

Grundlagen der Metallbearbeitung und Einführung in den Betrieb des Stromnetzes der TWS Netz GmbH

Praxisarbeit T3_1000

Studiengang Elektrotechnik

Studienrichtung Energie- und Umwelttechnik

Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg, Campus Friedrichshafen

von

Alexander Dreher

Abgabedatum:	09.10.2023
Bearbeitungszeitraum:	12 Wochen
Matrikelnummer:	5642939
Kurs:	TEU22
Ausbildungsfirma:	TWS Netz GmbH
Betreuer der Ausbildungsfirma:	Patricia Schmitz
Gutachter der Dualen Hochschule:	Prof. Dr.-Ing. Konrad Reif

Sperrvermerk

gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3, 4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2017:

Der Inhalt dieser Arbeit darf weder als Ganzes noch in Auszügen Personen außerhalb des Prüfungsprozesses und des Evaluationsverfahrens zugänglich gemacht werden, sofern keine anders lautende Genehmigung vom Dualen Partner vorliegt.

Ravensburg, den 29. September 2023

Alexander Dreher

Erklärung

gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3, 4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2017.

Ich versichere hiermit, dass ich meine Bachelorarbeit (bzw. Projektarbeit oder Studienarbeit bzw. Hausarbeit) mit dem Thema:

Grundlagen der Metallbearbeitung und Einführung in den Betrieb des Stromnetzes der TWS Netz GmbH

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Ravensburg, den 29. September 2023

Alexander Dreher

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ii
Formelzeichenverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
1 Einführung in die Tätigkeiten und Strukturen der TWS Netz GmbH	1
2 Verfahren zur Metallbearbeitung und Grundlagen der Elektrotechnik	2
2.1 Erstellung verschiedener Werkstücke aus Metall	2
2.2 Werkstückherstellung mithilfe verschiedener Metallbearbeitungsverfahren .	3
2.3 Erstellung von elektrischen Schaltungen	8
2.4 Die Integration von Elektrotechnik in den beruflichen Alltag	9
2.5 Herausforderungen in der Metallbearbeitung und Elektrotechnik	13
3 Betriebsaufgaben im Stromnetz der TWS Netz GmbH	14
3.1 Kontrollen und Untersuchungen gefundener Schäden im Stromnetz	14
3.2 Maßnahmen zur Vorbeugung von Schäden im Stromnetz	16
3.3 Die Bedeutung von Vorbeugungsmaßnahmen	22
3.4 Installation verschiedenster Kabelmuffentypen	23
3.5 Stromnetzerweiterungen und -erneuerungen durch die Kabelmuffentechnik	24
3.6 Die Bedeutung von Kabelmuffen im Stromnetz	30
3.7 Inspektion von Schaltfeldern im Stromnetz der TWS Netz GmbH	31
3.8 Schaltfeldmanagement für eine zuverlässige Stromversorgung	32
3.9 Die Relevanz des Schaltfeldmanagements im Stromnetz der TWS Netz GmbH	37
4 Zusammenfassung	38
Literatur	39

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AuS	Arbeiten unter Spannung
bzw.	beziehungsweise
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
FI	Fehlerstromschutzschalter
ggf.	gegebenenfalls
kV	Kilovolt
KVS	Kabelverteilerschrank
ms	Millisekunden
NH-Sicherung ..	Niederspannungs-Hochleistungs-Sicherung
PE/PEN	Schutzleiter
PSA	persönliche Schutzausrüstung
RCD	Fehlerstrom-Schutzeinrichtung
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SW	Schaltwerk
TWS	Technische Werke Schussental GmbH & Co. KG
Ust.	Umspannstation
z. B.	zum Beispiel

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	mm^2	Querschnittsfläche
I_{ges}	A	Gesamtstrom
I_n	A	Strom
l	m	Länge
R_a	Ω	Leitungswiderstand
R_{ges}	Ω	Gesamtwiderstand
R_n	Ω	Widerstand
U_n	V	Spannung
w_n		Anzahl Wicklungen der Spule n
κ	$\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$	spezifischer Leitwert
ρ	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	spezifischer Widerstand

Abbildungsverzeichnis

2.1	Werkstattfeile	3
2.2	MAG-Schweißen	5
2.3	Elektrodenschweißen	7
2.4	Gemischte Schaltung	10
3.1	Lichtbogen	17
3.2	Kräfte im Freileitungsmast	18
3.3	Freileitungsisolator	19
3.4	Schraubverbinder Niederspannung	24
3.5	Strahlennetz	34
3.6	Maschen und Ringnetz	35
3.7	Mittelspannungskabel Schneidung	36

Tabellenverzeichnis

3.1	Materialkonstanten	26
-----	------------------------------	----

1 Einführung in die Tätigkeiten und Strukturen der TWS Netz GmbH

Die Technischen Werke Schussental GmbH & Co. KG (TWS) sind ein ökologisch orientiertes und regional verwurzeltes Unternehmen, das sich seit 2001 um die Versorgung der Bürger in der Region mit Strom, Gas, Wasser und Wärme kümmert. Entstanden ist die TWS aus einer Fusion der Stadtwerke Ravensburg und Weingarten. Im Strombereich bietet die TWS seit 2008 nur Produkte aus regenerativen und erneuerbaren Energiequellen an. So trägt das Unternehmen zum Klimaschutz und zur Vermeidung von CO₂ bei.

In den ersten beiden Praxisphasen wurde hierbei der Fokus auf das Kennenlernen der internen Strukturen und Prozesse der Stromversorgung gelegt, sowie die grundlegende Schaffung von Kenntnissen im Bereich der Metallverarbeitung und der Elektrotechnik.

Zu diesen Tätigkeiten zählen allgemeine Betriebsaufgaben wie die Überprüfung vorhandener Anlagen auf einen einwandfreien und betriebssicheren Zustand. Dabei werden Instandsetzungsaufgaben nötig die unter anderem auch durch gemeldete Schäden und Mängel dritter zustande kommen. Weitere Aufgaben sind im Zusammenhang mit Neubau-, Instandsetzungs- oder Fremdaufträgen verbunden. Diese umfassten Arbeiten im Bereich der Kabelverbindungen sowie die Implementierung effizienter Netzwerkmanagementstrukturen in der TWS Netz GmbH.

Des Weiteren wurden Kenntnisse im Bereich Metallverarbeitung und Elektrotechnik erworben, um ein breiteres Verständnis für verschiedene Problemlösungsmethoden zu entwickeln. Dies schloss das Kennenlernen verschiedener Metallbearbeitungstechniken ein, die in praktischen Aufgabenstellungen angewendet wurden. Im Bereich der Elektrotechnik wurden Kenntnisse in Gleich- und Wechselstromlehre durch die Bearbeitung von Aufgaben unter Anleitung erworben und anschließend in praktischen Experimenten umgesetzt und bewiesen.

2 Verfahren zur Metallbearbeitung und Grundlagen der Elektrotechnik

2.1 Erstellung verschiedener Werkstücke aus Metall

Es sind die wichtigsten Grundlagen zur Metallbearbeitung zu erlernen. Dazu sollen zunächst händische Verfahren erlernt werden, um anschließend Methoden zur maschinellen Bearbeitung kennen zu lernen. Schwerpunkt in dieser Aufgabe besteht darin, Fertigungsverfahren aus dem Bereich Zerspannung, Umformung und Fügung an Problemstellungen anzuwenden. Des Weiteren sollen Kenntnisse über die wichtigsten Eigenschaften verschiedener Metallarten erlernt werden. