

BACHELOR THESIS
Sebastian Holz

Energieversorgungskonzept für den St. Pauli Elbtunnel

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Information and Electrical Engineering

Sebastian Holz

Energieversorgungskonzept für den St. Pauli Elbtunnel

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Röther
Zweitgutachter: Tobias Wiegel

Eingereicht am: 12. August 2024

Sebastian Holz

Thema der Arbeit

Energieversorgungskonzept für den St. Pauli Elbtunnel

Stichworte

Elektrische Energieversorgung, St. Pauli Elbtunnel, Netzauslegung

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit einem neuen Energieversorgungskonzept am St. Pauli Elbtunnel. Durch dieses neue Energieversorgungskonzept soll eine Sicherheitsstromversorgung für die neu errichtete Entrauchungsanlage sicher gestellt werden. Außerdem soll die Verfügbarkeit am St. Pauli Elbtunnel bei einer Unterbrechung der Allgemeinstromversorgung erhöht werden.

Sebastian Holz

Title of Thesis

Energy supply concept for the St. Pauli Elbtunnel

Keywords

Electrical energy supply, St. Pauli Elbe Tunnel, network design

Abstract

This bachelor's thesis deals with a new energy supply concept at the St. Pauli Elbe Tunnel. This new energy supply concept aims to ensure emergency power supply for the newly constructed smoke extraction system. Additionally, it aims to increase availability at the St. Pauli Elbe Tunnel in case of a general power supply interruption.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungen	x
Symbolverzeichnis	xii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.2 Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung	3
2 Grundlagen	4
2.1 Spannungsebenen	5
2.2 Versorgungsformen	5
2.2.1 Allgemeinstromversorgung	5
2.2.2 Ersatzstromversorgung/Netzersatzanlage	5
2.2.3 Sicherheitsstromversorgung	6
2.3 Netzformen	6
2.3.1 Strahlennetz	7
2.3.2 Ringnetz	8
2.3.3 Maschennetz	8
2.4 N-1 Kriterium	9
2.5 Gleichzeitigkeitsfaktor	9
2.6 Betriebsarten	10
2.7 Lastflussberechnung	10
2.8 Kurzschluss	11
2.8.1 Kurzschlussarten	12
2.8.2 Vorgehensweise bei der Kurzschlussstromberechnung	14

2.9	Selektivität	16
2.10	Leitungsdimensionierung	18
2.11	Norm für Einrichtungen für Sicherheitszwecke	19
2.11.1	Stromquellen für Sicherheitszwecke	19
3	Analyse des aktuellen Zustandes	21
3.1	Anlagenübersicht	21
3.2	Aufbau des Netzes	23
3.2.1	Netzform	24
3.2.2	Aufbau der Verteilungen	24
3.3	Ermittlung der verbauten Komponenten	26
3.3.1	Leitungen	26
3.3.2	Erfassung der Gesamtströme	27
3.3.3	Transformatoren	28
3.3.4	Niederspannungsanschluss	29
3.3.5	Mitellspannungsanschluss	29
3.4	Versorgung	30
3.4.1	Unterbrechung der Versorgung auf der Steinwerder Seite	31
3.4.2	Unterbrechung der Versorgung auf der St. Pauli Seite	32
3.4.3	Unterbrechung der Mittelspannungsversorgung	33
3.5	Auswertung des aktuellen Zustandes	34
4	Geplanter Zustand	35
4.1	Planung des Netzes	35
4.1.1	Sicherheitsstromversorgung nach DIN VDE 0100-560:2013-10	35
4.1.2	Versorgung der Lüfter für die Entrauchungsanlage	36
4.1.3	Versorgung für eine höhere Verfügbarkeit	36
4.1.4	Aufbau des geplanten Netzes	37
4.1.5	Verbindungsleitungen	38
4.2	Betriebsarten	39
4.2.1	Normalbetrieb	40
4.2.2	Ausfall/Wartung Trafo 3 (Steinwerder)	41
4.2.3	Ausfall/Wartung Trafo 4 (St. Pauli)	42
4.2.4	Ausfall Mittelspannung	43
4.3	Auswertung der Planung	44

5	Berechnung	45
5.1	Kurzschlussstromberechnung (nach DIN VDE 0102)	45
5.1.1	Kurzschlussmitimpedanzen (Mitimpedanzen)	45
5.1.2	Kurzschlussnullimpedanzen (Nullimpedanzen)	48
5.1.3	Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes I_k''	48
5.1.4	Berechnung des Stoßkurzschlussstromes i_p	50
5.2	Netzberechnung	52
5.2.1	Ermittlung der Leistungen	52
5.2.2	Spannungsfall	53
6	Simulation	55
6.1	Simaris Design	55
6.2	Parametrierung	55
6.3	Betriebsarten	56
6.3.1	Normalbetrieb	56
6.3.2	Ausfall/Wartung von Trafo 3	56
6.3.3	Ausfall/Wartung von Trafo 4	56
6.3.4	Ausfall der Mittelspannung	57
6.4	Ergebnisse der Simulation	57
7	Auswertung	59
7.1	Schaltmatrix	60
8	Fazit	61
8.1	Erkenntnisse	61
8.2	Ausblick	61
	Literaturverzeichnis	63
	A Anhang	66
	Selbstständigkeitserklärung	68

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht St. Pauli Elbtunnel [8]	1
2.1	Netzformen. a.) Strahlennetz, b.) Ringnetz, c.) Maschennetz [18, S.97] . .	6
2.2	Strahlennetztopologie hierarchischer gestaffelten Niederspannungsnetzen [19, S.513]	7
2.3	Verschiedene Kurzschlussarten und deren Ströme [6, S. 19]	12
2.4	Symmetrischer, dreipoliger Kurzschluss [19, S.825]	13
2.5	Auftrennung des unsymmetrischen Drehstromsystems in Mit-, Gegen- und Nullsystem [19, S.845]	14
2.6	Zeitlicher Verlauf eines generatorfernen Kurzschlussstromes [6, S.18] I''_K : Anfangs-Kurzschlusswechselstrom, i_p : Stoßkurzschlussstrom, I_k : Dauer- kurzschlussstrom, i_{DC} : Gleichstromanteil des Kurzschlussstroms, A : An- fangswert des Gleichstromanteils i_{DC}	14
2.7	Darstellung des Konzepts der Selektivität mit einem Kurzschluss am Ver- braucher V a.) Weg des Kurzschlussstroms (blau) b.) Verbraucherstrom- kreise, die vom Kurzschluss betroffen sind [19, S.635]	16
2.8	Beispiel für Selektivität von Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (Residual Cur- rent Device) (RCD) [7, S. 56]	18
3.1	St.Pauli-Elbtunnel Anlagenübersicht	21
3.2	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie	23
3.3	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie bei Normalbetrieb. Grün: im Betrieb, Rot: nicht im Betrieb	30
3.4	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie bei einem Ausfall der Versorgung auf der Steinwerder Seite. Grün: im Betrieb, Rot: nicht im Betrieb	31
3.5	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie bei einem Ausfall der Versorgung auf der St. Pauli Seite. Grün: im Betrieb, Rot: nicht im Betrieb	32
3.6	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie bei einem Ausfall der Mittelspannungs- versorgung. Grün: im Betrieb, Rot: nicht im Betrieb	33

4.1	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie	37
4.2	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie Normalbetrieb	40
4.3	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie Ausfall/Wartung Steinwerder	41
4.4	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie Ausfall/Wartung St. Pauli	42
4.5	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie Ausfall Mittelspannung	43
5.1	Einseitige Einspeisung mit mehreren Verbrauchern [17]	52
7.1	St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie mit Schaltelementen	60
A.1	Simulationsaufbau	67

Tabellenverzeichnis

2.1	Spannungsbereiche der verschiedenen Spannungsebenen [5, S. 14][18, S.424]	5
3.1	Kenngößen der verbauten Leitungen im St. Pauli Elbtunnel	26
3.2	Kenngößen der Gesamtströme im St. Pauli Elbtunnel	27
3.3	Kenngößen der Transformatoren im St. Pauli Elbtunnel	28
3.4	Kenngöße des Niederspannungsanschlusses	29
3.5	Kenngößen der Mittelspannungsanschlüsse [21]	29
4.1	Maximale Kenngößen der neuen Leitungen im St. Pauli Elbtunnel	38
6.1	Ergebnistabelle der Betriebsarten	57
6.2	Ergebnisse der Simulation für erforderlichen Leitungsgrößen	58
7.1	Schaltmatrix der Betriebsarten	60

Abkürzungen

AV Allgmeinstromversorgung

DIN Deutsches Institut für Normung

EN Europäische Norm

HA Hausanschluss

HPA Hamburg Port Authority

HS Hochspannung

HöS Höchstspannung

IEC International Electrotechnical Commission

MS Mittelspannung

NEA Netzersatzanlage

NS Niederspannung

NSHV Niederspannungshauptverteilung

NSUV Niederspannungsunterverteilung

RCD Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (Residual Current Device)

SNH Stromnetz Hamburg GmbH

STP St. Pauli

Abkürzungen

STW Steinwerder

SV Sicherheitsstromversorgung

TR Technical Report

USV Unterbrechungsfreie Stromversorgung

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Symbolverzeichnis

\underline{a} komplexer Einheitszeiger

c Spannungsfaktor

d Der mittlere geometrische Abstand der drei Leiter bzw. der Mittelpunkte von Bündelleitern

$I''_{k1maxPFO}$ Höchste einpolige Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ohne den Einfluss der Quellenströme von Kraftwerken mit Vollumrichter

I''_{k1PF} Beitrag der Kraftwerke mit Vollumrichter

I''_k Anfangs-Kurzschlusswechselstrom

$I''_{k2EL2maxPFO}$ Höchste zweipolige Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ohne den Einfluss der Quellenströme von Kraftwerken mit Vollumrichter

$I''_{k2EL2PF}$ Beitrag der Kraftwerke mit Vollumrichter

$I''_{k2maxPFO}$ Höchste zweipolige Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ohne den Einfluss der Quellenströme von Kraftwerken mit Vollumrichter

I''_{k2PF} Beitrag der Kraftwerke mit Vollumrichter

I''_{kQ} Anfangs-Kurzschlusswechselstrom am Anschlusspunkt Q der Netzeinspeisung

I_p Stoßkurzschlussstrom

i_{p1} Einpoliger Stoßkurzschlussstrom

i_{p2} Zweipoliger Stoßkurzschlussstrom

i_{p2EL2} Zweipoliger Stoßkurzschlussstrom mit Erdberührung

I_{rT} Bemessungsstrom des Transformators auf der Ober- oder Unterspannungsseite

j Imaginäre Zahl

κ Faktor zur Berechnung des Stoßkurzschlussstromes

μ_0 Absolute Permeabilität des Vakuums

ω Spezifischer Widerstand

P_{krT} Wickelverluste des Transformators bei Bemessungsstrom

q_n Nennquerschnitt

R Resistanz

r Der Leiterradius eines Einzelleiters

R'_L Wirksamer Resistanzbelag

ρ Spezifischer Widerstand

R_k Kurzschlussresistenz

$R_{(0)L}$ Resistanz im Nullsystem einer Leitung

R_Q Resistanz am Anschlusspunkt Q der Netzeinspeisung

R_T Resistanz eines Transformators

$R_{(0)T}$ Resistanz im Nullsystem eines Transformators

S_{rT} Bemessungsscheinleistung des Transformators

t_r Bemessungsübersetzungsverhältnis

u_{kr} Bemessungswert der Kurzschlussspannung in Prozent

U_n Netznennspannung, Leiter zu Leiter

U_{nQ} Netznenntspannung am Anschlusspunkt Q der Netzeinspeisung

u_{Rr} Bemessungswert des Wirkanteils der Kurzschlussleistung in Prozent

U_{rT} Bemessungsspannung des Transformators auf der Ober- oder Unterspannungsseite

X Reaktanz

X'_L Wirksamer Reaktanzbelag

X_k Kurzschlussreaktanz

$X_{(0)L}$ Reaktanz im Nullsystem einer Leitung

X_Q Reaktanz am Anschlusspunkt Q der Netzeinspeisung

X_T Reaktanz eines Transformators

$X_{(0)T}$ Reaktanz im Nullsystem eines Transformators

$\underline{Z}_{(0)}$ Komplexe Kurzschlussnullimpedanz

$\underline{Z}_{(1)}$ Komplexe Kurzschlussmitimpedanz

$\underline{Z}_{(2)}$ Komplexe Kurzschlussgegenimpedanz

Z_K Kurzschlussimpedanz eines Drehstromnetzes

Z_Q Kurzschlussimpedanz am Anschlusspunkt Q der Netzeinspeisung

\underline{Z}_T Komplexe Kurzschlussimpedanz des Transformators

Z_T Kurzschlussimpedanz des Transformators

1 Einleitung

Die Hamburg Port Authority (HPA) ist eine Anstalt des öffentlichen Rechts und ist im Auftrag der Stadt Hamburg für die Hafeninfrasturktur zuständig. [1] Hierzu gehört unter anderem auch die Instandhaltung und Sanierung des St. Pauli Elbtunnels.

Der St. Pauli Elbtunnel, eröffnet im Jahr 1911, unterquert die Norderelbe und verbindet mit zwei Tunnelröhren die Elbinsel Steinwerder mit den St. Pauli Landungsbrücken. Seit 2003 steht er unter Denkmalschutz und wurde von der Hamburgerischen Ingenieurkammer-Bau und der Bundesingenieurkammer mit dem Titel „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“ am 7. September 2011 in Deutschland ausgezeichnet. [12]

1994 wurde damit begonnen, eine Grundinstandsetzung des St. Pauli Elbtunnels durchzuführen. Ziel ist es hierbei, das Erscheinungsbild von 1911 wiederherzustellen. Zuerst wurden die Schachtgebäude aufwendig instandgesetzt und anschließend begannen die Arbeiten an der östlichen Tunnelröhre im Jahre 2010. Diese wurde 2019 wieder in Betrieb genommen und die Arbeiten an der westlichen Tunnelröhre begannen im Jahr 2022. [9]

Die Abbildung 1.1 zeigt eine Übersicht des St. Pauli Elbtunnels. Auf der linken Seite befindet sich Steinwerder (1) mit der Kraftwerkshalle (A) und dem Schachtgebäude Steinwerder (B). Auf der rechten Seite befindet sich St. Pauli mit dem dazugehörigen Schachtgebäude St. Pauli (2).



Abbildung 1.1: Übersicht St. Pauli Elbtunnel [8]

Die Schachtgebäude, welche sich an den Enden der Tunnelröhren befinden, haben jeweils sechs Aufzüge. Davon sind vier Aufzüge sogenannte Lastenaufzüge, welche damals auch PKWs förderten. Da die Durchfahrt mit einem PKW seit 2019 nicht mehr erlaubt ist, werden diese hauptsächlich von Fahrradfahrern genutzt. Die restlichen zwei Aufzüge sind Personenaufzüge.

In der Kraftwerkshalle befindet sich ein Mittelspannungsanschluss und drei von insgesamt vier Transformatoren. Von den drei Transformatoren sind zwei für die Lastenaufzüge und ein Transformator (intern bezeichnet mit dem Namen "Trafo 3") für die Drehstromverteilung auf der Steinwerder Seite zuständig. Auf der St. Pauli Seite befindet sich der Transformator (intern bezeichnet mit dem Namen "Trafo 4") für die Drehstromverteilung des Schachtgebäudes St. Pauli und ein Niederspannungsanschluss (auch genannt als Hausanschluss (HA)).

1.1 Ausgangssituation

Der St. Pauli Elbtunnel ist auf der Steinwerder Seite direkt an das Mittelspannungsnetz angeschlossen. Netzbetreiber des öffentlichen Mittelspannungsnetzes ist die Stromnetz Hamburg GmbH (SNH). Über ein Mittelspannungskabel in der Oströhre wird das Schachtgebäude St. Pauli mittelspannungsseitig versorgt.

An zwei Transformatoren sind zwei Gleichrichter angeschlossen, die sich in unmittelbarer Nähe zur Netzschaltanlage im Kraftwerksgebäude auf der Steinwerderseite befinden. Diese stellen eine Gleichspannung bereit, welche für die Gleichspannungsantriebe der Lastenaufzüge benötigt wird.

Die beiden anderen Transformatoren sind für die Versorgung der Drehstromverteilungen in den Schachtgebäuden zuständig. Hierbei versorgt ein Transformator ausschließlich nur ein Schachtgebäude. Eine elektrische Verbindung, auf der Sekundärseite der Transformatoren, existiert nicht.

Im Zuge der Sanierungsarbeiten wurde in den Tunnelröhren eine neue Entrauchungsanlage errichtet.

1.2 Problemstellung

Der elektrische Leistungsbedarf der Entrauchungsanlage ist so groß, dass er nicht wie alle anderen sicherheitstechnischen Anlagen im Falle eines Netzausfalls über Batterien für die nach Norm geforderte Zeit gepuffert werden kann. Eine alternative Sicherheitsstromversorgung gemäß DIN VDE 0100-560:2013-10 „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-56“ ist erforderlich. Hierzu wurde bereits als erste Maßnahme ein Hausanschluss errichtet, welcher die Anforderungen für eine Sicherheitsstromquelle nach DIN VDE 0100-560:2013-10 erfüllt. Dieser Hausanschluss wird aktuell noch nicht genutzt.

Gleichzeitig sorgt eine Wartung oder Ausfall der Transformatoren dafür, dass die allgemein versorgten Verbraucher nicht mehr versorgt werden und in dessen Folge der St. Pauli Elbtunnel für den öffentlichen Verkehr gesperrt werden muss.

