

IEAN



© fotopro

Lastflusssteuerung in einem 110 kV Netz

Masterarbeit von
Bernhard Martin Taupe BSc.

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

April 2023

Technische Universität Graz
Institut für elektrische Anlagen und Netze
Inffeldgasse 18/I
8010 Graz
Austria

Institutsleiter

Robert Schürhuber

Betreuer

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

Masterarbeit von
Bernhard Martin Taupe BSc.

April 2023

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.

Graz, am 17 April 2023

Bernhard Martin Taupe, BSc.

Abstract

In a 110 kV distribution grid, the geographically extensive location and a parallel 220 kV transmission grid line sometimes result in significant active power transit that additionally load the 110 kV grid. In some cases, loads of around 100 % occur in three parallel lines which are not the same length of the 110 kV grid, which should be reduced or evenly distributed to relieve the entire grid. During the evaluation of operational measured values, load cases with high generation power and simultaneously high west-east load flow in the transmission grid turned out to be critical load conditions. Different technological options for load flow control and different numbers of load flow controlling elements at different locations in the current grid have been compared, and a preselection on two variants for further investigations was made. All grid and power plant construction plans for the next couple of years have been implemented, and new load cases were defined accordingly. Based on these new load cases, the effect of the two variants on the load flow has been simulated in the future network topology and the results were compared. The different variants were subjected to an analysis for (n-1) criterion and the advantages and disadvantages of the individual variants were explained based on all the findings collected. All load flow simulations were done in NEPLAN, the evaluation of the measured data was done with MATLAB.

Keywords: Load flow control, active power load flow, (n-1)-security, distribution grid

Kurzfassung

In einem 110 kV Verteilnetz kommt es durch die geografisch ausgedehnte Lage und einer parallellaufenden 220 kV Übertragungsnetzleitung in manchen Lastfällen zu nennenswerten Wirkleistungsdurchzügen, die das 110 kV Netz zusätzlich belasten. Dabei treten in drei parallel verlaufenden, aber ungleich langen Leitungszügen des 110 kV Netzes teilweise Belastungen bis 100% auf, welche verringert oder gleichverteilt werden sollten, um das gesamte Netz zu entlasten. Bei der Auswertung betrieblicher Messwerte stellten sich Lastfälle mit hoher Erzeugungsleistung bei gleichzeitig hohem West-Ost Lastfluss im Übertragungsnetz als kritische Belastungszustände heraus. Es wurden verschiedene technologische Möglichkeiten der Lastflusssteuerung und verschiedene Anzahl lastflusssteuernder Elemente an unterschiedlichen Orten im aktuellen Netz verglichen, und eine Vorentscheidung auf zwei Varianten getroffen. Sämtliche Netz und Kraftwerksaubaupläne der nächsten Jahre wurden berücksichtigt und dementsprechend neue Lastfälle definiert. Auf Basis dieser neuen Lastfälle wurden in der zukünftigen Netztopologie die Auswirkung der zwei Varianten auf den Lastfluss simuliert und die Ergebnisse verglichen. Die unterschiedlichen Varianten wurden einer Analyse zur (n-1)-Sicherheit unterzogen und anhand aller gesammelten Erkenntnisse die Vor- und Nachteile der einzelnen Varianten erläutert. Sämtliche Simulationen der Lastflüsse im Netz wurden mittels NEPLAN durchgeführt, die Auswertung der Messdaten wurde mittels MATLAB realisiert.

Stichwörter: Lastflusssteuerung, Wirkleistungslastfluss, (n-1) Sicherheit, Verteilnetz

Symbol und Abkürzungsverzeichnis

C'	Kapazitätsbelag
δ	Übertragungswinkel
f	Frequenz
FACTS	Flexibel AC Transmission System
I	Strom
I_{nenn}	Nennstrom
$I_{\text{thermisch}}$	Thermischer Grenzstrom
KW	Kraftwerk
L'	Induktivitätsbelag
LFS	Lastflusssteuerung
NA	Netzabstützung
NSZ	Normalschaltzustand
P_T	Übertragene Wirkleistung
P_V	Verlustleistung
PST	Phasenschiebertransformator
Q_V	Blindleistungsbedarf
RHU	Regelumspanner / Regeltransformator
S_T	Übertragene Scheinleistung
$S_{\text{thermisch}_{116}}$	Thermische Grenzleistung bei 116 kV
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
U	Spannung
U_k	Kurzschlussspannung
U_{LFS1}	Spannung vor lastflusssteuerndem Element
U_{LFS2}	Spannung nach lastflusssteuerndem Element
U_n	Nennspannung
UW	Umspannwerk

Z	Impedanz
Z_l	Leitungsimpedanz
Z_0	Wellenwiderstand

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Netzanalyse.....	3
2.1	Lastflussberechnung.....	3
2.2	Übertragungsfähigkeit von Leitungen.....	4
2.3	(n-1) Kriterium.....	5
2.4	Lastflusssteuernde Elemente	5
2.4.1	Phasenschiebertransformator	6
2.4.2	Drossel.....	7
2.4.3	FACTS Elemente (Flexible AC Transmission System)	7
2.4.3.1	SSSC (Static Synchronous Series Compensator).....	8
3	Beschreibung des 110 kV Netzes	11
3.1	Erklärung und Darstellung des 110 kV Netzes im „Ist“ Zustand	11
3.1.1	Erzeugungsschwerpunkte	11
3.1.2	Lastschwerpunkte.....	12
3.1.3	Übergeordnetes Netz und Netzabstützungen	12
3.2	Auswertung von Messdaten	13
3.2.1	Hohe Erzeugungsleistung im westlichen Teil des Netzes.....	14
3.2.2	Hohe Pumpleistung im westlichen Teil des Netzes.....	16
3.2.3	Hoher Durchzug ausgehend vom Lastfluss des übergeordneten Netzes bei gleichzeitig hoher Erzeugung im westlichen Teil des Netzes.....	18
3.3	Stark belastete Leitungen	20
3.3.1	Leitung NW.....	20
3.3.2	Leitung MW.....	20
3.3.3	Leitung SW	20
3.4	Änderungen und Umbauten im Ausbauzustand „Ist+“	21
3.4.1	Änderungen im Netz.....	21
3.4.2	Neue Einspeiseanlagen.....	21
3.4.3	Übersicht Ausbauzustand „Ist+“	22
3.4.4	Sensitivität neuer Einspeiseanlagen nach Verlagerung von UWF1 auf 220 kV	23

3.4.5	Auswirkung des Umbaus auf bestehende Lastfälle	23
3.4.5.1	Hohe Erzeugung im westlichen Teil des Netzes	24
3.4.5.2	Hohe Pumpleistung im westlichen Teil des Netzes.....	25
3.4.5.3	Hoher Durchzug ausgehend vom Lastfluss des übergeordneten Netzes bei gleichzeitig hoher Erzeugung	26
3.5	Änderungen und Umbauten im Ausbauzustand „Zukunft“	27
3.5.1	Änderungen im Netz.....	27
3.5.2	Neue Einspeiseanlagen.....	27
3.5.3	Photovoltaik Einspeisung	28
3.5.4	Übersicht Ausbauzustand „Zukunft“	28
3.5.5	Sensitivität neuer Einspeiseanlagen.....	29
3.5.5.1	KW-ZIR 50 MW.....	29
3.5.5.2	KW-1 25 MW	29
3.5.5.3	KW-2 30 MW	29
3.5.5.4	KW-3 20 MW	29
3.6	Definition neuer Lastfälle	30
3.6.1	Hoher Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung	31
3.6.2	Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher PV-Einspeisung und niedrigem Verbrauch	33
3.7	Zusammenfassung der Lastfälle	35
4	Ableitung von lastflusssteuernden Maßnahmen zur Leitungsentlastung.....	37
4.1	Stufen der Transformatoren in den Netzabstützungen	37
4.2	Lastflusssteuernden Elemente	39
4.2.1	Dimensionierung der Drossel	39
4.2.2	Dimensionierung des Phasenschiebertransformators.....	41
4.2.3	Dimensionierung des SSSC	42
4.2.4	Verschaltung im Umspannwerk UW01 als Kupplung zwischen West- und Ostnetz	43
4.2.4.1	Drossel.....	44
4.2.4.2	Phasenschiebertransformator	46
4.2.4.3	SSSC	48

4.2.5	Verschaltung im Umspannwerk UW01 in Serie zu den stark belasteten Leitungen NW und MW	50
4.2.5.1	Drossel.....	51
4.2.5.2	Phasenschiebertransformator	53
4.2.5.3	SSSC	55
4.2.6	Zwei Standorte für lastflusssteuernde Elemente	57
4.2.6.1	Drossel.....	58
4.2.6.2	Phasenschiebertransformator	60
4.2.6.3	SSSC	62
4.2.7	Vergleich der Varianten	64
5	Auswirkungen der Lastflusssteuerung im Netz „Zukunft“	67
5.1	Lastflusssteuerung durch einen Phasenschiebertransformator als Kupplung	67
5.1.1	Hoher Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung	67
5.1.2	Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher PV-Einspeisung und niedrigem Verbrauch	69
5.2	Lastflusssteuerung durch einen Phasenschiebertransformator in Serie zu NW und MW	71
5.2.1	Hoher Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung	71
5.2.2	Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher PV-Einspeisung und niedrigem Verbrauch	73
5.3	Lastflusssteuerung durch drei Drosseln	75
5.3.1	Hoher Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung	75
5.3.2	Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher PV-Einspeisung und niedrigem Verbrauch	77
5.4	Vergleich der Varianten	79
6	Überprüfung auf (n-1) Sicherheit der einzelnen Varianten	81
6.1	Keine Lastflusssteuerung	82
6.1.1	Hoher Durchzug + Erzeugung	82
6.1.2	Maximales Pumpen + PV-Erzeugung	83
6.2	Variante Phasenschiebertransformator als Kupplung	84
6.2.1	Hoher Durchzug + Erzeugung	84
6.2.2	Maximales Pumpen + PV-Erzeugung	85
6.3	Variante Phasenschiebertransformator in Serie zu NW und MW	86

6.3.1	Hoher Durchzug + Erzeugung	86
6.3.2	Maximales Pumpen + PV-Erzeugung	87
6.4	Variante Drosseln	88
6.4.1	Hoher Durchzug + Erzeugung	88
6.4.2	Maximales Pumpen + PV-Erzeugung	89
7	Erkenntnisse und Diskussion.....	91
8	Referenzen	93
9	Anhang	95

1 Einleitung

In einem 110 kV Verteilnetz kommt es durch die ausgedehnte Lage, parallel zu einer 220 kV Leitung des Übertragungsnetzes, zu ungewollten Durchzügen. Diese treten bei übergeordneten Lastflüssen in West-Ost und Ost-West Richtung auf. Ausgehend von Messdaten der Leitungsbelastungen zwischen April 2021 – März 2022 wurden verschiedene Belastungssituationen des Netzes gefunden, bei denen sich drei stark belastete Leitungszüge in Ost-West Richtung zwischen dem Netzknotenpunkt und dem Erzeugungsschwerpunkt Westen als problematisch erwiesen. Der östliche Teil des Netzes stellte sich als deutlich unkritischer dar, wodurch sich die Untersuchungen auf das westliche Teilnetz konzentrierten. Je nach Belastungssituation, kann die Überlagerung des 110 kV Lastflusses mit dem Durchzug, verursacht durch den übergeordneten Lastfluss, zu Leitungsauslastungen in den besagten Leitungen bis zu 100 % führen. Da der Ausbau des Netzes sich als schwierig darstellt, wurden verschieden Methoden der Lastflusssteuerung im Netz untersucht. Dabei wurden, ausgehend vom „Ist“-Zustand des Netzes, Methoden wie Phasenschiebertransformatoren (PST), Längsdrosseln, FACTS-Elemente und das Verstellen der Transformatorstufen in den Netzabstützungen verglichen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden PST und Längsdrosseln in drei Varianten der Verschaltung für weitere Untersuchungen vorausgewählt. Für diese beiden Elementen wurde eine Grobdimensionierung vorgenommen. Der geplante Netzbau der kommenden 2-3 Jahre wurde in das NEPLAN Netzmodell integriert und ohne lastflusssteuernde Elemente mit den jetzigen Lastfällen simuliert. Zudem wurde die Sensitivität neuer Einspeiser in diesem Umbauschritt ermittelt. Für zukünftige Betrachtungen wurde ein Netzstand „Zukunft“ definiert, in den sämtlichen Änderungen von Leitungen, Umspannwerken und Erzeugungsanlagen bis ungefähr 2030 implementiert wurde. Anhand dieses Ausbaustandes „Zukunft“ wurden dann weitere Simulationen mit den zwei vorausgewählten Elementen der Lastflusssteuerung und deren verschiedenen Verschaltungsvarianten durchgeführt. Dabei wurden auch ausgehend von den neu dazu gekommenen Erzeugungsanlagen neue Lastfälle definiert und für diese Simulationen verwendet. Die verschiedenen Varianten wurden einer Analyse bezüglich der (n-1) Sicherheit unterzogen, und anhand aller gesammelten Erkenntnisse eine Beurteilung der einzelnen Methoden durchgeführt.

2 Netzanalyse

2.1 Lastflussberechnung

Das Hochspannungsnetz, in diesem Fall 110 kV, wird in den meisten Fällen durch mehrere Netzabstützungen mit dem Höchstspannungsnetz, oder auch Übertragungsnetz verbunden. Gängige Spannungen im Übertragungsnetz sind 220 kV oder 380 kV. Die Ausdehnung von 110 kV Hochspannungsnetzen beschränkt sich meist auf 150 - 200 km und technisch ist diese Spannungsebene die Brücke zwischen dem Übertragungsnetz und dem Mittelspannungs-Verteilnetz. In Österreich ist die Ausdehnung durch die einzelnen Bundesländer gegeben, die jeweils eigene 110 kV Netze betreiben, welche im Regelbetrieb nicht mit den Netzen der Nachbarbundesländer gekoppelt sind. Überwiegend sind Hochspannungsnetze als Freileitung ausgeführt, was sowohl finanziell als auch betrieblich Vorteile mit sich bringt. In urbanen Gebieten gewinnt die Ausführung durch Kabel aufgrund von technischem Fortschritt immer mehr an Bedeutung.[2] Im 110 kV Netz werden Erzeugungsanlagen bis zu 400 MVA Leistung angeschlossen, bei höheren Leistungen erfolgt dies direkt in das Übertragungsnetz. In den Netzabstützungen zu Höchstspannung werden hauptsächlich Schrägregeltransformatoren, meist mit 60° Spannungswinkel eingesetzt, die je nach Standort und Lastschwerpunkt zwischen 100 und 400 MVA Übertragungsleistung haben und in der Regel (n-1) - sicher ausgeführt sind. Die Übertragung in die Mittelspannungsebene erfolgt hier in Umspannwerken durch Transformatoren mit einer Leistung von bis zu 50 MVA und die Distanz zwischen den Umspannwerken kann hier durch die Spannung der Mittelspannungsebene in kV als Richtwert für die Distanz in km angenommen werden.

Die Lastflussberechnungen werden dabei mit dem Programm NEPLAN realisiert. Das 110 kV Netz ist in einem detaillierten Model durch den Verteilnetzbetreiber zur Verfügung gestellt worden. Das Übertragungsnetz ist in einer zweiten Ebene realisiert und über vier Netzabstützungen mit dem 110 kV Netz verbunden. Die Lasten der Abgänge in den Umspannwerken, die Erzeugungsleistungen der Kraftwerke und die Stufen der Transformatoren in den Netzabstützungen wurden mittels MATLAB aus Viertelstunden Messdaten extrahiert und als NEPLAN Belastungs-Daten und Topologie-Daten gespeichert. Der für die Simulation der Durchzüge relevante, übergeordnete Lastfluss kann in der Ebene des Höchstspannungsnetzes individuell eingestellt werden. Dazu wurde östlich und westlich der Netzabstützungen zum 110 kV Netz jeweils ein PQ-Knoten als Einspeiser oder Verbraucher platziert, die je nach Bedarf konfiguriert werden können, um den Lastfluss in der 220 kV Leitung den Messwerten entsprechend anzupassen. Als Slack-Knoten wird ein leistungsstarkes Pumpspeicherkraftwerk im Höchstspannungsnetz angenommen, welches in der Lage ist, die Leistungsbilanz in jeder Simulation auszugleichen.

Für die Lastflussberechnung können verschiedene Methoden angewendet werden. Seitens NEPLAN werden Methoden wie Stromiteration, Newton-Raphson, Erweitertes Newton-Raphson, Spannungsabfall oder DC-Lastfluss bereitgestellt. Bei der Berechnung von großen Netzen wird meist auf das Newton-Raphson oder auf das Gaus-Seidel Verfahren zurückgegriffen. Vorteil des Newton-

Raphson Verfahren ist, dass die Anzahl der Iterationsschritte nahezu unabhängig von der Anzahl der Netzknoten ist. Beim Newton-Raphson Verfahren wird die Knotenleistungsbilanz als Voraussetzung zur Berechnung des Lastflusses herangezogen. Die Knotenspannungen werden hier iterativ aus der Ableitung der Leistungen berechnet. Die Knotenleistung entspricht der Netzleistung am Knoten, also die Summe aller am Knoten eingespeisten oder bezogenen Leistungen. Die Spannungen stellen sich so ein, dass die Leistungen ausbalanciert sind. Das Newton-Raphson Verfahren wird somit auf die Differenz von Knotenleistung und Netzleistung angewandt. Je besser die Anfangslösung ist, desto besser ist die Konvergenzeigenschaft. Oft wird auch die Lösung einer früheren Lastflussberechnung als Startwert herangezogen. Wenn keine solche verfügbar ist, spricht man von einem „flat start“. Für die Durchführung der Lastflussberechnung muss ein Slack-Knoten mit konstanter Spannung und vorgegebenem Phasenwinkel definiert werden. [1]

2.2 Übertragungsfähigkeit von Leitungen

Die Übertragungsfähigkeit begrenzt sich durch Parameter wie den maximalen Spannungsabfall, den maximalen zulässigen Leitungswinkel als Indikator für die Wirkleistungsstabilität und die maximale thermische Strombelastung. Ein wichtiger Parameter für das Blindleistungsverhalten von Leitungen ist die natürliche Leistung. [2]

$$P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_0} \quad (2.2-1)$$

Mit Z_0 bezeichnet man den Wellenwiderstand der Leitung, den man wie folgt berechnet

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (2.2-2)$$

Bei Freileitungen ist die natürliche Leistung kleiner als die thermische Grenzleistung, bei Kabeln dagegen höher. Somit können Kabel nie mit natürlicher Leistung oder darüber betrieben werden, und liefern somit immer Blindleistung ins Netz. Leitungen wirken im Schwachlastfall, also unterhalb der natürlichen Leistung kapazitiv und werden oberhalb der natürlichen Leistung induktiv. [2]

Die thermische Grenzleistung einer Freileitung wird durch die maximale Leiterseiltemperatur definiert. Dabei kann durch Temperatur Monitoring des Leiterseiles dieser Grenzwert adaptiert werden („dynamic line rating“), um beispielsweise im Winter bei tiefen Temperaturen oder höheren Windgeschwindigkeiten, wo ohnehin vermehrt Starklastfälle verzeichnet werden, mehr Übertragungskapazität zu erhalten. Die thermische Grenzleistung führt nur in sehr ungünstigen klimatischen Bedingungen zur Grenztemperatur des Leiterseiles, weshalb man Leitungen auch kurzzeitig überbelastet betreiben kann, um die Stromversorgung aufrecht zu erhalten. [3]

2.3 (n-1) Kriterium

Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit elektrischer Energiesysteme werden qualitative Kriterien herangezogen. In der Netzplanung verwendet man das so genannte (n-1) Kriterium. Solange dieses Kriterium erfüllt ist, führt ein Ausfall **eines** Betriebsmittels nicht zu einer Überschreitung von Grenzwerten im verbleibenden Netz. [5] Durch Einhaltung des Kriteriums sollen Folgeausfälle vermieden werden. Prinzipiell kann dieses Kriterium nur in vermascht betriebenen Netzen eingehalten werden. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen Netzleitwarte und Kraftwerksleitwarte kann zeitweise auch oberhalb der (n-1) Grenze operiert werden, da bei einem Ausfall eines Betriebsmittels schnell durch die Kraftwerksleitwarte in die Erzeugung eingegriffen und den überlasteten Betriebsmitteln entgegengewirkt werden kann. Besonders kritisch kann der Ausfall einer Sammelschiene in einem Umspannwerk angesehen werden, da beim Auftreten dieses Fehlers gleich mehrere Leitungen und Betriebsmittel ausfallen, diese sind meistens aber aus dem (n-1) Kriterium ausgenommen. Durch die Vermaschung des Netzes muss bei Doppelsystemen nicht zwingend das Parallelsystem bei einem Ausfall die Belastung zur Gänze übernehmen, sondern das Gesamtsystem die ausgefallene Kapazität ergänzen. [12]

2.4 Lastflusssteuernde Elemente

In einem vermaschten Netz verteilt sich der Lastfluss entsprechend der Leitungsimpedanzen. Bei parallel verlaufenden Leitungen überträgt die Leitung mit der geringsten Impedanz, den prozentuell größten Anteil. Es kann dadurch in dieser Leitung zu Überlastungen kommen, obwohl parallel verlaufende Leitungen des Netzes noch freie Übertragungskapazität hätten.

Als Formel für die Leistungsübertragung gilt

$$P_1 = -\frac{3U_1U_2}{Z_l} \sin(\varphi_l - \delta) + \frac{3U_1^2}{Z_l} \cos(\varphi_l) \quad (2.4-1)$$

$$P_2 = \frac{3U_1U_2}{Z_l} \sin(\varphi_l - \delta) - \frac{3U_2^2}{Z_l} \cos(\varphi_l) \quad (2.4-2)$$

Nimmt man die Leitung als verlustlos an ($R = 0$, $Z_l = X_l$), so kann man die Formeln (2.4-1) und (2.4-2) auf folgende Formel vereinfachen.[2]

$$P_1 = P_2 = \frac{3U_1U_2}{X_l} \sin(\delta) \quad (2.4-3)$$

Nach Formel (2.4-3) kann nun gesagt werden, dass die Wirkleistung hauptsächlich durch den Leitungswinkel δ und die Reaktanz X_l beeinflusst werden kann. Somit muss für die Lastflusssteuerung einer dieser Parameter verändert werden, um die übertragene Leistung zu beeinflussen.

2.4.1 Phasenschiebertransformator

Wurden Phasenschiebertransformatoren (PSTs) früher hauptsächlich in Übertragungsebenen verwendet, bekommen sie aufgrund steigender Anforderungen an das Verteilnetz auch hier immer mehr Bedeutung, um Lastflüsse zu lenken und die Übertragungskapazität in Verteilnetzen zu steigern. Phasenschiebertransformatoren können in Ein- oder Zweikesselbauweise realisiert werden. Bei der Einkesselbauweise sind Erregerwicklung und Serienwicklung in einem Kessel zusammengefasst. Bei einer Zweikesselausführung ist die Erregerwicklung und Serienwicklung in jeweils einem getrennten Kessel, welche für den Betrieb extern verbunden werden müssen.

Außerdem werden sie in symmetrische und asymmetrische Bauweise klassifiziert. Bei der asymmetrischen Bauweise wird über einen Erregertransformator eine Zusatzspannung Δu um 90° phasenverschoben zur Netzspannung über den Serientransformator in die Leitung eingespeist. Diese Phasenverschiebung ergibt sich durch die dementsprechende Verschaltung der einzelnen Wicklungen. Durch diese Zusatzspannung ändert sich auch die Amplitude der Netzspannung, womit auch die Blindleistung mit beeinflusst wird. Bei der Symmetrischen Bauweise wird nur der Phasenwinkel der Netzspannung beeinflusst, nicht aber die Amplitude. Dies wird durch einen zusätzlichen Längsstufensteller realisiert, was die Kosten erhöht und den Bauraum zusätzlich vergrößert. [10]

Die Regelung der Zusatzspannung erfolgt durch einen Stufensteller und der in der Praxis übliche, maximale Spannungswinkel liegt bei ungefähr $25\text{-}30^\circ$. [4]

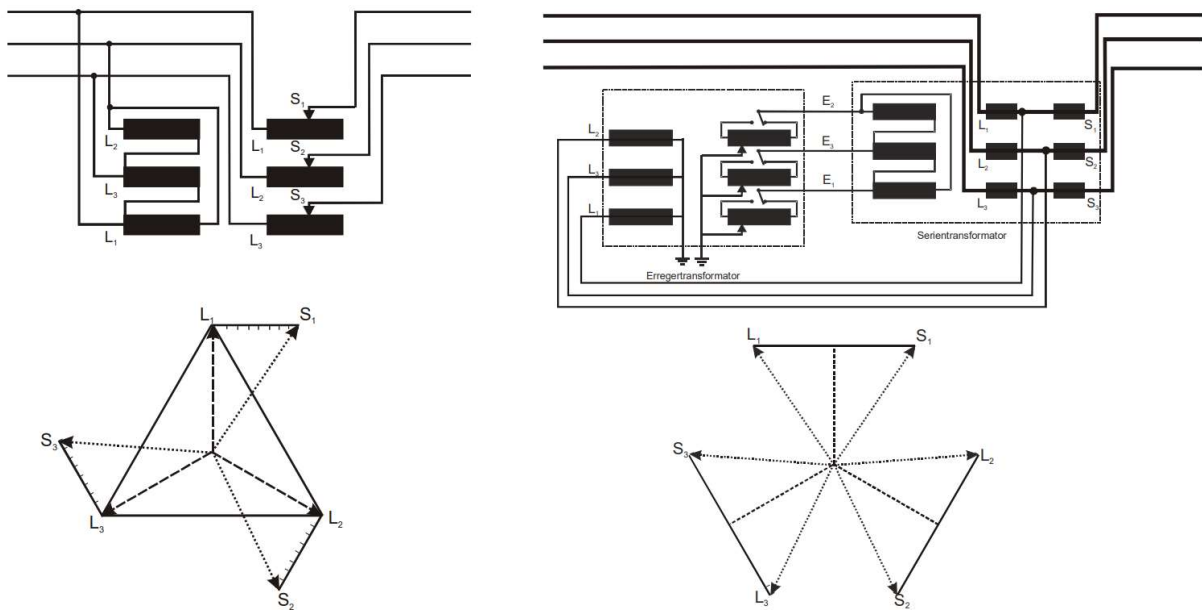


Abbildung 2-1: Phasenschiebertransformator als Asymmetrische Einfachkesselausführung und als Symmetrische Ausführung mit getrenntem Erreger- und Serientransformator [4]

Die Bauleistung von Phasenschiebertransformatoren ergibt sich durch den Nennstrom und den Leerlaufwinkel, der die maximale Höhe der Zusatzspannung Δu beschreibt. Die Zusatzspannung ist meistens deutlich kleiner als die Nennspannung, weshalb die Nennleistung des Phasenschiebertransformators deutlich kleiner als die Durchgangsleistung ist. [4].

