



Christoph Schred, BSc

Blindleistungsoptimierung an der Übergabestelle ÜNB/VNB

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner

Dipl.-Ing. Stefan Polster, BSc

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Graz, November 2018

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Professor Renner für die Vergabe dieser Arbeit und für die hervorragende Betreuung, die ich beim Verfassen dieser Arbeit erhalten habe, bedanken.

Weiters möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Stefan Polster für seine Unterstützung während des Verfassens dieser Arbeit bedanken.

Der Dynamobauzeichensaal war ein wichtiger Bestandteil meines Studiums. Sei es Lernen oder Freizeitgestaltung, ich habe hier unzählige schöne Momente erlebt. Daher möchte ich meinen Kollegen des Dynamobauzeichensaales für die unvergessliche Zeit danken.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Freundin bedanken, die mich während meines Studiums immer wieder ermutigt und unterstützt hat.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, ohne die ich dieses Studium nicht absolvieren hätte können.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein 110-kV-Verteilnetz im Hinblick auf die Blindleistungsübergabe in das Übertragungsnetz untersucht. Dazu wurde analysiert in welchen Umspannwerken eine kritische Blindleistungsübergabe stattfindet.

In weiterer Folge wurden Möglichkeiten ausgearbeitet, mit denen die Blindleistungsübergabe der kritischen Umspannwerke gezielt beeinflusst werden kann. Anschließend wurden die ausgewählten Möglichkeiten in mehreren Lastflussszenarien auf ihr Potential zur Beeinflussung der Blindleistungsübergabe untersucht. Besonders die Frage, ob eine Beeinflussung der Blindleistungsübergabe durch dezentral einspeisende, erneuerbare Energien, wie Windkraftanlagen oder Wasserkraftwerke möglich ist, ist von Interesse, da sich die momentane energiewirtschaftliche Entwicklung in diese Richtung bewegt. Über das Verteilnetz speist auch ein leistungsstarkes thermisches Kraftwerk ein. Da aufgrund der hohen installierten Leistung auch viel Potential zur Blindleistungsbeeinflussung der Umspannwerke vorhanden ist, wurde diese Möglichkeit untersucht.

Es besteht die Möglichkeit das betrachtete Verteilnetz in drei getrennten Teilnetzen zu betreiben. Da diese Methode vom Netzbetreiber in Erwägung gezogen wird, wurde auch ein Ausblick auf dieses Szenario in Bezug auf die Blindleistungsübergabe der kritischen Umspannwerke und die Möglichkeiten zur Beeinflussung dieser gegeben.

Es konnte gezeigt werden, dass Kompensationsdrosseln an den Tertiärwicklungen der Transformatoren, die das Verteilnetz mit dem Übertragungsnetz verbinden, einen relevanten Einfluss auf den gemessenen Blindleistungsaustausch haben, wobei sich die Blindleistungsbilanz des Netzes nicht ändert. Auch die Stufen dieser Transformatoren haben hierbei einen Einfluss, da diese Transformatoren im Schrägregelbetrieb arbeiten.

Eine Beeinflussung der Blindleistungsübergabe der kritischen Umspannwerke durch dezentral einspeisenden Kraftwerke ist nur möglich, wenn mehrere Kraftwerke gleichzeitig ihre Einspeiseblindleistung ändern, da der Einfluss eines einzelnen Kraftwerkes zu gering wäre. Zusätzliche Kompensationsdrosseln im betrachteten Verteilnetz können den Blindleistungsaustausch mit dem Übertragungsnetz unabhängig von der Netzlast und der Einspeisesituation beeinflussen, müssen aber möglichst nahe an den kritischen Umspannwerken sein um darauf einen großen Einfluss zu haben.

Durch den Betrieb von drei Teilnetzen wird an den kritischen Umspannwerken weniger Blindleistung in das Übertragungsnetz eingespeist. Die vorgestellten Maßnahmen haben durch den Teilnetzbetrieb einen größeren Einfluss auf die kritischen Umspannwerke, sofern sie in dieses Teilnetz einspeisen.

Mit dem leistungsstarken thermischen Kraftwerk lässt sich der Blindleistungsaustausch der kritischen Umspannwerke beeinflussen, da das Kraftwerk nur unregelmäßig einspeist ist eine dauerhafte Beeinflussung nicht möglich.

Abstract

In this master's thesis a 110-kV-distribution-grid is analysed and the focus is set on the reactive power exchange to the transmission-grid. Therefore, an analysis is made which identifies the critical transformer stations.

Furthermore, methods to purposefully influence the reactive power exchange at the critical transformer stations are discussed. The potential of each method is shown by evaluation of several load flow scenarios. Especially decentralized, renewable energies like wind parks and hydro power plants are of interest, because the focus of the energy economic-trends develops there. A powerful thermal power plant is connected to the distribution-grid as well. Due this high power, the potential to influence the reactive power exchange of the transformer stations with the operational settings of this power plant is quite high. Therefore, this scenario is investigated further.

The considered distribution-grid can be operated with three separated sub-grids. An outlook regarding the application of the discussed methods to influence the reactive power exchange is given for the operation with separated sub-grids, because the distribution grid operator contemplates this kind of operation.

It is shown that compensation inductors on the tertiary winding of the transformers between the distribution-grid and the transmission-grid influence the measured reactive power exchange. However, the reactive power balance of the distribution grid does depend on the operation of these compensation inductors. These transformers are operating with a diagonally ruling control, so the taps take an influence on the reactive power exchange as well.

The reactive power exchange at the critical transformer stations is only influenced by decentralized power plants in a meaningful amount if several power plants change their reactive power supply at the same time.

Additional compensation inductors in the distribution-grid influence the reactive power exchange independent of the load and the situation of supply. To have a major influence on the critical transformer station, they had to be electrically as close as possible to this station.

The reactive power exchange of the most critical transformer stations decreases, if the distribution grid is operation with three separated sub-grids. The potential of the discussed methods to influence the reactive power exchange increases if they are applied in the sub-grid corresponding to the critical transformer station.

The high power thermal plant can be used to influence the reactive power exchange of the critical transformer stations. However, due the unregularly operation of the power plant, no permanent influence on the reactive power exchange is possible.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
Einleitung	10
1 Grundlagen.....	12
1.1 Netztopologie	12
1.2 Blindleistungsbilanz des Netzes	13
1.2.1 Freileitungen und Kabel	13
1.2.2 Transformatoren	15
1.2.3 Blindleistungserzeugung durch Synchronmaschinen.....	17
1.2.4 Blindleistungserzeugung durch Umrichter	18
1.2.5 Blindleistungserzeugung durch doppelt gespeiste Asynchronmaschinen	19
1.2.6 Kompensationsanlagen.....	20
1.2.7 Verbraucherlasten	20
1.3 Spannungsänderung in einem Knoten durch Änderung der Blindleistung.....	20
2 Analyse der Blindleistungsübergabe den Übergabestellen	21
2.1 Grenzwerte des Blindleistungsaustausches der Umspannwerke.....	21
2.1.1 Verordnung der Europäischen Kommission zur Festlegung eines Netzkodex für den Lastanschluss (Demand Connection Code, DCC).....	21
2.1.2 Grenzwerte für österreichische Verteilnetze	21
2.2 Abschätzung der Blindleistungserzeugung durch das Netz	23
2.3 Gemessene Blindleistung im Umspannwerk A	24
2.4 Gemessene Blindleistung im Umspannwerk B	25
2.5 Blindleistungsjahresganglinie des Umspannwerkes B.....	27
2.6 Einflüsse auf das Umspannwerk B.....	28
2.7 Grundsätzliche Beeinflussungsmöglichkeiten durch Kraftwerke	30
3 Berechnungen mit Neplan.....	33
3.1 Modellanpassungen.....	33
3.1.1 Wasserkraftwerke.....	33

3.1.2	Transformatoren	33
3.1.3	Mittelspannungsnetze.....	34
3.1.4	Dezentrale Einspeisungen	35
3.2	Grundlagen zur Bewertung der vorgestellten Methoden	35
3.3	Möglichkeiten um die Übergabeblindleistungen an den Umspannwerken zu beeinflussen.....	36
3.4	Szenario 1: Schwachlast mit hoher Einspeisung durch Wasserkraft	38
3.4.1	Variante A: Keine Sammelschientrennung	38
3.4.2	Variante B: Sammelschientrennung	42
3.4.3	Blindleistungsreduktion von mehreren Kraftwerken	44
3.4.4	Erkenntnisse für weitere Berechnungen	45
3.5	Szenario 2: Maximale Blindleistungsrückspeisung des Umspannwerkes B	46
3.6	Szenario 3: Hohe Blindleistungsrückspeisung des Umspannwerkes B ohne Betrieb einer Kompensationsdrossel	48
3.7	Einfluss der vorhandenen Kompensationsdrosseln.....	51
3.7.1	Umspannwerk A	51
3.7.2	Umspannwerk B	52
3.8	Einfluss des GuD-Kraftwerkes.....	54
3.8.1	Beeinflussung des Blindleistungsaustausches	54
3.8.2	Auswirkungen des Betriebes auf andere Maßnahmen zur Beeinflussung des Blindleistungsaustausches.....	54
3.9	Ausblick auf den Netzbetrieb mit 3 Teilnetzen	56
3.9.1	Lastflussszenario	57
3.9.2	Änderungen durch den Betrieb mit 3 Teilnetzen	60
3.10	Einfluss der 380-kV-Leitung auf den Blindleistungsaustausch.....	61
4	Zusammenfassung.....	63
5	Literaturverzeichnis	65

Abkürzungsverzeichnis

DASM	Doppelt gespeiste Asynchronmaschine
EZS	Erzeugerzählpeilsystem
FHKW	Fernheizkraftwerk
GuD-KW	Gas- und Dampfkraftwerk
MS	Mittelspannung
RHU	Regelhauptumspanner
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
UW	Umspannwerk
WKW	Wasserkraftwerk
WP	Windpark
VNB	Verteilnetzbetreiber
VZS	Verbraucherzählpeilsystem
ΔP_{UW}	Wirkleistungsänderung eines Umspannwerkes
ΔQ	Blindleistungsänderung an einem Netzknoten
ΔQ_{KW}	Änderung der eingespeisten Blindleistung eines Kraftwerkes
ΔQ_{Netz}	Änderung des Blindleistungsbedarfes des Netzes
ΔQ_{TR}	Änderung des Blindleistungsbedarfes eines Transformators
ΔQ_{UW}	Änderung des Blindleistungsaustausches eines Umspannwerkes
ΔU	Spannungsänderung
ΔU_{max}	Maximale Spannungsänderung
ϑ	Polradwinkel der Synchronmaschine
φ	Phasenwinkel
ω	Winkelfrequenz
C	Kapazität
C'	Kapazitätsbelag
$\cos(\varphi)$	Leistungsfaktor
d	Relative Spannungsänderung
f	Frequenz
l	Leitungslänge
I_{μ}	Magnetisierungsstrom des Transformators
I_0	Leerlaufstrom des Transformators

I_{FE}	Wirkkomponente des Leerlaufstromes (Verursacht durch die Eisenverluste)
I_N	Nennstrom
L	Induktivität
P	Transportierte Leistung
P_L	Last mit der in Neplan die Berechnungen durchgeführt werden
$P_{L \text{ Gen MS}}$	In der Mittelspannung eingespeiste Leistung
P_{Last}	Wirkleistung einer Last
P_{NR}	Summe der Wirkleistungslasten in einer Netzregion
P_{n-1}	Summe der Transformatorwirkleistungen eines Umspannwerkes bei (n-1)-Sicherheit
Q	Blindleistung
Q'	Blindleistungsbelag (MVar/km)
Q_{μ}	Magnetisierungsblindleistung
Q_{Kabel}	Blindleistung, die durch ein Kabel/Freileitung erzeugt wird
$Q_{Kabel \text{ UW}}$	Summe der durch Leitungskapazitäten erzeugten Blindleistungen eines Umspannwerkes
Q_{Last}	induktiver Blindleistungsbedarf einer Last
$Q_{Last \text{ ges}}$	Blindleistung einer Last ($Q_{Last} + Q_{Kabel}$)
Q_L	Längsblindleistung (= durch Leitungsinduktivitäten verursachter Blindleistungsbedarf)
$Q_{Leitung}$	Blindleistungsbedarf einer Leitung (Freileitung oder Kabel)
Q_{NR}	Summe der durch Leitungskapazitäten erzeugten Blindleistungen in einer Netzregion
Q_Q	Querblindleistung (=durch Leitungskapazitäten erzeugt Blindleistung)
Q_T	Längsblindleistungsbedarf des Transformators
q_{UW}	Wirkungsfaktor eines Kraftwerkes auf ein Umspannwerk
S_N	Nennscheinleistung
S_{n-1}	Summe der Transformatorscheinleistungen eines Umspannwerkes bei (n-1)-Sicherheit
S_K	Kurzschlussleistung
U	Allg. Spannung
U_1	Spannung die an den Klemmen eines Transformators anliegt
u_x	Relative Kurzschlussspannung
X_T	Längsreaktanz des Transformators

Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein 110-kV-Netz in Hinblick auf den Blindleistungsaustausch mit dem österreichischen Übertragungsnetz betrachtet.

Da in der vergangenen Zeit vor allem Mittelspannungsnetze einen größer werdenden Verkabelungsgrad aufweisen, wird durch die Kabel immer mehr Blindleistung generiert. Zusätzlich zu diesem Effekt werden aufgrund der Energiewende immer mehr dezentral einspeisende Anlagen, welche oft mit teilweise langen Kabeln mit dem Netz verbunden sind, errichtet und zentrale, leistungsstarke Kraftwerke ersetzt oder seltener genutzt.

Das führt zu einer neuen Problematik in Bezug auf den Blindleistungsaustausch mit dem Übertragungsnetz. Ziel dieser Arbeit ist es, die Ursachen für hohe Blindleistungsübergaben an den Umspannwerken darzustellen und mögliche Einflüsse auf diese Blindleistungsübergaben zu diskutieren. Vor allem die Beeinflussung durch dezentrale Einspeiser, wie Windkraftanlagen und Wasserkraftwerke ist hierbei von Interesse, da sich der Trend hin zu erneuerbaren Energieträgern verstärken wird.

Im ersten Schritt ist die Blindleistungserzeugung durch das 110-kV-Netz berechnet und die Blindleistungserzeugung durch die untergeordneten Mittelspannungsnetze (Freileitungen und Kabel) abgeschätzt worden.

In weiterer Folge sind an den betrachteten Übergabestellen im Südnetz (Umspannwerk A und Umspannwerk B), auf denen der Fokus dieser Arbeit liegt, die Blindleistungsübergaben analysiert und mit den Grenzwerten verglichen worden. Die Grenzwerte sind im Demand Connection Code (DCC), dessen nationale Fassung aktuell verhandelt wird, festgelegt. In weiterer Folge wurden Abhängigkeiten der Blindleistungsübergaben der Umspannwerke eruiert und untersucht.

Die in dieser Arbeit untersuchten Möglichkeiten um die Blindleistungsübergabe einzelner Umspannwerke zu beeinflussen sind:

- Schaltung der vorhandenen Kompensationsdrosseln an der Tertiärseite der Regelhauptumspanner, die das 110-kV-Netz mit dem Übertragungsnetz verbinden
- Zusätzliche Kompensationsdrosseln: Hierbei wurden Kriterien für den Standort der Drosseln definiert und anschließend ein Standort ermittelt, welcher die größte Wirkung auf die kritische Übergabestelle aufweist
- Untererregung von Generatoren: In den Netzregionen, die eine hohe Blindleistungsrückspeisung aufweisen wurden Auswirkungen von Erregungsänderungen der Generatoren auf die kritischen Übergabestellen berechnet
- Einfluss durch die Transformatorstufen der Regelhauptumspanner

Abschließend sind die Auswirkungen eines möglichen Betriebes mit drei Teilnetzen dargestellt sowie der Einfluss eines leistungsstarken GuD-Kraftwerkes und der 380-kV-Freileitung der Austrian Power Grid (APG).

Für diese Arbeit wurden folgende Konventionen getroffen:

- Es sind ausschließlich stationäre Lastflüsse berechnet. Über dynamische Vorgänge wurden daher keine Aussagen getroffen.
- Es wurde das Erzeugerpeilsystem (EZS) verwendet. Wirk- und Blindleistungen, die erzeugt bzw. in das Verteilnetz importiert werden, haben ein positives Vorzeichen. Wirk- und Blindleistungen, die in das Übertragungsnetz exportiert werden, haben ein negatives Vorzeichen.
- Die Entfernung eines Kraftwerkes zu einem Umspannwerk bezieht sich stets auf die Leitungslängen zu diesem Umspannwerk.
- Auf Wunsch des Verteilnetzbetreibers wurde diese Arbeit anonymisiert dargestellt. Umspannwerke und Kraftwerke sind mit je einer Nummer oder einem Buchstaben gekennzeichnet (UW A, KW 1, usw.).

1 Grundlagen

1.1 Netztopologie

Das betrachtete 110-kV-Netz wird als vermaschtes Netz betrieben, kann jedoch (an zwei Stellen) in ein Nord- und ein Südnetz getrennt werden. Diese Trennung wird jedoch nur selten durchgeführt um Auswirkungen von möglichen Störungen, zum Beispiel bei Gewittern, zu minimieren.

Das Südnetz kann an mehreren Stellen weiter in ein Ost- und ein Westnetz getrennt werden. Diese Trennung wird aktuell noch nicht durchgeführt, jedoch zukünftig in Erwägung gezogen. Wenn das Netz mit mehreren Teilnetzen betrieben wird, sind die Teilnetze dennoch vermascht und jedes dieser Teilnetze verfügt über mindestens eine Anbindung an das Übertragungsnetz.

Wenn sowohl das ein leistungsstarkes GuD-Kraftwerk, als auch ein anderes thermisches Kraftwerk gleichzeitig in Betrieb sind kann es, abhängig von der Kurzschlussleistung, vorkommen, dass an manchen Umspannwerken eine Sammelschienentrennung zur Begrenzung des Kurzschlussstromes vollzogen wird.

Bei den Umspannwerken im Südnetz, die das 110-kV-Netz mit dem Übertragungsnetz verbinden, ist an jedem Umspanner über eine Tertiärwicklung eine Kompensationsdrossel vorhanden. Die Umspanner arbeiten zumeist im Schrägregelbetrieb. Bei Bedarf kann für niedrige Stufen auch auf eine Längsregelung umgeschaltet werden. Sowohl der Betrieb der Kompensationsdrosseln, als auch die Steuerung der Transformatorstufen erfolgt durch den Übertragungsnetzbetreiber.

Die Einspeisung von leistungsstarken Wasserkraftwerken erfolgt über Maschinentransformatoren in das Hochspannungsnetz, leistungsschwächere Wasserkraftwerke speisen in ein Mittelspannungsnetz ein. Windparks speisen ausschließlich in die Mittelspannung ein.

1.2 Blindleistungsbilanz des Netzes

1.2.1 Freileitungen und Kabel

Freileitungen, Kabel und Transformatoren haben einen Einfluss auf die Blindleistungsbilanz des Netzes, auf die folgend näher eingegangen wird.

