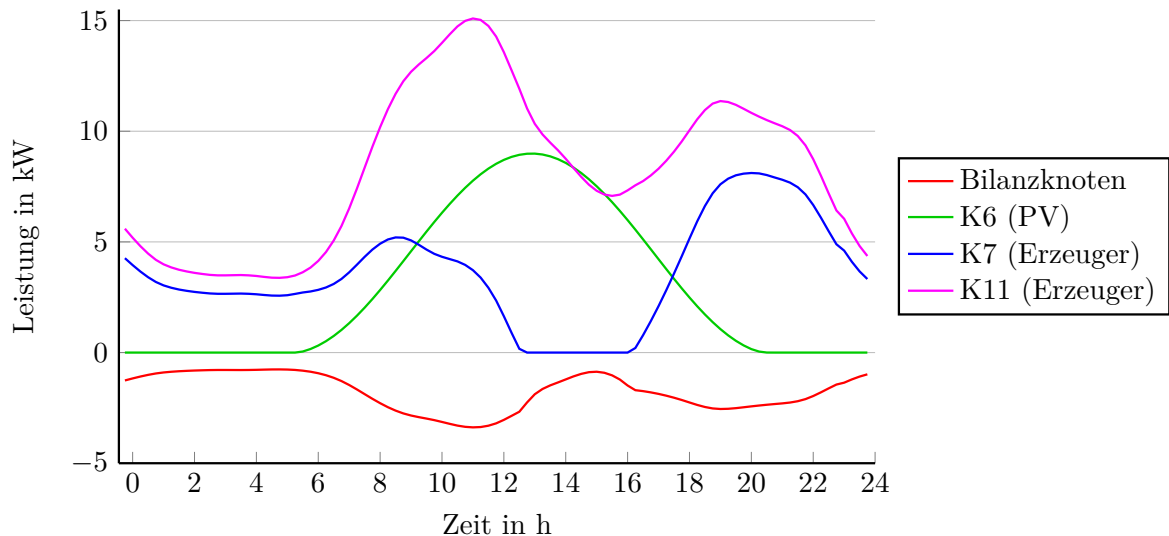


Abbildung 4.17: Niederspannungsnetz: Leistungsverläufe bei Spannungsregulation mit Regel-Cluster

Durch die erhöhten Leistungen steigen auch die Leitungsverluste auf 3.74 kWh an dem betrachteten Tag. Die maximalen Ströme liegen bei unproblematischen 22.04 Ampere.

Mit dieser Regelstrategie werden die Spannungen gut reguliert. Nur in den Zeiträumen, in denen viel Energie durch die PV-Anlage erzeugt wird, verliert das System seine Regelbarkeit und die Spannung erhöht sich. Um das zu verhindern, kann entweder die Produktion der PV-Anlage reduziert oder ein Speicher implementieren werden. Letzteres wird im folgenden Kapitel untersucht.

Spannungsregulation mit Regel-Cluster und Speicher

Um die Spannungsqualität weiter zu heben, wird ein Speicher direkt an die PV-Anlage angeschlossen. Dieser Speicher besteht aus einem Zusammenschluss von Bleiakkumulatoren. Diese haben im Mittel eine Selbstentladung von ca 3% bis 20% [20] pro Monat. Das bedeutet, dass nach einem Monat bis zu 20% der gespeicherten Energie verloren geht. In dieser Arbeit wurde der Bleiakkumulator mit einer mittleren Selbstentladung von 7% im Monat modelliert. Auf eine Stunde umgerechnet ergibt das ca. 0.01% Selbstentladungsverluste pro Stunde. Lade- und Entladewirkungsgrade wurden in dieser Simulation nicht berücksichtigt und verlustfrei angenommen.

Die verwendeten Leistungsdaten für den Speicher sind in Tabelle 4.5 aufgelistet.

Der Speicher soll die Regelung dann übernehmen, wenn viel Energie durch die PV-Anlage erzeugt wird und der Generator K7 seine Leistung auf Null heruntergefahren hat. Außerdem soll der Speicher seine Energie immer vor dem Generator bereitstellen.

P_{max}	5 kW
P_{min}	-5 kW
E_{max}	25 kWh

Tabelle 4.5: Niederspannungsnetz: Leistungsdaten des Speichers beim Niederspannungsverteilstromnetz

Um das zu realisieren, wurden folgende Bedingungen einprogrammiert:

- Der Speicher soll sich nur dann aufladen, wenn die PV-Anlage Leistung produziert und der Generator K7 abgeschaltet wurde. So soll verhindert werden, dass der Speicher die produzierte Leistung vom Generator speichert.
- Die Referenzspannung des Speichers wurde auf 400.5 Volt gesetzt, die vom Generator K7 auf 400 Volt. So wird erreicht, dass der Speicher immer vor dem Generator seine Leistung ins Netz einspeist.

Für die Regelung des Speichers werden andere Regelparameter gewählt. Diese sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

	K	T
PI-Regler	$0.2 \Omega^{-1}$	2 s

Tabelle 4.6: Niederspannungsnetz: Regelparameter des Speichers

Der Proportionalfaktor wurde verdoppelt, damit der Speicher schneller arbeitet und besser seine Leistung anpassen kann. Die restlichen Simulationseinstellungen sind dieselben wie bei der Regelstrategie mit Regel-Cluster.

Die Spannungsverläufe der Simulation sind in Abbildung 4.18 dargestellt.

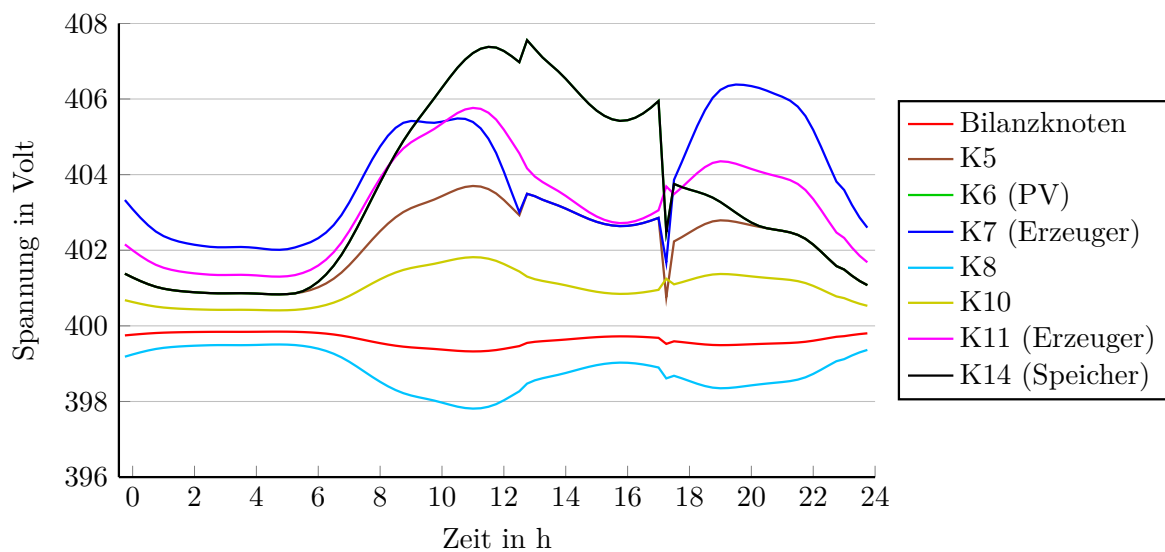


Abbildung 4.18: Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei optimierter Spannungsregulation mit Regelcluster und Speicher

Im Vergleich zu Abbildung 4.16 ist erkennbar, dass die Spannungsverläufe nahezu identisch sind. Die Spannungen der PV-Anlage K6 und des Speichers K14 sind identisch und liegen deswegen in der Grafik übereinander.

Während ohne dem Speicher die Spannung am Knoten 7 in den sonnenreichen Stunden über 404 Volt steigt, erreicht sie hier trotz der großen Produktion der PV-Anlage nur knapp über 403 Volt. Dieser Spannungseinbruch ist dem Speicher, der sich in diesem Zeitraum aktiviert, zu verdanken. Das ist auch in den Leistungsverläufen in Abbildung 4.19 zu sehen. In den Stunden 13 bis 16 schaltet der Generator K7 seine Leistungsproduktion ab. In diesem Zeitraum aktiviert sich der Speicher und lädt sich auf. Das ist an der negativen Leistung zu erkennen, da er sich in diesem Zeitraum wie ein Verbraucher verhält. Nachdem die sonnenreiche Phase zu Ende ist, entlädt sich zuerst der Speicher, bevor der Generator K7 wieder aktiviert wird. Der Speicher dient hier also als kurzfristige Spannungsstabilisierung.