2.4.2 Drossel

Für die Lastflusssteuerung werden Drosseln üblicherweise in Serie zu stark belasteten Leitungen verschalten. Diese Drosseln sind dabei hauptsächlich in Luftdrosselbauweise ausgeführt, was verglichen zu Ausführungen in ölgefüllter Kesselbauweise deutlich günstiger und wartungsfrei ist. Prinzipiell handelt es sich bei dieser Art der Lastflusssteuerung um eine Reaktanzanpassung der Leitung, wobei technisch gesehen die Leitungslänge verlängert wird. Damit kann die Leistung über die Leitung gedrosselt und auf andere Leitungen verlagert werden. Durch die Längsdrossel erhöht sich die Leitungsreaktanz X_l und nach Formel (2.4-3) die darüber übertragene Leistung. Eine Drossel mit 100 mH entspricht in einem 110 kV Netz etwa einer Leitungslänge von 75 km Einfachleiter oder 100 km Bündelleiter.

Übliche, und auch in NEPLAN verwendete Parameter bei Drosseln sind die Werte U_k und U_R , die sich wie folgt berechnen:

$$U_k = I_{nenn} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{Drossel} \quad (2.4-4)$$

$$U_R = I_{nenn} \cdot R_{Drossel} \quad (2.4-5)$$

Diese Werte werden üblicherweise in % der Nennspannung angegeben.



Abbildung 2-2: Längsdrossel 110 kV [6]

2.4.3 FACTS Elemente (Flexible AC Transmission System)

Mittels FACTS (Flexible AC Transmission System) Elemente lassen sich unterschiedliche Regelkonzepte in Übertragungssystemen realisieren. Für unterschiedliche Anforderungen der Regelung stehen unterschiedliche Varianten von FACTS zur Verfügung. Dabei kann auf verschiedene Parameter wie: Lastflussregelung, Spannungsregelung, statische- und dynamische Stabilität Einfluss genommen werden.[4]

Die Steuerung des Netzes durch FACTS Elemente kann in Echtzeit erfolgen und wird durch Veränderung der Leitungslängs- und Leitungsquerimpedanz, bzw. durch Einkopplung von Serienspannungen in Leitungen oder Injektion von Querströmen in Knoten realisiert. Somit können

dieselben Veränderungen wie mit Kompensationsmitteln oder Regeltransformatoren realisiert werden, nur dass die Regelung durch Halbleitertechnologie schneller möglich ist und das Netz deshalb näher an den Belastungsgrenzen betrieben werden kann. [11]

Im Falle der Lastflussregelung werden TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), SSSC (Static Synchronous Series Compensator) und UPFC (Unified Power Flow Controller) Elemente verwendet. Darüber hinaus sind noch FACTS wie SVC (Static Var Compensator) und STATCOM (Static Synchronous Compensator) in Verwendung. Bei den Netzuntersuchungen wurden ausschließlich SSSCs verwendet. In Abbildung 2-3 ist eine Tabelle ersichtlich, die den verschiedenen Einsatzbereichen geeignete FACTS Elemente zuordnet.

	Lastflussregelung	Spannungsregelung	Statische Stabilität	Dynamische Stabilität
SVC	•	••••	•	•••
STATCOM	•	••••	•	•••
TCSC	••	•	••••	•••
SSSC	••	•	••••	•••
UPFC	••••	••••	••	•••

Abbildung 2-3: Einsatzbereiche von FACTS Elementen [4]

2.4.3.1 SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Über einen Selbstgeführten Umrichter wird durch einen Serientransformator eine Zusatzspannung ΔU in die Leitung eingespeist. Der Gleichspannungskreis besitzt dabei abgesehen von einem Glättungskondensator keinen Energiespeicher. Somit kann nur Blindleistung ausgetauscht werden, was zu einer Zusatzspannung mit dem Phasenwinkel $\pm 90^\circ$ zum Leitungsstrom führt. Die Zusatzspannung kann im Rahmen der Bemessungsleistung mittels Umrichter variabel eingestellt werden.[4]

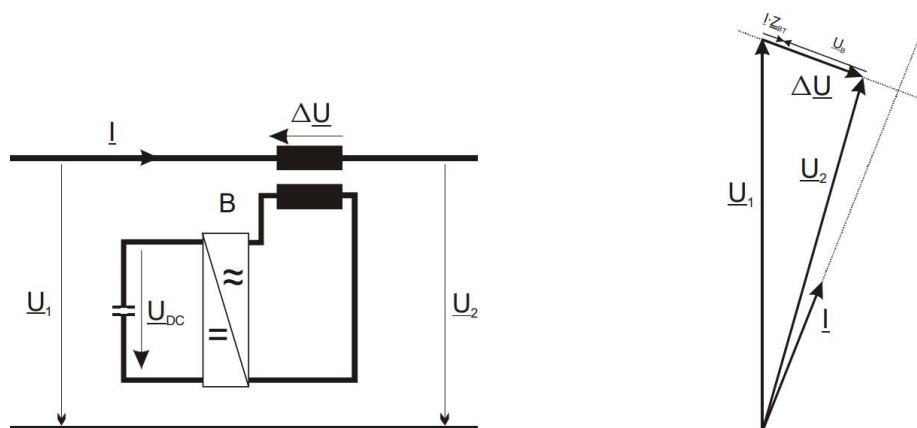


Abbildung 2-4: Prinzipieller Aufbau und Zeigerdiagramm SSSC: [4]

Die in den Untersuchungen verwendeten SSSC Elemente sind in modularer Bauweise ausgeführt und können sowohl stationär als auch mobil in das Netz integriert werden. Dabei können je nach Anforderung mehrere Module in Serie verschalten werden, um den nötigen Phasenwinkel erreichen zu können. Durch die kompakte Bauweise eines Modules ist eine modulweise Installation direkt auf einem Freileitungsmasten möglich, solange dieser statisch dafür ausreichend dimensioniert ist. [7] [8] [9]

3 Beschreibung des 110 kV Netzes

3.1 Erklärung und Darstellung des 110 kV Netzes im „Ist“ Zustand

Grundsätzlich ist das 110 kV Netz mit seinen Übergabestellen in Abbildung 3-1 dargestellt. Sämtliche Hauptleitungen in West-Ost Richtung verlaufen durch das Umspannwerk UW01, welches als Netzknoten des 110 kV Netzes gesehen werden kann. Dort kann mittels Kupplung das westliche Teilnetz vom östlichen Teilnetz getrennt werden. Bei Leitungen, die mit doppelter Linie dargestellt sind, handelt es sich um Leitungen mit zwei Systemen, bei einfacher Linie handelt es sich um ein Einfachsystem. Da hauptsächlich der westliche Teil des Netzes für nachfolgend Untersuchungen relevant ist, wurde in Abbildung 3-1 dieser Teil wesentlich detaillierter dargestellt.

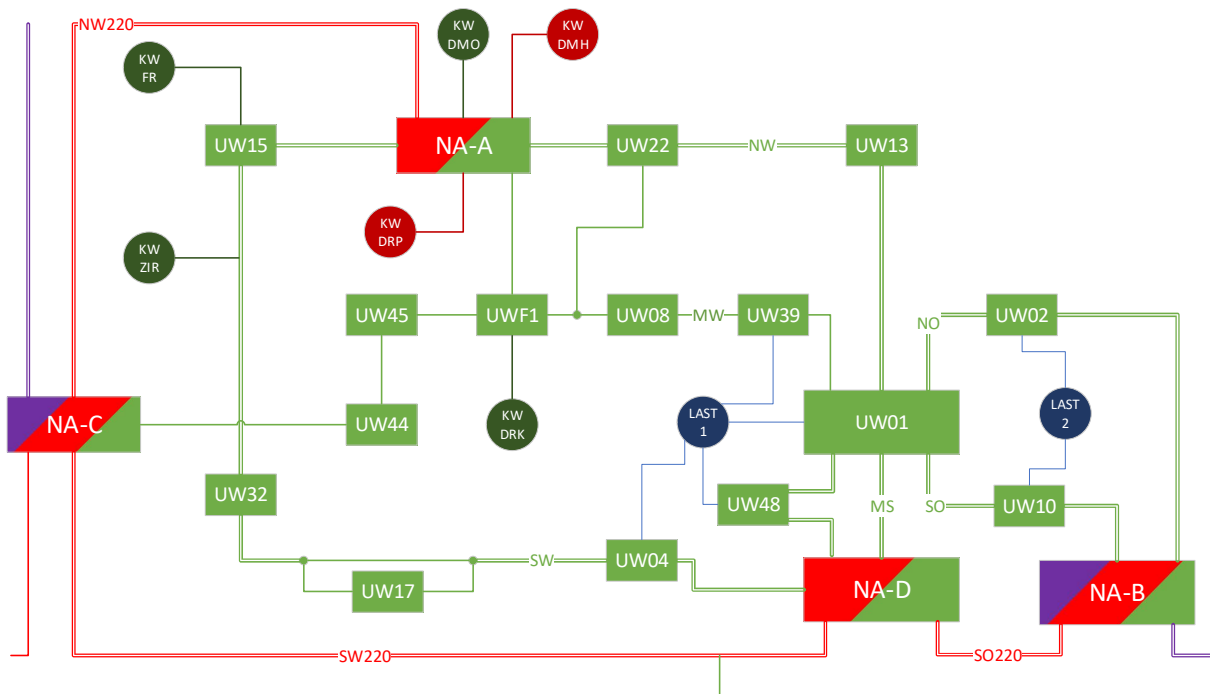


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des 110 kV Netzes im Ausbaustand „Ist“
blau: ≤ 20 kV, grün: 110 kV, rot: 220 kV, violett: 380 kV

3.1.1 Erzeugungsschwerpunkte

Rund um die Netzabstützung NA-A liegt der Erzeugungsschwerpunkt im westlichen Teil des Netzes. Dabei handelt es sich hauptsächlich um leistungsstarke Pumpspeicherkraftwerke. Die Erzeugungseingangsleistung aller in diesem Bereich des 110 kV Netzes angeschlossenen Anlagen (in Abbildung 3-1 als grüner Kreis dargestellt) beträgt etwa 700 MW. Die im 220 kV Netz angeschlossenen Kraftwerke (in Abbildung 3-1 als roter Kreis dargestellt) weisen gesamt eine Erzeugungseingangsleistung von etwa 1200 MW auf.

3.1.2 Lastschwerpunkte

Die Lasten sind, wie technisch üblich, hauptsächlich in der Niederspannung 400 V angeschlossen, und über Mittelspannungsleitungen, in diesem Netzgebiet 20 kV an die Umspannwerke des 110 kV Netzes geführt. Die in Abbildung 3-1 blau eingezeichneten Leitungen stellen dabei schematisch dar, aus welchen Umspannwerken die Lastschwerpunkte versorgt werden. Die Abbildung dieser Leitungen ist sehr stark vereinfacht dargestellt.

Westlich des Netzknotens UW01 liegt einer von zwei Lastschwerpunkten, LAST 1, in Abbildung 3-1 als blauer Kreis dargestellt. Dabei handelt es sich um Großindustriellast (Halbleiterhersteller), mittlerer Industriellast und Last einer Region mit etwa 75.000 Einwohner. Östlich des Netzknotens UW01 liegt der zweite Lastschwerpunkt LAST 2. Dabei handelt es sich um mittlere Industriellast inklusive Last einer Region mit etwa 125.000 Einwohner.

Auf die Lastschwerpunkte LAST 1 und LAST 2 entfallen somit etwa 120 MW bzw. etwa 70 MW Dauerleistung.

3.1.3 Übergeordnetes Netz und Netzabstützungen

Das 110 kV Netz (in Abbildung 3-1 grün dargestellt) ist über vier Netzabstützungen mit dem 220 kV Übertragungsnetz (in Abbildung 3-1 rot dargestellt) verbunden. Parallel zu den West-Ost Leitungen des 110 kV Netzes verläuft eine 220 kV Freileitung, welche mit zwei Systemen ausgeführt ist. Diese verbindet Netzabstützung NA-B über Netzabstützung NA-D mit Netzabstützung NA-C. Von den Netzabstützungen NA-B und NA-C aus wird diese mit 380 kV (violett) weitergeführt. Die Farben der Netzabstützungen bilden die dort installierten Spannungsebenen ab. Die Kraftwerke der 220 kV Ebene rund um die Netzabstützung NA-A sind über eine 220 kV Freileitung an die Netzabstützung NA-C geführt. Entlang der 220 kV Leitung zwischen den Netzabstützungen NA-C und NA-D wird eine 132 kV Leitung eines anderen Netzbetreibers Richtung Süden geführt. An der Netzabstützung NA-C verläuft außerdem eine 220 kV Freileitung Richtung Süden. In der Netzabstützung NA-A befinden sich zwei Regelumspanner parallel mit jeweils 200 MVA. In der Netzabstützung NA-B sind drei Regelhauptumspanner (RHU), zwei mit 300 MVA und einer mit 220 MVA, installiert, wobei in dieser Netzabstützung oft der nordöstliche Teil des Netzes (nicht in Abbildung 3-1 dargestellt) getrennt über einen 300 MVA Transformator betrieben wird. Da dieser Bereich für folgende Untersuchungen wenig relevant ist und der Sonderschaltzustand keine nennenswerten Auswirkungen auf die Leitungen im Westbereich hat, wurde dieser Schaltzustand nicht gesondert behandelt, und die Netze immer gekuppelt angenommen. In der Netzabstützung NA-C befindet sich ein RHU mit 220 MVA und in der Netzabstützung NA-D sind zwei RHUs parallel mit jeweils 300 MVA Übertragungsleistung installiert.

3.2 Auswertung von Messdaten

Bei der Auswertung von Messdaten wurde auf Messungen von April 2021 – März 2022 zurückgegriffen. Es handelt sich bei den Messdaten um Viertelstundenmesswerte zu Spannungen, Wirk- und Blindleistungen. Diese liegen zu jedem Umspannwerk und jeder Erzeugungsanlage vor. Bei den Regelumspannern der Netzabstützungen sind in diesen Messwerten auch die Stufen dokumentiert. Die Messreihe ist mit einem Zeitstempel versehen, um den Messwert zuordnen zu können. Bei der Auswertung wurden Messwerte, bei denen hohe Erzeugungs- oder Pumpleistung vorherrschen genauer untersucht. Außerdem war zu überprüfen, ob es zum Zeitpunkt dieser Lastfälle Sonderschaltzustände im Netz gab und wie sich diese auf den Lastfluss in den betroffenen Leitungen auswirken. Beim Auftreten eines Sonderschaltzustandes in relevanten Leitungen wurde der Messwert verworfen und eine Alternative dazu gesucht. Für eine weitere Untersuchung wurden drei Belastungsszenarien ausgewählt, bei denen jeweils eine sehr hohe Belastung der kritischen Leitungen erkennbar war. Diese Szenarien sind:

- Hohe Erzeugungsleistung im westlichen Teil des Netzes
- Hohe Pumpleistung im westlichen Teil des Netzes
- Hoher Durchzug ausgehend vom Lastfluss des übergeordneten Netzes bei gleichzeitig hoher Erzeugung im westlichen Teil des Netzes

Diese Belastungszeitpunkte wurden in NEPLAN mit dem Netzmodell simuliert, und mittels Adaption des übergeordneten Lastflusses versucht, die Messwerte möglichst exakt nachzustellen.

Ausgehend vom 110 kV Netz, entsprechen Messwerte mit positivem Vorzeichen Verbraucher bzw. Kraftwerke im Pumpbetrieb oder bei den Netzabstützungen Abgabe von Leistung an das übergeordnete Netz. Messwerte mit negativem Vorzeichen sind Einspeiser bzw. Erzeugungsanlagen oder bei den Netzabstützungen Bezug vom übergeordneten Netz.

3.2.1 Hohe Erzeugungsleistung im westlichen Teil des Netzes

Für dieses Szenario wurde der Messwert am 29.03.2022 um 08:00 Uhr herangezogen. Dieser Zeitpunkt fiel durch sehr hohe Erzeugungsleistung im westlichen Teilnetz auf.

In Tabelle 3-1 sind die bei diesem Lastpunkt gemessenen Werte aller relevanten Leitungen, Kraftwerke und Transformatoren der Netzabstützungen ersichtlich.

Netzabstützung	Leistung in MW	Kraftwerk	Leistung in MW
NA-A	88	KW FR	-378
NA-B	28	KW ZIR	-14
NA-C	36	KW DRK	-97
NA-D	88	KW DMO	-53
Leitung	Leistung in MW	KW DMH	-504
NW/4B	107	KW DRP	-406
MW/3B	98		
SW/7	67		
SW220	455		

220 kV Lastfluss eingestellt: 450 MW West > Ost

Tabelle 3-1: Messwerte – Hohe Erzeugungsleistung im Ausbauzustand „Ist“

Die Pfeile in der Abbildung 3-2 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

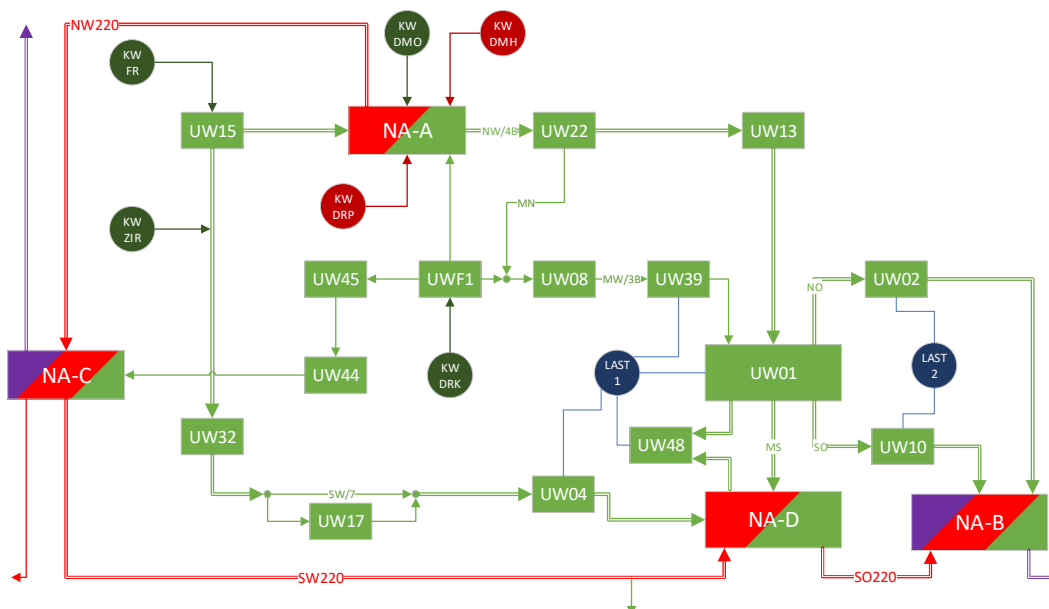


Abbildung 3-2: Lastflusssimulation – Hohe Erzeugungsleistung im Ausbauzustand „Ist“

Netzabstützung	Leistung in MW	Leitung	Leistung in MW
NA-A	84	SW220	333
NA-B	11	SO220	348
NA-C	39	NW220	994
NA-D	102	MS	20
Leitung	Leistung in MW	NO	80
NW/4B	106	SO	70
MW/3B	100	MN	16
SW/7	69		

Tabelle 3-2: Simulationsergebnisse – Hohe Erzeugungsleistung im Ausbauzustand „Ist“

3.2.2 Hohe Pumpleistung im westlichen Teil des Netzes

Für dieses Szenario wurde der Messwert am 27.03.2022 um 15:30 Uhr herangezogen. Dieser Messwert zeigte sehr hohe Pumpleistungen sowohl in 220 kV als auch in der 110 kV Netzebene im Bereich des westlichen Teilnetzes.

In Tabelle 3-3 sind die bei diesem Szenario gemessenen Werte aller relevanten Leitungen, Kraftwerke und Transformatoren der Netzabstützungen ersichtlich.

Netzabstützung	Leistung in MW	Kraftwerk	Leistung in MW
NA-A	28	KW FR	230
NA-B	-284	KW ZIR	0
NA-C	-14	KW DRK	14
NA-D	-224	KW DMO	0
Leitung	Leistung in MW		
NW/4B	66	KW DMH	128
MW/3B	58	KW DRP	371
SW/7	44		
SW220	600		
220 kV Lastfluss eingestellt: 2600 MW Ost > West			

Tabelle 3-3: Messwerte – Hohe Pumpleistung im Ausbauzustand „Ist“

Die Pfeile in der Abbildung 3-3 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

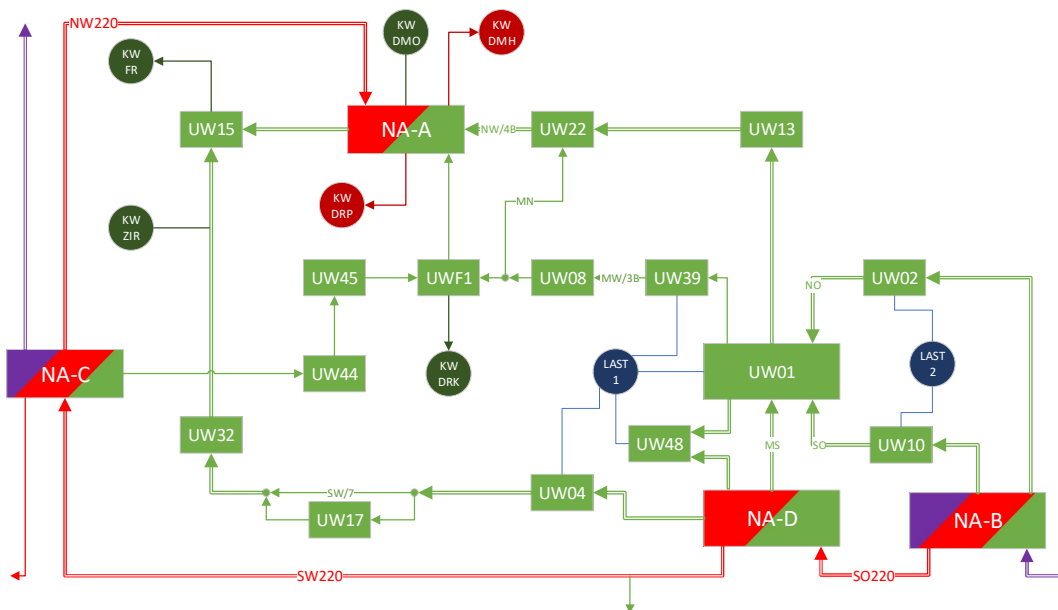


Abbildung 3-3: Lastflusssimulation – Hohe Pumpleistung im Ausbauzustand „Ist“

Netzabstützung	Leistung in MW	Leitung	Leistung in MW
NA-A	25	SW220	632
NA-B	-303	SO220	868
NA-C	-15	NW220	472
NA-D	-203	MS	44
Leitung	Leistung in MW	NO	79
NW/4B	64	SO	113
MW/3B	57	MN	8
SW/7	46		

Tabelle 3-4: Simulationsergebnisse – Hohe Pumpleistung im Ausbauzustand „Ist“

3.2.3 Hoher Durchzug ausgehend vom Lastfluss des übergeordneten Netzes bei gleichzeitig hoher Erzeugung im westlichen Teil des Netzes

Für dieses Szenario wurde der Messwert am 28.06.2021 um 19:45 Uhr herangezogen. Dieser Messwert zeichnete sich durch einen sehr hohen Lastfluss im übergeordneten Netz aus, was zu hohen Durchzügen führt. Ebenfalls war die Erzeugungsleistung im 110 kV Netz zu diesem Zeitpunkt sehr hoch.

In Tabelle 3-5 sind die bei diesem Lastpunkt gemessenen Werte aller relevanten Leitungen, Kraftwerke und Transformatoren der Netzabstützungen ersichtlich.

Netzabstützung	Leistung in MW	Kraftwerk	Leistung in MW
NA-A	-52	KW FR	-232
NA-B	193	KW ZIR	-35
NA-C	37	KW DRK	-133
NA-D	82	KW DMO	0
Leitung	Leistung in MW	KW DMH	-530
NW/4B	116	KW DRP	-392
MW/3B	110		
SW/7	69		
SW220	854		
220 kV Lastfluss eingestellt: 2585 MW West > Ost			

Tabelle 3-5: Messwerte – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Ist“

Die Pfeile in der Abbildung 3-4 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

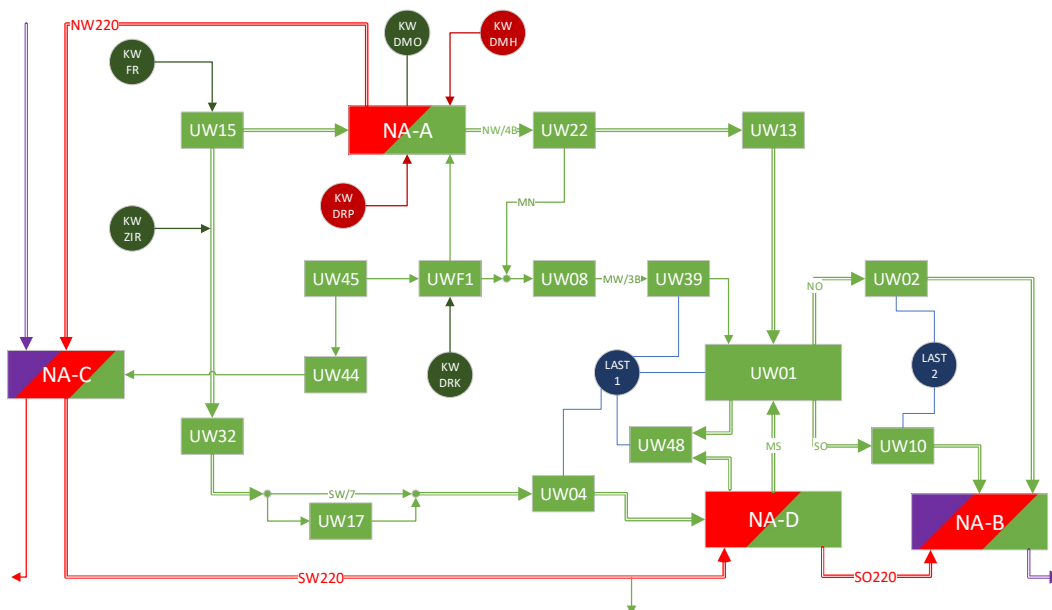


Abbildung 3-4: Lastflusssimulation – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Ist“

Netzabstützung	Leistung in MW	Leitung	Leistung in MW
NA-A	-52	SW220	871
NA-B	244	SO220	898
NA-C	33	NW220	870
NA-D	82	MS	5
Leitung	Leistung in MW	NO	127
NW/4B	114	SO	127
MW/3B	110	MN	13
SW/7	69		

Tabelle 3-6: Simulationsergebnisse – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Ist“

3.3 Stark belastete Leitungen

Durch die Simulationen wurde deutlich, dass sich die Leitungen parallel zur 220 kV Leitung „SW220“ als am stärksten belastet herausstellten. Dies bestätigte die im Vorhinein vom Netzbetreiber getroffene Abschätzung aus Erfahrungswerten. Durch die weit ins 110 kV Netz hineinragende Stichleitung NW220, kommt es von der Netzabstützung NA-A zur Netzabstützung NA-D zu Durchzügen über die parallel verlaufenden 110 kV Leitungen.

3.3.1 Leitung NW

Bei dieser Leitung handelt es sich um eine zweisystemige Leitung mit Al/St 240/40 mm² Leiterseilen. Lediglich zwischen Umspannwerk UW15 und Netzabstützung NA-A ist diese Leitung aufgrund der hohen Übertragungsleistungen als Zweierbündel ausgeführt. Der zulässige Dauerstrom beträgt hier 1280 A, die Maximalleistung bei einer üblichen Betriebsspannung von 116 kV etwa 260 MVA pro Leitungssystem. In den Sektionen mit Einfachseil liegt Grenzwert für den Dauerstrom bei 640 A, was einer Maximalleistung von etwa 130 MVA pro Leitungssystem entspricht.