Um die Verfügbarkeit des St. Pauli Elbtunnels für den öffentlichen Verkehr zu erhöhen, soll geprüft werden, ob über die zu errichtende Sicherheitsstromversorgung der Entrauchungsanlage, im Falle einer Versorgungsunterbrechung, die allgemeinen Verbraucher versorgt werden können und somit eine Sperrung umgangen werden kann.

1.3 Zielsetzung

Ziel der Bachelorarbeit ist ein Energieversorgungskonzept, welches die Verfügbarkeit des St. Pauli Elbtunnels erhöht und gleichzeitig die Anforderungen einer Sicherheitsstromversorgung erfüllt. Hierzu sollen Möglichkeiten geprüft werden, wie das aktuelle Netz ohne große Anpassungen erweitert werden kann.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich mit den Grundlagen für die Auslegung des Netzes. Hierzu werden die Grundlagen folgender Thematiken thematisiert:

- Spannungsebenen
- Versorgungsformen
- Netzformen
- N-1 Kriterium
- Gleichzeitigkeitsfaktor
- Betriebsarten
- Lastflussberechnung
- Kurzschluss
- Selektivität
- Leitungsdimensionierung
- Norm für Einrichtungen für Sicherheitszwecke

2.1 Spannungsebenen

Das elektrische Energieversorgungsnetz ist in mehrere Bereiche aufgebaut. Es wird unterschieden in Energieversorgungs- und Verteilungsnetz. Zu diesen Netzen gehören die vier unterschiedlichen Spannungsebenen Höchstspannung (HöS), Hochspannung (HS), Mittelspannung (MS) und Niederspannung (NS). [14, S.424]

Relevant für den St. Pauli Elbtunnel sind die Spannungsebenen der Mittelspannung und Niederspannung. Die jeweiligen Spannungsbereiche, die in diesen Spannungsebenen auftreten, werden in der Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Spannungsbereiche der verschiedenen Spannungsebenen [5, S. 14][18, S.424]

Spannungsebene	Spannung
Mittelspannung	$1 \text{ kV} < U_N < 60 \text{ kV}$
Niederspannung	$U_N \leq 1 \text{ kV}$

2.2 Versorgungsformen

Es gibt unterschiedliche Arten der Versorgungsformen. Wesentlich wird unterschieden in Allgemeinstromversorgung (AV), Ersatzstromversorgung oder Netzersatzanlage (NEA) und Sicherheitsstromversorgung (SV).

2.2.1 Allgemeinstromversorgung

Die Allgemeinstromversorgung ist die Versorgung, welche im Normalbetrieb sämtliche Verbraucher versorgt.

2.2.2 Ersatzstromversorgung/Netzersatzanlage

Eine Ersatzstromversorgung ist eine netzunabhängige Stromversorgungsanlage, die oft als Netzersatzanlage bezeichnet wird. Sie dient bei einem Ausfall der Allgemeinstromversorgung für eine weitere Versorgung der Verbraucher. Generatoren oder Batterien können als Energiequelle für eine Netzersatzanlage verwendet werden. [3, S. 385]

Diese Energiequellen sind ausschließlich als ein Ersatz der Allgemeinstromversorgung und nicht als eine Sicherheitsstromversorgung zugelassen. Nur wenn die geforderten Anforderungen aus der Norm DIN VDE 0100-560:2013-10 erfüllt sind, können diese Energiequellen als eine Sicherheitsstromversorgung genutzt werden.

2.2.3 Sicherheitsstromversorgung

Elektrische Anlagen für Sicherheitszwecke werden bei einem Ausfall der AV von einer SV versorgt. Die DIN VDE 0100-560:2013-10 „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-56: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Einrichtungen für Sicherheitszwecke“ legt vor, wie eine solche Sicherheitsstromversorgung auszulegen ist.

2.3 Netzformen

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Netzformen behandelt. Unter dem Begriff „Netz“ werden alle Betriebsmittel beschrieben, die für eine Übertragung oder Verteilung verwendet werden. Zu den Netzformen gehören die Strahlennetze, Ringnetze und Maschennetze, welche in diesem Kapitel noch näher erläutert werden. [18, S.96 ff.]

Die Abbildung 2.1 zeigt in vereinfachter Form die verschiedenen Netzformen. Das Strahlennetz (siehe Abbildung 2.1a), Ringnetz (siehe Abbildung 2.1b) und Maschennetz (siehe Abbildung 2.1c).

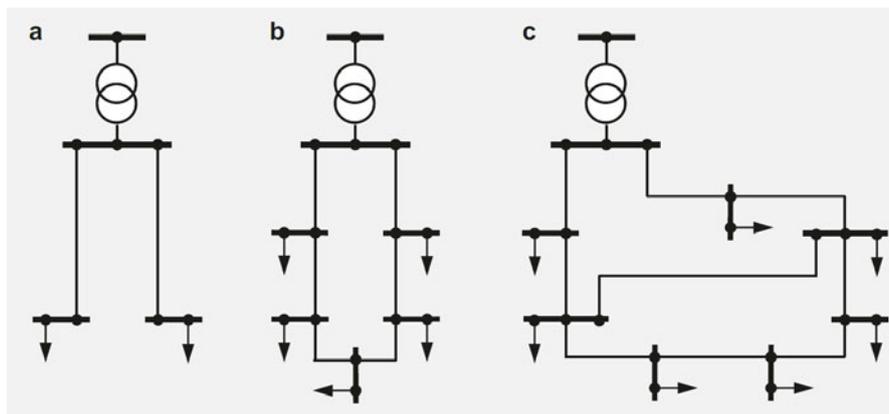


Abbildung 2.1: Netzformen. a.) Strahlennetz, b.) Ringnetz, c.) Maschennetz [18, S.97]

Die Netzformen weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Topologien verschiedene Eigenschaften auf. Diese Eigenschaften werden in den Kapiteln 2.3.1, 2.3.2 und 2.3.3 zu den jeweiligen Netzformen noch näher erläutert.

2.3.1 Strahlennetz

Die Versorgung in einem Strahlennetz läuft strahlenförmig von der Versorgung weg. Hierbei entsteht ein hierarchisch gestaffeltes Niederspannungsnetz, welches eingeteilt wird in Haupt-, Unter- und Kleinverteilungen. Die Verteilungen höherer Ebenen versorgen die Verteilungen kleiner Ebenen und auch größere Verbraucher. Veranschaulicht ist dies in der Abbildung 2.2. [19, S.512 ff.]

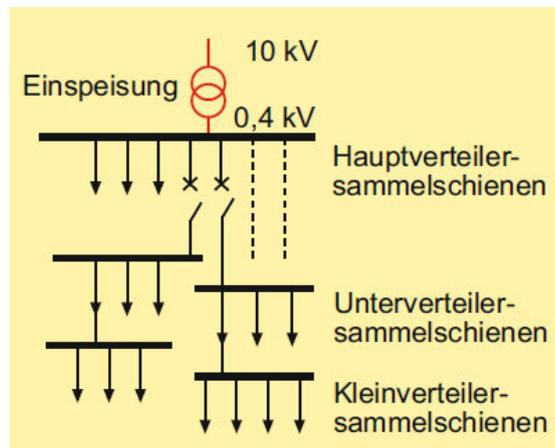


Abbildung 2.2: Strahlennetztopologie hierarchischer gestaffelten Niederspannungsnetzen [19, S.513]

Zu den Vorteilen eines Strahlennetzes gehört die einfache Netzplanung mit geringem Arbeitsaufwand, die geringe Anforderung für den Netzschutz und die gute Übersichtlichkeit im Falle einer Fehlersuche.

Nachteilhaft bei dieser Netzform können zunehmende Abstände zur Einspeisung werden. Sowohl die Spannungsfälle als auch die Leitungsverluste nehmen hierbei zu und dürfen nicht vernachlässigt werden. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Einhaltung der Nullungsbedingungen erschwert werden. [19, S.513]

2.3.2 Ringnetz

Ein Ringnetz besteht aus einer Verbindung von zwei Strahlennetzen. Da hierbei von zwei Seiten aus die Versorgung stattfinden kann, kann in einem einfachen Fehlerfall die Versorgung weiter aufrecht erhalten werden, weil jeder Verbraucher von zwei Seiten aus jeweils eine Verbindung zu einer Einspeisung hat. [19, S.513-514] Der Aufbau von einem Ringnetz ist in der Abbildung 2.1b veranschaulicht.

Die Verbindung zwischen den zwei Strahlen besitzt eine Trennstelle. Kommt es zu einem einfachen Fehler, wird automatisch der betroffene Strang von einem Netzschutz abgeschaltet. Nach dem die Fehlerstelle manuell abgeschaltet wird, kann die Trennstelle der Querverbindung zugeschaltet werden, und der vom Fehler betroffene Strang wird anschließend von dem ungestörten Strahl versorgt. [19, S.513-514]

Vorteilhaft bei dieser Netzform ist die höhere Verfügbarkeit des Netzes. Im Fehlerfall wird der betroffene Abschnitt abgeschaltet und kann somit repariert werden, während die restlichen Abschnitte weiterhin versorgt werden. [19, S.513-514]

Die Nachteile des Ringnetzes sind einmal die kurzzeitige Versorgungsunterbrechung die bei einer Abschaltung in einem Fehlerfall auftritt und der relativ hohe Spannungsfall der auftreten kann, wenn die Anlage sich nicht mehr im Normalbetrieb befindet. [18, S.99]

2.3.3 Maschennetz

Ein Maschennetz ist ein Netz, welches weitere Leitungsverbindungen zwischen den geschlossenen Netzringen hat (siehe Abbildung 2.1 c). Diese Netzform hat eine hohe Versorgungszuverlässigkeit und geringe Spannungsabfälle, weil Knoten und Zweige über verschiedene Verbindungen versorgt werden können. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass diese Netzform einen hohen Aufwand für ein Schutzkonzept benötigt. Zu dem kommt erhöhter Materialaufwand hinzu. Das Maschennetz wird vollständig in der Höchstspannungsebene und teilweise in der Hochspannungsebene verwendet. Lediglich Niederspannungsnetze mit hohen Lastdichten verwenden diese Netzformen ebenfalls. [18, S.101]

2.4 N-1 Kriterium

Um ein Netz sicher betreiben zu können, wird ein N-1 Kriterium vorausgesetzt. Aufgrund von Wartungen und Ausfällen im Netz kann die Zuverlässigkeit eingeschränkt werden. Um dies zu verhindern, ist eine gewisse Redundanz notwendig, das sogenannte N-1 Kriterium. [18, S.59]

Mit dem N-1 Kriterium wird dafür gesorgt, dass bei einem Ausfall die Versorgung weiterhin für die Betriebsmittel gewährleistet bleibt. Bei zwei zur Verfügung stehenden Versorgungssystemen werden beide Systeme nur mit der halben Nennleistung belastet. Ein System übernimmt dann 100 % der Leistung, sobald ein System versagt. Um dies zu gewährleisten, müssen die Systeme dementsprechend ausgelegt werden. [19, S.6]

2.5 Gleichzeitigkeitsfaktor

Das elektrische Netz einer Anlage wird in der Regel nicht nach der Summe aller maximal auftretenden Lasten ausgelegt, weil der Leistungsbedarf geringer als die Summe aller möglichen Lasten im Netz ist. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass alle Verbraucher zum selben Zeitpunkt eingeschaltet sind. Aus diesem Grund spielt der Gleichzeitigkeitsfaktor eine Rolle, bei der Auslegung des Netzes. Dieser Faktor ist ein Planungsfaktor und soll angeben, wie viele Verbraucher tatsächlich gleichzeitig im Betrieb sein werden. [10, S.258-259]

Der Gleichzeitigkeitsfaktor kann über folgende Formel ausgedrückt werden: [3, S.456]

$$g = \frac{P_{max}}{P_{inst}} \quad (2.1)$$

g : Gleichzeitigkeitsfaktor

P_{max} : Leistungsbedarf

P_{inst} : installierte Leistung (Anschlusswert)

2.6 Betriebsarten

Für die korrekte Berechnung und Dimensionierung ist es notwendig, die verschiedenen Betriebsarten zu definieren. Sämtliche Komponenten (Betriebsmittel, Leitungen, Sicherungen, usw.) sind anschließend nach diesen Betriebsarten berechnet und ausgewählt. Dementsprechend ist ein sichereres Betreiben einer Anlage nur gewährleistet, wenn die Bedienung nach diesen Betriebsarten stattfindet. Bei abweichendem Betreiben einer Anlage kann nicht gewährleistet werden, dass die gewählten Komponenten für ein sicheres Betreiben ausreichen. Die Auswirkungen, die bei einer nicht definierten Betriebsart auftreten können, sind folgende:

- Zu hohe Belastung für Leitungen
 - Schutzfunktionen würden auslösen und dementsprechend wird für den jeweiligen Abschnitt die Versorgung unterbrochen.
- Nicht beachtete/berechnete Kurzschlussströme
 - Sicherungen können im Fehlerfall nicht richtig auslösen. Dies ist eine Gefahr für Mensch und Tier sowie auch für die Anlage selbst.
- Unterversorgung der Verteilungen
 - Betriebsmittel werden nicht richtig versorgt und funktionieren nicht richtig oder gar nicht.
- Beeinträchtigung der Selektivität
 - Die nicht überprüfte Selektivität kann dazu führen, dass Sicherungen nicht selektiv auslösen und im Fehlerfall nicht nur die Fehlerstelle abgeschaltet wird, sondern noch mehr abgeschaltet wird.

2.7 Lastflussberechnung

Die sogenannte Lastflussberechnung ist die Berechnung von Leitungen und Netzen im stationären Betrieb. Hierbei werden die Wirk- und Blindleistungsflüsse eines Netzes bestimmt. Aus diesen Berechnungen erfolgen die optimalen Dimensionierungen für die

geringsten Spannungsabfällen im Netz sowie auch die Dimensionierung der Leiterquerschnitte. [19, S.777]

2.8 Kurzschluss

Dieses Kapitel befasst sich mit den Grundlagen und den Berechnungen von Kurzschlüssen.

Unter einem Kurzschluss versteht man eine Verbindung, mit einem niedrigen Widerstand bzw. einer niedrigen Impedanz, von zwei oder mehreren Punkten mit unterschiedlichen Spannungen innerhalb eines Stromkreises. [2, S.77] Diese Verbindungen, auch Fehlerstellen genannt, können aus unterschiedlichen Gründen entstehen. Zum Beispiel durch Umwelteinflüsse, Isolationsschäden, Überlastung von Betriebsmitteln, Verdrahtungsfehlern und Sabotage. Es entsteht ein Lichtbogen und die Verbraucherimpedanz wird kurzgeschlossen. Kurzschlussströme fließen über die Fehlerstelle sowie in den ein- und ausgehenden Leitungen. Die Intensität und das zeitliche Muster dieser Ströme werden durch die Leitungsimpedanzen im Strompfad und die komplexen Innenwiderstände des Generators bestimmt. [19, S.819]

Kurzschlussströme können eine Reihe von Problemen verursachen. Erstens erzeugen sie starke magnetische Kräfte zwischen den Leitern, was zu erheblichen mechanischen Belastungen führt. Zweitens führen sie zu einer übermäßigen Erwärmung der Betriebsmittel, die bei anhaltendem Kurzschluss thermisch zerstört werden könnten. Drittens haben die unmittelbaren thermischen Auswirkungen des Lichtbogens verschiedene Effekte, wie die Entzündung organischer Materialien und das Schmelzen von Metallen. Viertens verursacht der Lichtbogen, durch die explosive Druckerhöhung beim Aufheizen des Lichtbogens, unmittelbare mechanische Auswirkungen. Schließlich erzeugen sie gefährliche Schritt- und Berührungsspannungen und können Nachrichtensysteme elektromagnetisch beeinflussen. [19, S.819]

Aufgrund dieser Probleme ist es wichtig im Voraus bei der Planung einer elektrischen Anlage die wichtigsten Kurzschlussströme zu ermitteln, damit diese Anlage kurzschlussfest ist. [13, S.371]

2.8.1 Kurzschlussarten

Bei einem Kurzschluss wird unterschieden in einem symmetrischen und unsymmetrischen Kurzschluss. Der symmetrische Kurzschluss ist ein dreipoliger Kurzschluss, wobei der unsymmetrische Kurzschluss mehrere Fälle berücksichtigt. Dazu gehören einpolige- und zweipolige Kurzschlüsse, einpolige- und zweipolige Erdkurzschlüsse, Doppelerdschlüsse und Erdschlüsse mit Leitungsunterbrechungen. Doppelerdschlüsse und Erdschlüsse mit Leitungsunterbrechungen sind sogenannte Mehrfachfehler und die anderen Kurzschlüsse sind sogenannte Einfachfehler. [18, S.348-353]

Die Abbildung 2.3 zeigt die wesentlichen Kurzschlussarten, welche auch in der Norm DIN EN 60909-0 behandelt werden.