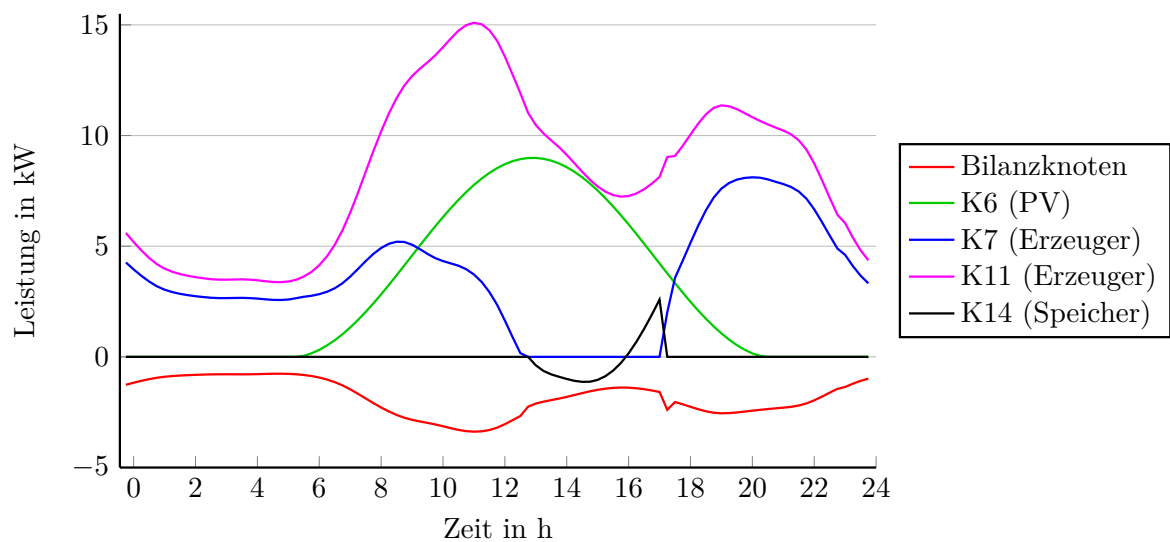


Abbildung 4.19: Niederspannungsnetz: Leistungsverläufe bei optimierter Spannungsregulation mit Regelcluster und Speicher

Die Leitungsverluste reduzieren sich ein wenig auf 3.7 kWh an diesem Tag.

4.2.2 Strategien zum Vermeiden von Energietransporten mit dem übergeordneten Netz

Eine weitere interessante Frage ist, wie das Netz so geregelt werden kann, dass keine oder nur sehr wenig Energie vom übergeordneten Netz benötigt beziehungsweise, dass keine Energie ins übergeordnete Netz zurückgespeist wird. Das würde bedeuten, dass die produzierte Leistung im Netz auch in diesem verbraucht wird.

Prinzipiell kann dieses Problem so gelöst werden, dass der erste Knoten nach dem Bilanzknoten auf Nennspannung gehalten wird. Solange dieser Knoten auf Nennspannung ist, gibt es keine Differenzspannung zum Bilanzknoten und somit keinen Strom- und Leistungsfluss.

In diesem Niederspannungsnetz müsste Knoten 2 auf Nennspannung gehalten werden. Dafür muss dessen Spannung an die Erzeuger kommuniziert werden.

Um Knotenpunkt 2 auf Nennspannung zu halten, wurden zwei Regelstrategien entwickelt:

- 1) Beide Erzeuger regeln die Knotenspannung von Knotenpunkt 2 auf Nennspannung.
- 2) Der Erzeuger K7 regelt die Spannung an Knotenpunkt 2, Erzeuger K11 regelt nach der bereits bei der Spannungsregulation vorgestellten Cluster-Methode den rechten Netzzweig.

Bei jeder dieser Methoden wird erwartet, dass die Spannungsniveaus an den Verbrauchern innerhalb des Netzes erhöht werden. Es soll untersucht werden, inwiefern dies problematisch sein kann.

Strategie 1

Die beiden Erzeuger werden so eingestellt, dass sie unabhängig voneinander die Spannung an Knotenpunkt 2 regeln. Die einzige Kommunikation, die hier stattfinden muss, ist die Übertragung der Spannung von Knoten 2 an die Erzeuger. Die Leistungsverläufe der Simulationsergebnisse sind in Abbildung 4.20 dargestellt.

Man erkennt, dass der Leistungsverlauf am Bilanzknoten konstant Null ist. Das bedeutet, dass weder Energie in das überliegende Netz transportiert, noch vom überliegende Netz geliefert wird. Die gesamte erzeugte Leistung im Niederspannungsnetz wird in demselben auch verbraucht. Die Leistung der beiden Erzeuger sind exakt gleich. Der Grund dafür ist, dass deren Leistungsproduktion ausschließlich von der Spannung am Knotenpunkt 2 abhängt. Da beide denselben Knotenpunkt regeln und dieselben Regelparameter verwenden, erzeugen sie die gleiche Leistung.

Das bedeutet, dass der Erzeuger am Knotenpunkt 7, der neben der PV-Anlage angeschlossen ist, eine Leistung produziert, die unabhängig von der Produktion der Photovoltaikanlage ist. Dadurch kommt es zu einer Spannungsüberhöhung von bis zu 420 Volt an diesem Knotenpunkt, wie in Abbildung 4.21 ersichtlich ist. Das entspricht einer Spannungsüberhöhung von 5%.

Da sich die Leistungen der PV-Anlage und des Erzeugers K7 addieren, kommt es im linken Netzzweig zu einem großen Lastfluss. Das führt zu hohen Leitungsverlusten. Der maximale

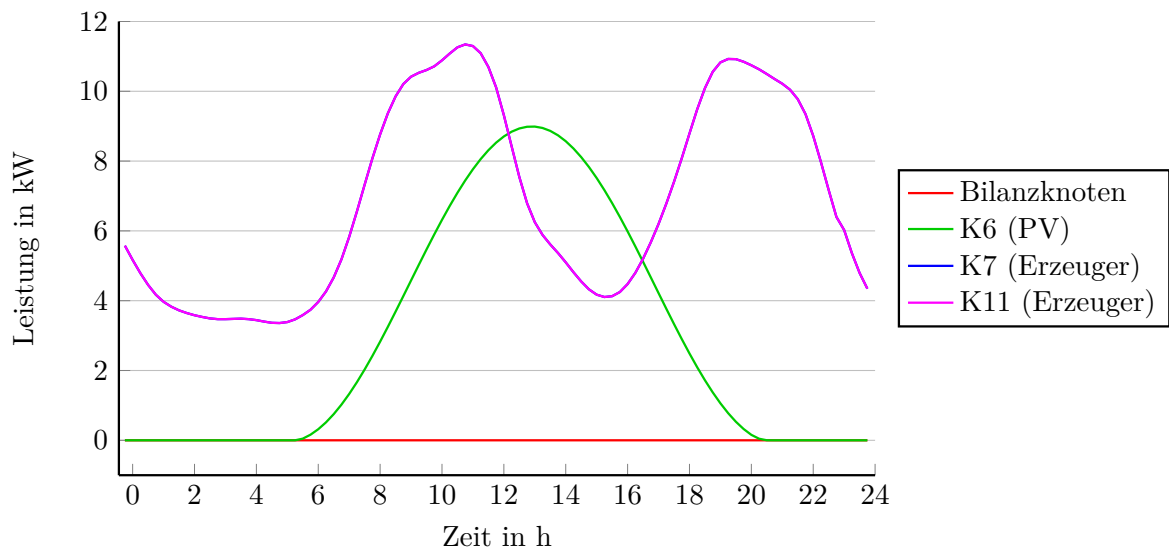


Abbildung 4.20: Vermeidung des Energietransportes im Bilanzknoten mit der ersten Regelstrategie - Leistungsverlauf