3.3.2 Leitung MW

Bei dieser Leitung handelt es sich um eine Einfachsystemleitung mit Großteiles Al/St 240/40 mm² oder Aldrey 276 mm² Leiterseilen, welche für einen maximalen Dauerstrom von 640 A bzw. 635 A ausgelegt sind, was einer Maximalleistung bei einer üblichen Betriebsspannung von 116 kV von rund 130 MVA entspricht. Als besonders kritischer Leitungsabschnitt stellte sich hier der Bereich zwischen den Umspannwerken UW08 und UW39 heraus, welcher mit MW/3B gekennzeichnet wird. Im Umspannwerk UW08 speist dabei ein Laufwasserkraftwerk etwa 20 MW ein, was der Leistung entspricht, die direkt im Umspannwerk UW39 nahezu dauerhaft bezogen wird.

3.3.3 Leitung SW

Bei dieser Leitung handelt es sich um eine Zweisystemleitung, welche abschnittsweise mit Al/St 240/40 mm² oder Al/St 260/23 mm² Leiterseilen bestückt ist, welche für einen maximalen Dauerstrom von 640 A bzw. 685 A ausgelegt sind, was bei einer üblichen Betriebsspannung von 116 kV einer Maximalleistung von rund 130-135 MVA pro Leitungssystem entspricht. Zwischen den Umspannwerken UW32 und UW04 wird bei dieser Leitung nur jeweils ein System pro Umspannwerk eingeschliffen, was im Verlauf der Leitung zu einer unsymmetrischen Verteilung der Last führt.

Durch ihre, im Vergleich zu den Leitungen MW und NW, längere Leitungstrasse zwischen dem Erzeugungsschwerpunkt und dem Lastschwerpunkt ist diese Leitung durchwegs weniger belastet.

3.4 Änderungen und Umbauten im Ausbauzustand „Ist+“

Als Ausbauzustand „Ist+“ wird ein Ausbauzustand definiert, bei dem sämtliche definitiv geplanten oder bereits im Bau befindlichen Änderungen realisiert sind. Dabei wird die Realisierung von lastflussteuernenden Elementen bis zu diesem Zeitpunkt noch ausgeschlossen.

3.4.1 Änderungen im Netz

Eine signifikante Änderung des Netzes betrifft die Kraftwerksgruppe KW-DRK, welches inklusive Umspannwerk UWF1 über einen eigenen 220/110 kV Transformator direkt an das 220 kV Netz angeschlossen wird. Dabei werden die beiden Leitungen MW/1A und MW/1, welche bisher durch das Umspannwerk UWF1 gingen, jeweils direkt in die Netzabstützung NA-A geleitet und verkürzt sich beide um jeweils etwa 2 km. Die Leitung zwischen UWF1 und NA-A wird dabei rückgebaut.

Durch die zweite Änderung wird am Knoten des Kraftwerkes KW-ZIR und der Leitung SW ein Umspannwerk (UW52) gebaut, welches dort die Leitung SW symmetriert. Die Leistung des Kraftwerkes soll zukünftig über die Bestehende 110 kV Stickleitung an dieses Umspannwerk geführt und auf beide Leitungen aufgeteilt werden. Bisher erfolgte dies nur in eine Leitung, was zu unsymmetrischer Belastung in diesem Abschnitt sorgte. Die Leitungslängen der Leitung SW bleiben nahezu unverändert.

3.4.2 Neue Einspeiseanlagen

Bis zum neuen Netzausbaustand „Ist+“ werden folgende Erzeugungsanlagen an das 110 kV Netz angeschlossen

- Das KW-DRK wird mit einer Pumpspeicher-Erzeugungsanlage erweitert, die eine Engpasserzeugungsleistung von 45 MW und eine Engpasspumpleistung von 45 MW aufweist.
- Im UW04 wird ein Batteriespeicher mit 10 MW Engpassleistung realisiert.

In Abbildung 3-5 ist die schematische Darstellung des Netzes im Ausbauzustand „Ist+“ ersichtlich.

3.4.3 Übersicht Ausbauzustand „Ist+“

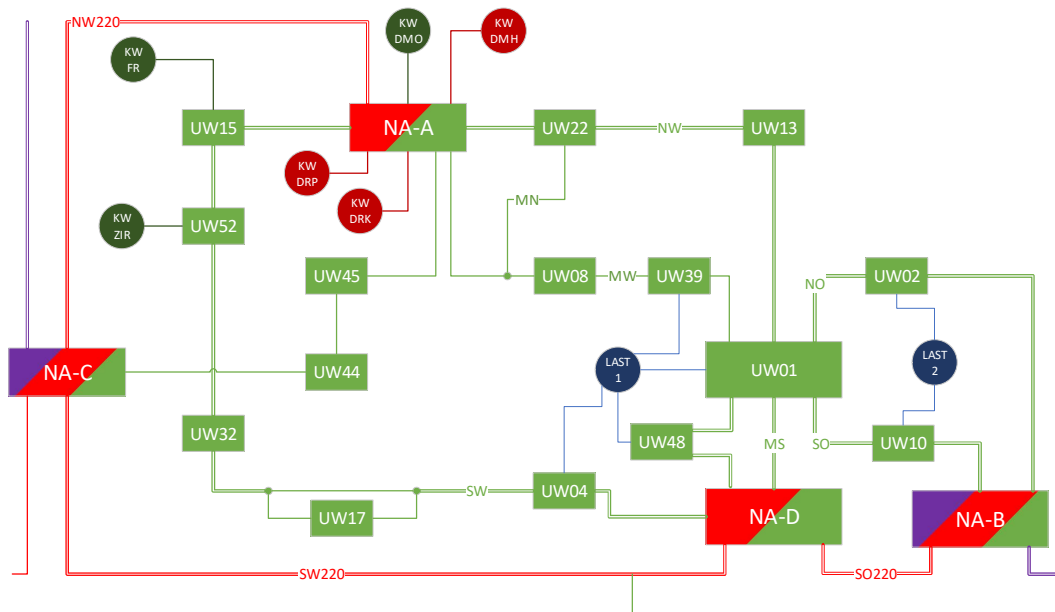


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung des 110 kV Netzes im Ausbauzustand „Ist+“

3.4.4 Sensitivität neuer Einspeiseanlagen nach Verlagerung von UWF1 auf 220 kV

Die Auswirkung auf die Lastverteilung nach dem Umbau in diesem Bereich wurde überprüft. Dabei wurde ausgehend von 100 MW Erzeugung im KW-DRK, die Verteilung auf das Netz im Zustand „Ist“ und „Ist+“ verglichen. Die Simulationen wurden im Belastungszustand „Hohe Erzeugungsleistung im westlichen Teil des Netzes“ durchgeführt und als Einspeiseleistung des Kraftwerkes DRK 0 MW bzw. 100 MW angenommen.

Netzabstützung/ Leitung	Erzeugung KW-DRK 0 MW	Erzeugung KW- DRK100 MW	Änderung
	MW	MW	MW
NA-A	29,8	83,2	53,4
NW220	940,0	994,0	54,0
NW (NA-A – UW22)	197,4	213,4	16,0
NW (NA-A – UW15)	-250,0	-241,2	8,8
MW (UWF1 – UW08)	72,6	84,0	11,4
MW (UWF1 – UW45)	-0,6	9,8	10,4

Tabelle 3-7: Einspeiseaufteilung im Ausbauzustand „Ist“

Netzabstützung/ Leitung	Erzeugung KW-DRK 0 MW	Erzeugung KW-DRK 100 MW	Änderung
	MW	MW	MW
NA-A	30,2	12,8	-17,4
NW220	940,0	1022,0	82,0
NW (NA-A – UW22)	191,8	199,8	8,0
NW (NA-A – UW15)	-250,8	-247,0	3,8
MW (NA-A – UW08)	77,3	80,6	3,3
MW (NA-A – UW45)	0,9	3,4	2,5

Tabelle 3-8: Einspeiseaufteilung im Ausbauzustand „Ist+“

Aus Tabelle 3-7 und Tabelle 3-8 wird deutlich, dass wie zu erwarten, nach dem Umbau mehr Leistung direkt über die 220 kV Leitung NW220 von der Netzabstützung NA-A abgeleitet wird als im jetzigen Ausbauzustand. Von 100 MW Erzeugung, verblieben vor dem Umbau ca. 46 MW im 110 kV Netz. Nach dem Umbau reduziert sich dieser Wert auf 17,4 MW. So kann davon ausgegangen werden, dass eine Erhöhung der Erzeugungsleistung in diesem Kraftwerk zu etwa 18 % ins 110 kV Netz geleitet wird.

3.4.5 Auswirkung des Umbaus auf bestehende Lastfälle

Bei der Simulation wurden Erzeugungs- oder Pumpleistung neu hinzugefügte Kraftwerke der Lastsituation angepasst gewählt. Somit wurden in Lastsituationen mit starker Erzeugung die Erzeugungsengpassleistung, und in Lastsituationen mit Pumpbetrieb die Pump- bzw. Speicherengpassleistung gewählt.

3.4.5.1 Hohe Erzeugung im westlichen Teil des Netzes

Die Pfeile in der Abbildung 3-6 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

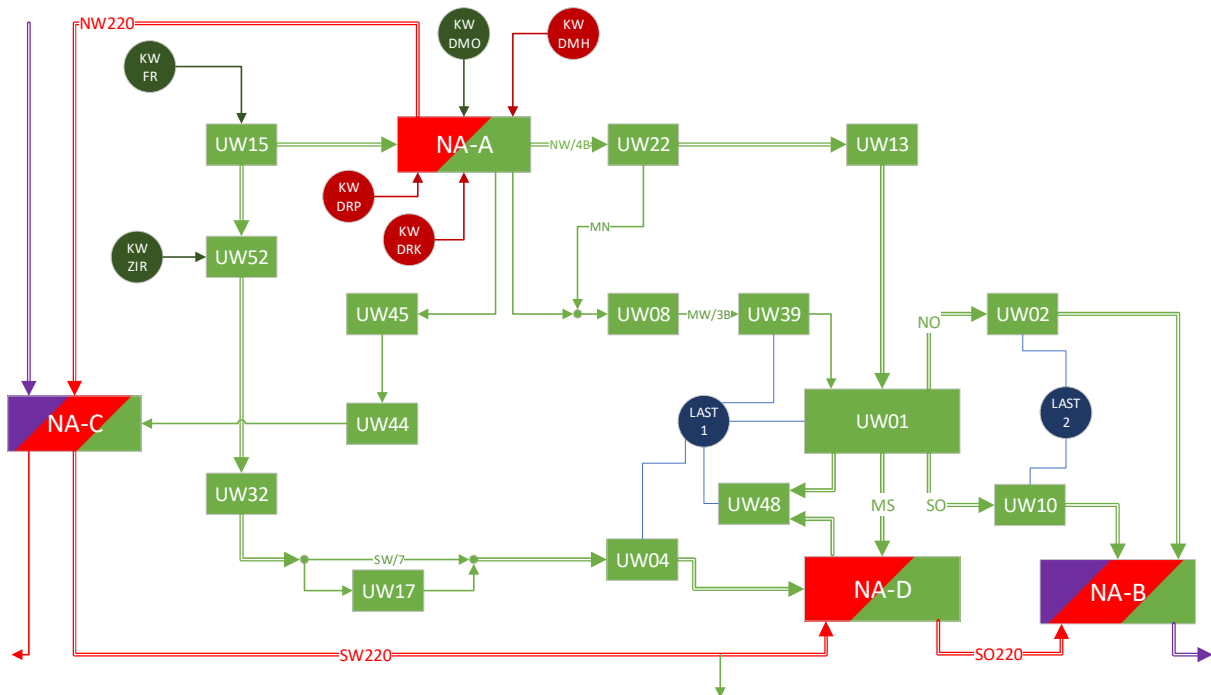


Abbildung 3-6: Lastflusssimulation – Hohe Erzeugungsleistung im Ausbauzustand „Ist+“

Netzabstützung	Leistung in MW	Leitung	Leistung in MW
NA-A	-7	SW220	346
NA-B	-7	SO220	357
NA-C	34	NW220	1060
NA-D	97	MS	14
Leitung	Leistung in MW	NO	80
NW/4B	101	SO	70
MW/3B	97	MN	14
SW/7	67		

Tabelle 3-9: Simulationsergebnisse – Hohe Erzeugungsleistung im Ausbauzustand „Ist+“

3.4.5.2 Hohe Pumpleistung im westlichen Teil des Netzes

Die Pfeile in der Abbildung 3-7 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

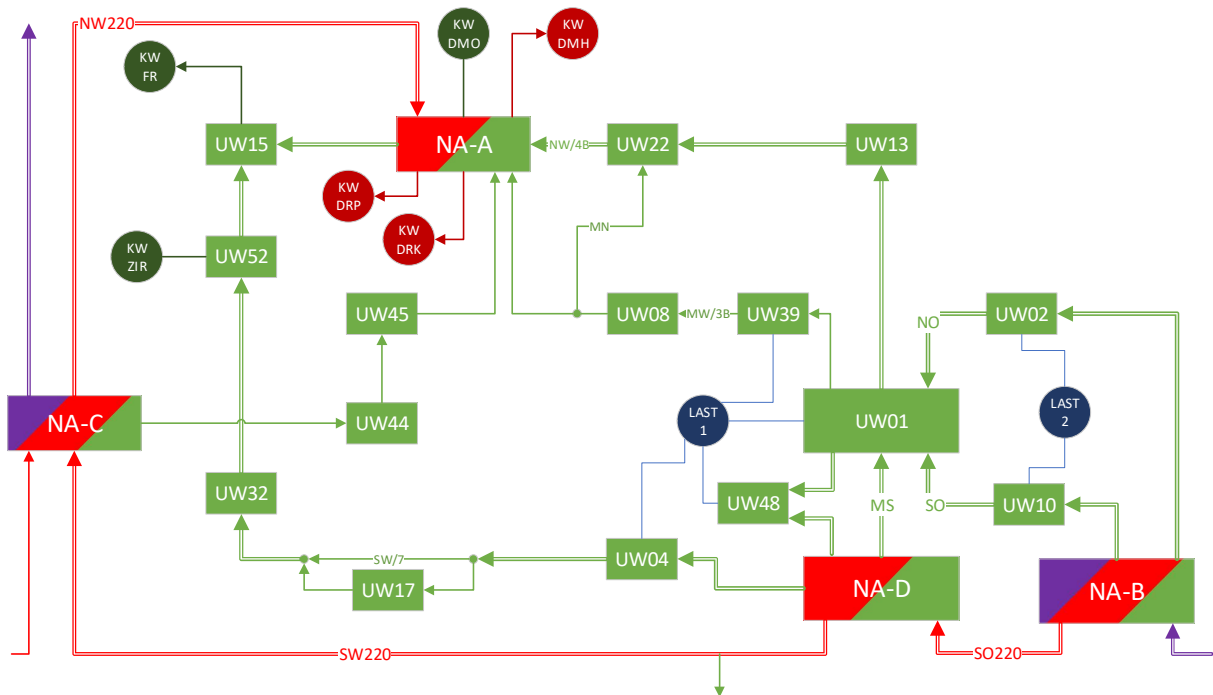


Abbildung 3-7: Lastflusssimulation – Hohe Pumpleistung im Ausbauzustand „Ist+“

Netzabstützung	Leistung in MW	Leitung	Leistung in MW
NA-A	44	SW220	635
NA-B	-355	SO220	879
NA-C	-16	NW220	516
NA-D	-196	MS	34
Leitung	Leistung in MW	NO	89
NW/4B	64	SO	126
MW/3B	59	MN	6
SW/7	46		

Tabelle 3-10: Simulationsergebnisse – Hohe Pumpleistung im Ausbauzustand „Ist+“

3.4.5.3 Hoher Durchzug ausgehend vom Lastfluss des übergeordneten Netzes bei gleichzeitig hoher Erzeugung

Die Pfeile in der Abbildung 3-8 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

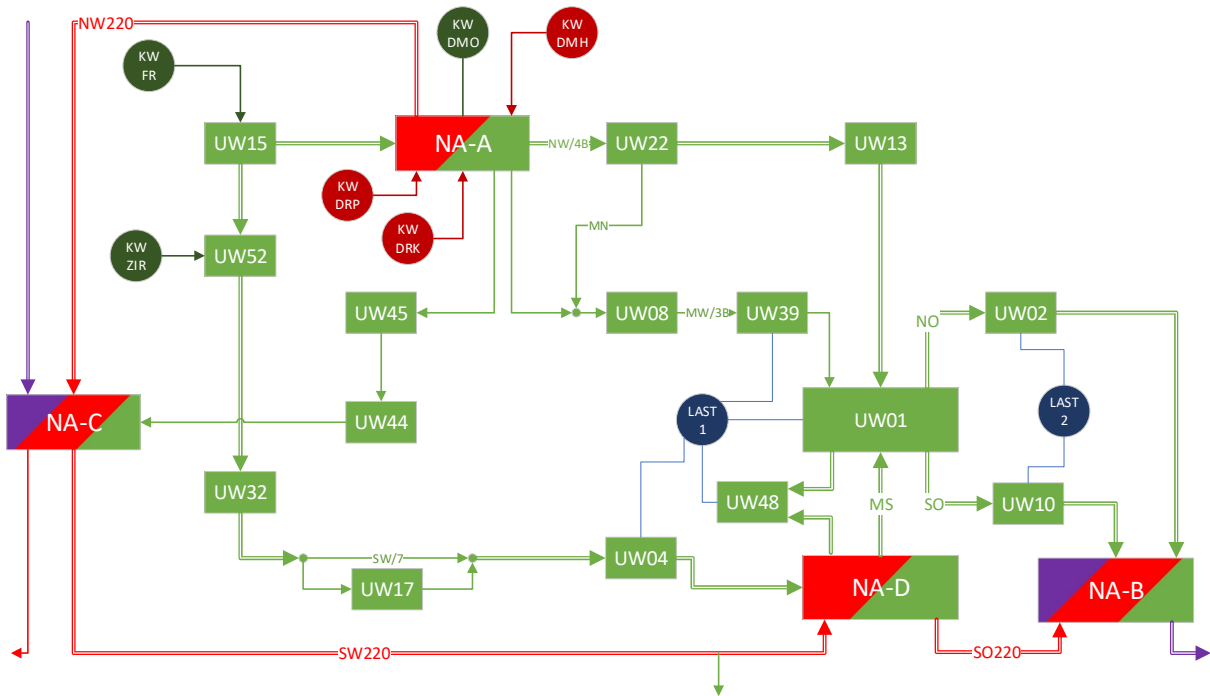


Abbildung 3-8: Lastflusssimulation – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Ist+“

Netzabstützung	Leistung in MW	Leitung	Leistung in MW
NA-A	166	SW220	892
NA-B	192	SO220	862
NA-C	16	NW220	932
NA-D	26	MS	42
Leitung	Leistung in MW	NO	154
NW/4B	113	SO	160
MW/3B	109	MN	13
SW/7	67		

Tabelle 3-11: Simulationsergebnisse – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Ist+“

3.5 Änderungen und Umbauten im Ausbauzustand „Zukunft“

Als Ausbauzustand „Zukunft“ wird ein Ausbauzustand definiert, in dem alle geplanten Änderungen der nächsten 5 bis 10 Jahre realisiert sind. Aufgrund der aktuellen Situation und dem forcierten Ausbau erneuerbarer Energien kann davon ausgegangen werden, dass alle bis zu diesem Zeitpunkt geplanten Änderungen auch umgesetzt werden. Das Netz „Zukunft“ sollte dann der Ausbauzustand sein, in welchem lastflusssteuernde Elemente zum Einsatz kommen. Dieser Ausbauzustand wurde zusätzlich auch ohne Lastflusssteuernde Elemente als Vergleich simuliert.

3.5.1 Änderungen im Netz

Aufgrund der wachsenden Industrie um das Umspannwerk UW48 kann davon ausgegangen werden, dass dort bis zum Zeitpunkt „Zukunft“ dauerhaft 160 MW Bezug anliegt. Bei der vorhandenen Leitung in dieses UW handelt es sich überwiegend um eine Leitung mit 2 Systemen zu je Al/St 120/20 mm², welche für diese Anforderungen zu schwach dimensioniert ist. Aufgrund dessen ist geplant, ein System der Leitung MS in das Umspannwerk UW48 zu schleifen. Bei der Leitung MW handelt es sich um eine sehr leistungsstarke Leitung aus zwei Systemen mit jeweils zwei Bündelleiter zu je Al/St 550/70 mm² welche für einen maximalen Dauerstrom von 2150 A ausgelegt sind, was einer Maximalleistung von rund 430 MVA pro Leitungssystem entspricht.

3.5.2 Neue Einspeiseanlagen

Bis zum neuen Netzausbaustand „Ist+“ werden folgende Erzeugungsanlagen an das 110 kV Netz angeschlossen

- Im KW-ZIR wird eine zusätzliche Pumpspeicher Erzeugungsanlage mit einer Erzeugungseingangsleistung von 50 MW und einer Pumpengangsleistung von 50 MW realisiert.
- Im UW45 wird ein Schwallausgleichskraftwerk (KW 1) mit einer Erzeugungseingangsleistung von 25 MW errichtet.
- Im UW08 wird ein Pumpspeicherkraftwerk (KW 2) mit einer Erzeugungseingangsleistung von 30 MW und einer Pumpengangsleistung von 30 MW errichtet.
- Im UW17 wird ein Pumpspeicherkraftwerk (KW 3) und mehrere kleine Erzeugungsanlagen mit einer gesamten Erzeugungseingangsleistung von 20 MW und einer Pumpengangsleistung von 15 MW errichtet.
- Im östlichen Teil des Netzes wird um das Umspannwerk UW02 ein Batteriespeicher mit einer Maximalleistung von 20 MW realisiert. Dieser sollte aber nahezu keinen Einfluss auf das Westnetz haben.

3.5.3 Photovoltaik Einspeisung

Bis zum Zeitpunkt „Zukunft“ wird auch ein massiver, flächendeckender Ausbau an Photovoltaikanlagen erwartet. Gesamt ist im Netz bis zum Jahr 2030 mit einer Einspeiseleistung von ca. 670 MW zu rechnen. Der Anteil an dieser Gesamtleistung pro 110 kV Umspannwerk wird durch Ausbaupläne, Abschätzungen und örtlichen Gegebenheiten berechnet und von den Messwerten der Last abgezogen. Dabei liegt der überwiegende Teil der Einspeisung im östlichen Teil des Netzes.

3.5.4 Übersicht Ausbauzustand „Zukunft“

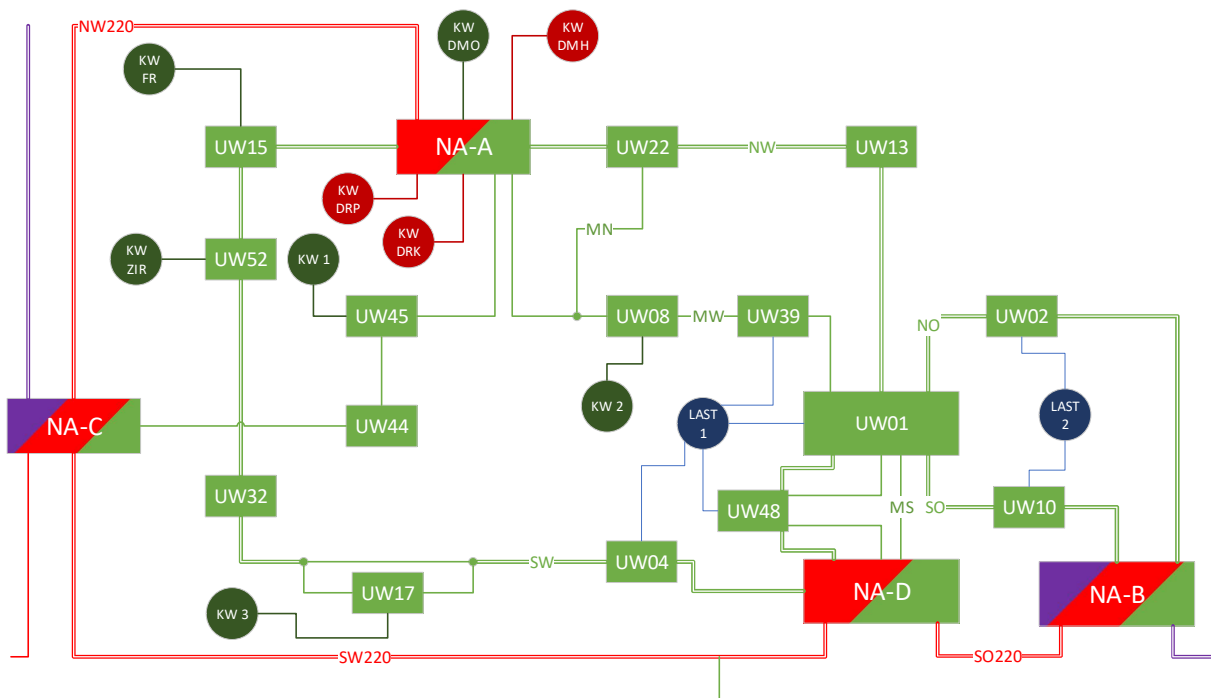


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung des 110 kV Netzes im Ausbauzustand „Zukunft“

3.5.5 Sensitivität neuer Einspeiseanlagen

Im Ausbauzustand „Zukunft“ wurde die Lastaufteilung neuer Kraftwerkseinspeisungen überprüft. Dazu wurde jeweils das Kraftwerk mit Engpassleistung zugeschaltet und die Lastverteilung simuliert.

3.5.5.1 KW-ZIR 50 MW

Leitung	Erzeugung KW-ZIR 0 MW	Erzeugung KW-ZIR 50 MW	Änderung MW	Aufteilung %
	MW	MW		
SW(UW52 – UW15)	-139,3	-104,3	35,0	70,0
SW(UW52 – UW32)	152,8	167,0	14,2	28,4

Tabelle 3-12: Sensitivität Einspeisung KW ZIR

3.5.5.2 KW-1 25 MW

Leitung	Erzeugung KW-1 0 MW	Erzeugung KW-1 25 MW	Änderung MW	Aufteilung %
	MW	MW		
MW(UW45 – UW44)	49,6	53,7	4,1	16,4
MW(UW45 – NA-A)	-16,7	4,2	20,9	83,6

Tabelle 3-13: Sensitivität Einspeisung KW 1

3.5.5.3 KW-2 30 MW

Leitung	Erzeugung KW-2 0 MW	Erzeugung KW-2 30 MW	Änderung MW	Aufteilung %
	MW	MW		
MW(UW08 – UW39)	113,9	124,6	10,7	35,6
MW(UW08 – NA-A)	-98,1	-78,8	19,3	64,4

Tabelle 3-14: Sensitivität Einspeisung KW 2

3.5.5.4 KW-3 20 MW

Leitung	Erzeugung KW-3 0 MW	Erzeugung KW-3 20 MW	Änderung MW	Aufteilung %
	MW	MW		
SW(UW17 – UW04)	68,0	75,0	7	35,0
SW(UW17 – UW32)	-74,0	-61,2	12,8	65,0

Tabelle 3-15: Sensitivität Einspeisung KW 3

3.6 Definition neuer Lastfälle

Bei der Definition neuer Lastfälle sollten ausgehend von den jetzigen Lastfällen realistische Szenarien definiert werden. Somit wurde die Auswirkung von neuen Kraftwerken und Photovoltaikeinspeisung auf die vorhandenen Lastfälle abgeschätzt. Erzeugungsleistung aus Pumpspeicherkraftwerken wird meistens benötigt, wenn keine oder wenig Erzeugung aus erneuerbarer Energie vorherrscht. Und Pumpleistung ergibt sich aus einem Überangebot aus Erneuerbarer Energie bei niedrigem Verbrauch.