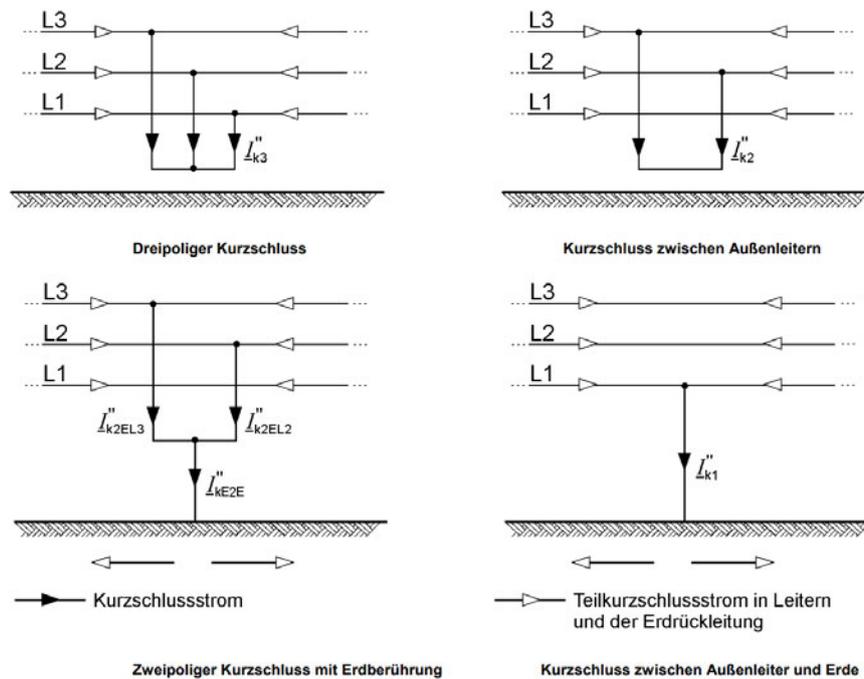


Abbildung 2.3: Verschiedene Kurzschlussarten und deren Ströme [6, S. 19]

Symmetrischer Kurzschluss

Ein symmetrischer Kurzschluss entsteht, wenn alle drei Phasen eines Netzes an einer Fehlerstelle eine Verbindung aufweisen (siehe Abbildung 2.4).

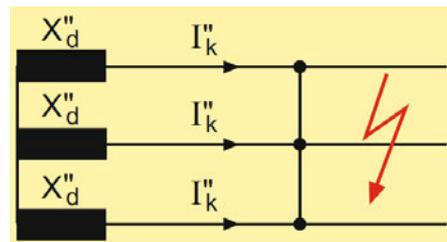


Abbildung 2.4: Symmetrischer, dreipoliger Kurzschluss [19, S.825]

Da bei diesem Kurzschlussfall davon ausgegangen wird, dass alle drei Phasen gleich belastet werden, kann das dreiphasige System als ein einphasiges System dargestellt werden. Allerdings nur unter der Berücksichtigung, dass die Betriebsmittel symmetrisch aufgebaut sind und die Einspeisung symmetrisch erfolgt. [18, S.355]

Unsymmetrischer Kurzschluss

Bei einem Kurzschluss, bei dem nicht alle drei Phasen gleich belastet werden, handelt es sich um einen unsymmetrischen Kurzschluss. Aufgrund der Unsymmetrie in der Belastung der einzelnen Leitungen, kann für diesen Kurzschlussfall nicht das einphasige Modell als Vereinfachung genutzt werden.

Für die Berechnung wird die Methode der symmetrischen Komponenten genutzt. Hierbei werden die Zeiger eines unsymmetrischen Systems, welches sich im stationären Zustand befindet, in drei unterschiedliche Systeme zerlegt. Daraus resultiert ein Drehstromsystem mit normaler Phasenfolge (Mitsystem), Drehstromsystem mit entgegengesetzter Phasenfolge (Gegensystem) und ein System, in dem die Ströme den gleichen Betrag und Phasenlage haben (Nullsystem). [10, S.534] Dargestellt wird diese Zerlegung in der Abbildung 2.5.

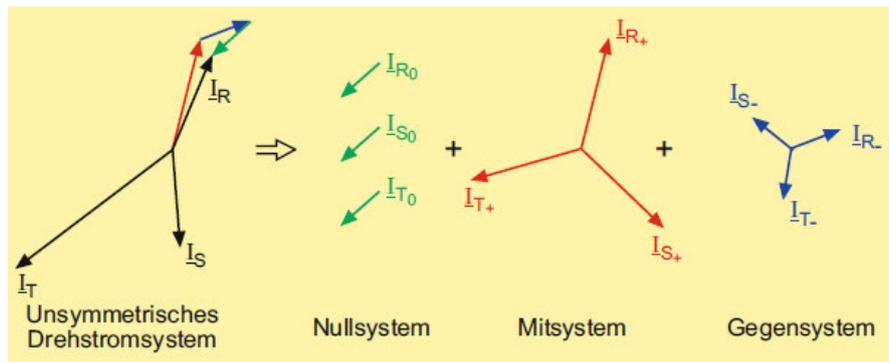


Abbildung 2.5: Auftrennung des unsymmetrischen Drehstromsystems in Mit-, Gegen- und Nullsystem [19, S.845]

2.8.2 Vorgehensweise bei der Kurzschlussstromberechnung

Die Besonderheit bei einem Kurzschluss ist, dass der Verlauf von einem Kurzschlussstrom eine nichtlineare, zeitvariable Form hat. Diese Form ist dargestellt in der Abbildung 2.6.

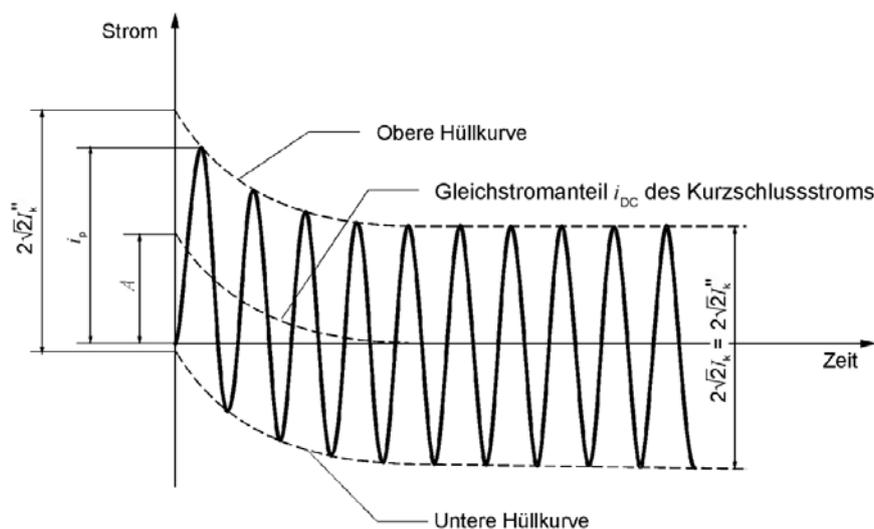


Abbildung 2.6: Zeitlicher Verlauf eines generatorfernen Kurzschlussstromes [6, S.18]

- I_K'' : Anfangs-Kurzschlusswechselstrom,
- i_p : Stoßkurzschlussstrom,
- I_k : Dauerkurzschlussstrom,
- i_{DC} : Gleichstromanteil des Kurzschlussstroms,
- A : Anfangswert des Gleichstromanteils i_{DC}

Da es sich hierbei um transiente, nichtsinusförmige Vorgänge handelt, können diese nur durch Zeitfunktionen $i_k(t)$ mathematisch beschrieben werden. Diese Zeitfunktionen setzen voraus, dass diese erst durch das Aufstellen eines Differentialgleichungssystem gelöst werden können. Für die Elektrotechnik spielt hierbei die VDE Norm eine wichtige Rolle. In der Norm „DIN EN 60909-0 VDE 0102:2016-12 Kurzschlussströme in Drehstromnetzen“ ist festgelegt, dass zunächst der sogenannte Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I_k'' berechnet wird und daraus die weiteren relevanten Größen ermittelt werden. Der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom ist als Effektivwert einer harmonisch Wechselstromkomponente definiert, die zum Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts im erwarteten Kurzschlussstrom auftritt. [19, S.821-822]

In dieser Norm wird ebenfalls festgehalten, dass die Berechnungen für die größten und kleinsten Kurzschlussströme folgende Vereinfachungen annehmen: [6, S.19]

- Für die Dauer des Kurzschlusses tritt keine Änderung in der Art des Kurzschlusses ein, d. h. ein dreipoliger Kurzschluss bleibt dreipolig und ein einpoliger Erdkurzschluss bleibt einpolig während der Kurzschlussdauer.
- Während der Kurzschlussdauer tritt keine Änderung im betroffenen Netz ein.
- Die Impedanz der Transformatoren bezieht sich auf die Stellung des Stufenschalters auf der Hauptanzapfung.
- Lichtbogenwiderstände werden nicht berücksichtigt.
- Queradmittanzen und nichtmotorische Lasten sollen im Mit-, Gegen- und Nullsystem vernachlässigt werden.
- Leitungskapazitäten sollen im Mit- und Gegensystem vernachlässigt werden. Leitungskapazitäten im Nullsystem sollen in den Netzen mit niederohmiger Sternpunktterdung berücksichtigt werden, die einen Erdfehlerfaktor (siehe IEC 60027-1) größer als 1,4 haben.
- Magnetisierungsadmittanzen von Transformatoren sollen im Mit- und Gegensystem vernachlässigt werden.

Um den Anfangskurzschlusswechselstrom richtig zu bestimmen, müssen vorher bestimmte Unterscheidungen getroffen werden. Allgemein werden Kurzschlüsse als generatornah bzw. generatorfern unterschieden. Hinzu kommt noch die Unterscheidung, ob es sich um

einen einfach gespeisten Kurzschluss, mehrfach gespeisten Kurzschluss oder mehrseitig einfach gespeisten Kurzschluss handelt. [6, S.36]

Da bei der Ausarbeitung dieser Bachelorarbeit der generatorferne und einfach gespeiste Kurzschluss eine relevante Rolle spielen, werden nur diese näher erläutert und beschrieben.

2.9 Selektivität

«Unter „Selektivität“ versteht man die Eigenschaft eines Schutzes, nach Möglichkeit nur die vom Fehler betroffenen Betriebsmittel abzuschalten.» [15, S.471]

Eine weitere Anforderung an die Schutztechnik ist es, selektiv auszulösen. Wie schon im Zitat erwähnt, soll nur jene Sicherung auslösen, die möglichst nah an der Fehlerquelle liegt. Mithilfe von in Reihe geschalteten Schutzorganen, deren Auslöseverhalten angepasst sind, wird eine Selektivität gewährleistet. Dieser Prozess ist auch bekannt als Schutzkoordination. [19, S.635]

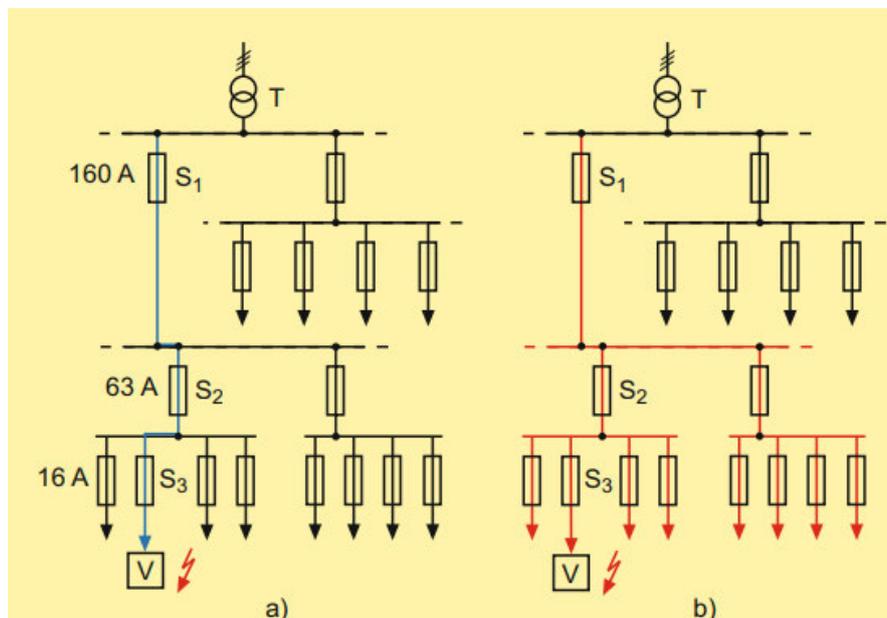


Abbildung 2.7: Darstellung des Konzepts der Selektivität mit einem Kurzschluss am Verbraucher V a.) Weg des Kurzschlussstroms (blau) b.) Verbraucherstromkreise, die vom Kurzschluss betroffen sind [19, S.635]

In der Abbildung 2.7 wird dargestellt, wie der Weg eines Kurzschlussstromes zwischen einer Einspeisung und einem Verbraucher ist. Ebenso werden die betroffenen Verbraucherstromkreise dargestellt.

Der Kurzschlussstrom in Abbildung 2.7a bewegt sich zwischen der Einspeisung T und dem Verbraucher V. Dieser Stromweg beinhaltet eine Reihe von Sicherungen mit unterschiedlichen Nennbetriebsströmen. Durch die Staffelung 160A/63A/16A ist dafür gesorgt, dass die Sicherung S3 als erstes ansprechen wird und somit der Kurzschlussstrom unterbrochen wird. Die vom Fehler betroffenen Betriebsmittel sind in diesem Fall abgeschaltet und die restlichen Betriebsmittel werden weiterhin versorgt. Würde dieses selektive Verhalten nicht vorhanden sein, könnten ziemlich viele Verbraucherstromkreise von diesem Kurzschluss betroffen sein. Wenn anstelle der Sicherung S3 die Sicherung S1 auslösen würde, zeigt Abbildung 2.7b, dass der gesamte linke Zweig abgeschaltet wäre. [19, S.635-636]

Eine Staffelung des Auslösestroms der Sicherungen reicht allerdings nicht immer aus, um ein selektives Verhalten aufzuweisen. Bei Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (Residual Current Device) (RCD), die in Reihe geschaltet sind, reicht es nicht aus, die Schalter nur nach dem Nennstrom und Bemessungsdifferenzstrom zu Staffeln. Hier ist dann eine Staffelung nach der Zeit notwendig. Selektive RCDs haben eine Zeitverzögerung und sind nach DIN EN 61008-1 (VDE 0664-10) genormt. [13, S.89]

Die aus der Norm DIN VDE 0100-530 entnommen Abbildung 2.8 zeigt, dass vorge-schaltete RCDs mit einem zusätzlichen Symbol gekennzeichnet werden. Das Symbol  kennzeichnet die zeitliche Selektivität.

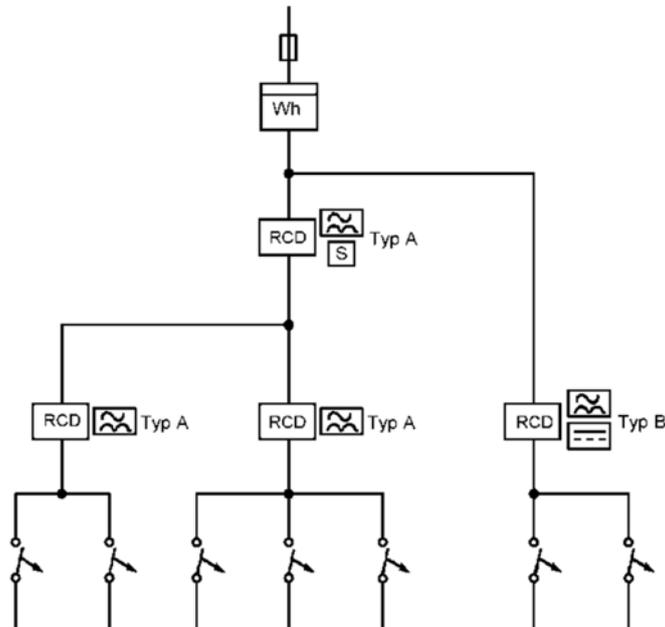


Abbildung 2.8: Beispiel für Selektivität von Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (Residual Current Device) (RCD) [7, S. 56]

2.10 Leitungsdimensionierung

Die Auswahl der Querschnitte von Leitungen ist von deren Belastungen abhängig. Die Belastbarkeit einer Leitung darf nicht durch die Belastung überschritten werden. Für die richtige Auswahl werden zwei Bedingungen betrachtet: [11, S. 93-96]

- Belastung im ungestörten Betrieb
- Belastung im Kurzschlussfall

Bei dem Vorgehen der Dimensionierung der Querschnitte im ungestörten Betrieb sind folgende Schritte zu behandeln: [11, S. 93-96]

- Betriebsbedingung auswählen
- Bei vereinbarten Betriebsbedingungen die Belastbarkeit festlegen
- Abweichende Betriebsbedingungen und Umrechnungsfaktoren festlegen
- die tatsächliche Belastbarkeit berechnen

Die Schritte für das Vorgehen zu der Ermittlung von der Kurzschlussbelastbarkeit sind folgende: [11, S. 93-96]

- Bestimmung der Leitertemperatur zum Auftreten eines Kurzschlusses
- Für eine Bemessungs-Kurzschlussdauer von 1 s den Bemessungs-Kurzzeitstrom berechnen
- Berechnung der Kurzschlussbelastbarkeit

Für die Ermittlung der Belastbarkeiten findet die Norm DIN VDE 0298-4 ihre Anwendung. In dieser Norm kann mithilfe von Tabellen die Belastbarkeit der Leitungen im ungestörten Betrieb und Kurzschlussfall ermittelt werden. [11, S. 93-96]

2.11 Norm für Einrichtungen für Sicherheitszwecke

Die DIN VDE 0100-560:2013-10 „Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-56: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Einrichtungen für Sicherheitszwecke“ befasst sich mit Einrichtungen für Sicherheitszwecke. In dieser Norm ist festgehalten, wie die allgemeinen Anforderungen für elektrische Anlagen mit Einrichtungen für Sicherheitszwecke zu sein haben. Hierzu gehören ebenfalls die Anforderungen von Stromquellen für Sicherheitszwecke. [4]

Die Norm legt fest, dass Anlagenteile, die für Sicherheitszwecke konzipiert sind, so beschaffen sein müssen, dass ihre Funktionen auch bei einem Ausfall der Hauptversorgung aufrechterhalten bleiben. Um dies umzusetzen sind besondere Stromquellen, Stromkreise, Betriebsmittel, Leitungen und Leitungsverlegungen erforderlich. [4]

Da der St. Pauli Elbtunnel nur die Anforderungen für eine Stromquelle für Sicherheitszwecke nicht erfüllt, werden die anderen Anforderungen hier nicht weiter beschrieben.