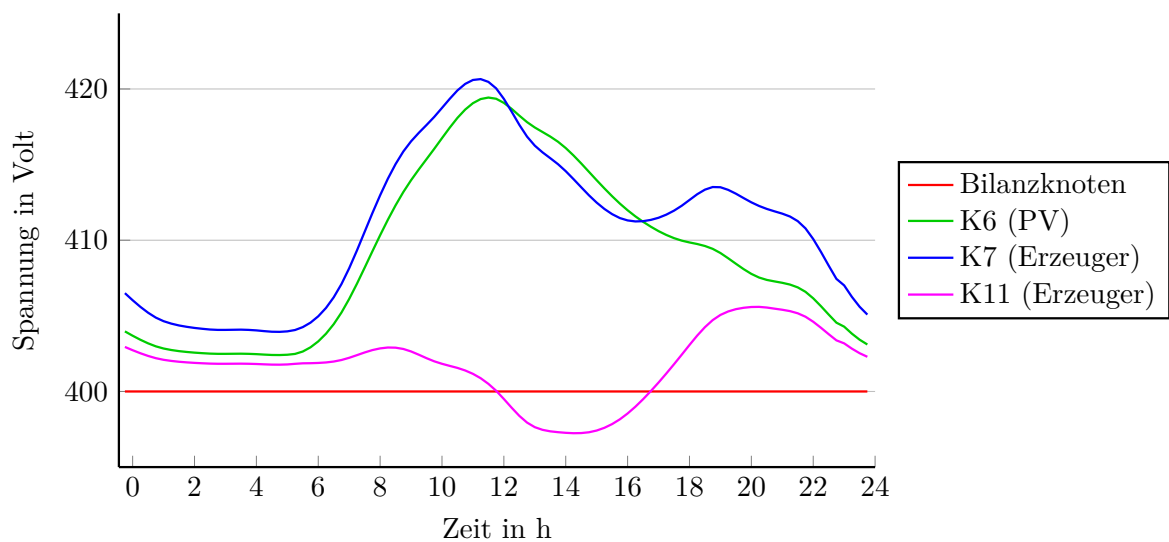


Abbildung 4.21: Vermeidung des Energietransportes im Bilanzknoten mit der ersten Regelstrategie - Spannungsverläufe

Strom im System ist thermisch unbedenklich mit 35.46 Ampere, jedoch höher als bei jeder anderen bisher untersuchten Regelung in diesem Netz. Die maximale Verlustleistung über den Tag betrachtet beträgt mit 6.9 kWh doppelt so viel wie bei den Strategien für Spannungsregulation. Der Grund dafür ist, dass die komplette benötigte Leistung von den Erzeugern im Netz geliefert werden muss und somit viel Leistung über große Distanzen transportiert wird.

Um diese hohen Verluste und die Spannungsüberhöhung zu reduzieren, müssen die Regelmethoden der beiden Erzeuger besser auf die Aufgabe abgestimmt werden. Dafür muss auch das Maß an Kommunikation erhöht werden. Das wird mit der nächsten Strategie untersucht.

Strategie 2

Bei dieser Regelstrategie werden die beiden Erzeuger unterschiedlich geregelt. Der Erzeuger K7 ist dafür verantwortlich, dass die Spannung an Knotenpunkt 2 auf Nennspannung gehalten wird. Das wurde deswegen so gewählt, da dieser Erzeuger weniger Haushalte versorgen muss und geografisch näher an K2 steht. Deswegen muss er die Regelleistung über geringe Distanzen schicken und muss generell mit weniger Leistung regeln. Die Vermutung ist, dass so die Übertragungsverluste verringert werden. Zudem bekommt er noch Unterstützung von der PV-Anlage.

Der Erzeuger K7 wird mit einfacher Voltage Droop Spannungsregulation mit der Knotenspannung von K2 als Referenzspannung betrieben.

Der Erzeuger K11 wird mit der Cluster-Methode geregelt, wobei als Cluster, ähnlich wie bei dem Beispiel der Spannungsregulation (Abbildung 4.16), der komplette rechte Netzzweig von Knoten 8 bis Knoten 13 verwendet wird. Knoten 2 wird dieses mal nicht eingebunden, da dieser vom Erzeuger K7 geregelt wird. Als Methode zur Bestimmung der Cluster Spannung wird die Minimummethode und die Mittelwertmethode verwendet. Bei der Minimummethode versucht der Regler stets die kleinste Spannung in seinem Cluster auf Nennspannung zu regeln. Bei der Mittelwertmethode wird hingegen der Mittelwert aller Spannungen auf Nennspannung geregelt. Um diese Regelstrategie verfolgen zu können, müssen demnach die Spannung von Knoten 8 bis 13, sowie am Knoten 2 gemessen und an die Reglereinheiten übergeben werden.

Es sollen zunächst nur die Verluste dieser beiden Methoden verglichen werden. Die Mittelwertmethode hat Leitungsverluste von 6.18 kWh. Das ist um circa 10.5% weniger als bei der ersten Regelstrategie. Bei der Minimummethode betragen die Verluste 5.2 kWh, das sind fast 25% weniger als bei der ersten Regelstrategie. Da diese Methode die besseren Werte liefert, soll sie nun genauer untersucht werden.

Die Ergebnisse der Simulation mit der Minimummethode sind in Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 dargestellt.

Durch die Minimummethode wird die kleinste Spannung im rechten Netzzweig auf Nennspannung von 400 Volt geregelt. Dadurch ist die Spannung im rechten Zweig am Erzeuger K11 am höchsten, die dann bei jedem Verbraucher ein wenig abfällt. Die kleinste Spannung tritt am Knoten 8 auf. Die größte Spannung an einem Verbraucher ist im rechten Zweig an Knoten 12 zu finden. Dort erreichen sie bis zu 405 Volt.

Der abfallende Spannungsverlauf im rechten Zweig resultiert in einem Lastfluss, der in Richtung des Bilanzknoten und Knoten 2 fließt. Der Erzeuger K11 regelt die Spannung am Knoten 8 auf Nennspannung. Da Knoten 2 vom Erzeuger K7 auf Nennspannung gehalten wird, bedeutet das, dass zwischen dem Knoten 2 und Knoten 8 kein Leistungsaustausch stattfindet.

Die maximale auftretende Spannung im linken Netzzweig wird am Knoten 5 erreicht und beträgt 411 Volt. Das entspricht einer Abweichung von 2.75% von der Nennspannung.

Im Leistungsdiagramm ist ersichtlich, dass die Leistung des Erzeugers K7 weit geringer ist als bei der ersten Regelstrategie. Das führt zu den vorher genannten geringeren Verlusten auf der Leitung. Der maximal auftretende Strom verringert sich ebenfalls auf 26.2 Ampere.

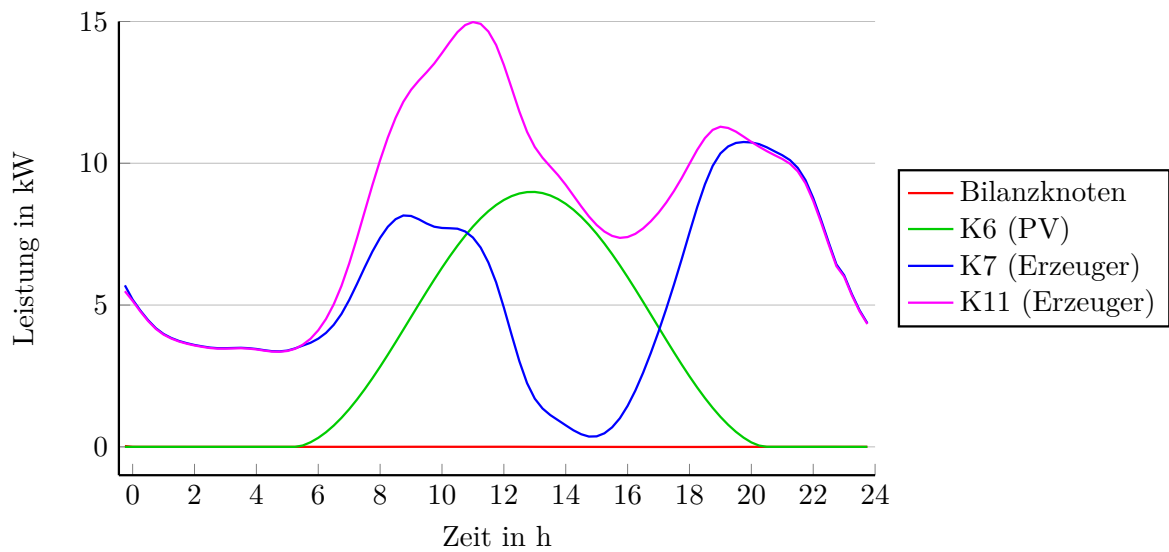


Abbildung 4.22: Niederspannungsnetz: Leistungsverläufe bei hohem Eigenverbrauch mit der Clustermethode

