

Diplomarbeit

Einfluss der fixen Stufenstellung auf das Netzverhalten bei einem großen dezentralen Erzeugungsanteil in Niederspannungsnetzen

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

unter der Leitung von:
Univ.Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gawlik
Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Albana Ilo

eingereicht an der:
Technische Universität Wien
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

von
Lukas Kloibhofer 1125858
Hertha-Firnberg-Straße 9/3/311
1100 Wien

Wien, September 2018

Kurzfassung

Heutzutage steigt der Anteil an dezentralen Erzeugern, sowohl im Mittel- als auch im Niederspannungsnetz. In vielen Fällen kann es dadurch zu einer Änderung der Leistungsflussrichtung kommen, wodurch Verletzungen der oberen Spannungsbandgrenze auftreten können. Verteiltransformatoren sind das Verbindungsglied zwischen dem Mittel- und Niederspannungsnetz. Diese sind mit einem Umsteller ausgestattet, an welchem in Abhängigkeit des Lastverhaltens eine fixe Stufenstellung eingestellt ist. Zum verändern dieser Stufenstellung muss der Transformator außer Betrieb genommen werden. Die konventionelle Einstellung der Stufenstellung kann zu einer zusätzlichen Spannungsanhebung oder -absenkung auf der Sekundärseite des Transformators führen, je nach dem ob der Transformator am Anfang oder am Ende des Mittelspannungsnetzes angeschlossen ist. Diese Arbeit fokussiert sich auf die Untersuchung der Auswirkungen dieser fixen Stufenstellungen auf das Netzverhalten bei einem hohen Anteil an dezentraler Erzeugung im Niederspannungsnetz.

Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit wird von einem europäischen Stromnetz ausgegangen. Zu Beginn sind der theoretische Hintergrund und die Modellierung näher erläutert, wobei auf Verteiltransformatoren im Detail eingegangen wird. Für die Simulationen werden zwei verschiedene Netzarten verwendet: Urban und Ländlich. Neunzehn Verteiltransformatoren verbinden reale Niederspannungsnetze mit einem Mittelspannungsabzweig, welcher mit Freileitungen bzw. Kabeln ausgeführt wird. Die Auswirkungen der fixen Stufenstellung wird in vier Abschnitten untersucht: zuerst an einem stark vereinfachten Netzmodell; danach an erweiterten Niederspannungsnetzen; im dritten Abschnitt an einem Mittelspannungsabzweig in Kombination mit erweiterten Niederspannungsnetzen; und zuletzt wird die Abhängigkeit der Anschlussposition des Transformators bei einer Stufenstellungsänderung untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Veränderung der Stufenstellung nicht nur einen direkten Effekt auf die Spannung im Niederspannungsnetz hat, sondern auch eine indirekte Wirkung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz. Dieser indirekte Effekt ist wird hauptsächlich von spannungsabhängigen Netzelementen verursacht, welche in Abhängigkeit der anliegenden Spannung ihre bezogene bzw. eingespeiste Leistung ändern. Das hat zur Folge, dass sich der Leistungsfluss und die Spannung im Mittelspannungsnetz ändern. Wenn die fixe Stufenstellung eines Verteiltransformators am Ende eines Mittelspannungsabzweiges geändert wird, ändert sich die Spannung im Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz genau in die entgegengesetzte Richtung. Bei dem Einsatz von lokaler Blindleistungsregelung im Niederspannungsnetz kann ein zusätzlicher Blindleistungsfluss zwischen Hoch- und Mittelspannungsnetz auftreten.

Der Einfluss einer Änderung der Stufenstellung eines Verteiltransformators auf die Spannung im Mittelspannungsnetz hängt stark von der Anschlussposition ab. Auf Grund des lokalen Effekts hat eine Leistungsflussänderung am Ende eines Mittelspannungsabzweiges eine größere Wirkung auf die Spannung als am Anfang des Abzweiges. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Stufenstellung des Verteiltransformators eine große Auswirkung auf den Leistungsfluss haben kann. Aus diesem Grund sollte bei Leistungsflussberechnungen, welche sowohl das Mittel-

Kurzfassung

als auch das Niederspannungsnetz betreffen, die fixe Stufenstellung des Verteiltransformators berücksichtigt werden. Bei einer Vernachlässigung dieser können Fehler im Leistungsfluss beider Netzebenen auftreten. In den hier durchgeführten Simulationen treten Fehler der Spannung im Mittelspannungsnetz bis zu 1.7% und im Niederspannungsnetz von bis zu 5.5% auf.

Abstract

Nowadays, the decentralized generation share is increasing in medium- as well as in low-voltage grid levels. In many cases this provokes a reverse power flow causing a violation of the upper voltage limit in the radial structure of distribution grids. Distribution transformers are the connecting links between medium- and low-voltage grids. They currently have off-load taps whose fixed position is defined depending on the load behaviour. The traditional fixed tap position may lead to an additional voltage decrease or increase in the voltage level of the secondary side bus of a distribution transformer connected at the beginning or at the end of the medium voltage feeder, respectively. This work is focused on investigating the influence of the fixed tap position on the grid behaviour in the presence of large distributed generation share in low-voltage grids.

The study is conducted in the European network type. In the beginning, the relevant theoretical approach and modelling descriptions are given. Distribution transformers and their tap changers are described in detail. Two different low voltage grid types are used for the simulations: urban and rural types. Nineteen distribution transformers connect the real low voltage grids to a medium voltage feeder, which consists of cable or overhead structure. The influence of the fixed tap position is examined in four stages: firstly, a very simple two bus model is used; secondly, extended low voltage grids are simulated; thirdly, extended medium- and low voltage grids are considered; and finally, the effect of the location dependency of the change of fixed tap position on grid behaviour is investigated.

Results show that a change of the fixed tap position has not only a direct effect on the voltage in the low voltage grid, but also an indirect effect on the voltage in the medium voltage grid. The indirect effect is mainly caused by voltage dependent grid elements, which consume or inject a different amount of power depending on the voltage. As a result, the power flow and the voltage profile in medium voltage grid level will change. When the fixed tap position of a transformer located at the end of a feeder is changed, the voltage profiles of both grids –i.e. medium- and low-voltage grid- vary in the opposite directions. By use of local reactive power control in low voltage grids, an additional reactive power flow between the high voltage grid and the medium voltage grid may occur.

The impact of changing the fixed tap position of a distribution transformer on the voltage in the medium voltage feeder strongly depends on its location on it. Due to the local effect, the power injection or consumption at the end of a medium voltage feeder has more influence on its voltage than at the beginning of the feeder. Additionally, results underline that the fixed tap position of distribution transformers have a major effect on power flow results. Thus, in the calculation of power flows, where the medium- and low voltage grid are considered together, the fixed tap position of distribution transformers should also be taken into account. If neglected, the power flow results will be incorrect in both grids, medium- and low voltage. In our case, results show that the inaccuracy in voltage can reach up to 1.7 and 5.5%, respectively.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abstract	iv
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Motivation	1
1.3 Umfang	2
1.4 Ziele	2
1.5 Struktur	2
2 Theoretischer Hintergrund	4
2.1 Der Transformator	4
2.1.1 Grundlagen	4
2.1.2 Verteiltransformator	8
2.2 Beschreibung des Netzverhaltens im Mittel- und Niederspannungsnetz	12
2.2.1 Spannungsabfall	12
2.2.2 Wirkleistungsverluste und Blindleistungsbedarf	14
2.2.3 Auslastung	14
3 Modellierung	15
3.1 Netzelemente	15
3.1.1 Transformator	15
3.1.2 Leitung	16
3.1.3 ZIP-Last	17
3.1.4 Zusammenfassung der spannungsabhängigen Elemente	18
3.2 Netze	18
3.2.1 Niederspannungsnetze	18
3.2.2 Mittelspannungsnetz	20
3.3 Lokale Blindleistungsregelung	22
4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten	23
4.1 Vereinfachtes Ersatznetz	23
4.2 Erweitertes Niederspannungsnetz	29
4.2.1 Ohne lokaler Blindleistungsregelung	30
4.2.2 Mit lokaler Blindleistungsregelung	37
4.3 Erweitertes Mittel- und Niederspannungsnetz	40
4.3.1 Freileitungen im Mittelspannungsnetz	41
4.3.2 Kabel im Mittelspannungsnetz	54
4.4 Ortsabhängigkeit der Stufenstellungsänderung	59
4.4.1 Ortsabhängigkeit ohne lokaler Blindleistungsregelung	59
4.4.2 Ortsabhängigkeit mit lokaler Blindleistungsregelung	61

Inhaltsverzeichnis

4.4.3	Ort der Leistungsänderung am Mittelspannungsabzweig	65
5	Evaluierung	67
5.1	Methode	67
5.2	Einfluss der geänderten Stufenstellung des Verteiltransformators	68
5.3	Einfluss der geänderten Stufenstellung des Verteiltransformators bei lokaler Blindleistungsregelung	71
6	Schlussfolgerung	74
7	Appendix	77
7.1	Netzdaten	77
7.2	Verluste nach Netzelementen	78
7.2.1	Verluste Freileitungs-Mittelspannungsnetz	78
7.2.2	Verluste Kabel-Mittelspannungsnetz	79
7.3	P(U)- und Q(U)-Kennlinien der Niederspannungsnetze	81
7.3.1	Kennlinien Niederspannungsnetz Ländlich	81
7.3.2	Kennlinien Niederspannungsnetz Urban	85
	Literatur	89

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Mit den Energie- und Klimazielen der EU für 2030 einigten sich die EU-Mitglieder im Januar 2014 auf langfristige Ziele, welche ein stärkeres, sichereres und vor allem ein nachhaltigeres Energiesystem gewährleisten sollen. Die drei Hauptziele sind die Senkung der Treibhausgase um mindestens 40% im Vergleich zum Jahr 1990, die Erhöhung des Anteils an erneuerbarer Energie auf mindestens 27% und die Steigerung der Energieeffizienz um mindestens 27% [1]. Diese Ziele sollen den Weg ebnen, um die Energie Strategie der EU zu ermöglichen, bis zum Jahr 2050 den Ausstoß von Treibhausgasen um 80%-90% im Vergleich zum Jahr 1990 zu senken.

Auf dem Sektor der Stromerzeugung werden aus diesem Grund die erneuerbaren Energien immer wichtiger und durch diverse Gesetzgebungen in den einzelnen Mitgliedstaaten gefördert. Typischerweise sind diese erneuerbaren Erzeugungseinheiten kleine dezentrale Einheiten, im Vergleich zur konventionellen fossilen Erzeugung und großen Wasserkraftwerken. Das bringt neue Probleme mit sich und stellt die Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber vor neue Herausforderungen, da das heutige Stromnetz für eine Erzeugung aus zentralen Großkraftwerken errichtet wurde. Solche Kraftwerke werden auf einer hohen Spannungsebene angeschlossen, von welcher aus die Energie bis in die Verteilnetze und zu den Kunden transportiert wird. Kleine dezentrale Einheiten, wie zum Beispiel Photovoltaikanlagen(PV-Anlagen), werden mit Ausnahme von größeren PV-Parks, oft im Verteilnetz anschlossen.

Deutschland ist bei der installierten PV-Kapazität, gefolgt von Italien und Großbritannien, der Spitzenreiter in Europa [2]. Die insgesamt installierte PV-Leistung in Deutschland lag Ende 2017 bei 43 GW, wobei im Jahr 2017 38,4 TWh in das öffentliche Netz eingespeist wurden. Das ergibt in diesem Jahr einen Anteil von 7.0% an der Nettostromerzeugung zur öffentlichen Stromversorgung. Der Spitzenwert 2017 in Deutschland betrug am 27.05. um 13:00 ca. 30 GW Photovoltaikleistung, was zu diesem Zeitpunkt einen Anteil von 42.7% der gesamten Stromerzeugung ausmachte.[3]

Dieses Beispiel zeigt das Problem auf, welches erneuerbare Quellen wie Sonne oder Wind haben: Fluktuation. An einem windstillen Tag mit dichter Bewölkung müssen daher Stromerzeuger einspringen, die nicht von äußeren Gegebenheiten beeinflusst werden. Jedoch an Tagen, wie am 27.05.2017, kommt in Deutschland fast die Hälfte des erzeugten Stroms von der Sonne. Diese Gegebenheiten stellen die Stromnetzbetreiber vor zunehmende Probleme, da das Netz für eine konventionelle Stromerzeugung ausgelegt wurde. Ein mögliches Problem bei hoher dezentrale Einspeisung stellt die Einhaltung des Spannungsbandes dar, welches eine Abweichung um $\pm 10\%$ von der Nennspannung erlaubt [4].

1.2 Motivation

Konventioneller Leistungsfluss geht vom erzeugenden Kraftwerk hin zu den Verbrauchern, was eine definierte Richtung des Spannungsabfalles bedeutet, welcher in Abhängigkeit der

1 Einleitung

Belastung unterschiedlich hoch ausfällt. Durch die dezentrale Erzeugung in den unteren Spannungsebenen kann sich dieser Leistungsfluss im Extremfall umkehren. Dies führt zu einer Erhöhung des Spannungsbandes und kann in einer Verletzung der oberen Spannungsbandgrenze enden. Der Verteiltransformator verbindet das Niederspannungsnetz(NS-Netz) mit dem Mittelspannungsnetz(MS-Netz), das bedeutet die gesamte von den Kunden im NS-Netz verursachte Last geht über diesen Knotenpunkt. Unter der Annahme einer sehr hohen Anzahl dezentralen Erzeugungseinheiten im Niederspannungsnetz, wie zum Beispiel Photovoltaikanlagen, kann sich wie beschrieben der Leistungsfluss über den Verteiltransformator umkehren.

Da der Verteiltransformator im konventionellen Sinne heute meist auf einen Leistungsfluss vom Mittelspannungsnetz ins Niederspannungsnetz ausgelegt ist, sind auch die Stufenstellungen des Umstellers auf diesen Zustand eingestellt. Mit dem Umsteller lässt sich die Windungszahl der Wicklungen verändern, um das Übersetzungsverhältnis an die Spannung im Mittelspannungsnetz anzupassen. Denn das Spannungsband im Mittelspannungsnetz erfährt unter Belastung ebenfalls einen Spannungsabfall, welcher mit der richtigen Wahl der Stufenstellung im Verteiltransformator für das Niederspannungsnetz ausgeglichen werden kann. Diese Stufenstellung ist aber im Fall hoher dezentraler Erzeugung im Niederspannungsnetz nicht optimal und kann zu Spannungsbandverletzungen führen.

1.3 Umfang

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Nieder- und Mittelspannungsnetz, wobei von einem europäischen Stromnetz ausgegangen wird. Unsymmetrische Belastungen des Netzes wurden dabei vernachlässigt und die Simulationen wurden unter der Annahme eines symmetrisch belasteten Netzes durchgeführt.

1.4 Ziele

In dieser Arbeit soll evaluiert werden, wie fixe Stufenstellungen eines Verteiltransformators wirken, wenn durch einen hohen Anteil an verteilter Erzeugung im Niederspannungsnetz Spannungsbandverletzungen auftreten. Weiters sollen die Auswirkungen einer Änderung der Stufenstellung auf das Netzverhalten des Nieder- und Mittelspannungsnetz untersucht werden, wobei der Fokus auf der Spannung im Mittelspannungsnetz liegen soll. Auch die Wirkung der lokalen Blindleistungsregelung im Niederspannungsnetz auf das Netzverhalten, bei Änderung der Stufenstellung im Verteiltransformator, soll untersucht werden.

1.5 Struktur

Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 2 der theoretische Hintergrund zu Transformatoren und das Netzverhalten von Leitungen im Nieder- und Mittelspannungsnetz erklärt. Hierbei wird detailliert auf Spannungsabfall, Verluste und Auslastung eingegangen. In Kapitel 3 werden die Modelle der Leitungen, Transformatoren und Lasten beschrieben, die in den Simulationen verwendet wurden. Des weiteren werden die Niederspannungsnetze und das verwendete Mittelspannungsnetz vorgestellt, außerdem wird auf die lokale Blindleistungsregelung der dezentralen Erzeuger eingegangen. Kapitel 4 beschreibt das Ergebnis der Simulationen, wobei zuerst Simulationen an einem vereinfachten Ersatznetz und in Folge an konkreten Niederspannungsnetzen durchgeführt wurden. Danach werden Simulationen an einem erweiterten Nieder- und Mittelspannungsnetz beschrieben und die Auswirkungen der Stufenstellungsänderung an Verteiltransformatoren in

1 Einleitung

verschiedenen Gegebenheiten analysiert. Am Ende des Kapitels wird auf die Ortsabhängigkeit der Stufenstellungsänderung eingegangen. Kapitel 5 evaluiert die erzielten Ergebnisse der Simulationen in übersichtlicher Weise und führt zur Schlussfolgerung in Kapitel 6.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Der Transformator

Um die Übertragung elektrischer Energie über große Distanzen möglichst verlustarm zu ermöglichen benötigt es Transformatoren, welche zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen als Verbindungselement eingesetzt werden. Transformatoren können aber auch Wirk- und Blindleistungsflüsse steuern oder werden für die Einspeisung elektrischer Energie von Generatoren in die verschiedenen Netzebenen benötigt. Dabei gibt es verschiedene Einteilungen die man für Transformatoren treffen kann[5]:

Maschinentransformatoren Sie transformieren die Ausgangsspannung von Generatoren auf die Spannung der Netzebene, an die der jeweilige Generator angeschlossen ist.

Netzkupplungstransformatoren Dienen als Verbindung des Transportnetzes mit einem Mittelspannungsnetz.

Verteiltransformatoren Sie sind der letzte Transformator vor dem Hausanschluss und verbinden das Mittelspannungsnetz mit dem Niederspannungsnetz.

Regeltransformatoren Die unter Last schaltbaren Regelwicklungen ermöglichen die Ausgangsspannung nach Belastung und Phase zu verändern.

Dreiwicklungstransformatoren Sie besitzen im Gegensatz zum „klassischen“ Zweiwicklungstransformator drei Wicklungen und somit die Möglichkeit, die Eingangsspannung auf zwei verschiedene Ausgangsspannungen zu transformieren.

2.1.1 Grundlagen

Zu Beginn werden im Folgenden kurz grundsätzliche Begrifflichkeiten, das Ersatzschaltbild und das Zeigerdiagramm erläutert. Ein Einphasentransformator besteht aus einem Eisenkern, einer Primärwicklung und einer Sekundärwicklung. Die Primärwicklung ist jene Wicklung in die eingespeist wird. Das muss nicht immer die Oberspannungswicklung sein, welche im Gegensatz zur Unterspannungswicklung die höhere Windungszahl aufweist. Das Verhältnis der Windungszahlen der Ober- und Unterspannungswicklung wird Übersetzungsverhältnis genannt:

$$\ddot{u} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_{OS}}{U_{US}} = \frac{U_1}{U_2} \quad (2.1)$$

Das Ersatzschaltbild eines Transformators, unter Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes \underline{I}_μ und des Verluststromes \underline{I}_v ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Dabei sind R_1 und R'_2 als die Wicklungswiderstände der Primär- und Sekundärseite zu interpretieren. Dadurch werden die Kupferverluste berücksichtigt, welche vom Widerstand des Leiters abhängig sind und sich quadratisch zum Strom verhalten, also quadratisch zur Belastung. Oft werden die Kupferverluste auch Wicklungsverluste genannt. $X_{1\sigma}$ und $X'_{2\sigma}$ sind jeweils die primäre und sekundäre Streureaktanz. Unter idealen Verhältnissen würde der gesamte Fluss der beiden Wicklungen miteinander verknüpft sein und im Eisenkern verlaufen. In der Realität tritt jedoch ein Teil des Flusses aus dem Eisenkern aus und nicht durch beide Wicklungen hindurch. Dieser Fluss wird Streufluss

2 Theoretischer Hintergrund

genannt und kann durch die Anordnung der Primär- und Sekundärwicklung verringert werden. Die Eisenverluste und der Magnetisierungsstrom werden durch den Verlustwiderstand R_{Fe} und die Hauptreaktanz X_h berücksichtigt. Eisenverluste sind lastunabhängig und bestehen aus den Hystereseverlusten und den Wirbelstromverlusten, sie werden auch oft Ummagnetisierungsverluste genannt. Diese Verluste sind von der Belastung unabhängig und treten auf, sobald der Transformator magnetisiert ist. Dabei sind sie abhängig vom Material und Aufbau des Kerns, von der Flussdichte, der Frequenz und der anliegenden Spannung. Um die Wirbelstromverluste zu verringern wird der Eisenkern mit dünnen Kernblechen aufgebaut, die voneinander isoliert sind. Die Hystereseverluste können mit einer schmälere Hysteresekurve verringert werden, was durch eine Anreicherung der Trafobleche mit Silikon erreicht wird [6]. Der Magnetisierungsstrom I_μ wird zur Magnetisierung des Kerns und zum Aufbau der Nennspannung benötigt. Die Elemente der Sekundärseite wurden für das Ersatzschaltbild mit Hilfe des Übersetzungsverhältnisses auf die Primärseite umgerechnet.

$$\begin{aligned}
 R'_2 &= R_2 \cdot \ddot{u}^2 \\
 X'_{2\sigma} &= X_{2\sigma} \cdot \ddot{u}^2 \\
 \underline{U}'_2 &= \underline{U}_2 \cdot \ddot{u} \\
 \underline{I}'_2 &= \frac{\underline{I}_2}{\ddot{u}}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

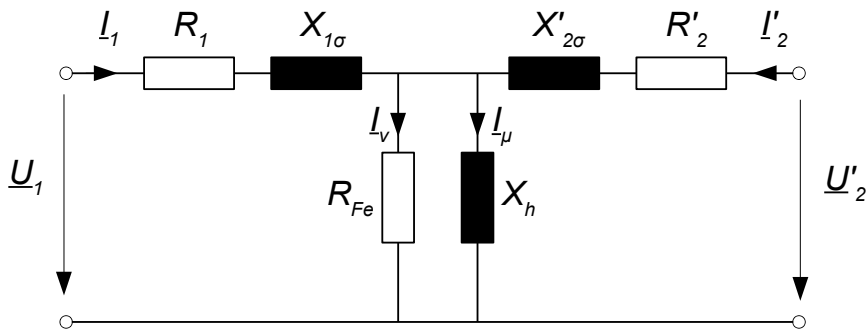


Abbildung 2.1: Vollständiges Ersatzschaltbild des Transformators

Berücksichtigt man, dass die Hauptreaktanz und der Verlustwiderstand um vieles größer sind als der Wicklungswiderstand und die Streureaktanz:

$$\mathbf{R_1 : X_\sigma : X_h : R_{Fe} \approx 1 : 2 : 1000 : 10.000}$$

kann für den allgemeinen Belastungsfall der Magnetisierungs- und Verluststrom meist vernachlässigt werden. Das vereinfachte, stromideale Ersatzschaltbild ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

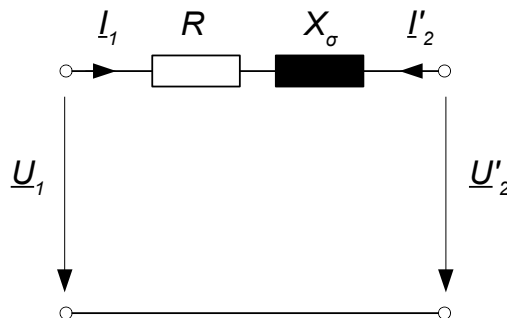


Abbildung 2.2: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Transformators für den Belastungszustand (Kurzschlussersatzschaltbild)

2 Theoretischer Hintergrund

Der Widerstand und die Reaktanz des vereinfachten Ersatzschaltbildes sind gleich dem Kurzschlusswiderstand und der Kurzschlussreaktanz und ergeben sich wie folgt:

$$\begin{aligned} R &= R_1 + R'_2 \\ X_\sigma &= X_{1\sigma} + X'_{2\sigma} \\ \underline{I}_1 &= -\underline{I}'_2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Das zugehörige Zeigerdiagramm ist in Abbildung 2.3 für eine induktiven und kapazitiven Lastfall abgebildet.

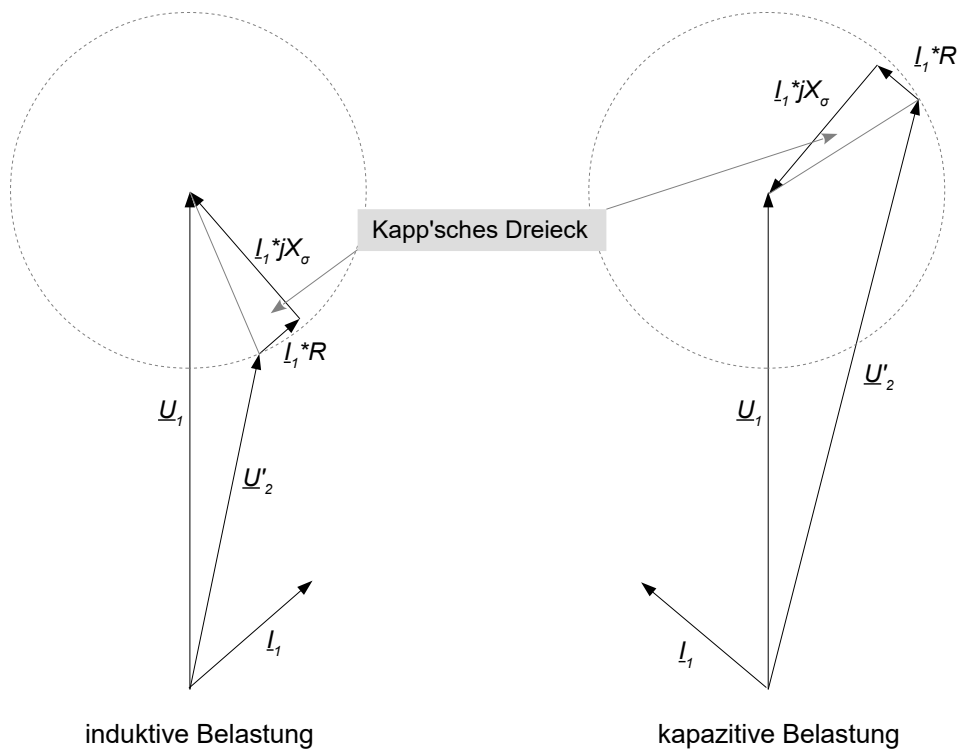


Abbildung 2.3: Zeigerdiagramm für den induktiven und kapazitiven Belastungsfall

Der Spannungsabfall am Widerstand und der Reaktanz ergibt ein Dreieck, welches den Namen Kapp'sches Dreieck trägt. Dieses verändert seine Form unter der Voraussetzung konstanter Frequenz nicht, sondern wird in Abhängigkeit des Belastungsstromes nur verschieden groß. Variiert man den Winkel zwischen Strom und Spannung ergibt sich somit ein Kreis, welcher durch das starre Kapp'sche Dreieck gezogen wird. Dabei kann bei kapazitiver Belastung, die auf die Primärseite bezogene Sekundärspannung, den Betrag der Primärspannung sogar übersteigen. Zu beachten ist, dass hier auf Grund der besseren Darstellbarkeit die Spannungsabfälle am Widerstand und der Reaktanz überproportional groß eingezeichnet wurden.

Spannungsabfall am Transformator

Wie bereits erläutert, kann in den meisten Belastungsfällen mit dem Kurzschlusersatzschaltbild des Transformators gerechnet werden. Dabei wird der Widerstand der Wicklungen und die Streuinduktivität berücksichtigt. Dieses Ersatzschaltbild wird auch verwendet, um die Spannungsabfälle am Transformator zu bestimmen.[7]

Der Spannungsabfall ergibt sich in bezogener Form wie folgt:

$$\Delta u \approx [u_r \cdot \cos(\varphi_1) + u_x \cdot \sin(\varphi_1)] \cdot \frac{I}{I_n} \quad (2.4)$$

Der relative ohmsche und reaktive Spannungsabfall u_r und u_x sind gegeben durch:

$$u_r = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \quad (2.6)$$

Wobei S_n die Scheinleistung und P_k die Kurzschlussleistung des betrachteten Transformators sind. Die bezogene Kurzschlussspannung u_k ergibt sich aus dem Kurzschlussversuch und ist jene Spannung, welche im Kurzschluss am Transformator anliegen muss damit Nennstrom fließt. Man erkennt an der Formel 2.4, dass der Spannungsabfall durch den Term $\frac{I}{I_n}$ mit steigender Belastung größer wird. Betrachtet man das Kurzschlusersatzschaltbild aus Abbildung 2.2 setzt sich der Spannungsabfall zusammen aus dem Spannungsabfall, den der Wirkstrom am Kurzschlusswiderstand R verursacht und dem Spannungsabfall, den der Blindstrom an der Kurzschlussstreureaktanz X_σ verursacht.

In Abbildung 2.4 ist der Spannungsabfall mit Hilfe des Zeigerdiagramms dargestellt. Daraus lässt sich die Formel 2.4 grafisch relativ einfach herleiten. Anzumerken ist, dass diese Formel genau genommen der Längsspannungsabfall ist. Der Querspannungsabfall ist hier nicht berücksichtigt, kann aber auf Grund eines geringen Übertragungswinkel meist vernachlässigt werden.

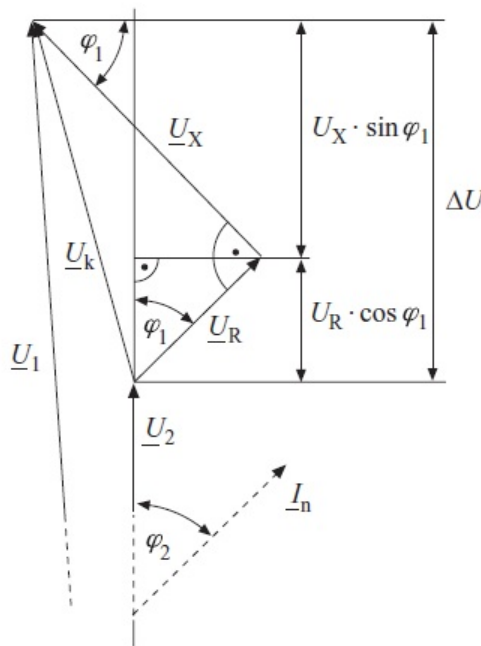


Abbildung 2.4: Spannungsabfall am Transformator [7]

2.1.2 Verteiltransformator

Im Folgenden wird auf den Verteiltransformator näher eingegangen, oft auch Verteilungstransformator oder Ortsnetztransformator genannt. In [5] werden Verteiltransformatoren wie folgt definiert: *“Sie transformieren die von den Mittelspannungsnetzen bei 10 kV und 20 kV bereitgestellte Energie auf die Spannungsebene 400 V/230 V der Niederspannungsnetze, aus denen die meisten Endverbraucher ihre elektrische Energie beziehen und in die Nutzenergien Licht, Wärme, Kraft umwandeln.“*. Grundsätzlich haben solche Transformatoren, die für Verteilung elektrischer Energie an den Endkunden zuständig sind, mehrere Merkmale. Hier soll vor allem auf die Möglichkeit von Verteiltransformatoren, ihr Windungsverhältnis stufenweise zu verändern, eingegangen werden.

Die Schaltgruppe des Transformators hat einen gewissen Einfluss auf die Art wie das Windungsverhältnis an den einzelnen Spulen geändert werden kann, deswegen soll hier festgelegt werden welche Schaltgruppen bei den Verteilnetztransformatoren in Europa üblich sind. Auf der Unterspannungsseite wird im Niederspannungsnetz der Sternpunkt immer herausgeführt, da dieser als vierter Leiter zu den Haushalten geführt wird. Aus diesem Grund wird unterspannungsseitig eine y-Wicklung oder z-Wicklung verwendet, da es bei einer Dreieckwicklung keinen Sternpunkt gibt. Wird auf der Oberspannungsseite eine Y-Wicklung verwendet, dann ist es bei Verteiltransformatoren von Nachteil auf der Unterspannungsseite ebenfalls eine y-Wicklung einzusetzen, da bei solchen Schaltungen nur maximal 10% der Nennleistung über den Sternpunkt abgeführt werden dürfen. Da sich in Verteilnetzen durchaus Schiefasten einstellen können, wird eine solche Schaltung für Verteiltransformatoren nicht verwendet. Ist jedoch an der Unterspannungsseite eine y-Wicklung angebracht, wird in diesem Fall überspannungsseitig eine Dreieckschaltung eingesetzt. Bei der D-Wicklung kann überspannungsseitig ein Nullstrom fließen, welcher den Nullstrom der Unterspannungsseite kompensiert. Eine andere Möglichkeit ist die Yzn Schaltung, bei welcher eine unsymmetrische Belastung auf der Unterspannungsseite ebenfalls kein Problem wäre. Bei Nennleistungen über 200 kVA ist bei Verteiltransformatoren die Dyn-Schaltung üblich. Darunter wird die Yzn-Schaltung bevorzugt, da diese günstiger unsymmetrisch belastbar ist und in kleineren Verteilnetzen unsymmetrische Lasten durch einphasige Verbraucher besonders ausgeprägt sind [8]. Eine unsymmetrische Belastung der Yzn-Schaltung ruft in der Zickzackschaltung in zwei Wicklungen auf unterschiedlichen Schenkeln zwei entgegengesetzte Durchflutungen hervor, welche von der Sternschaltung auf der Oberspannungsseite kompensiert werden können. Nachteilig wirkt sich bei der Zickzackschaltung der höhere Kupferbedarf und die um $\sqrt{3}/2$ schlechtere Ausnutzung, durch Addition von zwei um 60° verschobenen Spannungen, aus.

Allgemein hat die Y-Schaltung den Vorteil eines geringeren Isolationsaufwandes, da die Strangspannung $\frac{U_n}{\sqrt{3}}$ beträgt, was sie für die Oberspannungsseite attraktiv macht. Wogegen die D-Schaltung den Vorteil kleinerer Strangströme von $\frac{I_n}{\sqrt{3}}$ hat, was auf der Unterspannungsseite von Vorteil sein kann, sofern dort kein Nulleiter benötigt wird.

Um den betrieblichen Anforderungen der Spannungshaltung gerecht zu werden, ist es üblich Verteiltransformatoren mit veränderbarem Windungsverhältnis auszuführen. Ein Transformator mit starrer Übersetzung wird diesen Anforderungen selten gerecht [9]. Großen Transformatoren, welche das Hochspannungsnetz mit dem Mittelspannungsnetz verbinden, werden meist als Regeltransformatoren (engl. OLTC...On Load Tap Changer) ausgeführt. Ein solcher Regeltransformator kann das Windungsverhältnis unter Last umschalten und wird mit einer Regelung ausgeführt, welche die Spannung an z.B. einer Sammelschiene in einem gewissen Spannungsband hält. Verteiltransformatoren werden selten als Regeltransformatoren ausgeführt, da diese sehr

2 Theoretischer Hintergrund

teuer sind und eine ständige Umschaltung des Windungsverhältnis im Niederspannungsnetz bis jetzt nicht oft nötig war. Stattdessen werden sogenannte Umsteller verwendet, welche nur im spannungslosen Zustand geschaltet werden dürfen. Das bedeutet, die Einstellung erfolgt für die mittlere Betriebsspannung und wird nur in seltenen Fällen geändert. Üblicherweise werden Umsteller mit drei, fünf oder sieben Stufen ausgeführt, wobei die fünfstufige Ausführung mit $\pm 2,5\%$ und $\pm 5\%$ am weitesten verbreitet ist.[6]

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Arten von Verteiltransformatoren [6]:

- **Trockentransformatoren** (in der Regel Gießharz-Transformatoren): Im Gegensatz zu Öltransformatoren enthält der Trockentransformator keine flüssigen Isolierstoffe. Auf Grund der Isolierung müssen die Wahlanschlüsse für das Umstellen des Windungsverhältnis extern über eine Laschenverbindung umgeklemmt werden. Vorteil von Gießharztransformatoren gegenüber Öltrafos ist die verminderte Brandlast und das kleinere Bauvolumen. Das bedeutet sie werden vor allem an Orten eingesetzt, wo man die erhöhte Brandgefahr nicht in Kauf nehmen kann, bzw. nur geringes Platzangebot besteht. Die Leistung ist heutzutage auf bis zu 20 MVA und die maximale Spannungen auf bis zu 36 kV begrenzt.
- **Öltransformatoren**: Bei Öltransformatoren wird Öl als Isolator verwendet, welches auch gleichzeitig zur Kühlung dient. Die Umstellung der Stufen erfolgt direkt über einen im Kessel verbauten Umsteller, bei welchem die Antriebswelle nach außen geführt wird und meist per Hand zu bedienen ist. Es kann zwischen linearen (Kontakte auf einer Ebene angeordnet) und rotierenden Umstellern (Kontakte kreisförmig angeordnet) unterschieden werden. Meist sind die kostengünstigeren linearen Umsteller verbaut. In Abbildung 2.5 und 2.6 ist die Umsetzung beider Ausführungen zu sehen [10][11]. Der lineare Umsteller wird dabei im Trafogehäuse oberhalb der Wicklungen angebracht, der rotierende Umsteller in der Lücke zwischen den Wicklungen und der Kesselwand.



Abbildung 2.5: Rotierender Umsteller DEETAP®DU von Maschinenfabrik Reinhausen[10]



Abbildung 2.6: Linearer Umsteller MHM der Albert Maier GmbH[11]

2 Theoretischer Hintergrund

In der Regel werden die Wicklungen der Oberspannungsseite für die verschiedenen Stufen angezapft. Ein Grund dafür ist die Konstruktionsweise eines Transformators, da die Oberspannungswicklung außen angebracht ist, wird diese einfacher zugänglich. Außerdem führt die Oberspannungsseite einen geringeren Strom als die Unterspannungsseite, was vor allem bei Regeltransformatoren ein ausschlaggebender Grund dafür ist. Bei Verteiltransformatoren kommt hinzu, dass auf der Oberspannungsseite bedeutend mehr Windungen angebracht sind als auf der Unterspannungsseite. Nimmt man zum Beispiel einen 20kV/0,4kV Transformator mit der Schaltgruppe Dyn5. Dieser benötigt ein Windungsverhältnis von $\frac{20000V}{400V/\sqrt{3}} = 86,6$ und somit für 30 Windungen auf der Unterspannungsseite 2598 Windungen auf der Oberspannungsseite. Damit würde man für den üblichen Umsteller mit 5% Spannungsvariation auf der Unterspannungsseite 1,5 Windungen benötigen, was nicht möglich wäre. [6]

Anzapfung

Die Realisierung der Anzapfung kann auf verschiedene Weisen erfolgen und ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie zum Beispiel der Schaltgruppe oder der Transformatorgröße. Im Allgemeinen und vor allem bei Verteiltransformatoren handelt es sich um wenige Anzapfungen und einen kleinen Einstellbereich. Durch die Anzapfung der Wicklungen und durch die Stufenstellung entstehen "Lücken" in den Wicklungen, welche zu Querstreuflüssen führen. Diese Querstreuflüsse bewirken wiederum eine Schubkraft auf die Wicklungen, welche vor allem bei Kurzschlüssen oder Stoßspannungsbeanspruchungen problematisch werden kann. Dies wird vermieden, indem man die Lücken in der Wicklungsdurchflutung genügend verteilt oder kompensiert, um so die Querstreuflüsse und damit die hervorgerufenen Schubkräfte in Grenzen zu halten. Die Anzapfung wird außerdem meist an den Sternpunkt gelegt und nicht direkt an den Eingang, um so hohe Stoßspannungsbeanspruchung des angezapften Wicklungsteils der Leitungen und des angeschlossenen Umstellers oder Klemmbretts zu vermeiden. [9]

In den folgenden Abbildungen werden Grundschaltungen für verschiedene Möglichkeiten der Anzapfung aus [12] gezeigt. Die einfachste Methode ist in 2.7 zu sehen, wobei die angezapften Wicklungen aus schon erwähnten Gründen im Sternpunkt liegen und fünf einstellbare Stufen bietet. Die Normalstellung ist hierbei meist in der Mitte zu finden, um von dort aus Windungen hinzu oder wegschalten zu können, also eine positive oder negative Einstellmöglichkeit zu haben. Der Einfach-Umsteller aus Abbildung 2.8 wird auch bei Dreiecksschaltungen verbaut.

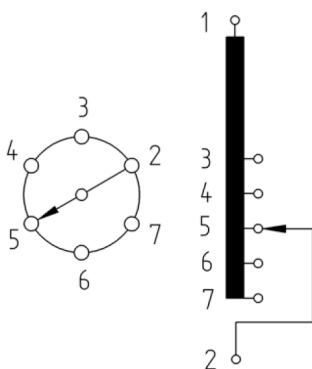


Abbildung 2.7: Anzapf-Umsteller [12]

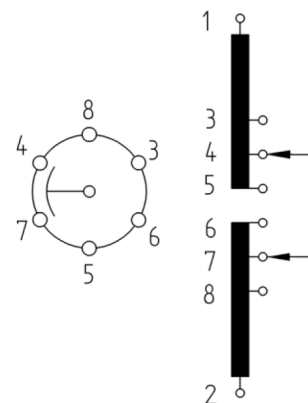


Abbildung 2.8: Einfach-Umsteller [12]

2 Theoretischer Hintergrund

Um die Schubkraft durch Querstreifflüsse im Kurzschlussfall zu verringern, kann mit dem Doppel-Mittenumsteller nach Abbildung 2.9 die Kraft auf die Wicklungen etwa halbiert werden. Der Buck-and-Boost-Umsteller aus Abbildung 2.10 ermöglicht sozusagen das Addieren, oder Subtrahieren von Wicklungen, indem diese in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung geschaltet werden. Ein Nachteil dieser Anordnung ist, dass bei der kleinsten Stufenstellung, im Gegensatz zu den anderen Anordnungen höhere Kupferverluste auftreten, da auch hier alle Wicklungen bestromt sind.[9]

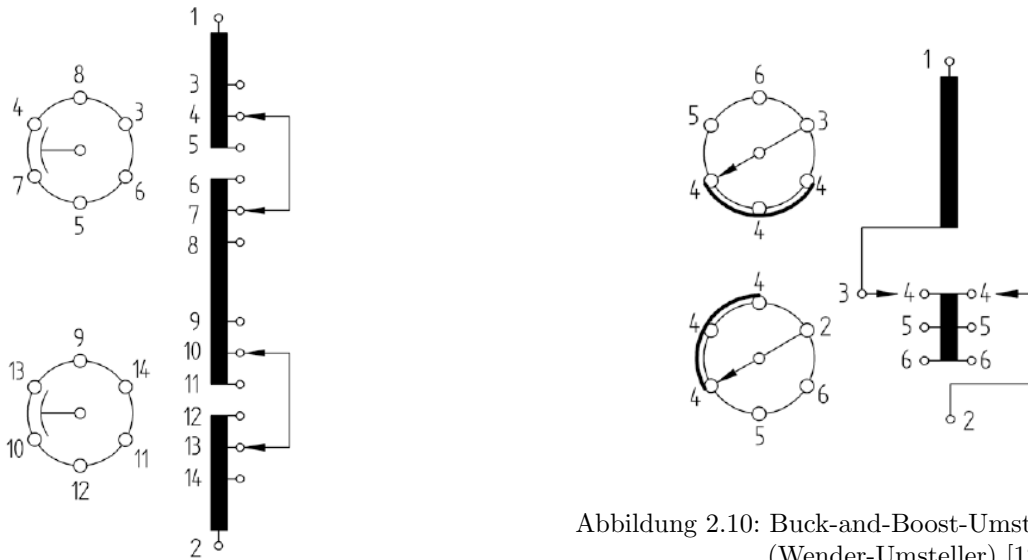


Abbildung 2.10: Buck-and-Boost-Umsteller (Wender-Umsteller) [12]

Abbildung 2.9: Doppel-Mittenumsteller [12]

2.2 Beschreibung des Netzverhaltens im Mittel- und Niederspannungsnetz

Im Folgenden wird das grundsätzliche Verhalten von Netzelementen, welches für das weitere Verständnis von Bedeutung ist, erläutert.

2.2.1 Spannungsabfall

Der maximale Spannungsabfall im Mittel- und Niederspannungsnetz ist in Abbildung 2.11 zu sehen [13]. Das Spannungsband darf durch den auftretenden Spannungsabfall über die Leitungen nicht über die Spannungsgrenzen treten, welche durch die Norm EN 50160 festgelegt werden.

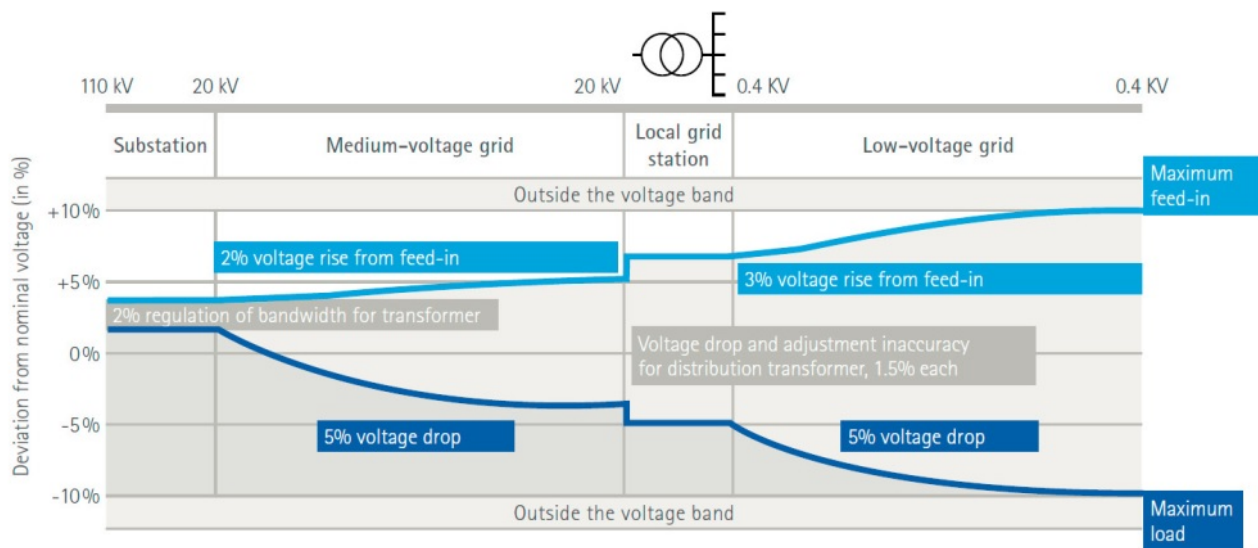


Abbildung 2.11: Spannungsband unter Einhaltung von EN 50160 [13]

Der Spannungsabfall an den einzelnen Leitungselementen wird durch die Richtung und die Größe des Leistungsflusses, die Leitungsparameter und die anliegende Spannung beeinflusst. In Abbildung 2.12 ist das Ersatzschaltbild einer Leitung unter Vernachlässigung der Querelemente dargestellt, da diese im Nieder- und Mittelspannungsnetz vernachlässigt werden können.[14]

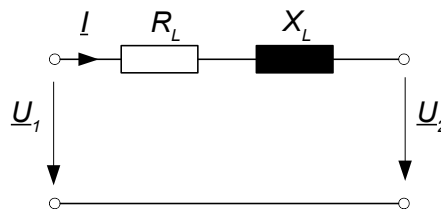


Abbildung 2.12: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Leitung

Es ist zu erkennen, dass dieses Ersatzschaltbild dem des kurzgeschlossenen Transformators gleicht. Das bedeutet, dass die Gleichungen, welche hier für die Leitung beschrieben werden, ebenso für das vereinfachte Ersatzschaltbild des Transformators gelten.

2 Theoretischer Hintergrund

Im folgenden wird die Seite 1 mit der anliegenden Spannung \underline{U}_1 als Anfang und die Seite 2 mit der Spannung \underline{U}_2 als Ende der Leitung bezeichnet. Die Scheinleistung am Ende der Leitung lässt sich aus der Spannung und dem konjugiert komplexen Strom berechnen:

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}^* \quad (2.7)$$

Daraus ergibt sich für den Strom, der auf Grund der vernachlässigten Querelemente auf beiden Seiten gleich groß ist:

$$\underline{I} = \frac{\underline{S}_2^*}{\underline{U}_2^*} = \frac{\underline{S}_1^*}{\underline{U}_1^*} \quad (2.8)$$

Die Spannung am Ende der Leitung ergibt sich durch die Spannung am Anfang weniger dem Spannungsabfall über die Leitung, also über dem Leitungswiderstand R_L und der Leitungsreaktanz X_L :

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - (R_L + jX_L) \cdot \underline{I} \quad (2.9)$$

Der Spannungsabfall $\Delta \underline{U}$ ergibt sich also zu:

$$\Delta \underline{U} = -(R_L + jX_L) \cdot \underline{I} = -\frac{(R_L + jX_L) \cdot (P_2 - jQ_2)}{\underline{U}_2^*} \quad (2.10)$$

$$\Delta \underline{U} = -\frac{R_L \cdot P_2 + X_L \cdot Q_2 + j(X_L \cdot P_2 - R_L \cdot Q_2)}{\underline{U}_2^*} \quad (2.11)$$

Wobei der Realteil der Gleichung 2.11 der Längsspannungsabfall und der Imaginärteil der Querspannungsabfall ist. Liegt eine elektrisch kurzen Leitungen vor, wovon hier ausgegangen wird (Ausnahme wären eine sehr lange Hochspannungsleitungen), tritt nur eine geringe Phasenverschiebung zwischen dem Leitungsanfang und dem Leitungsende auf. Aus diesem Grund kann man den Querspannungsabfall vernachlässigen und es ergibt sich folgende Formel für den Spannungsabfall:

$$\Delta U \approx -\frac{R_L \cdot P_2 + X_L \cdot Q_2}{U_2} \approx -\frac{R_L \cdot P_1 + X_L \cdot Q_1}{U_1} \quad (2.12)$$

Spannungsverletzungs-Index

Der Spannungsverletzungs-Index nimmt für einen betrachteten Netzabschnitt einen Wert an, welcher den Grad der Spannungsverletzungen vergleichbar macht. Somit ist es möglich, die Spannungsbandverletzungen verschiedener Simulationen miteinander zu vergleichen. Dabei wird nicht nur die Anzahl der Verletzungen berücksichtigt, sondern auch die Höhe der Spannungsüberschreitung, was eine genauere Aussage liefert. Der Spannungsverletzungs-Index (SVI) wird wie folgt definiert:

$$SVI = \sum_{i=1}^n \frac{U_{Knoten,i} - U_{lim_max}}{U_n} + \sum_{j=1}^m \frac{U_{lim_min} - U_{Knoten,j}}{U_n} \quad (2.13)$$

$U_{Knoten,i}$ mit $i = 0 \dots n$ bei oberer Spannungsbandverletzung
 $U_{Knoten,j}$ mit $j = 0 \dots m$ bei unterer Spannungsbandverletzung

Wobei U_{lim_max} und U_{lim_min} jeweils die untere und obere Spannungsbandgrenzen sind.

2.2.2 Wirkleistungsverluste und Blindleistungsbedarf

Jede Leitung welche nicht als ideal angesehen werden kann, hat Verluste in Form von Wirkleistungsverlusten und benötigt Blindleistung in Form von ihrem Blindleistungsbedarf (wird oft auch als Blindleistungsverluste bezeichnet). Die gesamte von der Leitung aufgenommene Leistung $\underline{\Delta S}_L$ setzt sich also aus den Wirkleistungsverlusten ΔP_L und dem Blindleistungsbedarf der Leitung ΔQ_L zusammen.

$$\underline{S}_L = \underline{S}_1 - \underline{S}_2 = (\underline{U}_1 - \underline{U}_2) \cdot \underline{I}^* = (R_L + jX_L) \cdot I^2 = (R_L + jX_L) \cdot \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} = \Delta P_L + j\Delta Q_L \quad (2.14)$$

Für einen vernachlässigbar kleinen Übertragungswinkel bei einer Spannung auf der Realachse wird aus Gleichung 2.8

$$\frac{\underline{S}_2^*}{U_2} = \frac{\underline{S}_1^*}{U_1} \quad (2.15)$$

und somit erhält man durch das Quadrieren beider Seiten die folgende Beziehung

$$\frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \approx \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \quad (2.16)$$

damit ergibt sich für die Wirkleistungsverluste und den Blindleistungsbedarf durch Auftrennung in den Real- und Imaginärteil

$$\Delta P_L = R_L \cdot I^2 = R_L \cdot \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \approx R_L \cdot \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \quad (2.17)$$

$$\Delta Q_L = X_L \cdot I^2 = X_L \cdot \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \approx X_L \cdot \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \quad (2.18)$$

Man erkennt also, dass bei den Wirkleistungsverlusten auch der Blindleistungsfluss mit berücksichtigt werden muss und bei den Blindleistungsverlusten der Wirkleistungsfluss. Je höher der Leistungsfluss über die Leitung, desto höher werden die Verluste. Durch die quadratische Spannung im Nenner verringern sich die Verluste bei Erhöhung der Spannung.

2.2.3 Auslastung

Die Auslastung von Netzelementen ist gegeben durch den aktuellen Strom den das Element führt, bezogen auf den thermischen Grenzstrom. Dieser thermische Grenzstrom gibt jenen Strom an, welcher durch das Betriebsmittel fließen kann, ohne dass es durch Überhitzung zu Schäden kommt. Durch Umformung mit der Formel 2.8 bekommt man die Auslastung in Abhängigkeit des Leistungsflusses. Bei Transformatoren muss die jeweilige Spannung bzw. der thermische Grenzstrom auf Ober- oder Unterspannungsseite bezogen sein.

$$\frac{|\underline{I}|}{I_{th}} = \frac{|\underline{S}_1^*|}{|\underline{U}_1^*| \cdot I_{th}} = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{U_1 \cdot I_{th}} \quad (2.19)$$

3 Modellierung

3.1 Netzelemente

Im folgenden werden Netzelemente beschrieben, welche für die Modellierung der Netze verwendet wurden. Die Modellierung und die Simulationen wurden in PSS®SINCAL durchgeführt.

3.1.1 Transformator

Der Verteiltransformator wird für die weiteren Berechnungen im Modell durch das π -Ersatzschaltbild in Abbildung 3.1 dargestellt. Das π -Ersatzschaltbild hat den Vorteil, dass kein zusätzlicher Knoten im Transformator entsteht, dessen Potential berechnet werden müsste. Bei dem hier dargestellten Modell befindet sich der Stufensteller auf der Oberspannungsseite.

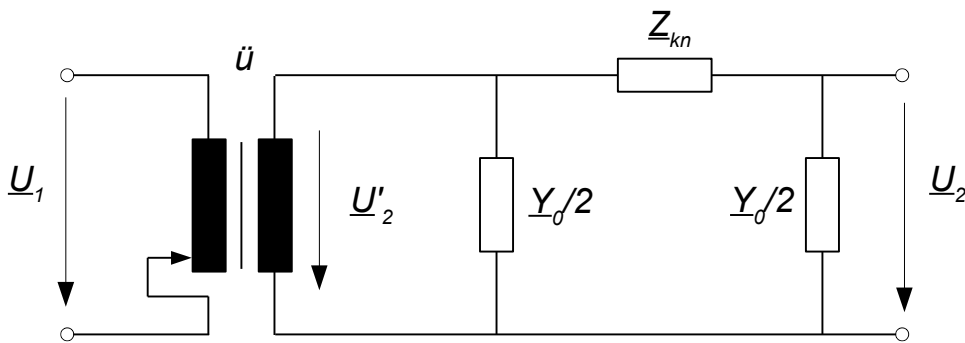


Abbildung 3.1: Ersatzschaltbild des Verteiltransformators

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k = \frac{U_{n2}^2 \left(u_r + j\sqrt{u_k^2 - u_r^2} \right)}{S_n} \quad (3.1)$$

$$\underline{Y}_0 = \frac{P_0 - j\sqrt{(i_0 \cdot S_n)^2 - P_0^2}}{U_{n2}^2} \quad (3.2)$$

$$\ddot{u} = \frac{U_{n1} + (U_{n1} \cdot u_{st} \cdot (\rho - \rho_m))}{U_{n2}} \quad (3.3)$$

\underline{Z}_k	Kurzschlussimpedanz [Ω]	\underline{Y}_0	Leerlaufadmittanz [S]
U_{n1}	Nennspannung auf der Oberspannungsseite [V]	U_{n2}	Nennspannung auf der Unterspannungsseite [V]
u_k	Kurzschlussspannung [p.u.]	u_r	Ohmsche Kurzschlussspannung [p.u.]
P_0	Eisenverluste [W]	i_0	Leerlaufstrom [p.u.]
S_n	Nennscheinleistung [VA]	u_{st}	Zusatzspannung pro Regelstufe [p.u.]
ρ	Aktuelle Regelstufe	ρ_m	Mittlere Regelstufe

3 Modellierung

Das obige Modell ist das Modell welches Sincal verwendet, unter der Vernachlässigung einer zusätzlichen Phasendrehung durch den Stufensteller. Des weiteren wurde die Phasendrehung verursacht durch die Schaltgruppe in diesem Ersatzschaltbild nicht berücksichtigt, welche eine Multiplikation des Übersetzungsverhältnisses mit $e^{j \cdot k \cdot 30^\circ}$ bedeuten würde.

Unter Vernachlässigung der Leerlaufadmittanz \underline{Y}_0 gelten für die Verluste die gleichen Formeln wie bereits in Kapitel 2.2 für die Leitung erklärt, jedoch muss nun das veränderbare Übersetzungsverhältnis mit berücksichtigt werden. Im folgenden werden als Beispiel die Verluste für den Transformator aus Abbildung 3.1, unter Vernachlässigung von \underline{Y}_0 , berechnet. Dabei ergibt sich die Spannung \underline{U}'_2 auf der Unterspannungsseite und vor der Kurzschlussimpedanz wie folgt:

$$\underline{U}'_2 = \frac{U_1}{\underline{ü}} = \frac{\underline{U}_1 \cdot U_{n2}}{U_{n1} \cdot (1 + u_{st} \cdot (\rho - \rho_m))} \quad (3.4)$$

Eingesetzt in die Gleichung 2.17 und 2.18, wobei hier anstatt \underline{U}_1 die Spannung \underline{U}'_2 eingesetzt werden muss, ergibt sich:

$$\Delta P_T = R_k \cdot \frac{P_1^2 + Q_1^2}{(|\underline{U}_1| \cdot U_{n2})^2} \cdot (U_{n1} \cdot (1 + u_{st} \cdot (\rho - \rho_m)))^2 \quad (3.5)$$

$$\Delta Q_T = X_k \cdot \frac{P_1^2 + Q_1^2}{(|\underline{U}_1| \cdot U_{n2})^2} \cdot (U_{n1} \cdot (1 + u_{st} \cdot (\rho - \rho_m)))^2 \quad (3.6)$$

3.1.2 Leitung

Da die Leitungen als elektrisch kurz betrachtet werden können, wird für sie das π -Ersatzschaltbild aus Abbildung 3.2 verwendet. Wie beim Transformator hat es bei knotenorientierten Lösungsverfahren den Vorteil, dass kein zusätzlicher Knoten entsteht dessen Potential berechnet werden müsste.

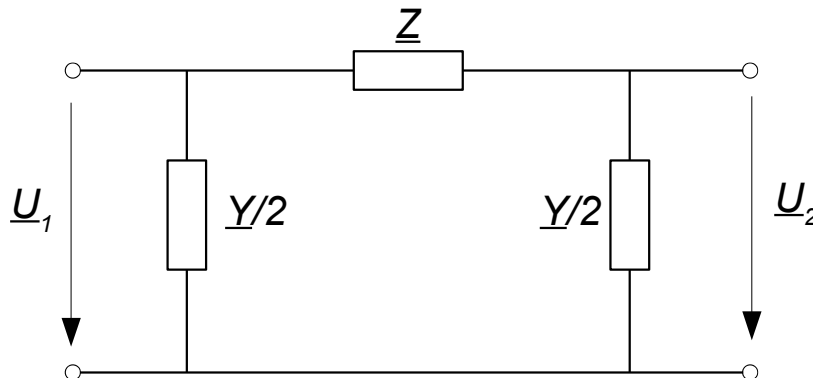


Abbildung 3.2: π -Ersatzschaltbild der Leitung

Für die Leitung gilt unter der Vernachlässigung der Arbeitsverluste (kein paralleles System):

$$\underline{Z} = R + jX = l \cdot r' \cdot (1 + (T - 20) \cdot \alpha) + j \cdot l \cdot x' \quad (3.7)$$

$$\underline{Y} = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l \cdot c' \quad (3.8)$$

r'	Widerstandsbelag [$\Omega \backslash km$]	x'	Reaktanzbelag [$\Omega \backslash km$]
c'	Kapazitätsbelag [$F \backslash km$]	α	Temperaturkoeffizient [$1/^\circ C$]
l	Leitungslänge [m]	T	Temperatur [$^\circ C$]

3.1.3 ZIP-Last

Lasten die in Form von ZIP-Lasten modelliert werden, setzen sich aus 3 verschiedenen Anteilen bezüglich der Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Spannung zusammen. Der Grund liegt darin, dass Lasten nicht ausschließlich konstant Wirk- und Blindleistung beziehen. Der Bezug hängt von der Art des Verbrauchers und der anliegenden Spannung ab. Somit setzt sich die Last aus verschiedenen Lasttypen zusammen, welche jeweils zu verschiedenen Anteilen vertreten sind. Der Wirk- und Blindleistungsverbrauch dieser Zusammensetzung lässt sich über das ZIP-Modell beschreiben:

$$P_{Last} = P_{Ln} \cdot \left[\alpha_z \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + \alpha_i \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + \alpha_p \right] \quad (3.9)$$

$$Q_{Last} = Q_{Ln} \cdot \left[\beta_z \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + \beta_i \cdot \left(\frac{U}{U_n} \right) + \beta_p \right] \quad (3.10)$$

Hier ist P_{Ln} und Q_{Ln} die Leistung bei Nennspannung, und α bzw. β die Koeffizienten der 3 verschiedenen Lasttypen, wobei $\alpha_z + \alpha_i + \alpha_p = 1$ bzw. $\beta_z + \beta_i + \beta_p = 1$ gilt.

- **Z-Lasten** (α_z, β_z): Bei diesen Lasten geht eine Verringerung der Spannung mit einer gleichzeitigen Verringerung des bezogenen Stroms einher. Dies bedeutet eine quadratische Reduktion der bezogenen Leistung wenn die Spannung absinkt.
- **I-Lasten** (α_i, β_i): Diese Lasten beziehen konstant den gleichen Strom wenn sich die Spannung ändert. Die Leistung verändert sich somit linear mit der Änderung der Spannung.
- **P-Lasten** (α_p, β_p): Die bezogene Leistung bleibt bei diesen Lasten konstant bei schwankender Spannung und ist somit von dieser unabhängig. Damit die Leistung konstant bleiben kann, muss der Strom das Verhalten der Spannung ausgleichen. Sinkt die Spannung ab, erhöht sich der bezogene Strom.

In Abbildung 3.3 ist der Leistungsbezug der drei verschiedenen Lasttypen in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen [15]. Wobei p und q die Exponenten der Spannung für die Wirk- und Blindleistung sind. Die Z-Last hat einen quadratischen Zusammenhang zwischen der Leistung und der Spannung, also $p = q = 2$. Für die I-Last bedeutet das $p = q = 1$ und für die P-Last $p = q = 0$.

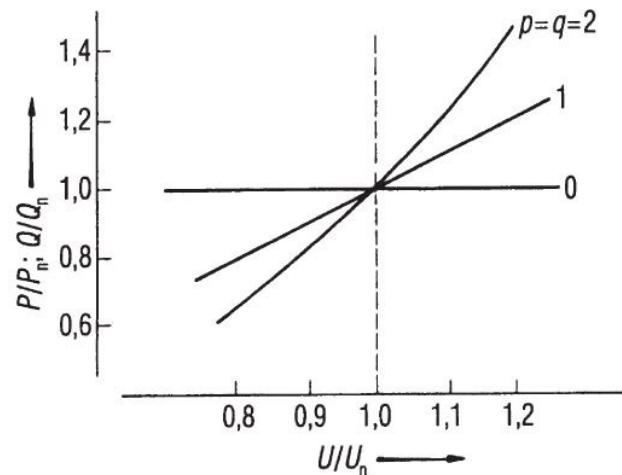


Abbildung 3.3: Leistungsbezug in Abhängigkeit der Spannung für die 3 Lasttypen [15]

3.1.4 Zusammenfassung der spannungsabhängigen Elemente

In den Netzen welche in dieser Arbeit betrachtet werden, gibt es Netzelemente, welche in Abhängigkeit der Spannung eine Auswirkung auf den Leistungsfluss haben. Diese Elemente werden in weiterer Folge als spannungsabhängige Elemente bezeichnet und sind:

- Lasten
- Wechselrichter
- Leitungen
- Transformatoren

Bei den Lasten ist die spannungsabhängigkeit über das ZIP-Modell definiert, welches in Kapitel 3.1.3 beschrieben wird. Die Spannungsabhängigkeit der Wechselrichter wird über die lokale Regelung definiert, auf welche in Kapitel 3.3 näher eingegangen wird. Leitungen und Transformatoren haben Verluste, welche sich in Abhängigkeit der Spannung ändern, wie in der Formel 2.17 bzw. 2.18 zu erkennen ist.

3.2 Netze

3.2.1 Niederspannungsnetze

Für die Simulationen in Kapitel 4 werden zwei verschiedene Niederspannungsnetze verwendet, ein urbanes und ein ländliches.

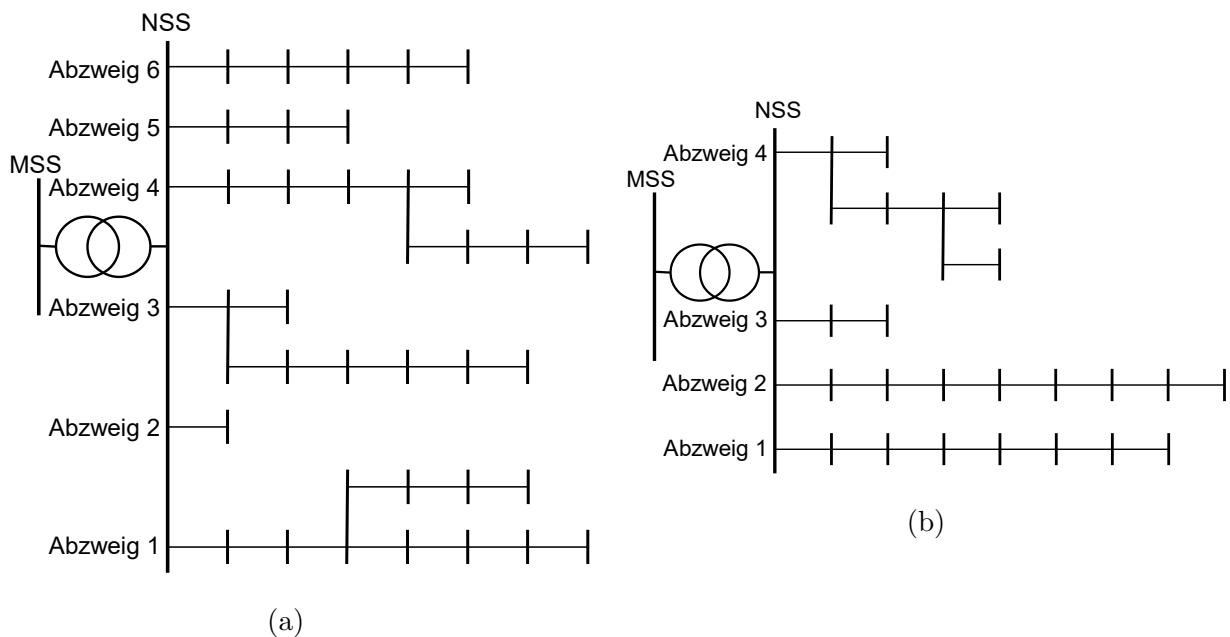


Abbildung 3.4: Niederspannungsnetze die im Modell verwendet werden: (a) Urban, (b) Ländlich

Beide Niederspannungsnetze beruhen auf realen Netzen, wobei die Lastdaten aus dem Jahr 2016 stammen. Auf Grund der Unterschiede von Netzen in der Stadt oder am Land, bietet sich die Möglichkeit zwei strukturell unterschiedlich aufgebaute Netze miteinander zu vergleichen. Diese Verschiedenheiten ergeben sich durch die geografischen Umstände, wobei sich das städtische Netz durch kürzere Leitungen mit einem großem Kabelanteil auszeichnet. Im ländlichen Netz sind auf Grund der größeren Distanzen zwischen den Haushalten, also den Lasten, längere Leitungen mit

3 Modellierung

einem großem Freileitungsanteil zu finden. Die Struktur der verwendeten Netze ist in Abbildung 3.4 zu sehen, wobei mit *MSS* und *NSS* jeweils die Sammelschienen im Mittelspannungsnetz und im Niederspannungsnetz gekennzeichnet sind. Auf jedem Knoten im Niederspannungsnetz, welcher ebenfalls durch eine Sammelschiene zu erkennen ist, hängen Lasten bzw. dezentrale Einspeiser. Eine genauere Aufschlüsselung der Netzdaten ist im Appendix in den Tabellen 7.1 bis 7.3 zu finden.

Die Lasten im Niederspannungsnetz sind in Form von ZIP-Lasten modelliert, welche in Kapitel 3.1.3 bereits erläutert wurden. Die Koeffizienten $(\alpha_z, \beta_z, \alpha_i, \beta_i, \alpha_p, \beta_p)$ der Lasten setzen sich aus den verschiedensten Faktoren zusammen und hängen von der Zusammensetzung der angeschlossenen Geräte in einem Haushalt ab. Genau betrachtet ändern sich diese Koeffizienten, sobald im Haushalt ein Gerät zu- oder abgeschaltet wird. In [16] werden mögliche ZIP-Koeffizienten vorgestellt, welche in verschiedene Haushalts-Klassen unterteilt sind. Diese Klassen unterscheiden sich im jährlichen Stromverbrauch der Haushalte. Die Zusammensetzung der Geräte im Haushalt beruht auf Untersuchungen in der Stadt New York.

Die Koeffizienten für die Niederspannungsnetze Urban und Ländlich wurden über den Jahresverbrauch ermittelt und sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

	α_z	β_z	α_i	β_i	α_p	β_p
Urban	1.18	8.29	-1.64	-13.67	1.47	6.38
Ländlich	0.96	6.28	-1.17	-10.16	1.21	4.88

Tabelle 3.1: ZIP-Koeffizienten der Lasten in den Niederspannungsnetzen des Modells

Abbildung 3.5 zeigt die Spannungsabhängigkeit jeweils eines Haushalts, also einer Last, in den beiden Niederspannungsnetzen. Dabei würde als Nennleistung die Maximalleistung P_{Last}^{max} (siehe Tabelle 7.2) angenommen.

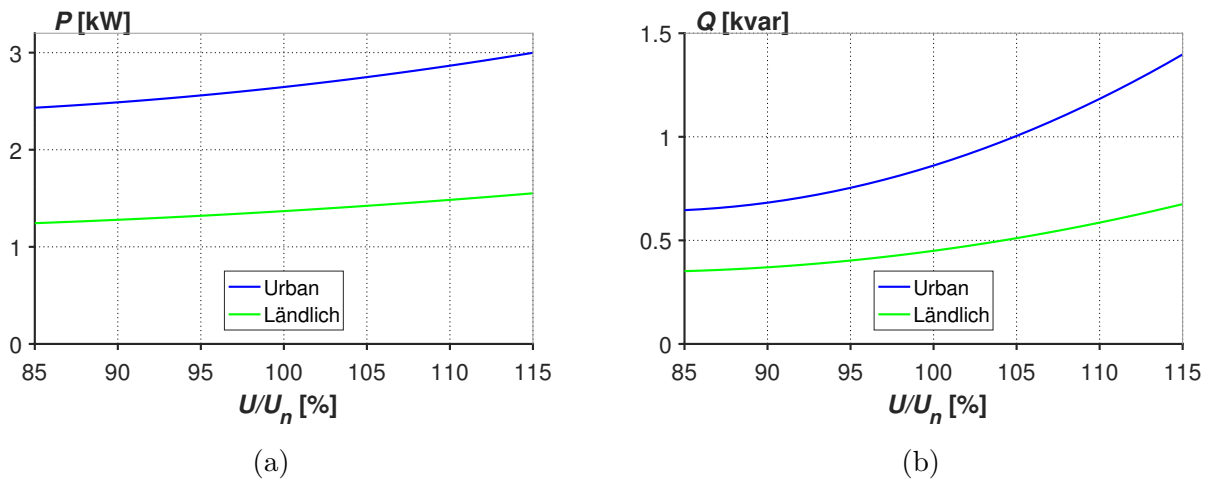


Abbildung 3.5: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie für eine Last im Niederspannungsnetz Urban und Ländlich bei P_{Last}^{max} :
(a) $P(U)$, (b) $Q(U)$

Last im Niederspannungsnetz

Die Lasten im Niederspannungsnetz sind als ZIP-Lasten modelliert, welche in Kapitel 3.1.3 erläutert werden. Um verschiedene Szenarien definieren zu können, benötigt es ein Lastprofil und die Maximallast. In Abbildung 3.6 sind Lastprofile aus [17] für drei verschiedene Typen von Niederspannungsnetzen zu sehen. Die in blau gekennzeichnete Linie gibt das Profil eines

3 Modellierung

Wohngebietes wieder, welches für die Analysen in dieser Arbeit verwendet werden wird, wobei nur diskrete Zeitpunkte analysiert werden.

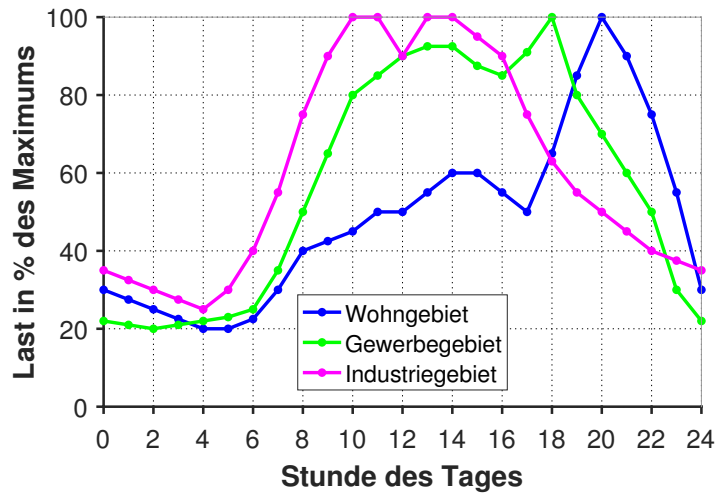


Abbildung 3.6: Lastprofil eines Niederspannungsnetzes für verschiedene Gebiete [17]

Um die Extremfälle von Last und Einspeisung betrachten zu können wird für den Einspeisefall eine Last von $0.5 \cdot P^{max}$ verwendet, da wie in Abbildung 3.6 zu erkennen ist die Last um die Mittagszeit, also bei maximaler PV-Einspeisung, bei ca. der halben Maximallast liegt. Die Lastspitze wird in Wohngebieten erst um ca. 20 Uhr erreicht und man kann davon ausgehen, dass bei diesen Spitzenlasten in Wohngebieten kaum mehr Einspeisung aus PV-Anlagen stattfinden wird. Im Gegensatz zu Wohngebieten treten bei Gewerbe- oder Industriegebieten die hohen Lasten unter tags auf, das heißt zur normalen Arbeitszeit. Ihre Lastspitzen sind um die Mittagszeit zu erwarten, also genau dann, wenn die PV-Anlagen maximale Einspeisung vorweisen können. Die minimale Last ist bei allen drei Gebieten in der Nacht zwischen 2 und 5 Uhr zu erwarten und beträgt ca. $0.2 \cdot P^{max}$.

3.2.2 Mittelspannungsnetz

In Abbildung 3.7 ist der für die Simulationen aufgebaute theoretische Mittelspannungsabzweig zu sehen. Dieser dient dazu die Auswirkungen einer Änderung der fix eingestellten Stufenstellungen auf das Mittelspannungsnetz zu analysieren.

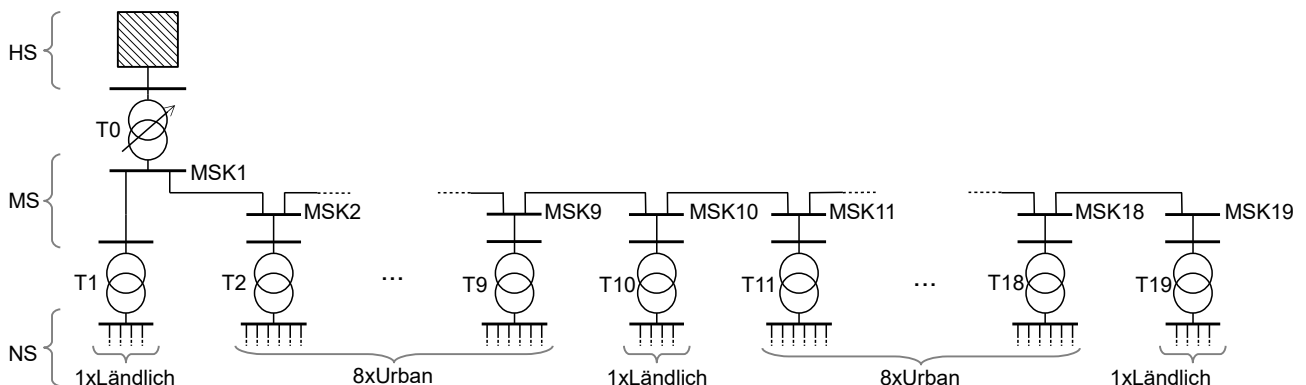


Abbildung 3.7: Theoretischer Mittelspannungsabzweig

3 Modellierung

Beim Aufbau des Abzweigs diente als Orientierung ein reales Mittelspannungsnetz, von diesem stammen die Leitungsdaten und die prinzipielle Struktur des Abzweigs. Es wurde darauf geachtet, dass Leitungsdaten von Leitungen stammen, welche im realen Netz häufig vorkommen. In der Grafik 3.7 werde die jeweiligen Knoten im Mittelspannungsabzweig mit MSK_i bezeichnet. An dem Mittelspannungsabzweig sind insgesamt 19 Niederspannungsnetze angeschlossen. 16 dieser Niederspannungsnetze sind vom Typ Urban und drei vom Typ Ländlich, welche in Kapitel 3.2.1 beschrieben werden. Die ländlichen Netze wurden am Anfang, in der Mitte und am Ende des Mittelspannungszweiges eingefügt, um sie mit den urbanen Netzen vergleichen zu können. Es wurden für die Leitungen des Mittelspannungsabzweiges drei verschiedene Leitungsquerschnitte verwendet, wobei für die ersten sechs Leitungen der größte und für die letzten sechs Leitungen der kleinste Querschnitt verwendet wurde. Die sechs Leitungen dazwischen haben den mittleren Querschnitt. Am Ende eines Abzweigs werden aus Kostengründen meist kleinere Querschnitte verwendet, da das Ende eines solchen bei einem strahlenförmigen Netz weniger belastet ist als der Anfang. Der Transformator T_0 zwischen dem Hochspannungsnetz und dem Mittelspannungsnetz ist geregelt ausgeführt und hält die Spannung auf ca. $u_{MSK1} = 102.5\%$. Um an den Grenzen zwischen zwei Regelstufen ein eventuelles Auf- und Abschalten zu verhindern, wird eine Regelbandbreite von 2% vorgegeben, das bedeutet die Spannung der Unterspannungsseite des HS-/MS-Transformators liegt zwischen 101.5% und 103.5%. Auf welche Spannung genau geregelt ist, wird dem jeweiligen Verteilnetzbetreiber überlassen, weswegen es hier keinen einheitlichen Wert gibt, der herangezogen werden kann. In [14] wird davon ausgegangen, dass auf 102% geregelt wird und in [13] auf 102,5%. Die Regelung über eine sogenannte "line drop compensation" (LDC) wird hier nicht implementiert, da sie bei hoher dezentraler Einspeisung zu Fehlverhalten führen kann [18][19].

Die einzelnen Niederspannungsnetze sind mit Zuleitungen in der Länge von 0.7km ausgeführt und haben den kleinsten der drei Freileitungsquerschnitte. Die genauen Daten des Netzes sind im Anhang in Tabelle 7.5 und 7.6 zu finden.

Die Simulationen wurden sowohl mit einem reinen Freileitungs-Mittelspannungsnetz als auch mit einem Kabel-Mittelspannungsnetz aufgebaut. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen, wurde darauf geachtet, dass der thermische Grenzstrom der Freileitungen und der Kabel in etwa gleich sind. Die Daten der Leitungen sind in Tabelle 3.2 zu sehen. Da die Leitungsdaten aus einem realen Netz entnommen wurden, war es nicht möglich den exakt gleichen thermischen Grenzstrom für Freileitung und Kabel zu erzielen.

Typ	A [mm ²]	r' [Ω/km]	x' [Ω/km]	c' [nF/km]	I _{th} [A]
Freileitung 1	35	0.8353	0.376	9.6	170
Freileitung 2	50	0.5946	0.376	9.6	210
Freileitung 3	95	0.358	0.376	9.6	350
Kabel 1	50	0.641	0.146	175	173
Kabel 2	95	0.32	0.132	216	252
Kabel 3	240	0.125	0.113	304	419

Tabelle 3.2: Daten der Freileitungen und Kabel im Mittelspannungsabzweig

3.3 Lokale Blindleistungsregelung

Die lokale Blindleistungsregelung ist für den Verteilnetzbetreiber eine Möglichkeit, Spannungsproblemen über dezentrale Erzeugungseinheiten entgegenzuwirken. In den technischen und organisatorischen Regeln für Betrieb und Benutzer von Netzen (TOR) im Teil D4 wird erläutert, welche prinzipiellen Möglichkeiten eine dezentrale Erzeugungsanlage bereitstellen muss, um an das Netz angeschlossen werden zu dürfen [20].

Im Folgenden wird auf die Regelung für PV-Anlagen mit Wechselrichtern größer als $S_n = 3.68kVA$ näher eingegangen. Solche Anlagen müssen die folgenden Blindleistungsregelungsstrategien bereitstellen können: $\cos\varphi$ fest, $\cos\varphi(P)$, $Q(U)$, Q fix. In dieser Arbeit wird nur die Blindleistungsregelungsstrategie $Q(U)$ betrachtet, da sie wesentliche Vorteile gegenüber den anderen Regelungen hat und jene ist, bei welcher sich der Arbeitspunkt durch die Veränderung der Stufenstellung des Verteiltransformators ändert. Im Vergleich zu den anderen Regelungen berücksichtigt sie den aktuellen Zustand des Netzes über die Spannung als Eingangsgröße. Genau diese Eingangsgröße wird durch eine veränderte Stufenstellung beeinflusst, was es besonders interessant macht die $Q(U)$ -Regelung in diesem Kontext zu betrachten. Bei der $\cos\varphi(P)$ -Regelung kann es außerdem bei hoher Einspeisung der PV-Anlage und bei gleichzeitiger hoher Last zu unnötigen Blindleistungsflüssen kommen.[18][21]

Laut TOR D4 muss ein im Niederspannungsnetz angeschlossener Wechselrichter, mindestens Blindleistung im Ausmaß von $\frac{Q_{max}}{S_n} = \pm 43.6\%$ bereitstellen können, was einen maximalen $\cos\varphi$ von 0.90 bedeutet. Eine Kennlinie ist in der TOR ebenfalls festgelegt, jedoch sind die genauen Arbeitspunkte nicht definiert, bei welchen der Wechselrichter anfangen und aufhören muss Blindleistung einzuspeisen. Die genaue Parametrierung des Wechselrichters obliegt dem Verteilnetzbetreiber. Abbildung 3.8 zeigt eine Kennlinie, welche in [22] als empfohlene Standard-Kennlinie aufgeführt ist. Darum wird bei den Simulationen in dieser Arbeit mit aktiver $Q(U)$ -Regelung diese Kennlinie verwendet, wobei für die maximale Blindleistung $Q_{max} = S_n \cdot 0.436$ gilt.

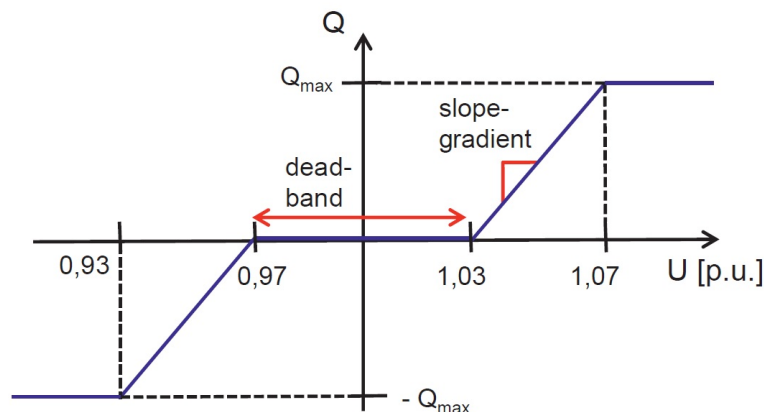


Abbildung 3.8: Empfohlene $Q(U)$ -Kennlinie aus [22]

Die Kennlinie zeigt, dass der Wechselrichter bei hoher Spannung Blindleistung konsumiert, was die Spannung im Netz verringern soll. Dieses Verhalten beginnt bei einer Spannung im Netz welche $1.03 \cdot U_n$ entspricht und erreicht das Maximum bei $1.07 \cdot U_n$. Umgekehrt speist der Wechselrichter Blindleistung ins Netz wenn die Spannung zu niedrig ist. Zwischen $0.97 \cdot U_n$ und $1.03 \cdot U_n$ wird vom Wechselrichter nur Wirkleistung ins Netz gespeist. Da die Spannung immer lokal am Wechselrichter gemessen wird, wird nur dort im Netz Blindleistung verbraucht oder eingespeist, wo die Spannung gestützt werden muss.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

4.1 Vereinfachtes Ersatznetz

Für die folgenden Betrachtungen wird ein reduziertes Netz verwendet, um die grundlegende Wirkung des Verteiltransformators auf die Spannung an den angeschlossenen Sammelschienen auf Ober- und Unterspannungsseite zu analysieren. Das hierfür verwendete reduzierte Netz ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

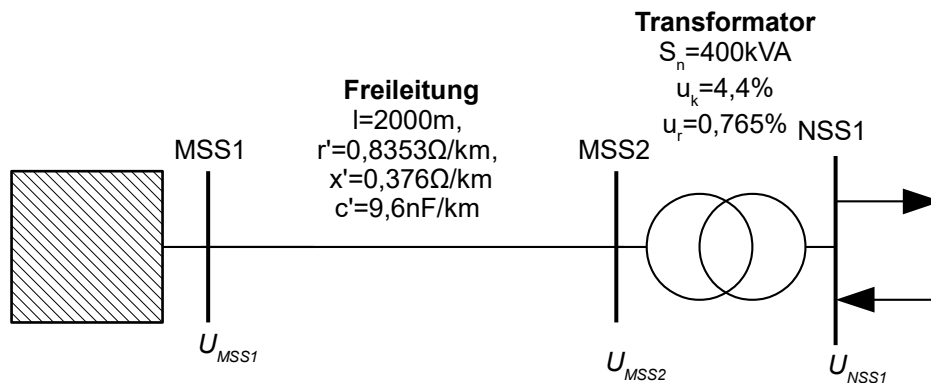


Abbildung 4.1: Netzmodell für die Analyse der Wirkung des Verteiltransformators

Die Freileitung hat die angegebenen Daten und eine Länge von 2 km. Im Folgenden wird die Spannung an der Sammelschiene MSS1 (Mittelspannungs-Sammelschiene), auf welche die Netzeinspeisung passiert, mit U_{MSS1} bezeichnet. Die Sammelschienen auf der Ober- bzw. Unterspannungsseite des Transformators wird mit MSS2 bzw. NSS1 (Niederspannungs-Sammelschiene) bezeichnet, die anliegende Spannung mit U_{MSS2} und U_{NSS1} . Auf der Sammelschiene NSS1 ist eine Last mit einem Wirkleistungsbezug von $P_l = 238,42\text{kW}$ und einem Blindleistungsbezug von $Q_l = 78,37\text{kvar}$ angeschlossen, das entspricht einem $\cos(\varphi)$ von 0,95. Die Werte für P_l und Q_l wurden aus dem Niederspannungsnetz Urban entnommen und entsprechen dort der maximalen Last aus dem Jahr 2016. Für diese Untersuchungen wurde eine "PQ-Last" ohne Spannungsabhängigkeit verwendet. Ebenfalls auf dieser Sammelschiene hängt eine Einspeisung, welche maximal $P_{pv} = 238,42\text{kW}$ einspeisen kann und zur Simulation eines rückwärtigen Wirkleistungsflusses dient (hierzu wird $P_l = 0\text{kW}$ gesetzt). Der 400kVA Transformator entspricht jenem Transformator, welcher ebenfalls für das Niederspannungsnetz Urban verwendet wurde und ist einem Datenblatt für flüssigkeitsgekühlte Verteiltransformatoren der Firma Rauscher Stoecklin entnommen. Die Daten dazu sind im Appendix in der Tabelle 7.3 zu entnehmen [23].

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Für die folgenden Simulationen ist der Transformator nicht belastet, das bedeutet, die $P_l = 0$, $Q_l = 0$ und $P_{pv} = 0$. In Abbildung 4.2a sind die Anzapfungen der Wicklung des Verteiltransformators im Modell veranschaulicht. Der Einstellbereich, also die Zusatzspannung für je eine Regelstufe, beträgt $u_{st} = 2,5\%$. Wenn nicht explizit angegeben, wird für die restlichen Simulationen von einem Verteiltransformator ausgegangen, bei welchem sich die Anzapfungen für den Umsteller auf der Oberspannungsseite befinden.

In Abbildung 4.2b sieht man, dass sich bei der Umstellung auf der Oberspannungsseite ein nichtlinearer Verlauf der Spannung U_{NSS1} ergibt. Das Resultat ist bei Stufe 1 eine Abweichung von $0,26\%$ der Spannung, je nach Seite des Umstellers. In der Mittelstellung, also Stufe 3, gibt es keine Abweichung. Ein Blick auf das Übersetzungsverhältnis gibt eine Erklärung dafür: $\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$. Wird die Stufenstellung auf der Oberspannungsseite geändert, ändert sich n_1 und für die Spannung auf der Unterspannungsseite gilt: $U_2 = \frac{n_2}{n_1} \cdot U_1$. Damit verändert sich der Wert des Nenners, was einen nichtlinearen Verlauf ergibt, welcher in den folgenden Analysen zu sehen sein wird. Erfolgt die Umstellung auf der Unterspannungsseite, ist die sich ändernde Größe im Zähler und es ergibt sich ein linearer Verlauf, wie in Abbildung 4.2b zu sehen. Um einen besseren Vergleich zu ermöglichen, wurde die Spannung bei Anzapfung auf der Unterspannungsseite gespiegelt. Die Spannungen an der Sammelschiene NSS1 für den unbelasteten Transformator, bei Nennspannung auf der Oberspannungsseite und unter Vernachlässigung der Verluste, sind wie folgt (oberspannungsseitiger Umsteller):

Stufe 1	Stufe2	Stufe3	Stufe 4	Stufe 5	$[U_{NSS1}/U_n]$
105.26%	102.56%	100%	97.56%	95.24%	

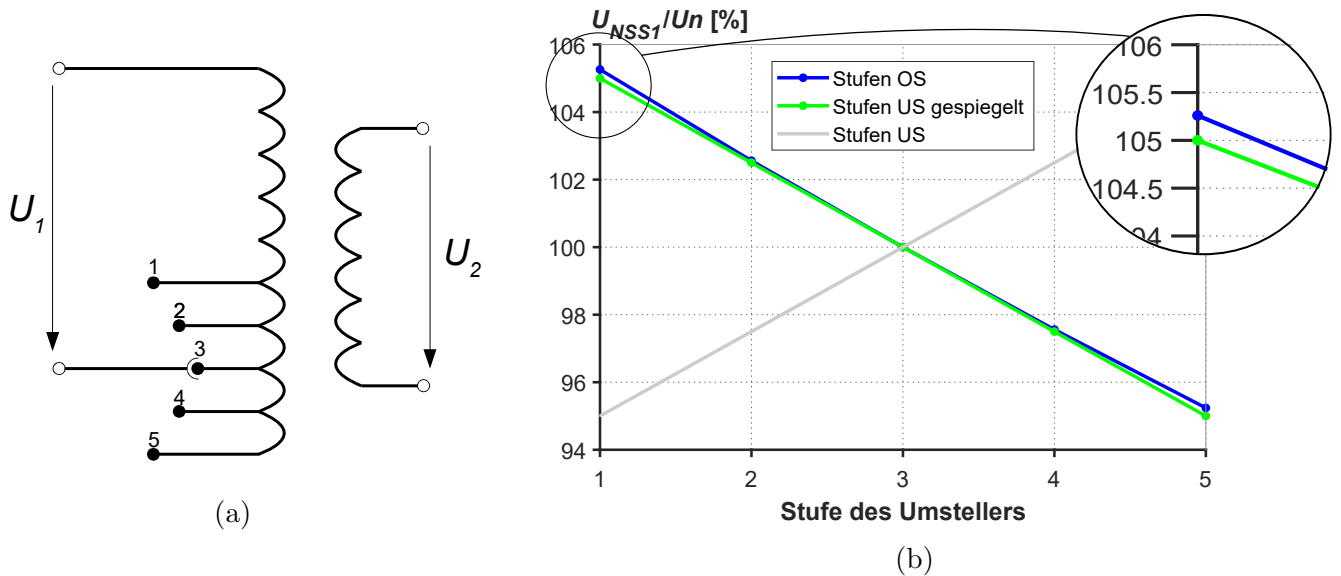


Abbildung 4.2: (a) Veranschaulicht die 5 Stufen des Verteiltransformators im Modell; (b) zeigt den Vergleich von U_{NSS1} bei Umstellung auf Ober- und Unterspannungsseite des unbelasteten Transformators

Um die Wirkung der Stufenstellung auf die Spannung im Niederspannungsnetz zu sehen, zeigt Abbildung 4.3 die Spannung U_{NSS1} für die fünf Stufen und für drei verschiedene Spannungen der Netzeinspeisung mit einer Spannung U_{MSS1} von 95% , 100% und 105% . Die Spannungsänderung auf der Unterspannungsseite zwischen den einzelnen Stufen beträgt $\sim 2.5\%$. Querverluste, also Eisenverluste und der Leerlaufstrom, wurden für diese Analyse nicht berücksichtigt.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Man erkennt, dass U_{NSS1} bei überspannungsseitigem Umsteller mit steigender Stufenzahl verringert wird, da mehr Windungen bei gleichbleibender Spannung einen geringeren magnetischen Fluss im Eisenkern bedeuten. Bei unterspannungsseitigen Anzapfungen hat man genau das gegenteilige Verhalten, da sich hier durch mehr Windungen, z.B. bei Stufe 5, eine größere Flussverkettung ergibt und somit eine größere Spannung auf der Unterspannungsseite.

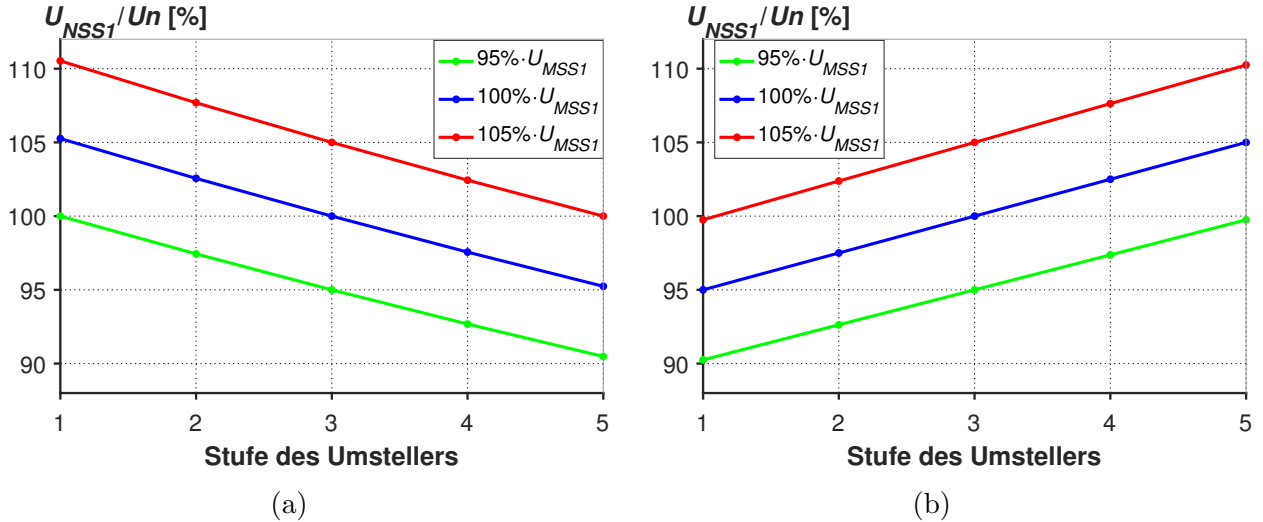


Abbildung 4.3: U_{NSS1} bei verschiedenen Stufen des Verteiltransformators ohne Belastung: (a) überspannungsseitiger Umsteller, (b) unterspannungsseitiger Umsteller

Für die Untersuchung der Wirkung von verschiedenen Leistungsflüssen über die Leitung und den Transformator auf die Spannung werden fünf verschiedene Fälle betrachtet. Beim Verteiltransformator wurden für diese Simulationen die Eisenverluste und der Leerlaufstrom mit berücksichtigt. Es handelt es sich nicht um realistische Belastungsfälle, sie dienen ausschließlich zum theoretischen Verständnis. Der erste Belastungsfall ist mit P_{Last} ($P_l = 238,42kW$, $P_{pv} = 0kW$) der Bezug von Leistung durch das Niederspannungsnetz mit einem $\cos(\phi)$ von 0.95, was den konventionellen Leistungsfluss vom Mittelspannungsnetz ins Niederspannungsnetz darstellt. Für den Fall $P_{Einspeisung}$ ($P_l = 0kW$, $P_{pv} = 238,42kW$) dreht sich der Wirkleistungsfluss um, was einer hohen dezentralen Einspeisung im Niederspannungsnetz gleich kommt. Alle Fälle wurden jeweils mit einem $\cos(\phi)$ von 0.95 und 1 durchgerechnet. Der reine Wirkleistungsfluss soll die Q-Autarkie des Niederspannungsnetzes simulieren, also den Fall bei dem das Niederspannungsnetz die benötigte Blindleistung selbst bereit stellt. Um die Wirkung der reinen Blindleistung auf den Spannungsabfall über die Leitung und den Transformator zu betrachten, wird im fünften Belastungsfall der reine Blindleistungsfluss analysiert. Zur besseren Übersicht sind die fünf Belastungsfälle in der Tabelle 4.1 zusammengefasst.

P_{Last} $\cos(\varphi) = 0,95$	$P_{Einspeisung}$ $\cos(\varphi) = 0,95$	P_{Last} $\cos(\varphi) = 1$	$P_{Einspeisung}$ $\cos(\varphi) = 1$	Q $\cos(\varphi) = 0$

Tabelle 4.1: Belastungsfälle für das vereinfachte Ersatznetz

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

In Abbildung 4.4a sind für fünf verschiedene Belastungsfälle des Transformators jeweils die Spannungen an den drei Sammelschienen aus dem Modell in Abbildung 4.1 zu sehen. Die Wirkung des Stufenstellers ist, unabhängig von der Leistungsflussrichtung, die Anhebung oder Senkung der Spannung im Niederspannungsnetz und gekennzeichnet durch ‐Zusatzspannung durch Stufenstellung‐. Die verschiedenen Belastungsfälle verursachen unterschiedliche Spannungsabfälle über die Mittelspannungsleitung und über den Transformator. Je nach Stufe wird die Spannung im Mittelspannungsnetz angehoben oder abgesenkt.

Zusätzlich erkennt man in Abbildung 4.4a, dass die Spannungsanhebung in Stufe 1 und 2 größer ist als die Spannungssenkung in Stufe 4 und 5. Dieser Unterschied ergibt sich durch den nichtlinearen Verlauf aus 4.2b.

Der Spannungsabfall über den Transformator ändert sich je nach Belastungsfall. Im Gegensatz zu den anderen Belastungsfällen gibt es bei der reinen Wirkleistungsrückspeisung aus dem Niederspannungsnetz eine Spannungserhöhung über den Transformator. Kommt im Fall ‐ $P_{Einspeisung}$ mit $\cos(\phi) = 0.95$ ‐ der Blindleistungsbezug des Niederspannungsnetzes hinzu, tritt trotz des geringeren Blindleistungsflusses im Vergleich zum Wirkleistungsfluss ein Spannungsabfall und keine Spannungserhöhung auf. Der Grund liegt darin, dass die Blindleistung über die Reaktanz des Transformators einen größeren Spannungsabfall verursacht, als die Wirkleistung über die Resistanz. Die bezogene Kurzschlussreaktanz und Resistanz ergibt sich für diesen Transformator über:

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} = \frac{Z_k \cdot I_n}{U_n} = \frac{Z_k}{Z_n} = z_k \quad (4.1)$$

zu $x_k = u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} = \sqrt{(4.4\%)^2 - (0.765\%)^2} = 4.33\%$ und $r_k = u_r = 0.765\%$, was den größeren Spannungsabfall durch die Blindleistung erklärt. Den Unterschied erkennt man auch beim Vergleich der Belastungsfälle ‐ P_{Last} mit $\cos(\phi) = 1$ ‐ und ‐ Q mit $\cos(\phi) = 0$ ‐. Der größte Spannungsabfall über den Transformator ergibt sich folglich bei Wirk- und Blindleistungsbezug des Niederspannungsnetzes.

In Abbildung 4.4b und 4.4c sind schematische Zeigerdiagramme für den Bezug und die Rückspeisung des Niederspannungsnetzes dargestellt. Hier ist der Grund für den Spannungsabfall trotz Leistungsrückspeisung vom Niederspannungsnetz ins Mittelspannungsnetz ebenfalls zu erkennen.