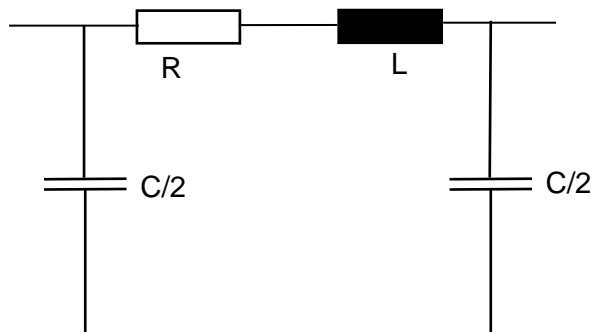


Abbildung 1: Verwendetes Ersatzschaltbild einer Leitung

Anhand des Ersatzschaltbildes einer Leitung ist ersichtlich, dass eine Leitung sowohl kapazitive- als auch induktive Anteile hat. Für die Berechnung der Blindleistungsaufnahme der Leitung wurde zur Vereinfachung angenommen, dass am Anfang und am Ende der Leitung die gleiche Spannung anliegt. Die Blindleistungsaufnahme kann durch die folgende Formel beschrieben werden: [1]

$$Q_{\text{Leitung}} = Q_C - Q_L = \omega \cdot C \cdot U^2 - 3 \cdot \omega \cdot L \cdot I^2 \quad (1)$$

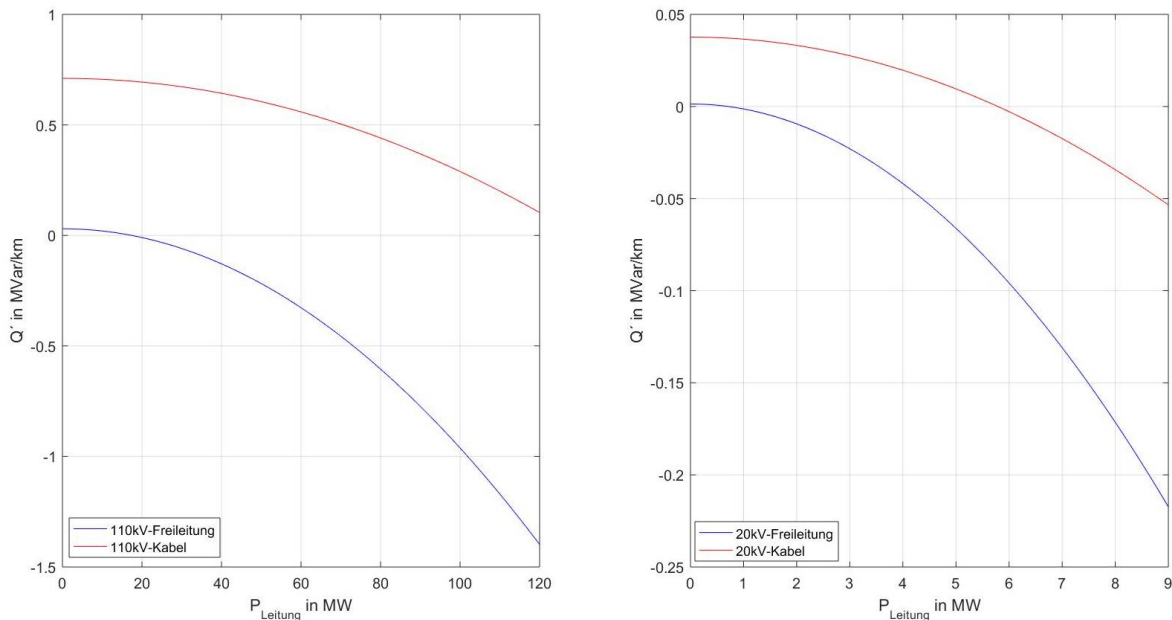


Abbildung 2: Blindleistungsbedarf von Leitungen

Leitungsart	Typ	X'	C'
-	-	m Ω /km	nF/km
110-kV-Freileitung	E-AI/St III 560/50	0,4	7,9
110-kV-Kabel	E-2XHCJA2Y 800	0,17	187
20-kV-Freileitung	E-ALMGSI 95	0,36	10,8
20kV-Kabel	E-A2XHC2Y 1/240 RM/25	0,15	300

Tabelle 1: Verwendete Leitungsparameter zur Berechnung des Blindleistungsbedarfes von Leitungen

In Abbildung 2 ist der Verlauf des Blindleistungsbedarfes von Freileitungen und Kabeln für 110 kV und für 20 kV dargestellt. Die Berechnungsparameter sind in Tabelle 1 angeführt. Es ist ersichtlich, dass sich Freileitungen abhängig von der transportierten Leistung sowohl induktiv als auch kapazitiv verhalten können. Der Betriebspunkt in dem die Freileitung eine ausgeglichene Blindleistungsbilanz aufweist, wird als natürliche Leistung bezeichnet. Bei kleineren Leistungen als der natürlichen Leistung verhält sich die Freileitungen kapazitiv, bei größeren Leistungen induktiv. Bei Kabeln liegt die natürliche Leistung außerhalb des Betriebsbereiches, daher verhalten sich Kabel immer kapazitiv. Aus Formel (1) kann weiters entnommen werden, dass die Blindleistungserzeugung einer Leitung quadratisch von der Betriebsspannung abhängt.

1.2.2 Transformatoren

Bei der Betrachtung des Blindleistungsbedarfes von Transformatoren wurde zwischen der Magnetisierungsblindleistung (Querblindleistung) und der Längsblindleistung unterschieden.

Magnetisierungsblindleistung

Bei großen Transformatoren beträgt der Leerlaufstrom weniger als 1% des Nennstromes. Der Leerlaufstrom teilt sich in einen Magnetisierungsstrom (Blindkomponente) und einen Strom, der durch die Eisenverluste verursacht wird (Wirkkomponente) auf, wobei der Magnetisierungsstrom den überwiegenden Anteil des Leerlaufstromes ausmacht, wie in den Zeigerdiagramm in Abbildung 3 dargestellt.[2]

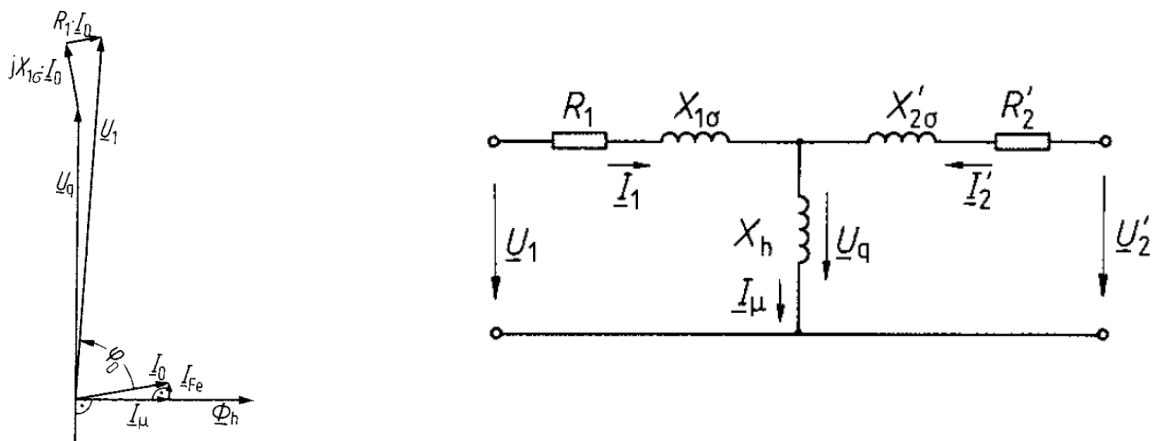


Abbildung 3: Zeigerdiagramm des leerlaufenden Transformators und Ersatzschaltbild des Transformators [2]

Aus Abbildung 3 kann weiters entnommen werden, dass die angelegte Spannung U_1 und der Magnetisierungsstrom einen Winkel von annähernd 90° einschließen. Die Magnetisierungsblindleistung eines Transformators kann durch folgende Formel angegeben werden:

$$Q_\mu = -\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_\mu \quad (2)$$

mit $I_\mu \approx 0,01 \cdot I_N$ bei Nennspannung ergibt sich:

$$Q_\mu \approx -\frac{U_1}{U_N} \cdot 0,01 \cdot S_N \quad (3)$$

Es ist zu erkennen, dass die Magnetisierungsblindleistung von Transformatoren, zusätzlich zu den Bemessungsgrößen, von der angelegten Spannung abhängig ist.

Längsblindleistung

Die Längsblindleistung von Transformatoren kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$Q_T = -3 \cdot I^2 \cdot X_T \quad (4)$$

mit $I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi)}$ und $X_T = \frac{U_N^2}{S_N} \cdot u_x$ ergibt sich:

$$Q_T = -\frac{S^2}{S_N} \cdot \left(\frac{U_N}{U}\right)^2 \cdot u_x \quad (5)$$

Aus Formel (5) ist ersichtlich, dass die Längsblindleistung von Transformatoren zusätzlich zu den Bemessungsgrößen S_N , u_x , U_N auch noch von der transportierten Scheinleistung S (Belastung) und von der Netzspannung U abhängig ist.

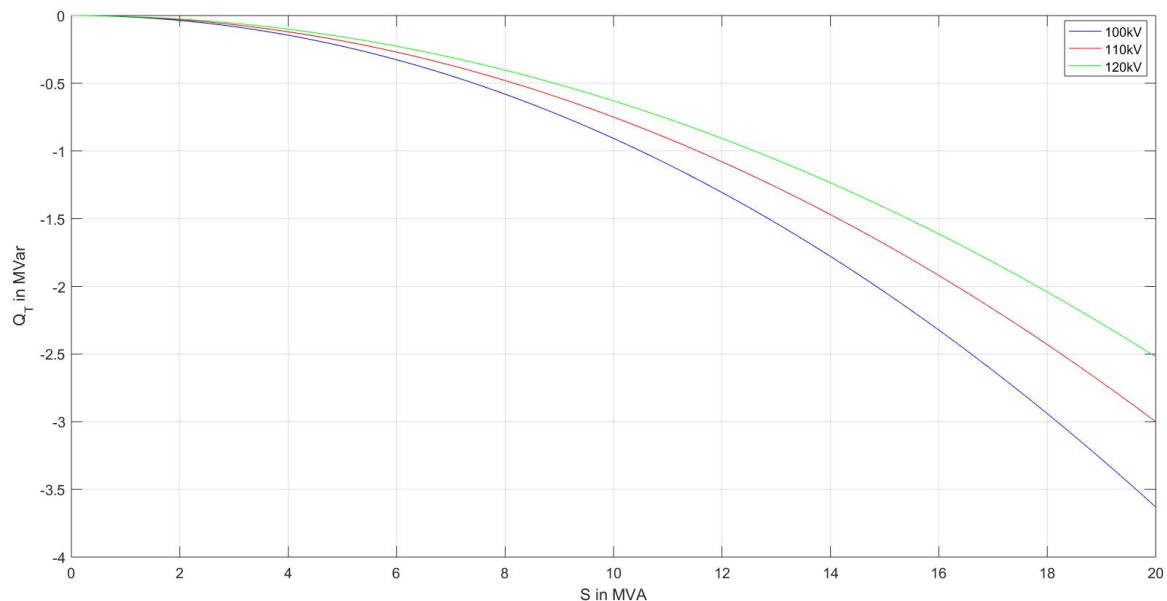


Abbildung 4: Längsblindleistungsbedarf eines Transformators als Funktion der übertragenen Leistung und verschiedenen Spannungen

Abbildung 4 zeigt den Längsblindleistungsbedarf eines 20-MVA-Transformators mit einem u_x von 0,15 als Funktion der übertragenen Scheinleistung bei verschiedenen Spannungen. Der Längsblindleistungsbedarf eines Transformators ist laut Formel (5) proportional zum Quadrat der übertragenen Scheinleistung.

1.2.3 Blindleistungserzeugung durch Synchronmaschinen

Synchronmaschinen können, abhängig von der Erregung, Blindleistung abgeben oder aufnehmen. Dadurch besteht Potential um die Blindleistungsbilanz des Netzes über eine geeignete Variation der Erregung zu beeinflussen.

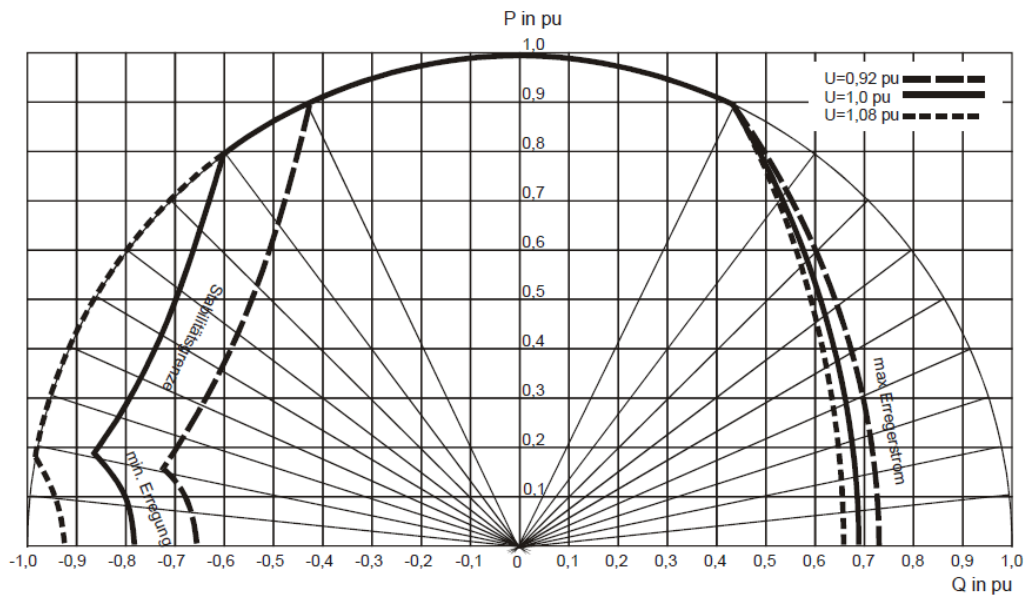


Abbildung 5: Betriebsbereich einer Synchronmaschine [3]

Aus dem Betriebsbereich der Synchronmaschine ist zu erkennen, dass für übererregte Zustände der maximale Erregerstrom den Grenzwert der Blindleistungseinspeisung bildet. Für den untererregten Betrieb bildet die Stabilitätsgrenze eine Begrenzung. Die Stabilitätsgrenze ergibt sich aus der Forderung $\vartheta < 90^\circ$, um auch auf Stoßbelastungen reagieren zu können muss der maximale Polradwinkel kleiner als 90° gewählt werden. Somit ergibt sich die in Abbildung 5 eingezeichnete Stabilitätsgrenze. Im Zuge dieser Arbeit sind Szenarien vorgestellt, in denen Synchronmaschinen von einem übererregten in einen untererregten Zustand gesetzt wurden. Um ausreichend Sicherheitsabstand zur Stabilitätsgrenze zu gewährleisten wird ein Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) \geq 0,95$ für den untererregten Betrieb gewählt. [2]

1.2.4 Blindleistungserzeugung durch Umrichter

Windkraftanlagen speisen teilweise über Umrichter in das Netz ein, deshalb wird auf die Möglichkeit zur Beeinflussung der Blindleistung durch Umrichter eingegangen.

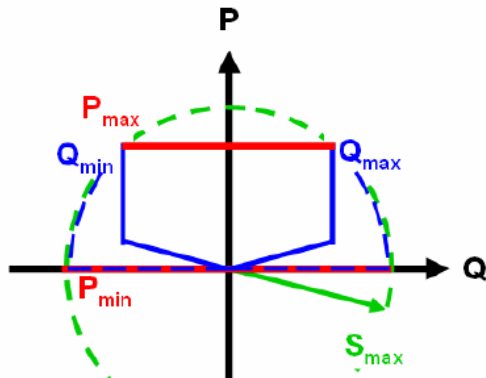


Abbildung 6: Betriebsbereich von Umrichtern [4]

In Abbildung 6 ist der Betriebsbereich von Umrichtern dargestellt. Die eingezeichneten Betriebsgrenzen der Umrichter sind durch die maximal übertragbare Wirkleistung (rot), der Blindleistung (blau) und der maximalen Scheinleistung (grün) gegeben. Je nach Design des Umrichters können diese auch Blindleistung einspeisen, wenn keine Wirkleistung eingespeist wird (blau-strichlierter Verlauf). [4]

Für eine Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit dem Übertragungsnetz bedeutet das, dass Umrichter bereits bei geringer Erzeugung die maximal mögliche Blindleistung einspeisen bzw. aufnehmen können. Bei Verwendung geeigneter Umrichter kann auch wenn keine Wirkleistung ausgetauscht wird, Blindleistung aufgenommen oder abgegeben werden.

1.2.5 Blindleistungserzeugung durch doppelt gespeiste Asynchronmaschinen

Doppelt gespeiste Asynchronmaschinen werden zur Energieerzeugung in Windkraftanlagen neben Umrichtern verwendet.

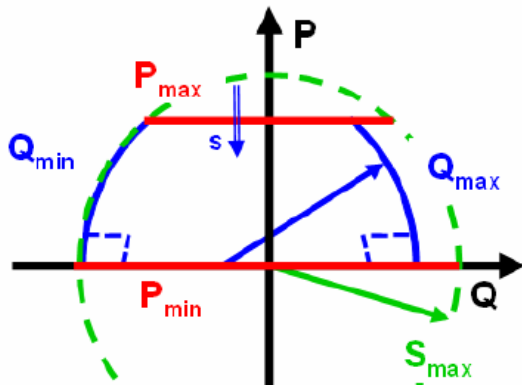


Abbildung 7: Betriebsbereich von doppelt gespeisten Asynchronmaschinen [4]

In Abbildung 7 ist der Betriebsbereich von doppelt gespeisten Asynchronmaschinen dargestellt. Begrenzt wird dieser Betriebsbereich durch folgende Parameter:

- Maximale Wirkleistung (rot): Die maximale Wirkleistung ist abhängig vom Schlupf [4]
- Für untererregte Zustände wird die maximale aufnehmbare Blindleistung (Q_{min}), durch die Scheinleistung des Stators S_{max} (grün) begrenzt [5]
- Für übererregte Zustände (Q_{max}) wird die Blindleistung durch den maximalen Rotorstrom begrenzt. Dieser Grenzwert ist kleiner als S_{max} , da in diesem Fall vom Rotor auch der Magnetisierungsstrom geliefert werden muss [5]
- Für geringe Leistungen wird bei manchen Maschinen die Statorwicklung in Stern geschaltet um Verluste zu minimieren und um höhere Schlupfwerte bei gleicher Rotorspannung zu erreichen (Für hohe Schlupfwerte kann sonst die maximale Rotorspannung überschritten werden). Dadurch ist die Grenze für die Blindleistungseinspeisung bzw. Blindleistungsaufnahme geringer als S_{max} (blau-strichlierter Verlauf) [6]

1.2.6 Kompensationsanlagen

Kompensationsdrosseln

Die Blindleistung, die durch Kompensationsdrosseln aufgenommen werden kann ist von der Spannung abhängig und kann durch folgende Formel beschrieben werden:

$$Q_L = -\frac{U^2}{\omega \cdot L} \quad (6)$$

Kompensationskapazitäten

Besonders in Betrieben mit hoher induktiven Blindleistungsaufnahme kann es erforderlich sein diese zu kompensieren. Die kompensierte Blindleistung ergibt sich durch:

$$Q_C = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad (7)$$

1.2.7 Verbraucherlasten

Die Lasten von Verbrauchern besitzen neben den ohmschen Anteil auch eine induktive Komponente. Besonders in der Industrie wird durch Asynchronmaschinen und Stromrichterantriebe Blindleistung aufgenommen.

Die aufgenommene Blindleistung von Lasten kann durch den Leistungsfaktor ($\cos(\varphi)$) beschrieben werden.