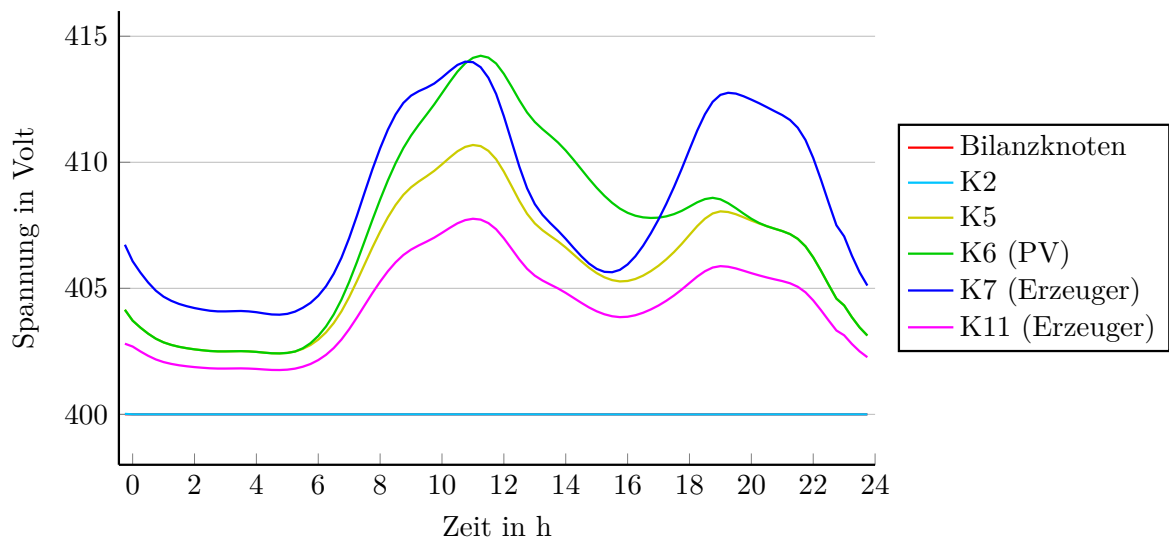


Abbildung 4.23: Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei hohem Eigenverbrauch mit der Clustermethode

Bei Regelung auf hohem Eigenverbrauch erhöht sich das Spannungsniveau im Netz. Diese Überhöhung liegt bei den Verbrauchern unter 3% der Nennspannung. Ist das zu hoch, müssen die Erzeuger bei Überschreiten des kritischen Spannungsniveaus ihre Produktion verringern oder konstant halten. Das führt dazu, dass diese Erzeuger nicht mehr regelbar sind. In den obigen Simulationen wurde keine Maximalspannung vorgeschrieben, da zum einen im Gleichstromnetz keine Spannungsnormen existieren, und zum anderen das Hauptaugenmerk auf den Regelstrategien liegt. Dafür muss die Regelbarkeit der Erzeuger aber gegeben sein.

4.2.3 Betrachtung der Verluste

In Abbildung 4.24 sind die Verluste der Regelstrategie zum Vergleich dargestellt. Die ersten vier Balken sind die Verluste bei der Regelung mit Schwerpunkt auf Spannungsregulation und die letzten 2 Balken mit Schwerpunkt auf Vermeiden des Energieaustausches mit dem übergeordneten Netz.

Die geringsten Leitungsverluste treten bei der einfachen Spannungsregulation der Erzeuger an ihrem Knotenpunkt auf Nennspannung auf. Während also die Spannungen an den Verbrauchern bei dieser Regelstrategie stark abfällt, bleibt der Leistungstransport und die damit verbundenen Verluste gering.

Die höchsten Verluste entstehen bei Vermeidung von Transporten mit dem übergeordneten Netz. Das ist durch die großen Leistungstransporte über weite Strecken des Netzes zu begründen. Hier ist die intelligente Regelung mit Regel-Cluster und der Minimummethode die bevorzugte Wahl.

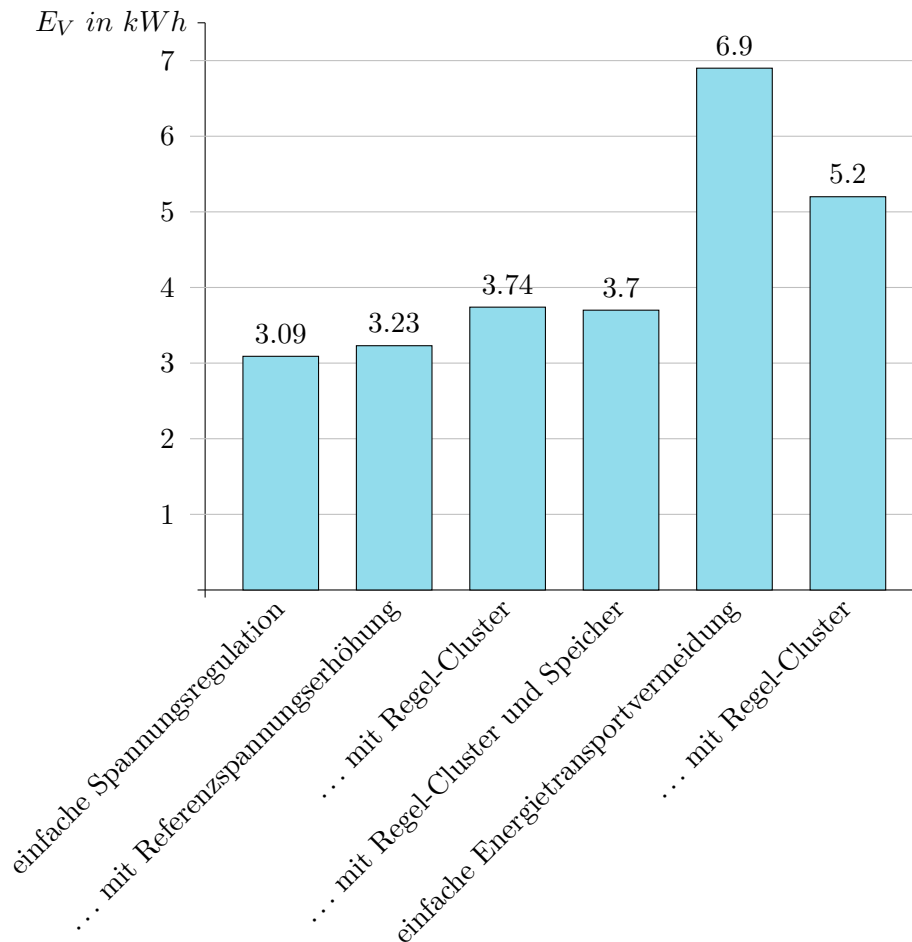


Abbildung 4.24: Niederspannungsnetz: Vergleich der aufsummierten Verluste des ausgewählten Tages

4.3 Hausnetz

In diesem Kapitel werden Strategien zur Regelung von Verbrauchern im Haushaltsnetz aus Kapitel 3.3 untersucht. Durch Anpassen der Last von verschiedenen Verbrauchern kann die Spitzenlast reduziert und das übergeordnete Netz entlastet werden. Diese Vorgehensweise wird Demand Side Management (DSM) genannt und in diesem Kapitel angewandt.

Als regelbare Verbraucher werden Kühlgeräte verwendet. Im Haushaltsnetz stehen dazu ein Kühlschrank, eine Gefriertruhe und eine Klimaanlage zur Verfügung. Diese können als Energiespeicher verwendet werden, indem bei Energieüberschuss stärker gekühlt und bei Energiedefizit die Kühlung reduziert wird.

Das Haushaltsnetz besitzt zwei Spannungsniveaus: 380 Volt für Großgeräte und 48 Volt für kleinere Verbraucher. Die Klimaanlage ist an 380 Volt angeschlossen, während der Kühlschrank und die Gefriertruhe an 48 Volt angeschlossen sind.

4.3.1 unregelter Fall

Zunächst wird der unregelte Fall untersucht. Es wird keine Lastregelung durchgeführt, die Kühlgeräte halten die Temperatur in ihrem System konstant. Der Kühlschrank und die Gefriertruhe können entweder mit Maximalleistung oder ausgeschaltet betrieben werden. Die Klimaanlage kann in diesem Modell beliebige Leistungen innerhalb ihres erlaubten Leistungsbereiches erreichen. Simuliert wird, um die Übersicht zu wahren, nur der erste Tag des Jahres.

Der Gesamtverbrauch des Haushaltes und die Lasten der drei Kühlgeräte im unregelmäßigen Fall sind in Abbildung 4.25 abgebildet.

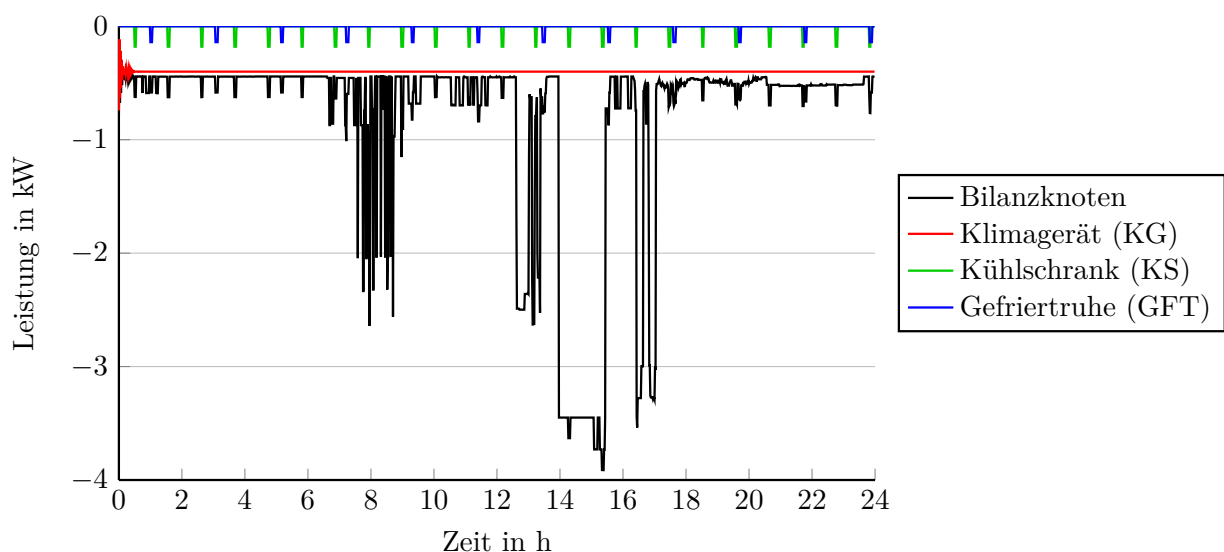


Abbildung 4.25: Leistungsverläufe des unregelmäßigen Hausnetzes

Das Klimagerät führt kontinuierlich jene Energie ab, die von außen an das System zugeführt wird. Dafür benötigt es eine Leistung von 400 Watt. Es wurde in diesem Modell eine konstante Aufwärmung des zu kühlenden Raumes hinterlegt.

Die periodisch auftretenden Spitzen entsprechen der Aktivität des Kühlschranks und der Gefriertruhe. Der größte Verbraucher ist der Elektroherd und der Backofen, die jedoch nicht reguliert werden können. Durch diese erreicht der maximale Verbrauch in Spitzenzeiten fast 4 kW.

Die Speicherung von Energie in den Gefriergeräten kann über die innere Energie des zu kühlenden Systems betrachtet werden. Die Veränderung der inneren Energie ist nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik für ein geschlossenes, nicht bewegtes System definiert durch Formel 4.1. dQ ist die Änderung der Wärme und dW die zu- oder abgeführte Arbeit[5].

$$dU = dQ + dW \quad (4.1)$$

Im Folgenden wird vereinfacht angenommen, dass sich in den betrachteten Bereichen der Kühlsysteme weder der Druck, noch das Volumen im System stark ändert. Dadurch kann $dW = 0$ gesetzt werden und die innere Energie hängt nur noch von der Wärmemenge im System ab. Diese ist proportional zur Temperatur, wodurch eine Proportionalität zwischen der inneren Energie und der Temperatur (in Kelvin) hergestellt werden kann.

Da die Kühlsysteme nicht ideal isoliert sein können, werden sie von der Umgebung erwärmt. Das heißt, dass Wärme von außen an das Kühlsystem zugeführt wird. Zur Vereinfachung wird in dieser Arbeit die Kühlgeräte als geschlossene Systeme betrachtet, das heißt es existiert keine Verschiebearbeit mit der Umgebung.

In Abbildung 4.26 ist die innere Energie der Kühlgeräte dargestellt. Sie wird relativ zu dem Sollwert im Kühlsystem angegeben. Dadurch ist es nicht erforderlich, den genauen Inhalt des Kühlsystems zu kennen. Da die innere Energie nach den obigen Überlegungen in den betrachteten Modellen annähernd proportional der Temperatur ist, ändert sich die Temperatur prozentual gleich wie die innere Energie.

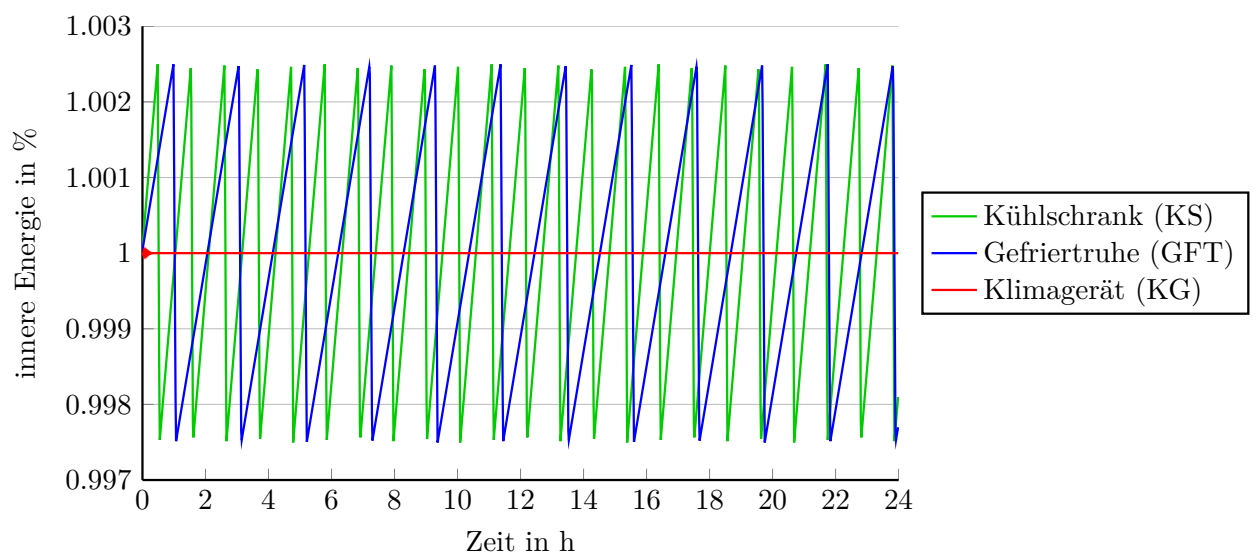


Abbildung 4.26: Energieinhalt der Kühlgeräte im unregulierten Hausnetz

An den Verläufen der inneren Energie aus Abbildung 4.26 ist sowohl beim Kühlschrank als auch der Gefriertruhe erkennbar, dass sich die Temperatur im System langsam wegen der nichtidealen Isolierung erhöht, bis die obere Temperaturgrenze erreicht wird. In dem Graphen ist die obere Temperaturgrenze als das 1.0025-fache des Sollwertes ersichtlich. Der Kühlschrank hat eine Solltemperatur von 279 K beziehungsweise 6°C . Das 1.0025-fache der Solltemperatur in Kelvin sind circa 279.7 K , das sind umgerechnet 6.7°C . Das entspricht der eingestellten Maximaltemperatur des Kühlschranks aus Tabelle 3.6. Durch das Erreichen des Maximalwertes schalten sich die Geräte ein und kühlen ihren Inhalt bis zur unteren Temperaturgrenze, bei der sie sich wieder abschalten. Dadurch wird die bei den Leistungsverläufen ersichtliche periodische Aktivität dieser Geräte erklärt. Die Temperatur des Klimaanlageansystems beträgt jedoch durch die kontinuierliche Leistungsanpassung immer den Sollwert.

Es stellt sich die Frage, wie dieses System so geregelt werden kann, dass die Spitzenlasten reduziert werden. Das wird im nächsten Kapitel untersucht.

4.3.2 Regelung mit Demand Side Management

Die Idee ist es, die Kühlgeräte so zu regeln, dass zu Zeiten mit Spitzenlast ihre Leistungen heruntergefahren werden. Bei der Klimaanlage bedeutet dies, dass sie auch komplett ausgeschaltet werden kann. Der Kühlschrank und die Gefriertruhe hingegen sollen ihren Aktivitätszyklus so weit wie möglich hinauszögern. Wenn eine gewisse Maximaltemperatur erreicht wird, soll die Regelung einsetzen und die Geräte wieder zu kühlen beginnen.

Die Regelung wird aktiviert, wenn die Gesamtlast des Haushaltes 2000 Watt überschreitet. Dieser Wert wurde hier deswegen gewählt, da diese Leistung an dem betrachteten Tag öfters erreicht wird und somit die Regelung mehrmals aktiviert werden muss.