Auf Grund fehlender spannungsabhängiger Elemente im Niederspannungsnetz, welches hier nur aus einer Last und einer Einspeisung besteht, hat die Änderung der Stufenstellung keine Auswirkung auf die Spannung an der Oberspannungsseite des Transformators. Somit ist hier zwischen MSS1 und MSS2 nur der Spannungsabfall für die jeweiligen Belastungsfälle zu erkennen.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

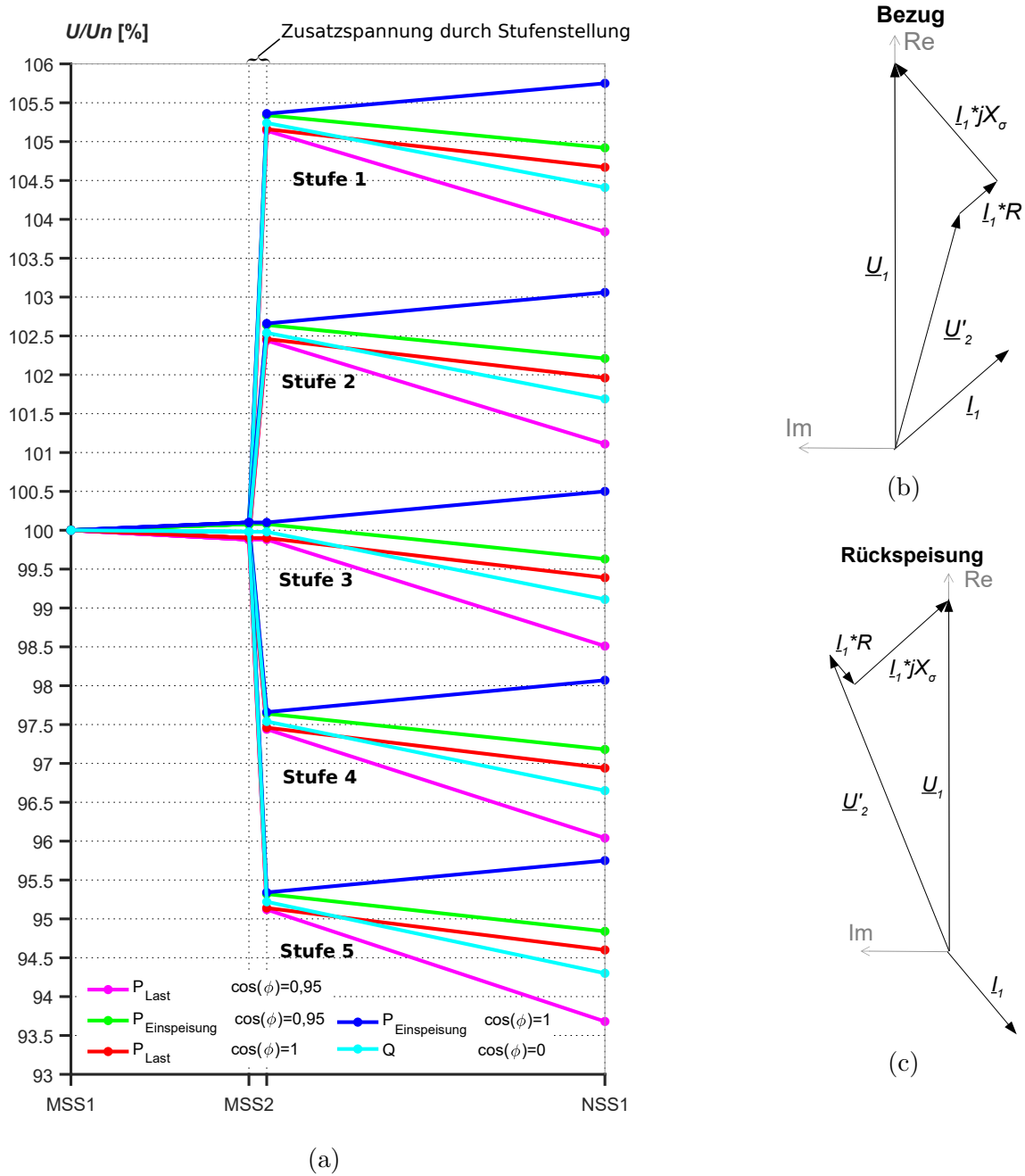


Abbildung 4.4: Analyse der Spannungsabfälle durch die Belastungsfälle: (a) Spannungen an den Sammelschienen, Schematisches Zeigerdiagramm Stufe 3 für (b) Bezug und (c) Rückspeisung über den Transformator

U_{NSS1}/U_n [%]	P_{Last} $\cos(\varphi) = 0,95$	$P_{Einspeisung}$ $\cos(\varphi) = 0,95$	P_{Last} $\cos(\varphi) = 1$	$P_{Einspeisung}$ $\cos(\varphi) = 1$	Q $\cos(\varphi) = 0$
Stufe 1	103.84	104.92	104.67	105.7500	104.41
Stufe 2	101.11	102.21	101.96	103.06	101.69
Stufe 3	98.51	99.63	99.39	100.50	99.11
Stufe 4	96.04	97.18	96.94	98.07	96.65
Stufe 5	93.68	94.84	94.6	95.75	94.30
U_{MSS2}/U_n [%]	99.88	100.08	99.90	100.10	99.98

Tabelle 4.2: U_{NSS1} und U_{MSS2} für verschiedene Stufenstellungen und Belastungsfälle

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Abbildung 4.5 zeigt die Verluste des Transformators in den jeweiligen Stufenstellungen, es wurde die Simulation am Netz aus Abbildung 4.1 verwendet unter Berücksichtigung der Eisenverluste und des Leerlaufstromes. Als Belastungsfall wurde " P_{Last} bei $\cos(\varphi) = 0.95$ " angenommen.

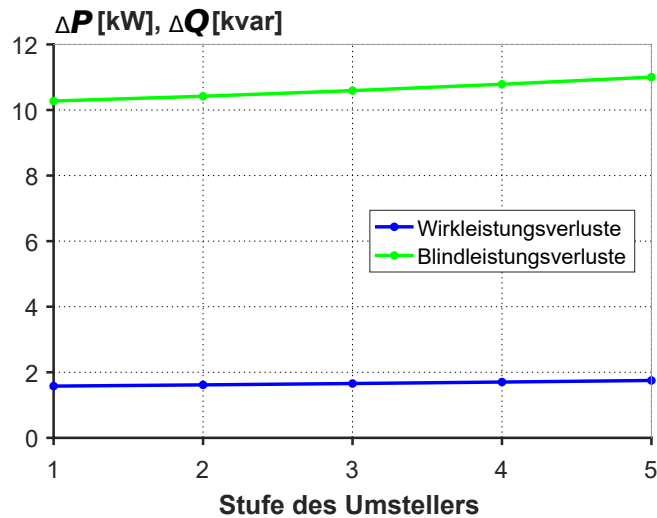


Abbildung 4.5: Wirk- und Blindleistungsverluste des Transformators

Es ist zu erkennen, dass die Verluste zunehmen, je mehr Windungen angezapft werden, also je höher die Stufe des Verteiltransformators ist. Trotz des geringeren Blindleistungsflusses sind die Blindleistungsverluste höher als die Wirkleistungsverluste. Dies liegt unter anderem daran, dass die Kurzschlussreaktanz im Transformator höher ist als die Kurzschlussresistanz ($u_r = 0,765\%$ und $u_x = 4,33\%$). Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Abhängigkeit der Verluste des Transformators von der Stufenstellung vergleichsweise gering sind. Es gilt zu berücksichtigen, dass hier der Leistungsfluss über den Transformator für jede Stufenstellung derselbe ist. Ändert sich der Leistungsfluss auf Grund einer Änderung der Stufenstellung, hat auch dieser eine Auswirkung auf die Verluste des Transformators.

Einfluss der Struktur des Mittelspannungsnetzes

Im Folgenden wird die Leitung zwischen Netzeinspeisung und dem Transformator einmal als Freileitung und einmal als Kabel ausgeführt. Die Daten für das verwendete Kabel wurden aus einem realen Mittelspannungsnetz entnommen, wobei das Kabel für diesen Vergleich dieselbe Länge wie die Freileitung hat. Die Wahl fiel auf dieses Kabel und diese Freileitung, da es in dem Mittelspannungsnetz für welches reale Daten zur Verfügung standen, die am häufigsten verwendeten Leitungen waren. Auch hier geht es ausschließlich um die theoretische Betrachtung des Einflusses der unterschiedlichen Leitungsparameter. Die Daten der Leitungen sind im Appendix in Tabelle 7.4 zu finden.

Für die weitere Analyse wurden die fünf Belastungsfälle jeweils mit der Freileitung und dem Kabel berechnet. In 4.6 ist die Spannung auf der Oberspannungsseite des Transformators U_{MSS2} für die verschiedenen Belastungsfälle aufgetragen.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

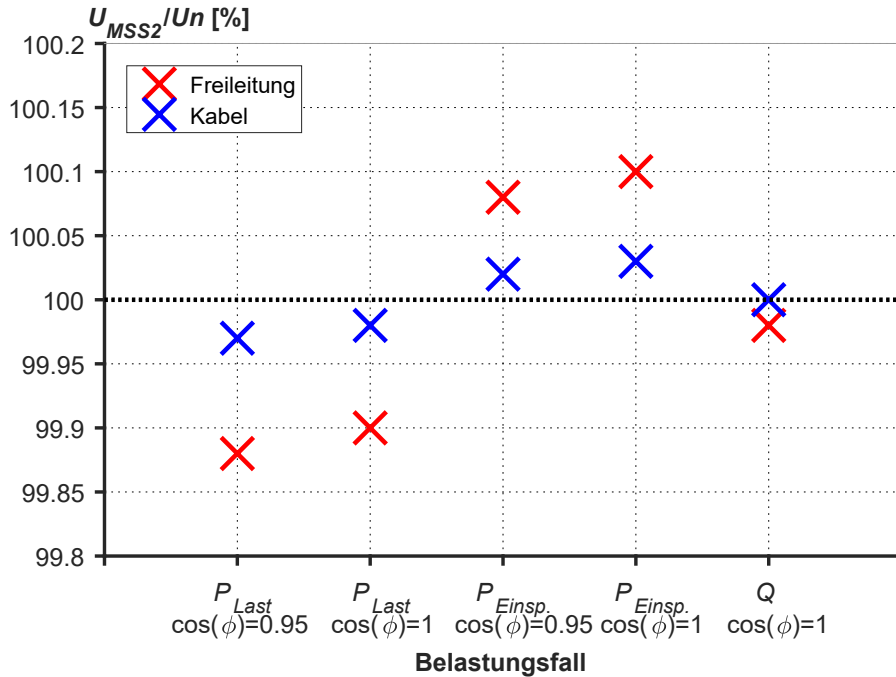


Abbildung 4.6: U_{MSS2} jeweils für Freileitung und Kabel bei verschiedenen Belastungsfällen

Der Transformator ist für alle Belastungsfälle in Mittelstellung und die Spannung U_{MSS1} wurde auf 100% eingestellt. Bezieht das Verteilnetz Wirk- und Blindleistung ist der Spannungsabfall über das Kabel auf Grund der Leitungsparameter geringer als über die Freileitung. Dasselbe gilt für den Bezug von reiner Wirk- oder Blindleistung, wobei der Spannungsabfall bei reinem Blindleistungsbezug auf Grund des geringeren Reaktanzbelages und des geringeren Blindleistungsbezug kleiner ausfällt. Speist das Verteilnetz in das Mittelspannungsnetz ein, kehrt sich also der Leistungsfluss um Es zeigt sich dann ein ähnliches Bild, mit dem Unterschied, dass eine Spannungsüberhöhung an U_{MSS2} auftritt.

4.2 Erweitertes Niederspannungsnetz

Durch die Spannungsabhängigkeit der Elemente im Niederspannungsnetz ergibt sich bei der Änderung der Stufenstellung ein geänderter Leistungsfluss zwischen Nieder- und Mittelspannungsnetz, welcher eine Auswirkung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz hat. Diese Änderung des Leistungsflusses soll im Folgenden untersucht werden. Da der Transformator zwischen Hochspannungsnetz und Mittelspannungsnetz meist als unter Last schaltbarer Regeltransformator ausgeführt ist, kann die Spannung an diesem Punkt als konstant angesehen werden. Das bedeutet, der Spannungsabfall über die Leitungen im Mittelspannungsnetz ändert sich in Abhängigkeit des Leistungsflusses im Mittelspannungsnetz. Der Zusammenhang des Leistungsflusses und des Spannungsabfalls einer Leitung ist in Gleichung 2.12 ersichtlich.

4.2.1 Ohne lokaler Blindleistungsregelung

Um den Leistungsfluss vom Niederspannungsnetz ins Mittelspannungsnetz und dessen Änderung durch die Stufenstellungen des Verteiltransformators näher zu untersuchen, wird das Netzmodell aus Abbildung 4.7 verwendet.

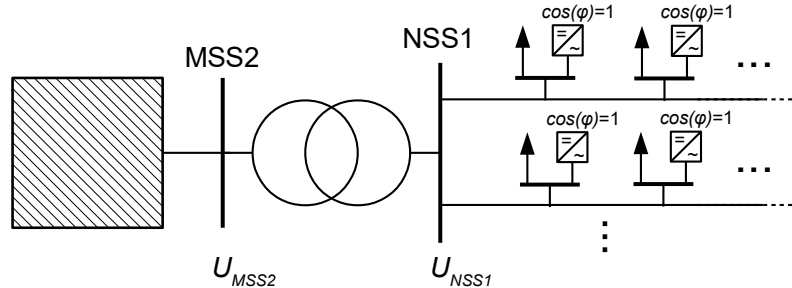


Abbildung 4.7: Reduziertes Netz zur Untersuchung der Änderung des Leistungsflusses in das Mittelspannungsnetz ohne lokaler Blindleistungsregelung

An die Sammelschiene NSS1 werden für diese Untersuchungen die in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Niederspannungsnetze Urban und Ländlich angeschlossen. Mit beiden Netzen werden getrennte Analysen durchgeführt, um eine Aussage darüber zu machen, ob sich das Verhalten des Leistungsflusses in das Mittelspannungsnetz mit der Struktur des Niederspannungsnetzes wesentlich ändert. Die Spannung am Einspeisepunkt U_{MSS2} wird auf 100% gesetzt.

Da die Spannungsabhängigkeit der Lasten in Hochlast-Fällen die größte Auswirkung hat und es in dieser Analyse darum geht, das grundsätzliche Verhalten zu untersuchen, wird für die Belastungsfälle die maximale Last P_{Last}^{max} des Niederspannungsnetzes angenommen. In einem zweiten Belastungsfall wird die Richtung des Leistungsflusses über den Transformator durch die Einspeisung im Niederspannungsnetz umgekehrt, um zu untersuchen wie diese Umkehrung in Abhängigkeit der Stufenstellungen des Verteiltransformators wirkt.

<p>MSS2 NSS1</p>	<p>MSS2 NSS1</p>
<p>P_{Last}^{max} $\cos(\varphi) = 0,95$</p>	<p>P_{PV}^{max} & P_{Last}^{max} $\cos(\varphi) = 0,95$</p>

Tabelle 4.3: Belastungsfälle zur Untersuchung des erweiterten Niederspannungsnetzes

Niederspannungsnetz Urban

Um die theoretische Betrachtung einer Umkehrung des Leistungsflusses zu ermöglichen, wurde für $P_{PV,Haushalt}^{max}$ der gesamte Leistungsfluss über den Transformator ins Mittelspannungsnetz bei maximaler Last verdoppelt und durch die Anzahl der Haushalte dividiert. Das ergibt für diese Analyse eine PV-Anlage mit $P_{PV}^{max} = 5,3745kW$ pro Haushalt. Die Verluste im Niederspannungsnetz und des Trafos wurden dabei mit berücksichtigt. Die folgenden Diagramme

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

sind im Verbraucherbezugssystem angegeben. Das bedeutet, dass das Niederspannungsnetz als Verbraucher gilt, was bei Last ein positiver Leistungsfluss aus dem Mittelspannungsnetz zur Folge hat. Bei Rückspeisung hat man einen negativen (Wirk-)Leistungsfluss vom Niederspannungsnetz in das Mittelspannungsnetz.

Die Spannung auf der Sammelschiene MSS2 wird durch den Slack-Knoten auf 100% gehalten. In einem Niederspannungsnetz, welches nicht an einem Slack-Knoten, sondern an einem Mittelspannungsnetz hängt, wäre die Spannung an der Sammelschiene MSS2 vom Leistungsfluss abhängig. Nimmt der Leistungsfluss vom Mittelspannungsnetz in das Niederspannungsnetz zu, konsumiert das Niederspannungsnetz sozusagen mehr Leistung. Dadurch wird die Spannung an der Sammelschiene MSS2 nach unten gedrückt. Im umgekehrten Fall, wenn das Niederspannungsnetz weniger Leistung aus dem Mittelspannungsnetz bezieht, wird sich die Spannung erhöhen. Der Einfluss, welchen die Stufenstellungen des Verteiltransformators auf den Leistungsfluss aus dem Niederspannungsnetz haben, wird in der Folge untersucht. Dabei wird in einer ersten Analyse die Regelung der Wechselrichter vernachlässigt und somit tragen zur Spannungsabhängigkeit des Leistungsflusses folgende Komponenten bei:

- Lasten
- Verluste der Netzelemente (Leitungen, Transformator)

Deren Verhalten zueinander lässt sich bei Erhöhung der Stufenstellung (z.B. von Stufe 3 auf Stufe 4) wie folgt beschreiben:

- Niedrigere Spannung im NS-Netz
- Höhere Verluste der Leitungen und des Transformators
- Weniger Leistungsbezug der Lasten, das bedeutet aber wiederum:
 - Geringere Verluste der Leitungen und des Transformatorsauf Grund des geringeren Leistungsflusses.

Man hat somit zwei Effekte die gegeneinander wirken.

Das Spannungsband des ersten Abzweigs des Niederspannungsnetzes ist für beide Belastungsfälle in Abbildung 4.8 dargestellt. Da beide Fälle mit P_{Last}^{max} simuliert wurden, tritt auch bei hoher Einspeisung keine Spannung auf, die weit über dem Nominalwert liegt.

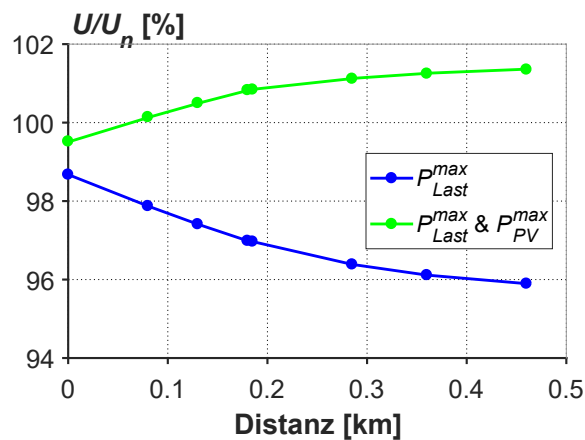


Abbildung 4.8: Spannungsband des ersten Abzweigs für die beiden Belastungsfälle im Niederspannungsnetz Urban bei Stufe 3 des Umstellers

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

In Abbildung 4.9 ist der Wirk- und Blindleistungsfluss vom Mittelspannungsnetz in das Niederspannungsnetz an der Sammelschiene MSS2 in Abhängigkeit der Stufe des Umstellers dargestellt. Abbildung 4.9a zeigt, dass sich der Betrag des Leistungsflusses $|P|$, bei einer Richtungsänderung des Leistungsflusses gegengleich verhält. Das bedeutet, die Höhe des Leistungsflusses über den Verteiltransformator ist bei niedrigerer Stufenstellung im Fall P_{Last}^{max} höher als im Fall $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$. Bei hoher Stufenstellung ist dieses Verhalten genau gegengleich. Der Blindleistungsfluss kehrt sich nicht um, er wird jedoch bei niedrigerer Spannung, also höherer Stufenstellung, kleiner. Durch das erhöhte Spannungsband bei Einspeisung im Niederspannungsnetz ist der Blindleistungsverbrauch im Fall $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$ höher als bei P_{Last}^{max} .

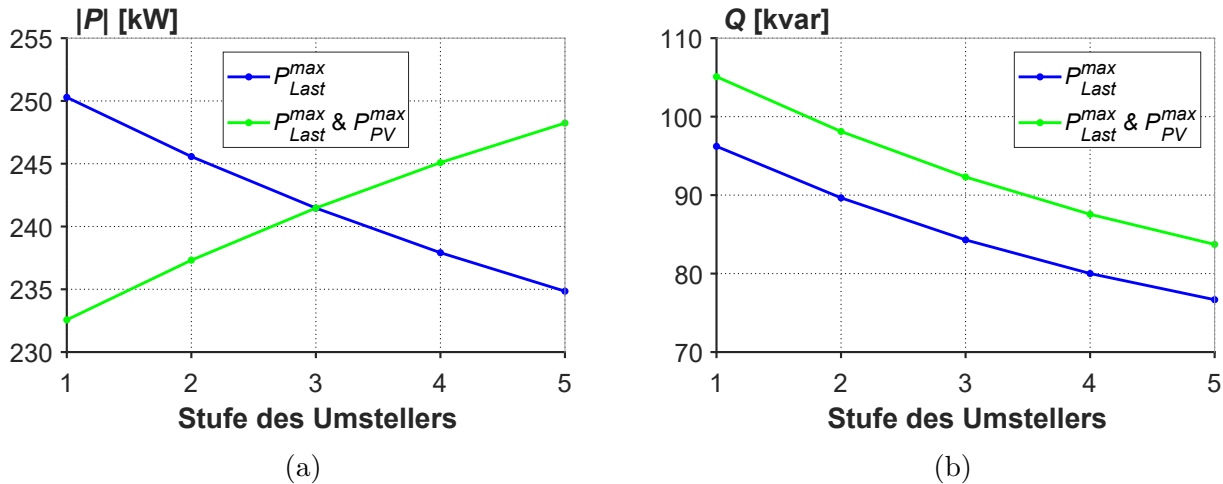


Abbildung 4.9: Vergleich des Leistungsflusses über den Transformator für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsfluss, (b) Blindleistungsfluss

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
$ P_{Last}^{max} - P_{PV}^{max} $ [kW]	17.72	8.25	0	-7.18	-13.39
$Q_{Last}^{max} - Q_{PV}^{max}$ [kvar]	-8.87	-8.46	-8.02	-7.55	-7.07

Tabelle 4.4: Differenz der Leistungsflüsse in den beiden Belastungsfällen

Das Beobachtete Verhalten und die Zusammenhänge aus Abbildung 4.9:

- P_{Last}^{max} : Höhere Stufe \rightarrow Niedrigere Spannung im NS-Netz \rightarrow Aufgenommene Leistung der Lasten sinkt \rightarrow Weniger Leistungsbezug aus dem MS-Netz \rightarrow Spannung im MS-Netz erhöht sich
- $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$: Die Einspeisung dreht den Leistungsfluss ins MS-Netz um \rightarrow Der Betrag des Leistungsflusses verhält sich gegengleich wie bei P_{Last}^{max}
Trotzdem: Höhere Stufe \rightarrow Niedrigere Spannung im NS-Netz \rightarrow Aufgenommene Leistung der Lasten sinkt \rightarrow Es wird mehr Leistung in das Mittelspannungsnetz eingespeist \rightarrow Spannung im MS-Netz erhöht sich

In beiden Fällen steigt also die Spannung im Mittelspannungsnetz wenn die Spannung im Niederspannungsnetz durch den Stufensteller nach unten gedrückt wird, da die Lasten bei niedrigerer Spannung weniger Leistung beziehen und dieses Verhalten von der Richtung des Leistungsflusses unabhängig ist. Der Unterschied besteht in der Ursache der Spannungserhöhung, denn bei P_{Last}^{max} erhöht sich die Spannung im Mittelspannungsnetz auf Grund der geringeren Belastung durch das Niederspannungsnetzes. Im Fall $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$ hingegen erhöht sich die Spannung auf Grund

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

der höheren Rückspeisung aus dem Niederspannungsnetz in das Mittelspannungsnetz. Das aufsummierte Verhalten aller Lasten in Abhängigkeit der Stufenstellung ist in Abbildung 4.10 zu sehen. Man erkennt das Leistungsverhalten der ZIP-Lasten, welche in Kapitel 3.1.3 erklärt wurden. Je höher die Spannung ist, also je geringer die Stufenstellung, desto mehr Leistung beziehen die Lasten.

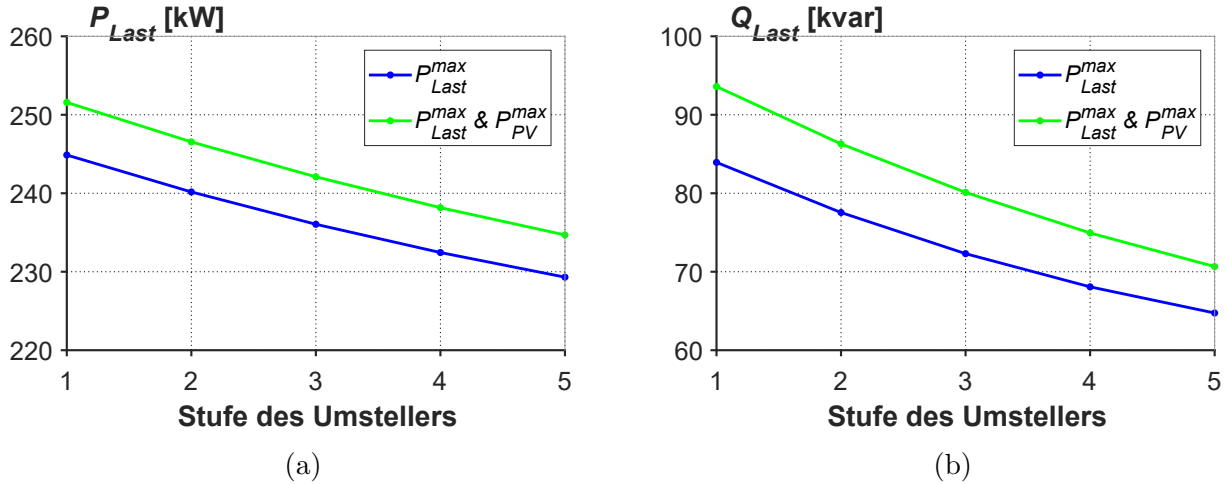


Abbildung 4.10: Vergleich Leistungsbezug der Lasten für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsbezug, (b) Blindleistungsbezug

Die Verluste der Niederspannungsabzweige, also die Verluste der Leitungen im Niederspannungsnetz, sind in Abbildung 4.11 zu sehen. Beim Erhöhen der Stufenstellung, also bei Verringerung der Spannung erhöhen sich die Verluste, da um die gleiche Leistung zu übertragen, mehr Strom benötigt wird. Dieser geht quadratisch in die Verluste ein. Jedoch beziehen die Lasten bei geringerer Spannung weniger Leistung, was wiederum die Verluste über den geänderten Leistungsfluss ändert. Es ist weiters zu erkennen, dass sich der Wirkleistungsfluss für die beiden Fälle genau gegengleich verhält, wie man in Abbildung 4.9a sieht. Diese Erkenntnis, sowie die geänderte Spannung, erklären die unterschiedlich starke Steigung der Verluste über die Stufenstellung für die beiden Belastungsfälle.

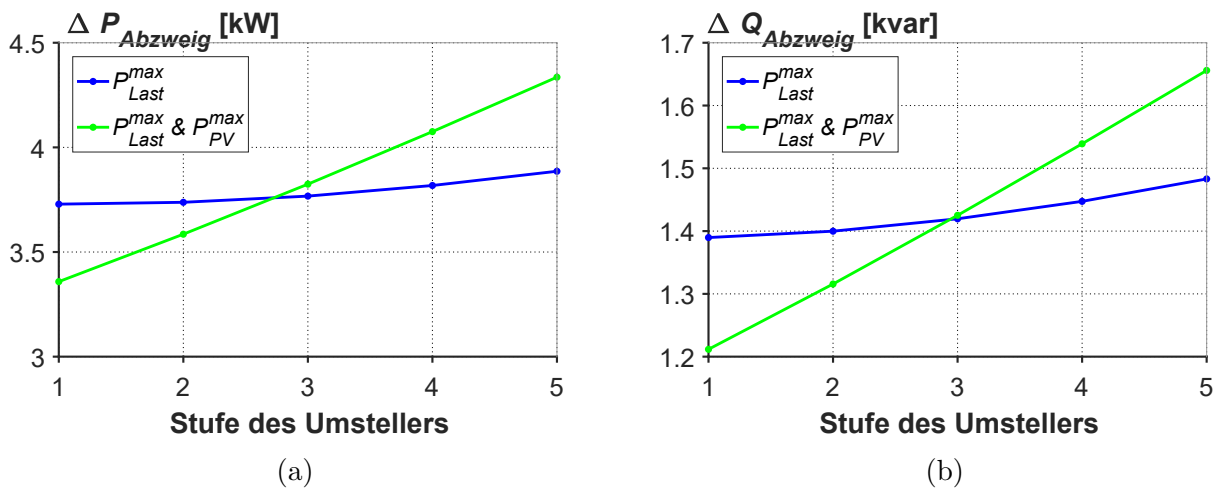


Abbildung 4.11: Vergleich Verluste der Leitungen im Niederspannungsnetz für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsverluste

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Es überlagern sich hier also zwei unterschiedliche Effekte, die sich in Abhängigkeit der Leistungsflussrichtung addieren oder gegeneinander wirken:

- Niedrigere Spannung im NS-Netz \rightarrow Mehr Strom \rightarrow *Größere Abzweigverluste*
- Lasten beziehen bei niedrigerer Spannung weniger Leistung \rightarrow Leistungsfluss ändert sich \rightarrow Verluste ändern sich
 - P_{Last}^{max} : Der absolute Leistungsfluss im Niederspannungsnetz verringert sich bei niedrigerer Spannung (höhere Stufenstellung) \rightarrow *Geringere Abzweigverluste*
 - P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max} : Der absolute Leistungsfluss im Niederspannungsnetz erhöht sich bei niedrigerer Spannung (höhere Stufenstellung) \rightarrow *Größere Abzweigverluste*

Wie man erkennen kann, hat in diesem Fall der größere Strom zur Übertragung der gleichen Leistung bei einer niedrigeren Spannung den größeren Einfluss.

In Abbildung 4.12 erkennt man die Auswirkung des unterschiedlichen Verhaltens des Betrags der Wirkleistung bei den zwei Belastungsfällen P_{Last}^{max} und P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max} . Für den Fall P_{Last}^{max} wird der Wirkleistungsfluss über den Transformator mit Erhöhung der Stufenstellung geringer, was geringere Transformatorverluste bedeutet. Für den Fall P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max} verhalten sich die Transformatorverluste in Abhängigkeit der Stufenstellung genau gegengleich. In diesem Fall bestimmt also der Betrag des Wirkleistungsfluss das unterschiedliche Verhalten.

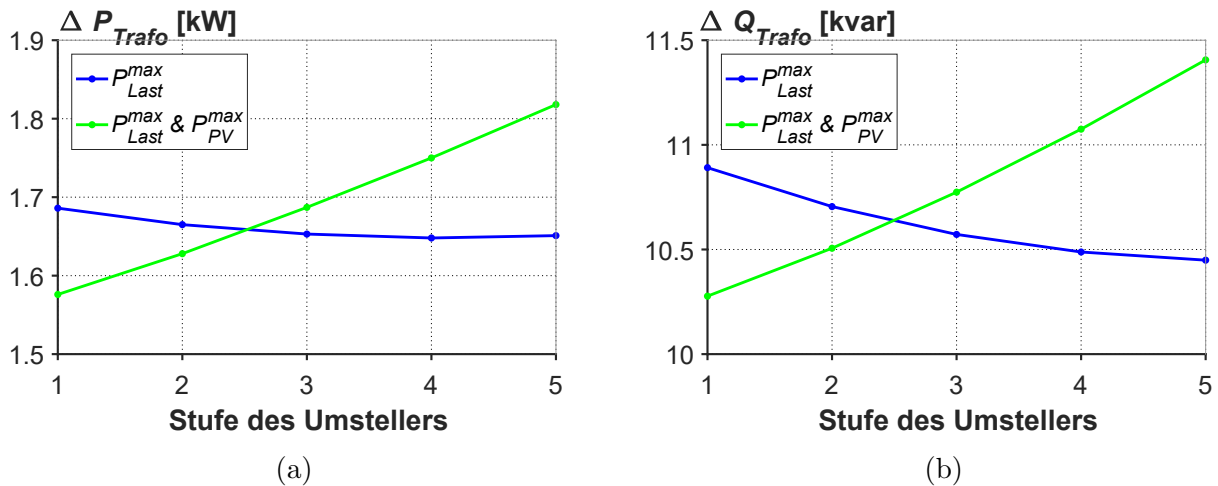


Abbildung 4.12: Vergleich Leistungsverluste des Transformators für P_{Last}^{max} und P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max} : (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsverluste

Niederspannungsnetz Ländlich

Auch für das ländliche Netz wurde mit $P_{PV,Haushalt}^{max}$ der gesamte Leistungsfluss über den Transformator ins Mittelspannungsnetz bei maximaler Last verdoppelt und durch die Anzahl der Haushalte dividiert. Das ergibt für diese Analyse eine PV Anlage mit $P_{PV}^{max} = 2,7989kW$ pro Haushalt.

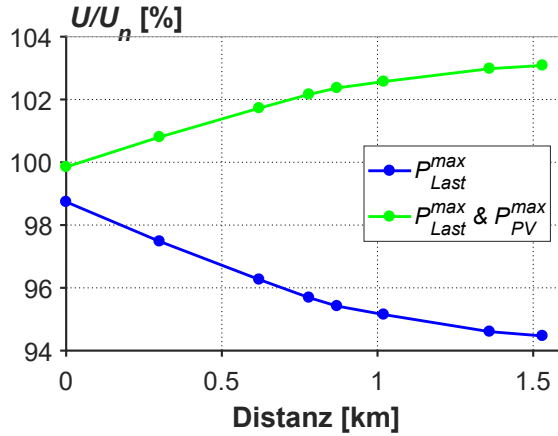


Abbildung 4.13: Spannungsband des ersten Abzweigs für die beiden Belastungsfälle im Niederspannungsnetz Ländlich bei Stufe 3 des Umstellers

Das Verhalten der verschiedenen Elemente und somit auch das Verhalten des Leistungsflusses über den Transformator für verschiedene Stufenstellungen ist tendenziell gleich wie im Niederspannungsnetz Urban, zu erkennen in den Abbildungen 4.14 bis 4.17.

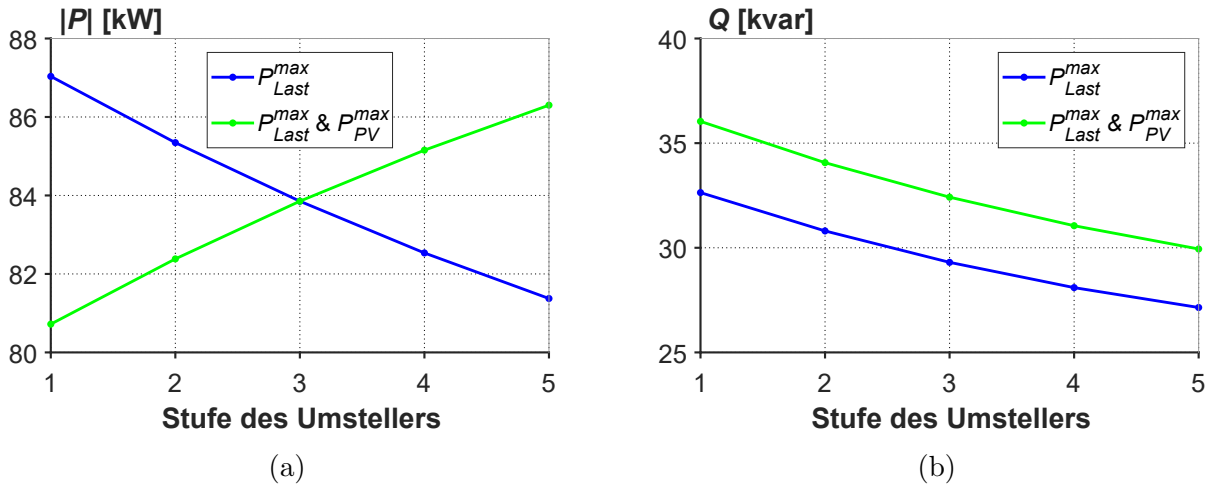


Abbildung 4.14: Vergleich des Leistungsflusses über den Transformator für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsfluss, (b) Blindleistungsfluss

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
$ P_{Last}^{max} - P_{PV}^{max} $ [kW]	6.31	2.96	0.00	-2.62	-4.93
$Q_{Last}^{max} - Q_{PV}^{max}$ [kvar]	-3.40	-3.26	-3.11	-2.96	-2.80

Tabelle 4.5: Differenz der Leistungsflüsse in den beiden Belastungsfällen

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

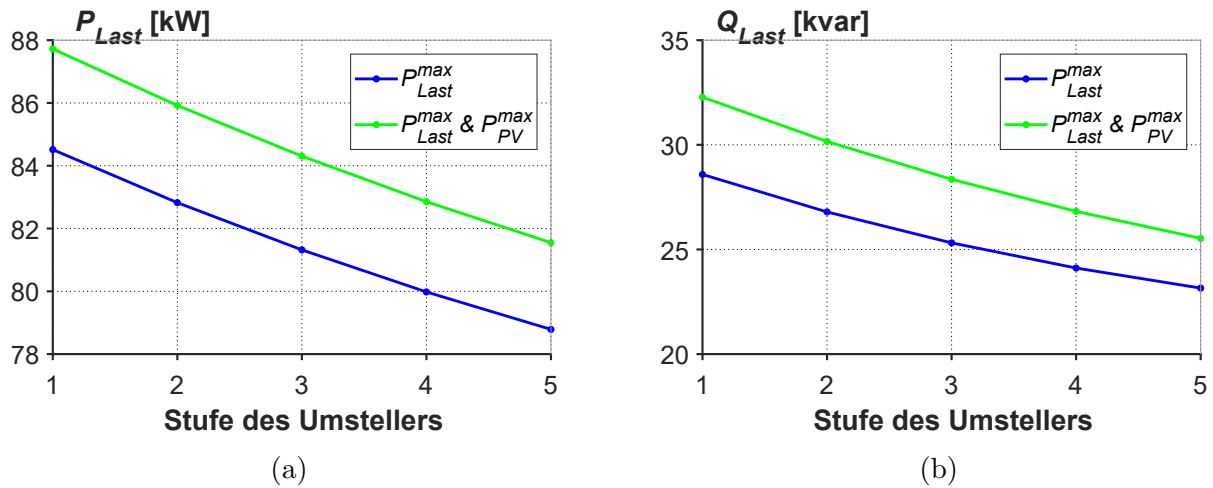


Abbildung 4.15: Vergleich Leistungsbezug der Lasten für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsbezug, (b) Blindleistungsbezug

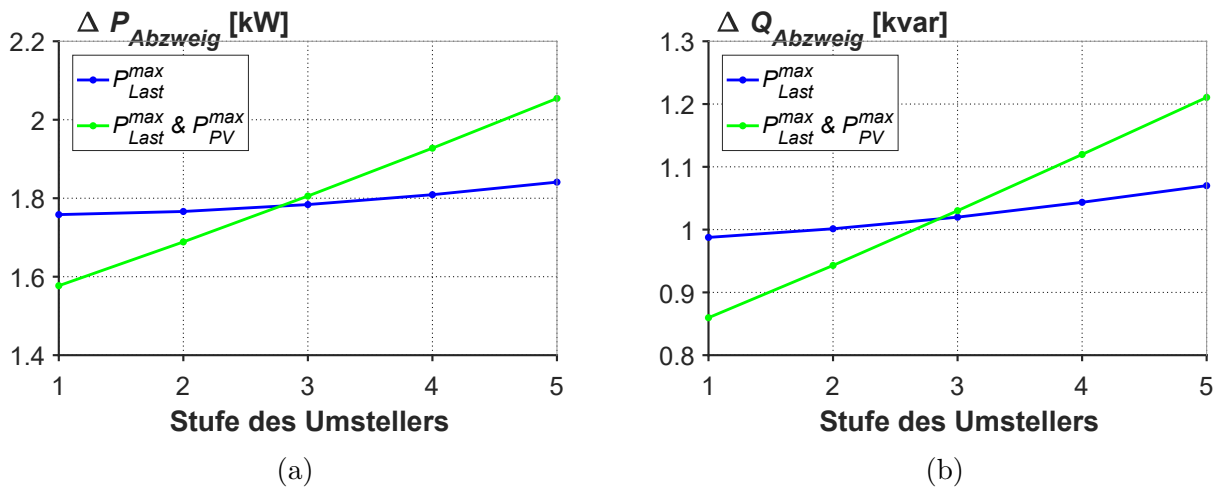


Abbildung 4.16: Vergleich Leistungsverluste der Leitungen im Niederspannungsnetz für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsverluste

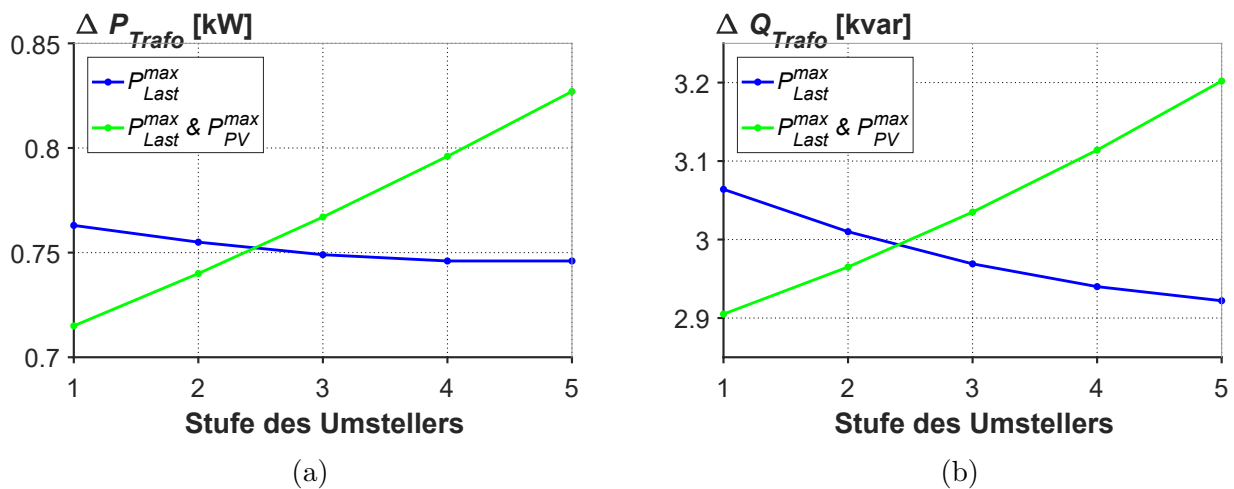


Abbildung 4.17: Vergleich Leistungsverluste des Transformators für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} & P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsverluste

4.2.2 Mit lokaler Blindleistungsregelung

Im Folgenden wird der Einfluss der Wechselrichterregelung auf den Leistungsfluss über den Verteiltransformator betrachtet. Als Regelung wird die $Q(U)$ -Regelung eingesetzt, welche im Kapitel 3.3 näher erläutert wurde.

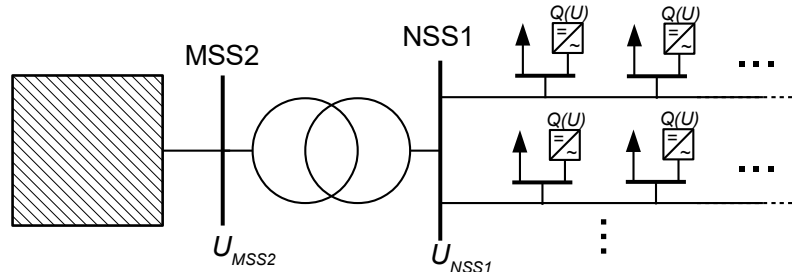


Abbildung 4.18: Reduziertes Netz zur Untersuchung der Änderung des Leistungsflusses in das Mittelspannungsnetz mit lokaler Blindleistungsregelung

Für die Analyse wird das Modell aus Abbildung 4.18 verwendet, wobei das Niederspannungsnetz Ländlich an die Sammelschiene NSS1 angeschlossen wird, da in diesem Niederspannungsnetz die Spannungsabfälle der Abzweige höher sind als beim Urbanen Netz. Um den Regelungseffekt der $Q(U)$ -Regelung weiter zu erhöhen, wird die Last auf $P_{Last}^{max} \cdot 0.5$ verringert. Die Einspeisung der PV-Anlagen wird mit 5kW pro Haushalt festgelegt.

In Abbildung 4.19 ist das Spannungsband des ersten Abzweigs im Niederspannungsnetz mit und ohne $Q(U)$ -Regelung zu sehen. Man erkennt, dass die Regelung die Spannung nach unten drückt, indem die Wechselrichter Blindleistung beziehen.

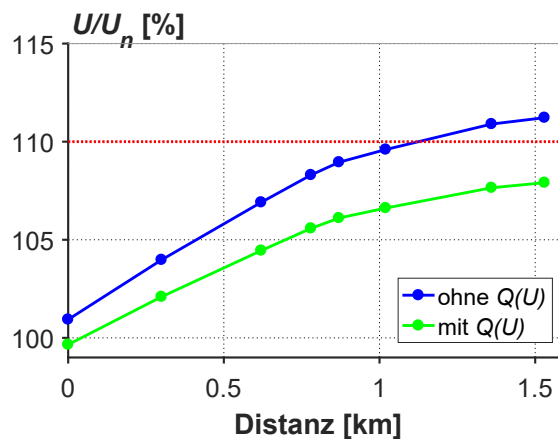


Abbildung 4.19: Spannungsband des ersten Abzweigs im Niederspannungsnetz Ländlich bei Stufe 3 des Umstellers mit und ohne $Q(U)$ -Regelung

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Die Auswirkungen auf den Leistungsfluss vom Niederspannungsnetz in das Mittelspannungsnetz sind in Abbildung 4.20 ersichtlich.

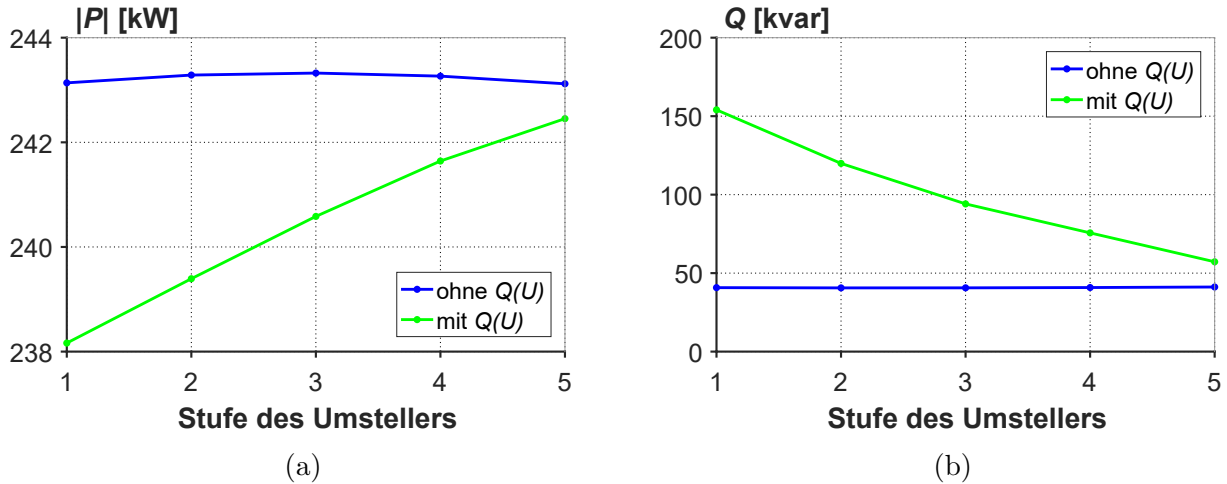


Abbildung 4.20: Vergleich Leistungsfluss über den Transformator (auf der Seite des Mittelspannungsnetzes) mit und ohne $Q(U)$ -Regelung: (a) Wirkleistungsfluss, (b) Blindleistungsfluss

Auf Grund der hohen Auslastung der Leitungen und des Transformators sind die Verluste in diesen Elementen relativ hoch. Für den Wirkleistungsfluss ergibt sich folgende Erkenntnis in den betrachteten Fällen:

- **Ohne $Q(U)$:** Bei Erhöhung der Stufenstellung benötigen die Lasten durch die niedrigere Spannung weniger Wirkleistung. Die direkte Abhängigkeit der Verluste von der Spannung wirkt diesem Effekt aber entgegen, da sie bei niedrigerer Spannung größer werden. Dieses Verhalten der Lasten und Verluste ist in Abbildung 4.21 zu sehen. In Abbildung 4.20a erkennt man genau den Punkt, an dem die Spannungsabhängigkeit der Verluste größer wird als die der Lasten. Mit den genauen Werten und deren Summe in Tabelle 4.6 kann man diesen Zusammenhang besser nachvollziehen.

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
P_{Last} [kW]	45.6973	44.7137	43.8266	43.0257	42.3017
$\Delta P_{Abzweig+Trafo}$ [kW]	16.1655	17.0024	17.8506	18.7098	19.5795
Summe [kW]	61.8628	61.7160	61.6772	61.7355	61.8812

Tabelle 4.6: Wirkleistungsbezug und Wirkleistungsverluste ohne $Q(U)$ -Regelung

- **mit $Q(U)$:** Es wirken die gleichen Effekte wie ohne $Q(U)$ -Regelung, jedoch werden die Verluste auf Grund des immer höher werdenden Blindleistungsflusses durch die Wechselrichter bei niedriger Stufenstellung immer größer. In Abbildung 4.21a ist zu sehen, dass die Lasten auf Grund der niedrigeren Spannung weniger Leistung beziehen als ohne Regelung. Abbildung 4.21b zeigt die größer werdenden Verluste, trotz Erhöhung der Spannung, auf Grund des größeren Blindleistungsflusses. Diese zwei Effekte addieren sich und wirken dann in einem verringerten Wirkleistungsfluss vom Niederspannungsnetz in das Mittelspannungsnetz, bei Verringerung der Stufenstellung des Transformators.

Schon bei Stufe 3 ist die Spannung im Niederspannungsnetz relativ hoch, das zeigt Abbildung 4.19. Wird die Spannung weiter erhöht, also die Stufenstellung verringert, benötigen die

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Wechselrichter immer mehr Blindleistung, um die Spannung nach unten zu drücken. Dieser Effekt ist in Abbildung 4.20b zu sehen. Für die Spannung im Mittelspannungsnetz würde der höhere Blindleistungsverbrauch der Wechselrichter im Niederspannungsnetz einen höheren Spannungsabfall, also eine niedrigere Spannung, bedeuten.

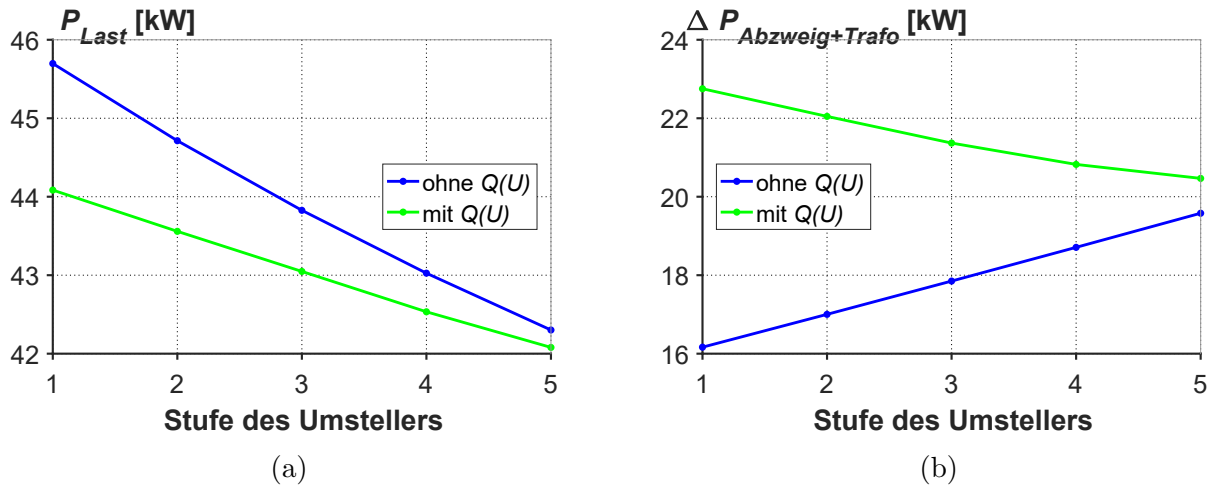


Abbildung 4.21: Vergleich der Last und der Verluste des Niederspannungsnetzes mit und ohne $Q(U)$ -Regelung über die Stufenstellung: (a) Wirkleistungsbezug, (b) Wirkleistungsverluste

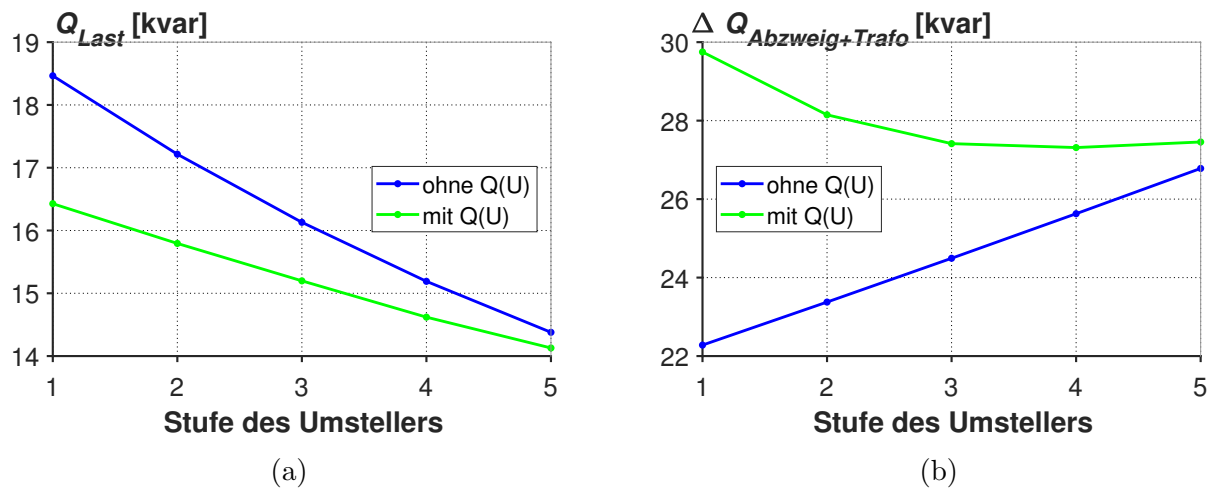


Abbildung 4.22: Vergleich der Blindleistungslast und der Blindleistungsverluste des Niederspannungsnetzes mit und ohne $Q(U)$ -Regelung über die Stufenstellung: (a) Blindleistungsbezug, (b) Blindleistungsverluste

4.3 Erweitertes Mittel- und Niederspannungsnetz

In diesem Abschnitt wird das Netzverhalten eines Mittelspannungsabzweigs mit voll modellierten Niederspannungsnetzen untersucht und analysiert welche Wirkung die Stufenstellung der Transformatoren auf die Spannung im Mittelspannungsnetz hat. Zu Beginn wird ein reines Freileitungs-Mittelspannungsnetz untersucht, danach wird auf dieses Mittelspannungsnetz näher eingegangen und ein Vergleich des Netzverhaltens bei verschiedenen Stufenstellungen gezeigt. Zum Abschluss des Kapitels wird dieser Vergleich auch für ein Kabel-Mittelspannungsnetz durchgeführt. Zur besseren Übersicht ist in Abbildung 4.23 der in den Simulationen verwendete Mittelspannungsabzweig noch einmal dargestellt.

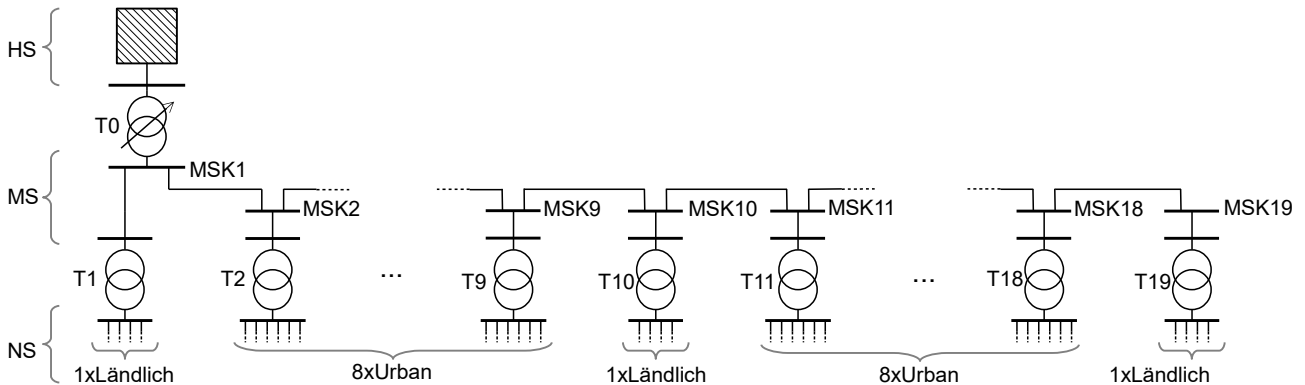


Abbildung 4.23: Theoretischer Mittelspannungsabzweig des erweiterten Mittelspannungsnetzes

Für die Analyse wurden die Belastungsfälle aus Tabelle 4.7 simuliert.

<p>MSSi NSSi P_{Last}^{max}</p>	<p>MSSi NSSi $P_{Last}^{max} \cdot 0.5 \ \& \ P_{PV}^{max}$</p>	<p>MSSi NSSi $P_{Last}^{max} \ \& \ Q_{PV}(U)$</p>	<p>MSSi NSSi $P_{Last}^{max} \cdot 0.5 \ \& \ P_{PV}^{max} \ \& \ Q_{PV}(U)$</p>
L^{max} / E^0	L^{min} / E^{max}	$L^{max} / E_{Q(U)}^0$	$L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$

Tabelle 4.7: Belastungsfälle für die Untersuchung der Auswirkung der Stufenstellungsänderung auf das Mittelspannungsnetz

Sie stellen Extremfälle der maximalen Last und der maximalen Einspeisung durch dezentrale Erzeuger dar, jeweils mit und ohne $Q(U)$ -Regelung der Wechselrichter im Niederspannungsnetz. Für die Einspeisung durch PV-Anlagen wurde angenommen, dass jeder Haushalt eine PV-Anlage mit maximal $P_{PV}^{max} = 5kW$ Wirkleistungseinspeisung besitzt. Der Wirkleistungsfluss zeigt bei Belastung vom Mittelspannungsnetz ins Niederspannungsnetz und bei Einspeisung kehrt er sich um. Die Blindleistung wird grundsätzlich immer vom Niederspannungsnetz bezogen, da die Lasten Blindleistung benötigen. Bei hoher Einspeisung im Niederspannungsnetz mit $Q(U)$ -Regelung benötigen die Wechselrichter zusätzlich Blindleistung, sofern die Spannung am Anschlussknoten $U_n \cdot 103\%$ überschreitet. Im Fall $L^{max} / E_{Q(U)}^0$ besteht die Möglichkeit, dass sich der Blindleistungsfluss umkehrt, wenn die Lasten weniger Blindleistung benötigen als die

Wechselrichter einspeisen. Die Einspeisung von Blindleistung durch die Wechselrichter setzt ab einer Spannung von $U_n \cdot 97\%$ und darunter ein, um die Spannung im Niederspannungsnetz nach oben zu drücken.

4.3.1 Freileitungen im Mittelspannungsnetz

Für die weitere Analyse und einen Vergleich ist es wichtig, die Stufenstellungen der Verteiltransformatoren für einen Basisfall richtig einzustellen. Die Stufenstellungen sind im konventionellen Netz für den Lastfall ohne dezentraler Erzeugung angepasst und bewerkstelligen eine Spannung auf der Sekundärseite des Transformators, welche leicht über der Nennspannung liegt. Genaue Werte hierzu findet man in der Literatur nicht, da diese Einstellung an die lokalen Gegebenheiten angepasst werden muss. Bedingungen welche erfüllt werden müssen, sind jedoch die in der Norm EN 50160 [4] festgelegten Spannungsgrenzen von $\pm U_n \cdot 10\%$.

Für das vorliegende Netz aus Abbildung 3.7 wird die Stufenstellung so eingestellt, dass bei einer Last von $P_{Last}^{max} \cdot 0.5$ die Spannung U_{NSSi} auf der Sekundärseite des Transformators mindestens $U_n \cdot 100.2\%$ beträgt. Die Last von $P_{Last}^{max} \cdot 0.5$ wurde für diese Einstellungen unter der Annahme herangezogen, dass die Einstellarbeiten am Transformator meist in der Mitte des Tages passieren, wo die Last in Wohngebieten ca. bei 50% der Maximallast liegt. Das Lastprofil für ein Wohngebiet ist in Abbildung 3.6 zu sehen. Es wurde außerdem überprüft, ob mit der eingestellten Stufenstellung bei P_{Last}^{max} , also der maximalen Last der Niederspannungsnetze, keine Spannungsbandverletzungen auftreten. Die mit diesem Verfahren ermittelten optimalen Stufenstellungen, in weiterer Folge "Ausgangsstufe" genannt, ergeben sich wie in Abbildung 4.24 gezeigt.

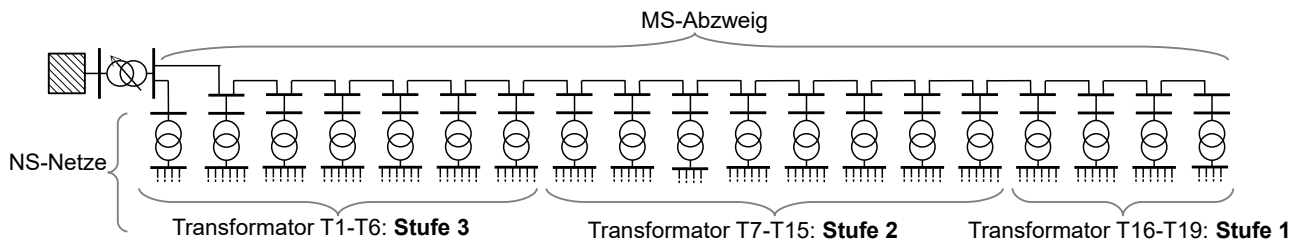


Abbildung 4.24: Ermittelte Ausgangsstufenstellungen der Verteiltransformatoren am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig

Durch diese Stufenstellungen wird der Spannungsabfall des Mittelspannungsnetzes kompensiert, indem in der Mitte und vor allem am Ende des Mittelspannungsabzweigs die Spannung im Niederspannungsnetz durch eine niedrige Stufenstellung (Stufe 1 oder 2) erhöht wird.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

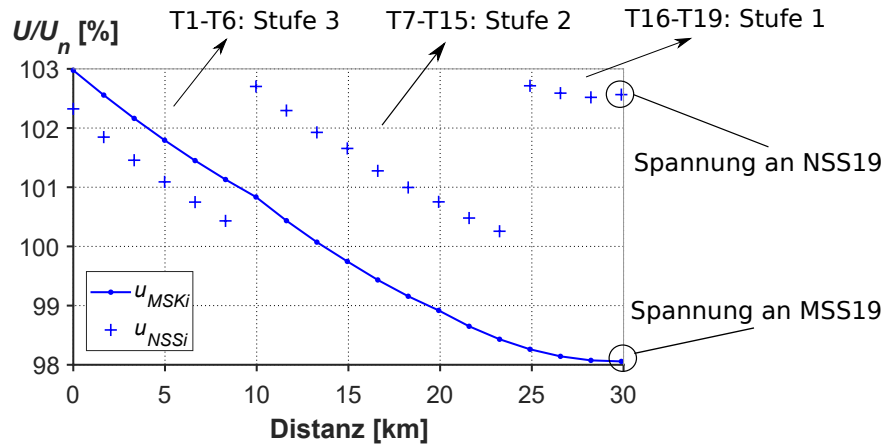


Abbildung 4.25: Spannung im Mittel- und Niederspannungsnetz bei $P_{Last}^{max} \cdot 0.5$ zur Einstellung der "optimalen Stufenstellung" (Ausgangsstufenstellung)

In Abbildung 4.25 sind das Spannungsband des Mittelspannungsnetzes und die Spannungen der Sammelschienen NSSi (mit einem + gekennzeichnet) für die eingestellte Ausgangsstufenstellung zu sehen. Man erkennt, dass durch die Einstellung der Stufenstellung die Spannung am Anfang der Niederspannungsabzweige für die Hälfte der Maximalbelastung durch die Lasten ($P_{Last}^{max} \cdot 0.5$) zwischen $U_n \cdot 100.2\%$ und $U_n \cdot 103\%$ liegt.

Abbildung 4.26a zeigt die Spannung des Mittelspannungsabzweigs und die der Unterspannungsseite des Verteiltransformators (+), also am Beginn der Niederspannungsabzweige, für die eingestellte Ausgangsstufenstellung. In 4.26b ist des weiteren das Spannungsband des letzten Niederspannungsnetzes am Mittelspannungsabzweig dargestellt, welches in diesem Mittelspannungsnetz das Netz mit dem größten Spannungsabfall ist.

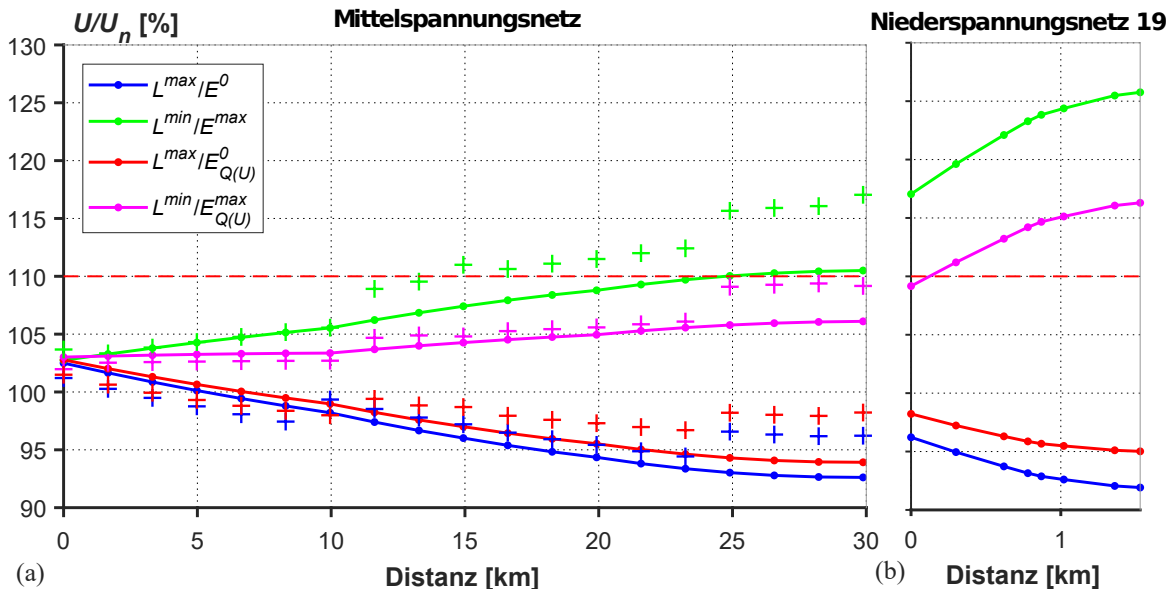


Abbildung 4.26: Spannung des MS-Abzweigs für die 4 Belastungsfälle bei der Ausgangsstufenstellung (+ Spannung auf der Unterspannungsseite des Verteiltransformators u_{NSSi})

Im Fall der maximalen Last ohne dezentraler Einspeisung L^{max}/E^0 kommt es zu keiner Spannungsbandverletzung, da der Transformator für den Fall ohne dezentraler Einspeisung und des zugehörigen Leistungsflusses vom Mittelspannungsnetz in das Niederspannungsnetz ausgelegt

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

ist und die Stufenstellungen dementsprechend eingestellt wurden. Man erkennt, dass es im Fall L^{min}/E^{max} zu massiven Spannungsbandverletzungen kommt. Die Stufenstellungen der Transformatoren verschlechtern die Situation weiter, da sie dafür ausgelegt sind, den Spannungsabfall des Mittelspannungsnetzes im Lastfall L^{max}/E^0 auszugleichen. Das bedeutet, dass die Stufenstellung die Spannung, welche durch die dezentrale Erzeugung schon relativ hoch ist, im Niederspannungsnetz noch weiter erhöht. Die $Q(U)$ -Regelung verbessert die Situation für beide Fälle, wobei die Wechselrichter nicht beliebig viel Blindleistung konsumieren können und somit die Spannung nicht beliebig weit senken. In dem hier dargestellten Fall ist auch mit der $Q(U)$ -Regelung eine Spannungsbandverletzung vorhanden. Man erkennt des Weiteren, dass der Spannungsabfall über den Transformator im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ gegenüber L^{min}/E^{max} deutlich abnimmt. Die Ursache liegt darin, dass der Spannungsabfall durch den erhöhten Blindleistungsfluss ins Niederspannungsnetz größer wird, verursacht durch die $Q(U)$ -Regelung.

In Abbildungen 4.27 und 4.28 sind die Spannungsbänder des Mittelspannungsnetzes mit dem dazugehörigen Leistungsfluss in die Niederspannungsnetze für die vier Belastungsfälle und drei verschiedene Stufenstellungen dargestellt. Bei dem Spannungsband sind mit Kreuzen + die Spannungen auf der Unterspannungsseite des Verteiltransformators (u_{NSSi}) dargestellt. Zu beachten ist, dass zu diesem Spannungsniveau noch der Spannungsabfall des Niederspannungsnetzes hinzukommt. Die Stufenstellung der Verteiltransformatoren wurde auf drei verschiedene Arten eingestellt:

- **Ausgangsstufe:** Die optimale Stufe für die halbe Maximallast ($P_{Last}^{max} \cdot 0.5$)
- **Stufe 3:** Bei allen Verteiltransformatoren ist die 3. Stufe eingestellt
- **Stufe 5:** Bei allen Verteiltransformatoren ist die 5. Stufe eingestellt

Durch diese Einstellungen lässt sich ein Trend der Stufenstellungsänderung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz erkennen. Eine genauere Analyse, bei der die Stufenstellungen der Transformatoren einzeln verändert werden, wurde für nicht sinnvoll erachtet, da sich daraus keine genaueren allgemeinen Aussagen treffen lassen. Die Stufenstellung der einzelnen Transformatoren ist vor allem vom Aufbau des Mittelspannungsnetzes abhängig, und ändert sich somit für jedes betrachtete Mittelspannungsnetz. Stufe 3 und 5 wurden ausgewählt, da sie bei sehr hoher Einspeisung im Niederspannungsnetz eine mögliche Lösung darstellen, um weniger Spannungsbandverletzungen im Niederspannungsnetz zu erreichen. Stufe 1 würde die Situation bei hoher dezentraler Einspeisung im Fall L^{min}/E^{max} weiter verschlechtern und keine Verbesserung im Fall L^{max}/E^0 bringen, da die Ausgangsstufenstellung für diesen Fall optimiert ist. Durch diese Auswahl lässt sich in den Simulationen eine gewisse Tendenz erkennen, welche Auswirkungen das Umstellen der Stufenstellungen hat. Die Auswirkungen einer niedrigen Stufenstellung können bei der Ausgangsstufenstellung beobachtet werden, da diese auf den Fall ohne dezentrale Einspeisung ausgelegt ist. Eine genaue Empfehlung für die jeweiligen Stufenstellungen wird nicht gegeben und ist auch nicht zielführend, da diese individuell an das jeweilige Mittelspannungsnetz angepasst werden müssen.

Abbildungen 4.27 zeigt den Fall ohne $Q(U)$ -Regelung der Wechselrichter. Es ist zu erkennen, dass im Fall L^{max}/E^0 die Änderung auf die Stufenstellung 3 oder 5 eine Verschlechterung der Situation bewirkt und es in den Niederspannungsnetzen zu Spannungsbandverletzungen kommt. Bei Stufe 3 ist zwar die Unterspannungsseite des Transformators noch über $U_n \cdot 90\%$, doch auf Grund des Spannungsabfalles im Niederspannungsnetz gibt es auch hier Spannungsverletzungen. Im Fall der maximalen Einspeisung und minimaler Last L^{min}/E^{max} verhält sich die Situation genau umgekehrt. Hier kommt es bei der Stufenstellung, welche im Lastfall optimal ist, zu

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

massiven Spannungsbandverletzungen. In diesem Fall wäre also Stufe 5 die beste Lösung, da sie die Spannungen im Niederspannungsnetz senkt. Die Transformatoren am Anfang des Mittelspannungsabzweigs sind im Vergleich der zwei Belastungsfällen keinem großen Unterschieden bezüglich der Spannung ausgesetzt. Am Ende des Abzweigs ist dieser Unterschied bei einer gleichmäßigen Verteilung der dezentralen Erzeuger am Mittelspannungsnetz am größten.

Die Auswirkung der veränderten Stufenstellung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz ist zu erkennen, aber relativ gering. Der Unterschied der Spannung am Ende des Mittelspannungsabzweigs zwischen der Ausgangsstufenstellung und der Stufe 5 beträgt für den Fall L^{max}/E^0 : $0.619\% \cdot U_n$ und im Fall L^{min}/E^{max} : $0.549\% \cdot U_n$. Die Änderung wird vor allem durch die Spannungsabhängigkeit der Lasten hervorgerufen. Bei den Wirk- und Blindleistungsflüssen ins Niederspannungsnetz ist die Wirkung der Stufenstellungsänderung auf das Mittelspannungsnetz zu erkennen.

Bezüglich des Leistungsbezuges der Niederspannungsnetze erkennt man in Abbildung 4.27 die Spannungsabhängigkeit der Niederspannungsnetze und die Auswirkung der Stufenstellungsänderung auf den Leistungsfluss. Das Verhalten entspricht dem in Kapitel 4.2 beschriebenen Verhalten der Netzelemente. Am Anfang des Mittelspannungsabzweigs ist zwischen der Ausgangsstufe und Stufe 3 kein Unterschied zu bemerken, da in den ersten sechs Niederspannungsnetzen bei der Ausgangsstufe ebenfalls Stufe 3 eingestellt ist. Bei genauer Betrachtung des Wirkleistungsbezuges sieht man hier aber einen extrem kleinen Unterschied, welcher in dem Spannungsunterschied im Mittelspannungsnetz bei den zwei Stufenstellungen erklärt ist. Im Appendix sind $P(U)$ und $Q(U)$ Kennlinien der Niederspannungsnetze für alle Belastungsfälle abgebildet.

In Abbildung 4.28 ist dieselbe Ausgangssituation dargestellt, aber mit dezentraler Einspeisung über $Q(U)$ -geregelter Wechselrichter. Auch im Lastfall arbeiten die Wechselrichter, um die Spannung mit der Einspeisung von Blindleistung zu erhöhen. Man erkennt eine deutliche Auswirkung der Stufenstellung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz durch das spannungsabhängige Blindleistungsverhalten der Wechselrichter. Im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ wird Blindleistung bereitgestellt, um die Spannung zu erhöhen. Dadurch wird in manchen Niederspannungsnetzen ein Teil der Blindleistung, welche von den Lasten benötigt wird, über die Wechselrichter bereitgestellt. Kommt es aber mit der Stufe 5 zu sehr niedrigen Spannungen und es wird noch mehr Blindleistung durch die Wechselrichter bereitgestellt, kehrt sich der Blindleistungsfluss teilweise um und das Niederspannungsnetz speist Blindleistung in der Mittelspannungsnetz ein. Dadurch wird auch die Spannung im Mittelspannungsnetz erhöht und es kommt zu einer Reduzierung der Steigung des Spannungsbandes im Mittelspannungsnetz, wie in Abbildung 4.28a zu sehen ist. Durch die Regelung kommt es in keinem Niederspannungsnetz zu Spannungsbandverletzungen, selbst nicht bei Stufe 5. Bei dieser Stufenstellung ändert der Transformator zwischen Hochspannungs- und Mittelspannungsnetz seine Stufenstellung, um die Spannung im Mittelspannungsnetz zu verringern. Das liegt daran, dass bei Stufen 5 der Blindleistungsfluss vom Mittelspannungsnetz ins Hochspannungsnetz sehr groß ist, was einen negativen Spannungsabfall über den Transformator bedeutet.

Im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$, wenn die Wechselrichter Blindleistung konsumieren, um die Spannung im Niederspannungsnetz zu reduzieren, wirkt sich eine hohe Stufenstellung zwar positiv auf die Spannung im Niederspannungsnetz aus, jedoch ergibt sich gleichzeitig ein negativer Effekt für das Mittelspannungsnetz. Durch die niedrigere Spannung im Niederspannungsnetz wird von den Wechselrichtern weniger Blindleistung konsumiert, was eine höhere Spannung im Mittelspannungsnetz bedeutet. Es ist zu erkennen, dass der Transformator zwischen Hochspannungsnetz und Mittelspannungsnetz bei der Ausgangsstufenstellung der Verteiltransformatoren seine Stu-

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

fenposition ändert um die Spannung im Mittelspannungsnetz zu erhöhen. Das liegt an dem hohen Blindleistungsfluss vom Hochspannungsnetz ins Mittelspannungsnetz, was einen hohen Spannungsabfall über den Transformator bedeutet.

Bei den Leistungsflüssen von den Niederspannungsnetzen ins Mittelspannungsnetz ist vor allem der Blindleistungsfluss interessant, welcher in den Abbildungen 4.28e und 4.28f zu sehen ist. Man erkennt hier, dass am Ende des Mittelspannungsabzweigs die Wechselrichter am meisten Blindleistung bereitstellen bzw. konsumieren müssen. Im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ kehrt sich dort der Blindleistungsfluss vom Niederspannungsnetz ins Mittelspannungsnetz in vielen Netzen auch um. Bezüglich der Stufenstellung bedeutet eine hohe Stufenstellung im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ mehr Blindleistungskonsum durch die Wechselrichter, bedingt durch die niedrigere Spannung. Im Gegensatz dazu bedeutet die höhere Stufenstellung im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ weniger Blindleistungsverbrauch der Wechselrichter.

Zu beachten ist, dass durch den erhöhten Blindleistungsfluss, welcher sich positiv auf die Spannung auswirken kann, mit erhöhten Verlusten und Auslastungen zu rechnen ist.

Stufe des Verteiltrafos	L^{max}/E^0	L^{min}/E^{max}	$L^{max}/E_{Q(U)}^0$	$L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$
Ausgangsstufe	11	11	11	10
Stufe 3	11	11	11	11
Stufe 5	11	11	12	11

Tabelle 4.8: Stufenstellung des HS-/MS-Transformators bei den verschiedenen Belastungsfällen und Stufenstellungen des Verteiltransformators

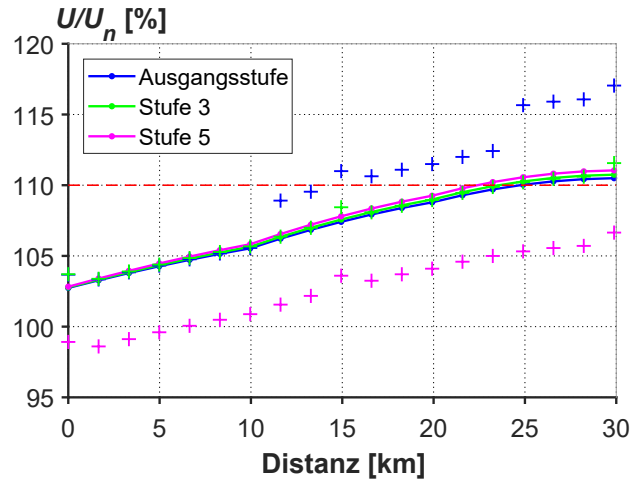
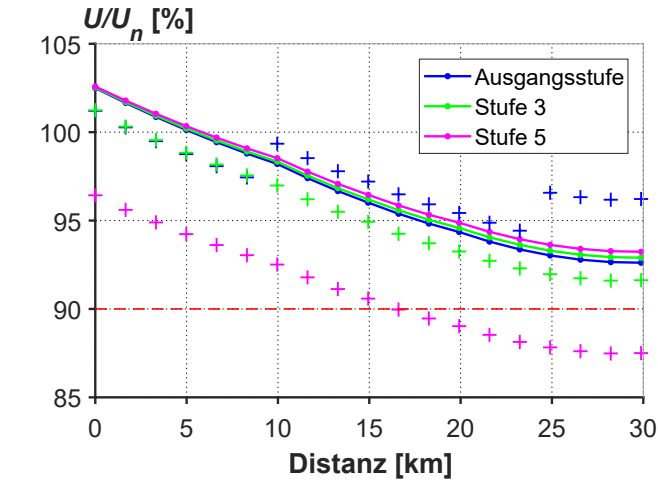
Für die Spannung im Mittelspannungsnetz lässt sich bei Betrachtung aller Fälle bezüglich der Stufenstellung und deren Auswirkung auf die Spannung folgendes zusammenfassen: jene Stufenstellung, die für das Niederspannungsnetz optimal wäre, ruft im Mittelspannungsnetz den größten Spannungsabfall hervor und ist somit aus der Sicht des Mittelspannungsnetzes die "schlechteste" Stufenstellung. Hier gilt als "schlecht", wenn die Spannung näher am vorgegebene Spannungsband von $U_n \cdot \pm 10\%$ liegt.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Ohne $Q(U)$ -Regelung

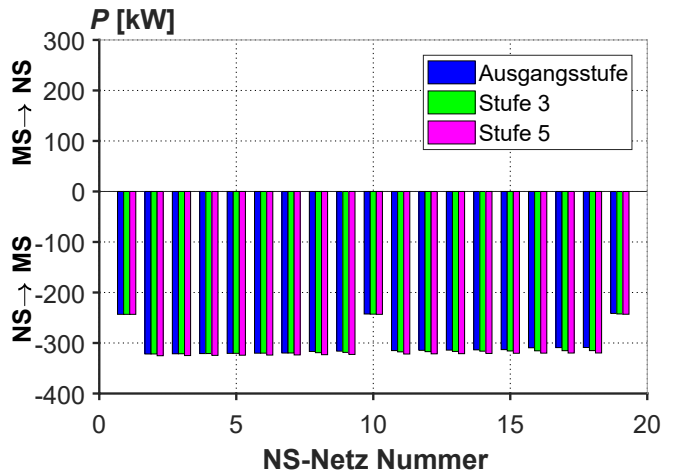
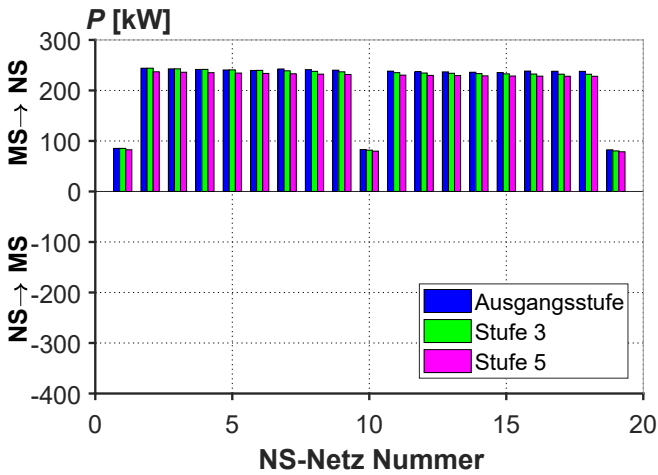
L^{max} / E^0

L^{min} / E^{max}



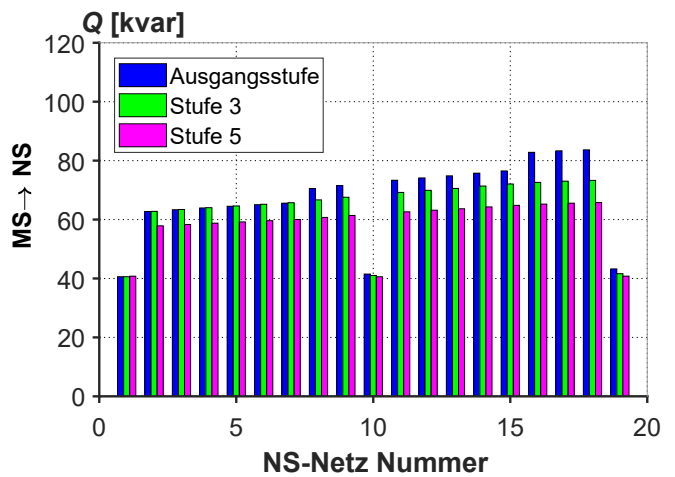
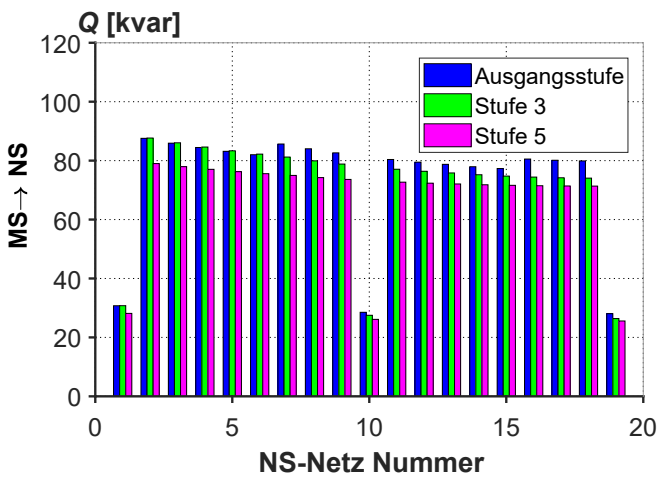
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Abbildung 4.27: Spannung des MS-Abzweigs: (a) L^{max} / E^0 und (b) L^{min} / E^{max} (+ Spannung auf der Unterspannungsseite des Verteiltransformators u_{NSSi}); Wirk- und Blindleistungsbezug der Niederspannungsnetze bei verschiedenen Stufenstellungen: (c)(e) L^{max} / E^0 und (d)(f) L^{min} / E^{max}

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Mit $Q(U)$ -Regelung

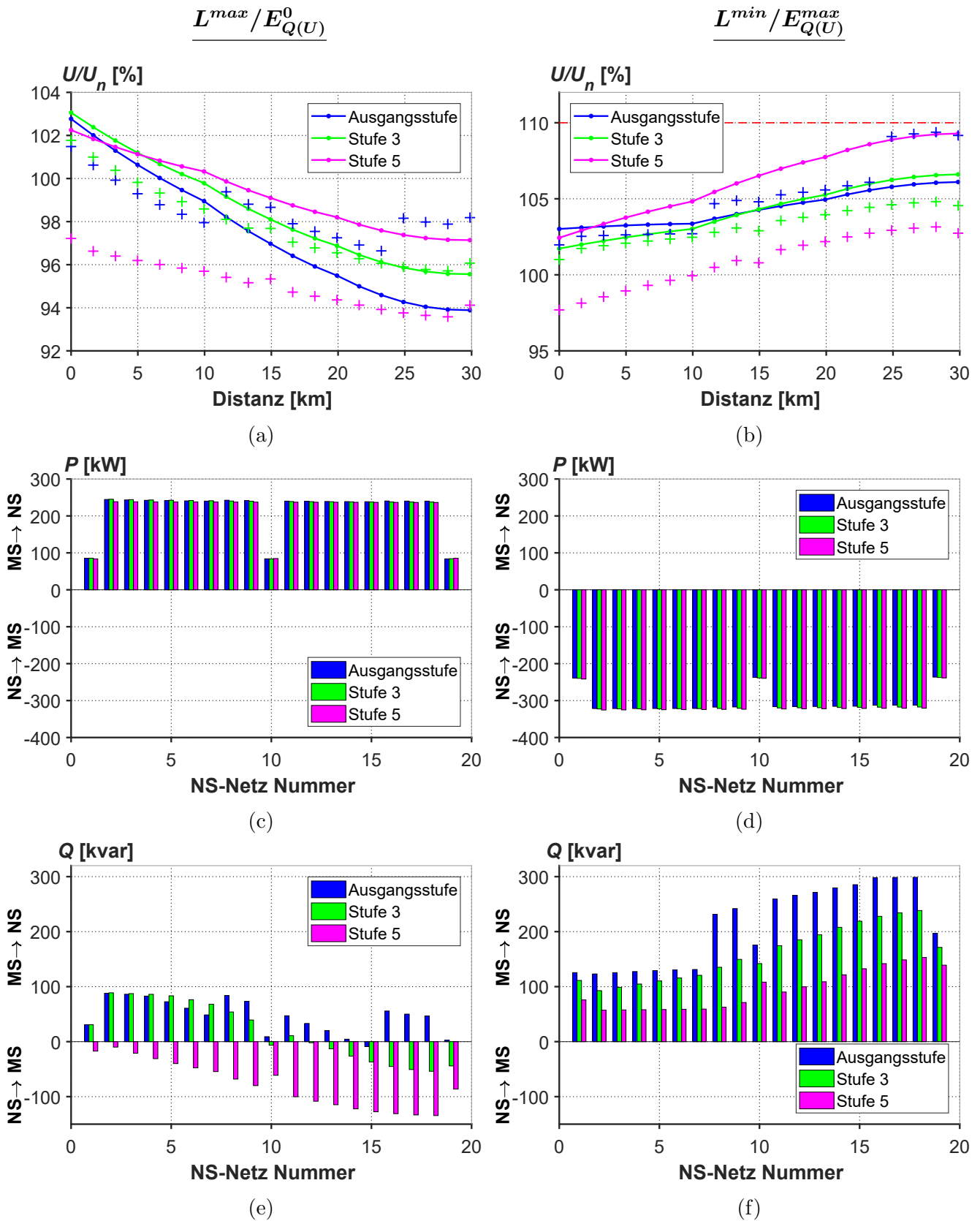


Abbildung 4.28: Spannung des MS-Abzweigs: (a) $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ und (b) $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ (+ Spannung auf der Unterspannungsseite des Verteiltransformators u_{NSSi}); Wirk- und Blindleistungsbezug der Niederspannungsnetze bei verschiedenen Stufenstellungen: (c)(e) $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ und (d)(f) $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$

Direkte und Indirekte Wirkung einer Stufenstellungsänderung

Aus den vorhergegangenen Simulationen lässt sich der Schluss ziehen, dass der Verteiltransformator die prinzipielle Aufgabe hat die Spannung des Mittelspannungsnetzes auf $0,4\text{kV}$ zu transformieren. Abgesehen davon hat die Stufenstellung des Verteiltransformators noch weitere Auswirkungen auf die Spannungen der angrenzenden Netze, welche in der weiteren Folge aufgeteilt werden in:

- **Direkte Wirkung:** Der Umsteller im Verteiltransformator bewirkt eine Spannungsanhebung oder Absenkung im Niederspannungsnetz, um den Spannungsabfall des Mittelspannungsabzweigs zu kompensieren. Diese Auswirkung betrifft nur das Niederspannungsnetz, hat jedoch auch eine Wirkung auf den Leistungsfluss im Niederspannungsnetz.
- **Indirekte Wirkung:**
 1. Leistungsflussänderung: Durch diese Spannungsanhebung oder Absenkung im Niederspannungsnetz ergeben sich weitere Änderungen im Netz, welche Auswirkungen auf das Mittelspannungsnetz haben. Die Verluste des Transformators und der Leitungen sind spannungsabhängig und verändern sich bei einer Umstellung der Stufenstellung. Außerdem beeinflusst die Änderung der Spannung im Niederspannungsnetz das Leistungsverhalten der Lasten und hat Auswirkungen auf das Regelverhalten der Wechselrichter. Diese Änderungen bewirken einen geänderten Leistungsfluss, welcher wiederum die Verluste im Niederspannungsnetz beeinflusst. Insgesamt ändert also eine Änderung der Stufenstellung im Verteiltransformator den Leistungsfluss vom oder ins Niederspannungsnetz und das wirkt sich wiederum auf die Spannung im Mittelspannungsnetz aus, wie man in Formel 2.12 sieht.
 2. Impedanzänderung: Durch die geänderte Stufenstellung ändert sich die Anzahl der angezapften Windungen des Verteiltransformators was eine modifizierte Transformator-Impedanz zur Folge hat. Durch diese Impedanzänderung ändert sich der Spannungsabfall über den Transformator, wie man in Formel 2.12 erkennen kann.

In dieser Arbeit wird die Impedanzänderung des Transformators bei einer Stufenstellungsänderung vernachlässigt, da der Fokus auf der Leistungsflussänderung aus den Niederspannungsnetzen liegen soll.

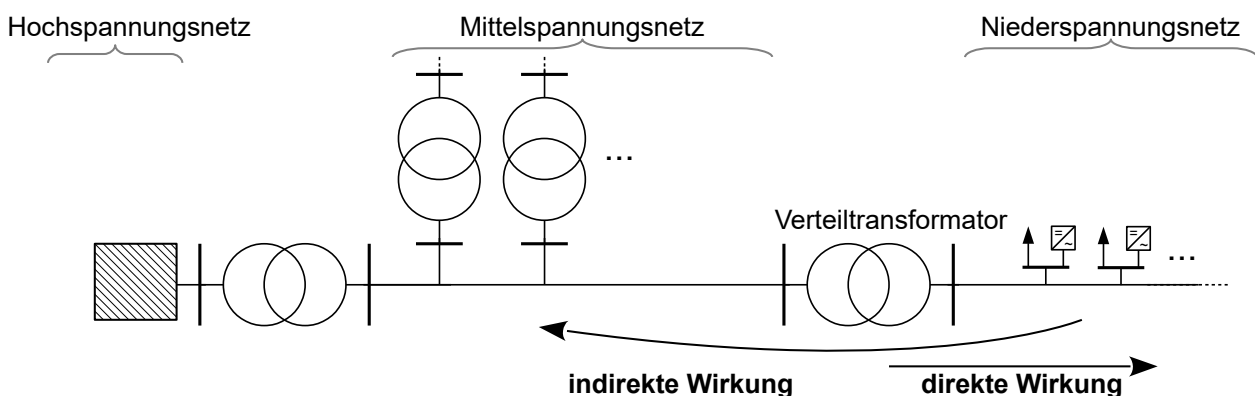


Abbildung 4.29: Direkte und indirekte Wirkung der Stufenposition des Verteiltransformators auf die Spannung

Vergleich der Stufenstellungen für ein Freileitungs-Mittelspannungsnetz

In Abbildung 4.30 ist das Spannungsprofil des Mittelspannungsabzweigs für verschiedene Belastungsfälle zu sehen. Man erkennt deutlich die bereits erläuterten Auswirkungen der Stufenstellungen mit und ohne Blindleistungsregelung.

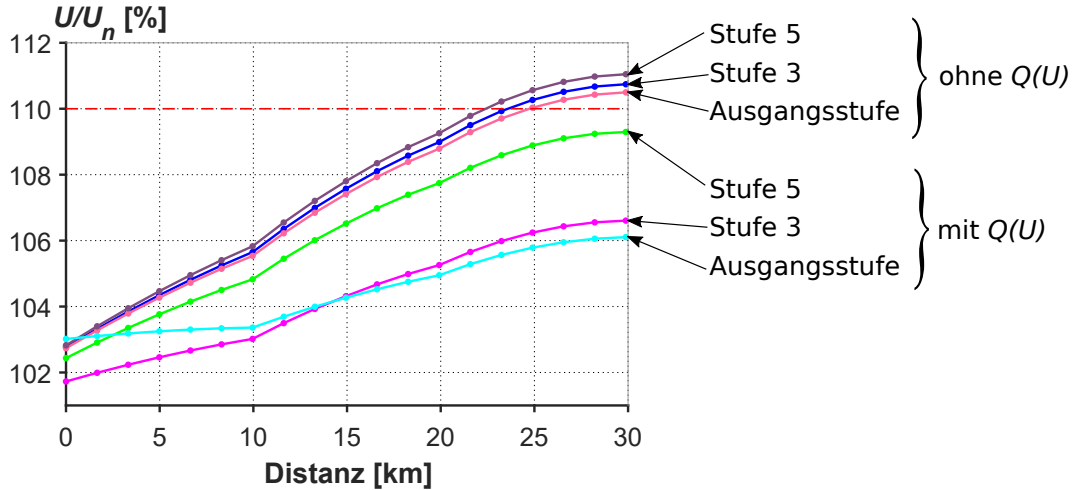


Abbildung 4.30: Spannung am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig für die Fälle L^{min}/E^{max} und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$

Würde man sich nur auf die Spannung im Mittelspannungsnetz konzentrieren um diese zu optimieren, könnte man behaupten, die beste Lösung wäre die Ausgangsstufenstellung mit $Q(U)$ -Regelung. Dabei würde man aber die Spannungen der Niederspannungsnetze vernachlässigen, die sich konträr zu der Spannung im Mittelspannungsnetz verhalten. In Abbildung 4.31 ist für dieselben Betrachtungsfälle die Spannung am Mittelspannungsabzweig und am letzten Niederspannungsnetz zu sehen. Man erkennt deutlich, dass die Spannung im Niederspannungsnetz mit Erhöhung der Stufenstellung sinkt, sich jedoch im Mittelspannungsnetz erhöht.

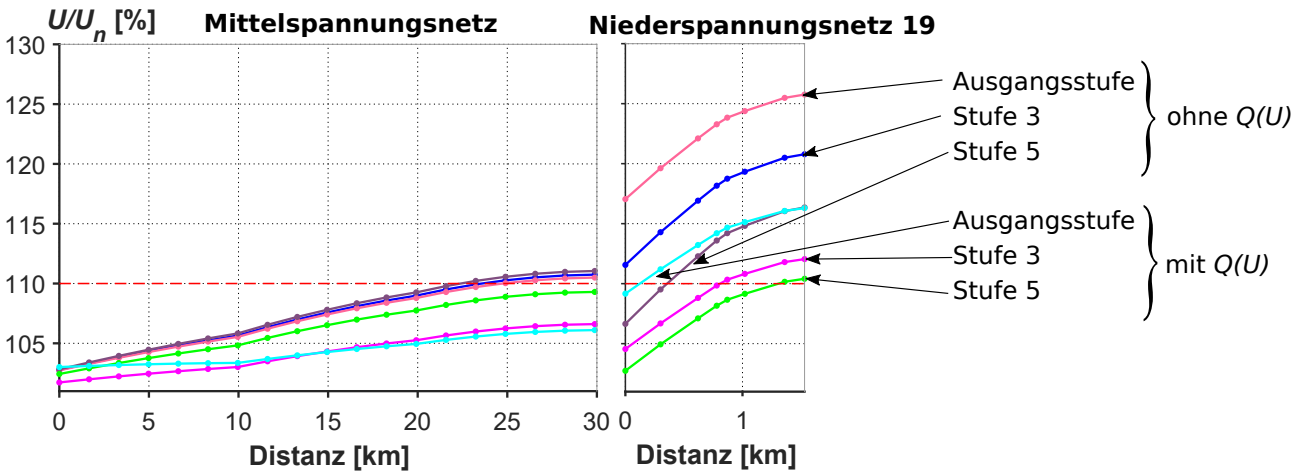


Abbildung 4.31: Spannung am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig und im Niederspannungsnetz 19 für die Fälle L^{min}/E^{max} und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ bei verschiedenen Stufenstellungen

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

In Abbildung 4.32 ist die Spannung in der gleichen Weise für die Fälle bei maximaler Last und ohne dezentraler Einspeisung (L^{max}/E^0 und $L^{max}/E_{Q(U)}^0$) dargestellt.