Somit wurden für die weiteren Untersuchungen zwei neue Belastungsszenarien definiert.

- Hoher West – Ost Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung von neuen und bestehenden Kraftwerken
- Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher Erzeugung durch Photovoltaik bei niedrigem Verbrauch

Beim ersten Lastfall wurde ausgehend vom ursprünglichen Lastfall „Hoher Durchzug + Erzeugung“ der Einsatz von neuen Kraftwerken dem Lastfall angepasst. So wurden alle neuen Kraftwerke mit voller Erzeugungsleistung zusätzlich zu den Erzeugungsleistungen der vorhandenen Kraftwerke betrieben. Als Photovoltaikeinspeisung wurde hier 0 % gewählt, da einerseits der Zeitpunkt des Lastfalles in den Abendstunden liegt und andererseits diese Einspeisung dem Lastfluss entgegenwirken würde.

Beim zweiten Lastfall wurde ein Zeitpunkt gewählt, an dem der Verbrauch sehr niedrig ist. Dazu wurde ein Sonntag - Nachmittag im Sommer ausgewählt. Ausgehend von der zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Erzeugung, wurden sämtliche bestehende und neue Kraftwerke die einen Pumpbetrieb ermöglichen mit maximaler Pumpleistung betrieben. Zusätzlich wurde als Photovoltaikeinspeisung 100 % der ermittelten Leistung angenommen und der übergeordnete Lastfluss in der 220 kV Leitung nach dem ursprünglichen Messwert des hohen Pumpbetriebes eingestellt. Somit sollte sich ein starker Lastfluss vom Osten aus über den Netzknoten UW01 in Richtung Kraftwerksschwerpunkt im Westen ergeben.

3.6.1 Hoher Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung

Für dieses Szenario wurde der Messwert am 28.06.2021 um 19:45 Uhr für die Belastungswerte und Erzeugungsanlagen herangezogen. Die Werte in Tabelle 3-16 beziehen sich auf die gesamte Kraftwerksleistung der einzelnen Kraftwerksgruppen. Beim 220 kV Lastfluss bezieht sich dieser Wert auf den in der NEPLAN Version eingestellten Wert des übergeordneten Lastflusses.

Kraftwerk	Leistung in MW	Kraftwerk	Leistung in MW
KW FR	-232	KW DMH	-530
KW ZIR	-84	KW DRP	-392
KW DRK	-176	KW 1	-25
KW DMO	0	KW 2	-30
B UW04	-10	KW 3	-20
B UW02	-20		
220 kV Lastfluss eingestellt: 2585 MW West > Ost			

Tabelle 3-16: Eingestellte Erzeugungsdaten Kraftwerke – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Zukunft“

Die Pfeile in der Abbildung 3-10 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

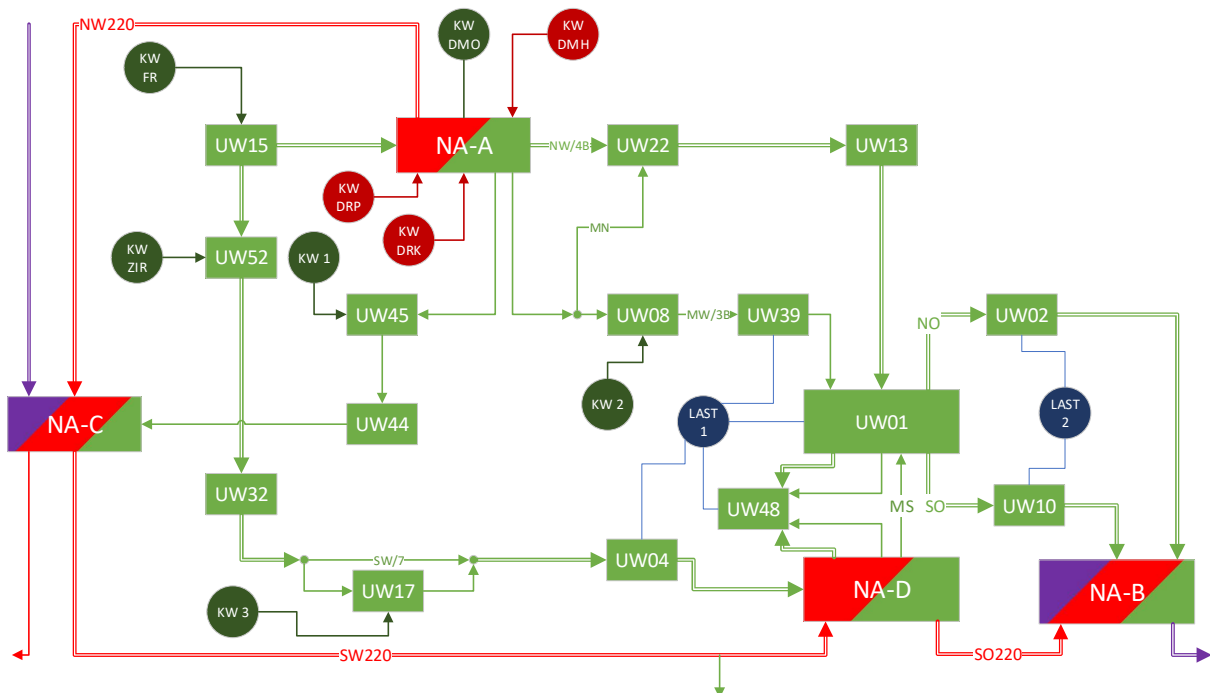


Abbildung 3-10: Lastflusssimulation – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Zukunft“

Netzabstützung	Leistung in MW	Leitung	Leistung in MW
NA-A	-120	SW220	908
NA-B	244	SO220	903
NA-C	32	NW220	980
NA-D	51	MS	5
Leitung	Leistung in MW	NO	117
NW/4B	117	SO	117
MW/3B	126	MN	3
SW/7	82		

Tabelle 3-17: Simulationsergebnisse – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Zukunft“

In diesem Lastfall sieht man, dass die neuen Kraftwerke die frei gewordenen Kapazitäten durch den Netzbau wieder auffüllen. Vor allem die Leitung MW, welche schon im „Ist“ Zustand an der Belastungsgrenze war, ist hier leicht überlastet und stellt mit der Leitung NW weiterhin den Flaschenhals des Netzes dar. Die (n-1) Ausfallssicherheit ist in diesem System nicht mehr gewährleistet. Lediglich die südliche Leitung SW hat noch Leistungsreserven.

3.6.2 Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher PV-Einspeisung und niedrigem Verbrauch

Für dieses Szenario wurde der Messwert am 27.03.2022 um 15:30 Uhr für die Belastungswerte und Erzeugungsanlagen herangezogen. Alle Pumpspeicherkraftwerke wurden auf Pumpengpassleistung eingestellt. Die Werte in Tabelle 3-18 beziehen sich auf die gesamte Kraftwerksleistung der einzelnen Kraftwerksgruppen. Beim 220 kV Lastfluss bezieht sich dieser Wert auf den in der NEPLAN Simulation eingestellten Wert des übergeordneten West-Ost Lastflusses.

Kraftwerk	Leistung in MW	Kraftwerk	Leistung in MW
KW FR	230	KW DMH	394
KW ZIR	19	KW DRP	373
KW DRK	105	KW 1	-25
KW DMO	141	KW 2	30
B UW04	10	KW 3	15
B UW02	20		
220 kV Lastfluss eingestellt: 2600 MW Ost > West			

Tabelle 3-18: Eingestellte Erzeugungsdaten Kraftwerke – Maximale Pumpleistung mit PV im Ausbauzustand „Zukunft“

Die Pfeile in der

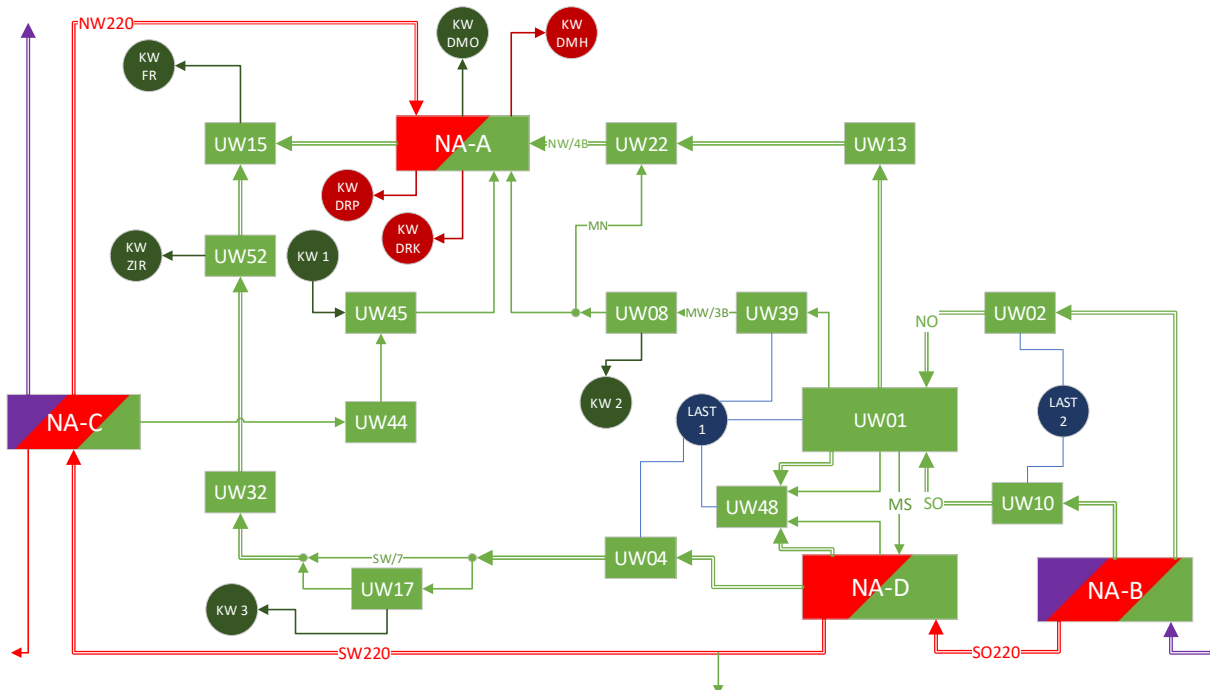


Abbildung 3-11 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

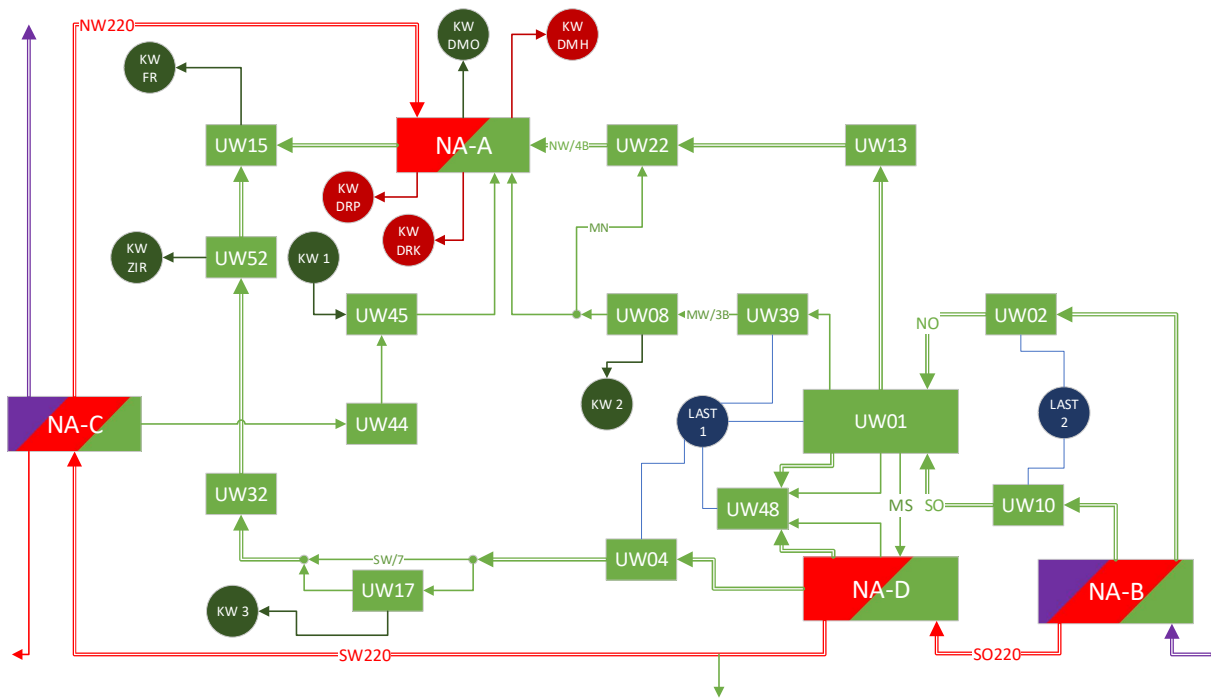


Abbildung 3-11: Lastflussimulation – Maximale Pumpleistung mit PV im Ausbaustand „Zukunft“

Netzabstüzung	Leistung in MW	Leitung	Leistung in MW
NA-A	260	SW220	857
NA-B	-36	SO220	1014
NA-C	-5	NW220	614
NA-D	-131	MS	25
Leitung	Leistung in MW	NO	222
NW/4B	144	SO	229
MW/3B	123	MN	13
SW/7	73		

Tabelle 3-19: Simulationsergebnisse – Maximale Pumpleistung mit PV im Ausbaustand „Zukunft“

Dieser Belastungsfall wäre ohne lastflusssteuerndes Element nicht realisierbar. Die Leitungen NW und MW sind schon deutlich überlastet und die (n-1) Ausfallsicherheit ist nicht mehr gewährleistet. Die Leitung SW hat mit ca. 70 MW Belastung pro System noch Belastungsreserven.

3.7 Zusammenfassung der Lastfälle

Im Erzeugungslastfall ergibt sich bedingt durch die Konzentration von Erzeugungsanlagen im Westen ein starker Lastfluss von Westen Richtung Netzknoten UW01 und weiter Richtung Osten. Die Netzabstützung NA-A entlang der Leitung NW führt bei übergeordnetem Lastfluss von Westen nach Osten zu Einspeisungen in das 110 kV Netz. Der Lastflusspfad von der Netzabstützung NA-A über die Leitungen NW und MW Richtung UW01 und weiter Richtung Osten ergeben einen günstigen Parallelpfad zum 220 kV Netz. Dadurch ergibt sich in den Leitungsabschnitten direkt nach der Netzabstützung in Lastflussrichtung Osten die höchste Auslastung. In der Leitung NW zwischen NA-A und UW22. Entlang der Leitung MW ist in diesem Lastfall der Bereich zwischen UW08 und UW39 am stärksten belastet. Die Leitung SW, die nach dem KW-ZIR in Lastflussrichtung Osten keine nennenswerten Einspeiseanlagen besitzt, ist durchwegs weniger belastet als NW und MW.

Im Pumplastfall sind die Leitungen deutlich weniger belastet, da die Pumpleistung deutlich unter der maximalen Erzeugungsleistung liegt. Im Pumpbetrieb ergibt sich ein Lastfluss von Osten Richtung Westen. Die Leitungsabschnitte in Lastflussrichtung direkt vor der Netzabstützung NA-A sind auch hier stark belastet, da über die Netzabstützung NA-A Leistung in das 220 kV Netz abgeführt wird. Der Pumplastfall im Ausbauzustand „Ist“ kann aber bezüglich der Leitungsauslastungen als deutlich weniger kritisch angesehen werden.

Im Ausbauzustand „Ist+“ werden durch den Umbau des Kraftwerkes KW-DRK und dessen Verlagerung in die 220 kV Spannungsebene speziell die Leitungen NW und MW merklich entlastet. Ein Teil der durch den Umbau gewonnenen Leistungsreserve wird aber direkt durch die Leistungserhöhung des Kraftwerkes KW-DRK wieder aufgebraucht. Das Umspannwerk UW52, welches bis zu diesem Ausbauzustand gebaut wird, teilt die in diesem Bereich eingespeiste Leistung auf beide Leitungssysteme auf, was bisher nicht erfolgte, da das KW-ZIR im Ausbauzustand „Ist“ nur in eines der beiden Leitungssystemen einspeist. Diese Änderung entlastet dieses Leitungssystem in diesem Bereich. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass der Ausbauzustand „Ist+“ im Vergleich zum Zustand „Ist“ eine Entlastung des Netzes darstellt.

Im Ausbauzustand „Zukunft“ ergeben sich durch veränderte Belastungssituationen neue Herausforderungen für das Netz. Durch den stetigen Zubau erneuerbarer Erzeugungsanlagen, vor allem Photovoltaikanlagen, werden in Zukunft auch Pumplastfälle kritisch. So ergeben sich in Belastungsszenarien bei hoher Erzeugung durch PV-Anlagen im Sommer bei gleichzeitig geringem Verbrauch, etwa an einem Sonntag, sehr günstige Marktbedingungen für Pumpspeicherkraftwerke. Durch die Konzentration der Photovoltaikanlagen aufgrund der topografischen Lage vor allem im östlichen Teilnetz und der Pumpspeicherkraftwerke im westlichen Teilnetz ergeben sich dadurch sehr starke Leitungsauslastungen in Leitungen von Osten nach Westen. In diesem Lastszenario sind die Leitungsabschnitte in Lastflussrichtung direkt vor den Pumpspeicherkraftwerken stark belastet. In der Leitung NW ist es der Abschnitt zwischen UW22 und NA-A, wo Leistung in das 220 kV Netz abgeführt wird. Bei der Leitung MW ist es der Leitungsabschnitt zwischen UW39 und UW08. In der Leitung SW sind die Auslastungen durchwegs niedriger als in den Leitungen NW und MW. Hohe Auslastungen sind hier, im Bereich des UW17 und zwischen UW32 und UW52 zu verzeichnen. Auch im Erzeugungsfall

erhöhen sich die Leitungsauslastungen der bereits in den vorherigen Ausbauständen relevanten Leitungen.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die neu installierten Einspeiseanlagen im Ausbaustand „Zukunft“ die Belastungssituation sowohl im Erzeugungs- als auch im Pumpbetrieb nicht verbessert, was den Einsatz von Lastflusssteuernden Elementen für den einschränkungsfreien Betrieb unumgänglich macht.

4 Ableitung von lastflusssteuernden Maßnahmen zur Leitungsentlastung

Anhand der durch Simulationen von Lastfällen gewonnenen Erkenntnissen über stark ausgelastete Leitungsabschnitte wurden nun geeignete Standorte für lastflusssteuernde Elemente ausgewählt.

Die Beeinflussungsvarianten wurden mit verschiedenen, technischen Möglichkeiten von lastflusssteuernden Elementen im „Ist“ Netz simuliert. Als Belastungszustand wurde das Szenario „Durchzug + Erzeugung“ gewählt, da dieses die höchsten Leitungsauslastungen zeigte und somit ideal für die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Varianten zur Lastflusssteuerung ist. Eine Vorauswahl auf zwei Technologien in drei Einbauvarianten wurde getroffen und die Varianten im Netz „Zukunft“ mit den neuen Lastfällen simuliert.

4.1 Stufen der Transformatoren in den Netzabstützungen

Es wurde die maximal ohne bauliche Umbaumaßnahmen realisierbare Entlastung des westlichen Netzes simuliert. Dabei war darauf zu achten, dass die Spannungen in den $\pm 10\%$ Spannungsgrenzen bleiben. In der Praxis obliegt die Regelung der Transformatorstufen dem Übertragungsnetzbetreiber, weshalb diese Möglichkeit der Lastflusssteuerung schwer umsetzbar ist. Außerdem wird der Betrieb nahe an den Spannungslimits in der Praxis nicht durchgeführt.

Als Transformatorstufen wurden folgende Einstellungen gewählt.

Netzabstützung	Stufe	Spannung in kV
NA-A	1	114,2
NA-B	22	120,5
NA-C	25	103,8
NA-D	25	120,5

Tabelle 4-1: Eingestellte Werte für die Transformatoren der Netzabstützung

Die Pfeile in der Abbildung 4-1 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

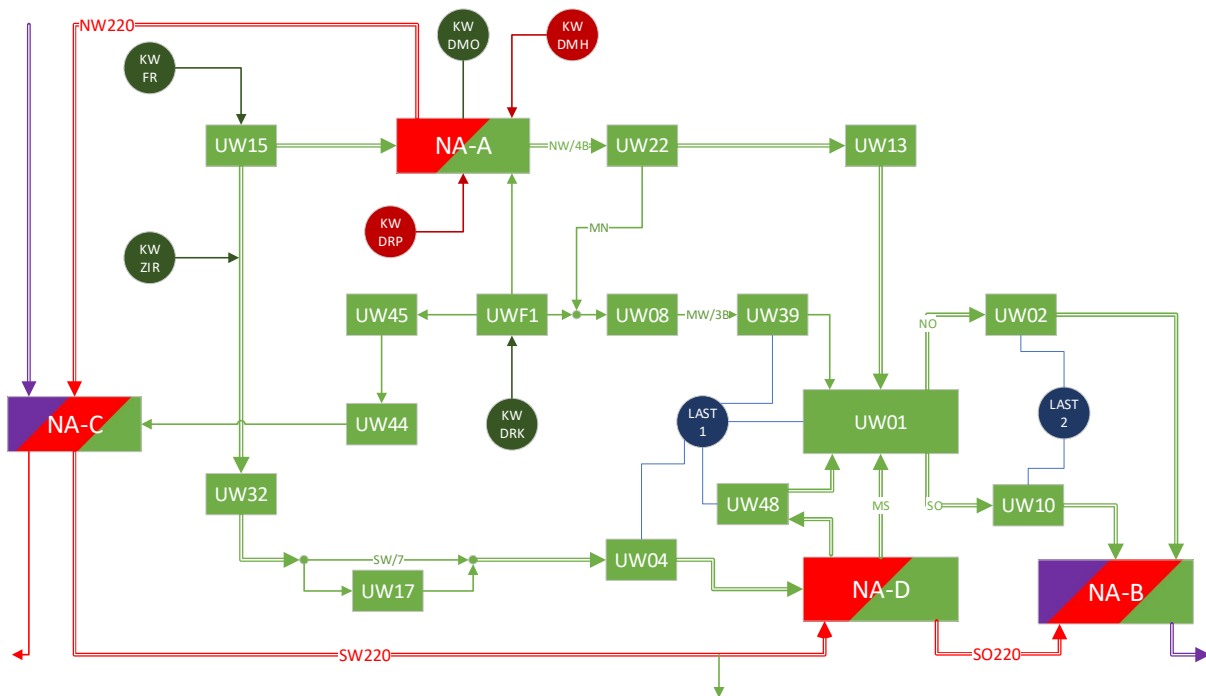


Abbildung 4-1: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch Stufen der Transformatoren in den Netzabstützungen

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	-13	SW220	871	940
NA-B	244	300	SO220	898	830
NA-C	33	73	NW220	870	910
NA-D	82	-53	MS	5	70
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	154
NW/4B	114	93	SO	127	159
MW/3B	110	91	MN	13	11
SW/7	69	58			

Tabelle 4-2: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch Stufen der Transformatoren in den Netzabstützungen, LFS steht für Lastflusssteuerung

Wie im Vergleich zu den Simulationsergebnissen ohne Lastflusssteuerung sichtbar ist, ist eine Entlastung der kritischen Leitungen durch das Ausreizen der Transformatorstufen möglich. Allerdings war nahezu überall im östlichen Teil des Netzes in den Simulationen die Spannung nahe der 110 % Obergrenze.

4.2 Lastflusssteuernden Elemente

Bei der Auswahl von Standorten wurde nach zwei unterschiedlichen Konzepten vorgegangen.

Einerseits sollte der Lastfluss über die Kupplung im UW01 reduziert werden und sich somit der Lastfluss zwischen östlichem und westlichem Teil des Netzes reduzieren. Dabei bleibt aber die ungleiche Lastflussaufteilung zwischen den Leitungen NW, MW und SW weiterhin erhalten.

Andererseits sollten die stark belasteten Leitungen NW und MW mit einem lastflusssteuernden Element in Serie beeinflusst werden. Die Idee hier ist, den Lastfluss auf die drei Leitungen NW, MW und SW gleichmäßig aufzuteilen, um somit die vorhandenen Kapazitäten in der Leitung SW besser ausnützen zu können.

4.2.1 Dimensionierung der Drossel

Bei der Dimensionierung der Drossel wurde sich an die Leitungslängen der Leitungen NW, MW und SW orientiert. Der Lastfluss von der Netzabstützung NA-A aus zur Netzabstützung NA-D sollte möglichst gleichmäßig auf die Leitungen NW, MW und SW aufgeteilt werden. Da die drei Leitungen nahezu dieselben Induktivitätsbeläge aufweisen, kann man sich bei der Dimensionierung der Drossel an der Leitungslänge orientieren. Die Freileitung mit Leiterseilen des Typs Al/St 240/40 mm² weisen dabei einen Induktivitätsbelag von $L' \approx 1,3 \text{ mH/km}$ auf. In Abbildung 4-2 werden die Leitungslängen der Netztopologie „Zukunft“ dargestellt.

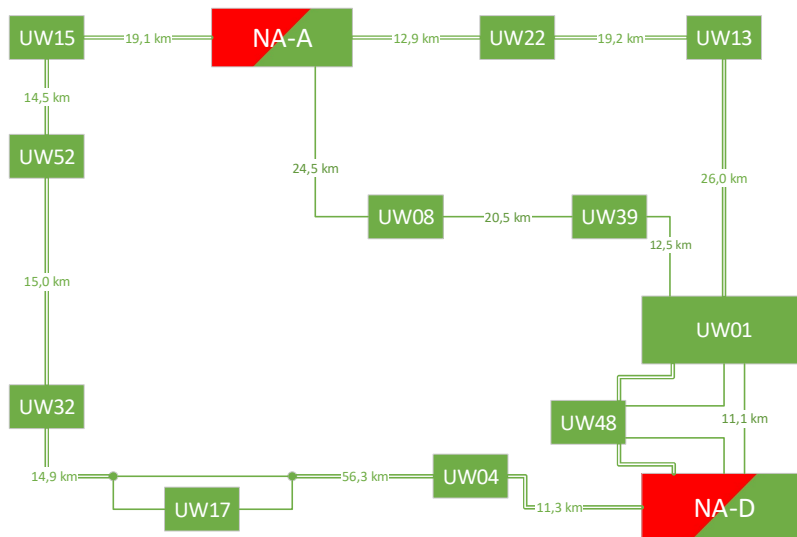


Abbildung 4-2: Leitungslängen der Netztopologie „Zukunft“

Wie aus Abbildung 4-2 ersichtlich, ergeben sich nun für die Leitungen NW, MW und SW folgende Leitungslängen:

- NW = 69,2 km
- MW = 68,6 km
- SW = 131,1 km

Somit sind die Leitungen NW und MW ca. 62 km kürzer als die Leitung SW. Dadurch ergibt sich für die Drossel als Induktivität:

$$L_{Drossel} = L'_{Leitung} \cdot l_{Leitung} = 1,3 \text{ mH/km} \cdot 62 \text{ km} = 80,6 \text{ mH} \quad (4.2-1)$$

Somit ergeben sich für die Drossel folgende Daten:

$L = 80 \text{ mH} \rightarrow U_k = 39,4 \%$ und $R = 110 \text{ m}\Omega \rightarrow U_R = 0,17 \%$ verwendet. Der Nennstrom beträgt $I_{nenn} = 1000 \text{ A}$ und die Nennspannung $U_{nenn} = 110 \text{ kV}$

In Abbildung 4-3 sind die in NEPLAN eingestellten Drosseldaten ersichtlich.