Um die Kühlgeräte zu regeln, wird direkt in die Temperaturregelung eingegriffen. Die Regelung befindet sich also in der Steuerelektronik der Kühlgeräte und nicht in einem DC/DC Wandler. Das Klimagerät regelt seine Leistung so, dass eine bestimmte innere Energie beziehungsweise eine Temperatur des Systems erreicht wird. Das geschieht in diesem Modell kontinuierlich mit einem PI-Regler. Seine Regelparameter sind in Tabelle 4.7 eingetragen. Der Proportionalfaktor K hat hier die Einheit s^{-1} . Das ist daraus zurückzuführen, dass die Abweichung der inneren Energie vom Sollwert über den Regler in die Leistung des Gerätes umgewandelt wird und die Umrechnung zwischen Energie und Leistung über die Zeit geschieht.

Um die Leistung des Klimagerätes zu steuern, wird der Sollwert der Temperatur angepasst. Wenn die Gesamtlast des Haushaltes 2000 Watt überschreitet, so wird die Temperatursollwert heraufgesetzt. In Tabelle 4.8 sind die Temperatureinstellungen eingetragen.

	K	T
<i>PI-Regler</i>	0.5 s^{-1}	2 s

Tabelle 4.7: Parameter des Reglers für die Steuerung des Klimagerätes im Haushaltsnetz

Für den Kühlschrank und die Gefriertruhe wird ähnlich vorgegangen. Um den Aktivitäts-

zyklus dieser Geräte zu steuern, kann sowohl die Maximaltemperatur als auch die Minimaltemperatur geändert werden. In dieser Arbeit wird die Maximaltemperatur erhöht, wenn die Gesamtlast des Haushaltes 2000 Watt überschreitet. Die genauen Temperatureinstellungen für das Demand Side Management sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst.

<i>Gerät</i>	T_{Soll}	T_{Max}	T_{Min}
<i>Klimagerät</i>	$22^{\circ}C$	$28^{\circ}C$	$22^{\circ}C$
<i>Kühlschrank</i>	$6^{\circ}C$	$9^{\circ}C$	$3^{\circ}C$
<i>Gefriertruhe</i>	$-15^{\circ}C$	$-12^{\circ}C$	$-18^{\circ}C$

Tabelle 4.8: Temperatureinstellungen für das Demand Side Management im Haushaltsnetz

Die Gesamtlast des Haushaltes und die Leistungsverläufe der drei Kühlgeräte sind in Abbildung 4.27 dargestellt. Bis zur circa achten Stunden ändert sich im Vergleich mit dem unregulierten Fall nichts. Erst dann erreicht die Gesamtlast des Haushaltes 2000 Watt und die Regelung wird aktiviert. Durch die sehr kurzen Lastspitzen von nur wenigen Minuten, die vom Elektroherd ausgehen, schaltet sich das Klimagerät für nur wenige Minuten ein und aus. Die Lastspitze reduziert sich zum unregulierten Fall um 10%. Zwischen 14 Uhr und 15:30 Uhr wird in diesem Haushalt die meiste Leistung durch den Elektroherd benötigt. In diesem Zeitraum deaktiviert sich die Klimaanlage und auch der Kühlschrank und die Gefriertruhe verzögern ihren Kühlzyklus. Erst wenn die Leistungsaufnahme sinkt, aktivieren sich alle drei Kühlgeräte wieder. Das Klimagerät erhöht kurz danach seine Leistungsaufnahme, um die Temperatur im Raum auf Solltemperatur zu bringen. Der Kühlschrank ist nach dem unterbrochenen Zyklus länger aktiv, um die Temperatur in seinem inneren zu senken. Das ist in dem Leistungsverlauf nur schwer zu sehen, da er ohnehin nur sehr kurz aktiv ist. Besser zu sehen ist das im Speicherverlauf der Kühlgeräte in Abbildung 4.28.

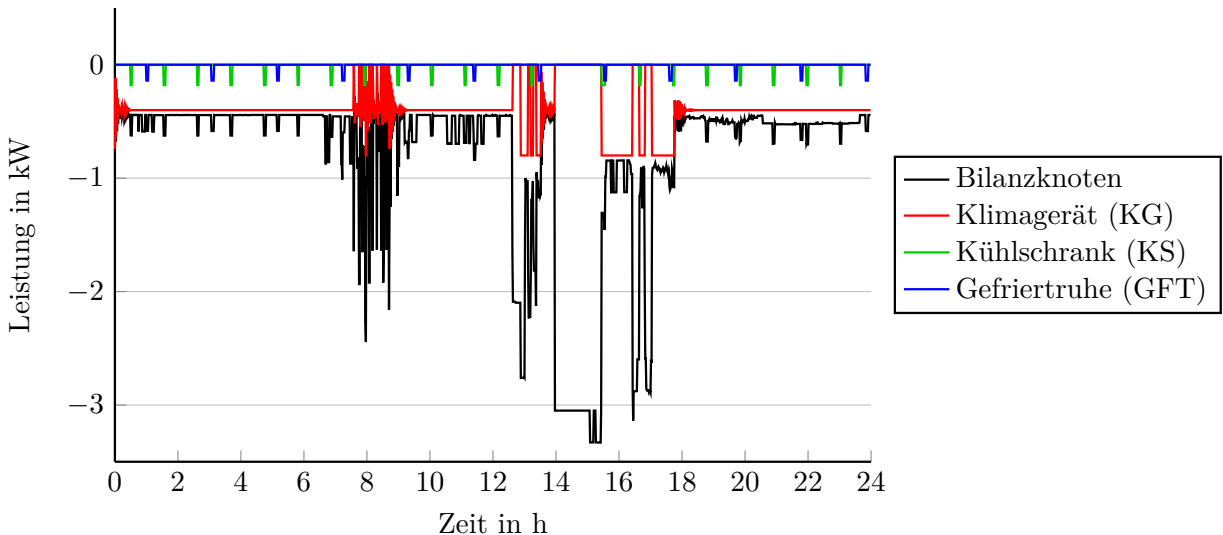


Abbildung 4.27: Leistungsverläufe des geregelten Hausnetzes

Die Temperatur im Kühlschrank erhöht sich um 0.8% der Solltemperatur. Das entspricht einer Temperatur von $8^{\circ}C$. Die Gefriertruhe verlässt ihren Kühlzyklus nicht. Der Grund dafür ist, dass sie während der Spitzenlast ohnehin deaktiviert ist.

Das Klimagerät erreicht eine Temperatur von 1.5% der Solltemperatur. Das sind 26.5°C .

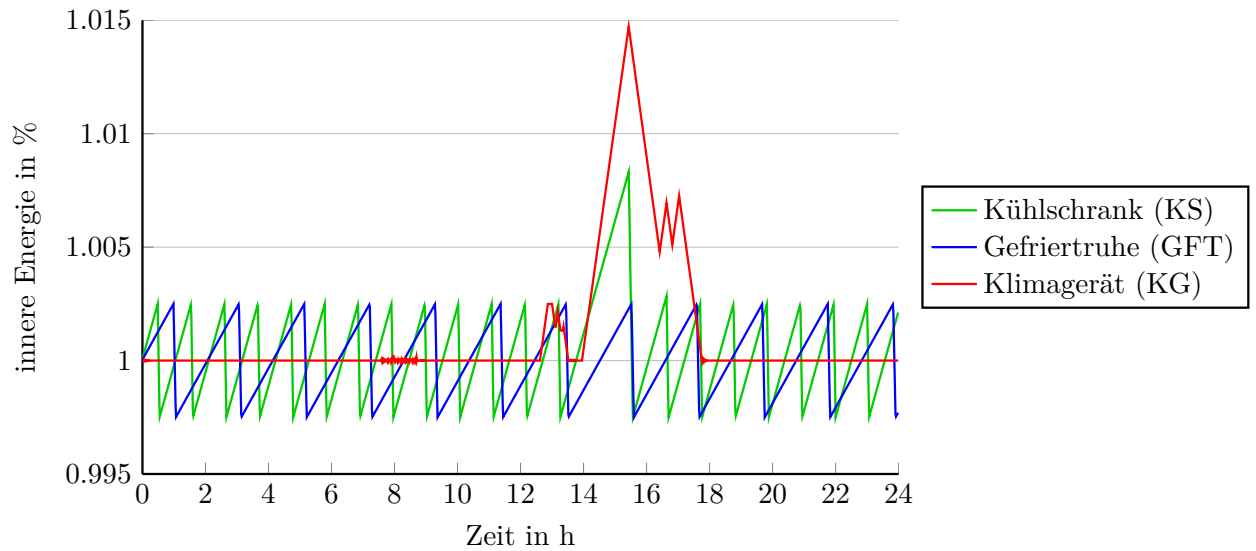


Abbildung 4.28: Energieinhalt der Kühlgeräte im geregelten Hausnetz

Durch das Demand Side Management konnte die Maximallast von 3.5 kW auf 3 kW reduziert werden. Das entspricht einer Reduktion von 15 %. Der Kühlschrank und die Gefriertruhe haben auf Grund ihrer kleinen Leistungen nur wenig Einfluss auf die Gesamtlast. Da der Aufwand für diese Art von Regelung aber minimal ist, gibt es keinen Grund sie in Haushalten nicht zu implementieren.

Kapitel 5

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Oft werden Erzeuger (oder auch Speicher und Verbraucher) parallel oder beinahe parallel zusammengeschlossen. Im ersten Simulationskapitel wurden Untersuchungen für diesen Zusammenschluss durchgeführt, die zeigen, dass die richtige Wahl der Regelmethode von der Anwendung abhängt.

In erster Linie geht es beim Parallelschalten von Erzeugern oder Speichern um eine gute Lastaufteilung. Dafür sollte eine Spannungs- und Stromregelung verwendet werden. Im Allgemeinen sind OLR Methoden dafür am besten geeignet, da sie das gesamte Spannungsniveau im System anheben. ILR Methoden regeln die Spannung an einem Punkt perfekt auf Sollspannung, die anderen Spannungen im System stellen sich darauf ein.

Die Master/Slave Regelung ist der Average Current Regelung vorzuziehen, da sie weniger anfällig gegen einen Ausfall eines Erzeugers ist. Tritt im Kommunikationskanal starkes Rauschen auf, so ist die Average Current Regelung die erste Wahl. Durch die prinzipbedingte Rauschunterdrückung ist sie robuster gegen solche Einflüsse. Die Master/Slave Regelung hingegen ist sensibel gegen Rauschen. Hier müsste eine gute Rauschunterdrückung implementiert werden.

Wenn keine Kommunikation zwischen den Erzeugern aufgebaut werden kann, so sollte eine Kombination aus einem PI-Regler und sonst P-Reglern gewählt werden. Hier ist darauf zu achten, dass der Erzeuger mit dem PI-Regler nahe am Verbraucher ist, da dieser die Spannung auf Nennspannung regelt. Weiters muss darauf geachtet werden, dass der Erzeuger mit PI-Anteil den größten regelbaren Leistungsbereich hat.

Unter Betrachtung einer idealen Lastaufteilung und Spannungsregulation ist ein Parallelschalten von Erzeugern ohne Kommunikation zu vermeiden.

Aus den Untersuchungen des Niederspannungsverteilsnetzes lässt sich folgern, dass das Netz unter verschiedenen Gesichtspunkten geregelt werden kann, die jede ihre Vor- und Nachteile haben. Zur Spannungsregulation bietet sich die Regelstrategie mit Bildung von Regel-Clustern an. Dadurch fällt die Spannung an den Verbrauchern nicht zu weit ab. Wenn die Kommunikation verringert werden soll, kann auf eine Erhöhung der Referenzspannung

zurückgegriffen werden, die prinzipbedingt auch geringere Verluste hat. Eine Kombination dieser beiden Regelstrategien ist auch denkbar: Es wird im normalen Betrieb mit den Regel-Clustern geregelt. Fällt die Kommunikation aus, so wird auf eine Referenzspannungserhöhung zurückgegriffen. So kann ein System erstellt werden, das auch nach dem Ausfall der Kommunikation weiterarbeiten kann.

Werden Erzeuger berücksichtigt, deren Produktion nicht reduziert werden kann oder soll, wie bei erneuerbaren Quellen, so ist der Einsatz von Speichern notwendig, um die Spannung zu regulieren.

Wenn kein Energietransport mit dem übergeordneten Netz stattfinden soll, so kann das ebenfalls mit der Regelstrategie mit Regel-Cluster realisiert werden. Fällt das übergeordnete Netz aus und stellt sich ein Inselbetrieb ein, so kann mit dieser Regelstrategie das Netz weiter betrieben werden. Es kommt jedoch zu Spannungserhöhungen, die berücksichtigt werden müssen. Die DC/DC Wandler in dem Netz müssen also dafür ausgelegt werden. Denkbar ist auch, den Leistungstransport mit dem übergeordneten Netz zu jeder Zeit auf einen vorgegebenen Wert festzulegen. So kann, wenn das übergeordnete Netz geschwächt ist, der Leistungstransport von diesem Netz reduziert werden. Diese Regelstrategie führt aber zu größeren Verlusten. Es muss für jedes Netz gesondert abgeschätzt werden, ob diese in Kauf genommen werden können.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit dem Haushaltsnetz zeigen, dass ein Demand Side Management von Kühlschränken und Gefriertruhen die Spitzenlast nur wenig beeinflusst. Da diese Regelung einfach zu implementieren ist, sollte sie, vor allem wenn viele Haushalte betrachtet werden, trotzdem zum Einsatz kommen. Die Regelung des Klimagerätes bringt starke Verbesserungen. Die hier verwendete Regelstrategie kann die Kühlgeräte in dem Haushaltsnetz so regulieren, dass die Spitzenlast um 15 % reduziert wird. Dabei ist der Aufwand gering. Es muss lediglich zu jeder Zeit die Gesamtlast des Haushaltes ermittelt werden. Eine zentrale Steuereinheit kann den Kühlgeräten mitteilen, wann sie ihre Leistung reduzieren sollen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass durch einen kombinierten Einsatz diverser hier vorgestellter Regelstrategien auf verschiedenen Netzebenen die Netzqualität gesteigert werden kann. Es ist möglich, dass sich Teilbereiche des Netzes selbst versorgen oder ihre Produktion beziehungsweise Last so anpassen, dass andere Netzbereiche entlastet werden.

Ein Haushalt kann entweder vom übergeordneten Netz oder selbst durch Spitzenlastanalyse seine Last in gewissen Grenzen reduzieren und damit das übergeordnete Netz unterstützen. Das Netz kann durch diese Regelstrategien dynamisch auf verschiedene Einflüsse reagieren. Dadurch wird das Netz zu einem Smart Grid.

Ausblick

Für eine effiziente Regelung ist eine starke Kommunikation zwischen Kontrollsystemen, Aktuatoren und Sensoren notwendig. Deswegen werden erhebliche Ansprüche an diese gestellt und sie sollte robust und redundant ausgelegt werden. Um das zu erreichen, sind vertiefende Untersuchungen empfehlenswert.

Eine Reduktion der Verlustleistung an den Leitungswiderständen ist in den meisten Situationen vorteilhaft. Das erfordert ausgeklügelte Regelalgorithmen, die zu untersuchen sind.

In dieser Arbeit wurden verschiedene Regelstrategien entwickelt, die unter unterschiedlichen Gesichtspunkten optimiert wurden. Beispielsweise muss im Falle eines Blackout des übergeordneten Netzes die Regelstrategie mit ausschließlich Eigenverbrauch aktiviert werden. Ist das übergeordnete Netz vorhanden, sollte im Normalfall eine andere Regelstrategie verfolgt werden um die Verluste gering zu halten. Zu untersuchen ist, ob diese Regelstrategien je nach Netzzustand umgeschaltet werden können, sodass das Netz immer optimal betrieben wird.

Weiters sind Untersuchungen über die Einbindung von Elektromobilität als Speicher in Haushalten und das Entwickeln passender Regelstrategien empfehlenswert. Zusammen mit den Kühlgeräten ergibt sich ein großes Speicherpotenzial, das zu untersuchen ist.