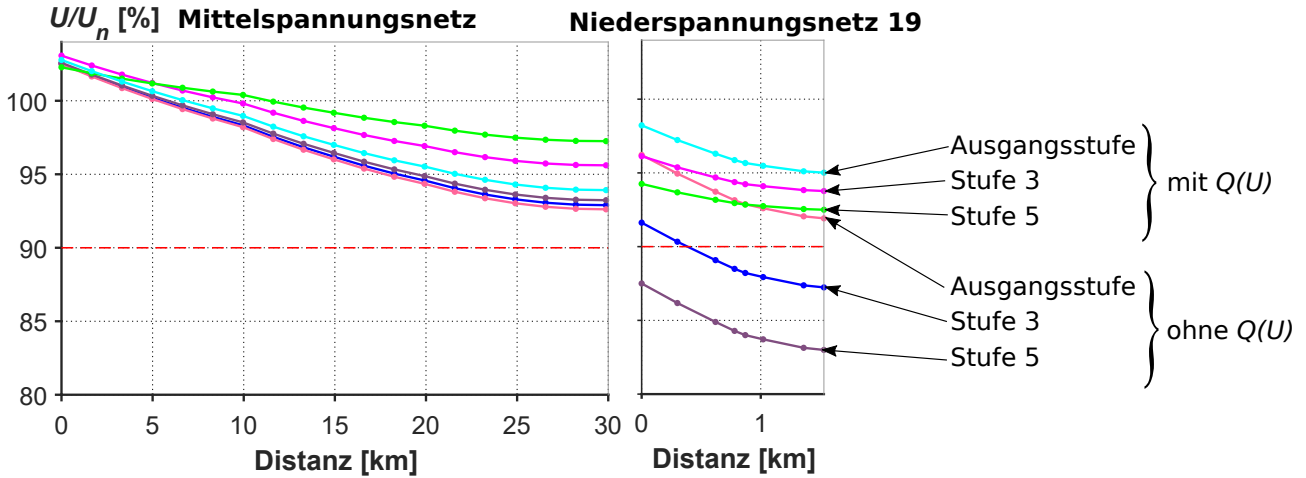


Abbildung 4.32: Spannung am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig und im Niederspannungsnetz 19 für die Fälle L^{max}/E^0 und $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei verschiedenen Stufenstellungen

Um nicht nur die Spannung im Mittelspannungsnetz isoliert zu betrachten, werden in weiterer Folge Vergleichskriterien eingeführt, welche das gesamt betrachtete Netz berücksichtigen, also den Mittelspannungsabzweig und alle Niederspannungsnetze:

- ΔP : Wirkleistungsverluste der Leitungen und Transformatoren im Nieder- und Mittelspannungsnetz
- ΔQ : Blindleistungsbedarf der Leitungen und Transformatoren im Nieder- und Mittelspannungsnetz
- **Anzahl der Spannungsbandverletzungen**: Über- oder Unterschreitung der Spannung von $\pm 10 \cdot U_n$ im Mittel- und Niederspannungsnetz
- **Spannungsverletzungs-Index (SVI)**: in Kapitel 2.2.1 definiert, berücksichtigt die Höhe der Spannungsbandverletzungen
- $Q_{Austausch}$: Austausch der Blindleistung von Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz
- I/I_n der MS-/NS-Trafos: Gemittelte Auslastung der Verteiltransformatoren

Abbildung 4.33 zeigt die Wirkleistungsverluste und den Blindleistungsbedarf aller Netzelemente für die vier Belastungsfälle bei verschiedenen Stufenstellungen. Man erkennt, dass sich ΔP und ΔQ sehr ähnlich verhalten, was daran liegt, dass bei beiden Verlusten sowohl die übertragene Wirk- als auch Blindleistung eingehen, wie man in Formel 2.17 und 2.18 sehen kann. Der Unterschied liegt vor allem in der Höhe der Verluste, bedingt durch die Leitungs- und Transformatorparameter. Die Verluste selbst sind jeweils quadratisch abhängig vom Leistungsfluss und der Spannung. Eine genaue Darstellung der Verluste für die unterschiedlichen Netzwerkelemente bei den verschiedenen Belastungsfällen ist im Appendix in den Abbildungen 7.1 bis 7.4 zu sehen. Im Fall der maximalen Last L^{max}/E^0 ist ΔP und ΔQ für die Stufe 5 am kleinsten. Den größten Anteil haben bei den Wirkleistungsverlusten die Leitungsverluste des Mittelspannungsnetzes. Die Leitungsverluste von Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz verhalten sich genau gegengleich. Beim Blindleistungsbedarf dominieren vor allem die Transformatoren, aber auch die Mittelspannungsleitungen. Durch eine höhere Stufenstellung der Verteiltransformatoren wird die Spannung im Mittelspannungsnetz angehoben, da die Lasten im Niederspannungsnetz weniger Leistung beziehen. Bei den Verlusten wirken also zwei Effekte: Die höhere Spannung und der

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

kleinere Leistungsfluss. Beide Effekte verringern die Verluste bei kleinerer Stufenstellung. Bei hoher dezentraler Einspeisung L^{min}/E^{max} verhalten sich die Verluste genau umgekehrt. Eine höhere Stufenstellung erhöht zwar die Spannung im Mittelspannungsnetz und verkleinert somit die Verluste, jedoch bewirkt sie gleichzeitig einen größeren Leistungsfluss, da durch die kleinere Last mehr Leistung vom Niederspannungsnetz ins Mittelspannungsnetz eingespeist wird. Hier dominiert dieser Effekt und die Verluste erhöhen sich bei einer größeren Stufenstellung. Hinzu kommt, dass im Niederspannungsnetz beide Effekte die Verluste bei hoher Stufenstellung steigen lassen: Niedrigere Spannung und höherer Leistungsfluss.

Es lässt sich also für die Fälle ohne $Q(U)$ -Regelung zusammenfassen:

- L^{max}/E^0 : höhere Stufenstellung \rightarrow höhere Spannung im Mittelspannungsnetz und geringerer Leistungsfluss (Verluste des Mittelspannungsnetzes dominieren) \rightarrow weniger Verluste
- L^{min}/E^{max} : höhere Stufenstellung \rightarrow höherer Leistungsfluss im Mittelspannungsnetz + niedrigere Spannung im Niederspannungsnetz bei höherem Leistungsfluss \rightarrow höhere Verluste

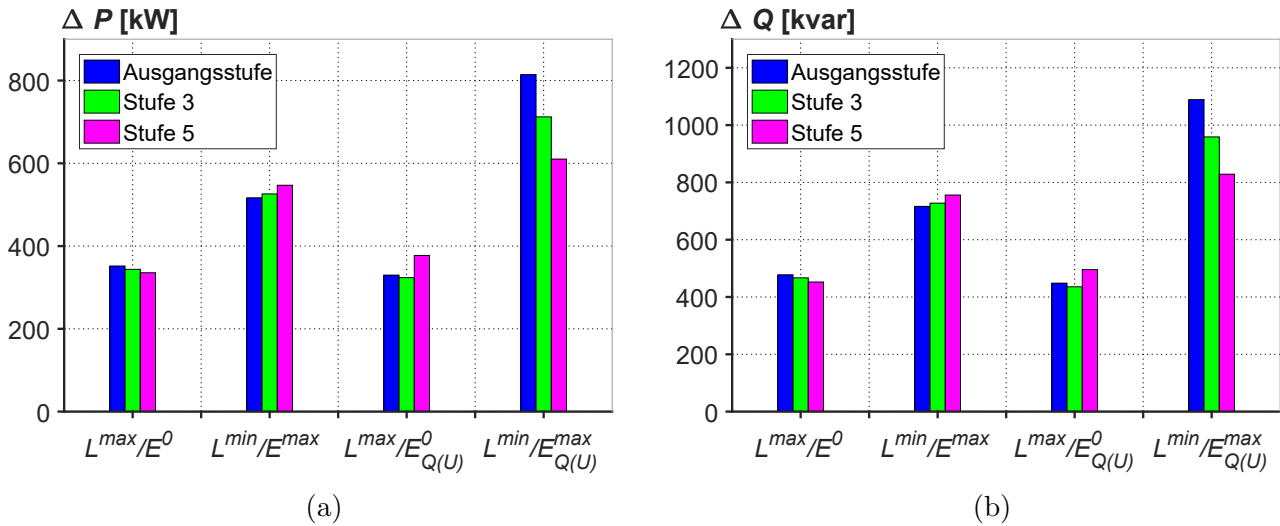


Abbildung 4.33: Gesamten Verluste des Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz für die Belastungsfälle (NS-Leitungsverluste, NS-Transformatorverluste, MS-Leitungsverluste, MS-Transformatorverluste) bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz: (a) Wirkleistungsverluste und (b) Blindleistungsbedarf

Bei den Fällen $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ mit $Q(U)$ -Regelung kommt die vom Wechselrichter bereitgestellte oder bezogene Blindleistung hinzu. Dieser Effekt wird umso größer, je weiter die Spannung in den Niederspannungsnetzen von der Nominalspannung abweicht und ist abhängig von der Kennlinie der Regelung. Diese Abweichung ist im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei Stufe 5 und im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ bei der Ausgangsstufe am größten. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ durch die Blindleistungseinspeisung der Wechselrichter der Blindleistungsbezug der Lasten teilweise gedeckt wird. Dieses Verhalten in manchen Niederspannungsnetzen ist sehr gut in Abbildung 4.28e zu sehen. Dadurch wird weniger Blindleistung aus dem Hochspannungsnetz bezogen. Im Fall der Stufe 5 kehrt sich dieser Effekt jedoch ins Negative, da nun durch die Wechselrichter so viel Blindleistung bereit gestellt wird, dass die Verluste im Vergleich ohne Regelung höher werden.

Über die Stufenstellung der Transformatoren lässt sich in Bezug auf die Verluste sagen, dass ohne $Q(U)$ -Regelung eine mittlere Stufenstellung zu bevorzugen wäre, da sie sowohl im Fall L^{max}/E^0 als auch im Fall L^{min}/E^{max} bei den Verlusten in der Mitte liegt. Mit $Q(U)$ -Regelung ist die mittlere Stufenstellung bei Last sogar die optimale Stufenstellung, bei Einspeisung ist es

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

jedoch vorteilhaft die Spannung im Niederspannungsnetz mit einer hohen Stufenstellung nach unten zu drücken.

Abbildung 4.34 zeigt die Spannungsbandverletzungen und den SVI für die verschiedenen Fälle. Bei der Ausgangsstufenstellung zeigt sich, dass diese für hohe PV-Einspeisung nicht optimal ist, denn hier kommt es auf Grund der zusätzlichen Spannungserhöhung in den Niederspannungsnetzen durch die Stufenstellung zu sehr großen Spannungsbandverletzungen. Eine hohe Stufenstellung ist zwar im Einspeisefall optimal, verursacht jedoch bei hoher Last hohe Spannungsbandverletzungen. Mit Hilfe der $Q(U)$ -Regelung lässt sich die Spannung im Lastfall für alle Stufeneinstellungen im erlaubten Bereich halten. Für $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ zeigt sich, dass auch hier sehr hohe Stufenstellungen optimal wären. Allgemein kann gesagt werden, dass sich in den Belastungsfällen L^{max}/E^0 und $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ eine hohe Stufenstellung negativ auswirkt und im Fall hoher dezentraler Erzeugung L^{min}/E^{max} und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ einen positiven Effekt auf die Anzahl der Spannungsbandverletzungen hat.

Vergleicht man die beiden Abbildungen 4.34a und 4.34b, also die Spannungsbandverletzungen und den SVI, bekommt man eine Aussage über die Höhe der Spannungsbandverletzungen in den einzelnen Fällen. Mit der Ausgangsstufe treten im Einspeisefall L^{min}/E^{max} nicht nur die meisten, sondern auch die höchsten Spannungsbandverletzungen auf. Im Gegenzug ist zu sehen, dass die Höhe der Verletzungen mit $Q(U)$ -Regelung vergleichsweise gering ausfallen.

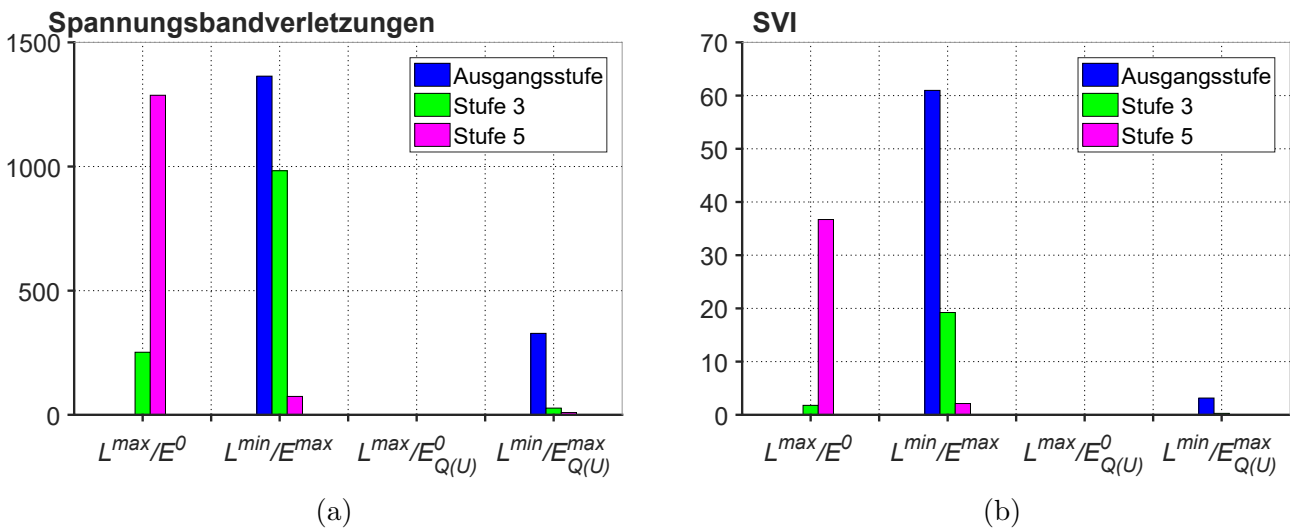


Abbildung 4.34: (a) Anzahl der Spannungsbandverletzungen und (b) Spannungsverletzungsindex im Nieder- und Mittelspannungsnetz bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz

In der Tabelle 4.9 sind die Werte des SVIs für die verschiedenen Belastungsfälle aufgelistet.

	Stufe Last	Stufe 3	Stufe 5
L^{max}/E^0	0	1.78	36.71
L^{min}/E^{max}	60.98	19.23	2.12
$L^{max}/E_{Q(U)}^0$	0	0	0
$L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$	3.15	0.27	0.03

Tabelle 4.9: Spannungsverletzungs-Index bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

In Abbildung 4.35a ist der Blindleistungsaustausch des Mittelspannungsnetzes und des Hochspannungsnetzes zu sehen. Im Fall ohne $Q(U)$ -Regelung wird die Abhängigkeit der Blindleistung von den Stufenstellungen nur durch die Lasten und Verluste bestimmt. Somit ergibt sich, dass $Q_{Austausch}$ kleiner wird, desto niedriger die Spannung im Niederspannungsnetz ist, also je höher die Stufenstellung ist. Es scheint als sei der Blindleistungsaustausch für den Fall L^{max}/E^0 und L^{min}/E^{max} genau gleich, was allerdings nicht stimmt und auch nicht allgemein gültig ist. Die Betrachtung der Abbildungen 4.27e und 4.27f zeigt wie sich der Blindleistungsfluss aus den Niederspannungsnetzen zusammensetzt. Man erkennt, dass im Fall L^{max}/E^0 mehr Blindleistung durch die Niederspannungsnetze bezogen wird. Hinzu kommen noch die Abhängigkeiten der Netzelemente im Mittelspannungsnetz, wobei hier der Transformator und die Leitungen auf Grund des höheren Leistungsflusses im Fall L^{min}/E^{max} mehr Blindleistung benötigen. Diese zwei Effekte gleichen sich hier aus und es erscheint, als wäre der Blindleistungsaustausch für beide Fälle gleich.

Mit $Q(U)$ -Regelung ist zu sehen, dass im Fall $L^{max}/E^0_{Q(U)}$ die ausgetauschte Blindleistung weniger wird, da die Wechselrichter Blindleistung bereitstellen. Für Stufe 5 tritt der Extremfall ein und der Blindleistungsfluss kehrt sich um, wodurch das Mittelspannungsnetz Blindleistung für das Hochspannungsnetz bereit stellt. Im Gegensatz dazu wird der Blindleistungsbezug des Mittelspannungsnetzes für den Fall hoher dezentraler Einspeisung $L^{min}/E^{max}_{Q(U)}$ sehr hoch. Durch die Änderung der Stufenstellung kann hier $Q_{Austausch}$ mehr als halbiert werden.

Abbildung 4.35b zeigt die durchschnittliche Auslastung der Verteiltransformatoren im Mittelspannungsnetz. In den Fällen mit dezentraler Einspeisung L^{min}/E^{max} und $L^{min}/E^{max}_{Q(U)}$ ist die Auslastung der Transformatoren größer, weil mit der sehr hohen Einspeisung von $5kW$ pro Haushalt sich der Wirkleistungsfluss über den Transformator umdreht und größer ist als im Fall ohne dezentraler Einspeisung. Ohne $Q(U)$ -Regelung ist der Belastungsunterschied zwischen den einzelnen Stufen nicht sehr hoch, da dieser nur durch die Spannungsabhängigkeit der Lasten und der Verluste hervorgerufen wird. Mit $Q(U)$ -Regelung ändert sich die Belastung stärker und wird vor allem von dem geänderten Blindleistungsfluss durch die Regelung und von den spannungsabhängigen Lasten beeinflusst.

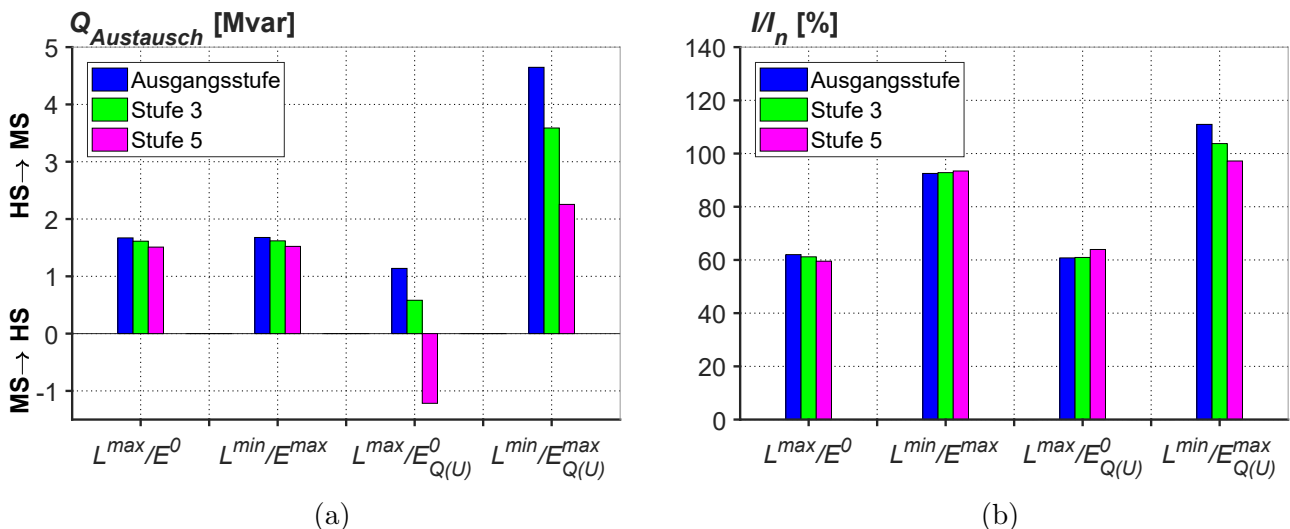


Abbildung 4.35: (a) Blindleistungsaustausch zwischen Hochspannungsnetz und Mittelspannungsnetz, (b) durchschnittliche Auslastung der Verteiltransformatoren bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz

Zieht man alle hier dargestellten Fälle und Faktoren in Betracht, kann festgestellt werden, dass mit lokaler Blindleistungsregelung und der richtigen Stufenstellung, der Optimalfall im

Bezug auf die Spannung erreicht wird. Zwar gibt es bei hoher dezentraler Erzeugung für diesen Mittelspannungszweig in jedem Fall Spannungsbandverletzungen, jedoch kann dies mit einer weiteren Adaption der Stufenstellungen vermieden werden. Die lokale Blindleistungsregelung im Niederspannungsnetz hat den Vorteil, dass sie direkt am Einspeisepunkt selektiv auf die jeweiligen Abzweige des Niederspannungsnetzes wirkt und den aktuellen Netzzustand mit berücksichtigt. Ein großes Problem der $Q(U)$ -Regelung ist aber der unkontrollierbare Blindleistungsfluss, welcher vor allem bei hoher Einspeisung und somit hoher Spannung sehr groß wird. Dieser hohe Blindleistungsfluss hat auch einen großen Einfluss auf die Verluste, welche bei hoher dezentraler Erzeugung mit $Q(U)$ -Regelung am größten sind. Beachtet werden muss aber, dass in Extremsituationen dieser Blindleistungsfluss für die Spannung im Mittelspannungsnetz wichtig sein kann, da er dort im Fall hoher dezentraler Einspeisung im Niederspannungsnetz bei $Q(U)$ -Regelung eine Verringerung der Spannung zur Folge hat.

4.3.2 Kabel im Mittelspannungsnetz

Um den Einfluss von Kabeln im Mittelspannungsnetz auf dessen Spannungsband in Abhängigkeit der Stufenstellung zu untersuchen, werden für die folgende Simulationen die Freileitungen im Mittelspannungsnetz aus dem Netz in Abbildung 3.7 durch Kabel ersetzt. Dabei sind drei verschiedene Kabeltypen zum Einsatz gekommen und diese wurden in gleicher Weise wie die Freileitungen verteilt. Am Anfang des Abzweigs liegen die Kabel mit dem größten Querschnitt, welcher dann bis zum Ende hin kleiner wird. Die Zuleitungen zu den Niederspannungsnetzen sind mit dem kleinsten Querschnitt ausgeführt. Die Leitungsparameter wurden aus dem gleichen Mittelspannungsnetz wie die Daten der Freileitung entnommen, wobei darauf geachtet wurde, dass der maximale Belastungsstrom von Freileitungen und Kabel bei den Typen in etwa gleich ist. Aus thermischen Gründen können Kabel nicht so hoch ausgelastet werden wie Freileitungen, weshalb der Querschnitt eines Kabels im Vergleich zu einer Freileitung mit dem gleichen thermischen Grenzstrom meist größer ist. Die genauen Leitungsdaten sind im Appendix in Tabelle 7.6 zu finden.

Die Ausgangsstufen für das Kabel-Mittelspannungsnetz unterscheiden sich zu denen des Freileitungs-Mittelspannungsnetz auf Grund des geringeren Spannungsabfalles über Kabel. Sie wurden mit der gleichen Methodik ermittelt wie jene für die Freileitungen, welche in Kapitel 4.3.1 beschrieben ist. Die Ausgangsstufenstellungen für das Kabel-Mittelspannungsnetz sind in Abbildung 4.36 gezeigt.

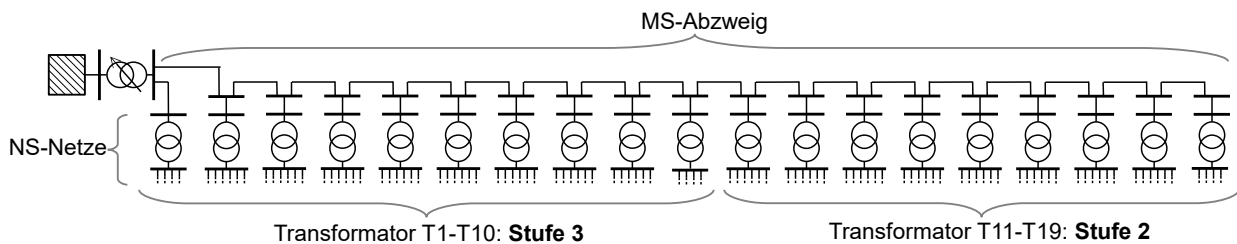


Abbildung 4.36: Ermittelte Ausgangsstufenstellungen der Verteiltransformatoren am Kabel-Mittelspannungsabzweig

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Im Vergleich zur Freileitung haben Kabel einen hohen Kapazitätsbelag, was einen kapazitiven Ladestrom (4.2) zur Folge hat. Sie können ohne künstliche Kühlung meist nur unter ihrer natürlichen Leistung betrieben werden und nehmen somit auch bei Belastung kapazitive Ladeleistung auf. Diese kapazitive Ladeleistung steigt, wie in 4.3 zu sehen ist, quadratisch mit der Spannung an.

Kapazitiver Ladestrom:

$$I'_c = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot X_c} \quad (4.2)$$

Ladeleistungsbelag:

$$Q'_c = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I'_c = \frac{U_n^2}{X_c} \quad (4.3)$$

Der Spannungsabfall über eine Kabelstrecke ist im Vergleich zur Freileitung auf Grund der Leitungsparameter geringer. Das liegt daran, dass wie bereits erwähnt bei Kabeln der Leiterquerschnitt aus thermischen Gründen größer gewählt wird als bei Freileitungen und der Leiterabstand zwischen den drei Phasen geringer ist. Dies bewirkt einen geringeren ohmschen und induktiven Leitungsbelag. Das bedeutet wiederum, dass ein zusätzlicher Leistungsfluss über ein Kabel einen geringeren Spannungsabfall verursacht als bei Freileitungen.

Vergleich der Stufenstellungen für ein Kabel-Mittelspannungsnetz

In Abbildung 4.37 ist die Spannung am Mittelspannungsabzweig dargestellt. Im Vergleich zur Freileitung steigt die Spannung am Ende des Abzweigs nicht über die kritischen $110\% \cdot U_n$ hinaus.

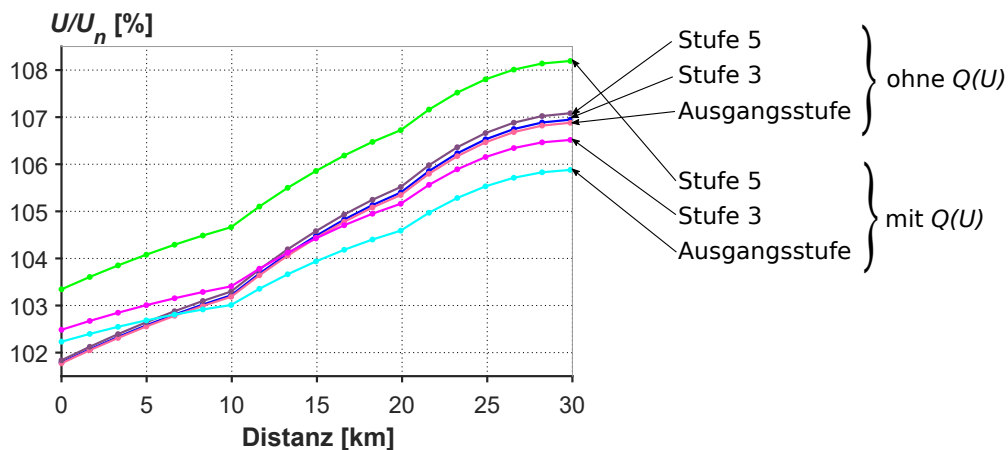


Abbildung 4.37: Spannung am Kabel-Mittelspannungsabzweig für die Fälle L^{min}/E^{max} und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ bei verschiedenen Stufenstellungen

Man erkennt die bereits besprochene Wirkung der Stufenstellung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz, welche sich aber bei einer Kabelstruktur nicht so stark auswirkt wie bei Freileitungen. Der Blindleistungsfluss durch die $Q(U)$ -Regelung bewirkt eine Änderung des Spannungsabfalls über den HS/MS-Transformator, welchen man deutlich erkennt. Zwischen der Ausgangsstufe und Stufe 3 mit $Q(U)$ -Regelung sieht man, dass der Spannungsabfall über den Transformator kleiner wird und somit eine höhere Spannung an der Sekundärseite des Transformators anliegt, da vom Mittelspannungsnetz bei Stufe 3 weniger Blindleistung bezogen wird. In Abbildung 4.41a ist zu sehen, dass bei Stufe 5 der Blindleistungsbedarf des Mittelspannungsnetzes noch weiter

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

zurück geht und somit die Spannung auf der Sekundärseite des HS-/MS-Transformators noch größer wird. In diesem Fall schaltet die Regelung des Transformators gerade noch nicht, um die Spannung nach unten zu drücken, da das Regelband des Transformators zwischen $101.5\% \cdot U_n$ und $103.5\% \cdot U_n$ liegt.

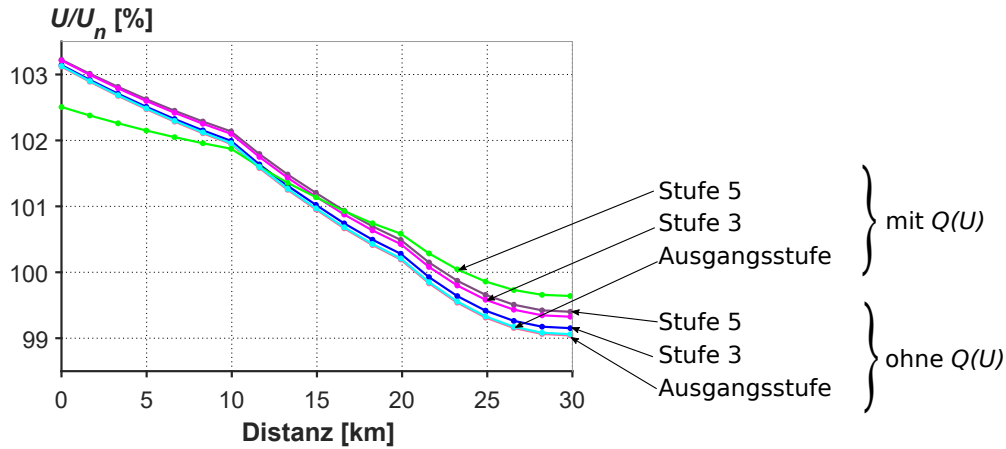


Abbildung 4.38: Spannung am Kabel-Mittelspannungsabzweig für die Fälle L^{max}/E^0 und $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei verschiedenen Stufenstellungen

Abbildung 4.38 zeigt die Fälle L^{max}/E^0 und $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei verschiedenen Stufenstellungen. Auch hier ist im Vergleich zu Freileitungen im Mittelspannungsnetz die Auswirkung der Stufenstellungen auf die Spannung geringer. Bei Stufe 5 mit $Q(U)$ -Regelung erkennt man, dass der HS-/MS-Transformators auf Grund einer Spannungsübertretung des oberen Regelbands eine Stufe nach oben schaltet, um die Spannung im Mittelspannungsnetz im Regelband zu halten. Dieser Spannungsabfall über den Transformator wird durch die Blindleistungseinspeisung der Wechselrichter hervorgerufen, welche bei zu geringer Spannung Blindleistung ins Netz einspeisen. Bei Stufe 5 wird im Vergleich zur Stufe 3 mehr Blindleistung eingespeist, da die Spannung in den Niederspannungsnetzen niedriger ist. Somit dreht sich in diesem Fall der Blindleistungsfluss um und zeigt vom Mittelspannungsnetz ins Hochspannungsnetz, wie in Abbildung 4.41a zu erkennen ist. Für den Spannungsabfall über den HS-/MS-Transformator bedeutet das einen negativen Spannungsabfall, also bei Stufe 5 eine höhere Spannung auf der Sekundärseite des Transformators als bei Stufe 3.

Stufe des Verteiltrafos	L^{max}/E^0	L^{min}/E^{max}	$L^{max}/E_{Q(U)}^0$	$L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$
Ausgangsstufe	11	12	11	11
Stufe 3	11	12	11	11
Stufe 5	11	12	12	11

Tabelle 4.10: Stufenstellung des HS-/MS-Transformators bei den verschiedenen Belastungsfällen und Stufenstellungen des Verteiltransformators

Zur Übersicht sind in Tabelle 4.10 die Stufenstellungen des HS-/MS-Transformators für alle Belastungsfälle und Stufenstellungen der Verteiltransformatoren dargestellt. Hauptverantwortlich für den Spannungsabfall über den Transformator ist die Blindleistung, aus diesem Grund lässt sich die aktuelle Stufenstellung des Transformators mit dem Blindleistungsaustausch zwischen HS- und MS-Netz aus Abbildung 4.41a erklären. Mehr Blindleistung vom HS-Netz ins MS-Netz bedeutet einen größeren Spannungsabfall und eine niedrigere Stufenstellen, sofern es dadurch zu Regelbandverletzungen kommt.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

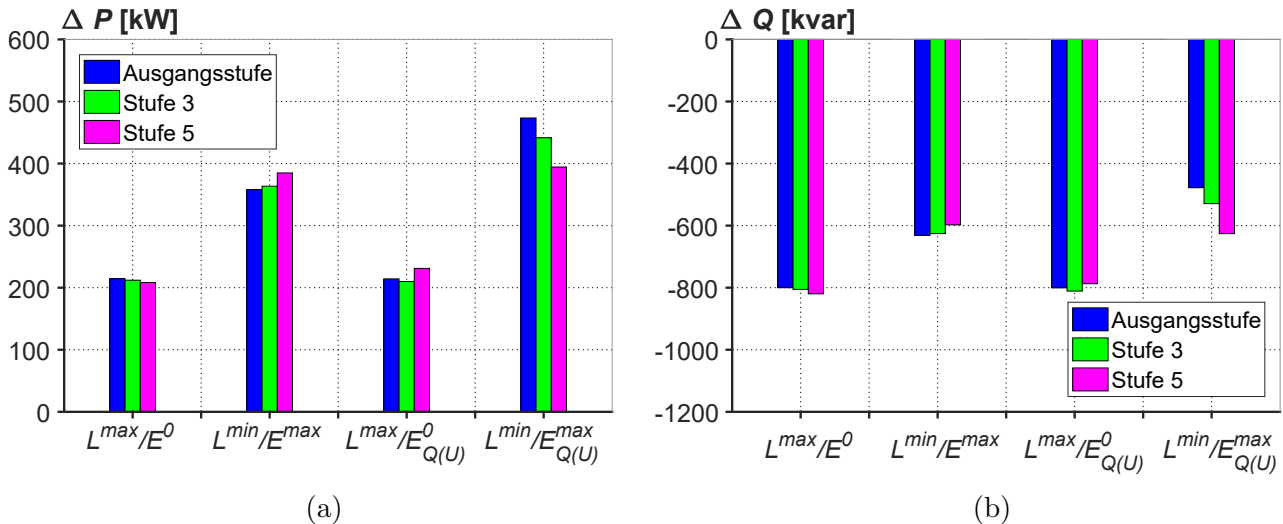


Abbildung 4.39: Gesamten Verluste des Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz für die Belastungsfälle (NS-Leitungsverluste, NS-Transformatorverluste, MS-Leitungsverluste, MS-Transformatorverluste) bei einem Kabel-Mittelspannungsnetz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf

Die Wirkleistungsverluste der Netzelemente sind im Vergleich zu den Freileitungen im Mittelspannungsnetz geringer, wie in Abbildung 4.39a zu sehen ist. Eine genaue Darstellung der Verluste für die unterschiedlichen Netzwerkelemente der verschiedenen Belastungsfälle ist im Appendix in den Abbildungen 7.5 bis 7.8 zu sehen. Man erkennt, dass die Mittelspannungsleitungen die dominierenden Verursacher der Verluste sind. Der Unterschied in den Verlusten durch das Verstellen der Stufenstellung ist kleiner als bei Freileitungen. Die tendenzielle Abhängigkeit der Verluste von der Stufenstellung ist jedoch bei Kabeln und Freileitungen in diesen Simulationen gleich. Das Verhalten im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ lässt sich über die Blindleistung erklären. Bei Stufe 5 dreht sich, wie in Abbildung 4.41a zu sehen ist der Blindleistungsfluss um und der Betrag der Blindleistung wird größer, was die höheren Wirkleistungsverluste erklärt. Durch die Dominanz der Kabel wird der summierte Blindleistungsbedarf aller Netzelemente negativ, wie in Abbildung 4.39b zu sehen ist.

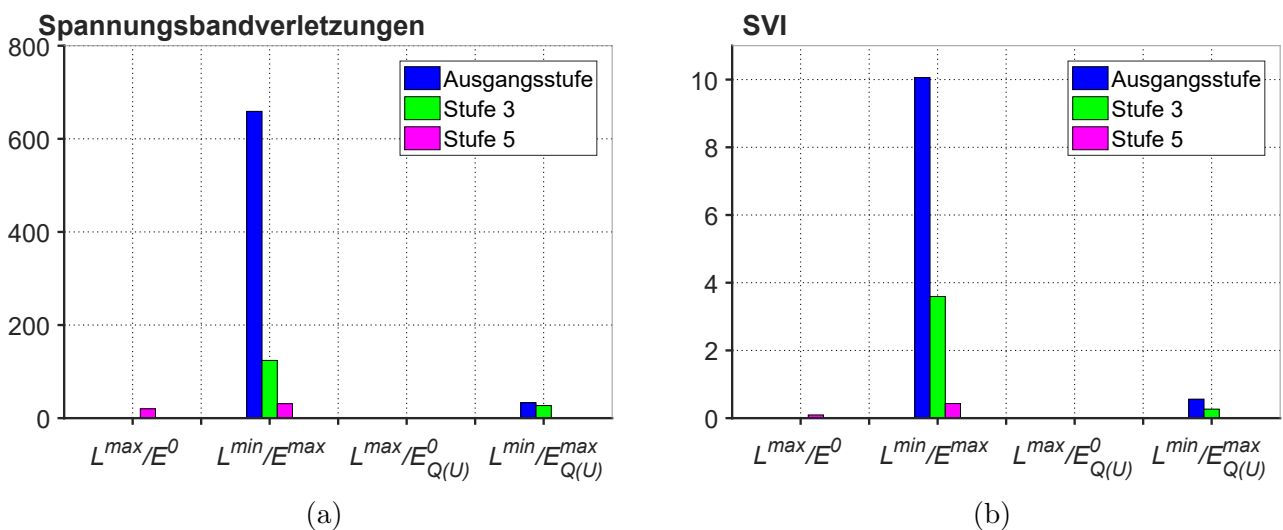


Abbildung 4.40: (a) Anzahl der Spannungsbandverletzungen und (b) Spannungsverletzungsindex im Nieder- und Mittelspannungsnetz bei einem Kabel-Mittelspannungsnetz

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Durch den kleineren Spannungsabfall über den Mittelspannungsabzweig auf Grund der Kabel, gibt es bei diesen Simulationen auch weniger Spannungsbandverletzungen als bei Freileitungen. Das Verhalten der Spannungsbandverletzungen in Abhängigkeit der Stufenstellung ist jedoch das gleiche, wie der Vergleich von Abbildung 4.34 und 4.40 zeigt.

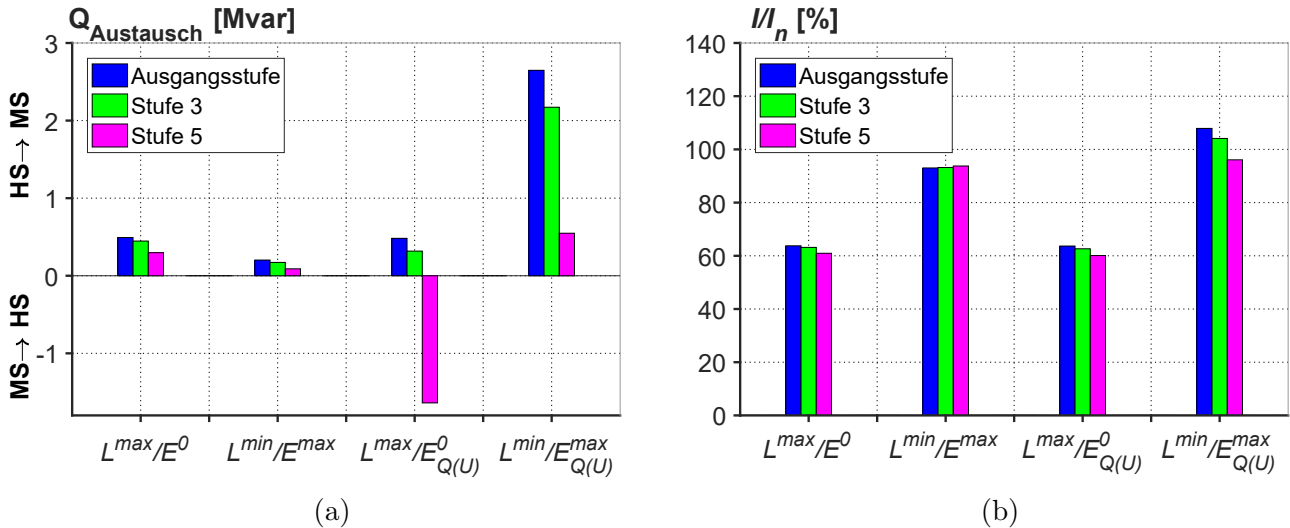


Abbildung 4.41: (a) Blindleistungsaustausch zwischen Hochspannungsnetz und Mittelspannungsnetz, (b) durchschnittliche Auslastung der Verteiltransformatoren bei einem Kabel-Mittelspannungsnetz

Auf Grund des großen Blindleistungseintrags der Kabel im Mittelspannungsnetz, wird die von den Lasten benötigte Blindleistung im Vergleich zu Freileitungen nicht mehr in dem Ausmaß aus dem Hochspannungsnetz bezogen, wie man in Abbildung 4.41a sehen kann. Im Fall ohne $Q(U)$ -Regelung wird somit für dieses Netz, in den betrachteten Extremfällen, kaum mehr Blindleistung aus dem Hochspannungsnetz benötigt. Die $Q(U)$ -Regelung führt im Lastfall $L^{\max}/E^0_{Q(U)}$ durch die zusätzliche Blindleistungseinspeisung der Wechselrichter bei Stufe 5 zu einem erhöhten Blindleistungsfluss vom Mittelspannungsnetz ins Hochspannungsnetz. Bei Einspeisung im Fall $L^{\min}/E^{\max}_{Q(U)}$ erkennt man, dass hier der Blindleistungsaustausch im Vergleich zur Freileitung zurückgeht, da die Spannungen niedriger sind und hier die von den Wechselrichtern konsumierte Blindleistung zur Spannungssenkung von den Kabeln kommt. Aber auch hier erkennt man, dass der prinzipielle Einfluss der Stufenstellungen auf den Blindleistungsaustausch derselbe ist wie bei Freileitungen, auch wenn sich Unterschiede in der Höhe ergeben. Die quadratische Spannungsabhängigkeit des Ladeleistungsbelags ist bei diesen Simulationen in Bezug auf die Blindleistung ebenfalls zu bedenken. Je höher die Spannung, desto mehr Blindleistung speisen die Kabel ins Netz.

Abbildung 4.41b zeigt die durchschnittliche Auslastung der Verteiltransformatoren im Mittelspannungsnetz. Die Auslastung verhält sich ähnlich wie bei Freileitungen im Mittelspannungsnetz, da sich an der Struktur des Niederspannungsnetzes nichts ändert. Eine kleine Veränderung bringt die geringere Spannung im Mittelspannungsnetz, welche sich sowohl auf den Leistungsbezug der Lasten und die $Q(U)$ -Regelung in den Niederspannungsnetzen auswirkt und somit auch auf die Auslastung des Verteiltransformators.

Zusammenfassend kann man sagen, dass durch die Kabelstruktur der Spannungsabfall im Mittelspannungsnetz sinkt und in den betrachteten Fällen weniger Blindleistungsaustausch mit dem HS-Netz stattfindet, da die Kabel einen Teil der von den Lasten benötigte Blindleistung bereit stellen. Nur im Fall $L^{\max}/E^0_{Q(U)}$ verschlechtert sich die Situation, da hier durch die Kabel zusätzliche Blindleistung vom Mittelspannungsnetz ins Hochspannungsnetz fließt.

4.4 Ortsabhängigkeit der Stufenstellungsänderung

Um die optimale Stufenstellung für die Verteiltransformatoren zu finden, bei der das Spannungsband nicht verletzt wird und der Blindleistungsfluss ins Hochspannungsnetz so gering wie möglich ist, gilt es mehrere Faktoren und Zusammenhänge zu berücksichtigen. Wie gezeigt werden wird, ist sowohl bezüglich der Wirkleistung als auch bei der Blindleistung, der Ort am Mittelspannungsabzweig bei einer Stufenstellungsänderung ein entscheidender Faktor. Denn je nach Position, variiert die Leistungsänderung durch einer Änderung der Stufenstellung. Bei lokaler Blindleistungsregelungen im Niederspannungsnetz spielt die Kennlinie der Regelung eine wichtige Rolle, da hier, je nach Position des Niederspannungsnetzes im Mittelspannungsabzweig, die Regelungen an einem anderen Arbeitspunkt betrieben werden. Das ergibt bei einer Stufenstellungsänderung eine verschieden große Änderung des Blindleistungsflusses, je nachdem welche Spannung am Niederspannungsnetz anliegt. Des Weiteren wirkt sich eine Leistungsänderung am Mittelspannungsabzweig auf die Spannung an verschiedenen Orten des Abzweigs anders aus, wie in Kapitel 4.4.3 gezeigt werden wird. Im Folgenden werden diese Effekte näher untersucht und analysiert. Hierfür wird im Mittelspannungsabzweig die Einteilung aus Abbildung 4.42 getroffen, wobei MSA-Anfang als der Anfang und MSA-Ende als das Ende des Mittelspannungsabzweigs bezeichnet wird. Die Spannungen an der ersten Sammelschiene des Abzweigs wird infolgedessen $U_{MSA-Anfang}$ bzw. am Ende als $U_{MSA-Ende}$ definiert.

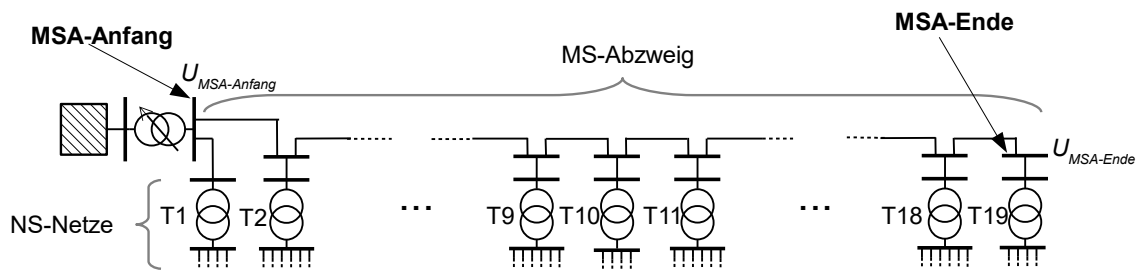


Abbildung 4.42: Theoretischer Mittelspannungsabzweig des erweiterten Mittelspannungsnetzes

4.4.1 Ortsabhängigkeit ohne lokaler Blindleistungsregelung

Abbildung 4.43 zeigt den Aufbau des Netzes, mit welchem die folgenden Kennlinien aufgenommen wurden. Hierfür wurde die Spannung der Netzeinspeisung zwischen 85% und 115% variiert. Die Verläufe wurden jeweils für die Stufenstellung 1,3 und 5 berechnet. Der Punkt an dem die Wirk- und Blindleistung betrachtet wurde ist die Sammelschiene MSS1, wobei ein Leistungsfluss vom Mittelspannungsnetz ins Niederspannungsnetz positiv gezählt wird.

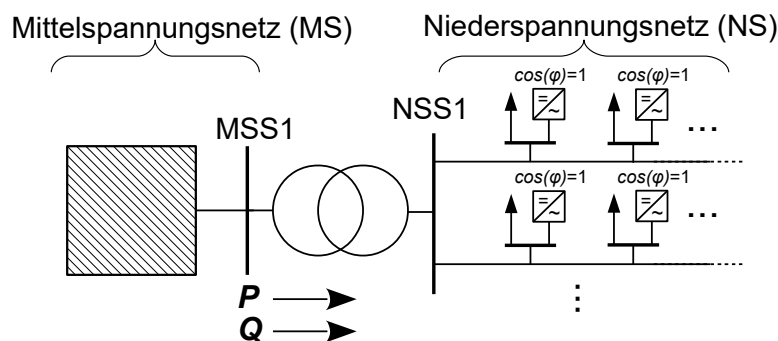


Abbildung 4.43: Netzaufbau zur Messung der $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie der Niederspannungsnetze ohne lokaler Blindleistungsregelung

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Eine Übersicht aller Kennlinie ist im Appendix in den Abbildungen 7.9 bis 7.32 zu finden. Im Folgenden wird das Verhalten der Niederspannungsnetze in Abhängigkeit der Stufenstellung des Verteiltransformators anhand einiger Kennlinien erklärt, da die Kennlinien oft ähnlich sind. Das Verhalten ist in allen Fällen auf dieselben Faktoren zurückzuführen, welche jeweils die Kennlinie verschieden stark beeinflussen. Ohne Regelung im Niederspannungsnetz, wird die Kennlinie von den schon erläuterten spannungsabhängigen Elementen beeinflusst: ZIP-Lasten, Verluste der Leitungen und des Transformators.

Die Kennlinien für den Fall L^{min}/E^{max} der zwei betrachteten Niederspannungsnetze sind in Abbildung 4.44 und 4.45 zu sehen. Das Niederspannungsnetz Urban zeigt, sowohl bei der Wirk- als auch bei der Blindleistung, einen Verlauf, welcher hauptsächlich von der Spannungsabhängigkeit der Lasten bestimmt ist. Das bedeutet für die Wirkleistung in diesem Fall: Bei höherer Spannung beziehen die Lasten mehr Leistung, welche von der dezentralen Erzeugung im Niederspannungsnetz geliefert wird. Dadurch verringert sich der Leistungsfluss vom Niederspannungsnetz ins Mittelspannungsnetz. Man erkennt, dass eine Änderung der Stufenstellung am Ende des Mittelspannungsabzweigs, also bei höherer Spannung auf der Oberspannungsseite des Verteiltransformators, eine größere Änderung bezüglich des Wirk- und Blindleistungsflusses ergibt. Das Verhalten der Blindleistung im Bereich $U/U_n < 90\%$ in Abbildung 4.44b erklärt sich durch die größer werdenden Verluste bei niedriger Spannung. In diesem Bereich ändert sich die Kennlinie des Leistungsbezuges der Lasten kaum mehr, jedoch steigen die Verluste weiter an, wie in Abbildung 7.24 und 7.25 gesehen werden kann.