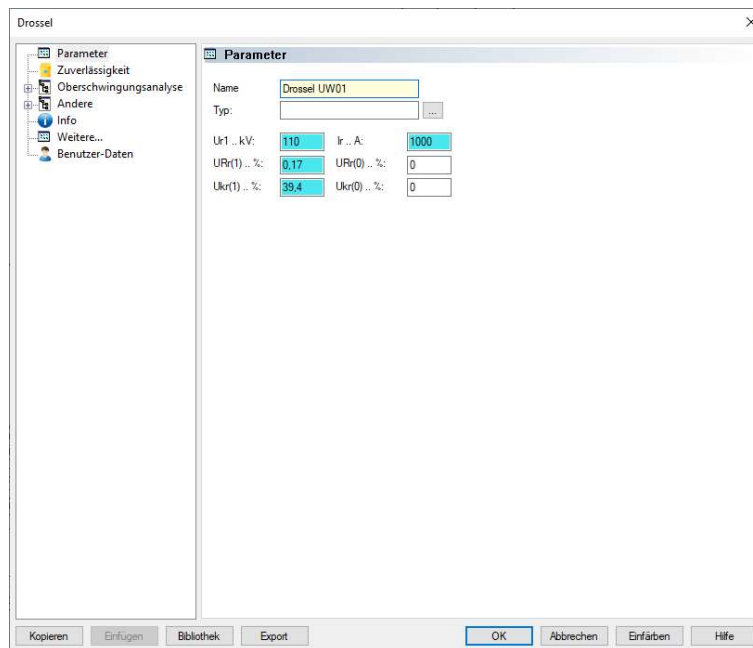


Abbildung 4-3: Drosseldaten

4.2.2 Dimensionierung des Phasenschiebertransformators

Bei der Dimensionierung des Phasenschiebertransformators waren Parameter wie Übertragungsleistung und maximaler Übertragungswinkel zu bestimmen. Als Übertragungsleistung scheinen die bisher verwendeten 400 MVA laut Simulationsergebnissen ausreichend groß gewählt zu sein. Beim maximalen Phasenwinkel sollte in der Praxis ein Wert von $\pm 25^\circ$ nicht überschritten werden. Die bei ersten Simulationen gewählten ± 30 Stufen zu je $\Delta u = 1\%$ mit einem maximalen Übertragungswinkel von $\pm 16,7^\circ$ erwiesen sich als ausreichend groß dimensioniert. Um den Einstellbereich des Winkels nach oben hin vergrößern zu können, wurde der Bereich auf ± 40 Stufen zu je $\Delta u = 1\%$ erweitert, was einem maximalen Winkel von $\pm 21,8^\circ$ entspricht. In Abbildung 4-4 sind die in NEPLAN verwendeten Daten des Phasenschiebertransformators ersichtlich.

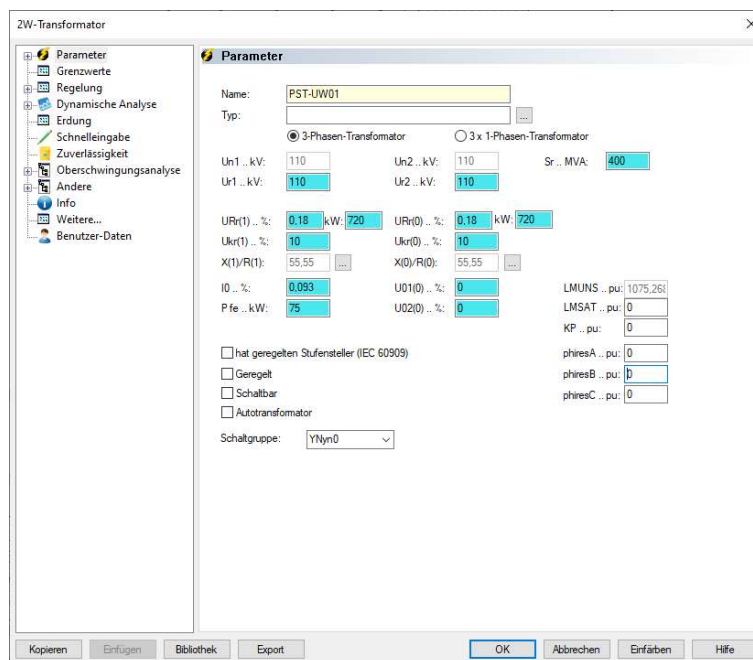


Abbildung 4-4: Daten des Phasenschiebertransformators

4.2.3 Dimensionierung des SSSC

Für diese Simulation wurde ein SSSC-Element der Firma SmartValve verwendet. Dieses SmartValve ist in Modulen zu je $\pm 566\text{V} - \pm 5660\text{V}$ stufenlos regelbarer Zusatzspannung realisiert. Diese Zusatzspannung liegt 90° phasenversetzt zum Strom an. Der minimale Einsatzstrom beträgt 100 A , der Maximalstrom beträgt 1800 A . Die maximale Zusatzspannung würde einem Übertragungswinkel von ca. 3° entsprechen. Da die Funktionsweise des SSSC ähnlich dem des PSTs ist, wurde die Simulation in NEPLAN mittels PST durchgeführt. Als U_k wurden 1% angenommen. Für die Regelstufen wurden, ausgehend von der Nennstufe 0 , ± 30 Stufen für drei Module des SSSCs gewählt, mit einer Spannung von $0,51\%$ pro Stufe. Die Simulation wurde dabei ausgehend von drei Modulen in Serie in der höchstmöglichen Stufe durchgeführt. Abbildung 4-5 zeigt die in NEPLAN eingestellten Daten des Phasenschiebertransformators als SSSC.

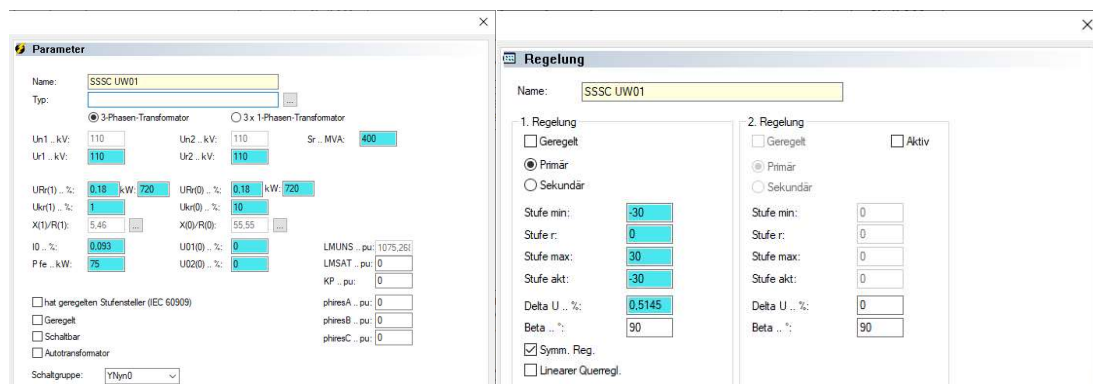


Abbildung 4-5: Eingestellte Daten des PST als SSSC in NEPLAN

4.2.4 Verschaltung im Umspannwerk UW01 als Kupplung zwischen West- und Ostnetz

Bei dieser Variante mit einem lastflusssteuernden Element bietet sich, wie in Abbildung 4-6 dargestellt, die freie Sammelschiene 3 im Umspannwerk UW01 an. Die Leitungen NW, MW und ein System von MS werden dabei auf diese Sammelschiene verschaltet, und über ein lastflusssteuerndes Element mit dem östlichen Netz auf Sammelschiene 2 gekuppelt. Das zweite System der Leitung MS wird mit den Stadtleitungen nach UW48 gekuppelt auf Sammelschiene 1 im Ringschluss betrieben, um dort die Ausfallssicherheit zu gewährleisten. Der Nachteil dieser Variante ist, dass die direkte Verbindung eines Teilnetzes mit der Netzabstützung NA-D aufgegeben werden muss, da sich ansonsten durch das lastflusssteuernde Element als Kupplung über die Leitung MS ein signifikanter Ringlastfluss ergeben würde.

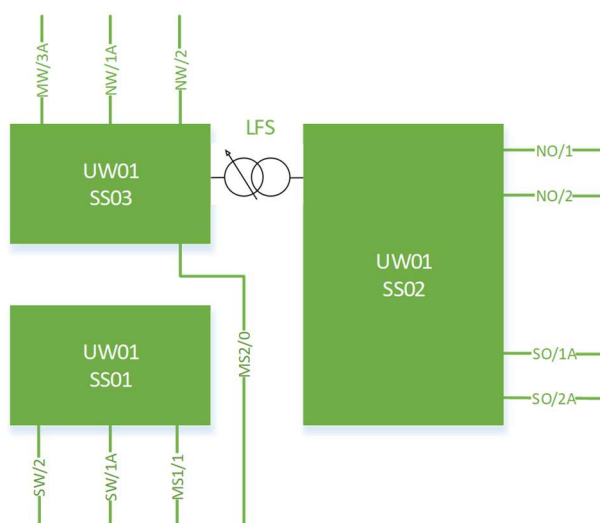


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Verschaltung als Kupplung

4.2.4.1 Drossel

Für diese Simulation wurde eine Längsdrossel mit den zuvor definierten Parametern verwendet.

Die Pfeile in der Abbildung 4-7 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

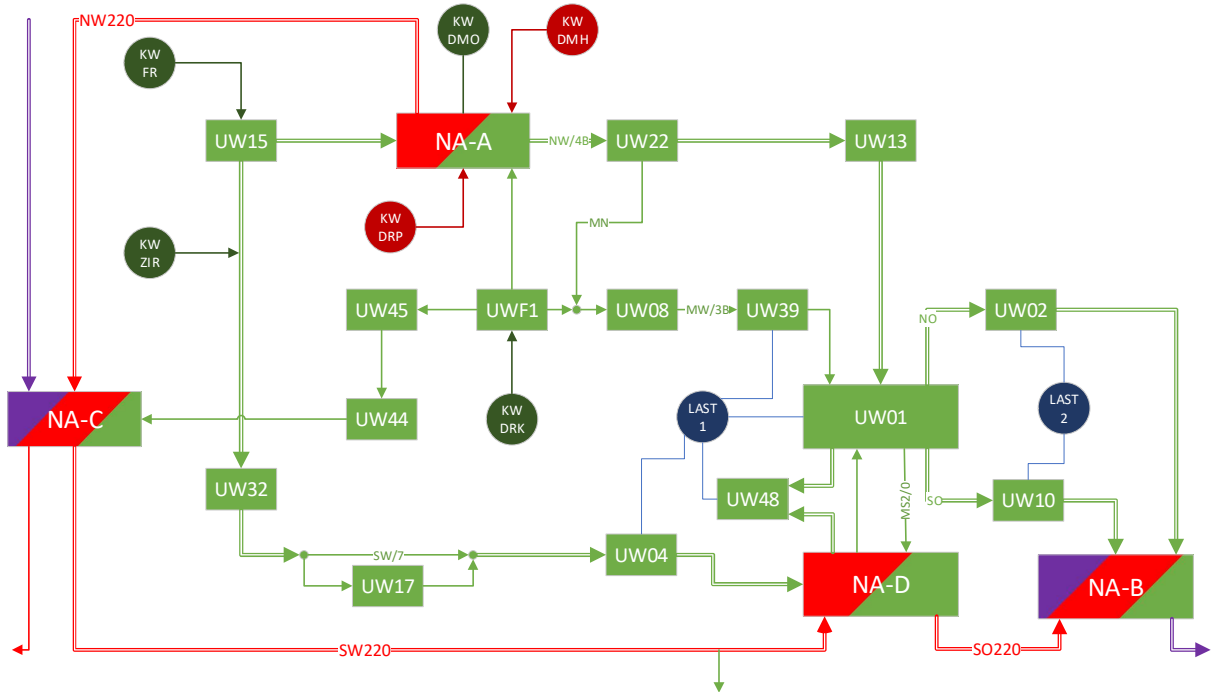


Abbildung 4-7: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch Drossel als Kupplung

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	-2	SW220	871	877
NA-B	244	99	SO220	898	1005
NA-C	33	40	NW220	870	921
NA-D	82	184	MS	5	131
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	59
NW/4B	114	94	SO	127	43
MW/3B	110	93	MN	13	10
SW/7	69	68			

Tabelle 4-3: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch Drossel als Kupplung, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 4-4 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen der Drossel dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	113,6 kV
U_{LFS2}	120,3 kV
I_{LFS}	558 A
P_T	107,8 MW
P_V	0,1 MW
S_T	116,2 MVA
Q_V	23,4 MVar
$\delta_{Drossel}$	11,4°

Tabelle 4-4: Leistungen und Spannungen der Drossel als Kupplung

4.2.4.2 Phasenschiebertransformator

Für diese Simulation wurde der zuvor definierte Phasenschiebertransformator verwendet. Die Simulation wurde dabei in Stufe +30 durchgeführt, was einem Leerlaufwinkel von etwa 17° entspricht.

Die Pfeile in der Abbildung 4-8 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

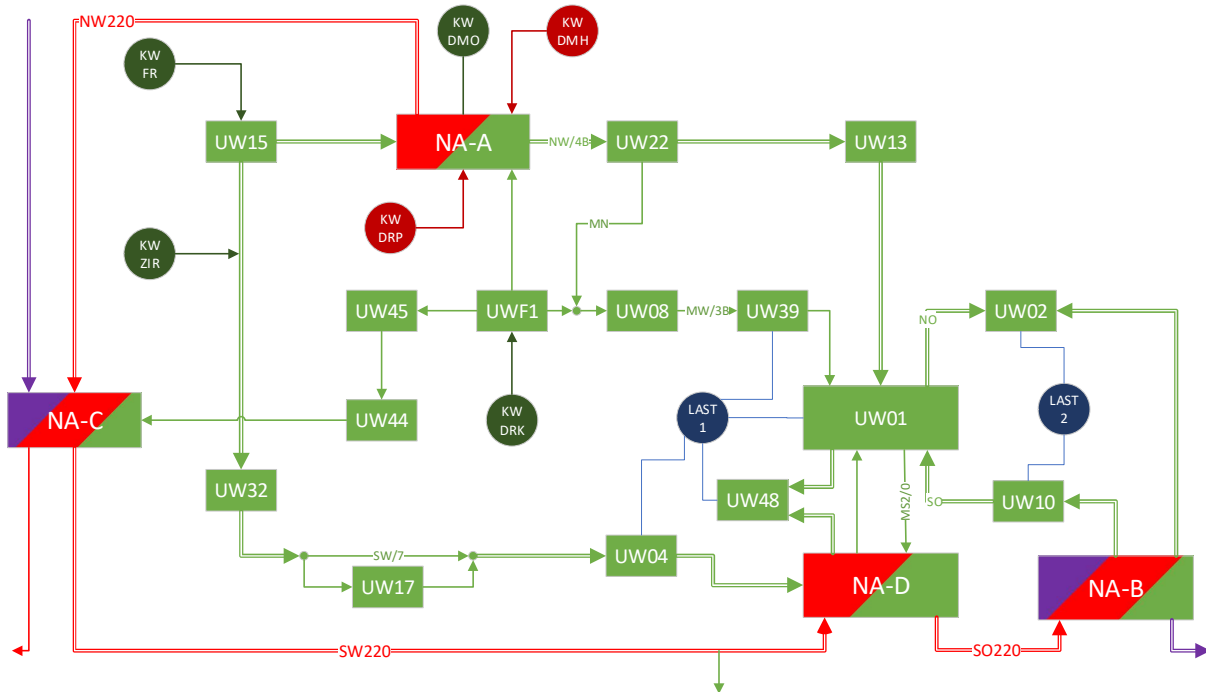


Abbildung 4-8: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch PST als Kupplung

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	22	SW220	871	888
NA-B	244	7	SO220	898	1073
NA-C	33	44	NW220	870	946
NA-D	82	250	MS	5	198
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	17
NW/4B	114	84	SO	127	8
MW/3B	110	84	MN	13	9
SW/7	69	68			

Tabelle 4-5: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch PST als Kupplung, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 4-6 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen des PSTs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	115,6 kV
U_{LFS2}	117,2 kV
I_{LFS}	326 A
P_T	15,5 MW
P_V	0,1 MW
S_T	64,8 MVA
Q_V	1,3 MVar
δ_{PST}	17,3°

Tabelle 4-6: Leistungen und Spannungen des PSTs als Kupplung

4.2.4.3 SSSC

Es wurden wie vorhin definiert, drei Module des SSSC in Serie simuliert.

Die Pfeile in der Abbildung 4-9 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

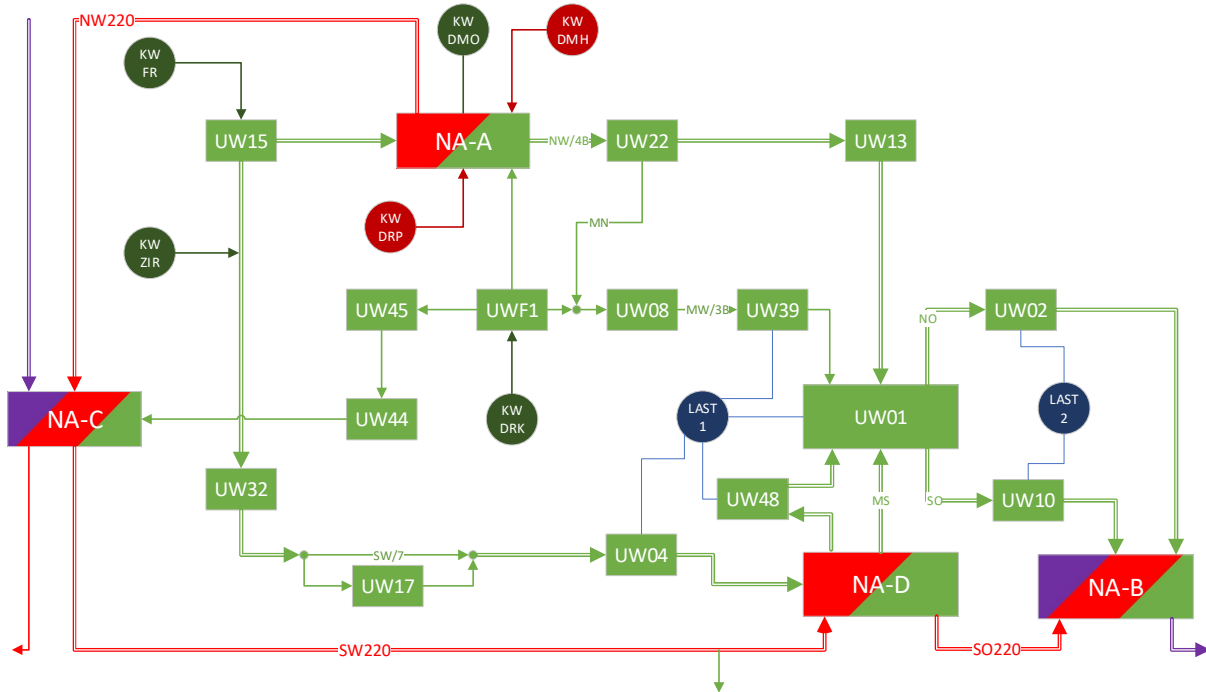


Abbildung 4-9: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch ein SSSC als Kupplung

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	-7	SW220	871	916
NA-B	244	108	SO220	898	999
NA-C	33	39	NW220	870	920
NA-D	82	179	MS	5	125
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	63
NW/4B	114	95	SO	127	49
MW/3B	110	94	MN	13	10
SW/7	69	69			

Tabelle 4-7: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch ein SSSC als Kupplung, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 4-8 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen des SSSCs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	115,7 kV
U_{LFS2}	117,6 kV
I_{LFS}	699 A
P_T	117,9 MW
P_V	0,2 MW
S_T	140,1 MVA
Q_V	4,6 MVar
δ_{SSSC}	10,3°

Tabelle 4-8: Leistungen und Spannungen des SSSCs als Kupplung

4.2.5 Verschaltung im Umspannwerk UW01 in Serie zu den stark belasteten Leitungen NW und MW

Wie in Abbildung 4-10 dargestellt, werden bei dieser Variante die Leitungen NW und MW auf die Sammelschiene 3 im UW01 gelegt. Diese wird dann über das lastflusssteuernde Element mit den beiden gekuppelten Sammelschienen 1 des Westnetzes und 2 des Ostnetzes verbunden. An den verbleibenden Leitungen und deren Verschaltung wird dabei nichts verändert.

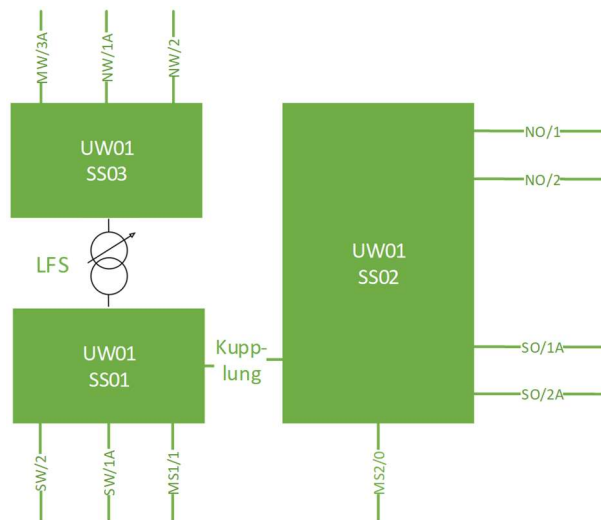


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung der Verschaltung in Serie

4.2.5.1 Drossel

Für diese Simulation wurde dieselbe Längsdrossel wie in der Simulation zuvor verwendet. Hier wäre es möglich zwischen beiden Varianten der Verschaltung zu wechseln.

Die Pfeile in der Abbildung 4-11 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

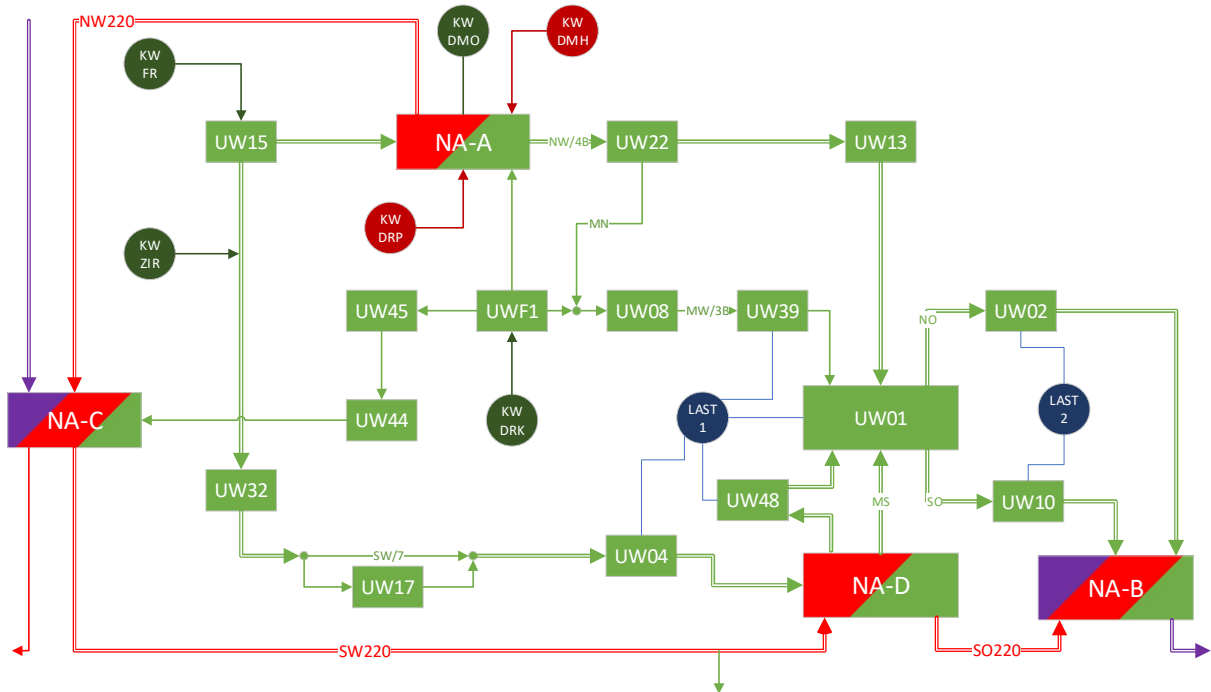


Abbildung 4-11: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch Drossel in Serie

Netzabstüzung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	71	SW220	871	962
NA-B	244	209	SO220	898	893
NA-C	33	50	NW220	870	994
NA-D	82	-11	MS	5	90
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	110
NW/4B	114	47	SO	127	106
MW/3B	110	52	MN	13	2
SW/7	69	91			

Tabelle 4-9: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch Drossel in Serie, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 4-10 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen der Drossel dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	118,1 kV
U_{LFS2}	110,9 kV
I_{LFS}	631 A
P_T	119,6 MW
P_V	0,1 MW
S_T	129,0 MVA
Q_V	29,8 MVar
$\delta_{Drossel}$	13,2°

Tabelle 4-10: Leistungen und Spannungen der Drossel in Serie

4.2.5.2 Phasenschiebertransformator

Für diese Simulation wurde derselbe Phasenschiebertransformator verwendet. Somit sollte es möglich sein, im Betrieb zwischen den beiden Varianten wechseln zu können. Die Simulation wurde hier mit Stufe 15 des PSTs durchgeführt.