1.3 Spannungsänderung in einem Knoten durch Änderung der Blindleistung

Die relative Spannungsänderung eines Netzknotens, die durch Änderung der Blindleistung oder der Impedanz entsteht, kann durch folgende Beziehung dargestellt werden: [7]

$$d_{max} = \frac{\Delta U_{max}}{U} = \frac{\Delta S}{S_K} \quad (8)$$

für ein Hochspannungsnetze ($R_K \ll X_K$) gilt:

$$d = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\Delta Q}{S_K} \quad (9)$$

Durch die Reduktion der Blindleistung um ΔQ in einem Netzknoten sinkt die Spannung des Knotens um ΔU . Wie stark ΔU ausgeprägt ist hängt neben ΔQ von der Kurzschlussleistung an diesem Netzknoten ab. Bei Netzknoten mit großer Kurzschlussleistung wirken sich Blindleistungsreduktionen nicht so ausgeprägt aus, wie bei Netzknoten mit kleiner Kurzschlussleistung.

2 Analyse der Blindleistungsübergabe den Übergabestellen

Da die kritischen Blindleistungsübergaben nur im Süden des 110-kV-Netzes stattfinden wurde für die Umspannwerke A und B eine Analyse der Blindleistungsübergabe durchgeführt. Weiters wurde analysiert ob es offensichtliche Abhängigkeiten der Blindleistungsübergabe gibt.

2.1 Grenzwerte des Blindleistungsaustausches der Umspannwerke

2.1.1 Verordnung der Europäischen Kommission zur Festlegung eines Netzkodex für den Lastanschluss (Demand Connection Code, DCC)

Die Grundlagen für die Grenzwerte der Blindleistung sind in Artikel 15 dieser Verordnung gegeben. Folgende Aussagen beziehen sich auf den Netzanschlusspunkt: [8]

1. Die Blindleistungsaufnahme/Blindleistungsabgabe von Verteilnetzen darf nicht größer sein als 48% der maximalen Bezugskapazität/Einspeisekapazität (entspricht $\cos(\varphi)=0,9$)
2. Der Übertragungsnetzbetreiber kann vorgeben, dass bei weniger als 25% der maximalen Bezugskapazität der Verteilnetzbetreiber in der Lage sein muss keine Blindleistung einzuspeisen
3. Der relevante Übertragungsnetzbetreiber kann mit den Verteilnetzbetreibern andere Grenzwerte festlegen, wenn diese technische oder finanzielle Vorteile bringen

2.1.2 Grenzwerte für österreichische Verteilnetze

Da der Übertragungsnetzbetreiber mit den Verteilnetzbetreibern gemäß 2.1.1 Grenzwerte vereinbaren kann, sind für die österreichischen Verteilnetzbetreiber andere Grenzwerte festgelegt worden. Vor allem da die Forderung nach keinem Blindleistungsaustausch bei geringen Wirkleistungsaustausch schwierig umzusetzen ist, sind folgende Grenzwerte vereinbart:

Bis 25% der (n-1)-betrachteten Bezugswirkleistung darf der Blindleistungsaustausch $0,15 \cdot S_{n-1}$ nicht überschreiten. Für Wirkleistungsbezüge, die größer als 25% von S_{n-1} sind, ist ein Leistungsfaktor von 0,9 als Grenzwert definiert. Der maximale Blindleistungsaustausch beträgt $0,31 \cdot S_{n-1}$, was einem Leistungsfaktor von 0,95 der maximalen Bezugsscheinleistung entspricht.

Zusammengefasst ergeben sich folgende Grenzwerte für den Blindleistungsaustausch:

$$|Q_{max}| = \begin{cases} S_{n-1} \cdot 0,15 & |P| < 0,25 \text{ p.u.} \\ \cos(\varphi) = 0,9 & |P| \geq 0,25 \text{ p.u. und } |Q_{max}| < S_{n-1} \cdot 0,31 \\ S_{n-1} \cdot 0,31 & \text{sonst} \end{cases} \quad (10)$$

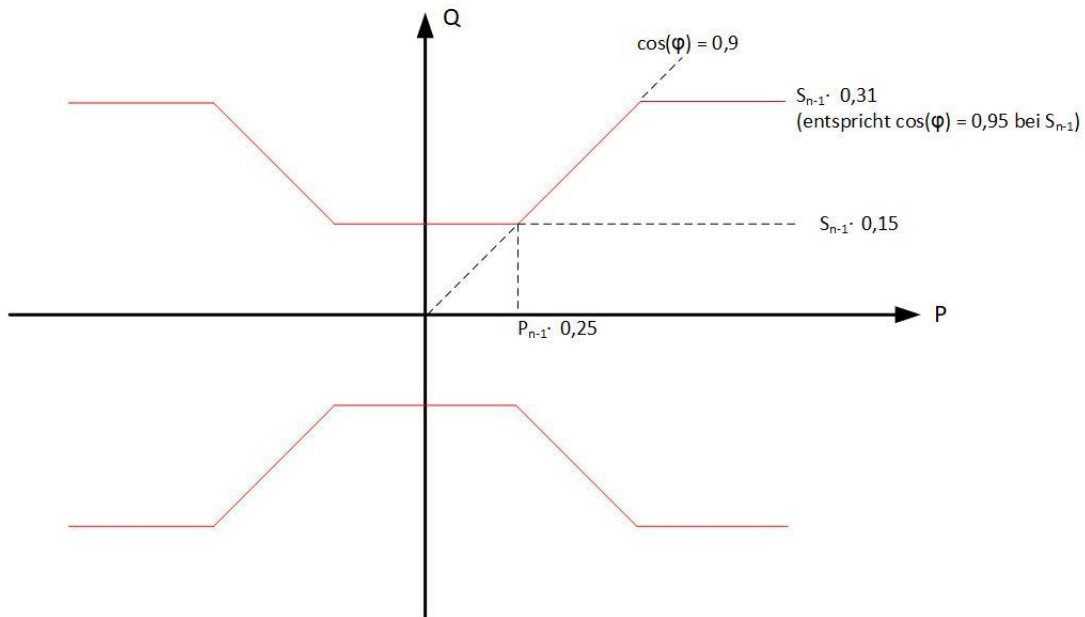


Abbildung 8: Grenzwerte für die Übergabeblindleistung eines UW gemäß Formel (12)

2.2 Abschätzung der Blindleistungserzeugung durch das Netz

Um einen Überblick über die Blindleistungserzeugung durch das Netz zu bekommen, wurde anhand der gegebenen Leitungsdaten für das Hochspannungsnetz und die Mittelspannungsnetze die erzeugte Blindleistung folgendermaßen berechnet:

$$Q_Q = l \cdot C' \cdot \omega \cdot U^2 \quad (11)$$

Da die Mittelspannungsnetze im Nordteil des Netzgebietes größtenteils mit 30 kV betrieben werden, wurde für diesen Netzteil vereinfachend eine einheitliche Netzspannung von 30 kV angenommen. Im südlichen Netzgebiet sind 20 kV als Netzspannung dominant. Die Kapazitätsbelege sowie die Leitungslängen des Hochspannungsnetzes wurden aus der zur Verfügung gestellten Neplan-Datei entnommen. Für die Mittelspannungsnetze wurden die Gesamtleitungslängen der Netzregionen sowie der Verkabelungsgrad vom Verteilnetzbetreiber angegeben, die Kapazitätsbelege von den Mittelspannungskabeln/Freileitungen wurden abgeschätzt.

	Leitungstyp	Systemlänge	Blindleistungserzeugung Q_Q	Blindleistungserzeugung Q_{NR}
	-	km	MVar	MVar
Norden	110-kV-Kabel	3,68	3,7	175,9
	110-kV-Freileitung	889	29,4	
	30-kV-Kabel	1640	139	
	30-kV-Freileitung	1258	3,8	
Süden	110-kV-Kabel	54	66,1	221,9
	110-kV-Freileitung	951	29,4	
	20-kV-Kabel	2460	123	
	20-kV-Freileitung	2242	3,4	

Tabelle 2: Blindleistungserzeugung durch Leitungskapazitäten

Für die 110-kV-Freileitungen und die 110-kV-Kabel wurden für jedes Element die Daten aus der vorhandenen Neplan-Datei entnommen. Für die Mittelspannungskabel wurde ein Kapazitätsbelag $C'=300$ nF/km verwendet, für Mittelspannungsfreileitungen ein Kapazitätsbelag von $C'=10,8$ nF/km.

Aus Tabelle 2 kann entnommen werden, dass vor allem die Mittelspannungskabel einen sehr großen Beitrag zur Blindleistungserzeugung leisten. Auch die Hochspannungskabel liefern trotz einer relativ geringen Systemlänge einen großen Beitrag zur Blindleistungserzeugung. Freileitungen spielen für die Blindleistungserzeugung eine geringere Rolle, insbesondere in der Mittelspannung.

2.3 Gemessene Blindleistung im Umspannwerk A

In Abbildung 9 ist das P-Q-Diagramm für das Umspannwerk A dargestellt. In dem Diagramm sind die P- und die Q-Werte als 15min-Mittelwerte aufgetragen. Dadurch ergibt sich für den betrachteten Zeitraum (Jahr 2017) eine „P-Q-Wolke“. Auf der x-Achse ist die Wirkleistung, auf der y-Achse die Blindleistung aufgetragen. Die schwarz eingezeichneten Linien entsprechen den nationalen DCC-Grenzwerten, die festgelegt wurden.

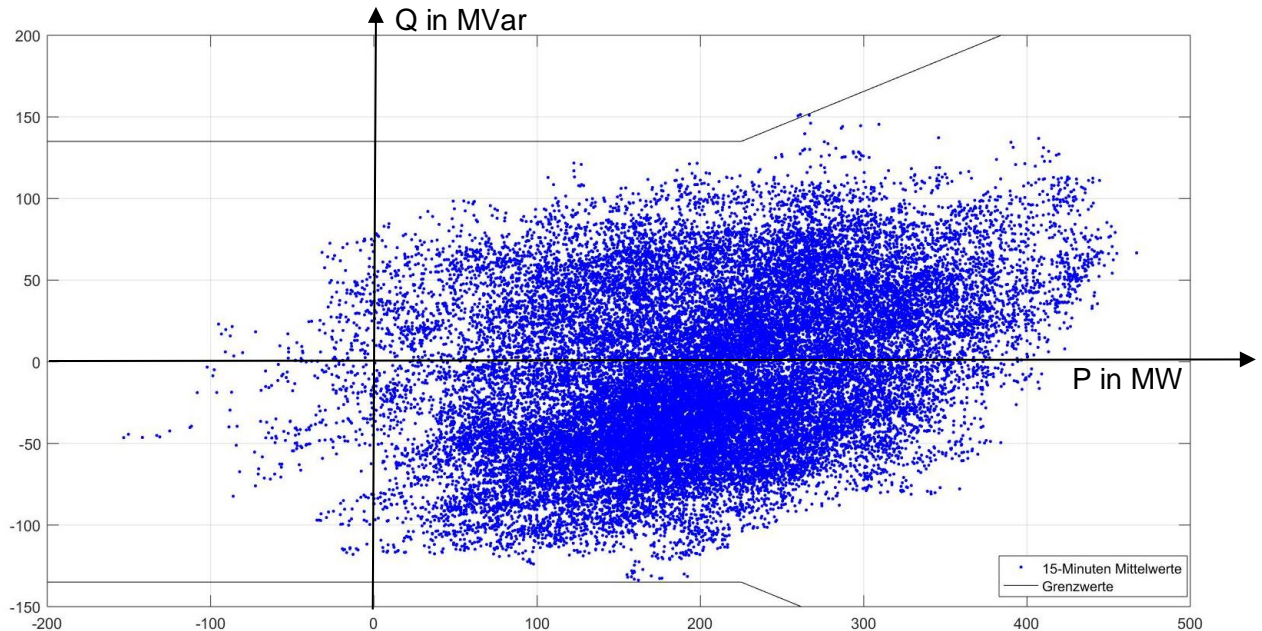


Abbildung 9: P-Q-Diagramm des UW A

Die zulässigen Blindleistungswerte für dieses Umspannwerk sind relativ groß, da auch die installierte (n-1)-Transformatorscheinleistung von 3x300 MVA groß ist. Zu erkennen ist, dass die Grenzen nur minimal überschritten werden bzw. nur selten erreicht werden und meistens sogar ein ausreichender Abstand zu den Grenzwerten vorhanden ist. Daher müssen für dieses Umspannwerk keine weiteren Maßnahmen getroffen werden. In den folgenden Kapiteln wird dargelegt, dass alle Maßnahmen die zur Reduktion des Blindleistungsaustausches des Umspannwerkes B getroffen werden auch auf den Blindleistungsaustausch des Umspannwerkes A einen Einfluss haben.

2.4 Gemessene Blindleistung im Umspannwerk B

Die installierte (n-1)-Scheinleistung des Umspannwerkes B ist mit 300 MVA wesentlich geringer als im Umspannwerk A, wodurch die Grenzwerte auch geringer ausfallen. Für die Betrachtung dieses Umspannwerkes wurde zusätzlich eine Unterscheidung hinsichtlich des Betriebs der Kompensationsdrosseln gemacht.

Bei Betrieb einer oder beider Kompensationsdrosseln steigt die exportierte Blindleistung auf der 110-kV-Seite der Transformatoren. Da die Steuerung der Kompensationsdrosseln dem Übertragungsnetzbetreiber obliegt, nimmt dieser Einfluss auf den Blindleistungsaustausch der jeweiligen Umspannwerke des Verteilnetzes.

Es treten auch für den Fall, dass keine Kompensationsdrossel in Betrieb ist, Grenzwertüberschreitungen auf. Es bedarf daher für dieses Umspannwerk einer genaueren Betrachtung und in weiterer Folge auch Maßnahmen um den Blindleistungsaustausch zu beeinflussen.

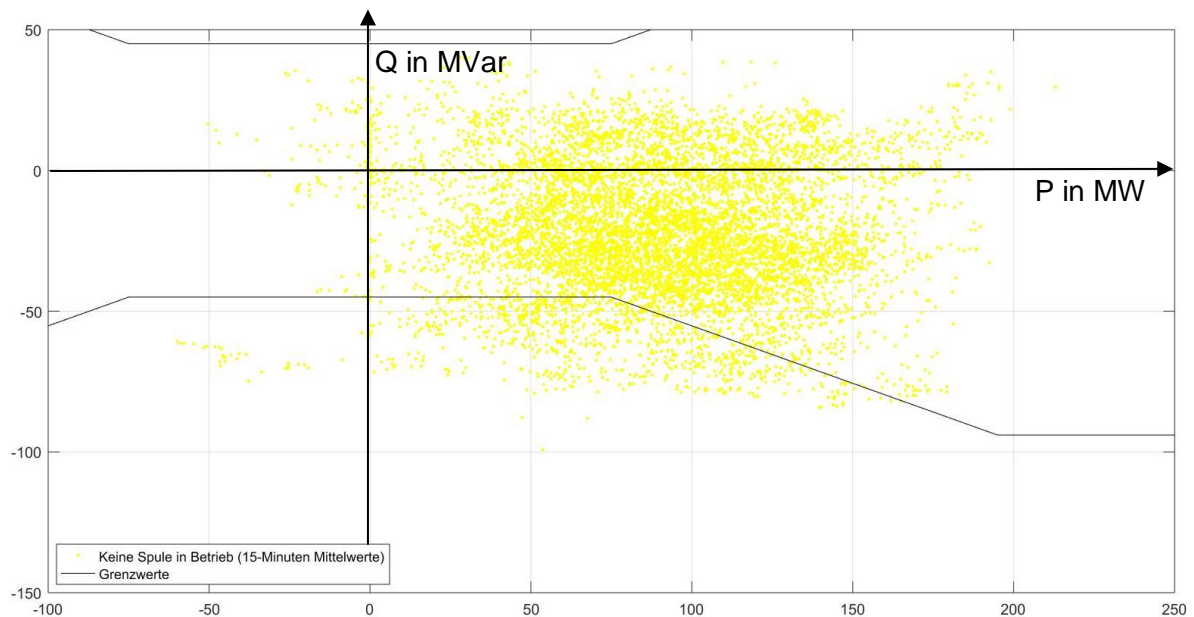


Abbildung 10: P-Q-Diagramm des UW B ohne Kompensationsdrossel in Betrieb

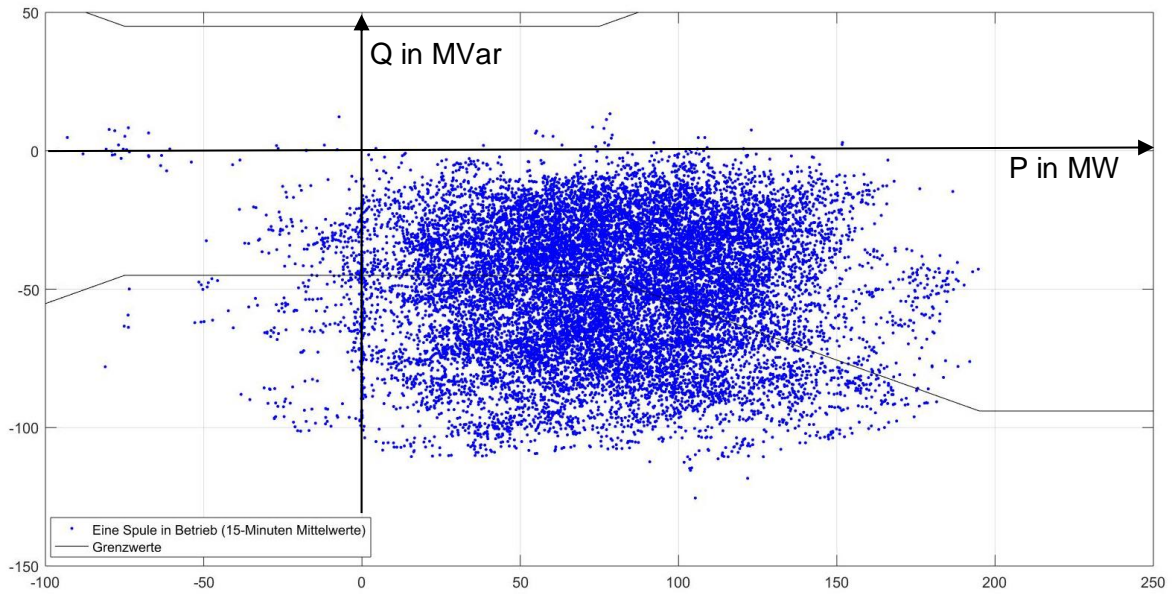


Abbildung 11: P-Q-Diagramm des UW B mit einer Kompensationsdrossel in Betrieb

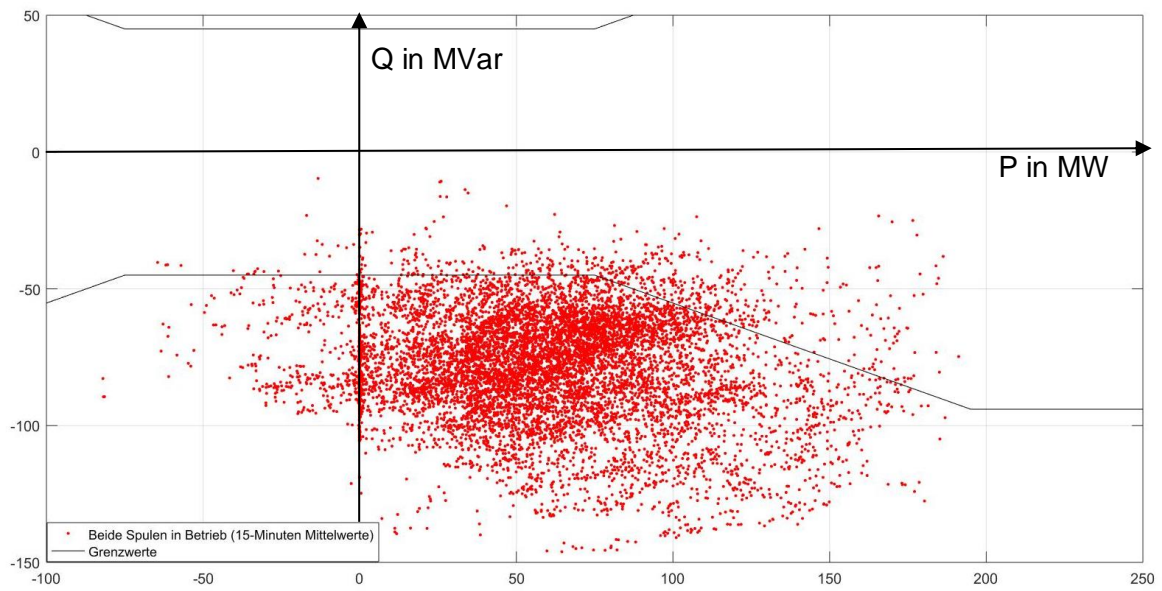


Abbildung 12: P-Q-Diagramm des UW B mit beiden Kompensationsdrossel in Betrieb

2.5 Blindleistungsjahresganglinie des Umspannwerkes B

In der folgenden Abbildung ist die Blindleistungsjahresganglinie des Umspannwerkes B dargestellt. Zu erkennen ist, dass in den Sommermonaten weniger Blindleistung in das Übertragungsnetz geliefert wird. Dies hängt von mehreren Faktoren wie Lastsituation, Einspeisung, Transformatorstufenstellung etc. ab. Die Faktoren sind in den nächsten Kapiteln näher beschrieben.

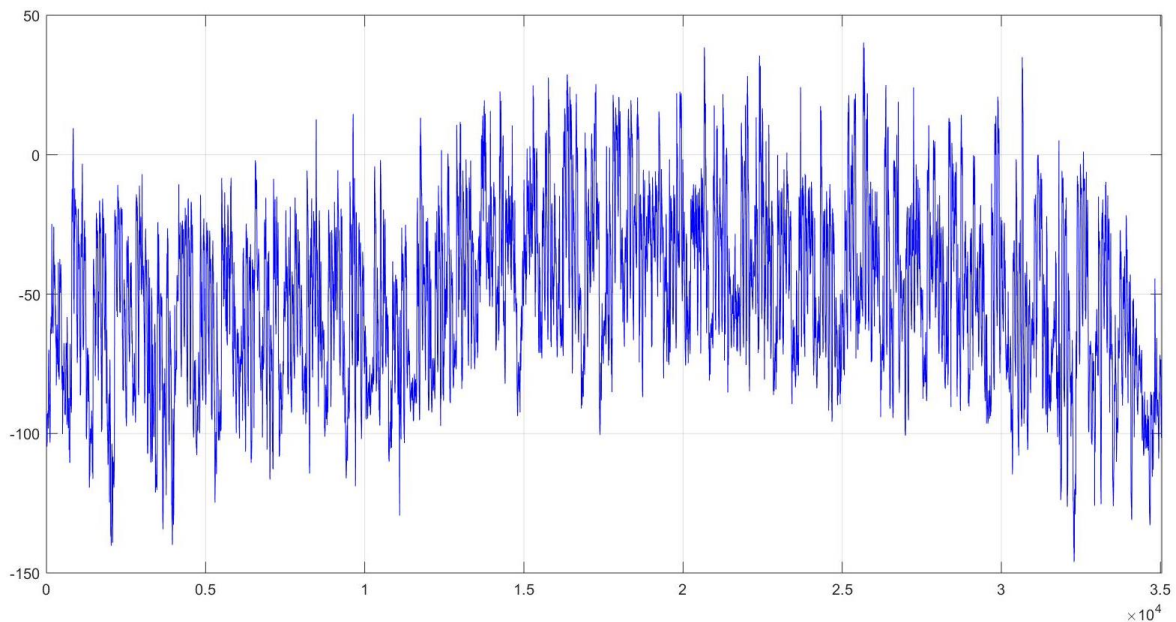


Abbildung 13: Jahresganglinie der Blindleistung für das UW B

2.6 Einflüsse auf das Umspannwerk B

Einfluss der Netzlast

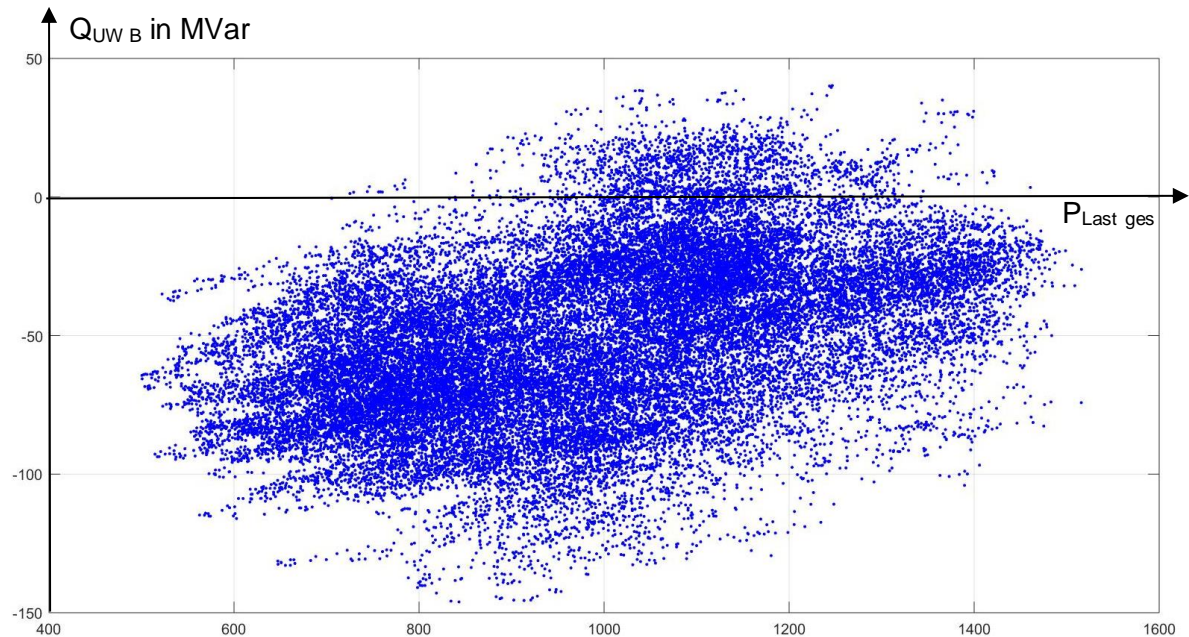


Abbildung 14: Blindleistungsaustausch des UW B in Abhängigkeit der gesamten Last im Netz

Bei steigender Last im gesamten Netz wird die Übergabeblindleistung des Umspannwerkes B geringer, wie in Abbildung 14 zu sehen ist. Dieser Effekt wird durch den induktiven Blindleistungsbedarf von Leitungen erklärt, der bei höherem Strom ansteigt (Formel (1)).

Einfluss der Einspeisung durch Wasserkraft

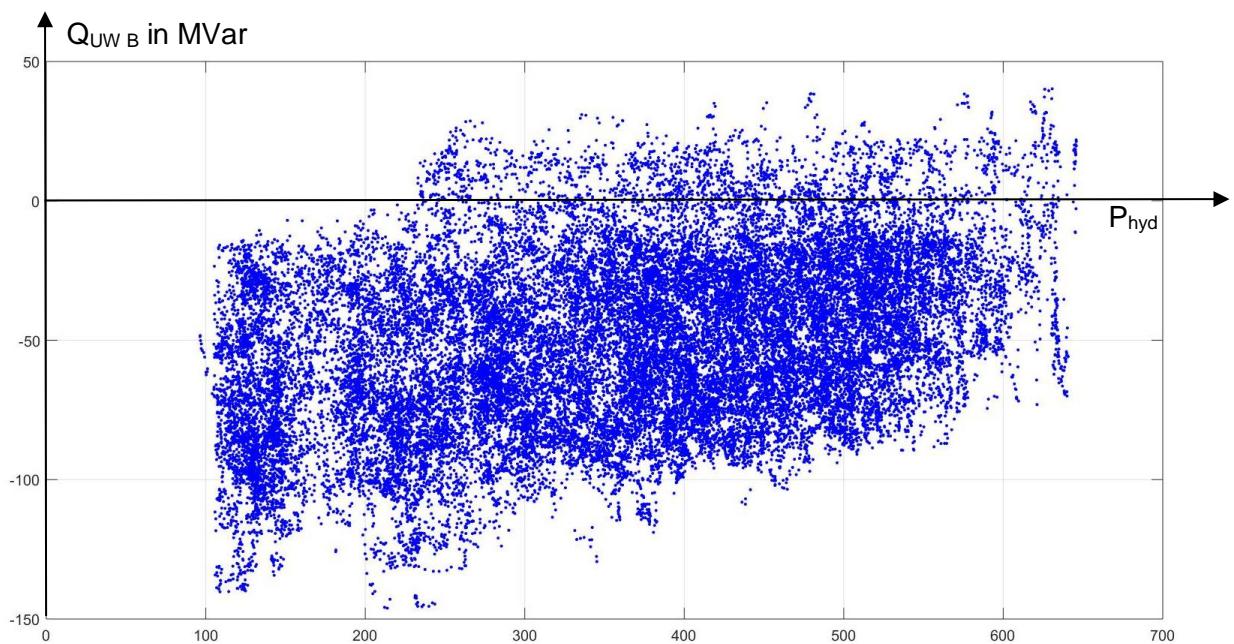


Abbildung 15: Blindleistungsaustausch des UW B in Abhängigkeit von der eingespeisten Leistung durch Wasserkraft

Abbildung 15 zeigt eine geringer werdende Übergabebindleistung bei steigender Einspeisung durch Wasserkraftwerke. Auch hierfür liegt der Grund in der steigenden Auslastung der Leitungen. Da in diesen Daten auch die Kleinwasserkraft enthalten sind, kommt dieser Effekt stärker zu tragen.

Einfluss thermische Einspeiser

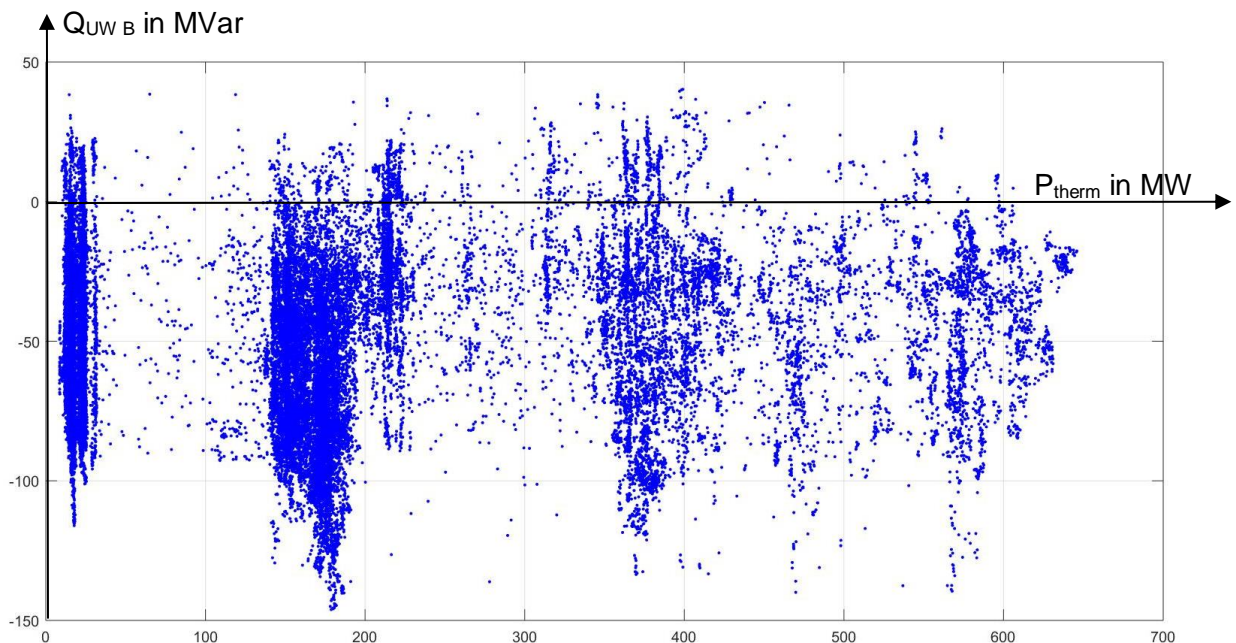


Abbildung 16: Blindleistungsaustausch des UW B in Abhängigkeit der gesamten thermischen Einspeisung

Zwischen der eingespeisten Leistung durch thermische Kraftwerke und der Übergabebindleistung des Umspannwerkes B gibt es keinen direkten Zusammenhang, wie in Abbildung 16 zu sehen ist. Die Einspeisung erfolgt zentral in das Hochspannungsnetz, deshalb werden einige Hochspannungsleitungen stark belastet, jedoch bleiben die Mittelspannungsnetze unbeeinflusst und damit auch deren Blindleistungsbilanz.

2.7 Grundsätzliche Beeinflussungsmöglichkeiten durch Kraftwerke

Wasserkraft

Die Jahresdauerlinie für die Wasserkraft zeigt, dass die Erzeugung durch Wasserkraft zwischen 650 MW und 120 MW schwankt. Da immer eine Mindestleistung vorhanden ist, kann auch das ganze Jahr über die Blindleistung mit Wasserkraftwerken beeinflusst werden.

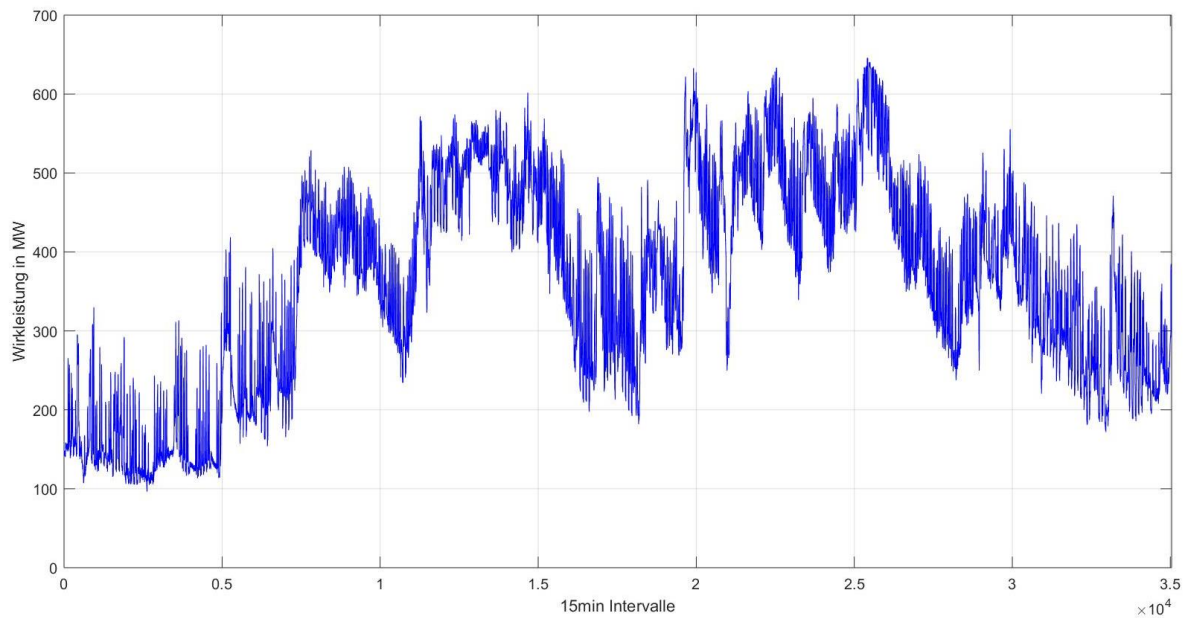


Abbildung 17: Jahresganglinie für Wasserkraft 2017

Windkraft

In Abbildung 18, der Jahressganglinie für die Windkraft ist zu erkennen, dass die eingespeiste Leistung sehr unregelmäßig ist und an manchen Zeitpunkten keine Leistung eingespeist wird. Die dauerhafte Beeinflussung der Blindleistungsübergabe an das Übertragungsnetz ist daher schwierig. Bei einer Einspeisung mit geeigneten Umrichtern ist, wie in 1.2.4 beschrieben, auch ohne Wirkleistungseinspeisung eine Blindleistungsbeeinflussung möglich.

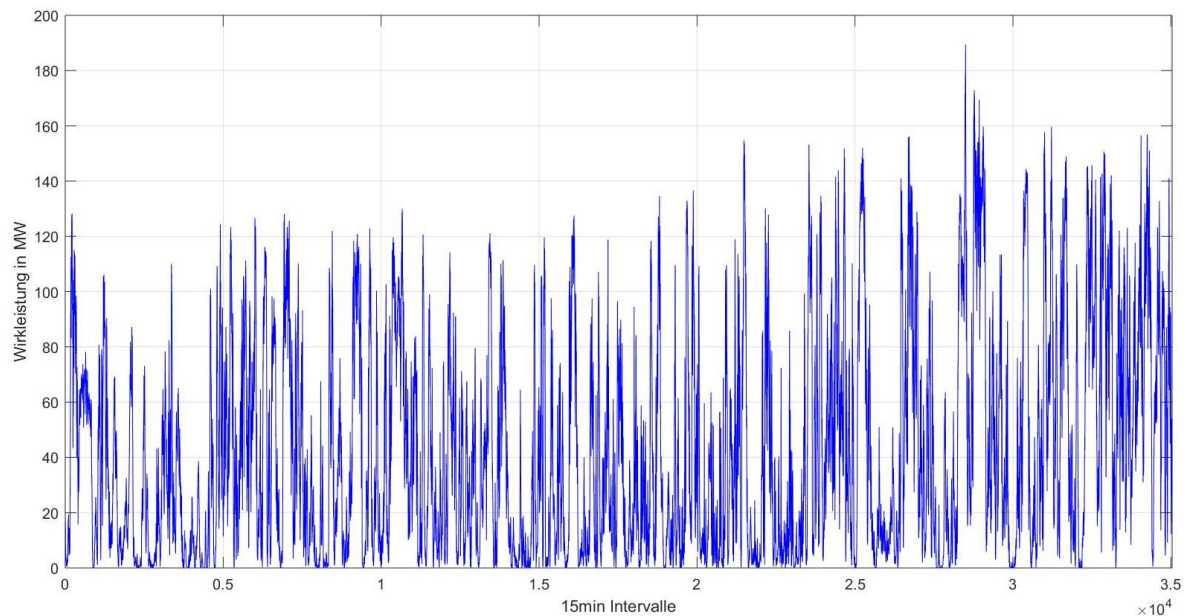


Abbildung 18: Jahressganglinie für Windkraft 2017

Thermische Einspeiser

In das betrachtete Verteilnetz speisen mehrere thermische Anlagen mit kleiner Leistung ein, die in der folgenden Abbildung unter „sonstige thermische Einspeiser“ geführt werden. Die beiden großen Einspeiser sind ein Fernheizwerk (FHKW) und ein GuD-Kraftwerk. Das Fernheizkraftwerk ist nur in den Wintermonaten in Betrieb während das GuD-Kraftwerk nur unregelmäßig in Betrieb ist. Bei beiden Kraftwerken ist daher eine ganzjährige Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit dem Übertragungsnetz nicht möglich. Mit dem Fernheizkraftwerk ist jedoch während der Betriebszeit eine Beeinflussung des Blindleistungsaustausches grundsätzlich möglich, wie auch in den folgenden Kapiteln angeführt wird. Da das GuD-Kraftwerk über eine große installierte Leistung verfügt, wird dieses Kraftwerk im Verlaufe der Arbeit näher betrachtet.

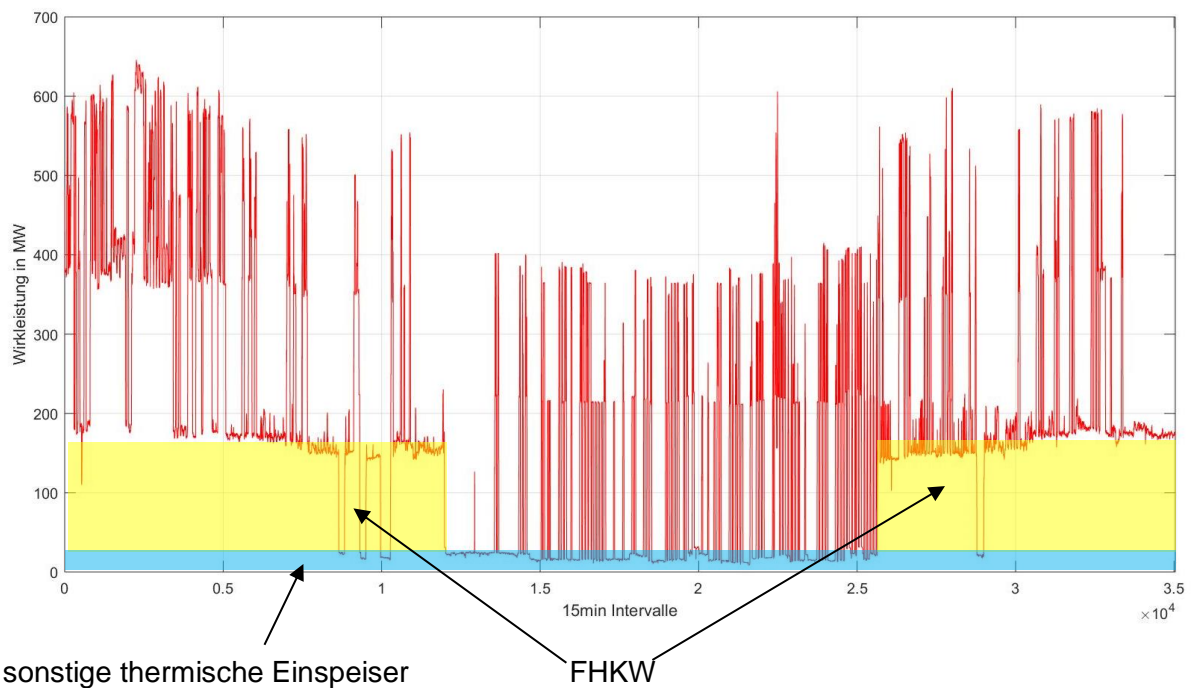


Abbildung 19: Jahresganglinie für thermische Einspeisung 2017

3 Berechnungen mit Neplan

3.1 Modellanpassungen

Für die Berechnungen wurde eine Neplan-Datei zur Verfügung gestellt. Um die Lastflussberechnungen durchführen zu können, mussten die Eigenschaften einiger Betriebsmittel in dieser Datei erweitert bzw. vereinfacht werden. Für die Mittelspannungsnetze wurde ein geeignetes Modell erstellt.

3.1.1 Wasserkraftwerke

Um die Berechnungen zu vereinfachen ist für alle Laufkraftwerke derselbe $\cos(\varphi)$ -Wert vorgegeben. Dieser ist durch Mittelung aller $\cos(\varphi)$ -Werte der Laufkraftwerke ermittelt und beträgt 0,94. Die Berechnungen mit unterschiedlichen Einspeiseleistungen sind durch Multiplikation der Wirk- und Blindleistung mit einem Skalierungsfaktor realisiert worden.

3.1.2 Transformatoren

An den Umspannwerken A und B mussten die bestehenden Zweiwickeltransformatoren in der Datei durch Dreiwickeltransformatoren mit einer Kompensationsspule an der Tertiärwicklung ersetzt werden. Geregelt wird die Sekundärspannung. Der Winkel der Zusatzspannung beträgt 60° . Die möglichen Transformatorstufen sind in Neplan mit -13 bis 13 gegeben. Aufgrund von Versuchen wurde festgestellt, dass die aus den Schaltprotokoll entnommenen Stufen (0-26) in Neplan berücksichtigt werden können, indem die Stufe 0 aus dem Schaltprotokoll der Stufe -13 in Neplan setzt.

3.1.3 Mittelspannungsnetze

Die Mittelspannungsnetze sind als Lasten mit vorgegebener Wirk- und Blindleistungsaufnahme dargestellt. Deshalb wurde für jedes Umspannwerk eine zusätzliche Last eingefügt, welche die Leitungskapazitäten repräsentiert und dadurch die durch Leitungen erzeugte Blindleistung berücksichtigt. Für die Berechnungen dieser Lasten wurde folgendes Modell verwendet:

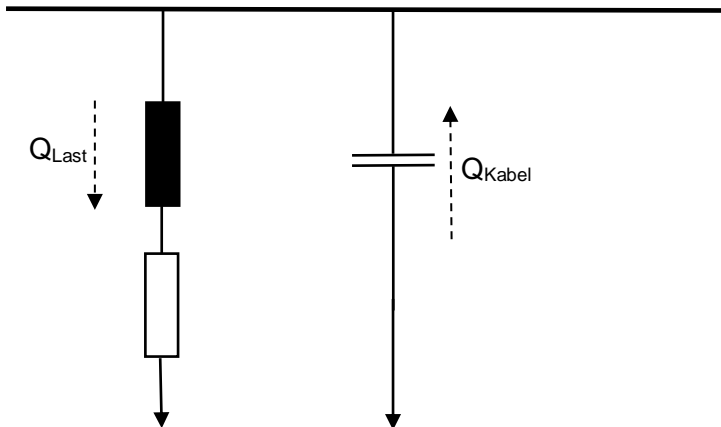


Abbildung 20: Modellierung der Mittelspannungsnetze

Über die Länge der einzelnen Mittelspannungsleitungen liegen keine genauen Daten vor, deshalb wurden die Leitungslängen anhand der bezogenen Wirkleistung abgeschätzt. Da Mittelspannungsfreileitungen nur einen geringen Anteil zur Blindleistungserzeugung liefern ist vor allem die erzeugte Blindleistung durch die Kabelkapazitäten relevant.

$$Q_{Kabel} = \frac{P_{Last}}{P_{NR}} \cdot Q_{NR} \quad (12)$$

$$Q_{Last} = Q_{Last\ ges} - Q_{Kabel} \quad (13)$$

Die Werte für Q_{NR} sind aus Tabelle 2 entnommen.

3.1.4 Dezentrale Einspeisungen

Da in der gegebenen Neplan-Datei Mittelspannungsnetze als Lasten dargestellt sind, erfolgt Berücksichtigung durch Einspeisungen in der Mittelspannung daher durch eine reduzierte Last. Die aktuelle Last wird um die eingespeiste Leistung in der Mittelspannung korrigiert.

$$P_{L\text{ Neplan}} = P_L - P_{\text{Gen MS}} \quad (14)$$

3.2 Grundlagen zur Bewertung der vorgestellten Methoden

Um die Auswirkungen verschiedener Blindleistungsreduktionsmöglichkeiten auf die Umspannwerke A und B zu bewerten, wurden Wirkungsfaktoren definiert. ΔQ_{KW} ist jener Wert, um den die Blindleistungseinspeisung eines Kraftwerkes geändert wurde.

$$q_{UW \%} = \frac{\Delta Q_{UW}}{\Delta Q_{KW}} \cdot 100 \quad (15)$$

ΔQ_{UW} ist die Differenz aus der Übergabeblindleistung nach der Maßnahme und der ursprünglichen Übergabeblindleistung.

$$\Delta Q_{UW} = Q_{UW \text{ nach Maßnahme}} - Q_{UW \text{ ursprünglich}} \quad (16)$$

Blindleistung, die in Richtung des Übertragungsnetzes geliefert wird, wird mit negativem Vorzeichen dargestellt (Last).

Zusätzlich zur Übergabeblindleistungsänderung der Umspannwerke wurden auch die Spannungsänderungen auf der 110-kV-Seite der Kraftwerke berechnet um die Auswirkungen der Blindleistungsreduktion auf die Spannung kontrollieren zu können.

3.3 Möglichkeiten um die Übergabebindleistungen an den Umspannwerken zu beeinflussen

Für die Szenarien wurden folgende Möglichkeiten der Blindleistungsreduktion an den Übergabestellen untersucht:

- Schaltung der Kompensationsdrosseln
Hierbei wurde untersucht wie sich die Blindleistungsübergabe ändert, wenn Kompensationsdrosseln zu- oder abgeschaltet werden.
- Blindleistungsänderung bei Laufkraftwerken
Es wurde anfangs für alle Laufkraftwerke ab den WKW 1 flussabwärts eine Berechnung der Auswirkungen einer Blindleistungsreduktion ΔQ_{KW} durchgeführt. In den weiteren Szenarien sind für Kraftwerke mit ähnlichen Auswirkungen zur Vereinfachung repräsentative Kraftwerke ausgewählt worden. $\Delta Q_{UW A}$ und $\Delta Q_{UW B}$ sind die Blindleistungsänderungen der Umspannwerke.
Als Blindleistungsgrenze wurde ein Leistungsfaktor von 0,95 angesetzt. Die Laufkraftwerke haben unterschiedliche installierte Leistungen, daher können die Werte von ΔQ_{KW} unterschiedlich ausfallen. Um die Auswirkungen vergleichen zu können sind die Wirkungsfaktoren der einzelnen Kraftwerke zum Vergleich herangezogen.
- Blindleistungsänderung durch Windparks
Im Zuge dieser Arbeit soll auch eruiert werden, ob eine Beeinflussung der Blindleistungsübergabe an das Übertragungsnetz durch Windparks möglich ist. Bereits in Absatz 2.7 ist dargestellt, dass aufgrund der schwankenden Einspeisung durch Windkraft eine konstante Beeinflussung der Übergabebindleistung an das Übertragungsnetz schwierig ist. Dennoch sind in weiter Folge die Einflüsse anhand eines Windparks dargestellt.
Der Windpark wird über ein ca. 17 km langes Kabelsystem abgespeist. Bei einer maximalen Leistung von 39 MW wurde berechnet, dass dieser Abzweig bei Volllast, inkl. Blindleistungsbedarf des Transformators, 0,5 MVar in das 110-kV-Netz einspeist. Bei geringerer Auslastung ist diese eingespeiste Blindleistung deutlich höher (4,4 MVar bei 10 MW Einspeiseleistung). Im Betrieb mit einem Leistungsfaktor von $\cos(\varphi)=1$ liefert der Windpark inklusive seiner Verkabelung daher immer Blindleistung ins Verteilnetz.
Für die weiteren Berechnungen wurde eine Blindleistungsreduktion ΔQ_{KW} von 10 MVar angenommen. Aufgrund der berechneten Wirkungsfaktoren ist eine Umrechnung auf einen anderen Wert von ΔQ_{KW} möglich.

- Blindleistungsänderung durch thermische Kraftwerke (GuD und FHKW)
Da aufgrund der installierten Scheinleistung von 480 MVA das GuD-Kraftwerkes ein großes Potential zur Aufnahme von Blindleistung im untererregten Betrieb hat, wird der Einfluss dieses Kraftwerkes näher untersucht. Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, stellt das Kraftwerk den überwiegenden Anteil der thermischen Energie in diesem Netz. Der Betrieb erfolgt allerdings nur unregelmäßig, da dieses Kraftwerk momentan hauptsächlich zum Redispatch verwendet wird.
Um zu überprüfen ob der Betrieb des GuD-Kraftwerks einen Einfluss auf die behandelten Methoden zur Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit dem Übertragungsnetz hat, wurden die Auswirkungen der Methoden mit Betrieb des GuD-Kraftwerkes berechnet und anschließend verglichen.
Für das Fernheizkraftwerk wurden die Auswirkungen einer Blindleistungsreduktion dieses Kraftwerks wie für die Laufkraftwerke dargestellt.
- Blindleistungsreduktion durch zusätzliche Kompensationsdrosseln im 110-kV-Netz
In diesen Szenarien sind die Einflüsse von Kompensationsdrosseln auf den Blindleistungsaustausch der Umspannwerke berechnet worden. Dabei sind verschiedene Umspannwerke als Drosselstandorte ausgewählt worden, welche eine Kurzschlussleistung größer als 2500 MVA aufweisen (um die Spannungsänderungen gering zu halten) und ausreichend Platzangebot haben. Es wurden wieder Wirkungsfaktoren verwendet um die Auswirkungen auf die verschiedenen Umspannwerke zu veranschaulichen. Zusätzlich wurden die stationären Spannungsänderungen berechnet, die bei der Zuschaltung der Drosseln entstehen.
- Blindleistungsreduktion durch Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner
Da die installierten Transformatoren im Schrägregelbetrieb arbeiten, beeinflussen die Stufen den Blindleistungsaustausch der Umspannwerke. Deshalb wurden die Einflüsse der Stufen in den folgenden Szenarien untersucht.
- Blindleistungsänderung durch Abschaltung eines Systems der 380-kV-Leitung
In Schwachlastzeiten wird durch die Kapazitäten der 380-kV-Leitung des Übertragungsnetzes Blindleistung erzeugt. Es wurde untersucht ob sich diese erzeugte Blindleistung auf den Blindleistungsaustausch zwischen den betrachteten 110-kV-Netz und dem Übertragungsnetz auswirkt.

3.4 Szenario 1: Schwachlast mit hoher Einspeisung durch Wasserkraft

Dieses Szenario entspricht einem Wochenendtag im Mai (hohe Einspeisung durch Wasserkraft, keine thermische Einspeisung, geringe Last). Folgende Daten wurden für die Berechnungen herangezogen:

- Gesamtlast: 550 MW
- Einspeisung durch Wasserkraftwerke: 500 MW
- Keine Einspeisung durch thermische Kraftwerke
- Aktive Kompensationsdrosseln: 3x100 MVar im Umspannwerk A, 2x50 MVar im Umspannwerk B
- Transformatorstufen: Umspannwerk A Stufe 11, Umspannwerk B Stufe 15

3.4.1 Variante A: Keine Sammelschienentrennung

Schaltung der Kompensationsdrosseln

Blindleistungserzeugung/ Blindleistungsübergabe	Ausgangssituation	Abschaltung 50 MVar im UW B	Abschaltung 100 MVar im UW B	Abschaltung 100 MVar im UW A
	Q	ΔQ		
	MVar	MVar		
110-kV-Netz	94,4	1,8	3,3	3,3
Last + MS-Netze	167,9	0	0	0
Generatoren	104,9	0	0	0
Übergabe an APG	-367,2	-1,8	-3,3	-3,3
$Q_{UW A}$ (135 MVar Limit)	-123,5	-18,5	-37,7	32,5
$Q_{UW B}$ (45 MVar Limit)	-81,4	25,8	52,9	-17,9
$Q_{UW C}$	-125,6	-5,6	-11,5	-11,3

Tabelle 3: Einfluss der Kompensationsdrosseln für das Szenario 1, Variante A

In Tabelle 3 ist ersichtlich, dass aufgrund der Schwachlastsituation durch die Mittelspannungskabel bzw. die Hochspannungskabel viel Blindleistung erzeugt wird. Daher ist die Blindleistungslieferung in Richtung Übertragungsnetz entsprechend groß. Für das Umspannwerk B wird der Grenzwert deutlich überschritten. Durch Abschalten einer bzw. beider Drosseln im Umspannwerk B reduziert sich die übergebene Blindleistung des Umspannwerkes jeweils um ca. die Hälfte der abgeschalteten Drosselblindleistung (die andere Hälfte wird vom Übertragungsnetz geliefert). Für die Betrachtung der Übergabeblindleistung des Umspannwerkes B in diesem Szenario bedeutet dies, dass ohne den Betrieb beider Kompensationsdrosseln der Grenzwert nicht überschritten wird.

Bei der Abschaltung einer Drossel sinkt im jeweiligen Umspannwerk die Übergabeblindleistung, in den anderen Umspannwerken steigt diese. Die Blindleistungsbilanz des 110-kV-Netzes ändert dabei sich nur geringfügig.

Blindleistungsreduktion durch Kraftwerke

Beschreibung	ΔQ_{KW}	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%
WKW 1	6,5	1,6	0,8	-0,3	25	13
WKW 2	9,8	3,0	1,6	-0,4	31	16
WKW 3	9,0	3,2	1,7	-0,4	36	19
WKW 4	6,9	2,9	1,6	-0,3	42	23
WKW 5	15,3	9,7	3,3	-0,3	63	21
WKW 6	7,7	4,6	1,9	-0,3	59	25
WKW 7	8,1	4,7	2,1	-0,4	58	26
WKW 8	8,1	4,7	2,2	-0,5	57	27
WKW 9	8,1	4,6	2,3	-0,6	57	28
WP	10	6,9	1,74	-0,6	69	17

Tabelle 4: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit Kraftwerken für das Szenario 1, Variante A

Die Aufteilung der Blindleistungsänderung auf die Übergabestellen zum Übertragungsnetz hängen von den Impedanzverhältnissen und damit auch von den Entfernungen der Kraftwerke zu den Übergabestellen ab.

In Bezug auf das Umspannwerk A kann erkannt werden, dass die Einflüsse der Kraftwerke flussabwärts bis zum WKW 5 steigen und anschließend sinken. Grund dafür ist, dass das WKW 5 die geringste Entfernung zum Umspannwerk A hat und davor sowie danach die Entfernung zunimmt.

Für das Umspannwerk B sind die Wirkungsfaktoren kleiner als für das Umspannwerk A, was auf die größere Entfernung der Kraftwerke zum Umspannwerk zurückzuführen ist. Die Wirkungsfaktoren steigen flussabwärts aufgrund der Netztopologie, da für den Leistungstransport zwei verschiedene Leitungen zur Verfügung stehen. Aufgrund dieser „Parallelstruktur“ sinkt die Impedanz zwischen dem Umspannwerk B und den betrachteten Kraftwerken, deshalb haben die südlicheren Kraftwerke einen stärkeren Einfluss auf das Umspannwerk B als die nördlicher gelegenen.

Der Windpark, der über die Mittelspannungsebene in das 110-kV-Netz einspeist, hat aufgrund seiner Nähe zum Umspannwerk A dort einen großen Einfluss. Da die Entfernung zum Umspannwerk B relativ groß ist, ist der Einfluss auf dieses Umspannwerk gering.

Wie bereits in Absatz 1.3 beschrieben wurde, ändert sich die Spannung eines Netzknotens durch die Blindleistungsreduktion. Die Spannungsänderungen, die durch die Blindleistungsreduktion der Kraftwerke hervorgerufen werden, sind allerdings gering.

Blindleistungsreduktion durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel im 110-kV-Netz

Standort	Q_{Drossel}	$\Delta Q_{\text{UW A}}$	$\Delta Q_{\text{UW B}}$	ΔU	$q_{\text{UW A}}$	$q_{\text{UW B}}$	$S_{K''}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%	MVA
UW B	50,00	18,7	27,7	-1,3	37	55	4260
UW G		29,2	15,5	-1,2	58	31	4920
UW B		20,2	25,6	-1,6	40	51	3710

Tabelle 5: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch zusätzliche Kompensationsdrosseln für das Szenario 1, Variante A

Aufgrund der Vermaschung der 110-kV-Netzes wirkt eine Blindleistungsreduktion im Osten des Netzes auch auf den Westen. In Tabelle 5 ist ersichtlich, dass die Auswirkungen auf das kritische Umspannwerk B selbst bei einer Installation der Drossel am entsprechenden Umspannwerk nur einen Wirkungsfaktor von 55% erreicht. Für die Drosselstandorte die weiter entfernt sind verringert sich der Wirkungsfaktor weiter. Die stationären Spannungsänderungen, welche durch die zusätzlichen Drosseln hervorgerufen werden, sind für den Betrieb zu berücksichtigen.

Blindleistungsreduktion durch Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner

Stufenänderung	$\Delta P_{\text{UW A}}$	$\Delta Q_{\text{UW A}}$	$\Delta P_{\text{UW B}}$	$\Delta Q_{\text{UW B}}$
-	MW	MVar	MW	MVar
UW A +1	-24,6	-10	15,2	7,4
UW A -1	25,1	10	-15,5	-7,3
UW B +1	13,7	8,3	-17,8	-8,9
UW B -1	-14,1	-8,2	18,3	8,9

Tabelle 6: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch Änderung der Trafostufen der RHU für das Szenario 1, Variante A

Durch eine Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner entstehen pro Stufe die in der Tabelle angeführten Änderungen. Dadurch ist eine Beeinflussung der Übergabebindleistung eines Umspannwerkes prinzipiell möglich. Da der Transformator im Schrägregelbetrieb arbeitet, haben Stufenänderungen auch auf den Wirkleistungsfluss einen Einfluss. Daher ist diese Methode limitiert. Weiters werden die Trafostufen auch durch den Übertragungsnetzbetreiber gesteuert.

3.4.1.1 Auswirkungen der Blindleistungsreduktion eines Kraftwerkes

Um die Auswirkungen der Blindleistungsreduktion zu zeigen wurden diese exemplarisch für das WKW 5 in diesem Szenario berechnet. Dazu wurden die Generatoren dieses Kraftwerkes von einem übererregten in einen untererregten Zustand versetzt, wodurch eine Blindleistungsdifferenz von 15,3 MVar erzielt wurde. In weiterer Folge sind die Änderungen der Übergabeblindleistungen aller Umspannwerke zum Übertragungsnetz sowie die Änderung des Blindleistungsbedarfes des Netzes und der Transformatoren dargestellt. Zusätzlich wurden auch die Spannungsänderungen der Umspannwerke berechnet.

WKW 5	Umspannwerke						Transformatoren	Netz
ΔQ_{KW}	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	$\Delta Q_{UW C}$	$\Delta Q_{UW D}$	$\Delta Q_{UW E}$	$\Delta Q_{UW F}$	ΔQ_{Tr}	ΔQ_{Netz}
MVar								
15,3	9,7	3,3	1,9	0,6	0,4	0,1	0,23	0,4

Tabelle 7: Änderung der Übergabeblindleistungen der Umspannwerke, Änderung des Blindleistungsbedarfes der Transformatoren und des Netzes

$U_{UW A}$	$U_{UW B}$	$U_{UW C}$	$U_{UW D}$	$U_{UW E}$	$U_{UW F}$
kV					
-0,3	-0,2	-0,1	0	-0,1	-0,1

Tabelle 8: Spannungsänderungen der Umspannwerke, durch Blindleistungsreduktion eines KW's

Man erkennt in den vorhergehenden Tabellen, dass bei einer Änderung der Blindleistung um 15,3 MVar sich sowohl die Spannung als auch die Blindleistung an allen Umspannwerken ändert. Addiert man die Blindleistungsänderungen aller Umspannwerke erhält man mit 16 MVar einen höheren Wert als die Blindleistungsänderung des Kraftwerkes. Diese Auswirkung entsteht dadurch, dass sich auch die Spannung ändert und dadurch weniger Blindleistung durch das Netz generiert wird (ΔQ_{Netz}) und weil Transformatoren bei geringerer Spannung und gleicher Übertragungsleistung mehr Blindleistung benötigen (ΔQ_{Tr}).

Durch eine Reduktion der Blindleistung an einem Knoten, ändert sich aufgrund der Spannungsänderung die Blindleistungsübergabe um einen Wert der größer ist als die ursprüngliche Änderung.

3.4.2 Variante B: Sammelschientrennung

Bei dieser Varianten wurden die Einflüsse einer an zwei Umspannwerken durchgeführten Sammelschientrennung berechnet.

Schaltung der Kompensationsdrosseln

Blindleistungserzeugung/ Blindleistungübergabe	Ausgangssituation	Abschaltung 50 MVar im UW B	Abschaltung 100 MVar im UW B	Abschaltung 100 MVar im UW A (Ost)	Abschaltung 100 MVar im UW A (West)
	Q	ΔQ			
	MVar	MVar			
110-kV-Netz	94,4	1,9	3,4	2,3	3,7
Last + MS-Netze	167,9	0	0	0	0
Generatoren	104,9	0	0	0	0
Übergabe an APG	-367,2	-1,8	-3,4	-2,2	-3,7
$Q_{UW A}$ (135 MVar Limit)	-121,4	-18,4	-37,2	35,8	31,2
$Q_{UW B}$ (45 MVar Limit)	-84,2	25,5	52,3	-21,2	-15
$Q_{UW C}$	-124,6	-5,6	-11,5	-10,5	-12,4

Tabelle 9: Einfluss der Kompensationsdrosseln für das Szenario 1, Variante B

Im Vergleich zu Variante A ändern sich durch die Sammelschientrennung die Übergabeleistungen an den Umspannwerken geringfügig. Die durch das 110-kV-Netz erzeugte Blindleistung ändert sich ebenfalls geringfügig, hervorgerufen durch die Spannungsänderung an einigen Knoten auf Grund der Sammelschientrennung. Die Einspeisung durch Generatoren und die Last bleibt unverändert.

Die durch die Abschaltung einer oder beider Drosseln im Umspannwerk B entstehende Blindleistungsänderung ist sehr ähnlich wie in Variante A. Da eine Trennstelle das Umspannwerk A ist, muss allerdings unterschieden werden in welchem Teilnetz die Drosselabschaltung stattfindet. Im Vergleich zur Variante A ändern sich die Ergebnisse für die Drosselabschaltung im Umspannwerk A nur geringfügig, da bei der Ost- /Westunterscheidung der Drosselabschaltung sich die Ergebnisse in unterschiedliche Richtungen ändern, entsteht hier ein größerer Unterschied. Eine Drosselabschaltung eines Regelhauptumspanners, der mit dem Ostnetz gekoppelt ist, hat auf das Umspannwerk B einen größeren Einfluss als ein mit dem Westnetz gekoppelter Regelhauptumspanner. Grund dafür sind unterschiedliche Koppelimpedanzen, die durch die Sammelschientrennung entstehen.

Blindleistungsreduktion durch Kraftwerke

Beschreibung	ΔQ_{KW}	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%
WKW 1	6,5	1,6	0,8	-0,3	25	13
WKW 2	9,8	3,0	1,6	-0,4	31	16
WKW 3	9,0	3,3	1,7	-0,4	36	19
WKW 4	6,9	3,0	1,6	-0,3	43	23
WKW 5	15,3	9,4	3,7	-0,4	62	24
WKW 6	7,7	4,5	2,1	-0,3	58	27
WKW 7	8,1	4,6	2,3	-0,4	57	29
WKW 8	8,1	4,6	2,4	-0,3	56	29
WKW 9	8,1	4,5	2,5	-0,6	55	30
WP	10	7,1	1,4	-0,6	71	14

Tabelle 10: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit Kraftwerken für das Szenario 1, Variante B

Aufgrund der Sammelschientrennung ergeben sich für die Wasserkraftwerke ab dem WKW 4 geringfügig steigende Einflüsse auf das Umspannwerk B und geringere Einflüsse auf das Umspannwerk A, bezogen auf die Variante A. Grund dafür sind die Orte der Sammelschientrennung, denn diese liegen beide auf dem Leitungssystem, welche die Kraftwerke mit dem Umspannwerk A verbinden. Dadurch erhöht sich die Impedanz der Leitungsverbindung zwischen den Kraftwerken und dem Umspannwerk A.

Blindleistungsreduktion durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel im 110-kV-Netz

Standort	$Q_{Drossel}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$	S_K''
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%	MVA
UW B	50,00	18,5	28,1	-1,3	37	56	4240
UW G		28,9	16,1	-1,4	58	32	4800
UW H		20,0	26,0	-1,6	40	52	3700

Tabelle 11: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel für das Szenario 1, Variante B

Da durch die Sammelschientrennung der Vermaschungsgrad zwischen Osten- und Westen des Netzes abnimmt, ist auch die Wirkung einer zusätzlichen Kompensationsdrossel auf das kritische Umspannwerk prinzipiell größer. Da die Sammelschientrennung nur an wenigen Umspannwerken vollzogen wird, sind die Auswirkungen dieser sehr gering. Es ist nur 1% mehr Wirkung auf das Umspannwerk B zu erwarten. Durch die Sammelschientrennung sinken auch die Kurzschlussleistungen. Am stärksten ausgeprägt ist die Reduktion der Kurzschlussleistung im Umspannwerk G, deshalb ist in diesem Umspannwerk die stationäre Spannungsänderung auch höher als in Variante A.

Blindleistungsreduktion durch Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner

Stufenänderung	$\Delta P_{UW A}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta P_{UW B}$	$\Delta Q_{UW B}$
-	MW	MVar	MW	MVar
UW A +1	-24,5	-10	15,1	7,4
UW A -1	25,1	10	-15,5	-7,3
UW B +1	13,6	8,3	-17,7	-8,8
UW B -1	-14,1	-8,1	18,2	8,6

Tabelle 12: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch Änderung der Trafostufen der RHU für das Szenario 1, Variante B

Die Ergebnisse durch die Trafostufenänderung sind bei dieser Variante nahezu ident wie die in Tabelle 6 angeführten Ergebnisse ohne Sammelschientrennung. Die Sammelschientrennung an zwei Umspannwerken beeinflusst die Blindleistungsänderung durch die Trafostufen der Regelhauptumspanner daher nicht.

3.4.3 Blindleistungsreduktion von mehreren Kraftwerken

Variante	Summe aus Tabelle 4		Gleichzeitige Blindleistungsänderung mehrerer Kraftwerke	
	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$
-	MVar	MVar	MVar	MVar
Variante A (ohne Sammelschientrennung)	31,2	13,4	31,3	13,4
Variante B (Sammelschientrennung an zwei Umspannwerken)	30,5	14,5	30,6	14,6

Tabelle 13: Reduktion der Einspeiseblindleistung bei mehreren Kraftwerken

In Tabelle 13 wurde bei allen Laufkraftwerken flussabwärts ab WKW 4 gleichzeitig eine Reduktion der Blindleistung durchgeführt. Anschließend wurden Blindleistungsübergaben der Umspannwerke A und B mit zwei Methoden berechnet:

- Die erste Methode summiert die Auswirkungen aus Tabelle 4 ab WKW4
- Bei der zweiten Methode wurde bei allen Laufkraftwerken ab WKW 4 die Einspeiseblindleistung gleichzeitig reduziert und anschließend die Blindleistungsübergaben berechnet

Es ist zu erkennen, dass die Abweichung zwischen den addierten- und simulierten Ergebnissen sehr gering ist. Die Auswirkungen der einzelnen Kraftwerke können daher separat betrachtet werden und bei Bedarf addiert werden.

3.4.4 Erkenntnisse für weitere Berechnungen

- Da die Auswirkungen der Sammelschienentrennung gering sind, wurde diese Variante in den weiteren Szenarien nicht zusätzlich berechnet.
- Gewisse Kraftwerke speisen im 110-kV-Netz nahe aneinander ein und haben daher auch ähnliche Auswirkungen. In den weiteren Szenarien wurden daher, repräsentativ, die Wasserkraftwerke 1 (Norden), 4, 5 und 8 (Süden) betrachtet.

3.5 Szenario 2: Maximale Blindleistungsrückspeisung des Umspannwerkes B

Dieses Szenario wurde mit dem Ziel eine Lastflusssituation mit einer möglichst großen Blindleistungsrückspeisung im Umspannwerk B zu erhalten ausgewählt. Es repräsentiert einen Wochenendtag im Dezember mit folgenden Daten:

- Gesamtlast: 840 MW
- Einspeisung durch Wasserkraftwerke: 235 MW
- Einspeisung durch thermische Kraftwerke: 180 MW
- Aktive Kompensationsdrosseln: 2x50 MVar im Umspannwerk B
- Transformatorstufen: Umspannwerk A Stufe 14, Umspannwerk B Stufe 19

Schaltung der Kompensationsdrosseln

Blindleistungserzeugung/ Blindleistungsübergabe	Ausgangssituation	Abschaltung 50 MVar im UW B	Abschaltung 100 MVar im UW B	Zuschaltung 100 MVar im UW A & Abschaltung 100 MVar im UW B
	Q	ΔQ		
	MVar	MVar		
110-kV-Netz	93,7	2,5	4,8	1,9
Last + MS-Netze	33,2	0	0	0
Generatoren	65	0	0	0
Übergabe an APG	-192	-2,5	-4,8	-1,9
$Q_{UW A}$ (135 MVar Limit)	43,2	-17,6	-35,9	-69,8
$Q_{UW B}$ (45 MVar Limit)	-110,8	24,3	49,7	68
$Q_{UW C}$	107,5	-5,8	-11,7	0,1

Tabelle 14: Einfluss der Kompensationsdrosseln für das Szenario 2

Im Umspannwerk B findet eine Blindleistungsübergabe statt, die den Grenzwert weit überschreitet, obwohl im Vergleich zu Szenario 1 durch die Mittelspannungsnetze inkl. Last weniger Blindleistung erzeugt wird. Aus Tabelle 14 ist erkenntlich, dass alleine durch die beiden Kompensationsdrosseln im Umspannwerk B einen Blindleistungsexport von 49,7 MVar auf der 110-kV-Seite der Transformatoren verursachen. Durch eine Verlagerung der Kompensation in das Umspannwerk A könnte hier beispielsweise in dem Umspannwerk B die Blindleistungsrückspeisung um 68 MVar gesenkt werden.

Ein weiterer Grund für die hohe Blindleistungsübergabe sind die unterschiedlichen Stufenstellungen bzw. die Differenz der Stufen der Regelhauptumspanner der Umspannwerke A und B. Dadurch wird der Blindleistungslastfluss in das Umspannwerk B verlagert. Für den Wirkleistungslastfluss kann dieser Unterschied jedoch notwendig sein.

Blindleistungsreduktion durch Kraftwerke

Beschreibung	ΔQ_{KW}	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%
WKW 2	4,2	1,3	0,8	-0,2	31	19
WKW 4	3	1,3	0,8	-0,2	43	27
WKW 5	6,6	4,1	1,6	-0,2	62	24
WKW 8	3,5	2	1	-0,2	57	28
FHKW	56	34,9	13,3	-1,3	62	24
WP	10	6,9	1,9	-0,6	69	19

Tabelle 15: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit Kraftwerken für das Szenario 2

In diesem Szenario wird durch Wasserkraft deutlich weniger Leistung eingespeist als in Szenario 1, daher ergibt sich auch weniger Potential zur Blindleistungsreduktion durch diese Kraftwerke. Durch eine Reduktion des Leistungsfaktors auf 0,95 untererregt, ergeben sich geringerer Werte für ΔQ_{KW} und daher auch geringere Auswirkungen auf die betrachteten Umspannwerke.

Mit dem Fernheizkraftwerk ist in diesem Szenario auch ein thermisches Kraftwerk in Betrieb. Durch die höhere Kraftwerksleistung ergibt sich auch eine größere Möglichkeit zur Reduktion der Blindleistung. Dieses Kraftwerk speist auf dieselbe Sammelschiene ein, wie das WKW 5 -deshalb sind die Wirkungsfaktoren ident.

Für den Windpark wurde wieder eine Änderung von $\Delta Q_{KW} = 10$ MVar angenommen. Die Auswirkungen auf die Umspannwerke sind dabei ident mit den Werten aus Szenario 1.

Die Wirkungsfaktoren ändern sich geringfügig ($\pm 2-3\%$ je Kraftwerk) im Vergleich zum Szenario 1, da sich Last-/Einspeiseverhalten sowie die Transformatorstufen und die Anzahl der Kompensationsspulen in Betrieb sich ändern.

Blindleistungsreduktion durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel im 110-kV-Netz

Standort	$Q_{Drossel}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$	S_K''
-	Mvar	MVar	MVar	kV	%	%	MVA
UW B	50,00	17,6	28,4	-1,4	35	57	4440
UW G		28,1	16,4	-1,3	56	33	5300
UW H		19	26,3	-1,6	38	53	3850

Tabelle 16: Beeinflussung des Blindleistungsaustausch durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel für das Szenario 2

Die Ergebnisse sind dem Szenario 1 sehr ähnlich. Aufgrund unterschiedlicher Transformatorstufen und anderem Kompensationsdrosselbetrieb ergeben sich geringfügige Unterschiede.

Blindleistungsreduktion durch Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner

Stufenänderung	$\Delta P_{UW A}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta P_{UW B}$	$\Delta Q_{UW B}$
	MW	MVar	MW	MVar
UW A +1	-23,9	-11,6	14,8	8
UW A -1	24,5	11,6	-15,1	-7,8
UW B +1	13	8,5	-16,7	-8,6
UW B -1	-13,3	-8,5	17,2	8,6

Tabelle 17: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch Änderung der Trafostufen der RHU für das Szenario 2

Auch bei den Wirk- und Blindleistungsänderungen pro Trafostufe sind nur geringe Unterschiede im Vergleich zu Szenario 1 zu beobachten. Diese Unterschiede ergeben sich aufgrund der anderen Last und der Schaltung der Kompensationsdrosseln.

3.6 Szenario 3: Hohe Blindleistungsrückspeisung des Umspannwerkes B ohne Betrieb einer Kompensationsdrossel

Da auch Grenzwertüberschreitungen des Umspannwerkes B auftreten, wenn dort keine Kompensationsdrossel in Betrieb ist, wurde solch ein Fall näher untersucht. Folgende Ausgangsdaten wurden verwendet.

- Gesamtlast: 810 MW
- Einspeisung durch Wasserkraftwerke: 300 MW
- Einspeisung durch thermische Kraftwerke: 180 MW
- Keine aktiven Kompensationsdrosseln
- Transformatorstufen: Umspannwerk A Stufe 16, Umspannwerk B Stufe 21

Schaltung der Kompensationsdrosseln

Blindleistungserzeugung/ Blindleistungsübergabe	Ausgangssituation	Zuschaltung 50 MVar im UW B	Zuschaltung 100 MVar im UW B	Zuschaltung 100 MVar im UW A
	Q	ΔQ		
	MVar	MVar		
110-kV-Netz	87,9	-2,4	-5	-3,1
Last + MS-Netze	13,9	0	0	0
Generatoren	77	0	0	0
Übergabe an APG	-178,8	2,4	5,1	3,1
$Q_{UW A}$ (135 MVar Limit)	6,1	17,5	34,5	-27,16
$Q_{UW B}$ (-45 MVar Limit)	-61,5	-24,3	-47,5	18,1
$Q_{UW C}$	-128,7	5,6	11,2	11,6

Tabelle 18: Einfluss der Kompensationsdrosseln für das Szenario 3

Da in diesem Szenario keine Kompensationsdrosseln in Betrieb sind, wurden die Auswirkungen von Zuschaltungen von Kompensationsdrosseln in Tabelle 18 berechnet. Ähnlich wie in Szenario 2 beträgt die Differenz der Stufen der Regelhauptspanner 5 Stufen. Daher wird der Blindleistungsfluss in Richtung des Umspannwerkes B verlagert. Die Blindleistungserzeugungen durch das Netz verhalten sich ähnlich wie in Szenario 2. Durch Zuschaltungen von Kompensationsdrosseln im Umspannwerk B würden die Blindleistungsrückspeisungen um ca. 25 MVar pro Drossel steigen. Das entspricht den selben Werten wie in den anderen Szenarien. Die Schaltung einer Kompensationsdrossel im Umspannwerk A würde die Blindleistungsrückspeisung im Umspannwerk B um ca. 18 MVar senken.

Blindleistungsreduktion durch Kraftwerke

Beschreibung	ΔQ_{KW}	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%
WKW 2	5,7	1,7	0,9	-0,3	30	16
WKW 4	4	1,7	0,9	-0,2	42	22
WKW 5	8,9	5,5	1,9	-0,2	62	21
WKW 8	4,7	2,7	1,3	-0,3	57	27
FHKW	54,5	34,6	12,4	-1,2	63	23
WP	10	6,7	1,8	-0,6	67	18

Tabelle 19: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit Kraftwerken für das Szenario 3

Ähnlich wie in den vorhergehenden Szenarien ändern sich durch die unterschiedliche eingespeiste Leistung die Übergabeblindleistungen der Umspannwerke A und B. Die Wirkungsfaktoren bleiben hierbei im Vergleich zu den vorhergehenden Szenarien gleich.

Blindleistungsreduktion durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel im 110-kV-Netz

Standort	Q_{Drossel}	$\Delta Q_{\text{UW A}}$	$\Delta Q_{\text{UW B}}$	ΔU	$q_{\text{UW A}}$	$q_{\text{UW B}}$	S_{K}''
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%	MVA
UW B	50,00	18,2	27,3	-1,4	36	55	4440
UW G		28,5	15,6	-1,3	57	31	5300
UW H		19,6	25,3	-1,7	39	51	3850

Tabelle 20: Beeinflussung des Blindleistungsaustausch durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel für das Szenario 3

Für diese Lastsituation wirken sich die zusätzlichen Kompensationsdrosseln auf die Umspannwerke A und B ähnlich aus, wie in den vorhergehenden Szenarien.

Blindleistungsreduktion durch Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner

Stufenänderung	$\Delta P_{\text{UW A}}$	$\Delta Q_{\text{UW A}}$	$\Delta P_{\text{UW B}}$	$\Delta Q_{\text{UW B}}$
-	MW	MVar	MW	MVar
UW A +1	-23	-11,3	14,2	7,9
UW A -1	23,5	11,3	-14,6	-7,9
UW B +1	12,4	8,7	-16,1	-9,1
UW B -1	-12,8	-8,7	16,5	9,1

Tabelle 21: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch Änderung der Trafostufen der RHU für das Szenario 3

Die Einflüsse, die durch die Stufenstellungen der Regelhauptumspanner der Umspannwerke A und B entstehen, sind ähnlich wie in den Szenarien 1 und 2. Da eine andere Lastsituation im Netz vorherrscht entstehen geringe Abweichungen zu den vorherigen Szenarien.

3.7 Einfluss der vorhandenen Kompensationsdrosseln

3.7.1 Umspannwerk A

Wie in den Lastflussszenarien gezeigt wurde, steigt bei einer Zuschaltung einer Drossel an den Tertiärwicklungen der Regelhauptumspanner des Umspannwerkes A der Blindleistungsexport in das Übertragungsnetz lokal um ca. 35% der durch die Drossel benötigten Blindleistung. Gleichzeitig sinkt der Blindleistungsexport im Umspannwerk B um ca. 20% und im Umspannwerk C um ca. 15% der Drosselblindleistung. Vom Übertragungsnetz werden 65% der durch die Drossel benötigten Blindleistung im Umspannwerk A bezogen.

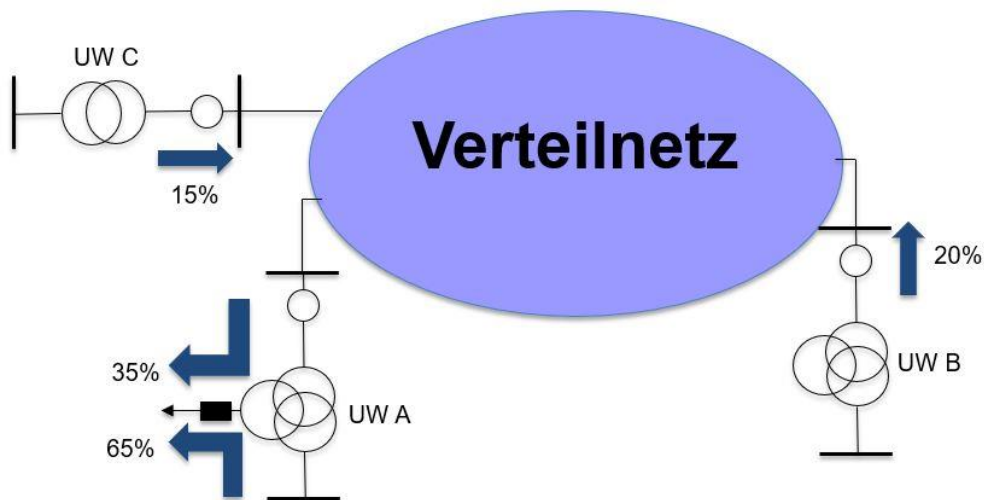


Abbildung 21: Blindleistungsfluss bei Zuschaltung einer Drossel im Umspannwerk A in Prozent der zugeschalteten Drosselblindleistung

3.7.2 Umspannwerk B

Bei einer Zuschaltung einer Drossel an den Tertiärwicklungen der Regelhauptumspanner des Umspannwerkes B steigt der Blindleistungsexport in das Übertragungsnetz lokal um ca. 50% der durch die zugeschaltete Drossel benötigten Blindleistung. Gleichzeitig sinkt der Blindleistungsexport im Umspannwerk A um ca. 40% und im Umspannwerk C um ca. 10% der Drosselblindleistung. 50% der durch die Drossel benötigten Blindleistung werden im Umspannwerk B vom Übertragungsnetz bezogen.

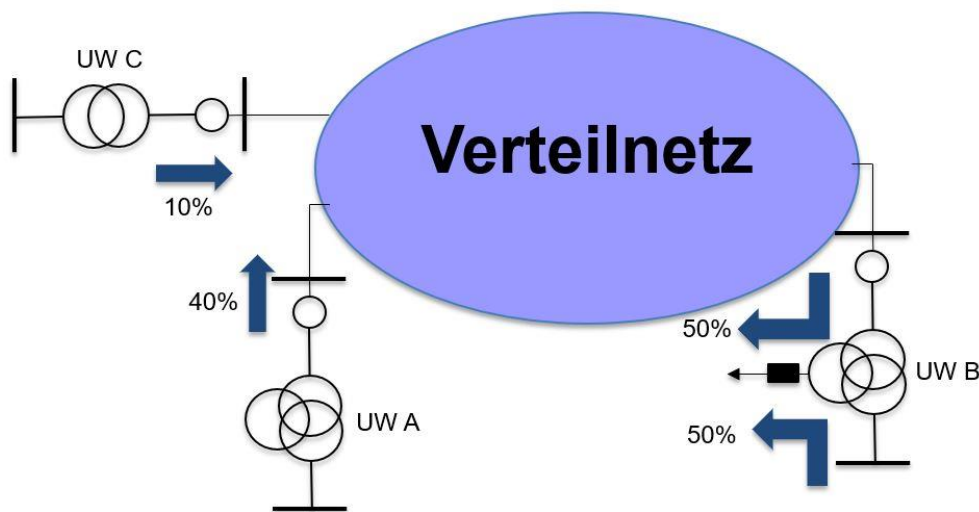


Abbildung 22: Blindleistungsfluss bei Zuschaltung einer Drossel im Umspannwerk B in Prozent der zugeschalteten Drosselblindleistung

Durch die Fallunterscheidung ob keine, eine, oder beide Drosseln in Betrieb sind, wurde der Blindleistungsaustausch dieses Umspannwerkes um den durch die Drosseln verursachten Beitrag „korrigiert“.

Wenn man dieses „korrigierte“ P-Q-Diagramm in Abbildung 23 mit den gemessenen Übergabebindleistungen des Umspannwerkes B vergleicht erkennt man, dass wesentlich weniger Viertelstundenwerte außerhalb der Grenzwerte liegen und auch die Grenzwertüberschreitungen weniger stark ausgeprägt sind.

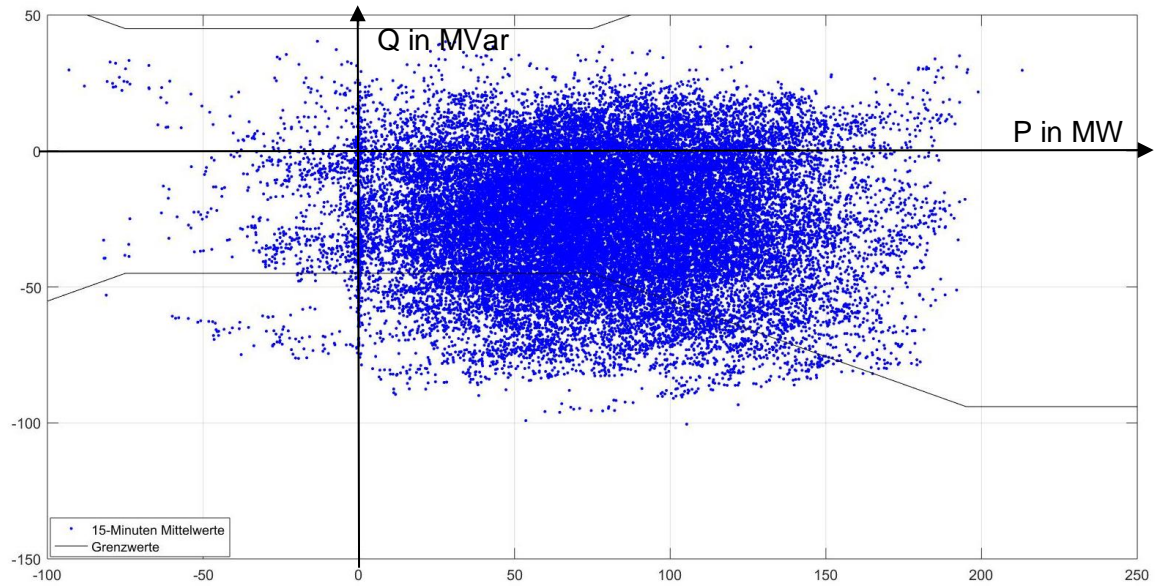


Abbildung 23: P-Q-Diagramm des UW B ohne Einfluss von Kompensationsdrosseln in diesem UW

Berücksichtigt man nun auch die Kompensationsdrosseln des Umspannwerkes A erhält man ein um alle Kompensationsdrosseln korrigiertes P-Q-Diagramm.

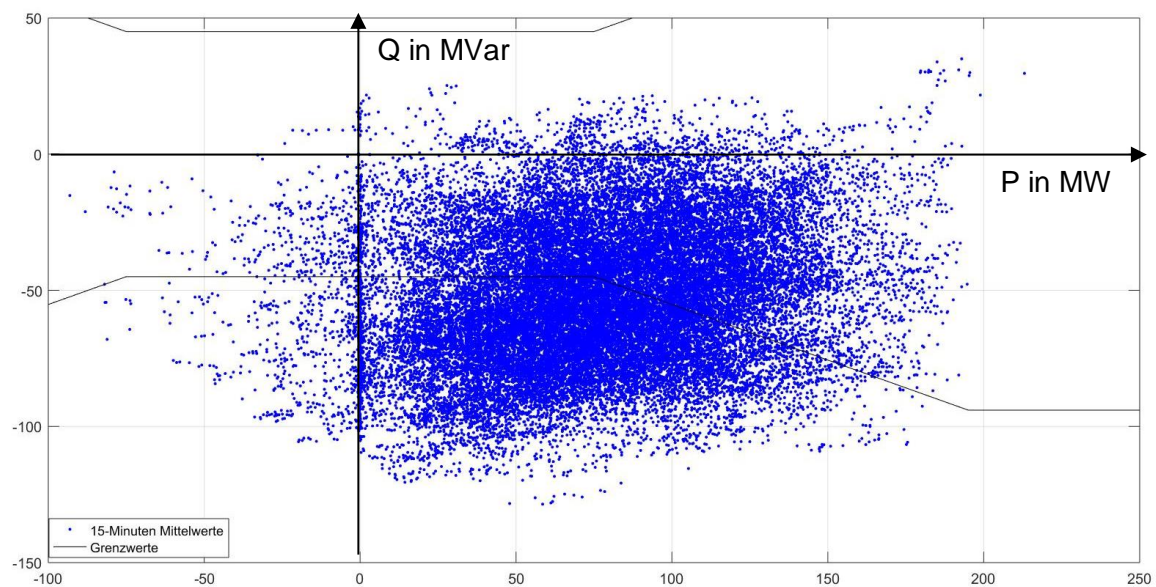


Abbildung 24: P-Q-Diagramm des UW B ohne Kompensationsdrosseln im Netz

3.8 Einfluss des GuD-Kraftwerkes

3.8.1 Beeinflussung des Blindleistungsaustausches

Abhängig von der eingespeisten Leistung und vom Leistungsfaktor sind die Auswirkungen auf die Umspannwerke A und B dargestellt. Aufgrund der hohen installierten Leistung sind die Möglichkeiten der Blindleistungsbeeinflussung wesentlich höher als durch ein Wasserkraftwerk. Die Nutzungsfaktoren weichen nur gering von denen des Wasserkraftwerkes 5 ab, da diese auf dieselbe Sammelschiene einspeisen.

Beschreibung	ΔQ_{KW}	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%
$\cos(\varphi)=0,95$ u $P=0,9$ p.u.	131,9	88,0	30,0	-2,9	67	23
$\cos(\varphi)=0,98$ u $P=0,9$ p.u.	94,5	62,1	21,1	-2,0	66	22

Tabelle 22: Beeinflussung der Übergabebindleistung durch das GuD-Kraftwerk

3.8.2 Auswirkungen des Betriebes auf andere Maßnahmen zur Beeinflussung des Blindleistungsaustausches

Schaltung der Kompensationsdrosseln

Blindleistungserzeugung/ Blindleistungsübergabe	Ausgangssituation	Abschaltung 50 MVar im UW B	Abschaltung 100MVar im UW B	Abschaltung 100MVar im UW A
	Q	ΔQ		
	MVar	MVar		
110-kV-Netz	54,2	2,4	4,5	4,5
Last + MS-Netze	167,9	0	0	0
Generatoren	133,8	0	0	0
Übergabe an APG	-355,9	-2,4	-4,4	-4,5
$Q_{UW A}$	-125,9	-18,2	-38,4	32
$Q_{UW B}$	-79,4	25,7	52,7	-18,3
$Q_{UW C}$	-120,1	-5,7	-11,6	-11,5

Tabelle 23: Einfluss der Kompensationsdrosseln bei Betrieb des GuD-Kraftwerkes

Die Auswirkungen der Drosselschaltungen an den Tertiärwicklungen der Regelhauptumspanner in den Umspannwerken A und B ändern sich durch den Betrieb des GuD-Kraftwerkes nicht. Im Vergleich zum Szenario 1 sinkt die Blindleistungserzeugung durch das 110-kV-Netz um 40 MVar aufgrund der stärkeren Auslastung einiger Freileitungen. Da dieses Kraftwerk in das 110-kV-Netz einspeist gibt es keinen Einfluss auf die Last und die Blindleistungserzeugung durch die Mittelspannungsnetze.

Blindleistungsreduktion durch Kraftwerke

Beschreibung	ΔQ_{KW}	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%
WKW 2	9,8	3	1,6	-0,4	31	16
WKW 4	6,9	3	1,6	-0,3	43	23
WKW 5	15,3	9,8	3,3	-0,4	64	22
WKW 8	8,1	7,4	2,2	-0,5	58	27
WP	10	7	1,7	-0,6	70	17

Tabelle 24: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch Kraftwerke bei gleichzeitigen Betrieb des GuD-Kraftwerkes

Die Änderungen des Blindleistungsaustausches sind mit denen des Szenarios 1 in Tabelle 4 bis auf geringe Abweichungen ident. Daher kann die Aussage getroffen werden, dass die Blindleistungsbeeinflussungen der einzelnen Kraftwerke auf die Umspannwerke A und B unabhängig vom Betrieb des GuD-Kraftwerkes sind.

Blindleistungsreduktion durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel im 110kV-Netz

Standort	$Q_{Drossel}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$	S_k''
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%	MVA
UW B	50,00	19	27,7	-1,4	38	55	4570
UW G		29,7	15,6	-1,3	59	31	5590
UW H		20,5	25,7	-1,6	41	51	3950

Tabelle 25: Beeinflussung des Blindleistungsaustausch durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel bei Betrieb des GuD-Kraftwerkes

Auch bei dieser Methode ändern sich die Auswirkungen durch den Betrieb des GuD-Kraftwerkes nur geringfügig. $\Delta Q_{UW A}$ wird geringfügig größer im Vergleich zu Szenario 1, die Änderungen sind jedoch kleiner als 0,5 MVar. $\Delta Q_{UW B}$ ändert sich durch den Betrieb des GuD-Kraftwerkes nicht.

Blindleistungsreduktion durch Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner

Stufenänderung	$\Delta P_{UW A}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta P_{UW B}$	$\Delta Q_{UW B}$
-	MW	MVar	MW	MVar
UW A +1	-24,4	-10,5	14,9	7,5
UW A -1	24,8	10,6	-15,3	-7,5
UW B +1	13,3	8,7	-17,5	-9,1
UW B -1	-13,9	-8,5	18	9

Tabelle 26: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch Änderung der Trafostufen der RHU bei betrieb des GuD-Kraftwerkes

Die Änderungen der Auswirkungen einer Blindleistungsreduktion mittels Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner ändern sich durch den Betrieb des GuD-Kraftwerkes nicht signifikant.

3.9 Ausblick auf den Netzbetrieb mit 3 Teilnetzen

Bei einem Betrieb mit drei Teilnetzen ändern sich die Voraussetzungen für den Lastfluss grundlegend. Im Zuge dieser Arbeit sind das Ostnetz und das Westnetz von Interesse. Durch die Netztopologie bestehen verschiedene Möglichkeiten für die Schaltung der Teilnetzte. Die Umspannwerke, an denen die Netztrennung durchgeführt wird, sind zwar vorgegeben, allerdings kann durch die Schaltung der Sammelschienen und deren Abgänge die Topologie der Teilnetze etwas variiert werden. Für diesen Ausblick wurden die Zuteilungen der Sammelschienen zu den Teilnetzen wie im ursprünglichen Datenbestand belassen. Dadurch ergeben sich für die Teilnetze folgende Besonderheiten:

- Westnetz: Da das Umspannwerk C vollständig dem Nordnetz zugeordnet ist, hat das Westnetz mit dem Umspannwerk A nur eine Übergabestelle zum Übertragungsnetz. Kraftwerke die in das Westnetz einspeisen haben daher keine Auswirkungen auf das Umspannwerk B.
Es wäre auch möglich das Westnetz über das Umspannwerk C mit dem Übertragungsnetz zu verbinden.
- Ostnetz: Das Ostnetz wird über die Umspannwerke A und B mit dem Übertragungsnetz verbunden.