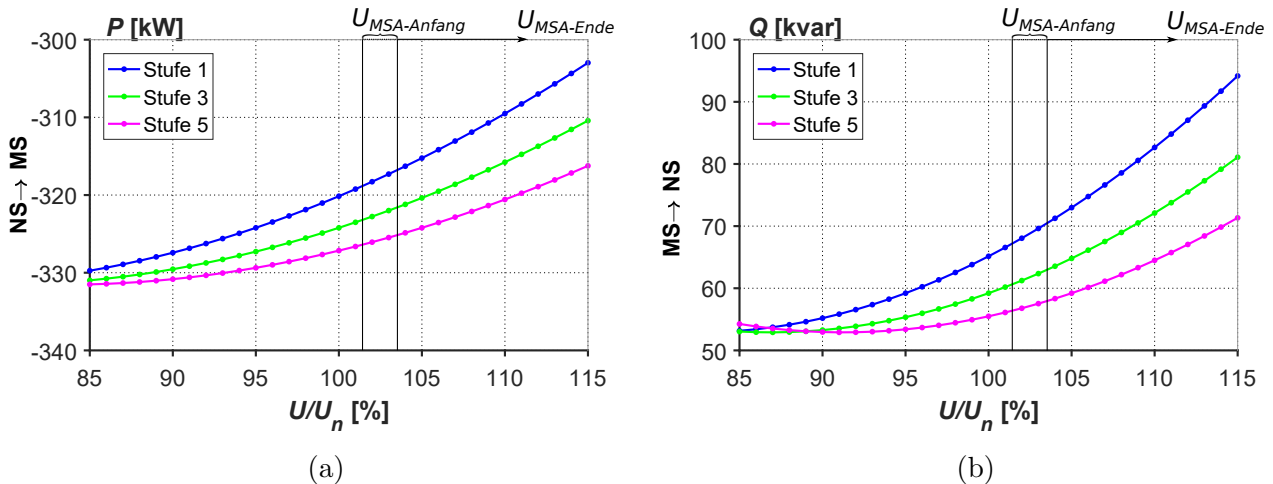


Abbildung 4.44: (a) $P(U)$ - und (b) $Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Urban

Im Niederspannungsnetz Ländlich hat die Kennlinie einen anderen Verlauf. Hier dominiert bei hoher Spannung die Spannungsabhängigkeit der Lasten und bei einer Spannung unter dem Nominalwert, die Spannungsabhängigkeit der Verluste im Niederspannungsnetz. Dieser Wechsel des dominierenden Effekts ergibt den Verlauf in Abbildung 4.45. Jedoch kann man auch hier erkennen, dass bei hoher Spannung die größte Änderung bezüglich des Leistungsflusses durch eine Stufenänderung auftritt. Also hat man auch hier den größten Einfluss am Ende des Mittelspannungsabzweigs. Spannungen unter $100\% \cdot U_n$ sind für den Fall L^{min}/E^{max} eher uninteressant, da hier durch die Einspeisung der dezentralen Erzeuger mit einer hohen Spannung zu rechnen ist.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

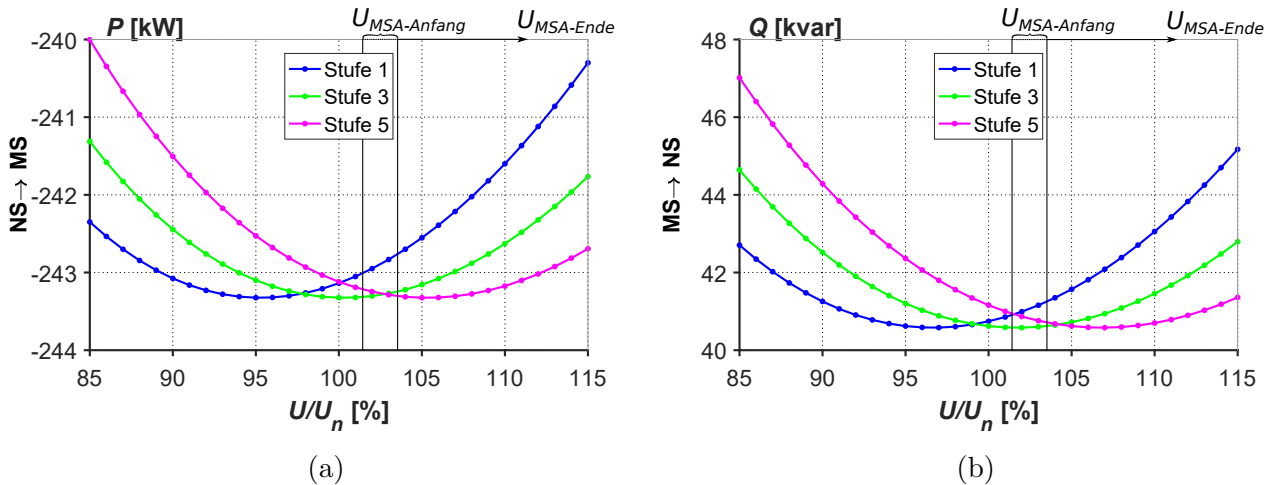


Abbildung 4.45: (a) $P(U)$ - und (b) $Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Ländlich

Zusammengefasst kann man feststellen, dass in den betrachteten Netzen im Fall hoher dezentraler Einspeisung ohne lokaler Blindleistungsregelung, der größte Leistungsunterschied bei veränderter Stufenstellung am Ende des Mittelspannungsabzweigs auftritt. Im Fall L^{max}/E^0 ähneln die Kennlinien des Niederspannungsnetzes jener in Abbildung 4.44, mit dem Unterschied, dass hier der Wirkleistungsfluss vom Mittelspannungsnetz ins Niederspannungsnetz zeigt und somit bei höherer Spannung größer wird. Da man im Fall ohne dezentraler Einspeisung und hoher Last aber im Niederspannungsnetz eher mit niedrigeren Spannungen zu rechnen hat, ist der linke Teil der Kennlinie interessant, wo U_n kleiner als 103.5% ist. Hier kann man sehen, dass die Wirkung einer Stufenstellungsänderung des Verteiltransformators eher am Anfang des Mittelspannungsabzweigs, also bei höherer Spannung, eine größere Auswirkung hat. Am Ende des Abzweigs ist auf Grund der niedrigen Spannung durch den Spannungsabfall im Fall L^{max}/E^0 mit einer geringeren Änderung zu rechnen. Das hier erklärte Verhalten ist sehr gut in Abbildung 4.27 zu erkennen, wenn man die Unterschiede der einzelnen NS-Netze im Wirk- und Blindleistungsfluss für die Stufenstellung 3 und 5 vergleicht. Die detaillierten Verläufe der Niederspannungsnetze sind im Anhang zu finden.

4.4.2 Ortsabhängigkeit mit lokaler Blindleistungsregelung

Die Kennlinie der Blindleistungsregelung hat ebenfalls eine Auswirkung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz in Abhängigkeit der Stufenstellung. Hierfür wurden wieder die Kennlinien der Niederspannungsnetze aufgenommen, diesmal jedoch mit aktiver $Q(U)$ -Regelung und mit dem Netz aus Abbildung 4.46.

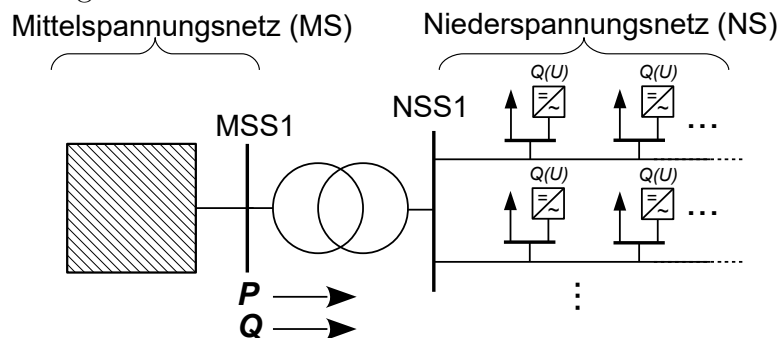


Abbildung 4.46: Netzaufbau zur Messung der $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie der Niederspannungsnetze mit lokaler Blindleistungsregelung

Je nach dem an welcher Position im Mittelspannungsnetz sich das Niederspannungsnetz befindet, ergibt sich eine andere Spannung auf der Primärseite des Verteiltransformators. Wie bereits zu

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

erkennen war, treten die größten Spannungsdifferenzen zwischen dem Fall hoher Last und dem hoher verteilter Einspeisung meist am Ende des Abzweigs auf. Je nach dem welche Spannung am Niederspannungsnetz anliegt, werden sich auch die Arbeitspunkte der Wechselrichter verschieben. Im Niederspannungsnetz selbst arbeiten die Wechselrichter alle an verschiedenen Arbeitspunkten, bedingt durch den Spannungsabfall über die Niederspannungsleitungen. Dieser wiederum hängt von der jeweiligen Belastung ab bzw. der Einspeisung.

In den Abbildungen 4.48 und 4.47 wurde für verschiedene Spannungen auf der Primärseite des Verteiltransformators der Blindleistungsaustausch mit dem Mittelspannungsnetz bei drei verschiedenen Stufen des Transformators (Stufe 1, 3 und 5) aufgenommen. Die Kennlinie setzt sich zusammen aus dem Verhalten von spannungsabhängigen Netzelementen im Niederspannungsnetz und der Kennlinie der Regelung an den Wechselrichtern. Für die Simulationen in diesem Netz wurde die im Kapitel 3.3 beschriebene $Q(U)$ -Kennlinie verwendet. Diese Kennlinie ist für die zwei betrachteten Extremfälle $L_{max}/E_{Q(U)}^0$ und $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$, jeweils für das Niederspannungsnetz Urban und Ländlich zu sehen.

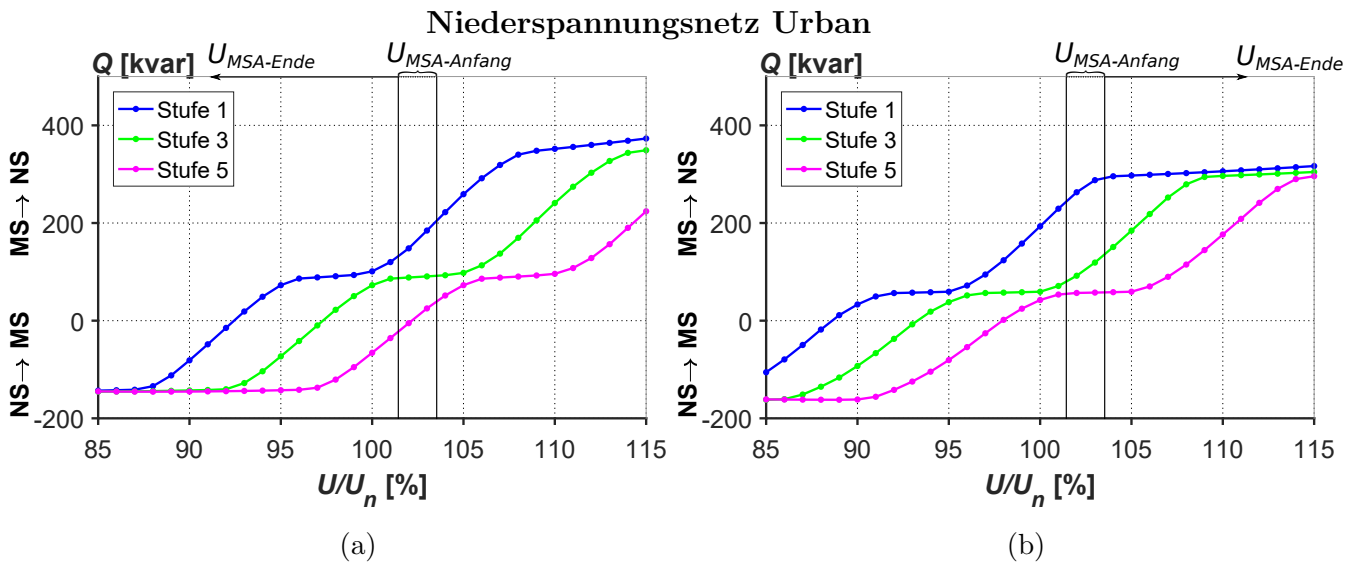


Abbildung 4.47: $Q(U)$ -Kennlinie des Niederspannungsnetzes Urban: (a) $L_{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$

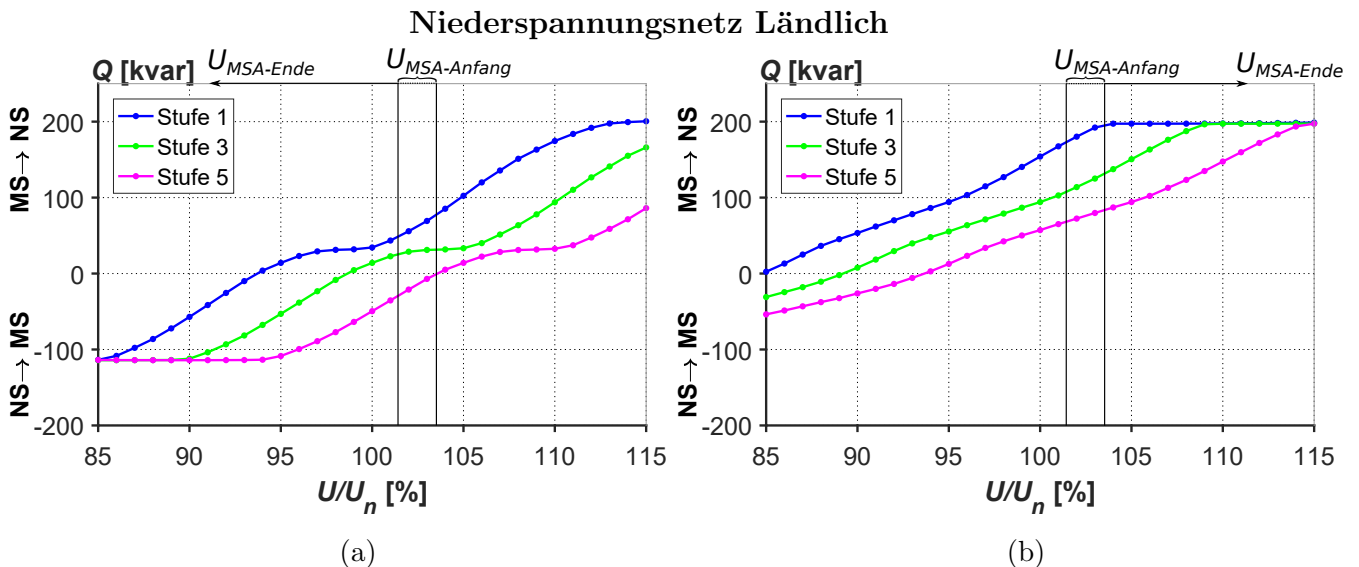


Abbildung 4.48: $Q(U)$ -Kennlinie des Niederspannungsnetzes Ländlich: (a) $L_{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Es gibt verschiedene Faktoren welche Einfluss auf die $Q(U)$ -Kennlinie haben. Das tendenzielle Verhalten der Kennlinie bei einer Änderung der Last bzw. der Einspeisung lässt sich wie folgt beschreiben:

- **Mehr Last:** bedeutet niedrigere Spannung im Niederspannungsnetz, was die Kennlinie rechts verschiebt, da an den Wechselrichtern eine kleinere Spannung anliegt. Außerdem verschiebt sich die Kennlinie insgesamt nach oben, da durch die größere Last mehr Blindleistung im Niederspannungsnetz benötigt wird.
- **Weniger Last:** bedeutet höhere Spannung im Niederspannungsnetz, was die Kennlinie links verschiebt. Es verschiebt sich die Kennlinie insgesamt nach unten, da durch die geringere Last weniger Blindleistung im Niederspannungsnetz benötigt wird.
- **Mehr PV-Anlagen:** mit mehr PV-Anlagen vergrößert sich die mögliche Blindleistungseinspeisung, was die Kennlinie nach oben und unten hin breiter werden lässt, da mehr Wechselrichter installiert sind. Bei Einspeisung der Anlagen erhöht sich die Spannung im Niederspannungsnetz, was die Kennlinie nach links verschiebt.
- **Weniger PV-Anlagen:** mit weniger PV-Anlagen verkleinert sich die mögliche Blindleistungseinspeisung, was die Kennlinie nach oben und unten hin schmaler werden lässt, da weniger Wechselrichter installiert sind. Bei Einspeisung der Anlagen verringert sich die Spannung im Niederspannungsnetz, was die Kennlinie nach rechts verschiebt.

Bei der Kennlinie des ländlichen Niederspannungsnetzes im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$, welche in Abbildung 4.48b zu sehen ist, erkennt man die typische $Q(U)$ -Kennlinie der Wechselrichter nicht mehr genau, was an der Struktur des Netzes liegt. Im ländlichen Netz ist der Spannungsabfall über die Abzweige relativ hoch, dies bedeutet die Wechselrichter arbeiten alle an verschiedenen Arbeitspunkten und die einzelnen $Q(U)$ -Kennlinien überlagern sich sozusagen aus der Sicht des Mittelspannungsnetzes. Im Urbanen Netz in Abbildung 4.47 ist die $Q(U)$ -Charakteristik viel besser zu sehen, da hier der Spannungsabfall im Niederspannungsnetz geringer ist und somit die Arbeitspunkte der Wechselrichter enger zusammen liegen. Man erkennt in beiden Netzen im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$, dass ab einer gewissen Spannung der Punkt erreicht wird, an dem alle Wechselrichter die maximale Blindleistung konsumieren. Die Steigung nach diesem Punkt, welche vor allem beim Urbanen Netz in Abbildung 4.47 zu sehen ist, kommt von der Spannungsabhängigkeit der Lasten.

Für die Stufenstellung der Transformatoren bedeuten diese Kennlinien, dass man durch dessen Änderung, je nach dem an welcher Position der Kennlinie sich das Mittelspannungsnetz befindet (welche Spannung am Verteiltransformator anliegt), weniger oder mehr Wirkung auf den Blindleistungsfluss nehmen kann. Die Position auf der Kennlinie wird durch die Position im Mittelspannungsnetz bestimmt. Ein Niederspannungsnetz am Ende eines Mittelspannungsabzweigs wird sich bei hoher Last oder hoher dezentraler Einspeisung eher an den äußeren Rändern der Kennlinie befinden; ein Netz am Anfang des Abzweigs eher in der Mitte.

Die Abbildungen 4.50 und 4.49 zeigen jeweils die Änderung des Blindleistungsflusses bei einer Änderung der Stufenstellung des Verteiltransformators.

Man erkennt deutlich zwei Höcker, jeweils für die untere und die obere Hälfte der $Q(U)$ -Kennlinie der Wechselrichter, welche sich für die zwei verschiedenen Änderungen verschieben. Die gesamte Kennlinie verschiebt sich nach links oder rechts in der gleichen Weise, wie sich die $Q(U)$ -Kennlinie der Niederspannungsnetze aus den Abbildungen 4.48 und 4.47 verschiebt. Im ländlichen Niederspannungsnetz im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ sieht man, was die Überlagerung der verschiedenen $Q(U)$ -Kennlinien bewirkt, bei denen sich die Arbeitspunkte der Wechselrichter durch lange Abzweige stark unterscheiden. Hier wird das "Tal" zwischen den zwei Höckern weniger tief.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

Aus diesen Kennlinien sieht man weiters, dass die größte Änderung bezüglich der Blindleistung links bzw. rechts einer Senke liegen und es auf Grund der $Q(U)$ -Kennlinie zwei Maxima gibt. Wo genau, kommt vor allem auf das jeweilige Niederspannungsnetz und die eingestellte $Q(U)$ -Kennlinie an.

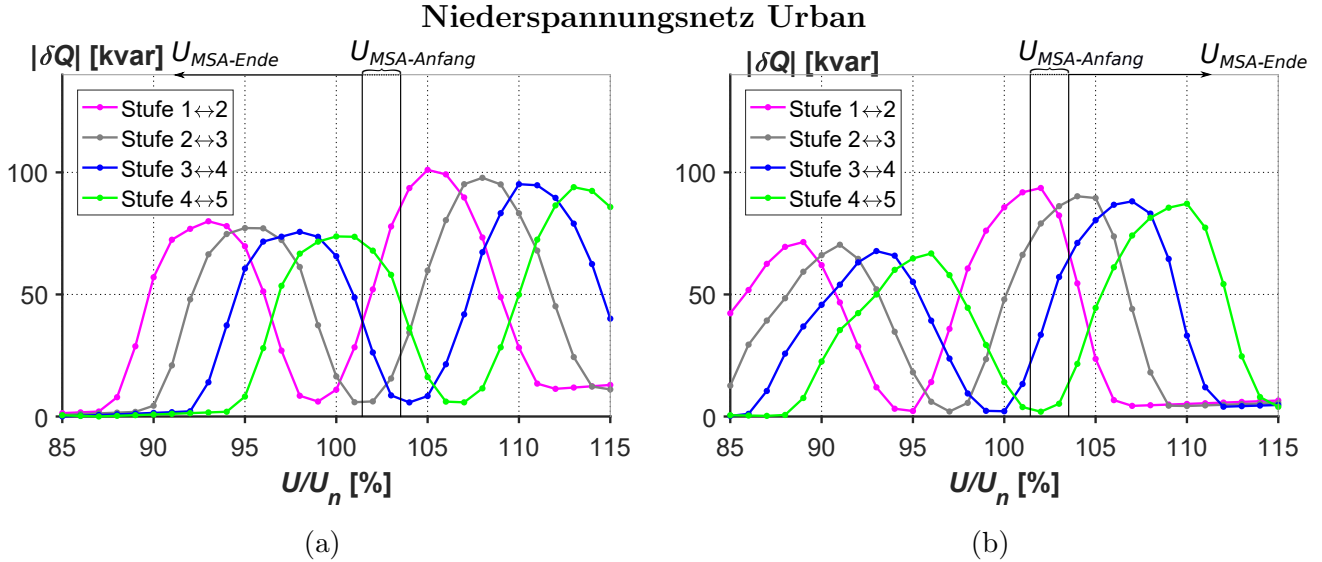


Abbildung 4.49: Änderung des Betrags der Blindleistung bei Änderung der Stufenstellung für das Niederspannungsnetz Urban: (a) $L_{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$

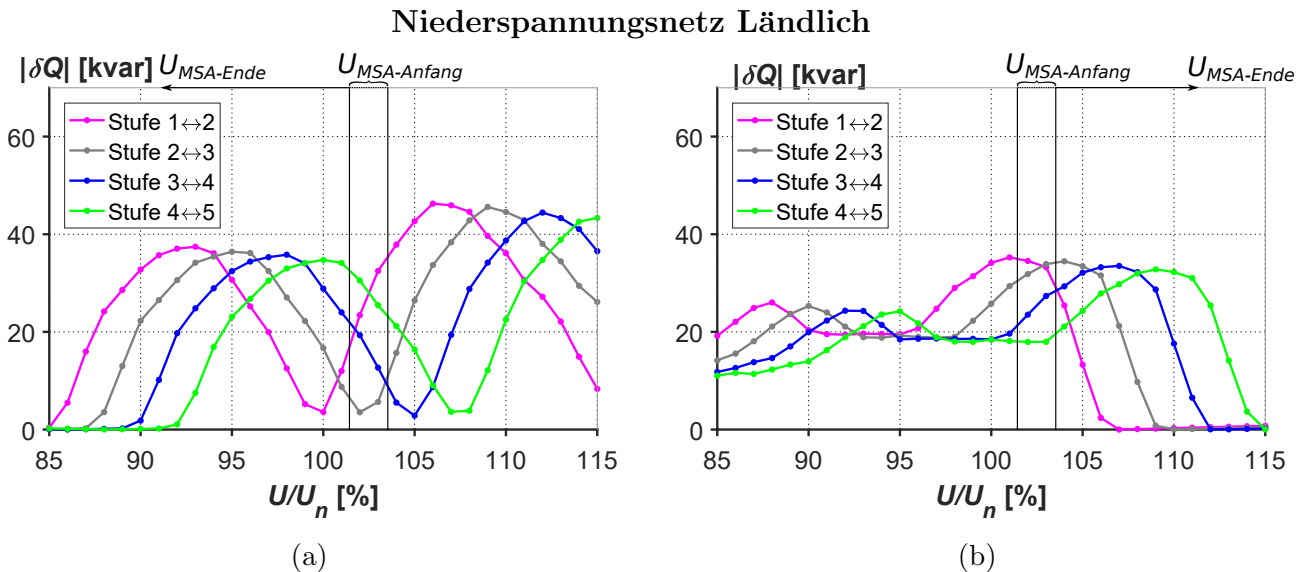


Abbildung 4.50: Änderung des Betrags der Blindleistung bei Änderung der Stufenstellung für das Niederspannungsnetz Ländlich: (a) $L_{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$

Zu berücksichtigen ist, dass in den obigen Analysen der Betrag der Blindleistung aufgetragen ist. Ob ein Niederspannungsnetz nach der Änderung mehr oder weniger Blindleistung bezieht oder einspeist, kann man leicht an der $Q(U)$ -Kennlinie des jeweiligen Netzes erkennen. Der Grund, dass die Kennlinie im Fall für Stufe 4 ↔ Stufe 5 so weit rechts liegt ist, dass bei Stufe 5 die Spannung im Niederspannungsnetz nach unten gedrückt wird, was die $Q(U)$ -Kennlinie des Netzes nach rechts verschiebt. Das bedeutet im Fall $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$ ist im Bereich hoher Stufenstellung

die größte Änderung des Blindleistungsflusses bei hoher Spannung im Mittelspannungsnetz zu erwarten, welche am Ende des Mittelspannungsabzweigs auftritt. Bei $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ ist bei hoher Stufenstellungen die größte Änderung im Bereich der Nominalspannung zu erwarten, was bei einer Regelung des HS/MS-Transformators auf $102.5\% \cdot U_n$ ca. in der Mitte des Abzweigs zu erwarten ist. Auf Grund der Spannungsabhängigkeit der Lasten wird der Maximalwert der Änderung der Blindleistung größer, je niedriger die Stufe ist. Eine niedrigere Stufe bedeutet eine höhere Spannung im Niederspannungsnetz und somit einen höheren Blindleistungskonsum der Lasten. Die Maxima der Kennlinien in den Abbildungen 4.50 und 4.49 liegen bei niedriger Spannung enger zusammen als bei hoher Spannung. Auch das ist auf die Spannungsabhängigkeit der Lasten zurückzuführen. Diese bewirkt, dass sich die $Q(U)$ -Kennlinien bei den einzelnen Stufen weiter auseinander "zerren", was einen größeren Abstand der einzelnen Kennlinien zur Folge hat.

Wie in Kapitel 4.3.1 erklärt kann bei hoher dezentraler Einspeisung eine Stufenstellungsänderung auf eine Stufe zwischen 3 und 5 mögliche Vorteile bringen. Aus diesem Grund wird hier auf das Verhalten einer Änderung zwischen Stufe 3 und 4 bzw. 4 und 5 näher eingegangen:

- **Änderungen der Stufenstellung von 3 auf 4 oder umgekehrt:** Im Fall $L_{max}/E_{Q(U)}^0$ ist die größte Änderung des Blindleistungsflusses bei ca. $98\% \cdot U_n$ zu erwarten. Im Fall $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$ ist die größte Änderung der Blindleistung bei ca. $107\% \cdot U_n$ zu erwarten.
- **Änderungen der Stufenstellung von 4 auf 5 oder umgekehrt:** Im Fall $L_{max}/E_{Q(U)}^0$ ist die größte Änderung des Blindleistungsflusses bei ca. $100\% \cdot U_n$ zu erwarten. Im Fall $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$ ist die größte Änderung der Blindleistung bei ca. $109\% \cdot U_n$.

Bei den hier gezogenen Schlussfolgerungen wird jedoch die Änderung der Spannung im Mittelspannungsnetz durch die indirekte Wirkung vernachlässigt.

Die Kennlinien der Wirkleistung über der Spannung, mit $Q(U)$ -Regelung, sind im Anhang zu finden. Diese sind auf Grund der Verluste im Niederspannungsnetz durch die Blindleistungsregelung der Wechselrichter sehr unterschiedlich und weisen wenig markante Gemeinsamkeiten auf.

4.4.3 Ort der Leistungsänderung am Mittelspannungsabzweig

Je nach Position des Niederspannungsnetzes im Mittelspannungsnetz verhält sich das Spannungsband bei einer Änderung des Leistungsflusses verschieden. Um dies zu analysieren wurde das erweiterte Mittel- und Niederspannungsnetz adaptiert. Es ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Im Folgenden wird auf die Blindleistungsflussänderung eingegangen, welche hervorgerufen wird durch lokale Blindleistungsregelung an den dezentralen Erzeugern im Niederspannungsnetz. Um diesen Effekt zu zeigen, ist in Abbildung 4.51 die Blindleistungsregelung in der vorderen Hälfte des Abzweigs in blau und bei Regelung an dessen Ende in grün dargestellt. Hierfür wurde die $Q(U)$ -Regelung in allen Niederspannungsnetzen deaktiviert, und danach an vier Niederspannungsabgängen jeweils die Summe des maximalen Blindleistungsbezugs der Wechselrichter als Blindleistungslast angeschlossen. Somit wird in blau vom Niederspannungsnetz 7 bis 10 und in grün vom Niederspannungsnetz 16 bis 19 die maximal mögliche Blindleistung der Wechselrichter bezogen. In grau ist als Vergleich das Spannungsband ohne Blindleistungsbezug der Wechselrichter zu sehen.

4 Einfluss der Position fixer Stufenstellungen auf das Netzverhalten

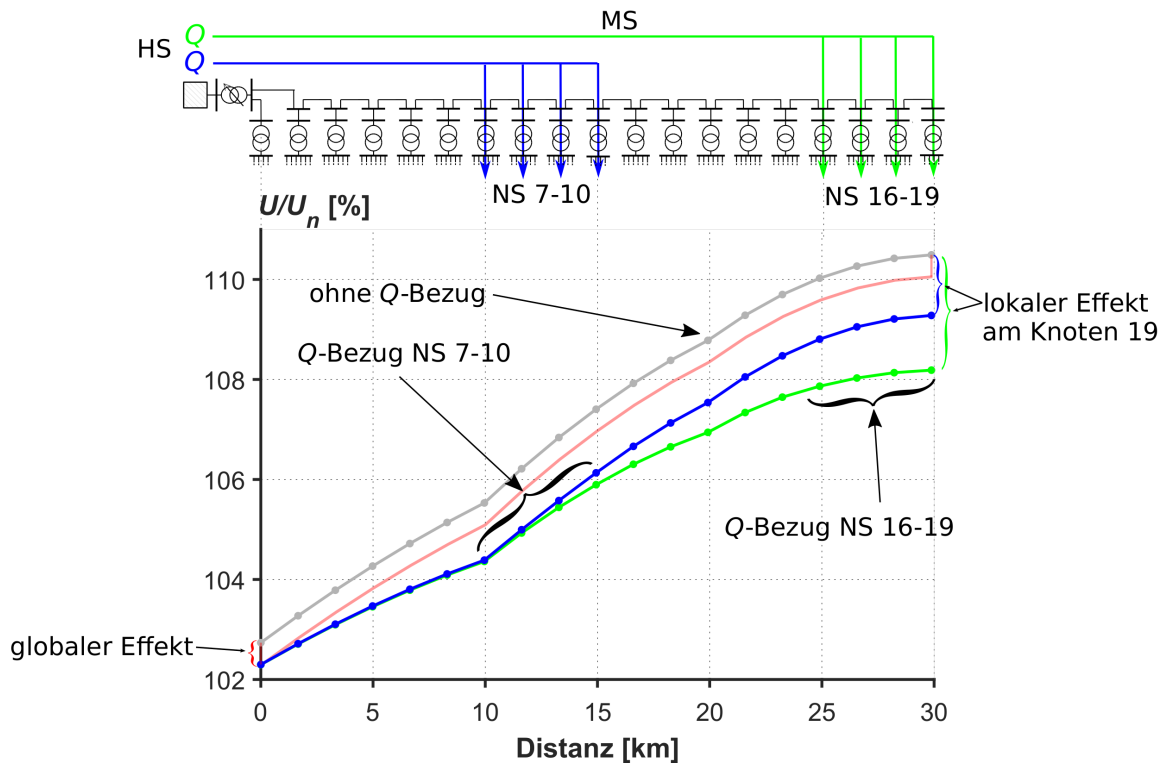


Abbildung 4.51: Spannungsband im Mittelspannungsnetz bei Blindleistungsbezug der Netze NS 7-10 oder NS 16-19 am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig

Der globale Effekt ist in Rot dargestellt. Dieser ist in beiden Fällen gleich groß und hat einen konstanten Effekt auf die gesamte Abzweiglänge. Der lokale Effekt ergibt sich aus dem Spannungsabfall über die Länge des Abzweigs bis hin zu den Niederspannungsnetzen in denen die Blindleistung bezogen wird, danach bleibt der lokale Effekt für die restliche Länge des Abzweigs gleich, wie man an der blauen Linie ab Kilometer 15 sehen kann. Wird die Blindleistung weiter hinten im Mittelspannungsnetz bezogen, vergrößert sich der lokale Effekt an den jeweiligen Knoten weiter. Beide Effekte werden in [24] definiert. Der Spannungsabfall über den Mittelspannungsabzweig wird also durch den Blindleistungsfluss über die zusätzliche Abzweiglänge größer, was man an der grünen Linie sehen kann. Dieselben Effekte können im Lastfall bei der Blindleistungsbereitstellung durch die Wechselrichter beobachtet werden. Die hier gegebene Erklärung vernachlässigt die Spannungsabhängigkeit der Elemente und der Verluste, da diese im Vergleich mit den beschriebenen Effekten nur eine kleine Auswirkung haben.

Es lässt sich also feststellen, dass die Blindleistungsregelung am Ende des Mittelspannungsabzweigs eine größere Wirkung auf das Spannungsband im Mittelspannungsnetz hat. Berücksichtigt werden muss aber, dass durch den Blindleistungsfluss über eine längere Strecke im Mittelspannungsnetz größere Verluste auftreten werden. Auch bei einer Änderung der Wirkleistung tritt dieser Effekt auf, welcher sich je nach Leitungsparameter in der Höhe des Spannungsabfalles unterscheidet.

5 Evaluierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationen an einem Mittelspannungsabzweig mit 19 daran angeschlossenen Niederspannungsnetzen (Abbildung 3.7) evaluiert. Eine genaue Beschreibung der Simulationen findet sich in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2. Die Evaluierung dient vor allem dazu, die Ergebnisse der Simulationen in übersichtlicher Weise miteinander zu vergleichen und zu analysieren. Dabei wird im Kapitel 5.2 die Evaluierung verschiedener Stufenstellungen ohne lokaler Blindleistungsregelung im Niederspannungsnetz beschrieben. Im Kapitel 5.3 werden die Ergebnisse mit lokaler Blindleistungsregelung im Niederspannungsnetz evaluiert. Dies wird jeweils für ein Freileitungs-Mittelspannungsnetz und ein Kabel-Mittelspannungsnetz durchgeführt.

5.1 Methode

Für den Evaluierung der Ergebnisse wurden verschiedene Kriterien ausgewählt, anhand denen verglichen wird. Diese Kriterien sind:

- **Wirkleistungsverluste:** Wirkleistungsverluste der Leitungen und Transformatoren im Nieder- und Mittelspannungsnetz
- **Anzahl der Spannungsbandverletzungen:** Über- oder Unterschreitung der Spannung von $\pm 10 \cdot U_n$ im Mittel- und Niederspannungsnetz
- **Spannungsverletzungs-Index (SVI):** in Kapitel 2.2.1 definiert, berücksichtigt die Höhe der Spannungsbandverletzungen
- **Q-Austausch HS \longleftrightarrow MS:** Austausch der Blindleistung von Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz
- **Auslastung MS-/NS-Trafos:** Gemittelte Auslastung aller Verteiltransformatoren

Zur besseren Übersichtlichkeit wird die Zusammensetzung der Szenarien hier noch einmal kurz beschrieben:

- L^{max} ...maximale Last
- L^{min} ...minimale Last
- E^0 ...keine dezentrale Einspeisung
- E^{max} ...maximale dezentrale Einspeisung

Wobei die konkreten Szenarien ohne lokaler Blindleistungsregelung L^{max}/E^0 und L^{min}/E^{max} , bzw. mit lokaler Blindleistungsregelung $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ sind.

Die in Abbildung 5.1 dargestellte Netzgrafik wurde als Darstellungsform gewählt, um die Stufenstellungen an Hand der einzelnen Kriterien zu vergleichen. Jede Stufenstellung spannt durch die Vergleichskriterien eine Fläche in der Netzgrafik auf, was den anschaulichen Vergleich der drei ausgewählten Stufenstellungen der Verteiltransformatoren erlaubt. In der Mitte der Netzgrafik befindet sich für alle Vergleichskriterien der Nullpunkt. Die einzelnen Werte der Kriterien werden nach außen hin größer und erreichen am Rand ihr Maximum, welches in

Abbildung 5.1 markiert ist. Dieses Maximum hat den maximalen Wert aller betrachteten Belastungsfälle, dies bedeutet, dass in mindestens einem Netzdiagramm dieser äußerste Rand für jedes Kriterium einmal erreicht wird.

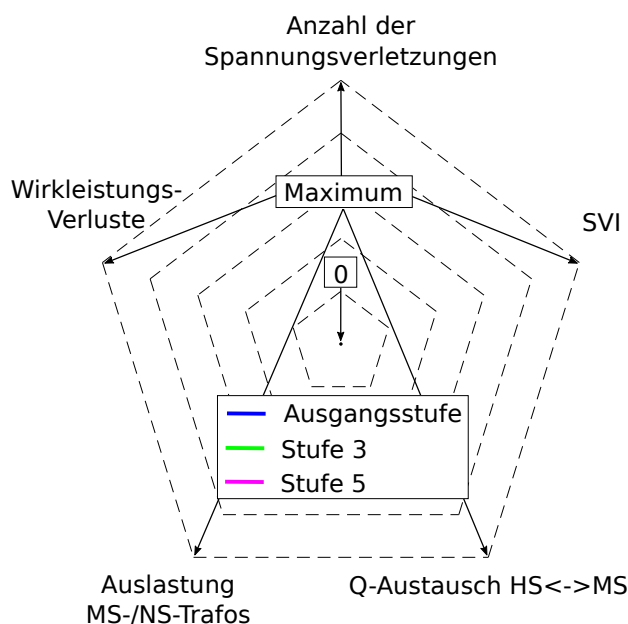


Abbildung 5.1: Verwendete Netzgrafik für den Vergleich der Wirkung geänderter Stufenstellungen

In den Fällen eines Kabel-Mittelspannungsnetz wurde auf die Vergrößerungen in den Netzgrafiken verzichtet, da das Verhalten bei einer Änderung der Stufenstellung fast immer dasselbe ist wie bei dem Freileitungs-Mittelspannungsnetz.

5.2 Einfluss der geänderten Stufenstellung des Verteiltransformators

In Abbildung 5.2 sind die Ergebnisse für die Belastungsfälle L^{max}/E^0 und L^{min}/E^{max} bei einer Freileitungs-Mittelspannungsstruktur gezeigt. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich der beiden Belastungsfälle bei L^{max}/E^0 die Ausgangsstufe bezüglich der Spannung am besten ist, da die Stufenstellung auf diesen Fall ausgelegt ist. Im Fall L^{min}/E^{max} ist es die Stufe 5, welche die Spannung in den Niederspannungsnetzen am weitesten nach unten drückt. Die auf den Fall ohne dezentrale Einspeisung ausgelegten Ausgangsstufen der Verteiltransformatoren führen im Fall L^{min}/E^{max} zu massiven Spannungsbandverletzungen. Die Wirkleistungsverluste von NS- und MS-Leitungen bzw. des MS-/NS-Trafos und HS-/MS-Trafo verhalten sich genau gegenteilig, denn hier sind die maßgeblichen Netzelemente die Mittelspannungsleitungen. Im Fall L^{max}/E^0 bedeutet eine höhere Stufenstellung weniger Leistungsbezug der Lasten und somit einen geringeren Leistungsfluss bei einer höheren Spannung auf den Mittelspannungsleitungen, was weniger Verluste bedeutet. Im Fall L^{min}/E^{max} ist die Spannung im Mittelspannungsabzweig bei höherer Stufe zwar ebenfalls höher, jedoch bedeutet hier weniger Leistungsbezug der Lasten, auf Grund der dezentralen Einspeisung, einen größeren Wirkleistungsfluss im Mittelspannungsnetz (in diesem Fall der dominierende Effekt). Hier spielen auch die Verluste im Niederspannungsnetz eine Rolle, da die höhere Stufe eine niedrigere Spannung bei einem größerem Leistungsfluss im NS-Netz bedeutet, also größere Verluste hervorruft. Die Auslastung der MS-/NS-Trafos ist abhängig vom Leistungsfluss, welcher im Fall L^{max}/E^0 bei höherer Stufenstellung geringer wird. Im Fall

5 Evaluierung

L^{min}/E^{max} verhält sich der Betrag des Leistungsflusses über den Transformator gegengleich zum Fall L^{max}/E^0 und die Änderung der Stufen bewirkt keine so große Änderung des Leistungsflusses, trotz der höheren Spannung. Das liegt vor allem an der minimalen Last im Fall L^{min}/E^{max} . Beim Blindleistungsaustausch dominiert die Blindleistungsabhängigkeit der Lasten, weshalb hier in beiden Belastungsfällen bei der höheren Stufe der geringere Blindleistungsaustausch zwischen HS- und MS-Netz stattfindet.

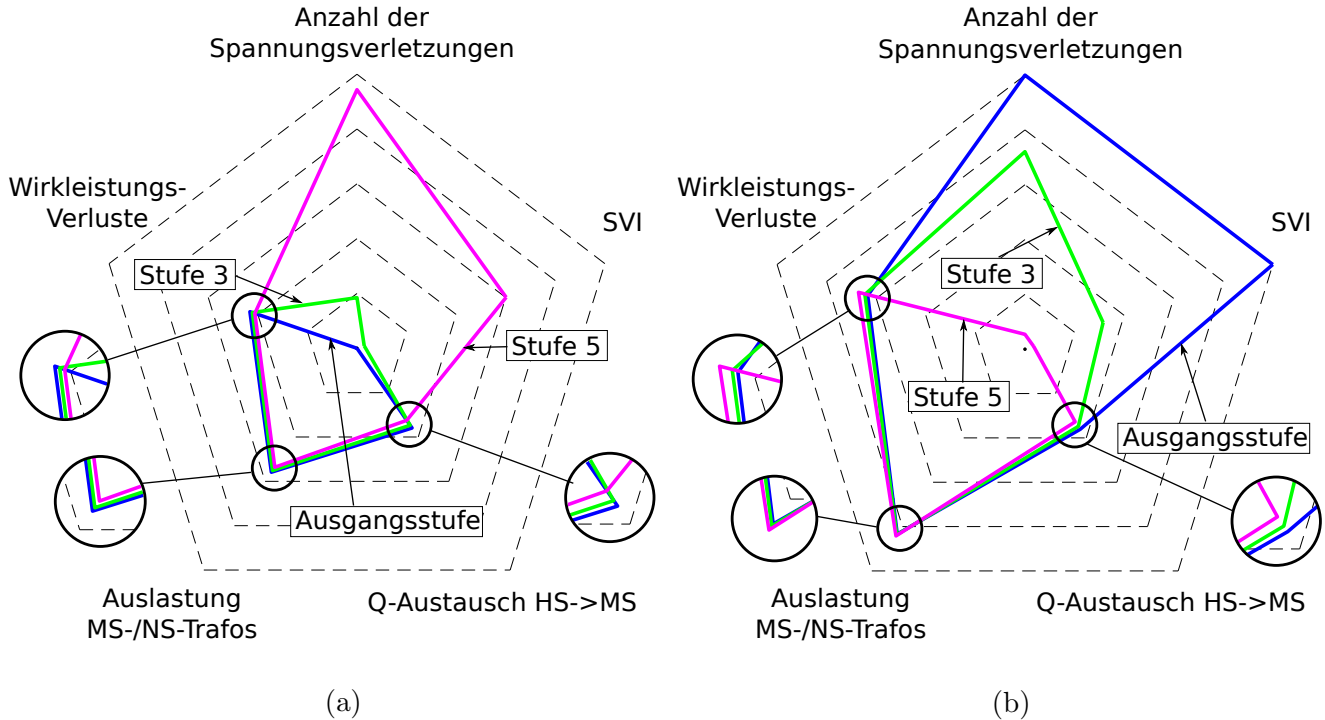


Abbildung 5.2: Vergleich der Stufenstellungen: Ausgangsstufe, Stufe 3 und Stufe 5 für einen Freileitungs-Mittelspannungsabzweig in den angegebenen Belastungsfällen: (a) L^{max}/E^0 , (b) L^{min}/E^{max}

Es ist zu erkennen, dass die aktuelle Ausgangsstufe für den Fall L^{min}/E^{max} auf Grund der Spannungsbandverletzungen nicht optimal ist, genau so ist aber die optimale Stufenstellung (Stufe 5) in diesem Fall jene, die im Fall L^{max}/E^0 zu den größten Spannungsbandverletzungen führt. Das bedeutet, die optimale Stufenstellung liegt zwischen der Ausgangsstufe und Stufe 5, wobei beim Umstellen die Position des Trafos im MS-Netz berücksichtigt werden muss und bei den einzelnen Transformatoren je nach Gegebenheit unterschiedliche Stufenstellungen zu bevorzugen sind. Überdies ist zu berücksichtigen, dass die optimale Stufenstellung für den jeweiligen Fall (bezogen auf die Spannung) die größeren Wirkleistungsverluste bzw. Auslastungen der MS-/NS-Trafos hervorruft. Der maximalen Einspeisung im Niederspannungsnetz sind jedoch durch die Spannungsbänder Grenzen gesetzt.

Die Fälle L^{max}/E^0 und L^{min}/E^{max} für ein Kabel-Mittelspannungsnetz sind in Abbildung 5.3 zu sehen. Auf Grund des geringeren Spannungsabfalles gibt es bei Kabeln im Mittelspannungsnetz viel weniger Spannungsbandverletzungen in beiden Fällen. In Abhängigkeit der Stufenstellung verhält sich der Kabel-Mittelspannungsabzweig tendenziell genau gleich wie der Freileitungs-Mittelspannungsabzweig. Unterschiedlich ist aber vor allem der Ladeleistungsbelag von Kabeln, welcher zu einem Blindleistungseintrag durch die Kabelstruktur führt. Das bedeutet, die Blindleistung welche von den Lasten und anderen Netzelementen benötigt wird, kommt in den betrachteten Fällen zu einem großen Teil von den Kabeln. Die Wirkleistungsverluste sind bei Kabeln auf Grund der Leitungsparameter kleiner als bei Freileitungen, was die gesamten

5 Evaluierung

Wirkleistungsverluste in beiden Fällen kleiner ausfallen lässt. Die Auslastung der MS-/NS-Transformatoren ist fast identisch mit der bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz, da sich die Struktur des Niederspannungsnetzes nicht ändert. Einfluss hat hier lediglich der geringere Spannungsabfall im Mittelspannungsnetz, welcher sich auf den Leistungsbezug der Netzelemente im Niederspannungsnetz auswirkt und somit auch auf die Auslastung des Trafos. In den betrachteten Fällen ist die Auslastung bei Kabeln im Mittelspannungsnetz leicht höher als bei Freileitungen. Der Grund hierfür ist im Fall L^{max}/E^0 der größere Leistungsbezug der Lasten durch die höhere Spannung und im Fall L^{min}/E^{max} die höheren Verluste der Leitungen und des Trafos, sowie der geringere Leistungsbedarf der Lasten (höherer Leistungsfluss durch dezentrale Erzeuger) durch die niedrigere Spannung im Vergleich zu Freileitungen.

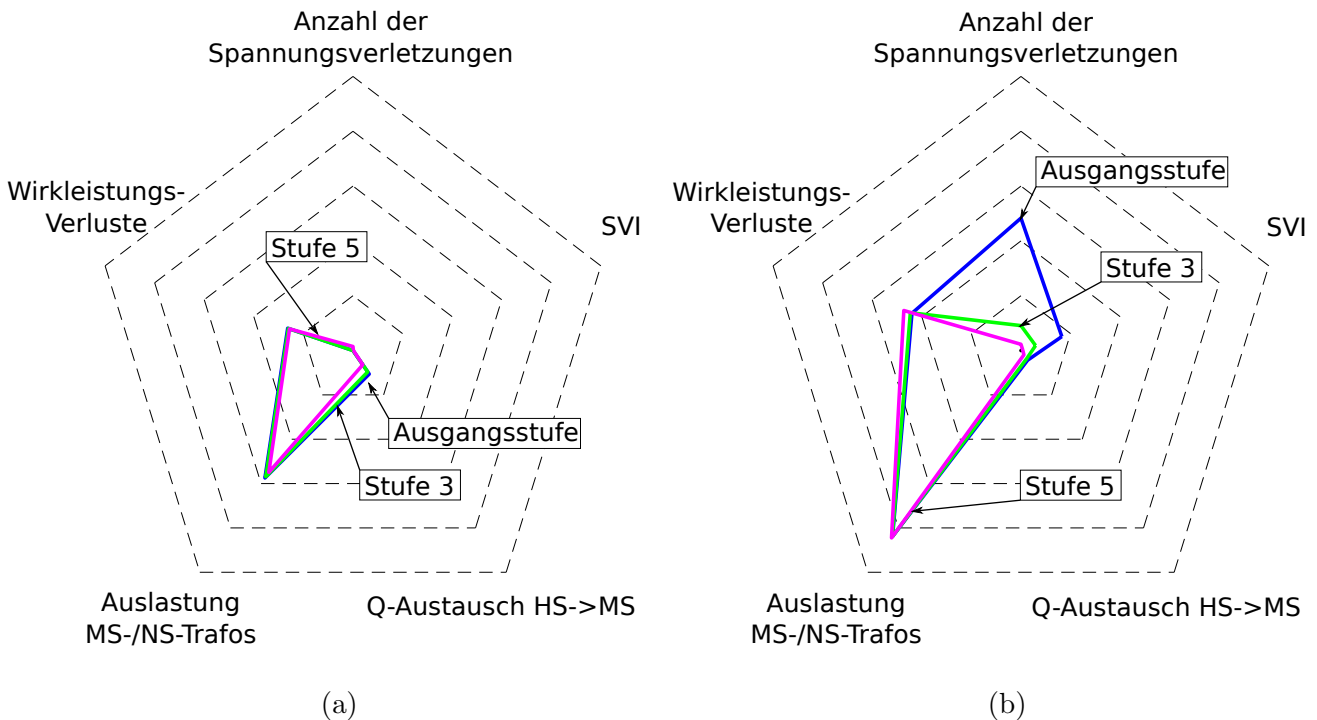


Abbildung 5.3: Vergleich der Stufenstellungen: Ausgangsstufe, Stufe 3 und Stufe 5 für einen Kabel-Mittelspannungsabzweig in den angegebenen Belastungsfällen: (a) L^{max}/E^0 , (b) L^{min}/E^{max}

Für die betrachteten Fälle ist hier also ein Kable-Mittelspannungsnetz durchaus von Vorteil. Es werden jedoch andere Faktoren, wie zum Beispiel die Kosten oder die Leitungsbelastbarkeit nicht berücksichtigt. Die Auswirkung der Stufenstellungen auf die Spannung im Mittelspannungsnetz bleibt in beiden Fällen gleich und unterscheidet sich nur in der Höhe der Spannungsänderung.

5.3 Einfluss der geänderten Stufenstellung des Verteiltransformators bei lokaler Blindleistungsregelung

Dieselben Belastungsfälle wurden bei aktiver $Q(U)$ -Regelung der dezentralen Einspeiser betrachtet, um die Auswirkung einer dezentralen Blindleistungsregelung zu untersuchen.