Zuletzt sind Untersuchungen interessant, bei dem verschiedene Regelstrategien in unterschiedlichen Netzebenen zusammenschaltet werden, um die Kombination aus DSM, Verteilnetzregelung und Übertragungsnetzregelung zu betrachten. Dafür können Regelstrategien aus dieser Arbeit verwendet werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Blockschaltbild eines rückgekoppelten Regelsystems	4
2.2	U-I Kennlinien einer idealen und einer mit Droop Charakteristik versehenen Spannungsquelle.	7
2.3	Zwei parallel geschaltete Spannungsquellen	8
2.4	Zwei parallele Spannungsquellen mit unterschiedlichem Arbeitspunkt bei verschiedenen Steilheiten der Droop Charakteristik	8
2.5	Blockschaltbild der Droop Regelung eines Erzeugers	9
2.6	Blockschaltbild der Master/Slave Regelung mit äußerer Regelschleife	14
2.7	Blockschaltbild der Master/Slave Regelung mit innerer Regelschleife	15
2.8	Bildung der Stromreferenz bei der Average Current Regelung	16
2.9	Blockschaltbild der Average-Current Regelung mit äußerer Regelschleife eines Teilnehmers	18
2.10	Blockschaltbild der Average-Current Regelung mit innerer Regelschleife eines Teilnehmers	19
3.1	Einfach Verteilnetz zum Testen und anfängliche Untersuchungen der Regelalgorithmen	26
3.2	Lastverlauf des Verbrauchers	27
3.3	Anordnung des Niederspannungsverteilstromnetzes	28
3.4	U-P Kennlinien des Bilanzknotens im Niederspannungsverteilstromnetzes	29
3.5	Grundriss des modellierten Hausnetzes	31
4.1	Verteilnetz mit parallelen Erzeugern im unregulierten Zustand	36
4.2	Parallele Erzeuger: Spannungsregulation mit P-Reglern	37
4.3	Parallele Erzeuger: Spannungsregulation mit PI-Reglern	38
4.4	Parallele Erzeuger: Spannungsregulation mit P- und PI-Reglern	39
4.5	Parallele Erzeuger: Vergleich der OLR mit Master/Slave Regelung	40

4.6	Parallele Erzeuger: Vergleich der OLR mit Average Current Regelung . . .	41
4.7	Parallele Erzeuger: Vergleich der ILR mit Master/Slave Regelung	42
4.8	Parallele Erzeuger: Vergleich der ILR mit Average Current Regelung	43
4.9	Parallele Erzeuger: Rauschempfindlichkeit der Master/Slave Regelung . . .	44
4.10	Parallele Erzeuger: Rauschempfindlichkeit der Average Current Regelung . .	45
4.11	Parallele Erzeuger: Vergleich der aufsummierten Verluste des Tages	46
4.12	Niederspannungsnetz: Leistungsverläufe bei Spannungsregulation mit Voltage Droop Regelung	48
4.13	Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei Spannungsregulation mit Voltage Droop Regelung	48
4.14	Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei Spannungsregulation mit Referenzspannungserhöhung von 1.5 Volt	50
4.15	Aufteilung des Niederspannungsverteilstromnetzes in Cluster	51
4.16	Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei Spannungsregulation mit Regel-Cluster	52
4.17	Niederspannungsnetz: Leistungsverläufe bei Spannungsregulation mit Regel-Cluster	53
4.18	Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei optimierter Spannungsregulation mit Regelcluster und Speicher	54
4.19	Niederspannungsnetz: Leistungsverläufe bei optimierter Spannungsregulation mit Regelcluster und Speicher	55
4.20	Vermeidung des Energietransportes im Bilanzknoten mit der ersten Regelstrategie - Leistungsverlauf	57
4.21	Vermeidung des Energietransportes im Bilanzknoten mit der ersten Regelstrategie - Spannungsverläufe	57
4.22	Niederspannungsnetz: Leistungsverläufe bei hohem Eigenverbrauch mit der Clustermethode	59
4.23	Niederspannungsnetz: Spannungsverläufe bei hohem Eigenverbrauch mit der Clustermethode	59
4.24	Niederspannungsnetz: Vergleich der aufsummierten Verluste des ausgewählten Tages	60
4.25	Leistungsverläufe des unregulierten Hausnetzes	61
4.26	Energieinhalt der Kühlgeräte im unregulierten Hausnetz	62
4.27	Leistungsverläufe des regulierten Hausnetzes	64
4.28	Energieinhalt der Kühlgeräte im regulierten Hausnetz	65

Tabellenverzeichnis

2.1	Berechnungstabelle der Regelparameter des Schwingungsverfahrens nach Ziegler/Nichols	6
3.1	Anschlusswiderstände der Erzeuger und Verbraucher mit 95mm^2 StAlu Freileitung im Modellnetz für parallele Erzeugung	26
3.2	Anschlussleistungen der Erzeuger im Modellnetz für parallele Erzeugung . .	26
3.3	Anschlussleistungen der Erzeuger im Niederspannungsverteilstromnetz	29
3.4	Elektrische Eigenschaften einiger Materialien im Vergleich [3]	32
3.5	Anschlussspannungen und Abkürzungen der Erzeuger im Haushaltsnetz . .	33
3.6	Eingestellte Sollwerte der Kühlgeräte	34
3.7	Eingestellte Leistungswerte der Kühlgeräte	34
4.1	Eingestellte Reglerparameter bei paralleler Erzeuger mit Voltage Droop Spannungsregulation	36
4.2	Eingestellte Reglerparameter bei paralleler Erzeuger mit Outer Loop Regulation	40
4.3	Eingestellte Reglerparameter bei paralleler Erzeuger mit Inner Loop Regulation	42
4.4	Parameter der Regler der Droop Regelungsverfahren	47
4.5	Niederspannungsnetz: Leistungsdaten des Speichers beim Niederspannungsverteilstromnetz	54
4.6	Niederspannungsnetz: Regelparameter des Speichers	54
4.7	Parameter des Reglers für die Steuerung des Klimagerätes im Haushaltsnetz	63
4.8	Temperatureinstellungen für das Demand Side Management im Haushaltsnetz	64

Literaturverzeichnis

- [1] Austrian Power Grid. Netzregelung. Online, <http://www.apg.at/de/markt/netzregelung>, letzter Zugriff: 27. Nov. 2014.
- [2] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. Standardlastprofile.
- [3] Deutsches Kupferinstitut. Eigenschaften von Kupfer. Online, <https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/werkstoff-eigenschaften/kupfer.html>, letzter Zugriff: 28. Nov. 2014.
- [4] Fraunhofer-Institut. Weltrekord-Solarzelle mit 44.7 Prozent Wirkungsgrad. September 2013. Number 22/13.
- [5] W. Gawlik. Energieübertragung und Kraftwerke Vorlesungsskriptum. Technische Universität Wien, 2012.
- [6] T. M. Haileselassie and K. Uhlen. Power Flow Analysis of Multi-terminal HVDC Networks. IEEE, 2011.
- [7] B. T. Irving and M. M. Jovanovic. Analysis, Design, and Performance Evaluation of Droop Current-Sharing Method. Delta Products Corporation.
- [8] P. Karlsson. DC Distribution Power Systems. 2002.
- [9] T. Kaufmann. Simulation des Betriebes eines DC Netzes. Technische Universität Wien, Mai 2013.
- [10] A. Kugi. Automatisierung Vorlesungsskriptum. Technische Universität Wien, 2013.
- [11] X. Lu, J. M. Guerrero, K. Sun, and J. C. Vasquez. An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy. IEEE, 2013.
- [12] S. Luo, Z. Ye, R.-L. Lin, and F. C. Lee. A Classification and Evaluation of Paralleling Methods of Power Supply Modules. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999.
- [13] Z. Moussaoui, I. Batarseh, H. Lee, and C. Kennedy. An Overview of the Control Scheme for Distributed Power Systems. Southcon Conference Record pp. 584-591, 1996.
- [14] F. Otto. Impact Assessment for a High Penetration of Distributed Generators in Medium and Low Voltage Grids. ITU Graz, Juli 2012.

- [15] Y. Pei, G. Jiang, X. Yang, and Z. Wang. Auto-Master-Slave Control Technique of Parallel Inverters in Distributed AC Power Systems and UPS. Xi'an Jiatong University, 2004.
- [16] Statistik Austria. Strom- und Gastagebuch. Bundesanstalt Statistik Österreich, 2012.
- [17] Statistik Austria. WOHNEN - Zahlen, Daten und Indikatoren der Wohnstatistik. Bundesanstalt Statistik Österreich, 2013.
- [18] Technische Universität Wien. aDSM - Aktives Demand-Side-Management durch Einspeiseprognose. 2014.
- [19] Universität Leipzig. Schwingungsverfahren nach Ziegler/Nichols. Online, <http://techni.tachemie.uni-leipzig.de/reg/regeintn.html>, letzter Zugriff: 02. Dez. 2014.
- [20] Wikipedia. Bleiakumulatoren. Online, http://en.wikipedia.org/wiki/Lead-acid_battery, letzter Zugriff: 21. Dez. 2014.
- [21] F. Zeilinger, M. Chochole, and T. Kaufmann. SmartDCGrid - Machbarkeit und Betrieb von intelligenten Gleichstrom-Niederspannungsnetzen. Online, <http://www.ea.tuwien.ac.at/projects/smardcgrid>, letzter Zugriff: 09. Jan. 2015.