2.11.1 Stromquellen für Sicherheitszwecke

Eine Stromquelle für Sicherheitszwecke ist eine Stromquelle, die den jeweiligen Bereich einer elektrischen Anlage versorgt, welcher für Sicherheitszwecke bestimmt ist.

Für die Stromquellen für Sicherheitszwecke sind folgende Stromquellen zulässig:

- nicht wiederaufladbare und wiederaufladbare Batterien (Primär- und Sekundärelemente)
- von der Allgemeinen Stromversorgung unabhängige Generatoren
- unabhängige und separate Einspeisungen aus dem Versorgungsnetz

Alle Stromquellen haben die Anforderungen, dass diese über ausreichende Leistungsfähigkeiten zur Versorgung der jeweiligen Einrichtungen für Sicherheitszwecke bereitstellen. Unabhängige und separate Einspeisungen aus dem Versorgungsnetz dürfen nur verwendet werden, wenn eine Zusicherung vorliegt, dass ein gleichzeitiger Ausfall dieser Einspeisungen kaum zu erwarten ist. [4, S. 12-13]

3 Analyse des aktuellen Zustandes

Dieses Kapitel befasst sich mit dem aktuellen Zustand am St. Pauli Elbtunnel. Es wird analysiert, wie das Netz aufgebaut ist und welche Komponenten verbaut sind.

3.1 Anlagenübersicht

Die Anlagenübersicht wird in der Abbildung 3.1 dargestellt. Diese Abbildung zeigt, wo sich die wesentlichen Komponenten aktuell befinden.

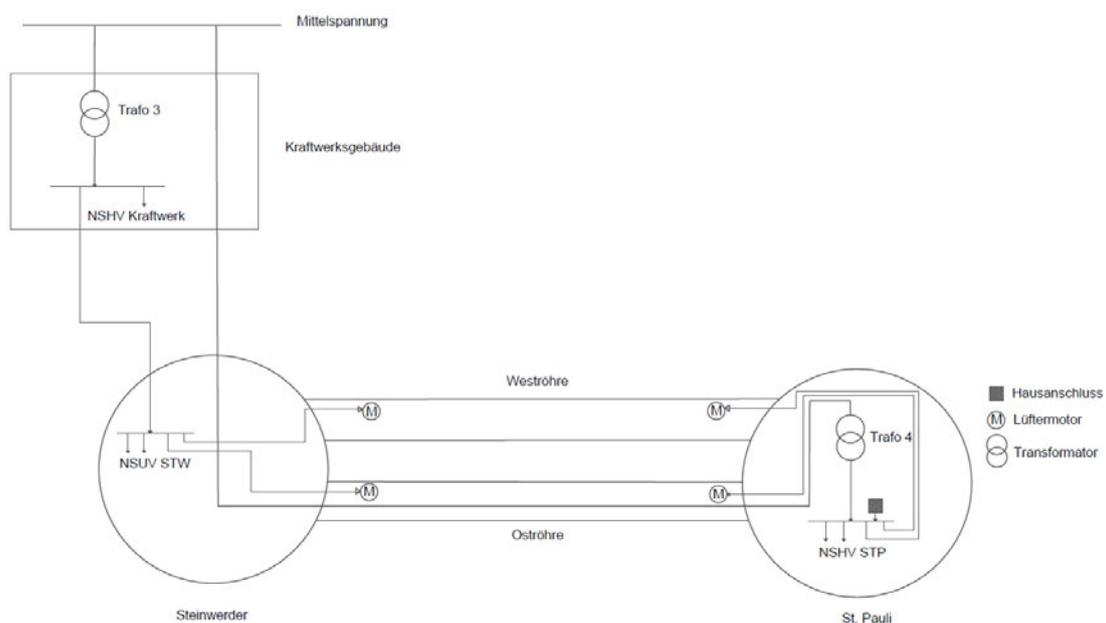


Abbildung 3.1: St.Pauli-Elbtunnel Anlagenübersicht

Wie im Kapitel 1 schon erwähnt, befindet sich im Kraftwerksgebäude der Transformator „Trafo 3“ und die Niederspannungshauptverteilung (NSHV) Kraftwerk. Die Primärseite

des Transformators „Trafo 3“ ist an der Mittelspannung von SNH angeschlossen. Ein weiterer Abgang von der Mittelspannung ist für den Transformator „Trafo 4“. Dieser Abgang geht mit einer Mittelspannungsleitung durch das Kraftwerksgebäude zum Schachtgebäude Steinwerder. Von dort aus geht die Mittelspannungsleitung durch die Oströhre zum Schachtgebäude St. Pauli, wo sich anschließend der Transformator „Trafo 4“ befindet. Ebenfalls im Schachtgebäude St. Pauli befindet sich die NSHV St. Pauli (STP). Die Niederspannungsunterverteilung (NSUV) Steinwerder (STW) befindet sich im Schachtgebäude Steinwerder und wird von der NSHV Kraftwerk versorgt. Die Motoren für die Lüfter der Entrauchungsanlage befinden sich jeweils am Anfang der Tunnelröhren. Diese Motoren sind auf Steinwerder an der NSUV STW und auf St. Pauli an der NSHV STP angeschlossen. Der Hausanschluss ist im Schachtgebäude St. Pauli. Dieser Hausanschluss ist nicht elektrisch an der NSHV STP angeschlossen, kann aber jederzeit durch handwerkliche Tätigkeiten angeschlossen werden. Aus diesem Grund hat der Hausanschluss in der Anlagenübersicht eine Verbindung zur NSHV STP.

3.2 Aufbau des Netzes

Das aktuelle Netz ist aufgebaut wie in der Abbildung 3.2.

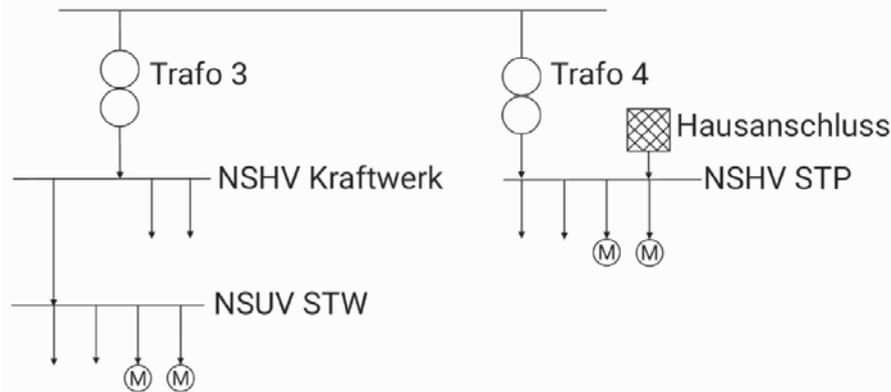


Abbildung 3.2: St. Pauli-Elbtunnel Netztopologie.

Trafo 3: Transformator Steinwerder

NSHV Kraftwerk: Niederspannungshauptverteilung Kraftwerksgebäude

NSUV STW: Niederspannungsunterverteilung Steinwerder

Trafo 4: Transformator St. Pauli

Hausanschluss (HA): Niederspannungsanschluss

NSHV STP: Niederspannungshauptverteilung St. Pauli

Ⓜ: Motor für Lüfter der Entrauchungsanlage

Die Versorgung beginnt von dem Einspeisepunkt des örtlichen Netzbetreibers SNH. Von dort aus besteht eine elektrische Verbindung zu den Transformatoren „Trafo 3“ und „Trafo 4“. Der Transformator „Trafo 3“ versorgt das Kraftwerksgebäude und das Schachtgebäude Steinwerder. Der Transformator „Trafo 4“ versorgt das Schachtgebäude St. Pauli.

Auf der Sekundärseite des Transformators „Trafo 3“ ist direkt die NSHV Kraftwerk elektrisch verbunden. Von dort aus wird das gesamte Kraftwerksgebäude versorgt. Zu dem Kraftwerksgebäude gehört die Werkstatt und die Büros innerhalb des Kraftwerksgebäude. Von der NSHV Kraftwerk geht ein Abgang zum Schachtgebäude Steinwerder. In diesem Schachtgebäude wird über den Abgang an der NSHV Kraftwerk die NSUV STW versorgt.

Der Transformator „Trafo 4“, welcher sich örtlich im Schachtgebäude St. Pauli befindet, ist auf der Sekundärseite elektrisch mit der NSHV STP verbunden und versorgt diese. Der Hausanschluss, welcher sich ebenfalls örtlich im Schachtgebäude St. Pauli befindet, kann

ebenfalls direkt mit der NSHV STP verbunden werden. Hier ist erneut zu erwähnen, dass dieser Hausanschluss im Normalfall nicht elektrisch an der NSHV STP angeschlossen ist. Nur wenn handwerkliche Tätigkeiten erfolgen, kann dieser Hausanschluss an der NSHV STP elektrisch angeschlossen werden, und diese auch versorgen.

Es sind vier Motoren für die Lüfter der Entrauchungsanlage vorhanden. Zwei sind jeweils an der NSUV STW und NSHV STP angeschlossen.

3.2.1 Netzform

Wie in der Abbildung 3.2 zu erkennen ist, ist das Netz auf der Niederspannungsebene strahlenförmig aufgebaut. An beiden Transformatoren geht jeweils ein Strahl ab und diese sind nicht elektrisch miteinander verbunden.

3.2.2 Aufbau der Verteilungen

An der NSHV Kraftwerk befinden sich Abgänge für folgende Verbraucher:

- Werkstatt
- Bürogebäude
- Küche
- Badezimmer
- Ladesäulen
- Außenbeleuchtung
- Abgang zur NSUV STW

Die Verteilungen NSUV STW und NSHV STP sind identisch aufgebaut. Beide Verteilungen haben Abgänge für die folgenden Verbraucher:

- Fahrkorbsteuerung der Lastenaufzüge
- Personenaufzüge
- Beleuchtung

- Sicherheitsbeleuchtungsanlage (Notstromversorgt über eigene USV)
- Brandmeldeanlage (Notstromversorgt über eigene USV)
- Lautsprecher für Tunneldurchsagen
- Entrauchungsanlage
- Hallenkran
- diverse Steckdosenstromkreise
- Zentrale Leittechnik
- Schmutzwasserpumpen im Tunnel

3.3 Ermittlung der verbauten Komponenten

3.3.1 Leitungen

Aus den Schaltplänen wurden die Längen der Leitungen entnommen. Bei den verbauten Leitungen, welche nicht mehr dokumentiert waren, wurde die Länge nachgemessen. Da hierbei nicht zu 100 % genau gemessen werden kann, wurde bei den Nachmessungen ca. 10 % der Leitungslänge als Sicherheit zugegeben. Sämtliche Querschnitte und Aderanzahlen wurden aus den Schaltplänen entnommen. In der Tabelle 3.1 sind die jeweiligen Kenngrößen aufgelistet.

Tabelle 3.1: Kenngrößen der verbauten Leitungen im St. Pauli Elbtunnel

Bezeichnung	Anzahl paralleler Leitungssysteme	Querschnitt	Leitungsbelegung	Länge
Verbindungsleitung Trafo 3 & NSHV Kraftwerk	2	185 mm ²	2x(L1-L2-L3)-PEN	10 m
Verbindungsleitung NSHV Kraftwerk & NSUV STW	1	95 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	90 m
Verbindungsleitung Trafo 4 & NSHV STP	2	185 mm ²	2x(L1-L2-L3)-PEN	15 m
Anschluss HA	1	185 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m

3.3.2 Erfassung der Gesamtströme

Die Ströme an den jeweiligen Verteilungen wurden mit einem Messgerät gemessen. Dabei wurde nicht jeder einzelne Abgang gemessen, sondern die Gesamtströme einer Unterverteilung. Um eine aussagekräftige Messung zu gewährleisten, wurden sämtliche Verbraucher hinzugeschaltet und ein Szenario erstellt, in welchem der St. Pauli Elbtunnel den höchsten Verbrauch hat. Anschließend wurden ca. 20 % als Sicherheitszuschlag drauf gerechnet. Aus diesen Messungen resultieren die Ströme, welche in der Tabelle 3.2 angegeben sind. Die Angaben von dem Lüftermotor beziehen sich auf einen einzelnen Motor. Verbaut sind vier Lüftermotoren mit jeweils einem dazugehörigen Frequenzumrichter.

Tabelle 3.2: Kenngrößen der Gesamtströme im St. Pauli Elbtunnel

Bezeichnung	Spannung	Strom	$\cos \varphi$	Leistung
NSHV Kraftwerk	400 V	30 A	-	20,78 kVA
NSUV STW	400 V	60 A	-	41,57 kVA
NSHV STP	400 V	60 A	-	41,57 kVA
Lüftermotor	400 V	35,166 A	0,86	24,36 kVA
Frequenzumrichter Lüfter	380 – 400 V	37,53 A	-	26 kVA

3.3.3 Transformatoren

Bei den Transformatoren Trafo 3 und Trafo 4 gilt es zu erwähnen, dass keine Datenblätter vorhanden sind. Es war außerdem nicht möglich, innerhalb der Bearbeitungszeit dieser Bachelorarbeit, die Typenschilder der Transformatoren abzulesen. Dies liegt daran, dass der St. Pauli Elbtunnel permanent im Betrieb ist. Dadurch können die Transformatoren nicht abgeschaltet werden und die Transformatorenräume können aus Sicherheitsgründen nicht betreten werden.

Die Kenngrößen der Transformatoren wurden aus Schaltplänen entnommen, in denen einige Kenngrößen der Transformatoren angegeben sind. Diese Kenngrößen sind in der Tabelle 3.3 angegeben.

Benötigte Kenngrößen, welche nicht angegeben sind, wurden in dieser Bachelorarbeit mit Kenngrößen vergleichbarer Transformatoren angegeben. Dies hat zur Folge, dass die Ergebnisse der später folgenden Netzberechnungen mögliche Abweichungen haben könnte. Für eine korrekte Berechnung ist es erforderlich, dass die Kenngrößen der Transformatoren ermittelt werden und die Berechnungen angepasst werden.

Tabelle 3.3: Kenngrößen der Transformatoren im St. Pauli Elbtunnel

	Trafo 3 (Steinwerder)	Trafo 4 (St. Pauli)
Primärspannung	10 kV	10 kV
Sekundärspannung	0,4 kV	400/231 V
Bemessungsleistung	315 kVA	250 kVA
Bem.-kurzschlussspannung	4 %	4 %
Schaltgruppe	Dyn5	Dyn5

3.3.4 Niederspannungsanschluss

Der Niederspannungsanschluss hat folgende Kenngrößen:

Tabelle 3.4: Kenngröße des Niederspannungsanschlusses

Nennstrom	Scheinleistung	Spannungsebene
200 A	138 kVA	230/400 V

3.3.5 Mitellspannungsanschluss

Die Mittelspannungseinspeisung erfolgt über zwei Transformatoren von der „Stromnetz Hamburg GmbH“. Die Kenngrößen am Mittelspannungsanschluss der Transformatoren sind in der Tabelle 3.5 angegeben.

Tabelle 3.5: Kenngrößen der Mittelspannungsanschlüsse [21]

	Trafo 10517	Trafo 10518
$S_{k,max,3p''}$	202,302 MVA	201,165 MVA
Winkel	$-82,3^\circ$	$-82,4^\circ$
$S_{k,min,3p''}$	180,779 MVA	179,791 MVA
Winkel	$-79,6^\circ$	$-79,7^\circ$
$I_{k,max,3p''}$	11,68 kA	11,617 kA
$I_{k,min,3p''}$	10,437 kA	10,380 kA
$R_X(I_{k,max})$	0,03/0,539	0,072/0,542
$R_X(I_{k,min})$	0,1/0,544	0,099/0,547
$I_{k,max,1p''}$	0,126 kA	0,126 kA
Winkel	$89,8^\circ$	$89,8^\circ$
$I_{k,min,1p''}$	0,115 kA	0,115 kA
Winkel	$89,7^\circ$	$89,7^\circ$

3.4 Versorgung

Die Versorgung im St. Pauli Elbtunnel kommt ausschließlich von einer Allgmeinstromversorgung.

Im Normalbetrieb versorgt die Allgmeinstromversorgung den kompletten St. Pauli Elbtunnel und das Kraftwerksgebäude. Die Versorgung wird in er Abbildung 3.3 gezeigt. In grün dargestellt sind die Bereiche, die im Betrieb sind. Die rot dargestellten Bereiche zeigen an, was sich nicht im Betrieb befindet.

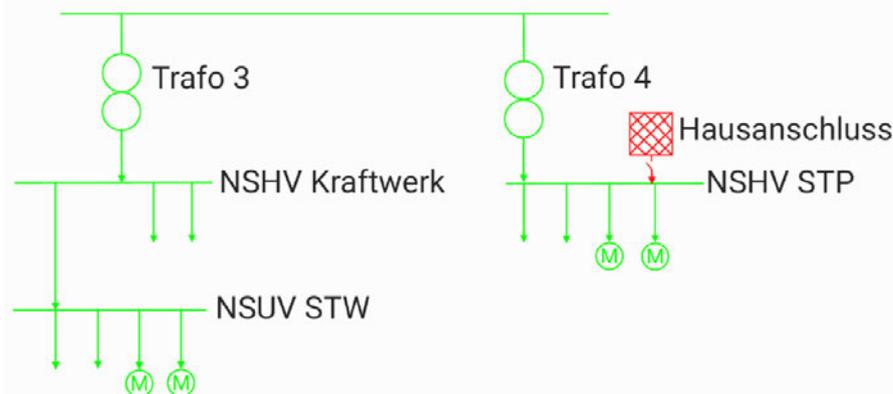


Abbildung 3.3: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie bei Normalbetrieb. Grün: im Betrieb, Rot: nicht im Betrieb

Jeder Transformator verfügt über genug Leistung, um die jeweilige Seite zu versorgen. Sie verfügen aber nicht über genug Leistung, dass der komplette St. Pauli Elbtunnel von nur einem Transformator versorgt werden kann.