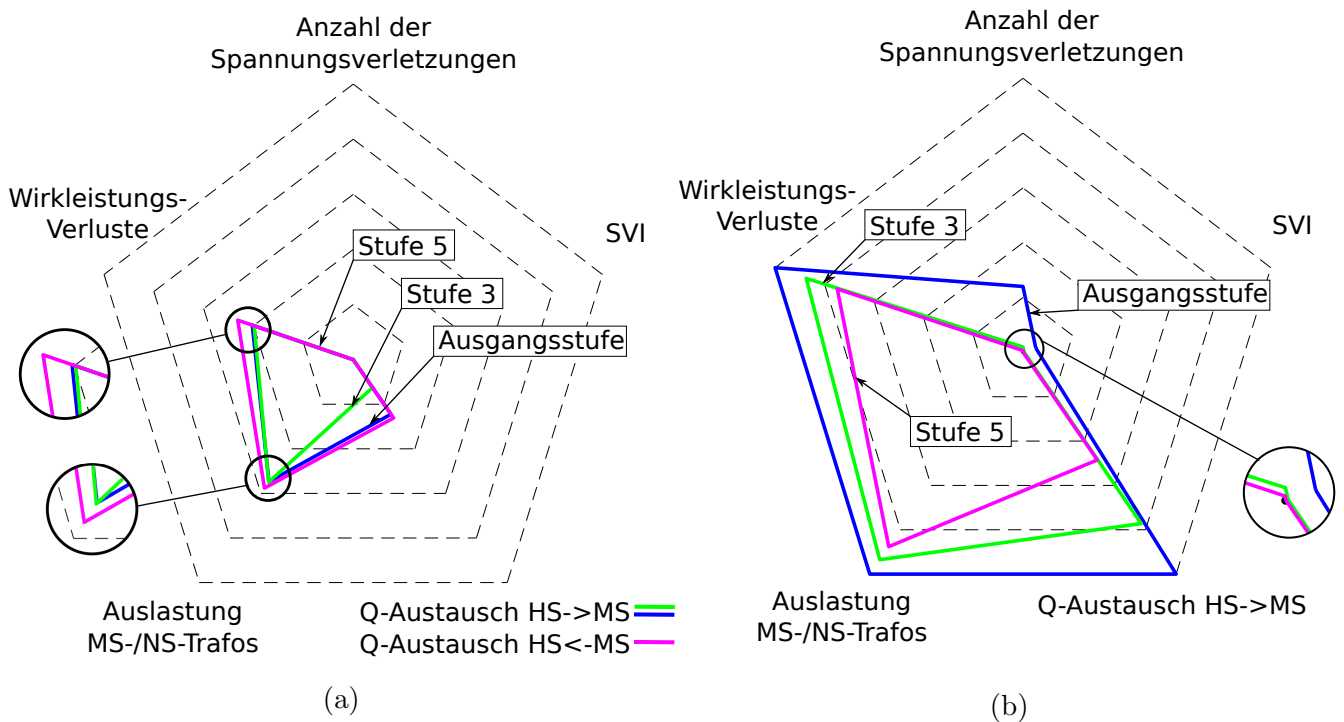


Abbildung 5.4: Vergleich der Stufenstellungen: Ausgangsstufe, Stufe 3 und Stufe 5 für einen Freileitungsmittelspannungsabzweig in den angegebenen Belastungsfällen mit $Q(U)$ -Regelung: (a) $L^{max}/E^0_{Q(U)}$, (b) $L^{min}/E^{max}_{Q(U)}$

Abbildung 5.4a zeigt, dass im Vergleich zum Fall ohne $Q(U)$ -Regelung durch die Blindleistungseinspeisung der Wechselrichter die Spannungsbandverletzungen im Fall $L^{max}/E^0_{Q(U)}$ verhindert werden können. Bei dezentraler Einspeisung im Fall $L^{min}/E^{max}_{Q(U)}$ ist dies für die ausgewählten Stufenstellungen nicht mehr möglich, jedoch werden die Spannungsverletzungen und der SVI bei den Stufen 3 und 5 fast null. Die Verluste werden in beiden Fällen wieder maßgeblich von den Mittelspannungsleitungen beeinflusst, welche vor allem von dem durch die Wechselrichter beeinflussten Blindleistungsfluss abhängen. Dieser ist im Fall $L^{max}/E^0_{Q(U)}$ bei der Stufe 5 am höchsten und im Fall $L^{min}/E^{max}_{Q(U)}$ bei der Ausgangsstufe, weshalb hier auch die größten Wirkleistungsverluste auftreten. Im Fall $L^{max}/E^0_{Q(U)}$ sind die Wirkleistungsverluste bei der Ausgangsstufe und der Stufe 3 fast gleich hoch, da hier auch die Verluste im Niederspannungsnetz eine Rolle spielen. Zwar tritt bei der Ausgangsstufe der größere Q-Fluss auf (höhere Verluste im MS-Netz), jedoch bewirkt die Spannungsabhängigkeit der Verluste im NS-Netz bei dieser Stufenstellung leicht geringere Verluste. Da hier der summierte Betrag des Blindleistungsflusses aus den Niederspannungsnetzen (Abbildung 4.28e) bei beiden Stufenstellungen genau den selben Wert hat (0.5 kvar Unterschied), spielt die Abhängigkeit der Verluste der Niederspannungsnetze vom Leistungsfluss bei den zwei Stufenstellungen eine untergeordnete Rolle. Der Unterschied im Wirkleistungsfluss ist mit 10 kW ebenfalls gering, wobei die Niederspannungsnetze bei der Ausgangsstufe mehr konsumieren. Bei der Stufe 3 sind es höhere Verluste im NS-Netz und ein geringerer Q-Fluss im Mittelspannungsnetz (geringere Verluste), da manche Niederspannungs-

netze induktiv und andere kapazitiv wirken. Bei der Ausgangsstufe sind es höhere Verluste im Mittelspannungsnetz und geringere Verluste im NS-Netz. Das lässt die Verluste der beiden Stufenstellungen insgesamt ähnlich hoch erscheinen (Ausgangsstufe hat leicht höhere Verluste). Im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ verhalten sich Auslastung der Verteiltransformatoren und der Blindleistungsaustausch mit dem Hochspannungsnetz ähnlich, wobei der Blindleistungsaustausch bei der Ausgangsstufenstellung den höchsten Wert aller betrachteten Fälle annimmt. Hier addiert sich der Blindleistungsbezug der Lasten und der Netzelemente zu jenem des $Q(U)$ -geregelten Wechselrichters. Im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ stellt der Wechselrichter Blindleistung bereit, welche dann direkt von den Lasten bezogen wird, was sowohl den Blindleistungsaustausch als auch die Verluste im Vergleich kleiner ausfallen lässt. Hier wird bei Stufe 5 die Blindleistungseinspeisung der Wechselrichter so groß, dass sich der Blindleistungsfluss über den HS-/MS-Trafo umdreht und auch im Betrag größer wird als bei den anderen Stufen. Zwischen der Ausgangsstufenstellung und Stufe 3 ist bei der Trafoauslastung im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ kaum ein Unterschied, da der summierte Wirk- und Blindleistungsfluss bei beiden Stufenstellungen ungefähr gleich ist. Zwar ist die Spannung im Mittelspannungsnetz bei Stufe 3 ein wenig höher, was eine geringere Auslastung bedeutet, jedoch wird bei der Ausgangsstufenstellung von den Niederspannungsnetzen ein wenig mehr Wirkleistung bezogen. Die Ausgangsstufe hat hier eine leicht geringere Trafoauslastung. Man erkennt bei der $Q(U)$ -Regelung, dass im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ die Ausgangsstufenstellung nicht mehr optimal ist, da hier durch eine Erhöhung der Stufenstellung der Blindleistungsfluss aus den Niederspannungsnetzen verringert werden könnte, indem die Wechselrichter die von den Lasten benötigte Blindleistung bereit stellen. Hierzu müsste aber im Optimalfall jedes Niederspannungsnetz getrennt betrachtet werden. Im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ hingegen wäre die Stufe 5 optimal, also jene Stufenstellung bei welcher die Spannung im Niederspannungsnetz am weitesten nach unten gedrückt wird. Insgesamt wäre bei lokaler Blindleistungsregelung also eher eine hohe Stufenstellung empfehlenswert, da im Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ die größeren Probleme auftreten. Wie aber schon erwähnt, macht es Sinn die Situation für jedes Niederspannungsnetz getrennt zu beurteilen.

In Abbildung 5.5 sind als letzter Vergleich die beiden Fälle bei einem Kabel-Mittelspannungsnetz mit aktiver $Q(U)$ -Regelung der Wechselrichter betrachtet worden. Wie schon bei den Fällen ohne $Q(U)$ -Regelung verhält sich, mit Ausnahme der Auslastung von den MS-/NS-Trafos, die Umstellung der Stufenstellung tendenziell gleich wie bei Freileitungen im Mittelspannungsnetz. Auch hier ist der geringere Spannungsabfall und der Blindleistungseintrag der Kabelstruktur ein wichtiger Einflussfaktor. Die Wirkleistungsverluste werden auf Grund der Leitungsparameter und der Blindleistungsbereitstellung der Kabel direkt im MS-Netz weniger, im Vergleich mit dem Freileitungs-Mittelspannungsnetz. Ebenso wird auf Grund der Blindleistungsbereitstellung der Blindleistungsaustausch bei der Ausgangsstufe und der Stufe 3 in beiden Belastungsfällen weniger. Im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ wird bei Stufe 5 der Blindleistungsaustausch im Vergleich jedoch größer. Das liegt an dem umgedrehten Blindleistungsfluss vom Mittelspannungsnetz ins Hochspannungsnetz, welcher auch beim Freileitungs-Mittelspannungsabzweig aufgetreten ist, und bei einem Kabel-Mittelspannungsabzweig durch dessen Blindleistungsbereitstellung nun noch größer wird. Der Unterschied in der Auslastung der MS-/NS-Trafos zwischen Kabel- und Freileitung-Netz im Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ hängt mit dem niedrigeren Spannungsabfall bei den Kabeln zusammen. Dadurch ist die Spannung in den Niederspannungsnetzen höher und die Wechselrichter stellen nicht so viel Blindleistung bereit. Das bedeutet, es muss mehr Blindleistung aus dem MS-Netz bezogen werden. Eine Erhöhung der Stufe senkt die Spannung, wodurch einerseits der Blindleistungsbedarf der Lasten durch die Wechselrichter weiter gedeckt werden kann und die Lasten außerdem weniger Wirkleistung beziehen. Bei der Spannung zwischen $99\% \cdot U_n$ und $103\% \cdot U_n$, welche der Kabel-Mittelspannungsabzweig in diesem Belastungsfall hat, wird der Blindleistungsbedarf der Lasten

5 Evaluierung

bei Stufe 5 in etwa gedeckt. Im Gegensatz dazu wird bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz bei Stufe 5 mehr Blindleistung von den NS-Netzen ins MS-Netz gespeist, was die Trafoauslastung erhöht. Mit der $Q(U)$ -Kennlinie des Niederspannungsnetzes Urban aus Abbildung 4.47 kann man diesen Zusammenhang erkennen, indem man das Q-Verhalten des NS-Netzes bei den typischen Spannungen am Freileitungs- bzw. Kabel-Abzweig analysiert.

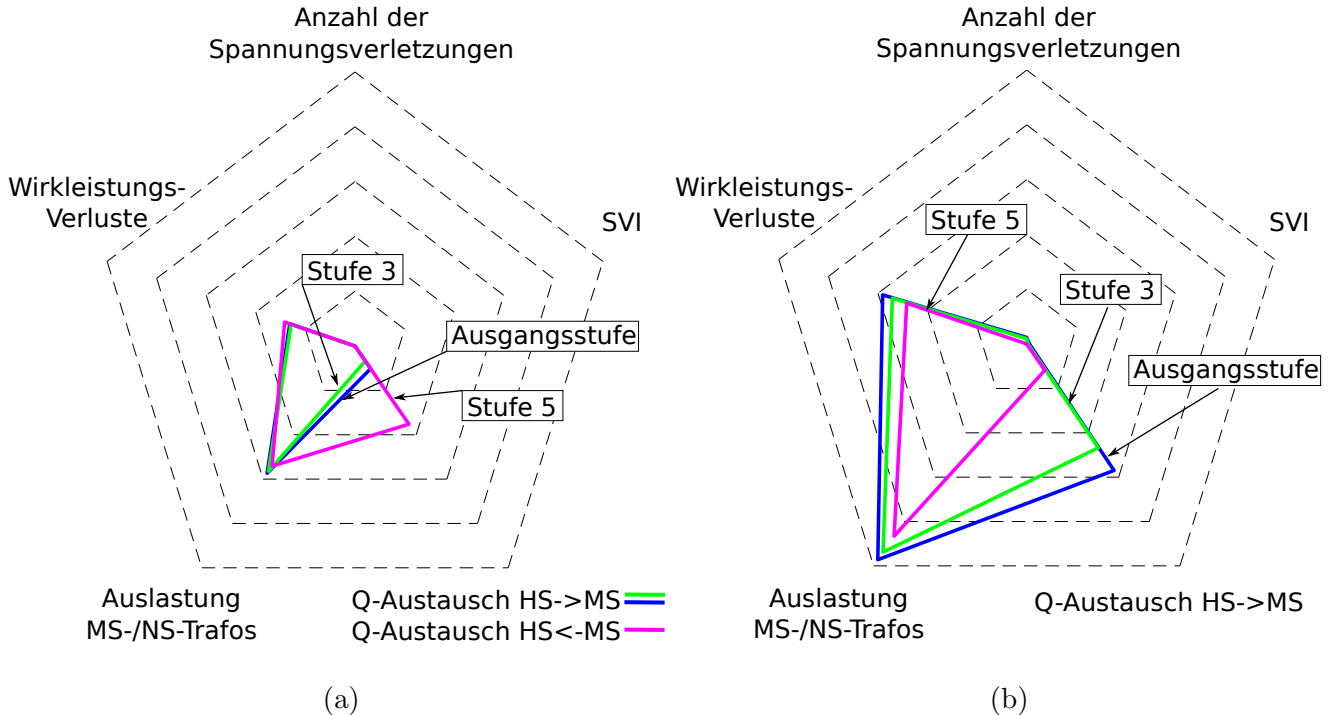


Abbildung 5.5: Vergleich der Stufenstellungen: Ausgangsstufe, Stufe 3 und Stufe 5 für einen Kabel-Mittelspannungsabzweig in den angegebenen Belastungsfällen mit $Q(U)$ -Regelung: (a) $L^{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$

Wie im Fall ohne $Q(U)$ -Regelung ist ein Kable-Mittelspannungsnetz hier durchaus von Vorteil, sofern es in extremen Lastfällen nicht zu einer zu hohen Blindleistungsrückspeisung ins Hochspannungsnetz kommt. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass andere Faktoren, wie zum Beispiel die Kosten oder die Leitungsbelastbarkeit nicht berücksichtigt sind.

6 Schlussfolgerung

Direkte und Indirekte Wirkung einer Stufenstellungsänderung

Eine Änderung der Stufenstellung im Verteiltransformator beeinflusst die Spannung im Niederspannungsnetz, was hier als direkte Wirkung des Transformators bezeichnet wird. Diese Beeinflussung der Spannung im Niederspannungsnetz hat wiederum einen Einfluss auf die Leistung, welche das Niederspannungsnetz vom Mittelspannungsnetz bezieht oder in dieses einspeist. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben gezeigt, dass es eine indirekte Wirkung gibt, welche durch eine Änderung des Wirk- und Blindleistungsflusses zwischen Niederspannungsnetz und Mittelspannungsnetz hervorgerufen wird. Verursacht wird diese Leistungsflussänderung durch spannungsabhängige Elemente im Niederspannungsnetz, wie zum Beispiel durch Lasten oder durch lokale Blindleistungsregelung der Wechselrichter. Diese indirekte Wirkung hat unter anderem eine Auswirkung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz.

Bei lokaler Blindleistungsregelung an den dezentralen Erzeugern wird durch die Änderung der Stufenstellungsposition diese indirekte Wirkung auf das Spannungsband erheblich größer und es kann zu einem zusätzlichen Blindleistungsfluss zwischen Mittel- und Hochspannungsnetz kommen.

Spannungsverhalten im Mittelspannungsnetz

Bei den hier betrachteten Niederspannungsnetzen ohne lokaler Blindleistungsregelung, welche am Ende des Mittelspannungsnetzes angeschlossen sind, zeigt folgendes Verhalten: Ändert man die Spannung in einem Niederspannungsnetz durch die Stufenstellung des Verteiltransformators, ändert sich die Spannung im Mittelspannungsnetz genau gegengleich. Das bedeutet, bei einer Erhöhung der Stufenstellung und einhergehender Verringerung der Spannung im Niederspannungsnetz erhöht sich die Spannung im Mittelspannungsnetz auf Grund der indirekten Wirkung. Dieses Verhalten wurde sowohl für den Fall hoher Last und ohne dezentraler Einspeisung (L^{max}/E^0) im Niederspannungsnetz, als auch bei niedriger Last und hoher dezentraler Einspeisung (L^{min}/E^{max}) im Niederspannungsnetz festgestellt.

Mit lokaler Blindleistungsregelung der dezentralen Erzeuger hängt die Leistungsflussänderung aus den Niederspannungsnetzen und somit auch die Spannungsänderung des Spannungsbandes sehr stark von der Kennlinie der Blindleistungsregelung ab.

Bei einem Kabel-Mittelspannungsabzweig haben die Simulationen gezeigt, dass der Spannungsabfall auf Grund der Leitungsparameter im Vergleich zu Freileitungen geringer ist. Das bedeutet, bei einer Gegenüberstellung rufen Kabel eine kleinere Änderung der Spannung durch eine Leistungsflussänderung im Mittelspannungsnetz hervor. Somit hat die Änderung der Stufenstellung des Verteiltransformators bei Kabeln eine geringere Auswirkung auf die Spannung im Mittelspannungsnetz als bei Freileitungen.

Anschlussposition des Verteiltransformators

Die Anschlussposition des Verteiltransformators am Mittelspannungsnetz, an welchem die Stufenstellung geändert wird, hat Auswirkungen auf die Höhe der Leistungsflussänderung aus dem

Niederspannungsnetz, also auch auf die Spannungsänderung im Mittelspannungsnetz. Zum einen gibt es den globalen und lokalen Effekt. Der globale Effekt im Mittelspannungsnetz ist für den gesamten Abzweig konstant und unabhängig vom Einspeise- oder Bezugspunkt der Leistung. Der lokale Effekt hängt sehr wohl von der Anschlussposition am Mittelspannungsabzweig ab und wird größer, je näher am Ende des Abzweiges die Leistungseinspeisung oder der Leistungsbezug stattfindet. Das bedeutet, eine Änderung des Leistungsflusses in oder aus einem Niederspannungsnetz am Ende des Mittelspannungsabzweiges hat eine größere Wirkung auf dessen Spannung, als eine Änderung am Anfang des Abzweiges.

Ohne lokaler Blindleistungsregelung können aus den $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinien der Niederspannungsnetze folgende Schlüsse bezüglich einer Änderung der Stufenstellung des Verteiltransformators gezogen werden:

- Im Fall hoher Last und ohne dezentraler Einspeisung (L^{max}/E^0) im Niederspannungsnetz tritt die größte Leistungsflussänderung (P und Q) des Niederspannungsnetzes bei einer Stufenstellungsänderung eher am Anfang des Mittelspannungsabzweiges auf.
- Im Fall niedriger Last und hoher dezentraler Einspeisung (L^{min}/E^{max}) im Niederspannungsnetz tritt die größte Leistungsflussänderung (P und Q) des Niederspannungsnetzes bei einer Stufenstellungsänderung eher am Ende des MS-Abzweiges auf.

Bei Niederspannungsnetzen mit $Q(U)$ -Regelung der Wechselrichter, hat die Anschlussposition des Niederspannungsnetzes am Mittelspannungsabzweig bei einer Stufenstellungsänderung große Auswirkung auf den Blindleistungsfluss. Die $Q(U)$ -Kennlinie eines Niederspannungsnetzes wird bei einer hohen Anzahl an dezentralen Erzeugern maßgeblich von der Kennlinie der lokalen Blindleistungsregelung beeinflusst. Die $P(U)$ -Kennlinie ändert ihren Verlauf vor allem auf Grund der Wirkleistungsverluste durch den geänderten Blindleistungsfluss, bedingt durch die Wechselrichter.

Änderung der aktuellen Stufenstellung

Die aktuelle Stufenstellung ist nicht für einen hohen Anteil dezentraler Erzeuger im Niederspannungsnetz ausgelegt. Sie gleicht bei einem konventionellen Leistungsfluss (von MS-Netz ins NS-Netz) den Spannungsabfall des Mittelspannungsnetzes im Niederspannungsnetz aus. Im Fall eines umgedrehten Leistungsflusses vom Niederspannungsnetz ins Mittelspannungsnetz erhöht sie, vor allem am Ende des Mittelspannungsabzweiges, die Spannung in den Niederspannungsnetzen, was Spannungsbandverletzungen begünstigt. Aus diesem Grund kann es sinnvoll sein, die aktuelle Stufenstellungen der Verteiltransformatoren zu überdenken.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit kann man erkennen, dass bei einem großen Anteil an dezentralen Erzeugern im Niederspannungsnetz eine Erhöhung der Stufenstellung eines Verteiltransformators in Frage kommt, was eine Verringerung der Spannung im Niederspannungsnetz bedeutet. Das ist jedoch nur möglich, wenn das gesetzlich einzuhaltende Spannungsband im Niederspannungsnetz für den Fall hoher Last ohne dezentraler Einspeisung (L^{max}/E^0) noch nicht voll ausgereizt ist. Auf Grund des Spannungsabfalles im Mittelspannungsnetz, ist eine Änderung der Stufenstellung vor allem bei Verteiltransformatoren am Ende des Mittelspannungsabzweiges sinnvoll.

Berücksichtigung der Stufenstellung bei Leistungsflussberechnungen

Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass die Stufenstellung von Verteiltransformatoren eine große Auswirkung auf den Leistungsfluss haben können. Das bedeu-

6 Schlussfolgerung

tet, dass bei Leistungsflussberechnungen in denen sowohl das Niederspannungsnetz, als auch das Mittelspannungsnetz betrachtet werden, auch die Stufenstellung der Verteiltransformatoren berücksichtigt werden sollte. Bei einer Vernachlässigung sind nicht nur die Ergebnisse im Niederspannungsnetz abweichend, sondern auch jene im Mittelspannungsnetz. In den hier durchgeführten Simulationen treten Fehler der Spannung im Mittelspannungsnetz von bis zu 1.7% und im Niederspannungsnetz bis zu 5.5% auf.

7 Appendix

7.1 Netzdaten

Netz	Kabelanteil [%]	Leitungslänge [km]	Abzweige	längster Abzweig [km]
Ländlich	58.64	6.335	4	1.63
Urban	81.11	4.975	6	0.61

Tabelle 7.1: Netzdaten Niederspannungsnetze

Netz	n_{Last}	$P_{\text{Last},n}^{\text{max}}$ [kW]	$Q_{\text{Last},n}^{\text{max}}$ [kvar]	$P_{\text{Last}}^{\text{max}}$ [kW]	$Q_{\text{Last}}^{\text{max}}$ [kvar]
Ländlich	61	1.368	0.4496	83.448	27.4256
Urban	91	2.62	0.8612	238.42	78.3649

Tabelle 7.2: Lastdaten der Niederspannungsnetze

S_n [kVA]	Trafo	U_{n1} [kV]	U_{n2} [kV]	u_k [%]	u_r [%]	P_0 [W]	i_0 [%]	Stufen
160	Yzn5	20	0.4	4.0	1.125	200	0.7	± 2.5 & ± 5
400	Dyn5	20	0.4	4.4	0.765	415	0.9	± 2.5 & ± 5

Tabelle 7.3: Transformatordaten für Niederspannungsnetze Ländlich und Urban

	r' [Ω/km]	x' [Ω/km]	c' [nF/km]	Länge [m]	I_{th} [A]
Freileitung	0.8353	0.376	9.6	2000	170
Kabel	0.206	0.1222	254	2000	320

Tabelle 7.4: Daten der Leitungen im reduzierten Netz

S_n [MVA]	Trafo	U_{n1} [kV]	U_{n2} [kV]	u_k [%]	u_r [%]	P_0 [kW]	i_0 [%]	Stufen
18.5	YNyn6	110	20	10.12	0.45	28	0,19	25 (je 1.667%)

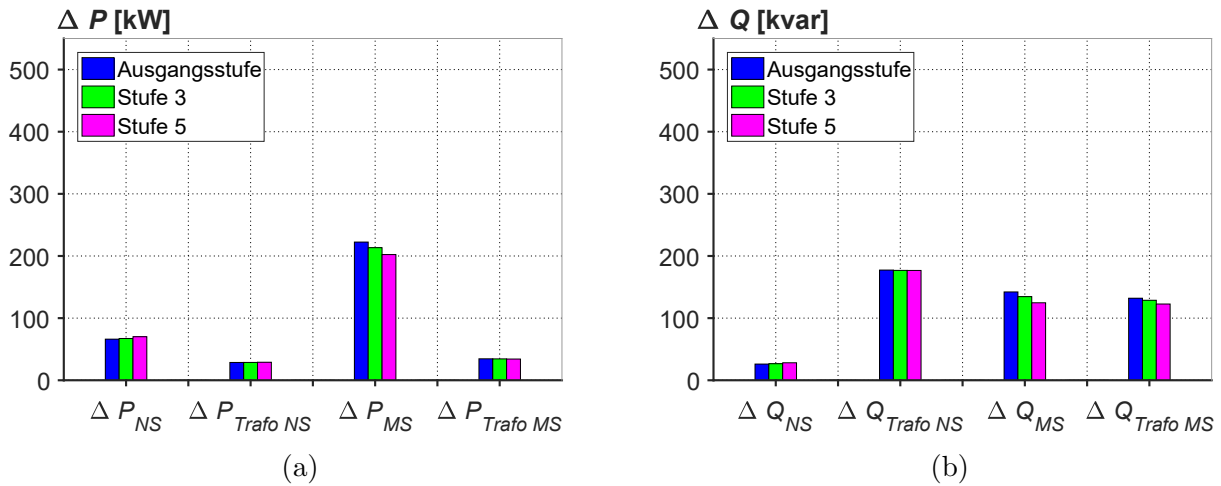
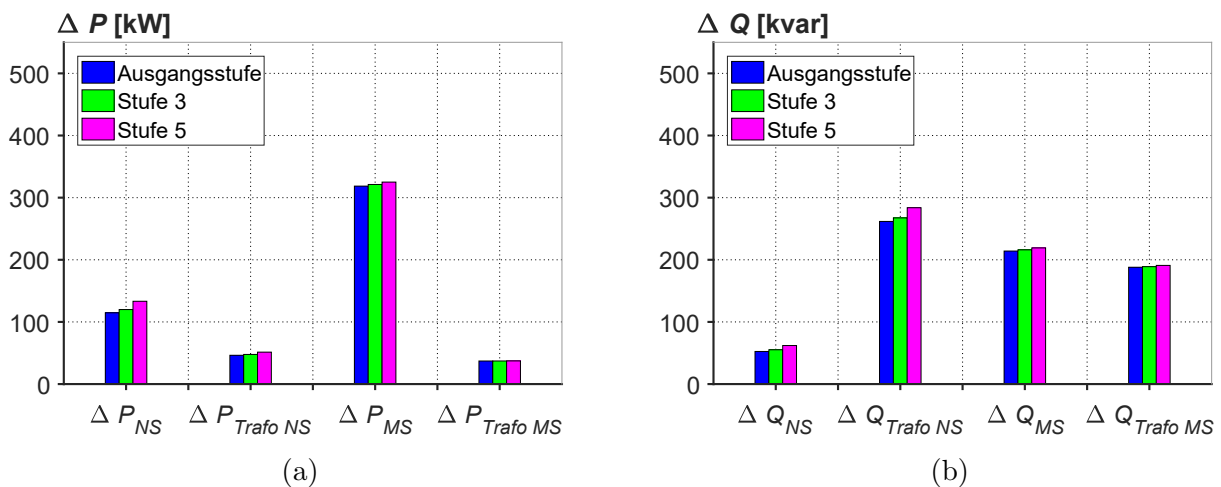
Tabelle 7.5: Transformatordaten für das Mittelspannungsnetz

Typ	A [mm ²]	r' [Ω/km]	x' [Ω/km]	c' [nF/km]	I _{th} [A]
Freileitung 1	35	0.8353	0.376	9.6	170
Freileitung 2	50	0.5946	0.376	9.6	210
Freileitung 3	95	0.358	0.376	9.6	350
Kabel 1	50	0.641	0.146	175	173
Kabel 2	95	0.32	0.132	216	252
Kabel 3	240	0.125	0.113	304	419

Tabelle 7.6: Daten der Leitungen im Mittelspannungsnetz

7.2 Verluste nach Netzelementen

7.2.1 Verluste Freileitungs-Mittelspannungsnetz

Abbildung 7.1: Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall L^{max}/E^0 bei Freileitungs-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) BlindleistungsbedarfAbbildung 7.2: Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall L^{min}/E^{max} bei Freileitungs-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf

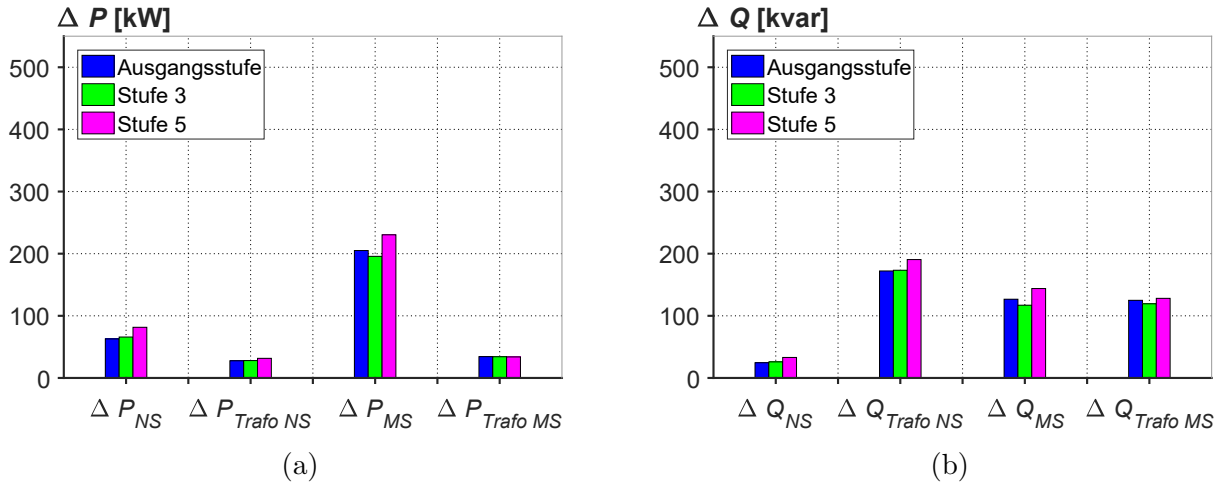


Abbildung 7.3: Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei Freileitungs-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf

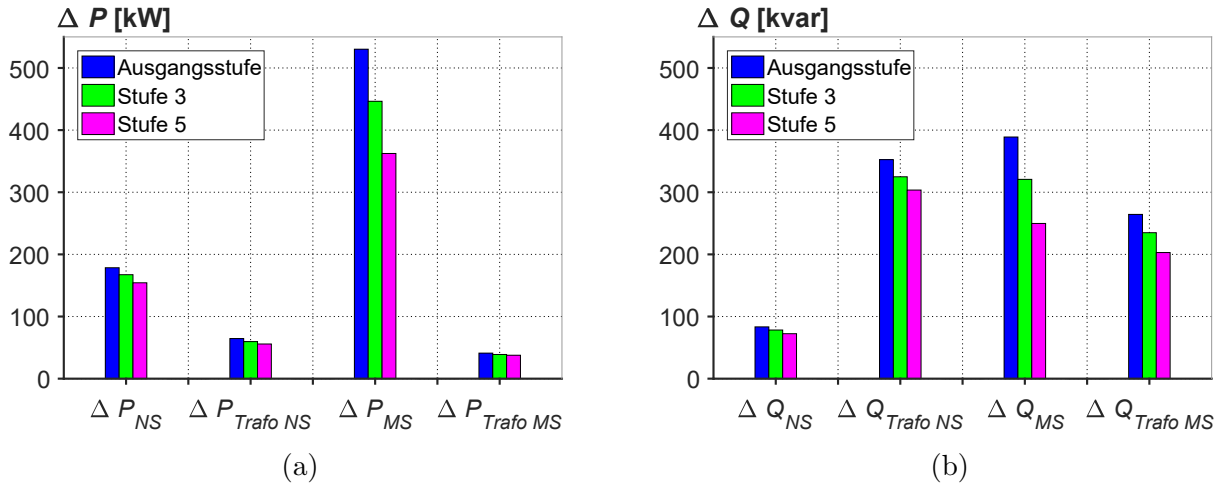


Abbildung 7.4: Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ bei Freileitungs-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf

7.2.2 Verluste Kabel-Mittelspannungsnetz

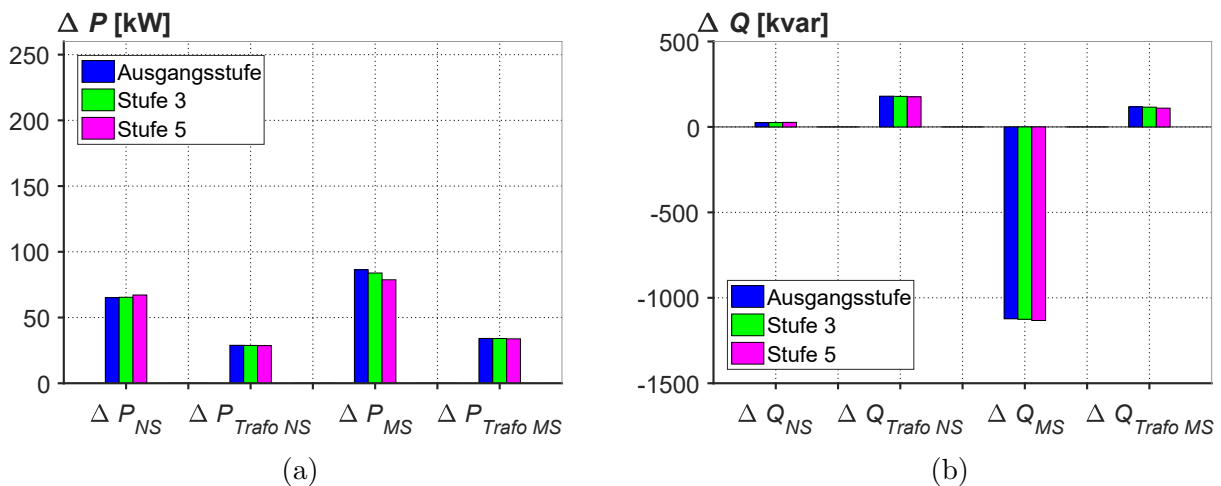


Abbildung 7.5: Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall L^{max}/E^0 bei Kabel-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf

7 Appendix

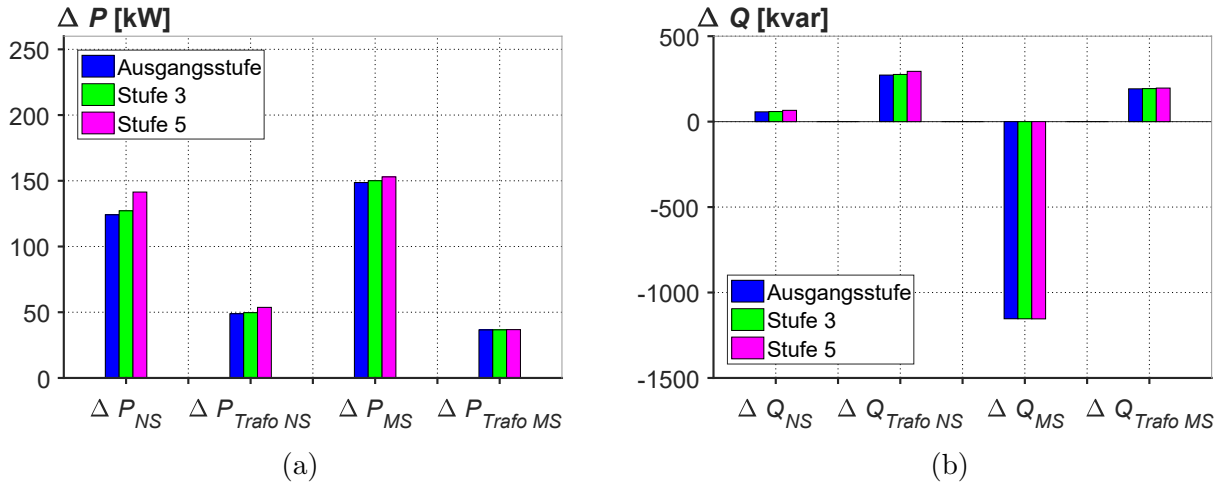


Abbildung 7.6: Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall L^{min}/E^{max} bei Kabel-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf

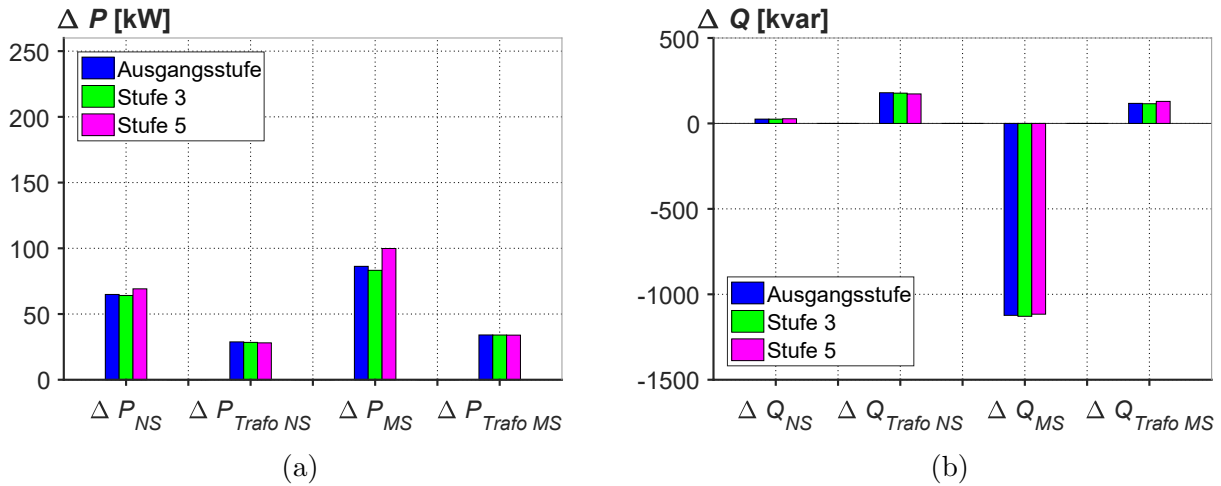


Abbildung 7.7: Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall $L^{max}/E^0_{Q(U)}$ bei Kabel-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf

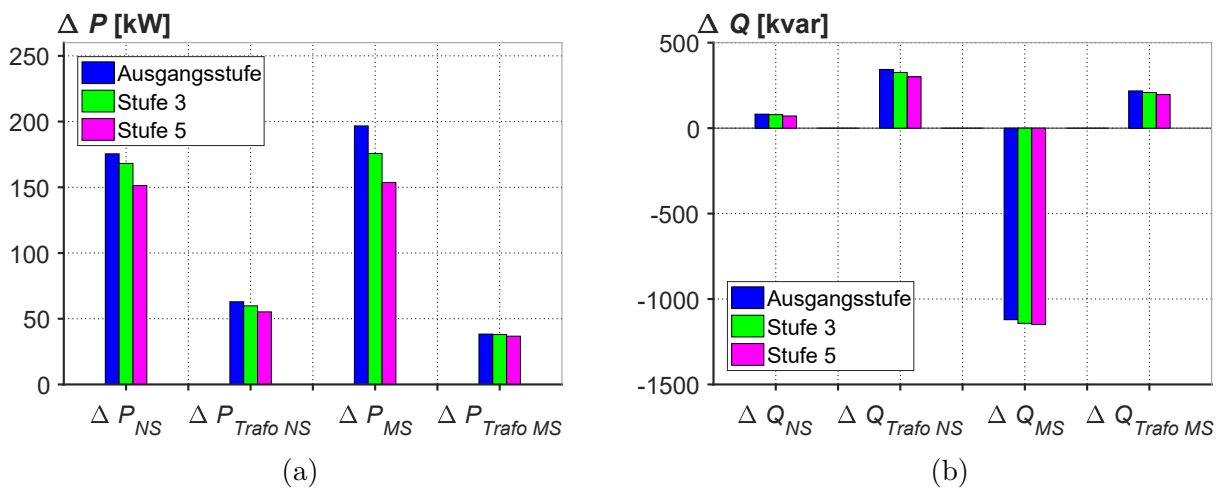


Abbildung 7.8: Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall $L^{min}/E^{max}_{Q(U)}$ bei Kabel-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf

7.3 P(U)- und Q(U)-Kennlinien der Niederspannungsnetze

7.3.1 Kennlinien Niederspannungsnetz Ländlich

$$L^{max} / E^0$$

Lasten

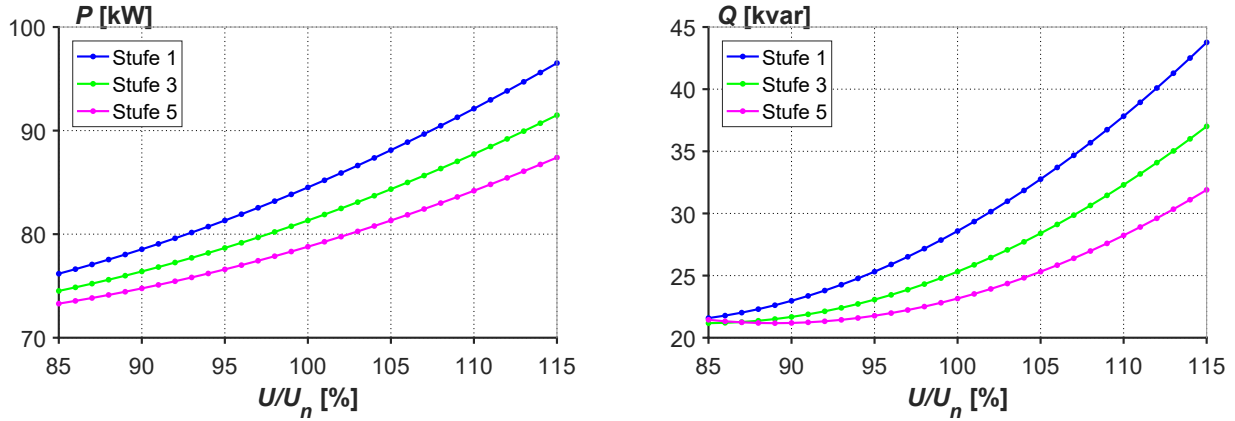


Abbildung 7.9: $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall L^{max} / E^0 im NS-Netz Ländlich

Verluste

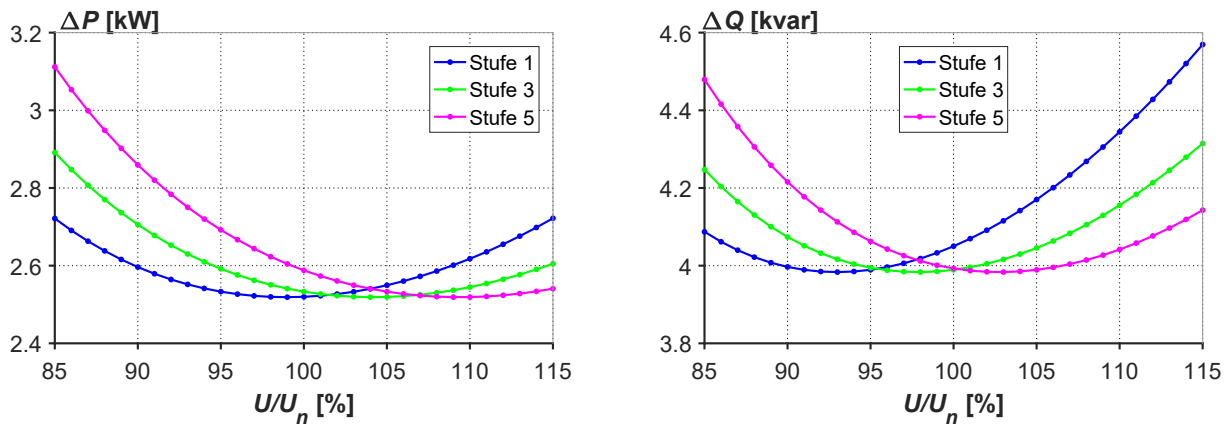


Abbildung 7.10: $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{max} / E^0 im NS-Netz Ländlich

Kennlinie Niederspannungsnetz

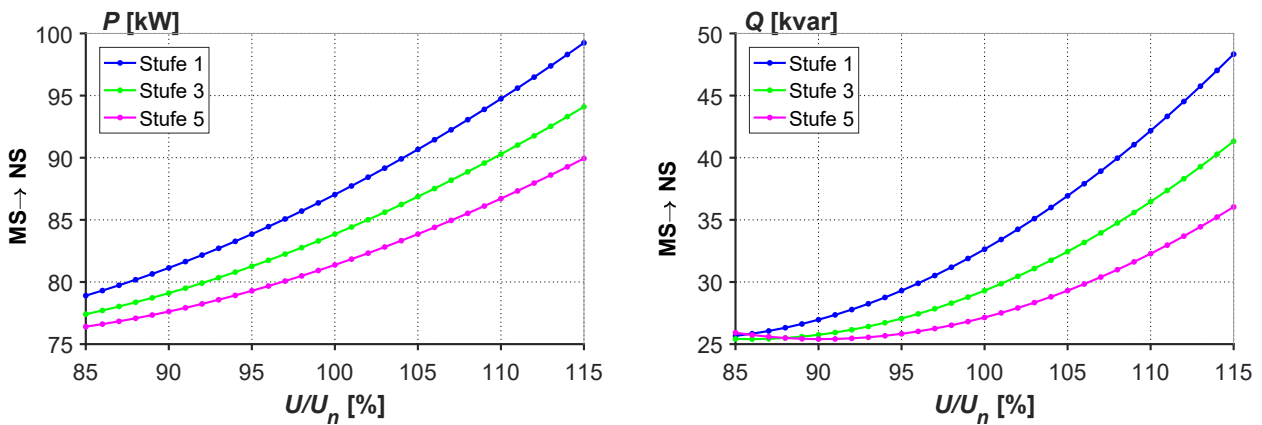


Abbildung 7.11: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall L^{max} / E^0 im NS-Netz Ländlich

$$L^{min} / E^{max}$$

Lasten

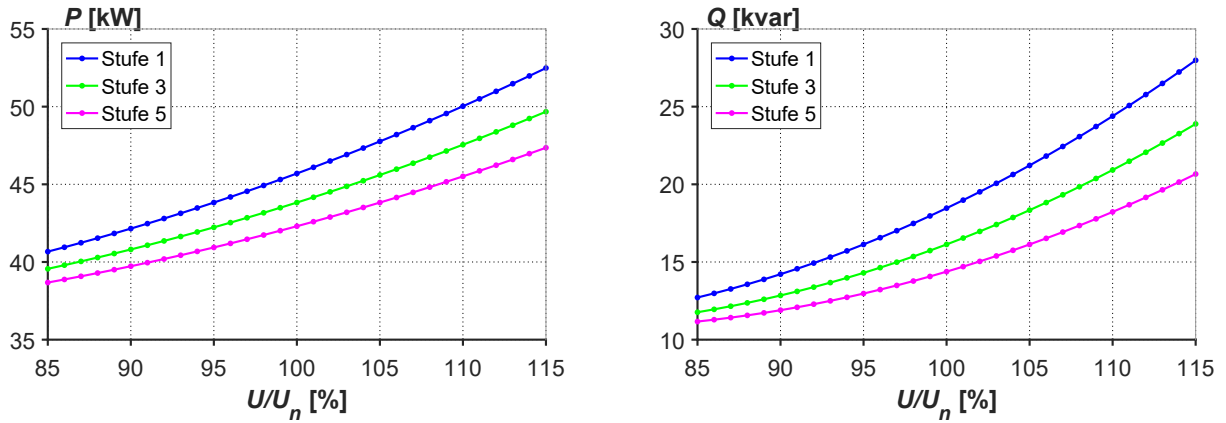


Abbildung 7.12: $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall L^{min} / E^{max} im NS-Netz Ländlich

Verluste

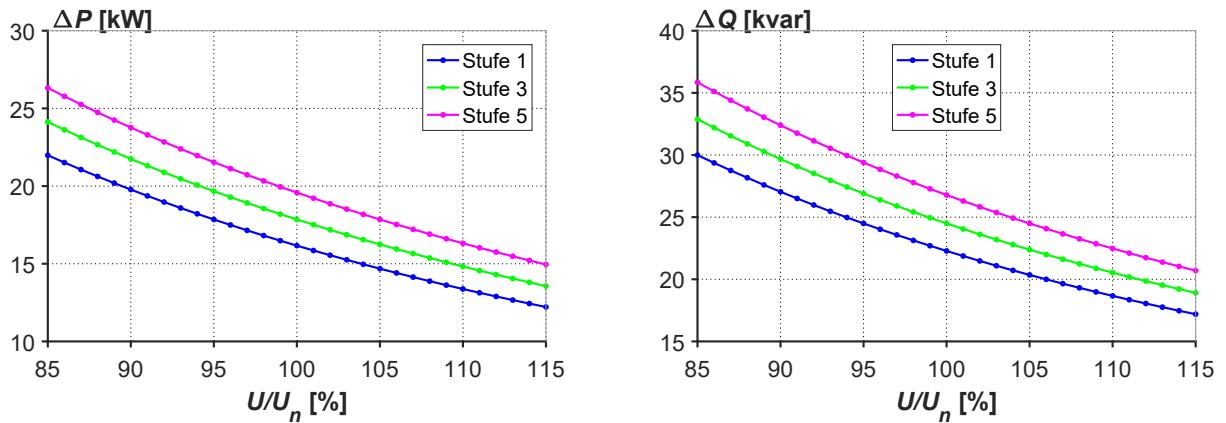


Abbildung 7.13: $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{min} / E^{max} im NS-Netz Ländlich