Die Pfeile in der Abbildung 4-12 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

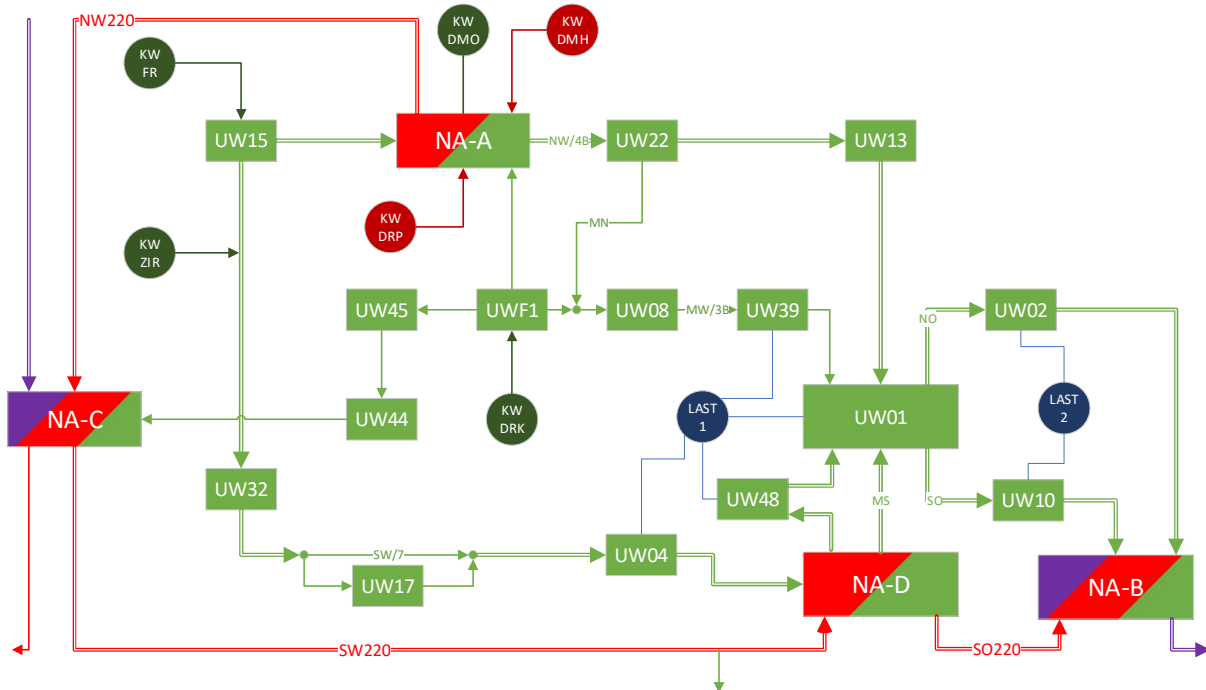


Abbildung 4-12: Lastflusssimulation – Lastflussteuerung durch PST in Serie

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	49	SW220	871	946
NA-B	244	215	SO220	898	895
NA-C	33	48	NW220	870	972
NA-D	82	6	MS	5	74
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	113
NW/4B	114	58	SO	127	110
MW/3B	110	62	MN	13	4
SW/7	69	88			

Tabelle 4-11: Simulationsergebnisse – Lastflussteuerung durch PST in Serie, LFS steht für Lastflussteuerung

In Tabelle 4-12 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen des PSTs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	115,5 kV
U_{LFS2}	117,5 kV
I_{LFS}	848 A
P_T	150,8 MW
P_V	0,2 MW
S_T	169,6 MVA
Q_V	6,8 MVar
δ_{PST}	10,5°

Tabelle 4-12: Leistungen und Spannungen des PSTs in Serie

4.2.5.3 SSSC

In dieser Simulation wurde dasselbe SSSC-Element wie in der Simulation zuvor verwendet. Dabei wurden drei Module in Serie verschaltet und die Simulation in der höchsten Stufe durchgeführt.

Die Pfeile in der Abbildung 4-13 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

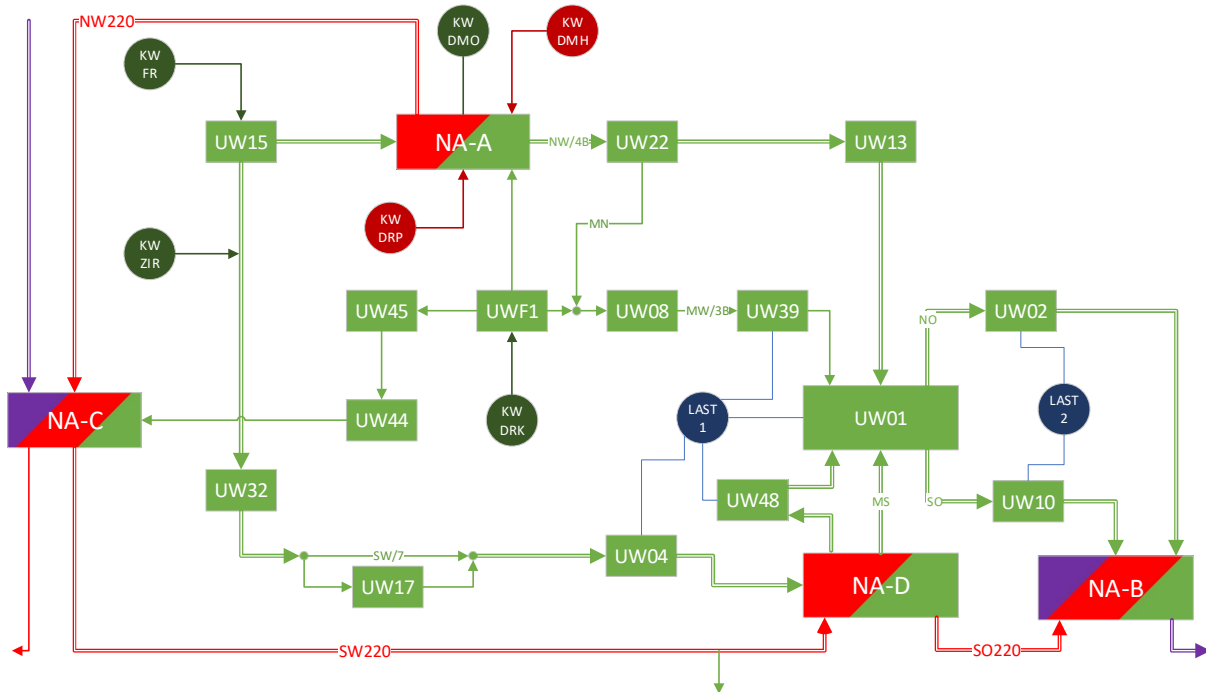


Abbildung 4-13: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch ein SSSC in Serie

Netzabstüzung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	48	SW220	871	946
NA-B	244	215	SO220	898	895
NA-C	33	48	NW220	870	970
NA-D	82	7	MS	5	74
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	113
NW/4B	114	58	SO	127	110
MW/3B	110	62	MN	13	4
SW/7	69	88			

Tabelle 4-13: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch ein SSSC in Serie, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 4-14 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen des SSSCs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	115,6 kV
U_{LFS2}	117,5 kV
I_{LFS}	839 A
P_T	149,0 MW
P_V	0,2 kV
S_T	167,9 MVA
Q_V	6,4 MVar
δ_{SSSC}	10,6°

Tabelle 4-14: Leistungen und Spannungen des SSSCs in Serie

4.2.6 Zwei Standorte für lastflusssteuernde Elemente

Bei dieser Variante sollte ein lastflusssteuerndes Element pro Leitung verbaut werden. Hier bietet sich in der Leitung NW das Umspannwerk UW22 an, welches direkt an den am stärksten belasteten Leitungsabschnitten liegt. Das lastflusssteuernde Element für die Leitung MW sollte im Umspannwerk UW01 realisiert werden, wo eine freie Sammelschiene dafür genutzt werden kann. Vorteil dieser Variante ist, dass die beiden Leitungen unabhängig voneinander beeinflusst werden können. Die Verschaltung dieser Variante ist in Abbildung 4-14 ersichtlich.

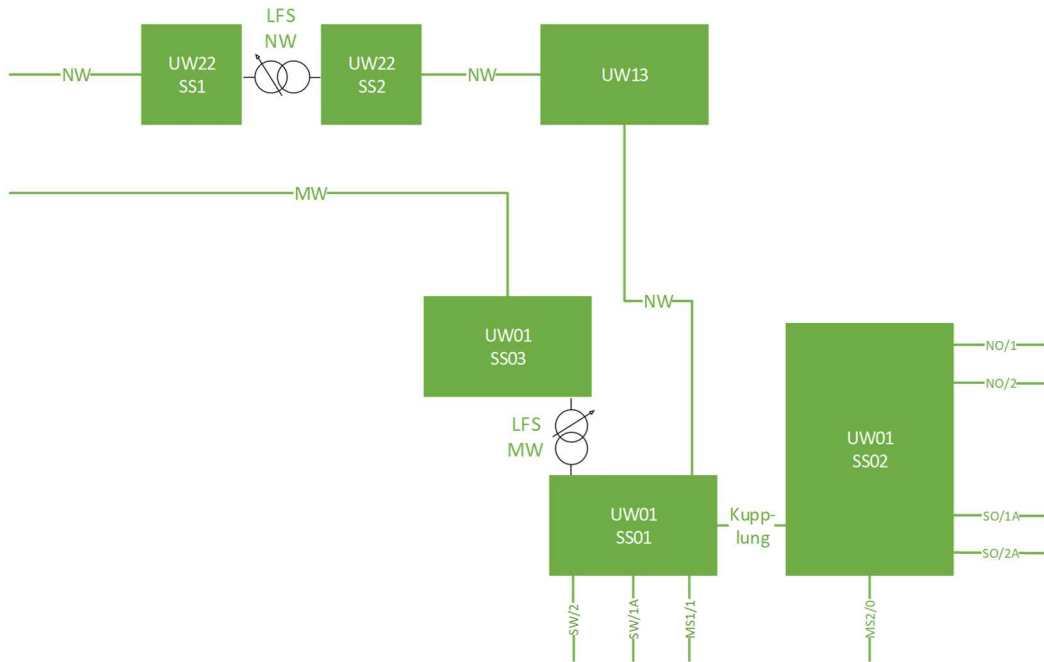


Abbildung 4-14: Lastflusssteuerung pro Leitung

4.2.6.1 Drossel

Für diese Simulation wurde je eine Längsdrossel pro Leitungssystem mit den zuvor definierten Parametern verwendet. Zwei Drosseln wurden dabei im UW22 in der Leitung NW positioniert und eine Drossel im UW01 für die Leitung MW.

Die Pfeile in der Abbildung 4-15 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

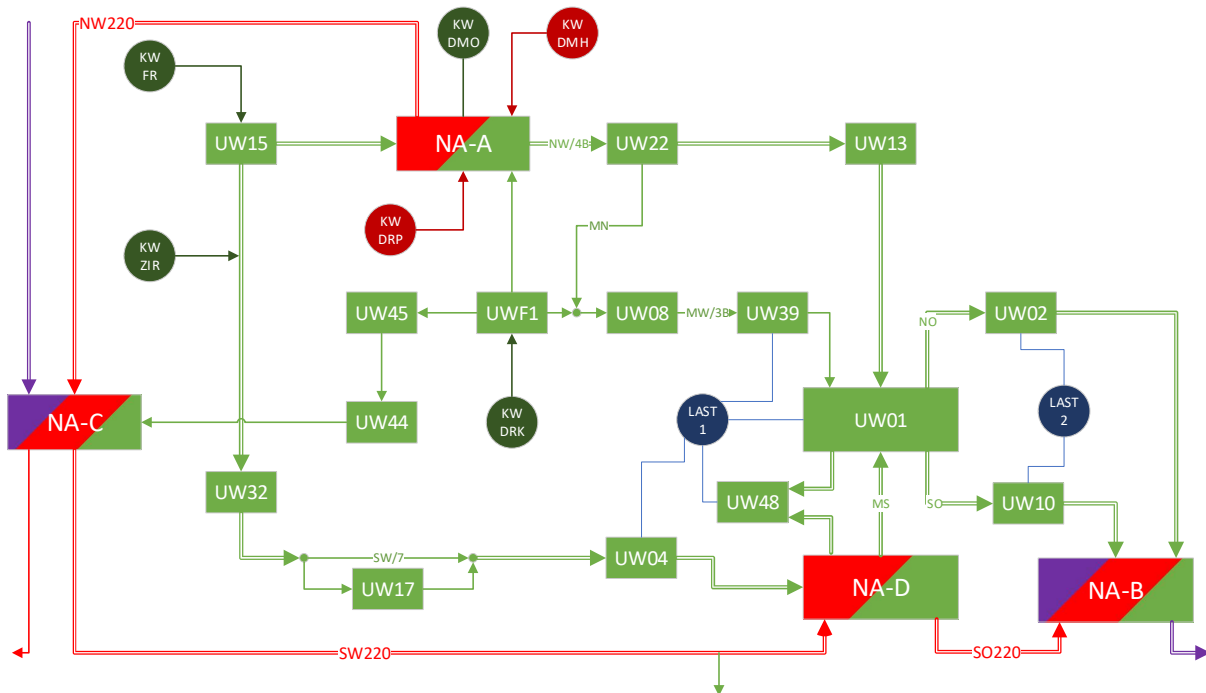


Abbildung 4-15: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch drei Drosseln

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	19	SW220	871	880
NA-B	244	225	SO220	898	895
NA-C	33	43	NW220	870	942
NA-D	82	30	MS	5	53
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	118
NW/4B	114	75	SO	127	116
MW/3B	110	79	MN	13	9
SW/7	69	81			

Tabelle 4-15: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch drei Drosseln, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 4-16 und Tabelle 4-17 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen der Drosseln dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	113,2 kV
U_{LFS2}	116,8 kV
I_{LFS}	367 A
P_T	71,0 MW
P_V	0,1 MW
S_T	72,0 MVA
Q_V	10,1 MVar
$\delta_{Drossel}$	7,7°

Tabelle 4-16: Leistungen und Spannungen einer Drossel im UW22

Parameter	Wert
U_{LFS1}	111,3 kV
U_{LFS2}	117,6 kV
I_{LFS}	368 A
P_T	66,7 MW
P_V	0,1 MW
S_T	71,1 MVA
Q_V	10,2 MVar
$\delta_{Drossel}$	7,4°

Tabelle 4-17: Leistungen und Spannungen der Drossel im UW01

4.2.6.2 Phasenschiebertransformator

Für diese Simulation wurde ein Phasenschiebertransformator mit 250 MVA Übertragungsleistung im UW22 und 150 MVA Übertragungsleistung im UW01 gewählt. Diese Werte orientieren sich an den zwei zu beeinflussenden Leitungen NW mit jeweils 130 MVA und der Leitung MW mit 130 MVA. Die reduzierten Leistungen wurden gewählt, weil Phasenschiebertransformatoren mit jeweils 400 MVA überdimensioniert wären. Die übrigen Daten des Phasenschiebertransformators wurden aus der Dimensionierung übernommen und die Simulation in Stufe 20 durchgeführt, was einem Leerlaufwinkel von etwa 11,4° entspricht.

Die Pfeile in der Abbildung 4-16 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

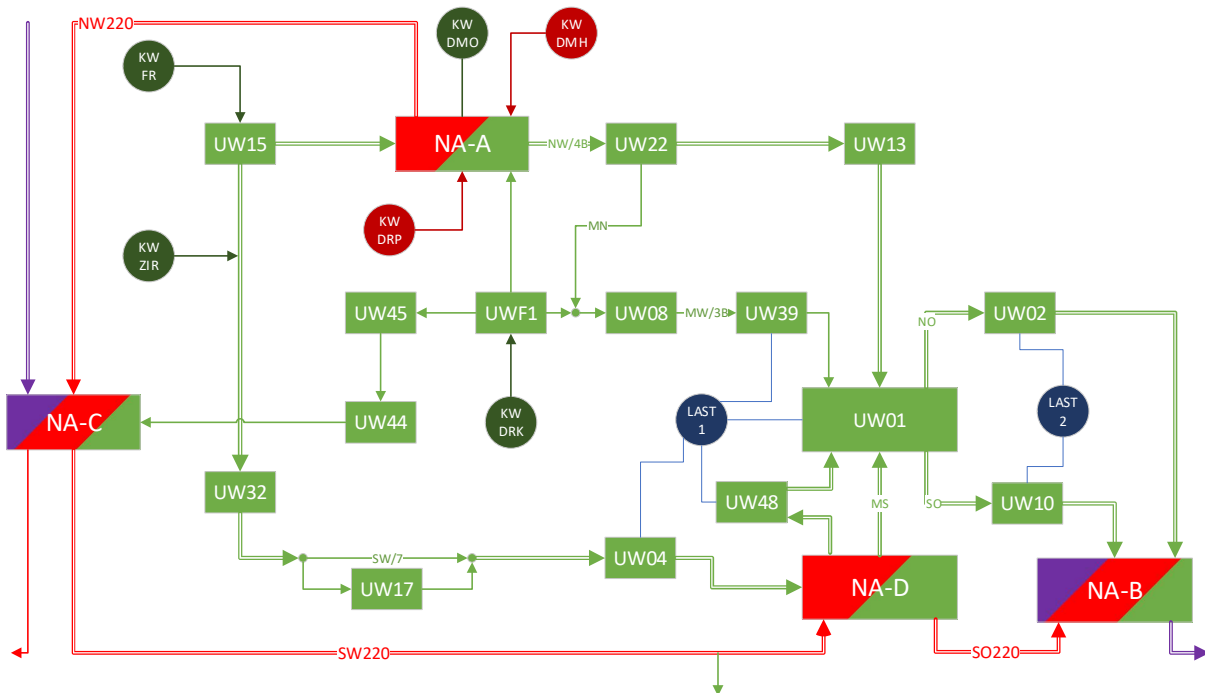


Abbildung 4-16: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch zwei PSTs

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	70	SW220	871	962
NA-B	244	207	SO220	898	895
NA-C	33	51	NW220	870	992
NA-D	82	-11	MS	5	90
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	109
NW/4B	114	46	SO	127	105
MW/3B	110	53	MN	13	4
SW/7	69	92			

Tabelle 4-18: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch zwei PSTs, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 4-19 und Tabelle 4-20 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen der PSTs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	114,8 kV
U_{LFS2}	116,2 kV
I_{LFS}	479 A
P_T	88,2 MW
P_V	0,2 MW
S_T	95,3 MVA
Q_V	3,4 MVar
δ_{PST}	13,2°

Tabelle 4-19: Leistungen und Spannungen des PSTs im UW22

Parameter	Wert
U_{LFS1}	115,7 kV
U_{LFS2}	117,6 kV
I_{LFS}	256 A
P_T	41,3 MW
P_V	0,2 MW
S_T	51,3 MVA
Q_V	1,6 MVar
δ_{PST}	12,8°

Tabelle 4-20: Leistungen und Spannungen des PSTs im UW01

4.2.6.3 SSSC

Für diese Simulation wurde je zwei Modulen des SSSC im UW22 und im UW01 platziert. Es wurde dasselbe SSSC-Modul wie in den Simulationen zuvor verwendet. Die Simulation wurde in der höchstmöglichen Stufe, also mit der maximalen Zusatzspannung der zwei Module durchgeführt.

Die Pfeile in der Abbildung 4-17 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

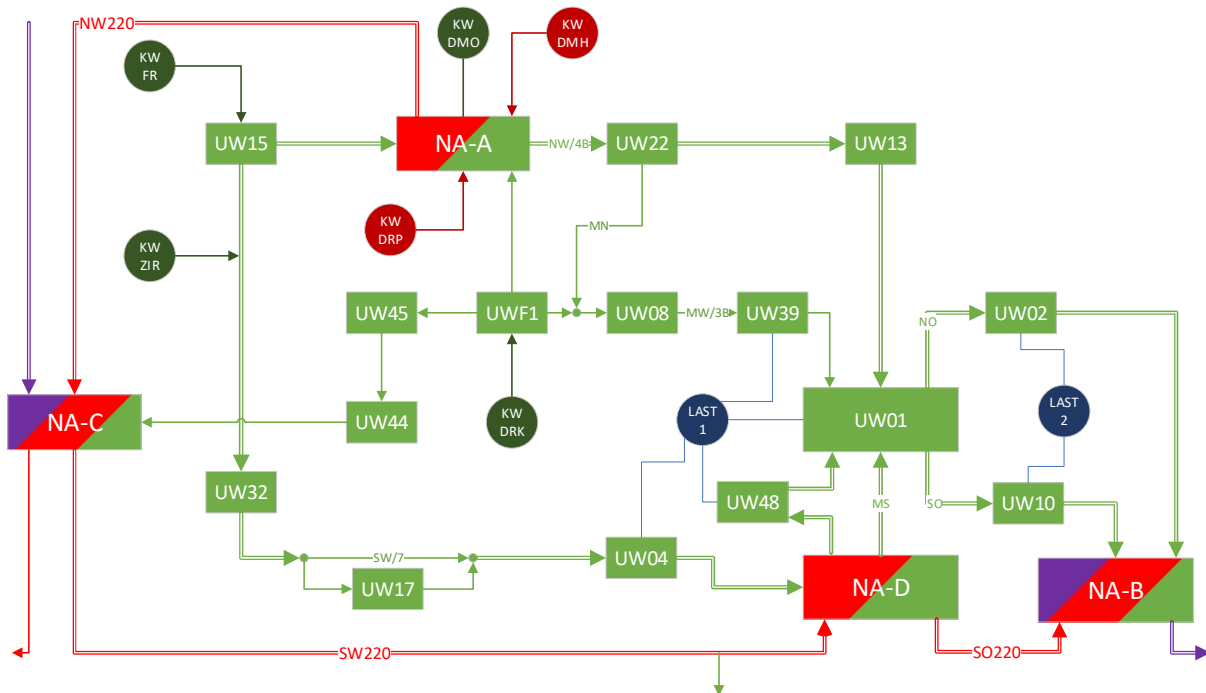


Abbildung 4-17: Lastflusssimulation – Lastflusssteuerung durch zwei SSSCs

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-52	17	SW220	871	921
NA-B	244	224	SO220	898	897
NA-C	33	43	NW220	870	940
NA-D	82	31	MS	5	52
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	127	118
NW/4B	114	75	SO	127	115
MW/3B	110	82	MN	13	11
SW/7	69	82			

Tabelle 4-21: Simulationsergebnisse – Lastflusssteuerung durch zwei SSSCs, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 4-22 und Tabelle 4-23 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen der SSSCs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	114,9 kV
U_{LFS2}	115,9 kV
I_{LFS}	731 A
P_T	138,8 MW
P_V	0,2 MW
S_T	145,5 MVA
Q_V	5,0 MVar
δ_{SSSC}	7,6°

Tabelle 4-22: Leistungen und Spannungen des SSSC im UW22

Parameter	Wert
U_{LFS1}	116,2 kV
U_{LFS2}	117,3 kV
I_{LFS}	413 A
P_T	70,0 MW
P_V	0,1 MW
S_T	83,1 MVA
Q_V	1,9 MVar
δ_{SSSC}	6,7°

Tabelle 4-23: Leistungen und Spannungen des SSSC im UW01

4.2.7 Vergleich der Varianten

Die Ergebnisse der verschiedenen Varianten zur Lastflusssteuerung wurden an den relevanten Betriebsmitteln wie Leitungsabschnitten oder Netzabstützungen verglichen. Dabei sollten vor allem die kritischen Leitungen NW/4B, MW/3B und die Netzabstützung NA-A betrachtet werden. Die Leitung SW/7, welche noch verbleibende Übertragungskapazität hat, sowie auch die Netzabstützung NA-D, sollten ebenfalls mit in den Vergleich aufgenommen werden.

Variante	NA-A	NA-D	NW/4B	MW/3B	SW/7
	MW	MW	MW	MW	MW
Ohne Elemente	-52	82	114	110	69
Stufen	-13	-53	93	91	58
PST Kupplung	22	250	84	84	68
PST Serie	49	6	58	62	88
Drossel Kupplung	-2	184	94	93	68
Drossel Serie	71	-11	47	52	91
SSSC Kupplung	-7	179	95	94	69
SSSC Serie	48	7	58	62	88
2 PST	70	-11	46	53	92
3 Drosseln	19	30	75	79	81
2 SSSC	17	31	75	82	82

Tabelle 4-24: Vergleich der Varianten zur Lastflusssteuerung

Wie in Tabelle 4-24 ersichtlich ist, sind alle verschiedenen Varianten zur Lastflusssteuerung wirksam.

Die Varianten mit dem Element als Kupplung wirken lastflussbremsend zwischen Westnetz und Ostnetz. Die Netzabstützung NA-D wird in diesen Varianten sehr stark belastet, da der überwiegende Anteil vom UW01 über die Leitung MS zur Netzabstützung NA-D abfließt. Das Ostnetz bleibt in dieser Variante nur über das lastflusssteuernde Element mit der Netzabstützung NA-D verbunden.

Die Varianten mit dem lastflusssteuernden Element in Serie zu den Leitungen NW und MW sind dabei sehr effektiv wirksam, um dem Lastfluss Richtung Leitung SW zu leiten. Dabei kann es bei übermäßiger Drosselung der Leitungen NW und MW schon zu hohen Auslastungen in der Leitung SW kommen. Diese Variante erscheint daher sinnvoll beim Einsatz eines regelbaren Elementes, also in der Variante mit PST oder SSSC. Zu beachten ist, dass der komplette Lastfluss der Leitungen NW und MW in diesen Varianten über das lastflusssteuernde Element geht und dass ein Fehler im Element zum Ausfall aller drei Leitungsverbindungen Richtung UW01 führt. Durch die Kupplung von Westnetz und Ostnetz im UW01 bleibt die Verbindung vom Ostnetz mit der Netzabstützung NA-D in dieser Variante aktiv.

Die Varianten mit den verteilten Standorten der lastflusssteuernden Elemente bringt vor allem in der Variante mit den drei Drosseln eine sehr gleichmäßige Verteilung des Lastflusses über die Leitungen NW, MW und SW. In der Variante mit den zwei Phasenschiebertransformatoren sind die beeinflussten Leitungen NW und MW in der höchstens Stufe schon zu stark gedrosselt, was die Leitung SW stärker auslastet als in den anderen Varianten. Außerdem bleibt in der Variante mit zwei Standorten der

lastflusssteuernden Elemente das Westnetz mit dem Ostnetz im UW01 gekuppelt und somit die Verbindung des Ostnetzes mit der Netzabstützung NA-D aktiv.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Varianten mit dem PST und die Varianten mit der SSSC vergleichbar funktionieren. Lediglich die Anzahl der Transformatorstufen bzw. die Anzahl der Module des SSSC legen hier den einstellbaren Übertragungswinkel fest.

Für die weiteren Untersuchungen wurden die Varianten auf zwei verschiedene Möglichkeiten eingeschränkt.

Als erste Möglichkeit wurde die Variante mit einem PST im UW01 gewählt. Aufgrund der sehr hohen Kosten eines PSTs wurde die Variante mit zwei PSTs verworfen. Der PST im UW01 kann auf zwei verschiedene Varianten verschalten werden und verhält sich ähnlich zu der Variante mit dem SSSC. Somit können Simulationsergebnisse dieser Variante auch für den SSSC herangezogen werden.

Die zweite Möglichkeit ist die Variante mit den 3 Drosseln. Aufgrund der sehr gleichmäßigen Lastverteilung in den Leitungen NW, MW und SW erscheint diese Variante als sehr geeignet und die Anschaffungskosten der Drosseln liegt deutlich unter denen eines PSTs. Dadurch, dass jede Leitung ihre eigene Drossel besitzt, wirkt sich der Ausfall einer Drossel nicht so schwerwiegend auf das Gesamtsystem aus.

5 Auswirkungen der Lastflusssteuerung im Netz „Zukunft“

5.1 Lastflusssteuerung durch einen Phasenschiebertransformator als Kupplung

5.1.1 Hoher Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung

Diese Simulation wurde in der Stufe 30 des Phasenschiebertransformators durchgeführt.