Eine Sicherheitsstromversorgung für die Lüfter der Entrauchungsanlage liegt nicht vor. Die Lüfter werden auf der Steinwerder Seite ausschließlich von der Allgmeinstromversorgung und auf der St. Pauli Seite im Notfall von der Niederspannungsversorgung versorgt. Wie schon erwähnt, ist der Hausanschluss nicht elektrisch angeschlossen und somit ist für eine Niederspannungsversorgung keine automatische Umschaltung vorhanden. Damit die Versorgung von dem Hausanschluss übernommen werden kann, müssen handwerkliche Arbeiten getätigt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Umverdrahtung bis zu drei Stunden in Anspruch nehmen kann. Durch diese Tätigkeiten wird das Schachtgebäude St. Pauli nicht mehr versorgt. Daraus folgt, dass der St. Pauli Elbtunnel für die Öffentlichkeit gesperrt werden muss.

Kommt es zu einer Unterbrechung in der Allgmeinstromversorgung, treten mehrere Probleme auf. In den folgenden Abschnitten werden die Folgen einer Unterbrechung erläutert.

3.4.1 Unterbrechung der Versorgung auf der Steinwerder Seite

Die Abbildung 3.4 zeigt farblich, welche Bereiche am St. Pauli Elbtunnel bei einer Unterbrechung der Versorgung des Transformators Trafo 3 noch versorgt werden.

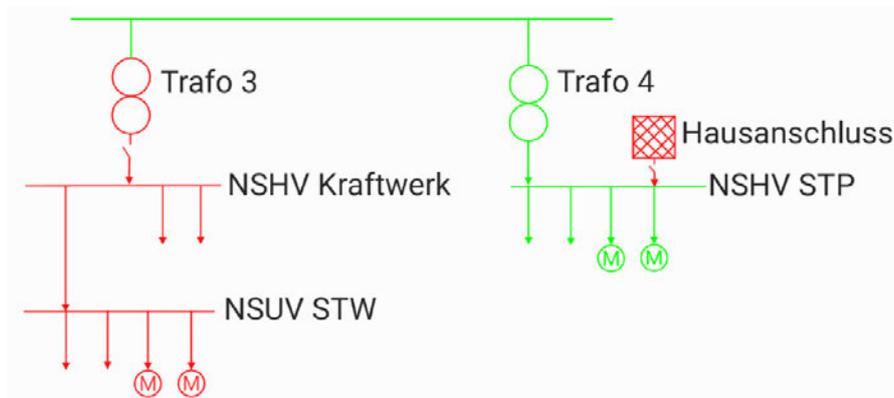


Abbildung 3.4: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie bei einem Ausfall der Versorgung auf der Steinwerder Seite. Grün: im Betrieb, Rot: nicht im Betrieb

Die in rot dargestellten Bereiche werden nicht mehr versorgt. Darunter fällt das Kraftwerksgebäude mit der NSHV Kraftwerk sowie auch das Schachtgebäude Steinwerder mit der NSUV STW. Lediglich das Schachtgebäude St. Pauli, mit der NSHV STP, wird weiterhin von dem Transformator Trafo 4 versorgt.

Das Kraftwerksgebäude hat keinen Einfluss darauf, dass der St. Pauli Elbtunnel gesperrt werden müsste. Lediglich die Mitarbeiter des St. Pauli Elbtunnels können die Örtlichkeiten des Kraftwerksgebäude nicht mehr nutzen.

Die Auswirkungen der Versorgungsunterbrechung sind am Schachtgebäude Steinwerder gravierender. Da sich an der NSUV STW Verbraucher befinden, die für das Betreiben des St. Pauli Elbtunnels notwendig sind (siehe Kapitel 3.2.2), hat diese Versorgungsunterbrechung die Folge, dass es zu einer Sperrung für den öffentlichen Bereich kommen muss. Sämtliche Anlagen für sicherheitsrelevante Zwecke werden von einer Unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) nur solange versorgt, wie es in der Norm vorgeschrieben ist. Dies

ist ausreichend, um eine Evakuierung durchzuführen, aber nicht ausreichend um den St. Pauli Elbtunnel weiterhin betreiben zu können.

Aufgrund der nicht vorhandenen Sicherheitsstromversorgung für die Lüfter der Entrauchungsanlage werden die Lüfter auf der Steinwerder Seite bei dieser Versorgungsunterbrechung nicht mehr versorgt.

3.4.2 Unterbrechung der Versorgung auf der St. Pauli Seite

Eine Unterbrechung der Versorgung über den Transformator Trafo 4, auf der St. Pauli Seite, hat im aktuellen Zustand keine gravierenden Auswirkungen für den Betrieb. Wie in der Abbildung 3.5 erkennbar ist, werden beide NSHVs und die NSUV STW weiterhin versorgt. Die Versorgung der NSHV STP erfolgt über den Hausanschluss.

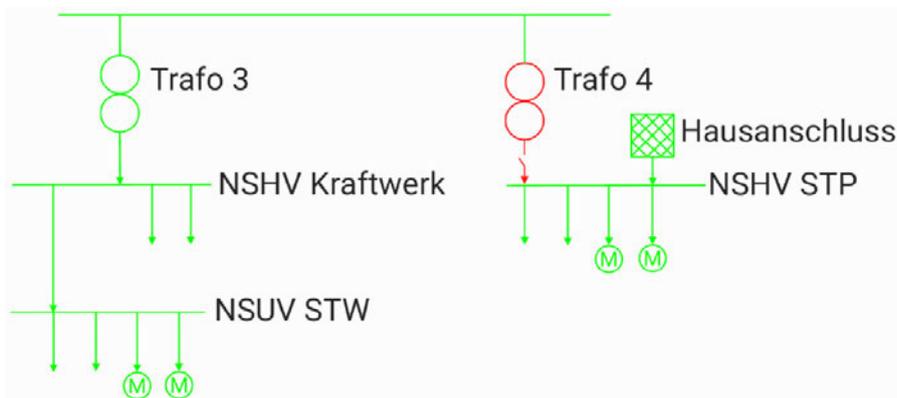


Abbildung 3.5: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie bei einem Ausfall der Versorgung auf der St. Pauli Seite. Grün: im Betrieb, Rot: nicht im Betrieb

Es ist jedoch wiederholt zu erwähnen, dass keine automatische Umschaltung zwischen der Hausanschlussversorgung und der Transformatorversorgung existiert.

Sobald im Schachtgebäude St. Pauli die Versorgung von dem Hausanschluss übernommen wird, werden alle relevanten Verbraucher, die für das Betreiben des St. Pauli Elbtunnels notwendig sind, versorgt.

Dennoch besitzen die Lüfter der Entrauchungsanlage keine normgerechte Sicherheitsstromversorgung.

3.4.3 Unterbrechung der Mittelspannungsversorgung

Wenn die Mittelspannungsversorgung nicht mehr vorhanden ist, tritt ein identischer Fall wie in Kapitel 3.4.1 auf. Wie in der Abbildung 3.6 erkennbar ist, wird lediglich nur noch die NSHV STP versorgt.

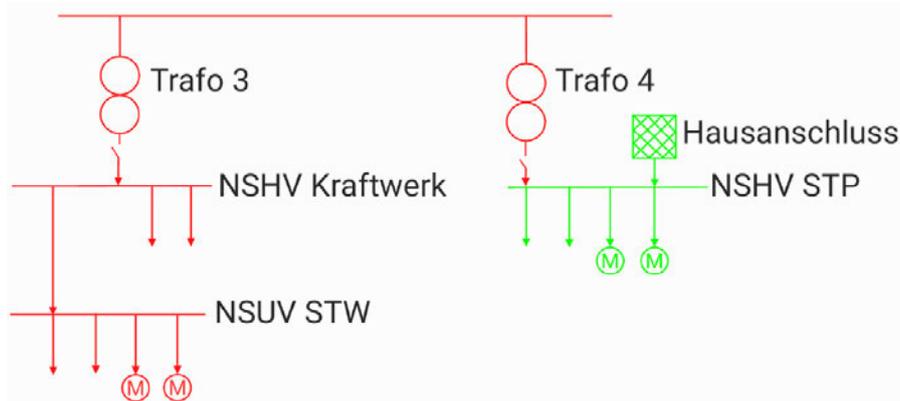


Abbildung 3.6: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie bei einem Ausfall der Mittelspannungsversorgung. Grün: im Betrieb, Rot: nicht im Betrieb

Da es sich um einen identischen Fall wie in Kapitel 3.4.1 handelt, sind die Probleme auch dieselben. Aufgrund des Versorgungsausfalles auf der Steinwerder Seite, muss der St. Pauli Elbtunnel für den öffentlichen Bereich ebenfalls geschlossen werden.

Es stellt sich nur die Frage, ob eine Notwendigkeit besteht, dass der Hausanschluss im Schachtgebäude St. Pauli für die Versorgung der NSHV STP benötigt wird. Dies wäre nur sinnvoll, wenn es für innerbetriebliche Zwecke verlangt wird, weil es sowieso zu einer Sperrung für den öffentlichen Bereich kommt. Die Abwägung des Verdrahtungsaufwands ist von entscheidender Bedeutung.

3.5 Auswertung des aktuellen Zustandes

Der aktuelle Aufbau des Netzes am St. Pauli Elbtunnel zeigt, dass eine redundante Versorgung nicht vorhanden ist. Je nach Fehlerfall der Versorgung muss der St. Pauli Elbtunnel für die Öffentlichkeit gesperrt werden. Somit kann eine hohe Verfügbarkeit nicht gewährleistet werden. Selbst bei einfachen Unterbrechungen, wie zum Beispiel einer Transformatorwartung, kann die Versorgung nicht aufrecht erhalten werden.

Da die Lüfter der Entrauchungsanlage nur über die Allgemeinstromversorgung versorgt werden, ist eine Sicherheitsstromversorgung gemäß DIN VDE 0100-560:2013-10 nicht vorhanden. Dies sorgt für eine große Gefahr, wenn es zu Problemen der Allgemeinstromversorgung kommt. Ebenfalls erfüllen die vorhandenen Zuleitungen der Lüfter nicht die Ansprüche gemäß DIN VDE 0100-560:2013-10.

Für die Einhaltung einer normgerechten Sicherheitsstromversorgung und die Erhöhung der Verfügbarkeit müssen Maßnahmen getroffen werden. Es sind neue Leitungen sowie auch Verbindungen der Verteilungen notwendig. Der Hausanschluss muss als eine Sicherheitsstromquelle verwendet werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Lüfter auch bei einem Ausfall der Allgemeinstromversorgung weiterhin versorgt werden können, um die Sicherheit im St. Pauli Elbtunnel zu gewährleisten.

4 Geplanter Zustand

Zusammenfassend aus dem Kapitel 1.2 ist das Ziel, dass die Entrauchungsanlage des St. Pauli Elbtunnel eine nach Norm gerechte Sicherheitsstromversorgung hat und dass es eine möglichst hohe Verfügbarkeit für den Betrieb gibt. Zusammen mit den Erkenntnissen aus dem Kapitel 3.5 soll nun eine Möglichkeit geplant werden, wie die Energieversorgung am St. Pauli Elbtunnel überarbeitet werden kann.

4.1 Planung des Netzes

Aus wirtschaftlichen Gründen sollen bestehende Netzkomponenten nur minimal verändert werden. Daher ist es wünschenswert, dass bereits installierte Komponenten weiterhin genutzt werden können. Neue Komponenten sollten so ausgelegt sein, dass sie die Anforderungen an die Sicherheitsstromversorgung erfüllen und die Verfügbarkeit des St. Pauli Elbtunnels erhöhen können.

Bei der primären Planung steht die Umsetzung im Fokus, dass die Entrauchungsanlage die geforderten Normen für die Sicherheitsstromversorgung erfüllt. Hinsichtlich der erhöhten Verfügbarkeit ist es wünschenswert, die Zugänglichkeit des St. Pauli Elbtunnels für den öffentlichen Bereich in sinnvollen Fällen aufrechtzuerhalten.

4.1.1 Sicherheitsstromversorgung nach DIN VDE 0100-560:2013-10

Für eine normgerechte Sicherheitsstromversorgung nach DIN VDE 0100-560:2013-10, soll der Niederspannungsanschluss als Stromquelle für Sicherheitszwecke verwendet werden. Die Versorgung des Niederspannungsanschlusses erfolgt aus dem Umspannwerk Großneumarkt und die Versorgung der Mittelspannung erfolgt aus dem Umspannwerk Kuhwerder. Der örtliche Stromnetzbetreiber „Stromnetz Hamburg GmbH“ versichert die nach Norm

geforderte getrennte unabhängige Einspeisung der beiden Versorgungen und dementsprechend auch, dass ein gleichzeitiger Ausfall der beiden Versorgungen unwahrscheinlich ist. Dadurch erfüllt der Niederspannungsanschluss die Anforderungen nach DIN VDE 0100-560:2013-10 Abschnitt 560.6.5 *«Separate voneinander unabhängige Einspeisungen aus dem Versorgungsnetz dürfen nur als Stromquelle für Sicherheitszwecke verwendet werden, wenn eine Zusicherung besteht, dass ein gleichzeitiger Ausfall beider Einspeisungen unwahrscheinlich ist.»* [4, S. 12]

4.1.2 Versorgung der Lüfter für die Entrauchungsanlage

Da die Versorgung von dem Niederspannungsanschluss primär für die Lüfter der Entrauchungsanlage sein soll, sollen die Lüfter jeweils von einer neuen NSUV versorgt werden, welche einen direkten Anschluss zum Niederspannungsanschluss haben soll. Diese NSUVs sollen dann ausschließlich für die Entrauchungsanlage verwendet werden. Dadurch sollen die Anforderungen aus der Norm erfüllt werden, dass die Versorgung anderer Betriebsmittel keine Einfluss auf die Verfügbarkeit der Versorgung für Einrichtungen für Sicherheitszwecke hat: *«Eine Stromquelle für Sicherheitszwecke darf nur dann zusätzlich für andere Zwecke als zur Versorgung von Einrichtungen für Sicherheitszwecke verwendet werden, wenn die Verfügbarkeit für die Versorgung der Einrichtungen für Sicherheitszwecke dadurch nicht beeinträchtigt wird. Ein Fehler, der in einem Stromkreis auftritt, der anderen Zwecken als der Versorgung von Einrichtungen für Sicherheitszwecke dient, darf zu keiner Unterbrechung irgendeines Stromkreises der Einrichtungen für Sicherheitszwecke führen.»* [4, S. 12]

Die NSUVs müssen dann über eine elektrische Leitung miteinander verbunden werden, damit die Versorgung der Lüfter von St. Pauli auch nach Steinwerder stattfinden kann.

Im Normalbetrieb sollen die Lüfter dann ausschließlich über die NSUV STW versorgt werden. Dementsprechend muss hier ebenfalls eine elektrische Verbindung von der Verteilung NSUV STW zur neuen Verteilung der Lüfter hergestellt werden.

4.1.3 Versorgung für eine höhere Verfügbarkeit

Um die Verfügbarkeit zu erhöhen, sollen die beiden Schachtgebäude elektrisch miteinander verbunden werden. Da für die Lüfter der Entrauchungsanlage eine Verbindungsleitung hergestellt werden muss, soll geprüft werden, ob diese Verbindungsleitung für eine

Versorgung genutzt werden kann. Über diese Verbindungsleitung soll dann dafür gesorgt werden, dass wenn eine Elbseite eine Versorgungsunterbrechung aufweist, die jeweils andere Elbseite die Versorgung mit übernehmen kann. Somit soll darüber eine redundante Versorgung der Allgemiestromversorgung stattfinden.

Es gilt dabei zu beachten, dass die Versorgung über die Transformatoren, welche von einem Mittelspannungsnetz eingespeist werden, nicht mit dem Netz des Niederspannungsanschlusses zusammengeschaltet werden sollen. Dies liegt daran, dass hierfür eine Netz-synchronisation erforderlich ist, wenn man unterschiedliche Netze miteinander im parallel Betrieb betreiben möchte. Da dies nicht gewünscht ist, müssen beide Netze voneinander getrennt werden.

4.1.4 Aufbau des geplanten Netzes

Der geplante Aufbau des Netzes wird in der Abbildung 4.1 dargestellt. Die überarbeiteten Abschnitte sind blau markiert.

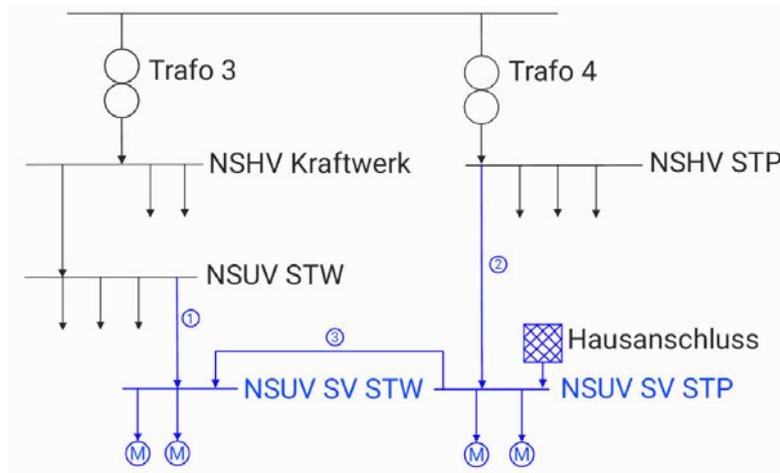


Abbildung 4.1: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie

Zu erkennen sind die neuen NSUVs, welche für die Versorgung der Lüfter für die Entrauchungsanlage zuständig sind (NSUV SV STW und NSUV SV STP). Die NSUV STW ist elektrisch mit der NSUV SV STW über die Leitung (1) verbunden. Die Leitung (2) verbindet die NSHV STP elektrisch mit der NSUV SV STP. Über die Leitung (3) werden die beiden neuen NSUVs elektrisch verbunden. Der Hausanschluss wird im Schachtgebäude St. Pauli direkt an die NSUV SV STP angeschlossen.