Kennlinie Niederspannungsnetz

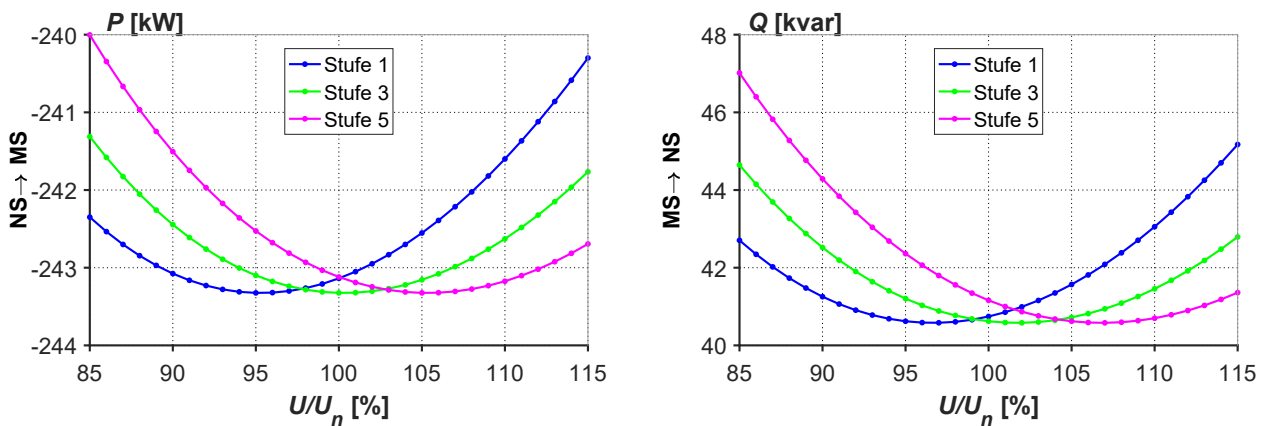


Abbildung 7.14: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall L^{min} / E^{max} im NS-Netz Ländlich

$$L^{max}/E_{Q(U)}^0$$

Lasten

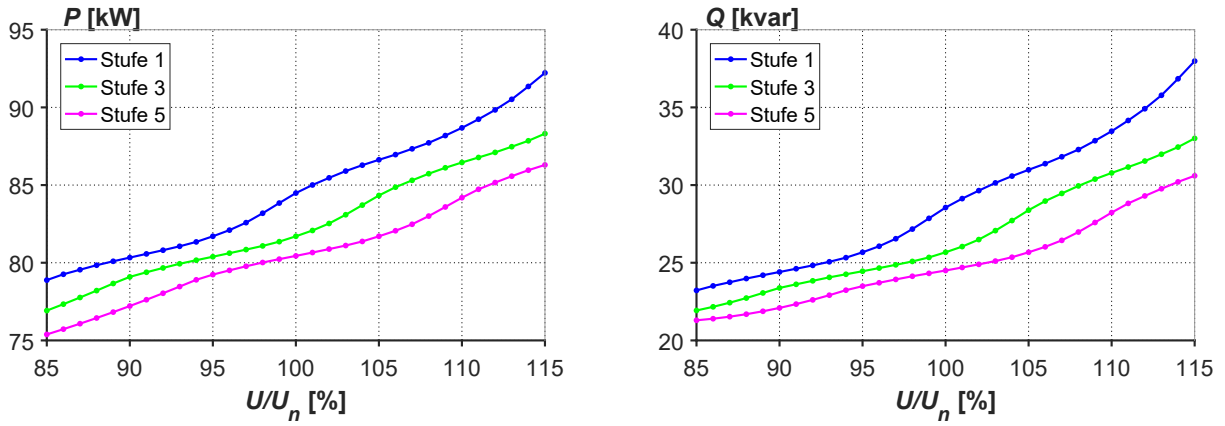


Abbildung 7.15: $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Ländlich

Verluste

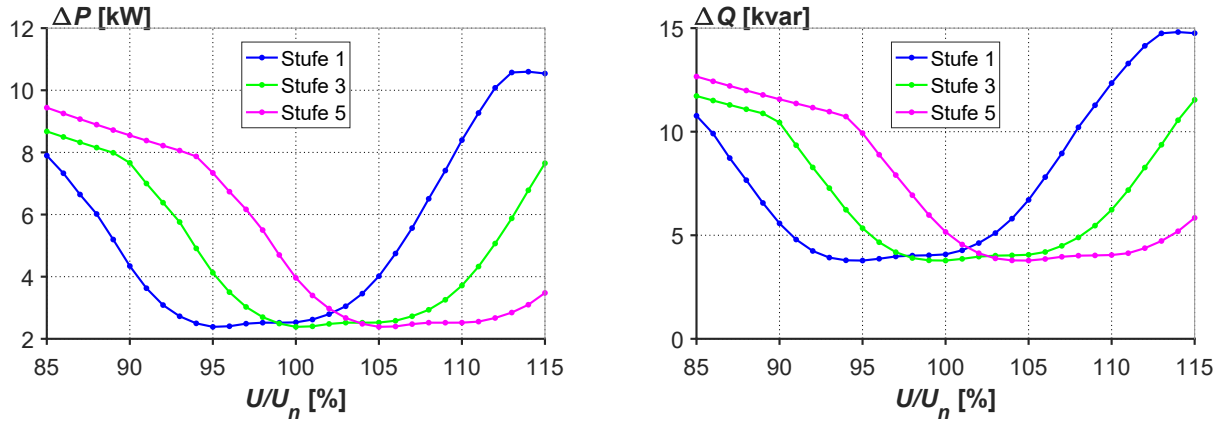


Abbildung 7.16: $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Ländlich

Kennlinie Niederspannungsnetz

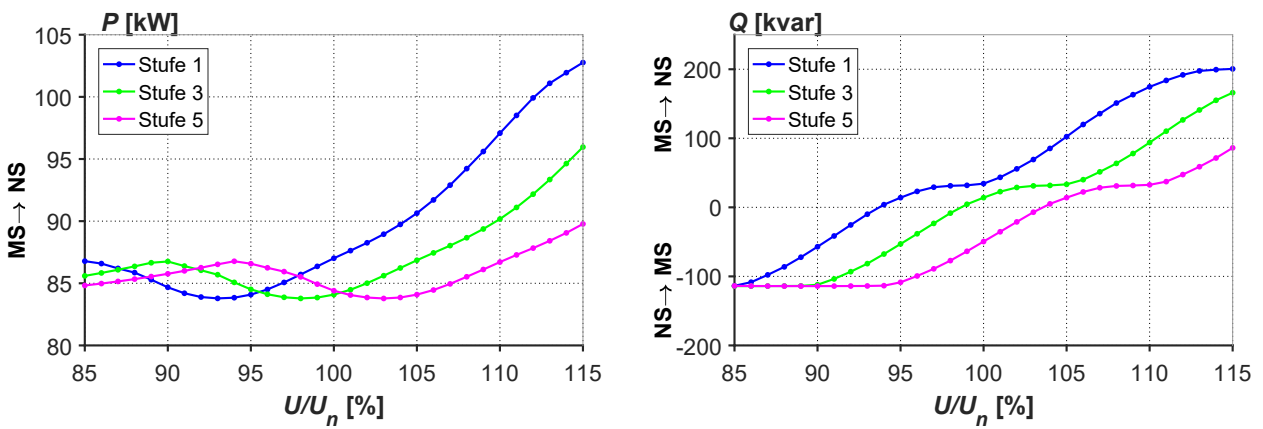


Abbildung 7.17: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Ländlich

$$L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$$

Lasten

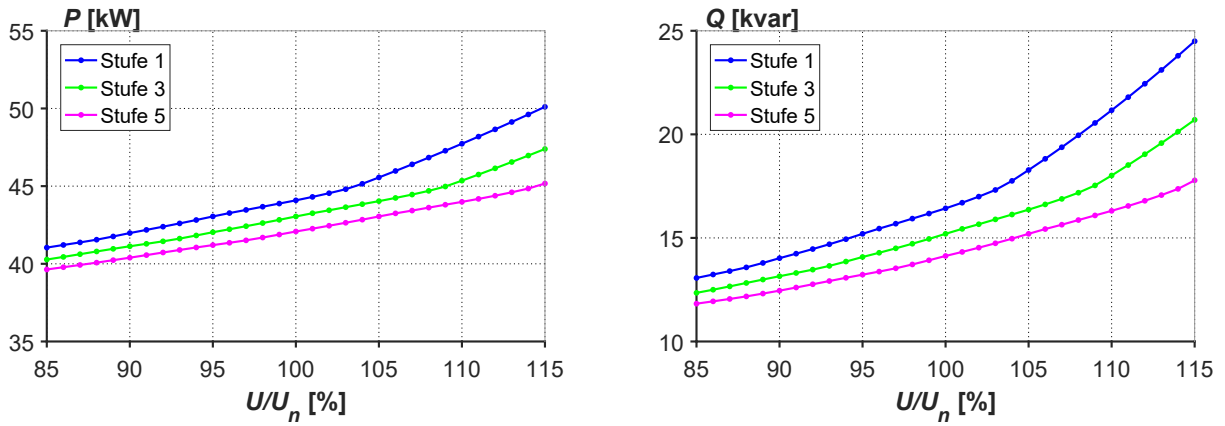


Abbildung 7.18: $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall $L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Ländlich

Verluste

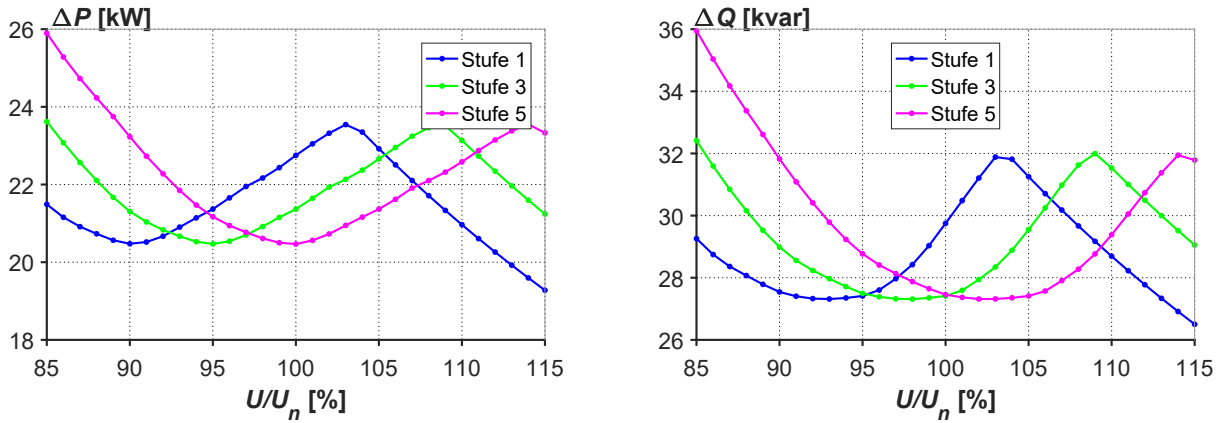


Abbildung 7.19: $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall $L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Ländlich

Kennlinie Niederspannungsnetz

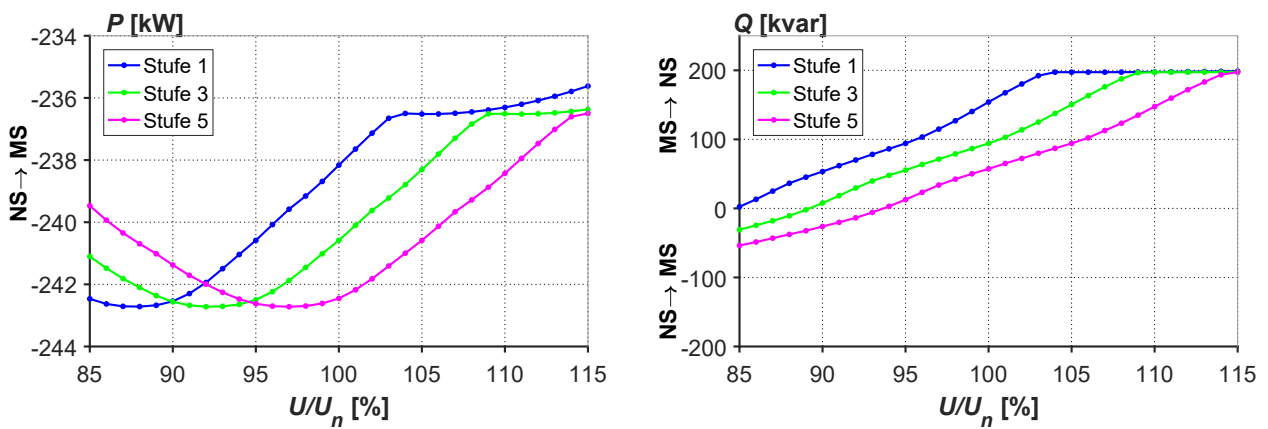


Abbildung 7.20: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall $L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Ländlich

7.3.2 Kennlinien Niederspannungsnetz Urban

$$L^{max} / E^0$$

Lasten

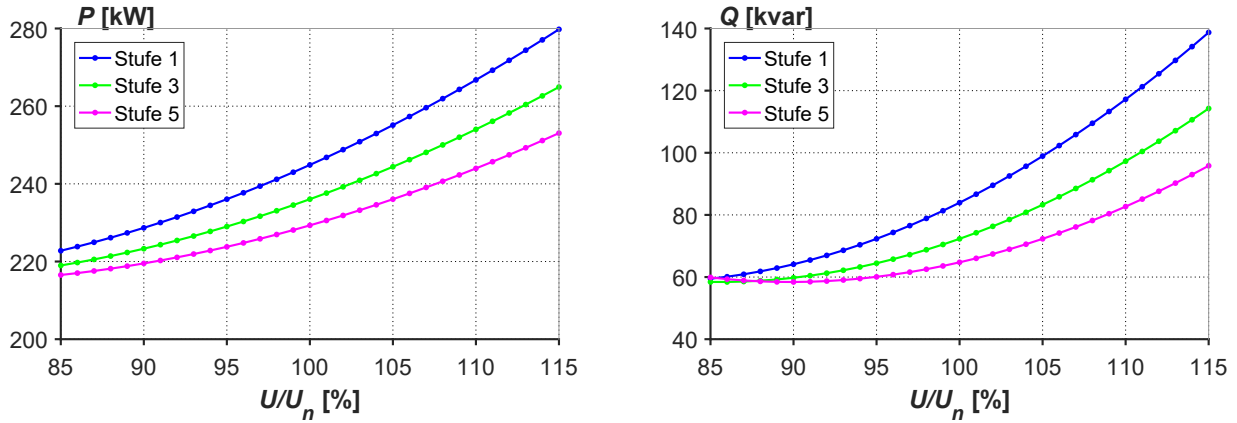


Abbildung 7.21: $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall L^{max} / E^0 im NS-Netz Urban

Verluste

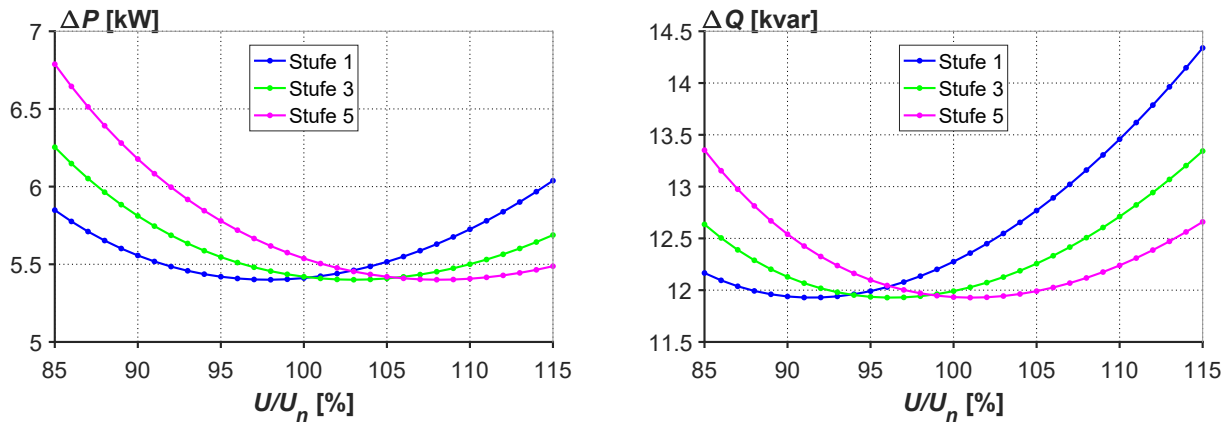


Abbildung 7.22: $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{max} / E^0 im NS-Netz Urban

Kennlinie Niederspannungsnetz

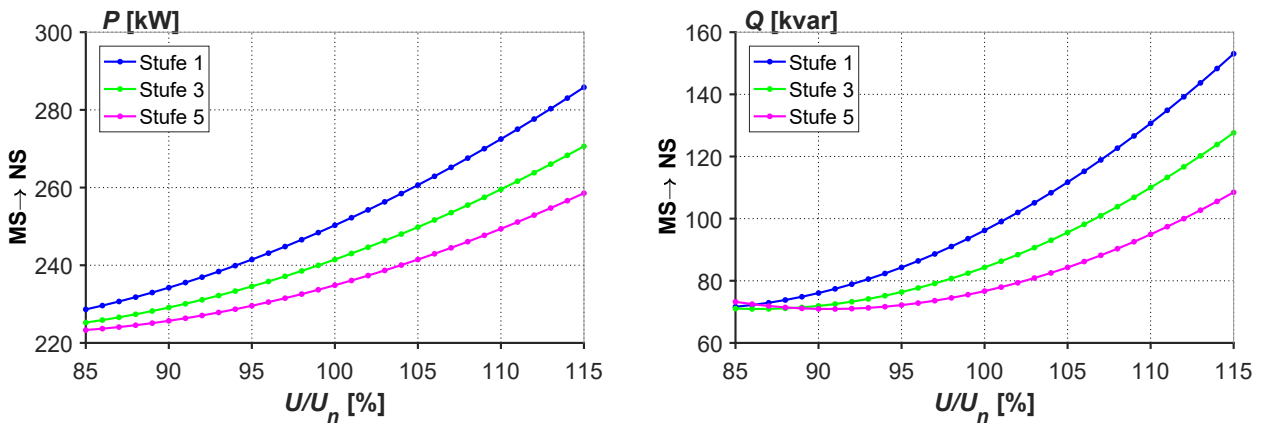


Abbildung 7.23: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall L^{max} / E^0 im NS-Netz Urban

$$L^{min} / E^{max}$$

Lasten

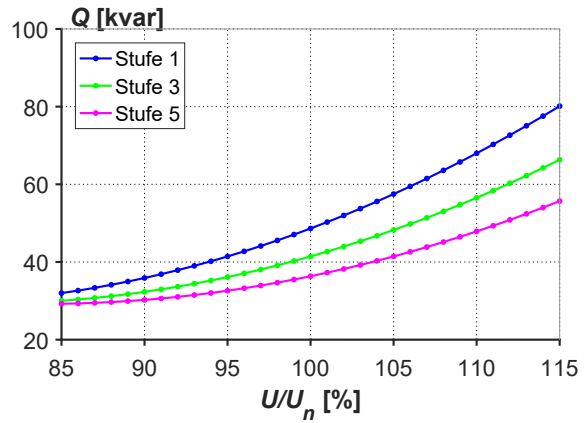
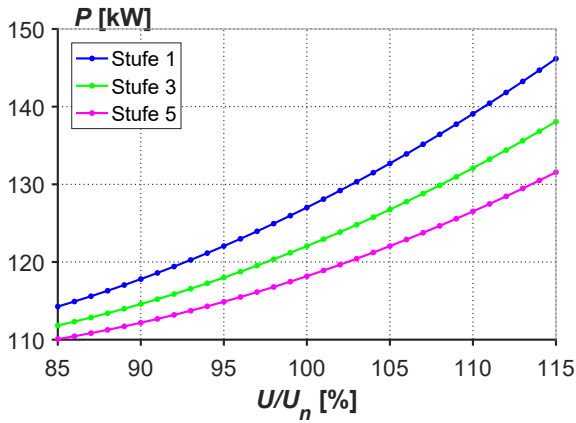


Abbildung 7.24: $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall L^{min} / E^{max} im NS-Netz Urban

Verluste

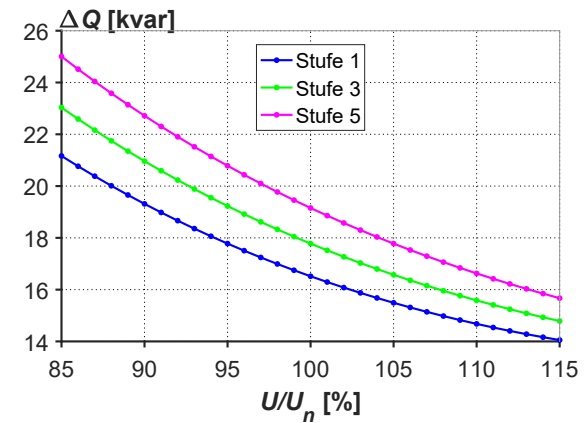
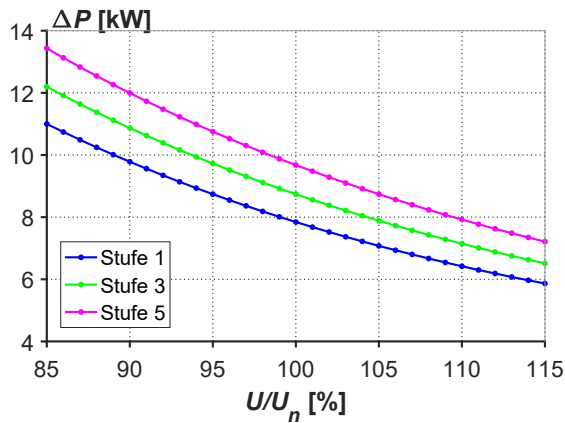


Abbildung 7.25: $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{min} / E^{max} im NS-Netz Urban

Kennlinie Niederspannungsnetz

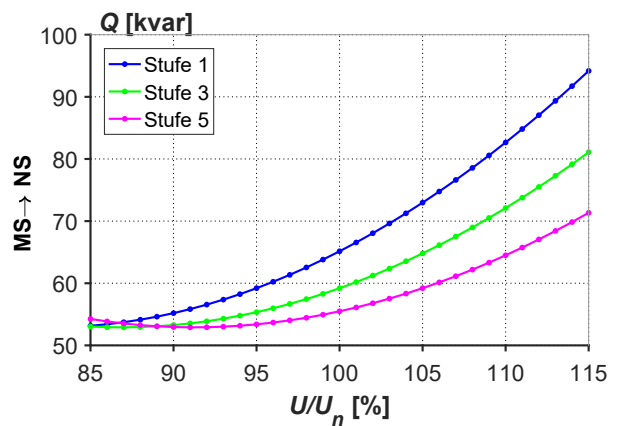
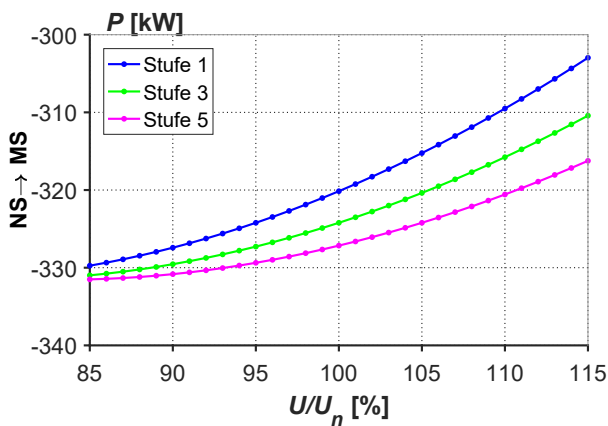


Abbildung 7.26: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall L^{min} / E^{max} im NS-Netz Urban

$$L^{max}/E_{Q(U)}^0$$

Lasten

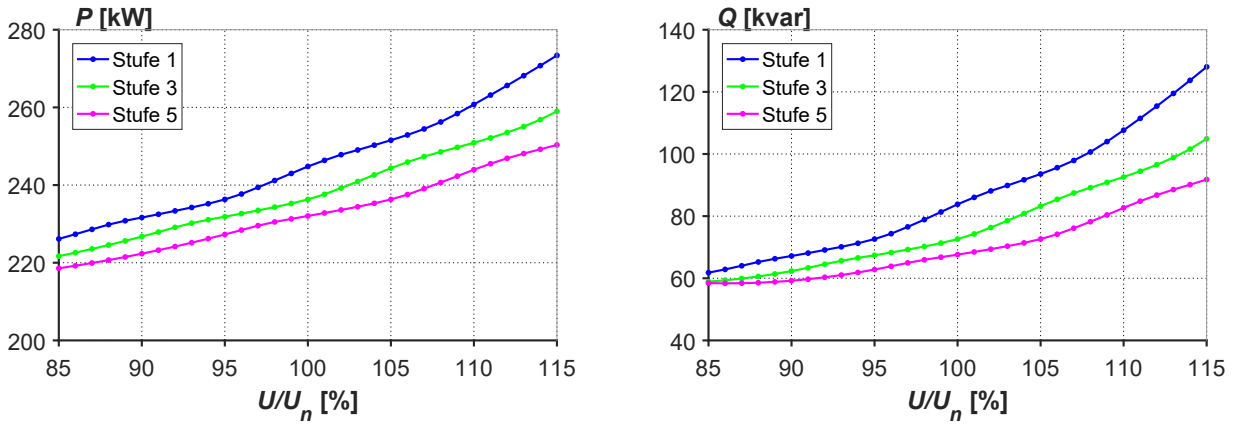


Abbildung 7.27: $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Urban

Verluste

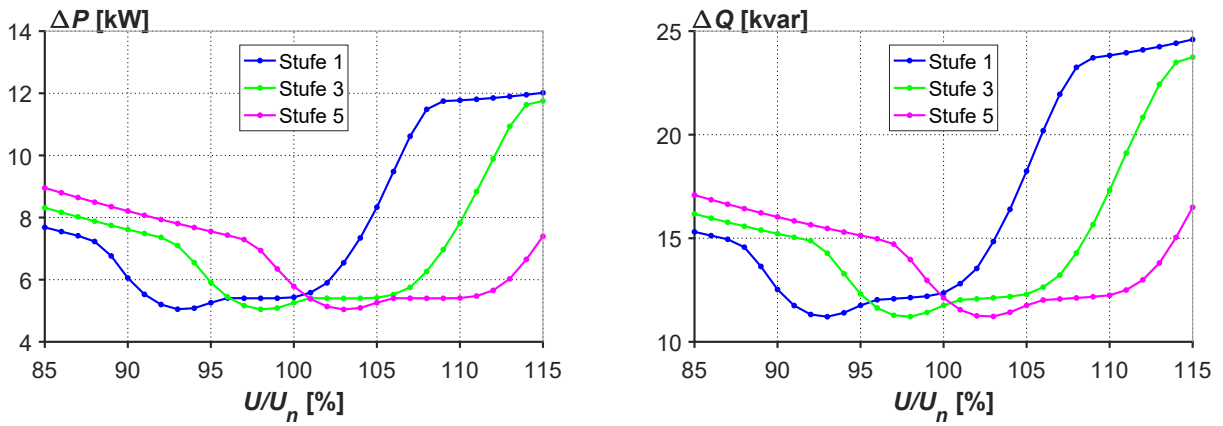


Abbildung 7.28: $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Urban

Kennlinie Niederspannungsnetz

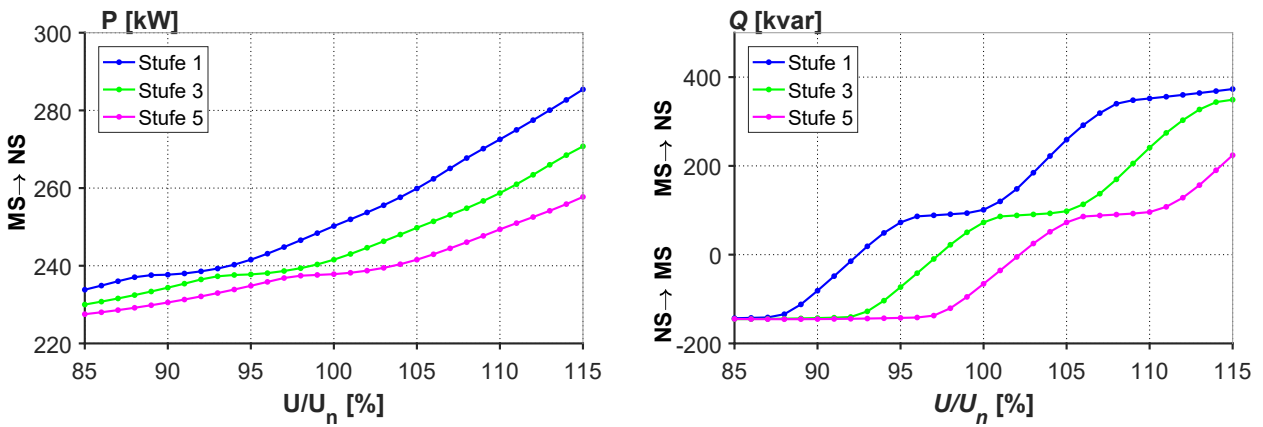


Abbildung 7.29: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Urban

$$L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$$

Lasten

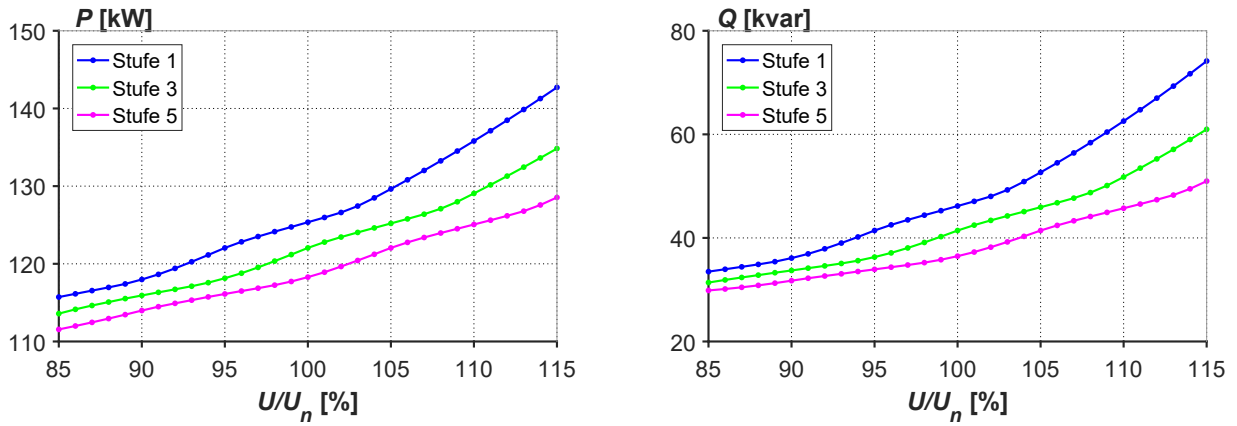


Abbildung 7.30: $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall $L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Urban

Verluste

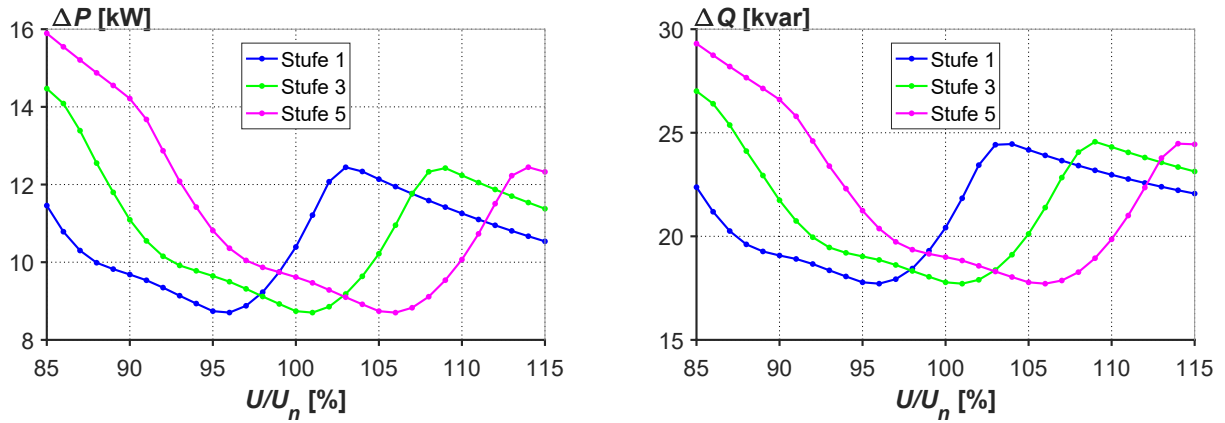


Abbildung 7.31: $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall $L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Urban

Kennlinie Niederspannungsnetz

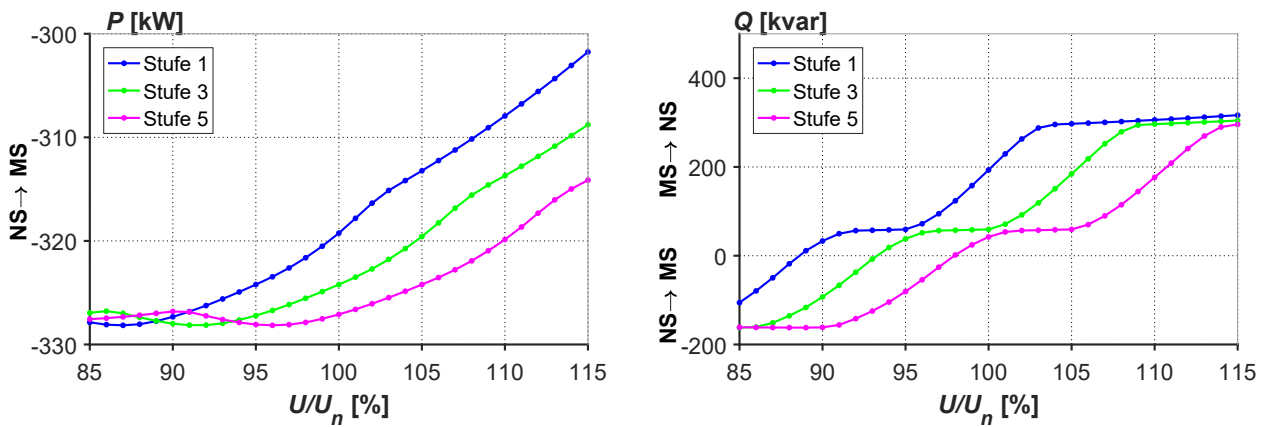


Abbildung 7.32: $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall $L^{min} / E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Urban

Literatur

- [1] EUROPEAN COMMISSION. *Ein Rahmen Für Die Klima- Und Energiepolitik Im Zeitraum 2020-2030*. 22. Jan. 2014. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0015&from=DE> (siehe S. 1).
- [2] Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen. *Photovoltaik Und Solarthermische Stromerzeugung*. Jan. 2018. URL: https://www.strom.ch/fileadmin/user_upload/Dokumente_Bilder_neu/010_Downloads/Basiswissen-Dokumente/13_PV_und_solarthermische_KW.pdf (siehe S. 1).
- [3] B. Burger. »Stromerzeugung in Deutschland Im Jahr 2017«. In: (2017) (siehe S. 1).
- [4] ÖVE/ÖNORM EN 50160: *Merkmale Der Spannung in Öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*. 2011 (siehe S. 1, 41).
- [5] A. Schwab. *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung Und Verteilung Elektrischer Energie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-92226-1 (siehe S. 4, 8).
- [6] H. Abst. *Verteil-Transformatoren Distribution-Transformers*. 2., neu bearb.Aufl. Berlin: VDE VERLAG GmbH, 7. März 2017. ISBN: 978-3-8007-4019-2 (siehe S. 5, 9, 10).
- [7] W. Hofmann, J. Schlabbach und W. Just. *Reactive Power Compensation: A Practical Guide*. 1. Auflage. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons, 10. Apr. 2012. ISBN: 978-0-470-97718-7 (siehe S. 7).
- [8] K. Heuck, K. Dettmann und D. Schulz. *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung Und Verteilung Elektrischer Energie Für Studium Und Praxis*. 9. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 19. Dez. 2013. ISBN: 978-3-8348-1699-3 (siehe S. 8).
- [9] R. Küchler. *Die Transformatoren: Grundlagen Für Ihre Berechnung Und Konstruktion*. Springer, 1956 (siehe S. 8, 10, 11).
- [10] Maschinenfabrik Reinhausen GmbH. *DEETAP DU Umsteller - Produktbeschreibung*. Apr. 2010 (siehe S. 9).
- [11] Albert Maier GmbH. *MAIER - Off Load Tap Changer Type Overview*. 12. Okt. 2016 (siehe S. 9).
- [12] Maschinenfabrik Reinhausen GmbH. *TD - Allgemeiner Teil Technische Daten TD 61*. 2013 (siehe S. 10, 11).
- [13] M. Sojer. »Voltage Regulating Distribution Transformers as New Grid Asset«. In: *Procedia Engineering* 202 (2017). ISSN: 18777058. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817342376> (besucht am 19.06.2018) (siehe S. 12, 21).
- [14] A. Sillaber. *Leitfaden Zur Verteilnetzplanung Und Systemgestaltung: Entwicklung Dezentraler Elektrizitätssysteme*. Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3-658-14712-9. URL: <http://www.springer.com/de/book/9783658147129> (besucht am 01.06.2018) (siehe S. 12, 21).
- [15] D. Oeding und B. Oswald. *Elektrische Kraftwerke Und Netze*. 8. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 13. Jan. 2017. ISBN: 978-3-662-52702-3 (siehe S. 17).

Literatur

- [16] A. Bokhari u. a. »Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads«. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 29.3 (Juni 2014). ISSN: 0885-8977 (siehe S. 19).
- [17] cigre Task Force C6.04. *Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*. CIGRÉ, 2014. ISBN: 978-2-85873-270-8 (siehe S. 19, 20).
- [18] B. Bletterie u. a. »Enhancement of the Network Hosting Capacity—Clearing Space for/with PV«. In: 6. Sep. 2010 (siehe S. 21, 22).
- [19] C. Dai. »Impact of Distributed Generation on Voltage Regulation by LTC Transformer«. In: (2014) (siehe S. 21).
- [20] E_CONTROL. *Technische Und Organisatorische Regeln Für Betreiber Und Benutzer von Netzen - D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen Mit Verteilernetzen*. 1. Juli 2016 (siehe S. 22).
- [21] F. Zhang u. a. »The Reactive Power Voltage Control Strategy of PV Systems in Low-Voltage String Lines«. In: *2017 IEEE Manchester PowerTech*. 2017 IEEE Manchester PowerTech. Juni 2017 (siehe S. 22).
- [22] O. Marggraf u. a. »U-Control - Analysis of Distributed and Automated Voltage Control in Current and Future Distribution Grids«. In: International ETG Congress 2017. Nov. 2017 (siehe S. 22).
- [23] Rauscher & Stoecklin AG. *Verteiltransformatoren Hermetik - Flüssigkeitsgefüllte Verteiltransformatoren*. März 2016. URL: www.raustoc.ch (siehe S. 23).
- [24] A. Ilo. »Effects of the Reactive Power Injection on the Grid—The Rise of the Volt/Var Interaction Chain«. In: *Smart Grid and Renewable Energy* (29. Juli 2016). URL: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=69319&#abstract> (siehe S. 66).

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vollständiges Ersatzschaltbild des Transformators	5
2.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Transformators für den Belastungszustand (Kurzschlussersatzschaltbild)	5
2.3	Zeigerdiagramm für den induktiven und kapazitiven Belastungsfall	6
2.4	Spannungsabfall am Transformator [7]	7
2.5	Rotierender Umsteller DEETAP®DU von Maschinenfabrik Reinhausen[10]	9
2.6	Linearer Umsteller MHM der Albert Maier GmbH[11]	9
2.7	Anzapf-Umsteller [12]	10
2.8	Einfach-Umsteller [12]	10
2.9	Doppel-Mittenumsteller [12]	11
2.10	Buck-and-Boost-Umsteller (Wender-Umsteller) [12]	11
2.11	Spannungsband unter Einhaltung von EN 50160 [13]	12
2.12	Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Leitung	12
3.1	Ersatzschaltbild des Verteiltransformators	15
3.2	π -Ersatzschaltbild der Leitung	16
3.3	Leistungsbezug in Abhängigkeit der Spannung für die 3 Lasttypen [15]	17
3.4	Niederspannungsnetze die im Modell verwendet werden: (a) Urban, (b) Ländlich	18
3.5	$P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie für eine Last im Niederspannungsnetz Urban und Ländlich bei P_{Last}^{max} : (a) $P(U)$, (b) $Q(U)$	19
3.6	Lastprofil eines Niederspannungsnetzes für verschiedene Gebiete [17]	20
3.7	Theoretischer Mittelspannungsabzweig	20
3.8	Empfohlene $Q(U)$ -Kennlinie aus [22]	22
4.1	Netzmodell für die Analyse der Wirkung des Verteiltransformators	23
4.2	(a) Veranschaulicht die 5 Stufen des Verteiltransformators im Modell; (b) zeigt den Vergleich von U_{NSS1} bei Umstellung auf Ober- und Unterspannungsseite des unbelasteten Transformators	24
4.3	U_{NSS1} bei verschiedenen Stufen des Verteiltransformators ohne Belastung: (a) überspannungsseitiger Umsteller, (b) unterspannungsseitiger Umsteller	25
4.4	Analyse der Spannungsabfälle durch die Belastungsfälle: (a) Spannungen an den Sammelschienen, Schematisches Zeigerdiagramm Stufe 3 für (b) Bezug und (c) Rückspeisung über den Transformator	27
4.5	Wirk- und Blindleistungsverluste des Transformators	28
4.6	U_{MSS2} jeweils für Freileitung und Kabel bei verschiedenen Belastungsfällen	29
4.7	Reduziertes Netz zur Untersuchung der Änderung des Leistungsflusses in das Mittelspannungsnetz ohne lokaler Blindleistungsregelung	30
4.8	Spannungsband des ersten Abzweigs für die beiden Belastungsfälle im Niederspannungsnetz Urban bei Stufe 3 des Umstellers	31
4.9	Vergleich des Leistungsflusses über den Transformator für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} \& P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsfluss, (b) Blindleistungsfluss	32

Abbildungsverzeichnis

4.10	Vergleich Leistungsbezug der Lasten für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} \& P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsbezug, (b) Blindleistungsbezug	33
4.11	Vergleich Verluste der Leitungen im Niederspannungsnetz für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} \& P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsverluste	33
4.12	Vergleich Leistungsverluste des Transformators für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} \& P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsverluste	34
4.13	Spannungsband des ersten Abzweigs für die beiden Belastungsfälle im Niederspannungsnetz Ländlich bei Stufe 3 des Umstellers	35
4.14	Vergleich des Leistungsflusses über den Transformator für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} \& P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsfluss, (b) Blindleistungsfluss	35
4.15	Vergleich Leistungsbezug der Lasten für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} \& P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsbezug, (b) Blindleistungsbezug	36
4.16	Vergleich Leistungsverluste der Leitungen im Niederspannungsnetz für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} \& P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsverluste	36
4.17	Vergleich Leistungsverluste des Transformators für P_{Last}^{max} und $P_{Last}^{max} \& P_{PV}^{max}$: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsverluste	36
4.18	Reduziertes Netz zur Untersuchung der Änderung des Leistungsflusses in das Mittelspannungsnetz mit lokaler Blindleistungsregelung	37
4.19	Spannungsband des ersten Abzweigs im Niederspannungsnetz Ländlich bei Stufe 3 des Umstellers mit und ohne $Q(U)$ -Regelung	37
4.20	Vergleich Leistungsfluss über den Transformator (auf der Seite des Mittelspannungsnetzes) mit und ohne $Q(U)$ -Regelung: (a) Wirkleistungsfluss, (b) Blindleistungsfluss	38
4.21	Vergleich der Last und der Verluste des Niederspannungsnetzes mit und ohne $Q(U)$ -Regelung über die Stufenstellung: (a) Wirkleistungsbezug, (b) Wirkleistungsverluste	39
4.22	Vergleich der Blindleistungslast und der Blindleistungsverluste des Niederspannungsnetzes mit und ohne $Q(U)$ -Regelung über die Stufenstellung: (a) Blindleistungsbezug, (b) Blindleistungsverluste	39
4.23	Theoretischer Mittelspannungsabzweig des erweiterten Mittelspannungsnetzes	40
4.24	Ermittelte Ausgangsstufenstellungen der Verteiltransformatoren am Freileitungsmittelspannungsabzweig	41
4.25	Spannung im Mittel- und Niederspannungsnetz bei $P_{Last}^{max} \cdot 0.5$ zur Einstellung der "optimalen Stufenstellung" (Ausgangsstufenstellung)	42
4.26	Spannung des MS-Abzweigs für die 4 Belastungsfälle bei der Ausgangsstufenstellung (+ Spannung auf der Unterspannungsseite des Verteiltransformators u_{NSSi})	42
4.27	Spannung des MS-Abzweigs: (a) L^{max}/E^0 und (b) L^{min}/E^{max} (+ Spannung auf der Unterspannungsseite des Verteiltransformators u_{NSSi}); Wirk- und Blindleistungsbezug der Niederspannungsnetze bei verschiedenen Stufenstellungen: (c)(e) L^{max}/E^0 und (d)(f) L^{min}/E^{max}	46
4.28	Spannung des MS-Abzweigs: (a) $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ und (b) $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ (+ Spannung auf der Unterspannungsseite des Verteiltransformators u_{NSSi}); Wirk- und Blindleistungsbezug der Niederspannungsnetze bei verschiedenen Stufenstellungen: (c)(e) $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ und (d)(f) $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$	47
4.29	Direkte und indirekte Wirkung der Stufenposition des Verteiltransformators auf die Spannung	48

Abbildungsverzeichnis

4.30	Spannung am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig für die Fälle L^{min}/E^{max} und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$	49
4.31	Spannung am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig und im Niederspannungsnetz 19 für die Fälle L^{min}/E^{max} und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ bei verschiedenen Stufenstellungen .	49
4.32	Spannung am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig und im Niederspannungsnetz 19 für die Fälle L^{max}/E^0 und $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei verschiedenen Stufenstellungen . .	50
4.33	Gesamten Verluste des Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz für die Belastungsfälle (NS-Leitungsverluste, NS-Transformatorverluste, MS-Leitungsverluste, MS-Transformatorverluste) bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz: (a) Wirkleistungsverluste und (b) Blindleistungsbedarf	51
4.34	(a) Anzahl der Spannungsbandverletzungen und (b) Spannungsverletzungsindex im Nieder- und Mittelspannungsnetz bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz	52
4.35	(a) Blindleistungsaustausch zwischen Hochspannungsnetz und Mittelspannungsnetz, (b) durchschnittliche Auslastung der Verteiltransformatoren bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz	53
4.36	Ermittelte Ausgangsstufenstellungen der Verteiltransformatoren am Kabel-Mittelspannungsabzweig	54
4.37	Spannung am Kabel-Mittelspannungsabzweig für die Fälle L^{min}/E^{max} und $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ bei verschiedenen Stufenstellungen	55
4.38	Spannung am Kabel-Mittelspannungsabzweig für die Fälle L^{max}/E^0 und $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei verschiedenen Stufenstellungen	56
4.39	Gesamten Verluste des Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz für die Belastungsfälle (NS-Leitungsverluste, NS-Transformatorverluste, MS-Leitungsverluste, MS-Transformatorverluste) bei einem Kabel-Mittelspannungsnetz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	57
4.40	(a) Anzahl der Spannungsbandverletzungen und (b) Spannungsverletzungsindex im Nieder- und Mittelspannungsnetz bei einem Kabel-Mittelspannungsnetz . . .	57
4.41	(a) Blindleistungsaustausch zwischen Hochspannungsnetz und Mittelspannungsnetz, (b) durchschnittliche Auslastung der Verteiltransformatoren bei einem Kabel-Mittelspannungsnetz	58
4.42	Theoretischer Mittelspannungsabzweig des erweiterten Mittelspannungsnetzes .	59
4.43	Netzaufbau zur Messung der $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie der Niederspannungsnetze ohne lokaler Blindleistungsregelung	59
4.44	(a) $P(U)$ - und (b) $Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Urban .	60
4.45	(a) $P(U)$ - und (b) $Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Ländlich	61
4.46	Netzaufbau zur Messung der $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie der Niederspannungsnetze mit lokaler Blindleistungsregelung	61
4.47	$Q(U)$ -Kennlinie des Niederspannungsnetzes Urban: (a) $L_{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$	62
4.48	$Q(U)$ -Kennlinie des Niederspannungsnetzes Ländlich: (a) $L_{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$	62
4.49	Änderung des Betrags der Blindleistung bei Änderung der Stufenstellung für das Niederspannungsnetz Urban: (a) $L_{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$	64
4.50	Änderung des Betrags der Blindleistung bei Änderung der Stufenstellung für das Niederspannungsnetz Ländlich: (a) $L_{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L_{min}/E_{Q(U)}^{max}$	64
4.51	Spannungsband im Mittelspannungsnetz bei Blindleistungsbezug der Netze NS 7-10 oder NS 16-19 am Freileitungs-Mittelspannungsabzweig	66
5.1	Verwendete Netzgrafik für den Vergleich der Wirkung geänderter Stufenstellungen	68

Abbildungsverzeichnis

5.2	Vergleich der Stufenstellungen: Ausgangsstufe, Stufe 3 und Stufe 5 für einen Freileitungs-Mittelspannungsabzweig in den angegebenen Belastungsfällen: (a) L^{max}/E^0 , (b) L^{min}/E^{max}	69
5.3	Vergleich der Stufenstellungen: Ausgangsstufe, Stufe 3 und Stufe 5 für einen Kabel-Mittelspannungsabzweig in den angegebenen Belastungsfällen: (a) L^{max}/E^0 , (b) L^{min}/E^{max}	70
5.4	Vergleich der Stufenstellungen: Ausgangsstufe, Stufe 3 und Stufe 5 für einen Freileitungs-Mittelspannungsabzweig in den angegebenen Belastungsfällen mit $Q(U)$ -Regelung: (a) $L^{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$	71
5.5	Vergleich der Stufenstellungen: Ausgangsstufe, Stufe 3 und Stufe 5 für einen Kabel-Mittelspannungsabzweig in den angegebenen Belastungsfällen mit $Q(U)$ -Regelung: (a) $L^{max}/E_{Q(U)}^0$, (b) $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$	73
7.1	Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall L^{max}/E^0 bei Freileitungs-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	78
7.2	Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall L^{min}/E^{max} bei Freileitungs-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	78
7.3	Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei Freileitungs-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	79
7.4	Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ bei Freileitungs-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	79
7.5	Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall L^{max}/E^0 bei Kabel-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	79
7.6	Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall L^{min}/E^{max} bei Kabel-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	80
7.7	Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ bei Kabel-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	80
7.8	Verluste der Netzelemente für den Belastungsfall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ bei Kabel-MS-Netz: (a) Wirkleistungsverluste, (b) Blindleistungsbedarf	80
7.9	$P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall L^{max}/E^0 im NS-Netz Ländlich	81
7.10	$\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{max}/E^0 im NS-Netz Ländlich	81
7.11	$P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall L^{max}/E^0 im NS-Netz Ländlich	81
7.12	$P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Ländlich	82
7.13	$\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Ländlich	82
7.14	$P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Ländlich	82
7.15	$P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Ländlich	83
7.16	$\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Ländlich	83
7.17	$P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Ländlich	83
7.18	$P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Ländlich	84
7.19	$\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Ländlich	84
7.20	$P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Ländlich	84
7.21	$P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall L^{max}/E^0 im NS-Netz Urban	85
7.22	$\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{max}/E^0 im NS-Netz Urban	85
7.23	$P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall L^{max}/E^0 im NS-Netz Urban	85

Abbildungsverzeichnis

7.24 $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Urban	86
7.25 $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Urban	86
7.26 $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall L^{min}/E^{max} im NS-Netz Urban	86
7.27 $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Urban	87
7.28 $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Urban	87
7.29 $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall $L^{max}/E_{Q(U)}^0$ im NS-Netz Urban	87
7.30 $P(U)$, $Q(U)$ der Lasten für den Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Urban	88
7.31 $\Delta P(U)$ - und $\Delta Q(U)$ -Kennlinie für den Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Urban	88
7.32 $P(U)$ - und $Q(U)$ -Kennlinie des NS-Netzes für den Fall $L^{min}/E_{Q(U)}^{max}$ im NS-Netz Urban	88

Tabellenverzeichnis

3.1	ZIP-Koeffizienten der Lasten in den Niederspannungsnetzen des Modells	19
3.2	Daten der Freileitungen und Kabel im Mittelspannungsabzweig	21
4.1	Belastungsfälle für das vereinfachte Ersatznetz	25
4.2	U_{NSS1} und U_{MSS2} für verschiedene Stufenstellungen und Belastungsfälle	27
4.3	Belastungsfälle zur Untersuchung des erweiterten Niederspannungsnetzes	30
4.4	Differenz der Leistungsflüsse in den beiden Belastungsfällen	32
4.5	Differenz der Leistungsflüsse in den beiden Belastungsfällen	35
4.6	Wirkleistungsbezug und Wirkleistungsverluste ohne $Q(U)$ -Regelung	38
4.7	Belastungsfälle für die Untersuchung der Auswirkung der Stufenstellungsänderung auf das Mittelspannungsnetz	40
4.8	Stufenstellung des HS-/MS-Transformators bei den verschiedenen Belastungsfällen und Stufenstellungen des Verteiltransformators	45
4.9	Spannungsverletzungs-Index bei einem Freileitungs-Mittelspannungsnetz	52
4.10	Stufenstellung des HS-/MS-Transformators bei den verschiedenen Belastungsfällen und Stufenstellungen des Verteiltransformators	56
7.1	Netzdaten Niederspannungsnetze	77
7.2	Lastdaten der Niederspannungsnetze	77
7.3	Transformatoraten für Niederspannungsnetze Ländlich und Urban	77
7.4	Daten der Leitungen im reduzierten Netz	77
7.5	Transformatoraten für das Mittelspannungsnetz	77
7.6	Daten der Leitungen im Mittelspannungsnetz	78

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct – Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis (in der aktuellen Fassung des jeweiligen Mitteilungsblattes der TU Wien), insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

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

Wien im September 2018

Lukas Kloibhofer, BSc