Die Pfeile in der Abbildung 5-1 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

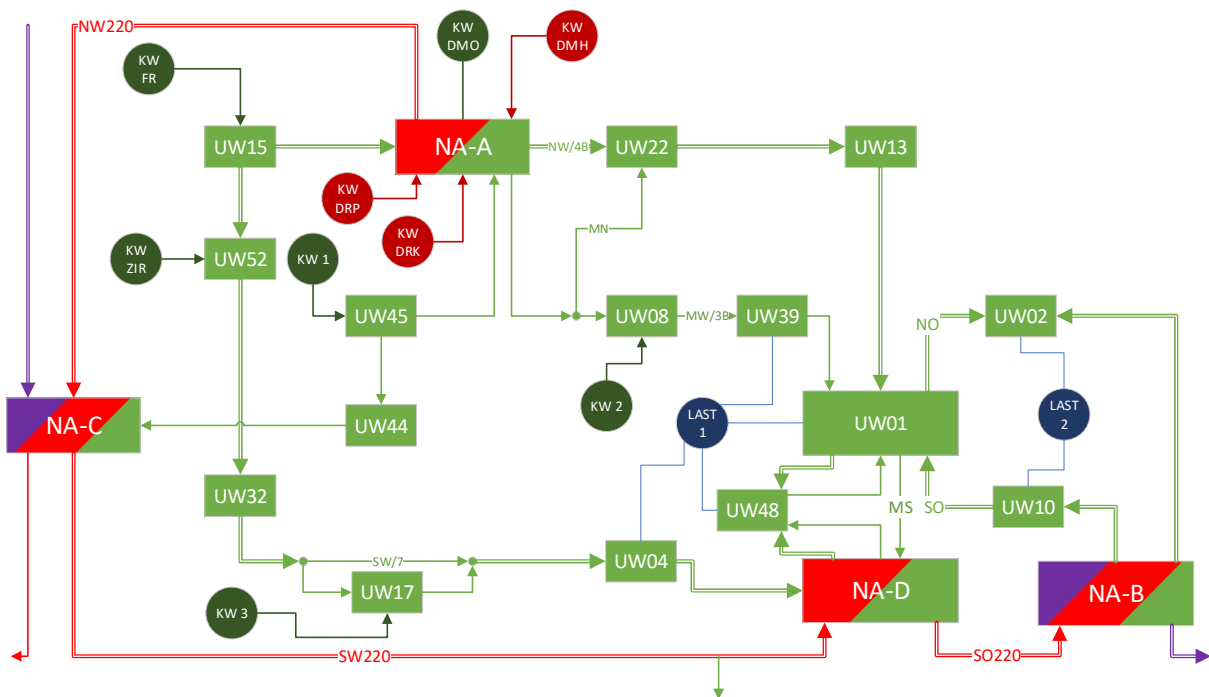


Abbildung 5-1: Lastflusssimulation – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Zukunft“ mit PST als Kupplung

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-120	-42	SW220	908	921
NA-B	244	18	SO220	903	1068
NA-C	32	44	NW220	980	1056
NA-D	51	205	MS	5	232
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	117	12
NW/4B	117	85	SO	117	11
MW/3B	126	98	MN	3	2
SW/7	82	81			

Tabelle 5-1: Simulationsergebnisse – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbautzustand „Zukunft“ mit PST als Kupplung, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 5-2 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen des PSTs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	115,0 kV
U_{LFS2}	116,8 kV
P_T	7 MW
P_V	0,1 MW
S_T	67 MVA
Q_V	1,4 MVar
δ_{PST}	17,2°

Tabelle 5-2: Leistungen und Spannungen des PSTs als Kupplung

5.1.2 Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher PV-Einspeisung und niedrigem Verbrauch

Diese Simulation wurde in der Stufe -30 des Phasenschiebertransformators durchgeführt.

Die Pfeile in der Abbildung 5-2 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

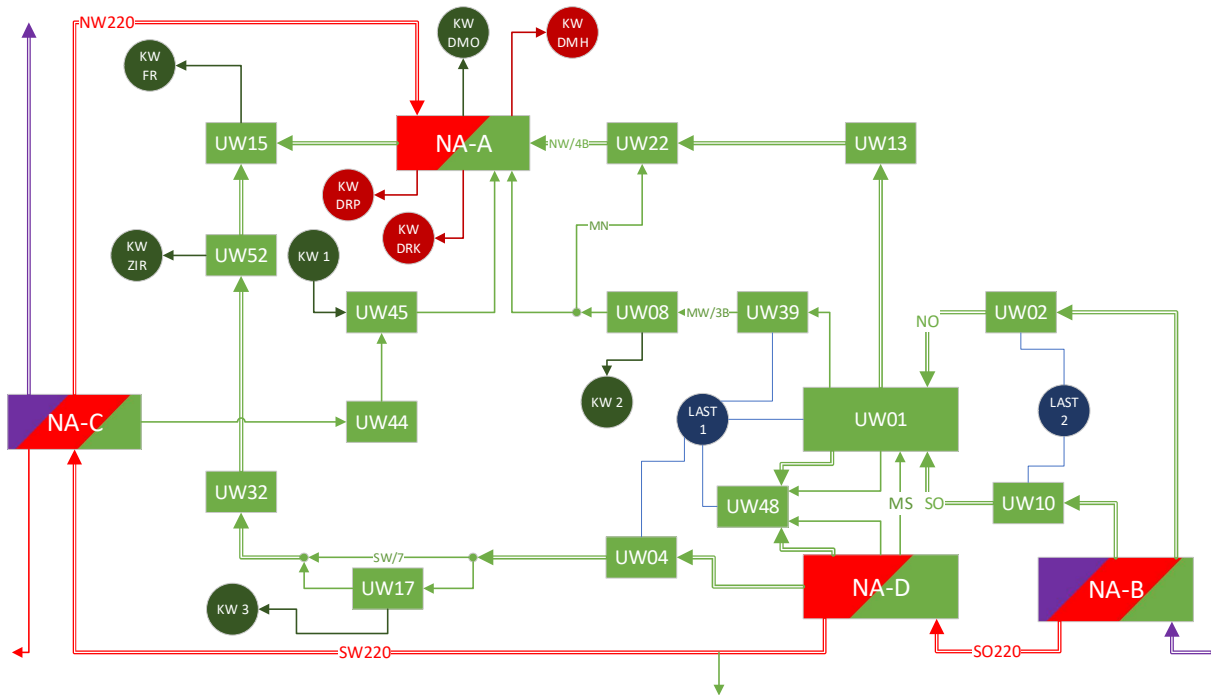


Abbildung 5-2: Lastflusssimulation – Maximales Pumpen + PV-Erzeugung im Ausbaustand „Zukunft“ mit PST als Kupplung

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	260	205	SW220	857	855
NA-B	-36	261	SO220	1014	1218
NA-C	-5	-14	NW220	614	668
NA-D	-131	-335	MS	25	97
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	222	96
NW/4B	144	123	SO	229	74
MW/3B	123	101	MN	13	10
SW/7	73	69			

Tabelle 5-3: Simulationsergebnisse – Maximales Pumpen + PV-Erzeugung im Ausbaustand „Zukunft“ mit PST als Kupplung, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 5-4 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen des PSTs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	116,5 kV
U_{LFS2}	116,0 kV
P_T	182,2 MW
P_V	0,2 MW
S_T	183,3 MVA
Q_V	7,7 MVar
δ_{PST}	19,3°

Tabelle 5-4: Leistungen und Spannungen des PSTs als Kupplung

5.2 Lastflusssteuerung durch einen Phasenschiebertransformator in Serie zu NW und MW

5.2.1 Hoher Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung

Diese Simulation wurde in der Stufe 10 des Phasenschiebertransformators durchgeführt.

Die Pfeile in der Abbildung 5-3 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

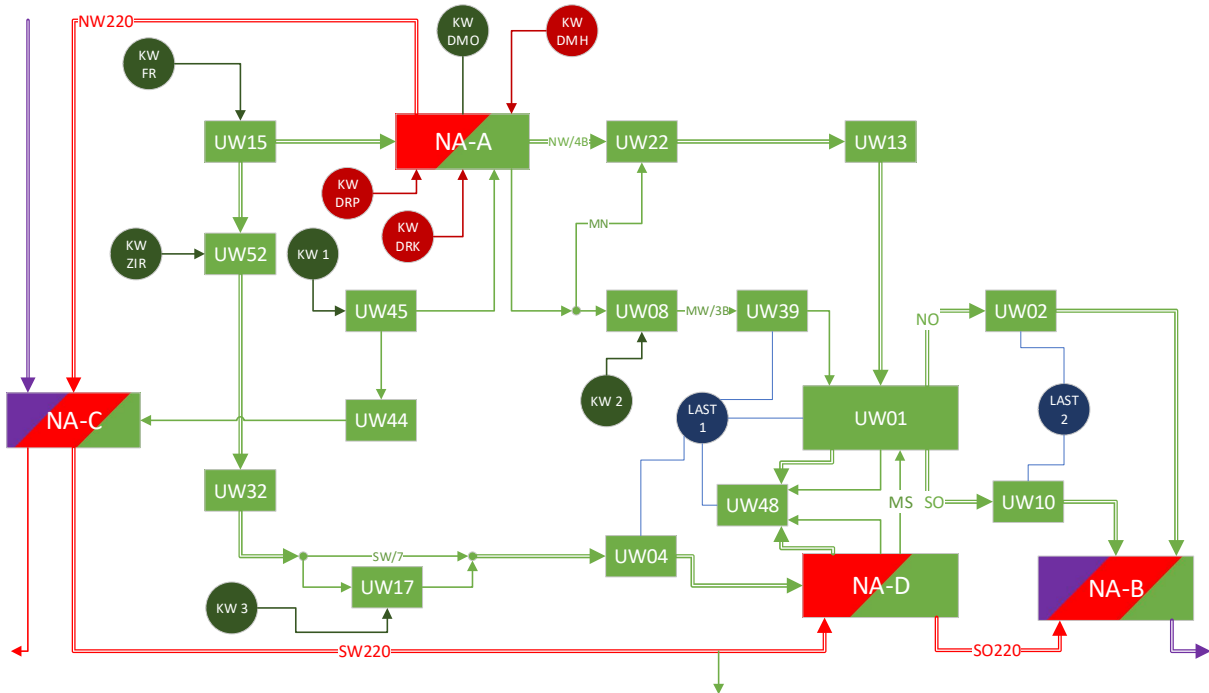


Abbildung 5-3: Lastflusssimulation – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Zukunft“ mit PST in Serie

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-120	-39	SW220	908	966
NA-B	244	221	SO220	903	901
NA-C	32	44	NW220	980	1060
NA-D	51	8	MS	5	33
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	117	106
NW/4B	117	73	SO	117	104
MW/3B	126	88	MN	3	3
SW/7	82	95			

Tabelle 5-5: Simulationsergebnisse – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Zukunft“ mit PST in Serie, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 5-6 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen des PSTs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	114,5 kV
U_{LFS2}	116,7 kV
P_T	209,5 MW
P_V	0,3 MW
S_T	224,7 MVA
Q_V	12,0 MVar
δ_{PST}	8,4°

Tabelle 5-6: Leistungen und Spannungen des PSTs in Serie

5.2.2 Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher PV-Einspeisung und niedrigem Verbrauch

Diese Simulation wurde in der Stufe -10 des Phasenschiebertransformators durchgeführt.

Die Pfeile in der Abbildung 5-4 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

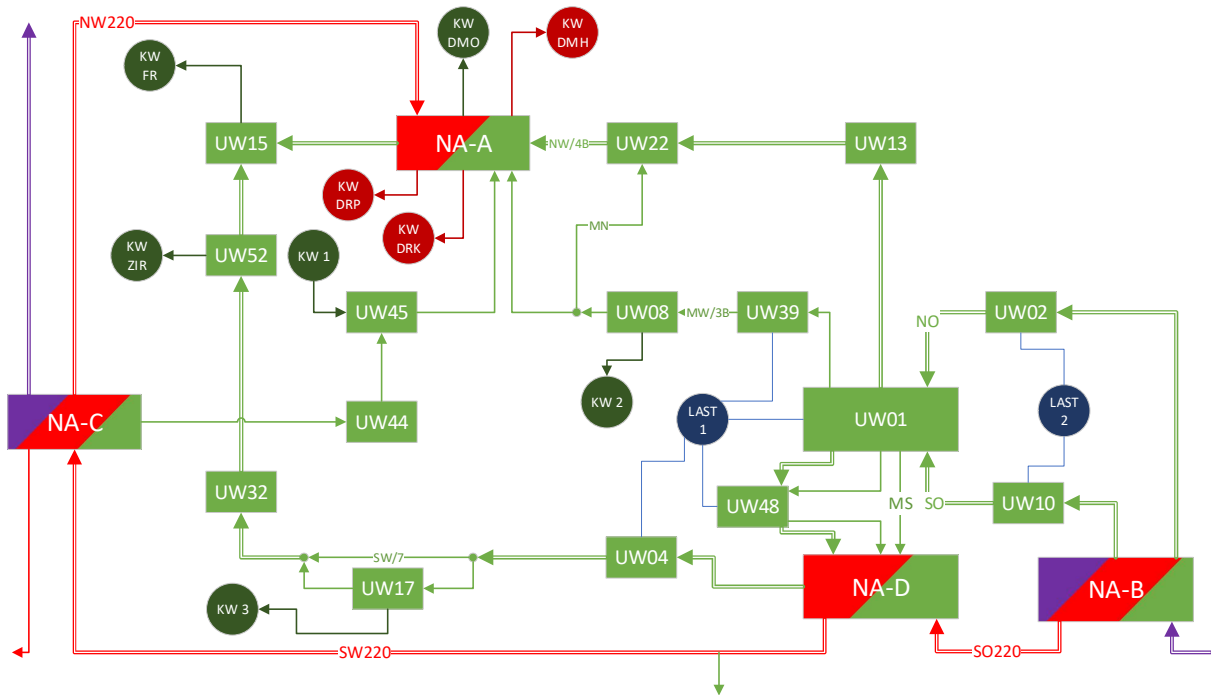


Abbildung 5-4: Lastflusssimulation – Maximales Pumpen + PV-Erzeugung im Ausbaustand „Zukunft“ mit PST in Serie

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	260	189	SW220	857	919
NA-B	-36	-6	SO220	1014	1011
NA-C	-5	-16	NW220	614	684
NA-D	-131	-67	MS	25	55
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	222	210
NW/4B	144	105	SO	229	214
MW/3B	123	83	MN	13	7
SW/7	73	86			

Tabelle 5-7: Simulationsergebnisse – Maximales Pumpen + PV-Erzeugung im Ausbaustand „Zukunft“ mit PST in Serie, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 5-8 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen des PSTs dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	114,6 kV
U_{LFS2}	114,1 kV
P_T	224,5 MW
P_V	0,3 MW
S_T	225,5 MVA
Q_V	12,1 MVar
δ_{PST}	8,7°

Tabelle 5-8: Leistungen und Spannungen des PSTs in Serie

5.3 Lastflusssteuerung durch drei Drosseln

5.3.1 Hoher Durchzug bei gleichzeitig hoher Erzeugung

Die Pfeile in der Abbildung 5-5 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

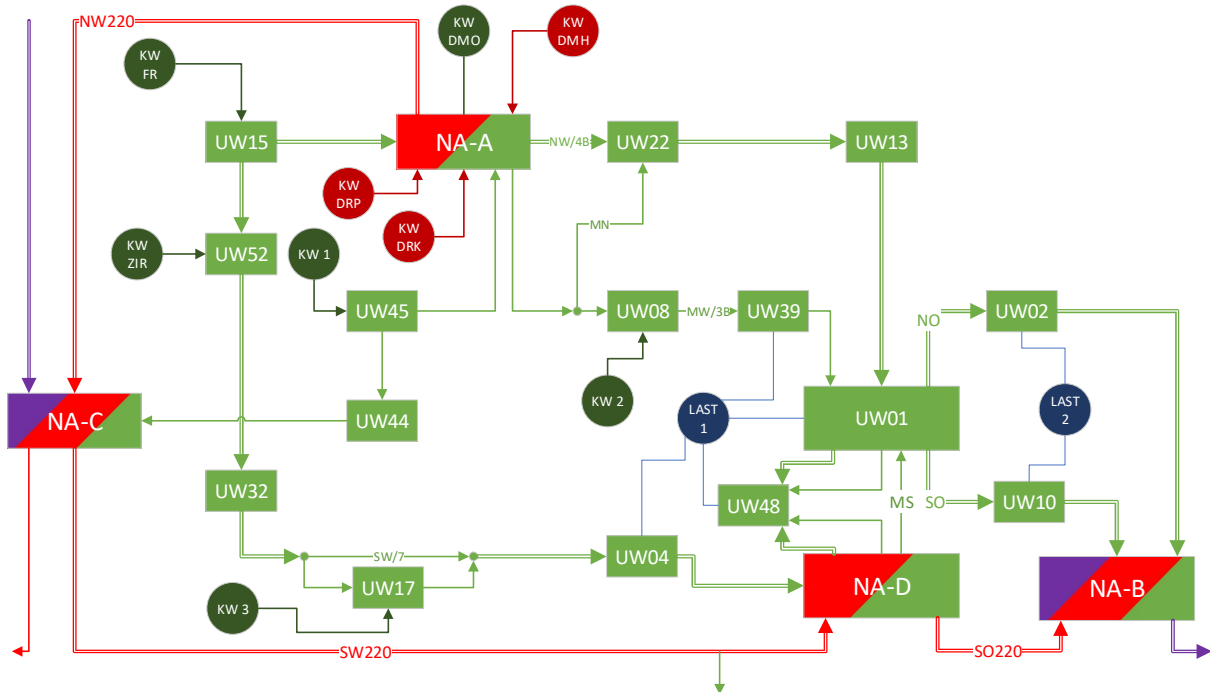


Abbildung 5-5: Lastflusssimulation – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Zukunft“ mit 3 Drosseln

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	-120	-41	SW220	908	965
NA-B	244	222	SO220	903	901
NA-C	32	43	NW220	980	1058
NA-D	51	-6	MS	5	33
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	117	107
NW/4B	117	75	SO	117	104
MW/3B	126	88	MN	3	4
SW/7	82	94			

Tabelle 5-9: Simulationsergebnisse – Hoher Durchzug + Erzeugung im Ausbauzustand „Zukunft“ mit 3 Drosseln, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 5-10 und Tabelle 5-11 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen der Drosseln dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	113,2 kV
U_{LFS2}	116,3 kV
P_T	76,8 MW
P_V	0,1 MW
S_T	77,3 MVA
Q_V	11,7 MVar
$\delta_{Drossel}$	8,4°

Tabelle 5-10: Leistungen und Spannungen einer Drossel im UW22

Parameter	Wert
U_{LFS1}	110,9 kV
U_{LFS2}	116,8 kV
P_T	75,7 MW
P_V	0,1 MW
S_T	78,5 MVA
Q_V	12,6 MVar
$\delta_{Drossel}$	8,4°

Tabelle 5-11: Leistungen und Spannungen der Drossel im UW01

5.3.2 Maximale Pumpleistung bei gleichzeitig hoher PV-Einspeisung und niedrigem Verbrauch

Die Pfeile in der Abbildung 5-6 weisen auf die Richtung des Wirklastflusses hin.

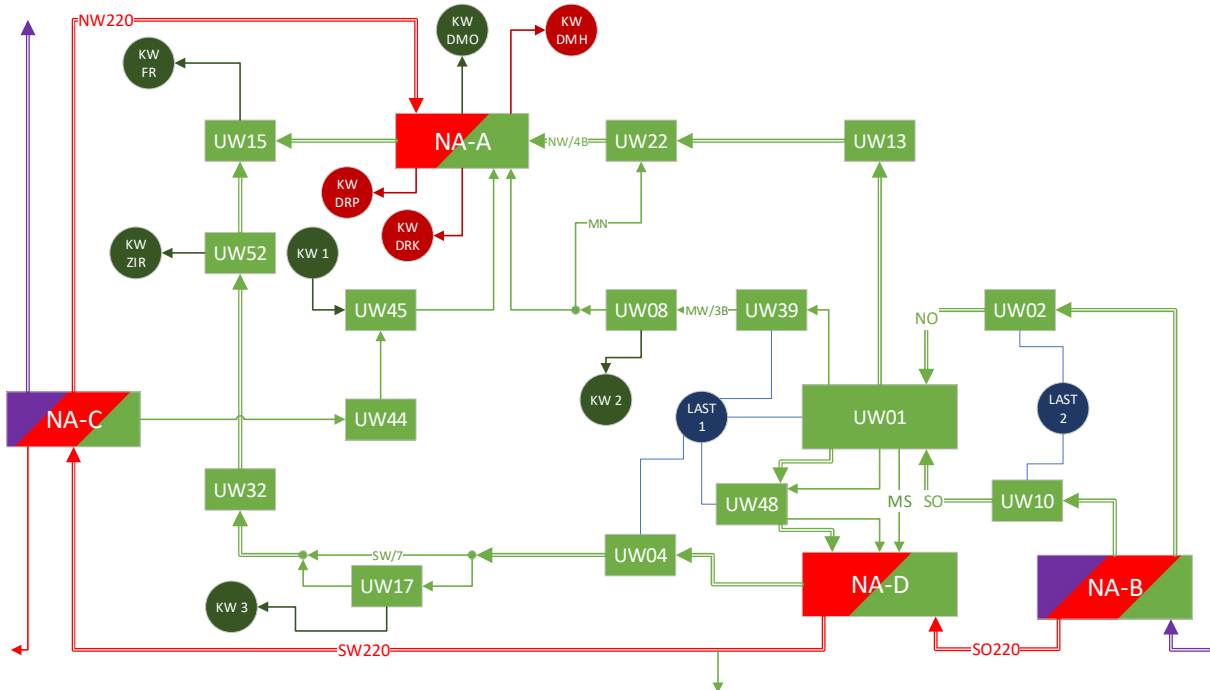


Abbildung 5-6: Lastflusssimulation – Maximales Pumpen + PV-Erzeugung im Ausbaustand „Zukunft“ mit 3 Drosseln

Netzabstützung	Leistung in MW		Leitung	Leistung in MW	
	Ohne LFS	Mit LFS		Ohne LFS	Mit LFS
NA-A	260	186	SW220	857	921
NA-B	-36	-4	SO220	1014	1011
NA-C	-5	-17	NW220	614	688
NA-D	-131	-64	MS	25	56
Leitung	Ohne LFS	Mit LFS	NO	222	209
NW/4B	144	104	SO	229	213
MW/3B	123	83	MN	13	8
SW/7	73	87			

Tabelle 5-12: Simulationsergebnisse – Maximales Pumpen + PV-Erzeugung im Ausbaustand „Zukunft“ mit 3 Drosseln, LFS steht für Lastflusssteuerung

In Tabelle 5-13 und Tabelle 5-14 werden die übertragenen Leistungen und Spannungen der Drosseln dargestellt.

Parameter	Wert
U_{LFS1}	109,6 kV
U_{LFS2}	110,3 kV
P_T	76,8 MW
P_V	0,1 MW
S_T	76,9 MVA
Q_V	12,3 MVar
$\delta_{Drossel}$	9,1°

Tabelle 5-13: Leistungen und Spannungen einer Drossel im UW22

Parameter	Wert
U_{LFS1}	114,2 kV
U_{LFS2}	112,3 kV
P_T	75,7 MW
P_V	0,1 MW
S_T	77,0 MVA
Q_V	11,4 MVar
$\delta_{Drossel}$	8,4°

Tabelle 5-14: Leistungen und Spannungen der Drossel im UW01

5.4 Vergleich der Varianten

Variante	NA-A	NA-D	NW/4B	MW/3B	SW/7	Kupplung UW01
	MW	MW	MW	MW	MW	MW
Ohne Elemente	-120	51	117	126	82	237
PST Kupplung	-42	205	85	98	81	7
PST Serie	-39	8	73	88	95	183
3 Drosseln	-41	-6	75	88	94	185

Tabelle 5-15: Vergleich der Varianten im Ausbauzustand „Zukunft“ zum Belastungsfall: Hoher Durchzug + Erzeugung

Variante	NA-A	NA-D	NW/4B	MW/3B	SW/7	Kupplung UW01
	MW	MW	MW	MW	MW	MW
Ohne Elemente	260	-131	144	123	73	435
PST Kupplung	205	-335	123	101	69	182
PST Serie	189	-67	105	83	86	377
3 Drosseln	186	-64	104	83	87	375

Tabelle 5-16: Vergleich der Varianten im Ausbauzustand „Zukunft“ zum Belastungsfall: Maximales Pumpen + PV-Erzeugung

Aus Tabelle 5-15 und Tabelle 5-16 ist deutlich zu erkennen, dass alle drei Möglichkeiten der Lastflusssteuerung funktionieren und die überlasteten Leitungen merklich entlasten. Die Varianten PST in Serie und 3 Drosseln verhalten sich hier wieder nahezu gleich, wobei die Variante PST als Kupplung deutlich durch den hohen Leistungsaustausch mit dem übergeordneten 220 kV Netz in der Netzabstützung NA-D auffällt. Im Belastungsfall „Maximales Pumpen + PV-Erzeugung“ ist die Leitung NW/4B mit der Variante PST als Kupplung allerdings wieder nahezu 100 % ausgelastet. Bei Pumpbelastung ist die Leitung NW/4B immer deutlich höher ausgelastet als die Leitung MW/3B. Dies kann auf die höhere PV-Einspeisung entlang der Leitung NW zurückgeführt werden. In den Varianten mit 3 Drosseln und dem PST in Serie ist vor allem im Erzeugungslastfall die gleichmäßige Belastung der Leitungen NW, MW und SW erkennbar. Auch ist die Leistungsverlagerung von den Leitungen NW und MW auf die Leitung SW erkennbar, da diese hier stärker belastet ist als in der Variante PST als Kupplung oder ohne lastflusssteuernde Elemente.

6 Überprüfung auf (n-1) Sicherheit der einzelnen Varianten

Es wurden die verschiedenen Varianten der Lastflusssteuerung auf ihr Verhalten beim Ausfall von verschiedenen Betriebsmitteln oder Leitungen untersucht. Betrieblich ist die Schutzeinstellung der Leitungen so gewählt, dass sie bei 190 % des Nennstromes anspricht. Bei einem Ausfall sollten deshalb die Leitungsbelastungen unter diesem Wert bleiben, damit alle Leitungen aktiv bleiben und genügend Zeit ist, entsprechend Kraftwerksleistungen zu drosseln, um dem überlasteten Zustand entgegenzuwirken. Es wurden Leitungsausfälle im übergeordneten Netz sowie auch an den Leitungen NW, MW und SW betrachtet. Außerdem wurden Ausfälle der lastflusssteuernden Elemente simuliert, um die Auswirkung auf das Netz zu untersuchen. Die Belastungswerte der verbleibenden Leitungen sind in den unten angeführten Tabellen in MW bzw. in % auf den maximalen Strom bezogen angeführt. Belastungen ab 125 % wurden in orange markiert, Belastungen über 150 % sind in rot markiert. Bei kritischen Überlastungen kann im Betrieb durch Drosselung der Erzeugungsleistung oder Adaption an den lastflusssteuernden Elementen eingegriffen werden, um das Netz zu entlasten. Belastungswerte über 190 % führen je nach Einstellung des Überstrom-Zeitschutzes zur Freischaltung der Leitung im Sekundenbereich, was zu schnell ist, um betrieblich eingreifen zu können. Deshalb sollten bei Leitungsausfällen die Belastungen immer unter dieser Schwelle bleiben, um den Gesamtausfall durch Verkettung von Leitungsausfällen zu vermeiden.

6.1 Keine Lastflusssteuerung

6.1.1 Hoher Durchzug + Erzeugung

In dieser Lastsituation sind vor allem Ausfälle in den Leitungen SW220 (Ausfall eines Systems), NW/3A (parallel zu NW/4B), NW/1B (parallel zu NW/4A, zwischen UW22 und UW13), MW/1 (zwischen NA-A und Abzweigung der Leitung MN) und SW/3C (parallel zu SW/4C, zwischen UW04 und NA-D) relevant. Zusätzlich wurden Ausfälle einzelner Transformatoren in den Netzabstützungen simuliert, um die Auslastung des verbleibenden Umspanners zu ermitteln.