Die daraus entstandene Netztopologie ähnelt der eines Ringnetzes. Allerdings wird das Netz nicht als solches betrieben, sondern weiterhin als ein Strahlennetz geführt. Im folgenden Kapitel 4.2 wird erläutert, wie die Versorgung in den verschiedenen Betriebsarten erfolgen soll.

4.1.5 Verbindungsleitungen

Aufgrund der bautechnischen Besonderheiten im St. Pauli Elbtunnel, sind Verlegungen von elektrischen Leitungen in den Tunnelröhren nicht einfach realisierbar. Der Platzbedarf ist sehr beschränkt und die Leitungswege befinden sich unterhalb der Fußgängerwege in den Tunnelröhren. Dies bedeutet, dass bei einer Neuverlegung von Leitungen, hohe wirtschaftliche Kosten entstehen und die jeweilige Tunnelröhre gesperrt werden muss. Aus diesem Grund wird die aktuelle Sanierung der West Tunnelröhre ausgenutzt, weil im Zuge der Sanierungsarbeiten die Leitungswege offen sind. Der Platzbedarf der Leitungswege ist allerdings beschränkt. Aus diesem Grund dürfen die Leitungen gewisse Querschnitte nicht überschreiten. In der Tabelle 4.1 werden die maximalen Anzahlen paralleler Leitungen einzelner Verbindungsleitungen sowie auch deren Querschnitte angegeben. Des Weiteren befinden sich in der Tabelle die benötigten Leitungsbelegungen und Längen der jeweiligen Verbindungsleitung.

Tabelle 4.1: Maximale Kenngrößen der neuen Leitungen im St. Pauli Elbtunnel

Bezeichnung	Anzahl paralleler Leitungssysteme	Querschnitt	Leitungsbelegung	Länge
Verbindungsleitung NSUV SV	3	185 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	600 m
Zuleitung NSUV SV STW	1	180 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m
Zuleitung NSUV SV STP	1	180 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m
Zuleitung Lüfter 1	1	95 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m
Zuleitung Lüfter 2	1	95 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	60 m
Zuleitung Lüfter 3	1	95 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m
Zuleitung Lüfter 4	1	95 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	60 m

Um die Verlegung der Leitungen möglichst einfach zu gestalten, ist es empfehlenswert, die Querschnitte und die Anzahl paralleler Leitungssysteme so gering wie möglich zu wählen.

Eine Überdimensionierung der Leitungen könnte aufgrund des begrenzten Platzbedarfs zu Schwierigkeiten beim Einhalten der Biegeradien führen.

Es gilt außerdem zu beachten, dass Leitungen für Sicherheitseinrichtungen spezielle Eigenschaften aufweisen müssen (siehe [4, S. 15]). Zu diesen Leitungen gehören die Zuleitungen der Lüfter und die Verbindungsleitung zwischen den NSUVs SV. Diese Leitungen sollten aus einem Brandkabel mit E-90-Funktionserhalt bestehen.

4.2 Betriebsarten

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Betriebsarten und den daraus gewünschten Zielen der Versorgung am St. Pauli Elbtunnel. Ob diese Ziele eingehalten werden können, wird hier noch nicht geprüft. Es ist lediglich die gewünschte Planung der Energieversorgung. Genauere Ergebnisse liefert dann das Kapitel 6.

Folgende Betriebsarten sollen am St. Pauli Elbtunnel umgesetzt werden:

- Normalbetrieb
- Ausfall/Wartung Trafo 3
- Ausfall/Wartung Trafo 4
- Ausfall Mittelspannung

Bis auf den Normalbetrieb repräsentieren die Betriebsarten jeweils eine bestimmte Art von Versorgungsunterbrechung. Hierbei werden ausschließlich einfache Fehler in der Versorgung betrachtet, weil zwei zeitgleiche Fehler sehr unwahrscheinlich sind.

4.2.1 Normalbetrieb

Im Normalbetrieb soll die Versorgung ausschließlich über die Mittelspannung erfolgen, wie es im aktuellen Zustand der Fall ist. Dies bedeutet, dass der Hausanschluss keine Verbraucher versorgt und somit nicht zugeschaltet ist. Der Transformator „Trafo 3“ versorgt dann das Kraftwerksgebäude, das Schachtgebäude Steinwerder und die gesamte Entrauchungsanlage. Das Schachtgebäude St. Pauli wird von dem Transformator „Trafo 4“ versorgt. Die Abbildung 4.2 zeigt, wie die Versorgung stattfinden soll. Wie im Kapitel 3.4 werden die Bereiche im Betrieb in grün dargestellt und die Bereiche, welche nicht im Betrieb sind, in rot dargestellt.

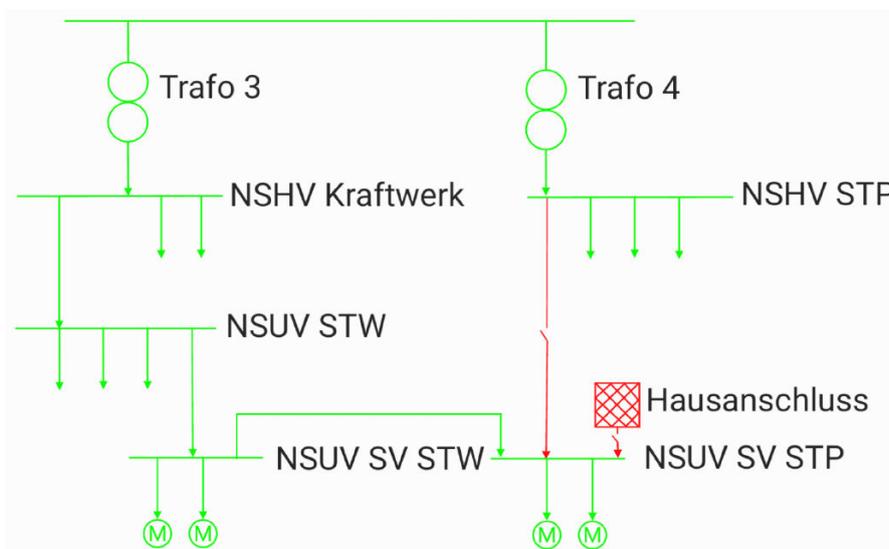


Abbildung 4.2: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie Normalbetrieb

4.2.2 Ausfall/Wartung Trafo 3 (Steinwerder)

Sobald die Versorgung von dem Transformator „Trafo 3“ unterbrochen wird, wird das Kraftwerksgebäude, das Schachtgebäude Steinwerder und die Entrauchungsanlage nicht mehr versorgt. Aus diesem Grund soll in diesem Fall der Hausanschluss die Versorgung dieser Bereiche übernehmen. Die Versorgung beginnt dann an der NSUV SV STP. Von dort aus geht die Versorgung weiter über die Verbindungsleitung innerhalb der Tunnelröhre zu der NSUV SV STW. Da diese NSUV mit der NSUV STW verbunden ist, soll über diese Verbindung das Schachtgebäude Steinwerder und das Kraftwerksgebäude mit versorgt werden. In der Abbildung 4.3 wird die Versorgung dargestellt.

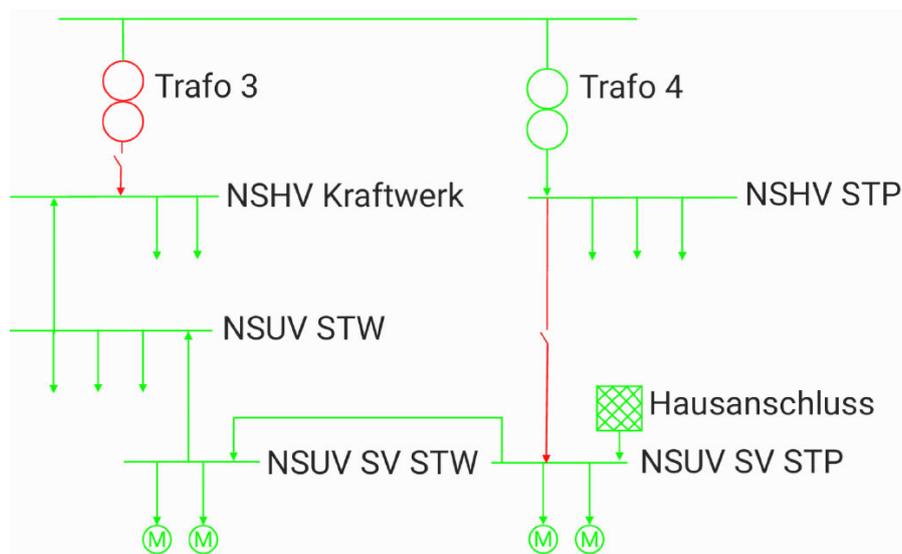


Abbildung 4.3: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie Ausfall/Wartung Steinwerder

Da das Schachtgebäude St. Pauli von der Versorgungsunterbrechung des Transformator „Trafo 4“ nicht betroffen ist, soll in dieser Betriebsart die NSHV STP weiterhin von dem Transformator „Trafo 4“ versorgt werden.

Bei dieser Betriebsart muss geprüft werden, ob der Hausanschluss über genügend Leistung verfügt, das Schachtgebäude Steinwerder und Kraftwerksgebäude mit zu versorgen. Primär soll der Hausanschluss die Lüfter der Entrauchungsanlage versorgen.

4.2.3 Ausfall/Wartung Trafo 4 (St. Pauli)

Da das Schachtgebäude St. Pauli, bei einer Unterbrechung der Versorgung des Transformators „Trafo 4“, nicht mehr versorgt wird, soll in diesem Fall der Hausanschluss die Versorgung übernehmen. Der Hausanschluss soll ebenfalls auch für die Versorgung der Entrauchungsanlage verantwortlich sein. Dies ergibt sich daraus, dass der Hausanschluss direkt an die NSUV der Entrauchungsanlage angeschlossen ist, von der aus die Versorgung der NSHV STP erfolgen soll. Die Verbindung von der NSUV STW mit der NSUV der Entrauchungsanlage muss in diesem Fall abgeschaltet werden. Ansonsten würde es zu Problemen führen, weil das Netz, welches aus der Mittelspannung eingespeist wird, nicht mit dem Netz aus dem Hausanschluss synchronisiert wird.

Die Versorgung wird in der Abbildung 4.4 dargestellt.

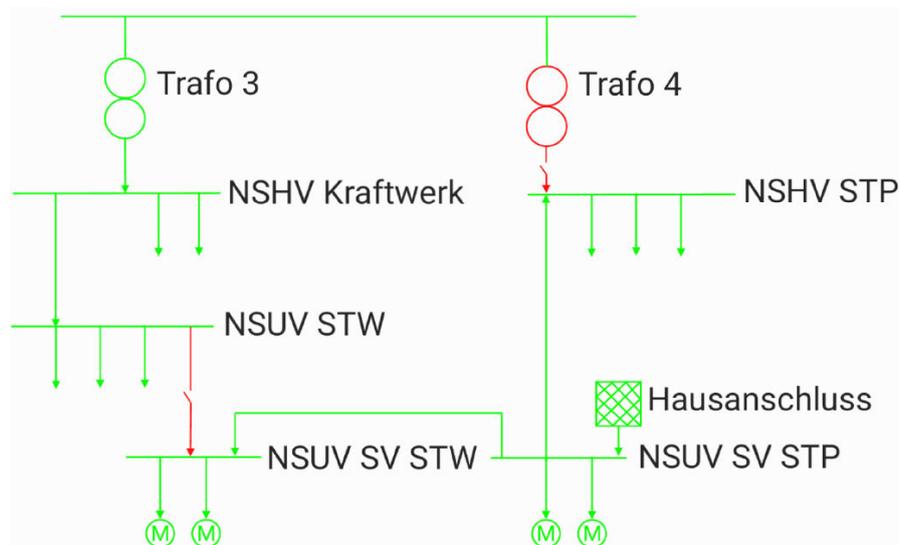


Abbildung 4.4: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie Ausfall/Wartung St. Pauli

Die NSHV Kraftwerk und NSUV STW wird weiterhin von dem Transformator „Trafo 3“ versorgt.

Hierbei muss geprüft werden, ob der Hausanschluss ausreichend ist, das Schachtgebäude St. Pauli und die Lüfter der Entrauchungsanlage gleichzeitig versorgen zu können.

4.2.4 Ausfall Mittelspannung

Da in diesem Zustand nur noch der Hausanschluss als Versorgung zur Verfügung steht, soll er ausschließlich die Entrauchungsanlage versorgen. Obwohl keine doppelte Fehlerbetrachtung gemacht wird, soll nicht riskiert werden, dass die Niederspannungsversorgung ebenfalls ausfallen könnte und die Entrauchungsanlage nicht mehr versorgt werden kann.

Die Abbildung 4.5 zeigt die Versorgung. Alle Bereiche, bis auf die NSUVs der Entrauchungsanlage, werden nicht mehr versorgt.

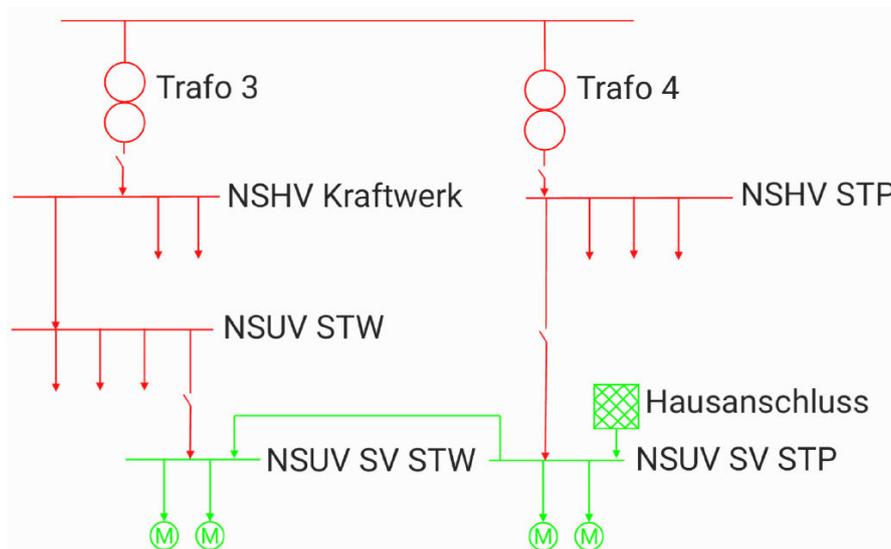


Abbildung 4.5: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie Ausfall Mittelspannung

4.3 Auswertung der Planung

Die Planung ergab, dass das vorhandene Netz mit folgenden Komponenten erweitert werden muss:

- Errichtung zwei neuer NSUVs für die Entrauchungsanlage
- Verlegung einer neuen Verbindungsleitung für die NSUVs der Entrauchungsanlage
- Verlegung einer neuen Leitung von der NSUV STW zur NSUV der Entrauchungsanlage
- Verlegung einer neuen Leitung von der NSHV STP zur NSUV der Entrauchungsanlage

Hinzu kommt, dass die aktuellen Abgänge für die Entrauchungsanlage umverdrahtet werden müssen. Im aktuellen Zustand befinden sich die Abgänge auf der NSUV STW und auf der NSHV STP. Diese Abgänge müssen dann jeweils auf die neu errichtete NSUV der Entrauchungsanlage gelegt werden. Außerdem muss der Hausanschluss an die NSUV SV STP der Entrauchungsanlage angeschlossen werden.

Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung des Netzes, um festzustellen, ob der geplante Zustand umgesetzt werden kann oder ob Anpassungen erforderlich sind. Dabei liegt der Fokus weiterhin auf der Sicherheitsstromversorgung der Entrauchungsanlage.

5 Berechnung

Damit ein Netz richtig ausgelegt werden kann, sind Berechnungen erforderlich. Zu diesen Berechnungen gehört eine Netzberechnung sowie auch eine Kurzschlussstromberechnung. In diesem Kapitel wird behandelt, wie diese Berechnungen durchgeführt werden. Anschließend folgt die praktische Anwendung anhand des St. Pauli Elbtunnels mithilfe einer speziellen Netzberechnungssoftware im Kapitel 6.

5.1 Kurzschlussstromberechnung (nach DIN VDE 0102)

Die Kurzschlussberechnung wird im folgenden nach der DIN VDE 60909 „Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 0: Berechnung der Ströme (IEC 60909-0:2016) ” behandelt. Diese Norm wird bei Niederspannungs-Drehstromnetzen mit einer Frequenz von 50 Hz angewendet.

Für die Berechnung wird die Methode der Ersatzspannungsquelle verwendet. Hierbei wird an der Kurzschlussstelle eine Ersatzspannungsquelle angenommen und alle regulären Netzeinspeisungen werden durch ihre Innenimpedanzen ersetzt. Mit dem daraus resultierenden Ersatzschaltbild können dann die Kurzschlussströme berechnet werden.

5.1.1 Kurzschlussmitimpedanzen (Mitimpedanzen)

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die verschiedenen Kurzschlussimpedanzen im Mitsystem berechnet werden. Dabei spielen nur die Impedanzen von der Netzeinspeisung, den Transformatoren und den Leitungen eine wichtige Rolle für die Bearbeitung dieser Bachelorarbeit. Weitere wichtige Impedanzen, die in der Norm enthalten sind, werden aus diesem Grund nicht erwähnt.