Das Umspannwerk A verbindet im Falle eines Betriebes mit Teilnetzen zwei Teilnetze mit dem Übertragungsnetz. Für die Betrachtung des Blindleistungsaustausches des Umspannwerkes ist nur der gesamte Blindleistungsaustausch des Umspannwerkes relevant. In den vorhergehenden Berechnungen konnte gezeigt werden, dass zwar das Potential zur Beeinflussung des Blindleistungsaustausches von der Lastsituation bzw. der Erzeugungssituation abhängt, die Wirkungsfaktoren der Kraftwerke jedoch wenig von der Last- bzw. Erzeugungssituation beeinflusst werden. Daher wurde ein Szenario näher untersucht um die Auswirkungen zu berechnen. Für andere Lastsituationen wurden nur die grundsätzlichen Änderungen durch den Teilnetzbetrieb betrachtet.

3.9.1 Lastflussszenario

Als Beispiel wurden dieselben Grundvoraussetzungen wie in Szenario 1 angenommen.

Schaltung der Kompensationsdrosseln

Blindleistungserzeugung/ Blindleistungsübergabe	Ausgangssituation		Abschaltung 50 MVar im UW B	Abschaltung 100 MVar im UW A (Ost)	Abschaltung 100 MVar im UW A (West)
	Ost	West			
	Q	Q	ΔQ		
	MVar	MVar	MVar		
110-kV-Netz	41,9	52,6	2	2,6	5,5
Last + MS-Netze	36,8	41,3	0	0	0
Generatoren	24,6	14,6	0	0	0
Übergabe an APG	-103,3	-108,5	-1,9	-2,5	-5,4
$Q_{UW A}$	-108,5	-26,3	-19	33,7	-2,9
$Q_{UW B}$	-77	-	17	-36,3	-2,6

Tabelle 27: Einfluss der Kompensationsdrosseln bei Teilnetzbetrieb

Durch den Betrieb mit Teilnetzen wurden in Tabelle 27 nur mehr die relevanten Teilnetze und deren Blindleistungsbilanz dargestellt. Die beiden dargestellten Teilnetze sind sich in der Blindleistungserzeugung und der Blindleistungsübergabe an das Übertragungsnetz ähnlich.

Durch die Drosselabschaltungen im Umspannwerk B sinkt die Blindleistungsübergabe an der 110-kV-Seite der Regelhauptumspanner mit 17 MVar um ca. 1/3 der abgeschalteten Blindleistung (zum Vergleich: ohne Netztrennung sinkt die Blindleistungsübergabe um ca. 50%). Wie auch ohne Teilnetzbetrieb ändert die Drosselabschaltung nichts an der Blindleistungsbilanz des Netztes.

Bei Drosselschaltungen im Umspannwerk A muss nach Teilnetz unterschieden werden. Bei Drosselschaltungen im Westnetz entsteht durch die Drosselschaltung nahezu kein Unterschied in der Blindleistungsbilanz, da dieses Teilnetz nur durch ein Umspannwerk versorgt wird und somit keine Blindleistungsastflüsse von einem anderen Umspannwerk erfolgen können. Bei Drosselschaltungen im Ostnetz sinkt die Übergabeblindleistung ähnlich wie in den vorhergehenden Szenarien um 36,3 MVar, was in etwa einem Drittel der geschalteten Blindleistung entspricht.

Wenn das Westnetz auch im Umspannwerk C an das Übertragungsnetz angebunden wird, sinkt der Blindleistungsaustausch des Umspannwerkes A um 20 MVar.

Die geringen Auswirkungen von Drosselschaltungen auf das andere Teilnetz ergeben sich durch Spannungsänderungen auf der 380-kV-Seite der Regelhauptumspanner, da sich hier die Umspanner von Ost- und Westnetz auf einer Sammelschiene befinden und somit verbunden sind.

Blindleistungsreduktion durch Kraftwerke

Beschreibung	ΔQ_{KW}	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%
WKW 4	6,9	6,9	0,2	-0,7	100	3
WKW 5	15,3	9,6	6,3	-0,5	63	41
WKW 8	8,1	4,7	3,7	-0,6	58	45
WP	10	10,2	0,3	-0,8	102	3

Tabelle 28: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit Kraftwerken bei Teilnetzbetrieb

Der Windpark und das WKW 4 speisen in das Westnetz ein, welches nur über das Umspannwerk A mit dem Übertragungsnetz verbunden ist. Daher wirken sich die Blindleistungsreduktionen dieser Einspeiser nur in diesem Umspannwerk aus. Die geringen Einflüsse auf das andere Teilnetz ergeben sich wieder durch Spannungsänderungen auf der 380-kV-Seite der Transformatoren.

Die Wasserkraftwerke 5 und 8 speisen in das Ostnetz ein, daher wirken sich Blindleistungsreduktionen dieser Kraftwerke auf die Umspannwerke A und B aus. Die Wirkungsfaktoren der Kraftwerke auf das Umspannwerk A sind ähnlich wie bei Betrieb mit einem Netz (Szenario 1), die Wirkungsfaktoren auf das Umspannwerk B steigen hingegen deutlich an.

Der in Absatz 3.4.1.1 beschriebene Effekt, dass die Summe der Blindleistungsänderungen der Umspannwerke größer sind als die Blindleistungsreduktion der Kraftwerke kann in den (kleineren) Teilnetzen besonders gut beobachtet werden.

Durch die Auftrennung des Netzes in Teilnetze nimmt die Kurzschlussleistung in den Netzknoten ab, daher entsteht durch die gleiche Reduktion der Blindleistungseinspeisung eines Kraftwerkes wie in Szenario 1 eine größere Spannungsänderung an diesem Netzknoten (vgl. Absatz 1.3).

Einflüsse des GuD-Kraftwerkes wurden in diesem Szenario nicht angeführt. Die berechneten Wirkungsfaktoren sind jedoch ähnlich wie jene des Wasserkraftwerks 5, da die beiden Kraftwerke auch bei einem Betrieb mit Teilnetzen in das gleiche Teilnetz einspeisen.

Blindleistungsreduktion durch eine zusätzliche Kompensationsdrossel im 110-kV-Netz

Standort	$Q_{Drossel}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta Q_{UW B}$	ΔU	$q_{UW A}$	$q_{UW B}$	$S_{K''}$
-	MVar	MVar	MVar	kV	%	%	MVA
UW B	50,00	19,1	36,3	-1,7	38	73	3275
UW G		28,7	28,1	-2,0	57	56	3010
UW H		20,3	35	-2,1	40	70	2810

Tabelle 29: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches mit zusätzlichen Kompensationsdrosseln bei Teilnetzbetrieb

Aufgrund des Teilnetzbetriebes steigen die Impedanzen der möglichen Drosselstandorte zum Umspannwerk A. Dadurch haben die zusätzlichen Kompensationsdrosseln einen größeren Einfluss auf das Umspannwerk B als im Betrieb mit einem Gesamtnetz. Der wirksamste Drosselstandort ist, nach wie vor, das Umspannwerk B. Aufgrund der geringeren Kurzschlussleistungen in den Netzknoten entsteht durch die Drosselzuschaltung ein größerer Spannungsunterschied.

Blindleistungsreduktion durch Änderung der Trafostufen der Regelhauptumspanner

Stufenänderung	$\Delta P_{UW A}$	$\Delta Q_{UW A}$	$\Delta P_{UW B}$	$\Delta Q_{UW B}$
-	MW	MVar	MW	MVar
UW A +1	-14,1	-6,6	14	6,3
UW A -1	14,4	6,7	-14,4	-6,3
UW B +1	12,7	7,2	-12,6	-6,1
UW B -1	-13,1	-7,1	12,9	6

Tabelle 30: Beeinflussung des Blindleistungsaustausches durch Änderung der Trafostufen der RHU bei Teilnetzbetrieb

Da das Umspannwerk A Umspanner für das Ost- und Westnetz besitzt, wurden in diesem Beispiel nur die Umspanner des Ostnetzes betrachtet.

Eine Stufenänderung der Regelhauptumspanner im Umspannwerk A hat auf die Übergabewirk- und Blindleistungen einen um den Faktor 1/3 geringeren Einfluss im Vergleich zum Szenario 1, da durch die Teilnetze auch weniger Leistung über die Umspanner transportiert wird. Die Einflüsse einer Stufenänderung der Regelhauptumspanner des Umspannwerkes A auf das Umspannwerk B sind vergleichbar mit den Ergebnissen aus Szenario 1.

Eine Stufenänderung der Regelhauptumspanner des Umspannwerkes B beeinflusst, im Vergleich zu Szenario 1, die Übergabewirk- und Blindleistungen in gleichen Maßen. Aufgrund der geringeren transportierten Leistung ergeben sich geringfügige Unterschiede.

3.9.2 Änderungen durch den Betrieb mit 3 Teilnetzen

	Gesamtnetz		Teilnetzbetrieb		
	$Q_{UW A}$	$Q_{UW B}$	$Q_{UW A West}$	$Q_{UW A Ost}$	$Q_{UW B}$
	MVar	MVar	MVar	MVar	MVar
Szenario 1	-123,5	-81,4	-108,5	-26,3	77
Szenario 1 inkl. GuD-KW	-125,9	-79,4	-108,4	-23,1	-66,3
Szenario 2	43,2	-110,8	-65,2	41,5	-94,8
Szenario 3	6,1	-61,5	-58,6	7,4	-59,4

Tabelle 31: Änderung des Blindleistungsaustausches bei Teilnetzbetrieb

Die Blindleistungsübergabe des Umspannwerkes B sinkt durch den Teilnetzbetrieb. Besonders wenn die Blindleistungsübergabe des Umspannwerkes B besonders groß ist, sinkt durch den Teilnetzbetrieb die Übergabeblindleistung um etwa 15%.

Die Blindleistungsübergabe des Umspannwerkes A in Tabelle 31 steigt im Vergleich zu dem Betrieb mit einem Gesamtnetz. Grund dafür ist, dass für diese Betrachtung das Westnetz nicht über das Umspannwerk C mit dem Übertragungsnetz verbunden wurde.

3.10 Einfluss der 380-kV-Leitung auf den Blindleistungsaustausch

Für diese Arbeit wurde der Einfluss der 380-kV-Freileitung des Übertragungsnetzes betrachtet. Die Abschaltung von 380-kV-Systemen ist im praktischen Netzbetrieb wegen der zu einhaltenden (n-1)-Sicherung nicht möglich und wird hier nur exemplarisch behandelt.

In Schwachlastzeiten wird aufgrund der geringen Auslastung durch die 380-kV-Leitung viel Blindleistung generiert. Daher wurde für die Schwachlastsituation aus Szenario 1 der Einfluss der 380-kV-Leitung untersucht. Da auch durch das Verteilnetz Blindleistung an das Übertragungsnetz übergeben wird, muss in weiterer Folge Blindleistung kompensiert werden, daher sind in diesem Szenario auch mehrere Kompensationsdrosseln in Betrieb.

Blindleistungserzeugung/ Blindleistungsübergabe	Ausgangssituation	Abschaltung eines Systems der 380-kV-Leitung
	Q	ΔQ
	MVar	MVar
110-kV-Netz	94,4	-3,3
380kV-Leitung	328,5	-198,2
Last + MS-Netze	167,9	0
Generatoren	104,9	0
Übergabe an APG	-367,2	3,3
$Q_{UW A}$	-123,5	-11,5
$Q_{UW A APG}$	165	-19,8
$Q_{UW B}$	-81,4	-0,2
$Q_{UW B APG}$	16,5	-2,7
$Q_{UW C}$	-125,6	10

Tabelle 32: Einflüsse der 380-kV-Leitung

Im Normalbetrieb ergibt die Blindleistungsbilanz der betrachteten 380-kV-Leitung (zwei Systeme) einen Blindleistungsüberschuss von 328,5 MVar. Nach Abschaltung eines Systems reduziert sich dieser auf 130,3 MVar. Dies ist weniger als die Hälfte des Ausgangswertes, da das verbleibende System entsprechend stärker belastet ist.

Die erzeugte Blindleistung durch das 110-kV-Netz ändert sich aufgrund der Spannungsänderung geringfügig und somit auch die Blindleistungsübergabe in das Übertragungsnetz. Auf der 380-kV-Seite der Regelhauptumspanner der Umspannwerke A und B ändert sich die Blindleistungsübergabe ebenfalls nur geringfügig.

Der Blindleistungsexport der Umspannwerke A und B steigt durch das Abschalten eines Systems der 380-kV-Leitung an, der Blindleistungsexport des Umspannwerkes C sinkt gleichzeitig. Grund dafür ist die Impedanzänderung des Übertragungsnetzes durch diese Maßnahme.

Für das Szenario 1 wurde angenommen, dass im Umspannwerk A drei Kompensationsdrosseln mit jeweils 100 MVar und im Umspannwerk B zwei Kompensationsdrosseln mit jeweils 50 MVar in Betrieb sind. Daher ergibt sich der Unterschied zwischen den Blindleistungen der 110-kV-Seite und der 380-kV-Seite der Regelhauptumspanner, da die Kompensationsdrossel an der Tertiärseite der Regelhauptumspanner angeschlossen sind und die kompensierte Blindleistung die Differenz der beiden Werte bildet.

Auch wenn der direkte Einfluss der Blindleistungserzeugung der 380-kV-Leitung auf das Verteilnetz gering ist, besteht dennoch ein Einfluss durch die Schaltungen der Kompensationsdrossel, da sich deren Einsatz durch die Lastsituation ändert. In Schwachlastzeiten sind mehr Kompensationsdrosseln in Betrieb um die, durch die 380-kV-Freileitung erzeugte Blindleistung, zu kompensieren. Der Einfluss, den die Kompensationsdrosseln auf den Blindleistungsaustausch zwischen Übertragungsnetz und Verteilnetz haben, wurde in den vorhergehenden Szenarien dargestellt.

4 Zusammenfassung

- Hoch- und Mittelspannungskabel erzeugen den größten Anteil der Blindleistung im 110-kV-Netz. Je geringer die Auslastung der Kabel ist, umso größer ist die erzeugte Blindleistung durch die Kabel. Deshalb wird in Schwachlastzeiten/Zeiten mit geringer Erzeugung viel Blindleistung durch das Netz generiert.
- Durch das Einschalten einer Drossel an der Tertiärwicklung der Regelhauptumspanner im Umspannwerk A steigt lokal der Blindleistungsexport an der 110-kV-Sammelschiene um ca. 35% der durch die zugeschaltete Drossel benötigten Blindleistung. Gleichzeitig sinkt der Blindleistungsexport im Umspannwerk B um ca. 20% und im Umspannwerk C um ca. 15% der Drosselblindleistung.
- Durch das Einschalten einer Drossel an der Tertiärwicklung der Regelhauptumspanner im Umspannwerk B steigt lokal der Blindleistungsexport an der 110-kV-Sammelschiene um ca. 50%, der durch die zugeschaltete Drossel benötigten Blindleistung. Gleichzeitig sinkt der Blindleistungsexport im Umspannwerk A um ca. 40% und im Umspannwerk C um ca. 10% der Drosselblindleistung.
- Die Wirkungsfaktoren der einzelnen Kraftwerke sind nahezu unabhängig von der Last- und Erzeugungssituation. Auch bei einer Sammelschientrennung in zwei Umspannwerken ändern sich die Wirkungsfaktoren nur geringfügig.
- Da die Wirkungsfaktoren für das kritische Umspannwerk gering sind, wirkt sich auch eine Blindleistungsreduktion bei Laufkraftwerken gering aus, vor allem wenn durch diese Kraftwerke wenig Leistung in das Netz eingespeist wird. Deshalb ist eine Blindleistungsreduktion an mehreren Kraftwerken notwendig um einen deutlichen Effekt beim kritischen Umspannwerk zu erzielen.
- Aufgrund der Netztopologie wirkt eine Drossel im östlichen Netzgebiet auch auf das Umspannwerk A. Um möglichst viel Wirkung im Umspannwerk B zu haben, sollte eine Drossel so nah wie möglich an diesem Umspannwerk sein.
- Eine Beeinflussung der Austauschblindleistung durch die Stufenschalter der Regelhauptumspanner ist möglich, aber aufgrund des Schrägregelbetriebes auch mit Einflüssen auf den Wirkleistungslastfluss verbunden.

- Der Betrieb des GuD-Kraftwerkes beeinflusst andere Maßnahmen zur Senkung des Blindleistungsaustausches mit dem Übertragungsnetz nicht. Aufgrund des unregelmäßigen Betriebes dieses Kraftwerkes ist eine Reduktion des Blindleistungsaustausches nicht immer möglich. Der Wirkungsfaktor für das kritische Umspannwerk liegt bei ca. 22% und ist daher auch gering. Da jedoch die Kraftwerksleistung sehr groß ist, kann dennoch eine Reduktion des Blindleistungsaustausches des Umspannwerkes B von ca. 30 MVar erzielt werden.
- Bei einem Betrieb mit drei Teilnetzen sinkt die Übergabebindleistung des Umspannwerkes B durch die Netztrennung. Die Kraftwerke, die in diesem Teilnetz einspeisen, haben aufgrund der geringeren Vermaschung eine größere Auswirkung auf den Blindleistungsaustausch. Eine Kompensationsdrossel im Ostnetz hat durch die Netztrennung einen stärkeren Einfluss auf das Umspannwerk B. Ein Einfluss auf das Umspannwerk A ist nach wie vor vorhanden.
- Der Einfluss der Kapazitäten der 380-kV-Freileitung des Übertragungsnetzes auf die Blindleistungsübergabe ist gering. Da jedoch der Betrieb der Kompensationsdrosseln abhängig von der erzeugten Blindleistung des Übertragungsnetzes ist, besteht dennoch ein Einfluss der 380-kV-Leitung auf das Verteilnetz durch den Betrieb der Kompensationsdrosseln.
- Sowohl die Schaltung der Kompensationsdrosseln, als auch die Steuerung der Transformatorstufen der Regelhauptumspanner obliegt dem Übertragungsnetzbetreiber. Daher hat der Übertragungsnetzbetreiber einen großen Einfluss auf den Blindleistungsaustausch eines Umspannwerkes.

5 Literaturverzeichnis

- [1] D. Oeding, Elektrische Kraftwerke und Netze, Berlin, Heidelberg: Springer, 2016.
- [2] R. Fischer, Elektrische Maschinen, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [3] H. Renner, Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme Skriptum, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, TU Graz, 2013.
- [4] M. Braun, „Reactive Power Supplied by Wind Energy Converters – Cost-Benefit-Analysis,“ in *European Wind Energy Conference (EWEC)*, Brüssel, 2008.
- [5] S. Engelhardt, I. Erlich, C. Feltes, J. Kretschmann und F. Shewarega, „Reactive Power Capability of Wind Turbines Based on Doubly Fed Induction Generators,“ *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 26, NO. 1, pp. 364-372, März 2011.
- [6] T. Lund, P. Sørensen und J. Eek, „Reactive Power Capability of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator,“ *Wind Energy*, Vol. 10, pp. 379-394, 25 April 2007.
- [7] H. Renner und M. Sakulin, Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit Skriptum, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, TU Graz.
- [8] Europäische Kommission, „VERORDNUNG (EU) 2016/1388 DER KOMMISSION vom 17. August 2016 zur Festlegung eines Netzkodex für den Lastanschluss,“ 2016.