Ausgefallenes Element	NW/4B		NW/4A		MW/3B		SW/4C		MN		NA-A RHU2		NA-D RHU2	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
NSZ	117	94	112	92	126	104	82	67	3	4	60	37	25	20
SW220	144	115	135	112	150	128	94	78	6	9	104	56	74	33
NW/3A	179	144	102	84	122	101	84	69	31	43	52	33	19	19
NW/1B	102	82	177	148	139	115	86	70	20	27	49	32	17	18
MW/1	151	122	109	90	110	91	85	69	73	102	53	34	20	19
SW/3C	119	96	114	94	128	105	153	116	3	5	57	36	23	19
NA-A RHU1	112	89	108	88	123	99	81	65	2	3	98	60	30	17
NA-D RHU1	115	92	110	91	125	102	81	66	2	4	56	34	42	30

Tabelle 6-1: Leitungsauslastungen bei Ausfällen ohne Lastflusssteuerung im Lastfall „Hoher Durchzug + Erzeugung“

In Tabelle 6-1 ist zu sehen, dass bei Ausfällen der Leitungen NW/3A oder NW/1B die jeweils parallel verlaufenden Leitungen NW/4B oder NW/3B deutlich überlastet werden. Auch beim Ausfall eines Systems der südlichen 220 kV Leitung kommt es zu deutlich höheren Durchzügen durch das 110 kV Netz und dadurch zu Überlastungen in den Leitungen NW, MW und SW. Dabei wird die Leitung MW/3B über 125 % ausgelastet. In diesem Szenario ist die Leitung NW im Bereich NA-A – UW22 – UW13 bei einem Ausfall am kritischsten.

6.1.2 Maximales Pumpen + PV-Erzeugung

In dieser Lastsituation sind vor allem Ausfälle in den Leitungen SW220 (Ausfall eines Systems), NW/3A (parallel zu NW/4B), NW/1B (parallel zu NW/4A, zwischen UW22 und UW13), MW/1 (zwischen NA-A und Abzweigung Leitung MN) und SW/0B (parallel zu SW/9, zwischen UW32 und UW52) relevant. Dabei kommt es jeweils in den zweiten Systemen parallel zu hohen Belastungen. Ein Fehler in MW/1 führt zur Überlastung der schwach dimensionierten Leitung MN. Zusätzlich wurden Ausfälle einzelner Transformatoren in den Netzabstützungen simuliert, um die Auslastung des verbleibenden Umspanners zu ermitteln.

Ausgefallenes Element	NW/4B		NW/4A		MW/1		SW/9		MN		NA-A RHU2		NA-D RHU2	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
NSZ	144	121	118	96	115	96	71	61	13	19	130	76	65	28
SW220	164	141	139	114	130	113	82	71	16	24	163	95	113	41
NW/3A	220	186	106	86	151	129	74	64	31	42	120	73	58	26
NW/1B	129	110	190	153	129	108	75	64	30	43	119	72	57	26
MW/1	186	158	115	93	0	0	74	64	109	150	120	73	58	26
SW/0B	146	123	120	98	117	98	128	110	14	20	127	75	62	27
NA-A RHU1	132	113	107	87	104	87	66	57	12	17	204	114	48	27
NA-D RHU1	139	118	113	93	110	94	68	59	13	19	122	74	99	43

Tabelle 6-2: Leitungsauslastungen bei Ausfällen ohne Lastflusssteuerung im Lastfall „Maximales Pumpen + PV-Erzeugung“

In Tabelle 6-2 ist zu sehen, dass dieser Lastfall hinsichtlich (n-1) Sicherheit schon als kritisch angesehen werden kann. Durch den Ausfall der Leitungen NW/3A oder NW/1B werden die parallel dazu verlaufenden Leitungen bereits mit über 150 % ausgelastet. Vor allem die Leitung NW/4B liegt hier mit 186 % nahe am 190 % Limit der Schutzeinstellung. Auch in der schwach dimensionierten Leitung MN kommt es durch den Ausfall der Leitung MW/1 zu einer kritischen Auslastung von 150 %. Am kritischsten ist auch hier die Leitung NW im Bereich NA-A – UW22 – UW13, besonders der Abschnitt zwischen NA-A und UW22.

6.2 Variante Phasenschiebertransformator als Kupplung

6.2.1 Hoher Durchzug + Erzeugung

In dieser Lastsituation sind vor allem Ausfälle in den Leitungen SW220 (Ausfall eines Systems), NW/3A (parallel zu NW/4B), NW/1B (parallel zu NW/4A, zwischen UW22 und UW13), MW/1 (zwischen NA-A und Abzweigung Leitung MN) und SW/3C (parallel zu SW/4C, zwischen UW04 und NA-D) relevant. Zusätzlich wurden Ausfälle einzelner Transformatoren in den Netzabstützungen simuliert, um die Auslastung des verbleibenden Umspanners zu ermitteln. Der Ausfall des lastflusstuernden Elements wurde ebenfalls simuliert.

Ausgefallenes Element	NW/4B		NW/4A		MW/3B		SW/4C		MN		NA-A RHU2		NA-D RHU2	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
NSZ	85	69	84	69	98	80	83	68	9	7	21	21	102	38
SW220	110	88	106	87	120	98	96	80	6	4	65	36	145	53
NW/3A	131	106	70	64	96	78	84	69	27	37	16	19	99	37
NW/1B	75	61	134	112	109	89	85	70	11	16	14	19	98	37
MW/1	109	89	83	68	87	71	84	69	49	69	17	20	100	38
SW/3C	87	70	86	70	100	81	153	126	9	7	18	20	99	38
NA-A RHU1	84	67	83	67	97	78	75	60	10	7	36	35	102	37
NA-D RHU1	80	65	80	65	93	76	79	65	10	7	11	16	167	61
LFS Element	83	67	73	68	97	79	75	61	10	7	19	15	104	43

Tabelle 6-3: Leitungsauslastungen bei Ausfällen mit PST als Kupplung im Lastfall „Hoher Durchzug + Erzeugung“

In Tabelle 6-3 wird deutlich, dass durch diese Methode lediglich die Leitung SW/4C beim Ausfall der parallel verlaufenden Leitung SW/3C über 125 % ausgelastet wird. Diese Überlastung kann durch die Reduktion von 50 MW Erzeugungsleistung im KW ZIR auf 116 % abgesenkt werden. Die Anzahl der über 125 % ausgelasteten Leitungen sinkt von drei auf eine. Somit ist die Auslastung des verbleibenden Netzes nach einem Ausfall durchwegs geringer als in der Variante ohne Lastflusststeuerung. Auch kritische Auslastungen von über 150 % treten hier nicht auf.

6.2.2 Maximales Pumpen + PV-Erzeugung

In dieser Lastsituation sind vor allem Ausfälle in den Leitungen SW220 (Ausfall eines Systems), NW/3A (parallel zu NW/4B), NW/1B (parallel zu NW/4A, zwischen UW22 und UW13), MW/1 (zwischen NA-A und Abzweigung der Leitung MN) und SW/0B (parallel zu SW/9, zwischen UW32 und UW52) relevant. Dabei kommt es jeweils in den zweiten Systemen parallel zu hohen Belastungen. Ein Fehler in MW/1 führt zu starker Auslastung der schwach dimensionierten Leitung MN. Zusätzlich wurden Ausfälle einzelner Transformatoren in den Netzabstützungen simuliert, um die Auslastung des verbleibenden Umspanners zu ermitteln. Der Ausfall des lastflusssteuernden Elements wurde ebenfalls simuliert.

Ausgefallenes Element	NW/4B		NW/4A		MW/1		SW/9		MN		NA-A RHU2		NA-D RHU2	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
NSZ	123	101	97	77	94	77	68	57	10	15	103	59	168	53
SW220	142	120	117	94	114	95	80	69	13	19	137	78	211	67
NW/3A	190	156	88	70	131	108	71	60	27	37	95	57	162	51
NW/1B	112	92	158	125	107	87	71	60	25	34	94	56	162	51
MW/1	161	133	95	76	0	0	71	60	92	124	96	57	164	51
SW/0B	125	103	99	79	98	81	124	105	11	15	100	58	165	52
NA-A RHU1	115	95	89	72	90	75	64	54	9	13	162	90	155	50
NA-D RHU1	116	95	90	72	91	75	62	52	9	13	88	53	269	85
LFS Element	104	85	78	62	81	67	67	56	7	11	78	49	227	72

Tabelle 6-4: Leitungsauslastungen bei Ausfällen mit PST als Kupplung im Lastfall „Maximales Pumpen + PV-Erzeugung“

Im Vergleich zu der Variante ohne Lastflusssteuerung sind auch hier die Leitungsbelastungen nach einem Ausfall durchwegs niedriger. Die Leitung NW bleibt im Bereich NA-A – UW22 nach einem Ausfall des Parallelsystems weiterhin kritisch bei einer maximalen Auslastung von 156 %. Diese Auslastung kann durch abschalten sämtlicher Pumpen im KW-FR auf 131 % reduziert werden.

6.3 Variante Phasenschiebertransformator in Serie zu NW und MW

6.3.1 Hoher Durchzug + Erzeugung

In dieser Lastsituation sind vor allem Ausfälle in den Leitungen SW220 (Ausfall eines Systems), NW/3A (parallel zu NW/4B), NW/1B (parallel zu NW/4A, zwischen UW22 und UW13), MW/1 (zwischen NA-A und Abzweigung der Leitung MN) und SW/3C (parallel zu SW/4C, zwischen UW04 und NA-D) relevant. Dabei kommt es jeweils in den zweiten Systemen parallel zu hohen Belastungen. Zusätzlich wurden Ausfälle einzelner Transformatoren in den Netzabstützungen simuliert, um die Auslastung des verbleibenden Umspanners zu ermitteln. Der Ausfall des lastflusstuernden Elements wurde ebenfalls simuliert.

Ausgefallenes Element	NW/4B		NW/4A		MW/3B		SW/4C		MN		NA-A RHU2		NA-D RHU2	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
NSZ	73	59	74	60	88	71	95	79	3	4	20	21	4	13
SW220	98	79	96	79	110	90	108	92	0	0	64	36	47	25
NW/3A	114	92	68	56	86	70	97	80	25	34	16	19	7	15
NW/1B	65	53	119	98	98	79	97	81	8	11	14	19	9	15
MW/1	95	77	73	60	79	64	96	80	40	56	16	20	7	15
SW/3C	75	61	76	62	90	73	177	147	3	4	16	19	7	15
NA-A RHU1	72	58	73	59	87	69	95	78	4	5	35	34	5	13
NA-D RHU1	73	59	74	60	88	71	95	79	3	5	19	18	5	23
LFS Element	4	4	3	3	16	13	117	101	14	19	52	27	61	22

Tabelle 6-5: Leitungsauslastungen bei Ausfällen mit PST in Serie im Lastfall „Hoher Durchzug + Erzeugung“

In dieser Variante kommt es nur in der Leitung SW/4C bei einem Ausfall des parallellaufenden Systems SW/3C zu einer deutlichen Überlastung von 147 %. Diese Überlastung kann durch Reduktion des PST auf Stufe 0 auf 134 % und bei zusätzlicher Reduktion der Erzeugungsleistung von 50 MW im Kraftwerk KW-ZIR auf 124 % abgesenkt werde.

6.3.2 Maximales Pumpen + PV-Erzeugung

In dieser Lastsituation sind vor allem Ausfälle in den Leitungen SW220 (Ausfall eines Systems), NW/3A (parallel zu NW/4B), NW/1B (parallel zu NW/4A, zwischen UW22 und UW13), MW/1 (zwischen NA-A und Abzweigung der Leitung MN) und SW/0B (parallel zu SW/9, zwischen UW32 und UW52) relevant. Dabei kommt es jeweils in den zweiten Systemen parallel zu hohen Belastungen. Ein Fehler in MW/1 führt zur Überlastung der schwach dimensionierten Leitung MN. Zusätzlich wurden Ausfälle einzelner Transformatoren in den Netzabstützungen simuliert, um die Auslastung des verbleibenden Umspanners zu ermitteln. Der Ausfall des lastflusssteuernden Elements wurde ebenfalls simuliert.

Ausgefallenes Element	NW/4B		NW/4A		MW/1		SW/9		MN		NA-A RHU2		NA-D RHU2	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
NSZ	105	87	80	64	82	69	84	72	8	11	94	58	33	21
SW220	125	106	100	81	99	84	96	85	11	16	129	77	82	32
NW/3A	163	135	72	58	112	93	86	74	25	34	88	56	29	20
NW/1B	97	80	130	104	81	68	86	74	20	28	88	56	28	20
MW/1	138	115	79	63	0	0	86	74	77	105	89	56	29	20
SW/0B	108	89	82	69	84	70	152	131	8	12	90	57	30	20
NA-A RHU1	98	83	73	59	76	65	79	69	7	10	149	89	22	22
NA-D RHU1	103	86	78	63	81	68	82	71	7	11	90	58	50	33
LFS Element	30	25	7	6	21	17	108	95	3	6	22	38	25	18

Tabelle 6-6: Leitungsauslastungen bei Ausfällen mit PST in Serie im Lastfall „Maximales Pumpen + PV-Erzeugung“

In dieser Variante ist die Leitung NW/4B bei Ausfall des parallellaufenden Systems NW/3A mit 135 % deutlich überlastet. Diese Überlastung kann durch verstellen des PST von Stufe -10 auf -20 auf 106 % reduziert werden.

Bei Ausfall der Leitung SW/0B kommt es im parallellaufenden System SW/9 zu einer Auslastung von 131 %. Diese Überlastung kann durch verstellen des PST von Stufe -10 auf Stufe 0 und gleichzeitiger Reduktion von 50 MW Pumpleistung im KW-ZIR auf 109 % reduziert werden.

6.4 Variante Drosseln

6.4.1 Hoher Durchzug + Erzeugung

In dieser Lastsituation sind vor allem Ausfälle in den Leitungen SW220 (Ausfall eines Systems), NW/3A (parallel zu NW/4B), NW/1B (parallel zu NW/4A, zwischen UW22 und UW13), MW/1 (zwischen NA-A und Abzweigung der Leitung MN) und SW/3C (parallel zu SW/4C, zwischen UW04 und NA-D) relevant. Dabei kommt es jeweils in den zweiten Systemen parallel zu hohen Belastungen. Zusätzlich wurden Ausfälle einzelner Transformatoren in den Netzabstützungen simuliert, um die Auslastung des verbleibenden Umspanners zu ermitteln. Der Ausfall jeweils einer Drossel wurde ebenfalls simuliert.

Ausgefallenes Element	NW/4B		NW/4A		MW/3B		SW/4C		MN		NA-A RHU2		NA-D RHU2	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
NSZ	75	60	76	61	88	72	94	79	4	8	20	16	3	15
SW220	94	75	92	76	105	86	109	93	1	7	59	30	43	24
NW/3A	118	94	72	58	86	70	95	80	27	38	17	15	6	15
NW/1B	56	45	98	80	97	79	99	83	12	17	6	10	15	15
MW/1	98	78	74	60	83	67	95	80	44	59	18	15	5	15
SW/3C	77	61	77	63	90	73	175	147	4	8	17	14	7	15
NA-A RHU1	74	59	75	60	88	71	94	78	4	8	35	26	5	13
NA-D RHU1	75	59	75	61	88	72	94	79	4	8	20	14	4	23
Drossel UW01	62	50	87	71	11	14	96	79	51	70	2	10	18	15
Drosseln UW22	21	17	0	0	113	93	108	92	43	57	21	14	37	17

Tabelle 6-7: Leitungsauslastungen bei Ausfällen mit 3 Drosseln im Lastfall „Hoher Durchzug + Erzeugung“

In dieser Variante der Lastflusssteuerung kommt es nur in der Leitung SW/4C bei einem Ausfall des parallellaufenden Systems SW/3C zu einer deutlichen Überlastung von 147 %. Diese Überlastung kann durch Reduktion der Erzeugungsleistung von 50 MW im Kraftwerk KW-ZIR auf 136 % abgesenkt werden. Eine weitere Reduktion der Erzeugungsleistung von 100 MW im Kraftwerk KW-FR führt zu einer Entlastung auf 122 %.

6.4.2 Maximales Pumpen + PV-Erzeugung

In dieser Lastsituation sind vor allem Ausfälle in den Leitungen SW220 (Ausfall eines Systems), NW/3A (parallel zu NW/4B), NW/1B (parallel zu NW/4A, zwischen UW22 und UW13), MW/1 (zwischen NA-A und Abzweigung der Leitung MN) und SW/0B (parallel zu SW/9, zwischen UW32 und UW52) relevant. Dabei kommt es jeweils in den zweiten Systemen parallel zu hohen Belastungen. Ein Fehler in MW/1 führt zur Überlastung der schwach dimensionierten Leitung MN. Zusätzlich wurden Ausfälle einzelner Transformatoren in den Netzabstützungen simuliert, um die Auslastung des verbleibenden Umspanners zu ermitteln. Der Ausfall jeweils einer Drossel wurde ebenfalls simuliert.

Ausgefallenes Element	NW/4B		NW/4A		MW/1		SW/9		MN		NA-A RHU2		NA-D RHU2	
	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%	MW	%
NSZ	104	87	78	63	82	69	84	73	8	14	93	59	32	22
SW220	119	101	93	77	94	81	98	87	10	17	122	76	77	33
NW/3A	163	137	73	60	112	94	86	74	26	35	88	58	29	21
NW/1B	85	71	101	82	75	63	90	77	24	36	78	54	20	20
MW/1	138	115	76	61	0	0	85	74	83	115	88	58	29	21
SW/0B	106	88	80	65	83	70	152	132	8	15	88	58	28	21
NA-A RHU1	98	83	72	59	76	65	79	69	7	13	147	92	21	23
NA-D RHU1	102	86	76	62	80	68	82	71	8	14	88	59	48	34
Drossel UW01	92	77	88	72	53	46	90	78	36	49	75	53	18	20
Drosseln UW22	51	42	0	0	62	52	98	86	53	77	50	45	2	18

Tabelle 6-8: Leitungsauslastungen bei Ausfällen mit 3 Drosseln im Lastfall „Maximales Pumpen + PV-Erzeugung“

In dieser Variante ist die Leitung NW/4B bei Ausfall des parallellaufenden Systems NW/3A mit 137 % deutlich überlastet. Diese Überlastung kann durch Reduktion von 130 MW Pumpleistung im Kraftwerk KW-FR auf 128 % reduziert werden.

Beim Ausfall der Leitung SW/0B kommt es im parallellaufenden System SW/9 zu einer Auslastung von 132 %. Diese Überlastung kann durch Reduktion von 50 MW Pumpleistung im Kraftwerk KW-ZIR auf 121 % reduziert werden.

7 Erkenntnisse und Diskussion

Im Ausbauzustand „Ist“ kommt es aufgrund der hohen Durchzüge zusätzlich zu hoher Erzeugungsleistung immer wieder zu sehr starken Auslastungen der Leitungszüge NW, MW und SW. Diese starken Auslastungen treten vor allem bei sehr hohem West – Ost Lastfluss auf der südlich verlaufenden 220 kV Leitung auf. Dadurch dass die Leitung NW220 als Stichleitung in das 110 kV Netz hineinragt, bildet diese über die Netzabstützung NA-A einen relevanten Parallelpfad zur südlichen Leitung SW220, was zu ebendiesen Durchzügen führt. Dabei sind die Leitungen NW und MW anhand der Messwerte und Simulationen jeweils deutlich stärker ausgelastet als die Leitung SW, was auf die kürzere Trassenlänge von der Netzabstützung NA-A bis zum Netzknoten UW01 zurückzuführen ist. Durch Simulationen verschiedenster Varianten der Lastflusssteuerung wurde ersichtlich, dass die Entlastung der Leitungen NW und MW durchwegs möglich ist und der Lastfluss je nach Variante auch auf die Leitung SW umlenkbar ist. Speziell in einem Erzeugungslastfall bei gleichzeitig hohem Durchzug mit Leitungsbelastungen von um die 100 % kann die Leitungsauslastung durch lastflusssteuernde Elemente auf ca. 60 % reduziert werden.

Durch die Umbauarbeiten im Ausbauzustand „Ist+“ verlagert sich die leistungsstarke Kraftwerksgruppe DRK von der 110 kV Ebene über einen eigenen Transformator direkt in die 220 kV Ebene. Da die Kraftwerksleistung nach dem Umbau mit 17,4 % im Vergleich zu 46 % vor dem Umbau deutlich weniger auf das 110 kV Netz wirkt, werden somit Kapazitäten in den Leitungen NW und MW frei.

Durch den Zubau von neuen Kraftwerken im Ausbauzustand „Zukunft“ werden diese frei gewordenen Kapazitäten wieder aufgefüllt, was in Zukunft lastflusssteuernde Elemente für den uneingeschränkten Kraftwerksbetrieb unumgänglich macht. Auch wird bis zu diesem Zeitpunkt der Pumpbetrieb in Kombination mit sehr hohen PV-Einspeiseleistungen für die Belastungssituation interessant, da es dann auch hier zu sehr starken Auslastungen der Leitungen kommt.

Bei der Lastflusssteuerung durch einen Phasenschiebertransformator in der Kupplung zwischen West- und Ostnetz kann der Leistungsaustausch zwischen den beiden Teilnetzen deutlich reduziert werden, was zu einer Entlastung der Leitungen NW, MW und auch SW führt. Durch die Regelmöglichkeit des PSTs kann in dieser Variante der Lastfluss über die Kupplung und damit die Beeinflussung individuell an die Lastsituation angepasst werden. Die Netzabstützung NA-D wird allerdings deutlich stärker belastet, da ein großer Teil der Leistung anstatt über die Kupplung hier über die Netzabstützung NA-D abgeführt wird. Außerdem fällt die direkte Verbindung des Ostnetzes mit der Netzabstützung NA-D in dieser Variante weg, da es sonst durch den PST als Kupplung über die Leitungen zu einem signifikanten Ringlastfluss kommen würde. Bei einem Leitungsausfall im Westlichen Teil des Netzes kann in dieser Variante durch den PST nur bedingt entgegen geregelt werden, da nur der Lastfluss über die Kupplung beeinflussbar ist. Bei einem Ausfall des PSTs kommt es zur Auftrennung des Netzes in zwei Teile.

Bei der Lastflusssteuerung durch einen Phasenschiebertransformator in Serie zu den Leitungen NW und MW kann der Lastfluss sehr gut durch die Stufenverstellung auf die Leitung SW verlagert werden. Die Kupplung zwischen Ost- und Westnetz bleibt in dieser Variante unverändert, und somit kann der

östliche Teil des Netzes weiterhin direkt mit der Netzabstützung NA-D verbunden bleiben. In dieser Variante kann auf einen Leitungsausfall im westlichen Teil des Netzes durch die Regelung der Transformatorstufen reagiert und so der Lastfluss umgelenkt werden. Ein Ausfall des PSTs ist allerdings in dieser Variante schwerwiegend, da damit die Verbindung der Leitungen NW und MW mit dem Netzknoten UW01 wegfällt, und als einzige Verbindung die Leitung SW intakt bleibt.

Bei der Lastflusssteuerung durch drei Drosseln, eine jeweils pro Leitungssystem der Leitung NW und MW, kommt es zu ähnlichen Entlastungen als in der Variante mit dem PST in Serie. Durch den starren Aufbau der Drossel kann hier nicht individuell dem Belastungszustand entsprechend nachgeregelt werden. Da durch die den Leitungslängen angepasste Drosselinduktivität, die Leitungen NW, MW und SW technisch auf dieselbe Länge gebracht wurden, wird in dieser Variante die Last ungefähr gleich auf die drei Leitungen aufgeteilt. Die Kupplung zwischen dem Westlichen und Östlichen Teil des Netzes bleibt in dieser Variante bestehen und somit ist auch das Ostnetz mit der Netzabstützung NA-D direkt verbunden. Bei einem Leitungsausfall kann durch die fehlende Regelbarkeit der Drossel nicht direkt auf die Belastung reagiert werden, allerdings fällt in dieser Variante der Ausfall einer Drossel nicht schwerwiegend aus.

Alle drei Möglichkeiten sind für die Entlastung des Netzes zielführend und schaffen es, Kapazitäten für zukünftige Einspeiser, Kraftwerke und Verbraucher zu schaffen.

8 Referenzen

- [1] R. Schürhuber, Planung und Betrieb elektrischer Energiesysteme, TU Graz, 2022
- [2] R. Schürhuber, Elektrische Energiesysteme 1, TU Graz, 2023
- [3] H. Brakelmann, „Netzverstärkungs-Trassen zur Übertragung von Windenergie. Freileitung oder Kabel?“, Rheinberg, 2004
- [4] H. Renner, Regelung und Stabilität elektrischer Energiesysteme, TU Graz, 2015
- [5] H. Renner, Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit von elektrischen Energiesystemen, TU Graz, 2008
- [6] [Air Core Dry Type Reactors | Coil Innovation — Composite Power Group \(compow.com\)](#)
- [7] <https://www.smartwires.com/smartvalve/>
- [8] <https://www.smartwires.com/2021/07/01/eirgrid-partners-with-smart-wires/>
- [9] <https://nomadgcs.com/2019/01/21/nomad-smart-wires/>
- [10] Verboomen, Jody & Van Hertem, Dirk & Schavemaker, Pieter & Kling, W.L. & Belmans, Ronnie. (2005). Phase Shifting Transformers: Principles and Applications. 6 pp. - 6. 10.1109/FPS.2005.204302.
- [11] Adolf J. Schwab, Elektroenergiesysteme [Buch], Springer, 2009
- [12] V. Wesselak und T. Schabbach, Regenerative Energietechnik, Springer, 2009

9 Anhang

In Tabelle 9-1 sind die relevanten Leitungsdaten mit thermischen Grenzströmen und Grenzleistungen bei 116 kV Betriebsspannung dargestellt.

Leitungsabschnitt	$I_{\text{thermisch}}$	$S_{\text{thermisch}116}$
	A	MVA
NW/1A	640	127
NW/2	640	127
NW/4A	640	127
NW/1B	640	127
NW/4B	640	127
NW/3A	640	127
NW/4C	1308	260
NW/3B	1308	260
NW/5	840	167
NW/6	840	167
MW/1	635	126
MW/3B	640	127
MW/3A	635	126
SW/4C	640	127
SW/3B	640	127
SW/3C	685	136
SW/5A	685	136
SW/6A	640	127
SW/5B	685	136
SW/6B	685	136
SW/5B	685	136
SW/7	685	136
SW/8	685	136
SW/9	685	136
SW/0B	685	136
MN/2	385	77
MS1/1	2148	428
MS2/0	2148	428
NO/1	685	136
NO/2	640	127
SO/1A	640	127
SO/2A	640	127

Tabelle 9-1: Leitungsdaten und Grenzwerte der relevanten Leitungen

In Tabelle 9-2 sind die Umspanntransformatoren der Netzabstützungen mit ihrer jeweiligen Nennleistung aufgelistet.

Transformator	Nennleistung
	MVA
NA-A	
RHU1	200
RHU2	200
NA-B	
RHU1	300
RHU2	300
RHU3	220
NA-C	
RHU1	220
NA-D	
RHU1	300
RHU2	300

Tabelle 9-2: Umspanner Kennwerte Netzabstützungen