Netzeinspeisung

Für einen dreipoligen Kurzschluss, welcher aus einem Netz gespeist wird und nur der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom bekannt I''_{kQ} ist, wird die Berechnung der Kurzschlussimpedanz nach der Formel 5.1 durchgeführt.

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (5.1)$$

X_Q kann über das Verhältnis $\frac{R_Q}{X_Q}$ wie folgt berechnet werden:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_Q}{X_Q}\right)^2}} \quad (5.2)$$

Kommt es zu einem Kurzschluss über einen Transformator, welcher aus einem Mittelspannungsnetz gespeist wird, muss die Netzimpedanz im Mitsystem nach der Formel 5.3 bestimmt werden.

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (5.3)$$

Ist die Resistanz R_Q nicht bekannt, kann diese über die Beziehung in den Formeln 5.4 und 5.5 bestimmt werden.

$$X_Q = 0,995 \cdot Z_Q \quad (5.4)$$

$$R_Q = 0,1 \cdot X_Q \quad (5.5)$$

$$\underline{Z_Q} = R_Q + j \cdot X_Q \quad (5.6)$$

Transformatoren

Bei einem Zweiwickeltransformator mit einer Stufenschaltung oder ohne, kann die Kurzschlussimpedanz mit folgenden Formeln bestimmt werden:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (5.7)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2} \quad (5.8)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (5.9)$$

Das Typenschild des Transformators liefert die wichtigen Daten zur Berechnung von $\underline{Z}_T = R_T + j \cdot X_T = \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

Leitungen

Aus den Leiterdaten kann die Kurzschlussimpedanz $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ berechnet werden. Dabei gilt, dass sich die Resistanz R_L aus dem Produkt des Resistanzbelages R'_L und der Leitungslänge ergibt. Ebenfalls ergibt sich die Reaktanz X_L aus dem Produkt des Reaktanzbelages X'_L und der Leitungslänge. Der Resistanzbelag und der Reaktanzbelag werden wie folgt berechnet:

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (5.10)$$

$$X'_L = \omega \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (5.11)$$

Im Fall für Bündelleitern gilt für die Gleichung 5.11, dass r ersetzt werden muss durch $r_B = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}}$ mit dem Bündelradius R .

Die Größe des spezifischen Widerstandes für Kupfer kann wie folgt angenommen werden:

$$\rho = \frac{1}{54} \cdot \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \quad (5.12)$$

5.1.2 Kurzschlussnullimpedanzen (Nullimpedanzen)

Die Kurzschlussnullimpedanzen (Kurzschlussnullimpedanzen) werden nicht wie die Kurzschlussmitimpedanzen für die Kurzschlussstromberechnung berechnet. Je nach dem welche Nullimpedanzen erforderlich sind, können diese unterschiedlich ermittelt werden.

Netzeinspeisung

Nur in besonderen Fällen ist die Nullimpedanz der Netzeinspeisung relevant. Dies ist abhängig von der Sternpunkterdung und des Wickelaufbaues der Transformatoren. Hierfür können besondere Fälle in der IEC/TR 60909-4:2000, Tabelle 1 nachgeschlagen werden.

Transformatoren

Vom Hersteller können die Angaben für $R_{(0)T}$ und $X_{(0)T}$ erfragt werden. Alternativ können sich diese Angaben auch auf dem Typenschild befinden.

Leitungen

Ebenfalls kann vom Hersteller die Angaben für $R_{(0)L}$ und $X_{(0)L}$ erfragt werden. Ansonsten können diese Angaben aus Kabelbüchern oder aus der IEC/TR 60909-2 entnommen werden.

5.1.3 Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes I_k''

Dieses Kapitel befasst sich mit der Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes I_k'' für die unterschiedlichen Kurzschlussarten.

Dreipoliger Kurzschluss

Nachdem die Kurzschlussimpedanz Z_K ermittelt wurde, wird der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom I_k'' nach der Formel 5.13 berechnet.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K} \quad (5.13)$$

Dabei gilt für die Kurzschlussimpedanz:

$$Z_K = |R_k + j \cdot X_k| \quad (5.14)$$

Zweipoliger Kurzschluss

Der Anfangs-Kurzschlusswechselstrom wird bei einem zweipoligen Kurzschluss nach der Formel 5.15 berechnet.

$$I_k'' = \frac{\sqrt{3}}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.15)$$

Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung

Bei einem zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung treten drei Anfangs-Kurzschlussströme auf (siehe Abbildung 2.3). Alle drei Anfangs-Kurzschlussströme lassen sich nach den Formeln 5.16, 5.17 und 5.18 berechnen.

$$I_{k2EL2}'' = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot (\underline{Z}_{(0)} - a \cdot \underline{Z}_{(2)})}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{Z}_{(2)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.16)$$

$$I_{k2EL3}'' = \left| \frac{\sqrt{3} \cdot (\underline{Z}_{(0)} - a^2 \cdot \underline{Z}_{(2)})}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{Z}_{(2)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.17)$$

$$I_{kE2E}'' = \left| \frac{3 \cdot \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)} \cdot \underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(0)} \cdot \underline{Z}_{(2)}} \right| \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.18)$$

Einpoliger Erdkurzschluss

Der Anfangs-Kurzschlussstrom beim einpoligen Erdkurzschluss berechnet sich nach folgender Formel:

$$I_k'' = \frac{3}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}|} \cdot \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (5.19)$$

5.1.4 Berechnung des Stoßkurzschlussstromes i_p

Dreipoliger Kurzschluss

Bei einem einfach und mehrseitig einfach gespeisten Kurzschluss wird der Stoßkurzschlussstrom bei einem dreipoligen Kurzschluss mit folgenden Gleichungen berechnet:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_k}{X_k} \quad (5.20)$$

$$I_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (5.21)$$

Der Faktor κ wird hierbei mit der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} \quad (5.22)$$

Für die Bestimmung des Faktors κ , bei einem mehrfach gespeisten Kurzschluss, gibt es drei Methoden.

- Einheitliches Verhältnis $\frac{X}{R}$ oder $\frac{R}{X}$
- Verhältnis $\frac{X}{R}$ oder $\frac{R}{X}$ an der Kurzschlussstelle
- Ersatzfrequenz f_c

Die erste Methode verwendet das größte Verhältnis $\frac{X}{R}$ oder kleinste Verhältnis $\frac{R}{X}$ aller Zweige eines Netzes.

Bei der zweiten Methode wird das Verhältnis $\frac{R_k}{X_k}$ aus der Berechnung des Anfangskurzschlussstromes verwendet. Hierbei wird der bestimmte Faktor κ mit 1,15 multipliziert, wenn das Verhältnis in allen führenden Kurzschlussstrom Zweigen $\frac{R}{X} > 0,3$ ist, um Ungenauigkeiten abzudecken.

In der dritten Methode wird, bei einer Frequenz von $f_c = 20 \text{ Hz}$, eine Ersatzimpedanz $\underline{Z}_c = R_c + j \cdot X_c$ berechnet. Daraus folgt für die Bestimmung des Verhältnis $\frac{X}{R}$ oder $\frac{R}{X}$ dann :

$$\frac{X}{R} = \frac{X_c}{R_c} \cdot \frac{f}{f_c} \quad (5.23)$$

Zweipoliger Kurzschluss

Bei einem zweipoligen Kurzschluss folgt die Berechnung des Stoßkurzschlussstromes nach folgender Gleichung:

$$i_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k2maxPFO} + \sqrt{2} \cdot I''_{k2PF} \quad (5.24)$$

Der Faktor κ wird ebenfalls wie beim dreipoligen Kurzschluss ermittelt.

Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung

Der Stoßkurzschlussstrom ergibt sich bei einem zweipoligen Kurzschluss mit Erdberührung nach der folgenden Gleichung:

$$i_{p2EL2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k2EL2maxPFO} + \sqrt{2} \cdot I''_{k2EL2PF} \quad (5.25)$$

Der Faktor κ wird ebenfalls wie beim dreipoligen Kurzschluss ermittelt.

Einpoliger Erdkurzschluss

Nach folgender Gleichung wird der Stoßkurzschlussstrom bei einem einpoligen Erdkurzschluss ermittelt:

$$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k1maxPFO} + \sqrt{2} \cdot I''_{k1PF} \quad (5.26)$$

Der Faktor κ wird ebenfalls wie beim dreipoligen Kurzschluss ermittelt.

5.2 Netzberechnung

Im Folgenden wird das Vorgehen einer Netzberechnung (auch bekannt als Lastflussberechnung) durchgeführt. Bei dem Netz am St. Pauli Elbtunnel handelt es sich um eine einseitige Einspeisung mit mehreren Verbrauchern. Aus diesem Grund wird nur diese Art der Einspeisung behandelt.

5.2.1 Ermittlung der Leistungen

In der folgenden Abbildung 5.1 wird ein Beispiel für eine einseitige Einspeisung mit mehreren Verbrauchern dargestellt. Als vereinfachte Annahme haben alle Verbraucher den gleichen $\cos\varphi$.

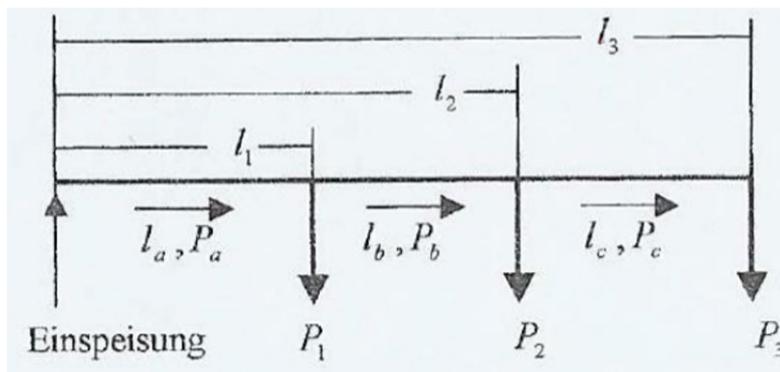


Abbildung 5.1: Einseitige Einspeisung mit mehreren Verbrauchern [17]

Die Leistungen auf den verschiedenen Leitungsabschnitten werden wie folgt berechnet:
[17]

$$P_c = P_3 \quad (5.27)$$

$$P_b = P_2 + P_c = P_2 + P_3 \quad (5.28)$$

$$P_a = P_1 + P_b = P_1 + P_2 + P_3 \quad (5.29)$$

5.2.2 Spannungsfall

Die Berechnungen für den Spannungsfall werden nach der Fachliteratur „*Berechnung von Kurzschlussströmen und Spannungsfällen*“ [16, S. 562 ff.] behandelt.

Aus den Impedanzen einer Leitung oder eines Kabels Z_L , welches mit einem Betriebsstrom I_B belastet wird, folgt der resultierende Spannungsfall ΔU_{rsl} . Dieser ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$\Delta U_{rsl} = I_B \cdot \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad (5.30)$$

Dabei gilt, dass die Resistanz R_L und Reaktanz X_L der Leitung/Kabel jeweils die Summe aus dem Resistanz-/Reaktanzbelag R'_L/X'_L mit der einfachen Leitungs-/Kabellänge l ist (siehe Gleichung 5.31 und 5.32).

$$R_L = R'_L \cdot l \quad (5.31)$$

$$X_L = X'_L \cdot l \quad (5.32)$$

Der Wirkspannungsfall ΔU_{rL} und der induktive Spannungsfall ΔU_{xL} einer Leitung/eines Kabels ergibt sich aus den folgenden Gleichungen:

$$\Delta U_{rL} = I_B \cdot R_L \cdot \cos(\varphi) \quad (5.33)$$

$$\Delta U_{xL} = I_B \cdot X_L \cdot \sin(\varphi) \quad (5.34)$$

Der Spannungsfall ΔU ergibt sich dann aus der Summe des Wirkspannungsfalls und des induktiven Spannungsfalls.

$$\Delta U = \Delta U_{rL} + \Delta U_{xL} \quad (5.35)$$

Daraus folgt dann die Gleichung für den Spannungsfall:

$$\Delta U = I_B \cdot (R_L \cdot \cos(\varphi) + X_L \cdot \sin(\varphi)) \quad (5.36)$$

In einem Drehstromsystem kann der Betriebsstrom nach der Gleichung 5.37 und der Spannungsfall nach der Gleichung 5.38 berechnet werden.

$$I_B = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos(\varphi)} \quad (5.37)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_B \cdot (R_L \cdot \cos(\varphi) + X_L \cdot \sin(\varphi)) \quad (5.38)$$

Der prozentuale Spannungsfall ε , bezogen auf die Nennspannung U_n , ergibt sich dann nach der folgenden Gleichung:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 \% \quad (5.39)$$

6 Simulation

In diesem Kapitel wird die geplante Netzerweiterung aus dem Kapitel 3 simuliert. Für die Simulation wird die Software „Simaris design 24“ verwendet.

6.1 Simaris Design

Simaris Design ist eine Software der Siemens AG. Mit dieser Software können Netzrechnungen im Mittelspannungs- bis Niederspannungsbereich durchgeführt werden. Zusätzlich können Kurzschlussströme, Lastflüsse und Spannungsfälle berechnet werden. Die dimensionierten Komponenten werden dann nach einem hinterlegten Produktkatalog direkt ausgewählt bzw. können ausgewählt werden. Die Berechnungen erfolgen nach geltenden Normen der VDE und IEC. [20]

6.2 Parametrierung

Die Parametrierung der vorhandenen Komponenten erfolgt nach dem Kapitel 3.3. Diese Komponenten werden so eingestellt, dass diese nicht neu parametrieren werden können. Somit kann leicht überprüft werden, ob diese Komponenten weiterhin verwendet werden können. Die neu benötigten Komponenten werden nicht parametrieren. Die Parametrierung erfolgt nach der Berechnung in „Simaris design 24“.

Für die Lasten an den Verteilungen werden sogenannte Summenlasten verwendet. Diese Summenlasten repräsentieren die gesamte Last, welche an einer Verteilung anliegt. Die Lüfter der Entrauchungsanlage werden nicht in den Summenlasten mit einbezogen. Aufgrund der hohen Anlaufströme der Lüftermotoren, werden diese in der Simulation als Motor parametrieren. Dadurch werden die Anlaufströme bei der Simulation mit berücksichtigt.

Eine Übersicht des Simulationsaufbaus befindet sich im Anhang A.1.

6.3 Betriebsarten

Alle Betriebsarten, die im Kapitel 4.2 vorgegeben wurden, werden simuliert. Die Simulationsergebnisse der einzelnen Betriebsarten werden in den folgenden Abschnitten erläutert. Bei der Erläuterung wird zunächst nur darauf eingegangen, ob die gewünschten Betriebsarten umgesetzt werden können und ob die vorhandene Komponenten ausreichen sind. Die Auslegung der neuen Komponenten erfolgt dann am Schluss dieses Kapitels.

6.3.1 Normalbetrieb

Die Simulation der Betriebsart „Normalbetrieb“ ergab, dass das Netz für die Erweiterung ausgelegt werden kann. Die Einspeiseleistungen der Transformatoren sind ausreichend, sämtliche Spannungsfälle werden nach der Norm eingehalten und die vorhandenen Komponenten erfüllen weiterhin alle Anforderungen, um das Netz weiter betreiben zu können.

6.3.2 Ausfall/Wartung von Trafo 3

Bei einer Unterbrechung der Versorgung, von dem Transformator „Trafo 3“, ergab die Simulation, dass das Netz ausreichend versorgt wird. Der Hausanschluss verfügt über ausreichende Einspeiseleistung, um die NSUV STW und NSHV Kraftwerk mit zu versorgen. Allerdings stößt der maximal zulässige Spannungsfall fast auf seine Grenzen. Auf der Steinwerder Seite beträgt der Spannungsfall für die Lüfter der Entrauchungsanlage $\Delta u_{\text{Lüfter 1}} = 3,98\%$ und $\Delta u_{\text{Lüfter 2}} = 3,99\%$. Laut der Norm DIN VDE 0100-520 Beiblatt 2 Abschnitt 6.1 darf der maximale Spannungsfall $\Delta u = 4\%$ nicht überschreiten, wenn die Energieversorgung von einem Hausanschluss kommt. Da die Leitungen schon auf das Maximum dimensioniert wurden, kann dem Spannungsfall durch größere Leitungen nicht entgegen gewirkt werden.

Des Weiteren können die vorhandene Komponenten weiterhin verwendet werden.

6.3.3 Ausfall/Wartung von Trafo 4

Die Simulation für eine Unterbrechung der Versorgung von dem Transformator „Trafo 4“ ergab, dass der Hausanschluss ebenfalls ausreichend für die Versorgung ist. Allerdings

kommt der maximal zulässige Spannungsfall auch an seine Grenzen. In diesem Fall betrifft es die Lüfter auf der St. Pauli Elbseite. Diese weisen einen Spannungsfall von $\Delta u_{\text{Lüfter } 3} = 3,94\%$ und $\Delta u_{\text{Lüfter } 4} = 3,84\%$ auf. Weil die Zuleitungen der Lüfter aber noch nicht auf ihr Maximum dimensioniert wurden, kann dem Spannungsfall hier entgegen gewirkt werden. Mit den maximal zulässigen Querschnitten kann der Spannungsfall auf einen Wert von $\Delta u_{\text{Lüfter } 3} = 1,21\%$ und $\Delta u_{\text{Lüfter } 4} = 1,82\%$ reduziert werden.

Ebenfalls müssen die vorhandenen Komponenten nicht ausgetauscht werden.

6.3.4 Ausfall der Mittelspannung

Bei einem Ausfall der Mittelspannung ergab die Simulation, dass die Einspeiseleistung des Hausanschlusses ausreichend ist, um die Lüfter der Entrauchungsanlage zu versorgen. Die Spannungsfälle befinden sich zudem in einem angemessenen Bereich.

6.4 Ergebnisse der Simulation

Die Ergebnisse aus der Simulation sind in der Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Ergebnistabelle der Betriebsarten

Betriebsart	Umsetzbar nach Kapitel 4?	Anmerkung
Normalbetrieb	ja	keine Probleme
Wartung/Ausfall Trafo 3	ja	maximal zulässiger Spannungsfall sehr nah an der Grenze von $\Delta u = 4\%$
Wartung/Ausfall Trafo 4	ja	maximal zulässiger Spannungsfall reduzierbar durch größere Leitungsquerschnitte
Ausfall Mittelspannung (MS)	ja	keine Probleme

In der Tabelle 6.2 sind die Größen der Leitungen aufgeführt. Diese Größen entsprechen den Mindestanforderungen, die die einzelnen Leitungen erfüllen müssen, damit das Netz allen Anforderungen gerecht wird.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Simulation für erforderlichen Leitungsgrößen

Bezeichnung	Anzahl paralleler Leitungssysteme	Querschnitt	Leitungsbelegung	Länge
Verbindungsleitung NSUV SV	3	185 mm ²	3x(L1-L2-L3-N-PE)	600 m
Zuleitung NSUV SV STW	1	150 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m
Zuleitung NSUV SV STP	1	10 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m
Zuleitung Lüfter 1	1	16 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m
Zuleitung Lüfter 2	1	95 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	60 m
Zuleitung Lüfter 3	1	4 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	10 m
Zuleitung Lüfter 4	1	25 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	60 m
Anschluss HA	1	95 mm ²	L1-L2-L3-N-PE	60 m

7 Auswertung

Das neue Konzept der Energieversorgung entspricht den Anforderungen einer Sicherheitsstromversorgung gemäß DIN VDE 0100-560:2013-10. Die Versorgung für die Lüfter der Entrauchungsanlage kann weiter aufrecht gehalten werden, wenn die Allgemeinstromversorgung unterbrochen wird.

Ebenfalls ist es mit dem neuen Energieversorgungskonzept möglich, die Verfügbarkeit am St. Pauli Elbtunnel zu erhöhen. Hierbei sollte allerdings beachtet werden, dass der maximal zulässige Spannungsfall schon ziemlich an seiner Grenze liegt. Jede weitere Erweiterung von neuen Betriebsmitteln kann dazu führen, dass der Grenzwert für den maximal zulässigen Spannungsfall überschritten wird. Dies gilt für die Betriebsart „Wartung/Ausfall Trafo 3“, bei dem die Lüfter einen Spannungsabfall von $\Delta u_{\text{Lüfter1}} = 3,98\%$ und $\Delta u_{\text{Lüfter2}} = 3,99\%$ aufweisen. Weitere Betriebsmittel in der Anlage können dazu führen, dass bei dieser Betriebsart die Versorgung für das Kraftwerksgebäude eingestellt werden muss, damit der Spannungsfall weiterhin unterhalb von $\Delta u = 4\%$ bleibt. Aufgrund des hohen Spannungsabfalls in dieser Betriebsart muss abgewogen werden, ob die Aufrechterhaltung der Versorgung am Kraftwerksgebäude relevant ist oder ob die Versorgung in diesem Fall komplett für das Kraftwerksgebäude eingestellt werden kann.

Da der Spannungsfall im Betriebszustand „Wartung/Ausfall Trafo 4“ durch Vergrößerung der Leitungsquerschnitte reduziert werden kann, muss hier eine Kalkulation stattfinden. Größere Querschnitte bedeuten geringere Leitungsverluste aber auch mehr Kosten für die Leitungen und Montage. Die Wahl des geeigneten Leitungsquerschnitts erfordert eine Abwägung zwischen den reduzierten Verlusten und den damit verbundenen Kosten für Material und Installation.

7.1 Schaltmatrix

Die Abbildung 7.1 zeigt den Aufbau des Netzes mit den dazugehörigen Schaltelementen, die zum Schalten der Betriebsarten benötigt werden. Die jeweiligen Schaltelemente sind gekennzeichnet mit S1 - S6. Diese müssen, je nach Betriebsart, geschlossen oder geöffnet werden. Die genauen Zustände der Schaltelemente sind in der Tabelle 7.1 angegeben. Es gilt zu beachten, dass diese Tabelle nicht die Reihenfolge angibt, wie die Schaltelemente geschaltet werden müssen. Sie dient lediglich als Übersicht, in welcher die Zustände der Schaltelemente für die jeweilige Betriebsart angezeigt werden. Zusätzlich ist vorgeschrieben, dass eine Umschaltung von einer AV zu einer SV in Deutschland automatisch erfolgen muss. „In Deutschland sind nicht-automatische Versorgungs-, deren Einschaltung durch das Bedienpersonal erfolgt, als Stromversorgungseinrichtung für Sicherheitszwecke nicht erlaubt.“ [4, S. 11]. Aus diesem Grund dürfen die Schaltelemente nicht manuell betätigt werden, sondern es ist eine automatische Umschalteinrichtung erforderlich.

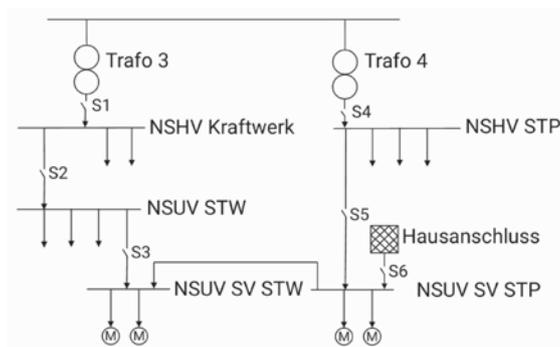


Abbildung 7.1: St.Pauli-Elbtunnel Netztopologie mit Schaltelementen

Tabelle 7.1: Schaltmatrix der Betriebsarten

	Normalbetrieb	Wartung/Ausfall Trafo 3	Wartung/Ausfall Trafo 4	Ausfall MS
S1	geschlossen	geöffnet	geschlossen	geöffnet
S2	geschlossen	geschlossen	geschlossen	geöffnet
S3	geschlossen	geschlossen	geöffnet	geöffnet
S4	geschlossen	geschlossen	geöffnet	geöffnet
S5	geöffnet	geöffnet	geschlossen	geöffnet
S6	geöffnet	geschlossen	geschlossen	geschlossen

8 Fazit

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus dieser Bachelorarbeit festgehalten. Zu dem folgt ein Ausblick darauf, wie die weiteren Schritte nach dieser Bachelorarbeit sind.

8.1 Erkenntnisse

Die Ausarbeitung des Energieversorgungskonzepts für den St. Pauli Elbtunnel zeigt, dass eine Überarbeitung der Versorgung eine Sicherheitsstromversorgung gemäß geltender Normen ermöglichen kann. Der bereits errichtete Hausanschluss verfügt hierfür über ausreichend Leistung, um die Lüfter der Entrauchungsanlage zu versorgen und kann zusätzlich als eine Sicherheitsstromquelle verwendet werden. Des Weiteren ergaben die Simulationen, dass bei entsprechender Dimensionierung der Leitungen die gewünschte Verfügbarkeit des St. Pauli Elbtunnels verbessert werden kann.

Sobald dieses Energieversorkungskonzept umgesetzt wird, sind damit alle sicherheitsrelevanten Einrichtungen des St. Pauli Elbtunnels über eine Sicherheitsstromversorgung versorgt, sodass der Elbtunnel sicher betrieben werden kann. Für die Öffentlichkeit bedeutet dieses neue Energieversorgungskonzept, dass es zu weniger Sperrungen des St. Pauli Elbtunnels führen wird.

8.2 Ausblick

Nach Abschluss dieser Bachelorarbeit müssen zunächst die Daten der Transformatoren überprüft werden. Sollten diese Daten nicht mit den in dieser Bachelorarbeit verwendeten Daten übereinstimmen, müssen die Berechnungen neu durchgeführt werden. Anschließend werden die betrieblichen Belange und positiven Veränderungen den Aufwänden

für den Umbau zur Erhöhung der Verfügbarkeit gegenübergestellt. Auf Basis dieser Gegenüberstellung wird der Umfang der Umbauarbeiten ermittelt. Je nach Umbauumfang schließen sich folgende Inhalte dann den weiteren Planungen an:

- Erstellung neuer Schaltpläne
- Handlungsanweisungen für die Umbaumaßnahmen erstellen
- Kostenermittlung
- Beauftragung der Umbaumaßnahmen

Literaturverzeichnis

- [1] *Unternehmensziele HPA*. hamburg-port-authority.de. – URL <https://www.hamburg-port-authority.de/de/hpa-360/philosophie-ziele>; abgerufen am 9. Juli 2024.
- [2] BIEGELMEIER, G. ; KIEFER, G. ; KREFTER, K.H.: *Schutz in elektrischen Anlagen*. VDE-Verlag, 1999 (Schutz in elektrischen Anlagen Bd. 5). – URL <https://books.google.de/books?id=S-B1PQAACAAJ>. – ISBN 9783800720521
- [3] CICHOWSKI, R.R. ; CICHOWSKI, A.R. ; VERLAG, VDE: *Lexikon der Elektroinstallation: Schnelle Hilfe für eine erfolgreiche Planung, Errichtung und Betrieb von Niederspannungsanlagen gemäß DIN VDE 0100 und weiteren Normen*. VDE VERLAG GMBH, 2020 (VDE-Schriftenreihe – Normen verständlich). – URL <https://books.google.de/books?id=nUauzQEACAAJ>. – ISBN 9783800751648
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 5-56: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Einrichtungen für Sicherheitszwecke (IEC 60364-5-56:2018)*. DIN VDE 0100-560 VDE 0100-560:2013-10. 10 2013. – Zugriff am: 21. Mai 2024
- [5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Betrieb von elektrischen Anlagen*. DIN VDE 0105-100 VDE 0105-100:2015-10. 10 2015. – Zugriff: 25. April 2024
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen*. DIN EN 60909-0 VDE 0102:2016-12. 12 2016. – Zugriff am: 08. März 2024
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Errichten von Niederspannungsanlagen*. DIN VDE 0100-530 VDE 0100-530:2018-06. 6 2018. – Zugriff am: 06. März 2024
- [8] GOOGLE MAPS: *Karte vom St. Pauli Elbtunnel*. – URL <https://www.google.com/maps/@53.5433603,9.9750855,398a,35y,271.59h,54.9t/data=!3m1!1e3?authuser=0&entry=ttu>. – Zugriffsdatum: 21.06.2024

- [9] HAMBURG PORT AUTHORITY: *Interne Leistungsbeschreibung für Projekt "Grundinstandsetzung St. Pauli Elbtunnel, 5.BA Weströhre TECHNISCHE AUSRÜSTUNG"*. 6 2023. – unveröffentlichtes Dokument
- [10] HEUCK, K. ; DETTMANN, K.D. ; SCHULZ, D.: *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013 (SpringerLink : Bücher). – URL <https://books.google.de/books?id=vc4-AgAAQBAJ>. – ISBN 9783834821744
- [11] HOCHBAUM, A. ; HOF, B.: *Kabel- und Leitungsanlagen: Auswahl und Errichtung nach DIN VDE 0100-520*. VDE-Verlag, 2003 (VDE-Schriftenreihe Normen verständlich). – URL <https://books.google.de/books?id=0TPjAAAACAAJ>. – ISBN 9783800726738
- [12] HÄHNEL, Jost: *Alter Elbtunnel in Hamburg wird Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland*. https://www.bingk.de/wp-content/uploads/2015/02/PM_040311_HW8_Buchvorst.pdf. 4. März 2011
- [13] KIEFER, G. ; KREFTER, K.H.: *Schutz gegen elektrischen Schlag: was bei der Errichtung von Niederspannungsanlagen zu beachten ist - Hinweise für die Praxis*. VDE-Verlag, 2008 (VDE-Schriftenreihe). – URL <https://books.google.de/books?id=I2Y1PQAACAAJ>. – ISBN 9783800730483
- [14] MAHR, F. ; HENNINGER, S. ; BILLER, M. ; JÄGER, J.: *Elektrische Energiesysteme: Wissensvernetzung von Stromrichter, Netzbetrieb und Netzschutz*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. – URL <https://books.google.de/books?id=iTuBzgEACAAJ>. – ISBN 9783658349073
- [15] MARENBACH, R. ; JÄGER, J. ; NELLES, D.: *Elektrische Energietechnik: Grundlagen, Energieversorgung, Antriebe und Leistungselektronik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. – URL <https://books.google.de/books?id=BCzvDwAAQBAJ>. – ISBN 9783658294922
- [16] PISTORA, G.: *Berechnung von Kurzschlussströmen und Spannungsfällen: Überstrom-Schutzeinrichtungen, Selektivität, Schutz bei Kurzschluss, Berechnungen für die Praxis mit CALCKUS ; [mit CD-ROM]*. VDE-Verlag, 2016 (VDE-Schriftenreihe Normen verständlich). – ISBN 9783800742240
- [17] RÖTHER, Prof. Dr-Ing. M.: *Grundlagen der Energietechnik*. Sommersemester 2022

- [18] SCHÄFER, K.F.: *Netzberechnung: Verfahren zur Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. – URL <https://books.google.de/books?id=gC3KDwAAQBAJ>. – ISBN 9783658267339
- [19] SCHWAB, A.J.: *Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. – URL <https://books.google.de/books?id=1RoeBAAAQBAJ>. – ISBN 9783642219580
- [20] SIEMENS AG: *SIMARIS Design*. 05.08.2024. – URL <https://www.siemens.com/de/de/produkte/energie/mittelspannung/simaris/simaris-design.html>
- [21] STROMNETZ HAMBURG GMBH: *E-Mail mit Messdaten*. E-Mail. 2024. – Erhalten am [16.04.2024]

A Anhang

Der Anhang zur Arbeit befindet sich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden. Auf der CD befindet sich:

- PDF-Datei der Arbeit
- Simaris Design Projekt
- Übersicht der Simulation
- Übersicht der Betriebsarten in der Simulation
- Datenblatt zu den Frequenzumrichtern

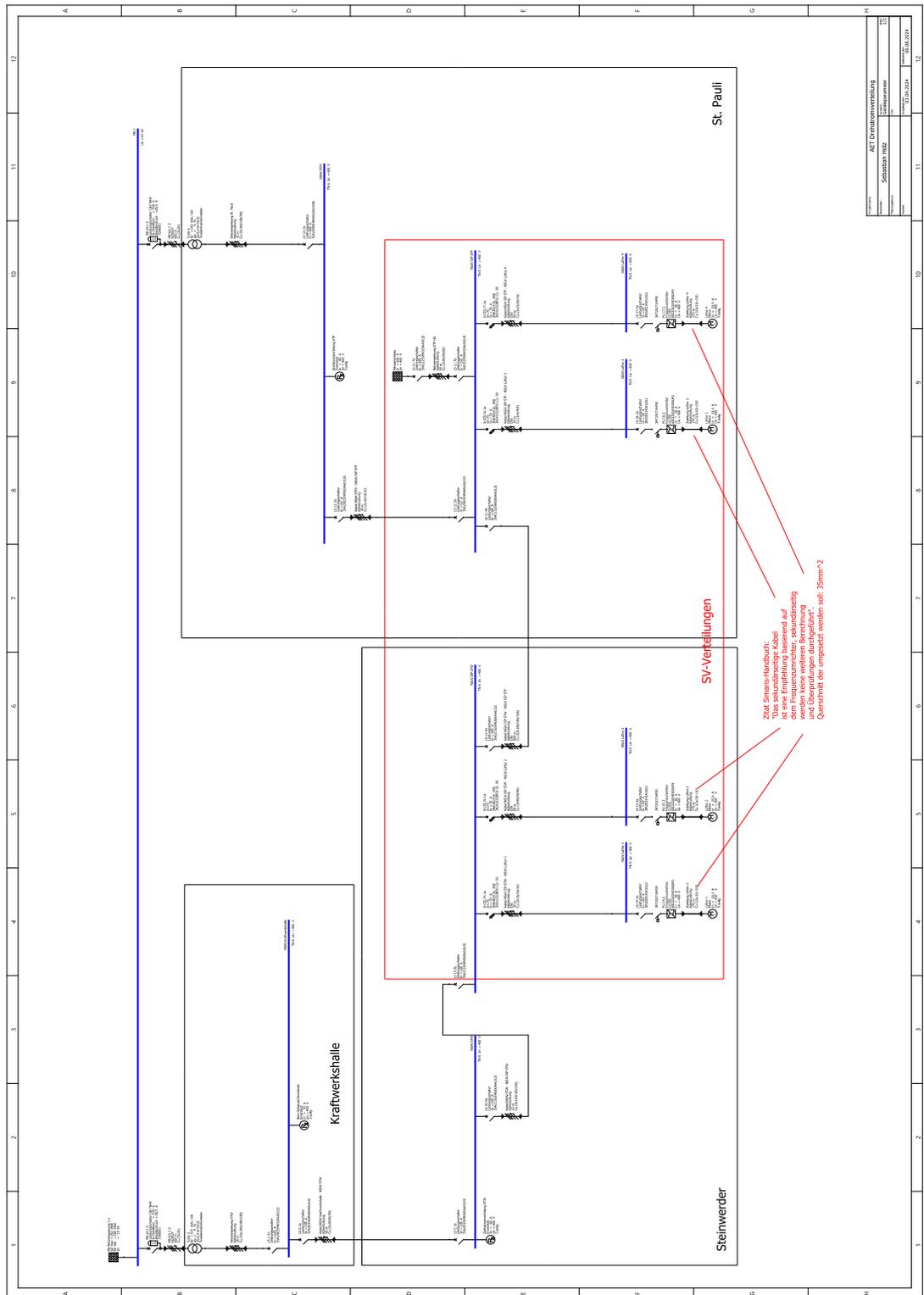


Abbildung A.1: Simulationsaufbau

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort	Datum	Unterschrift im Original
-----	-------	--------------------------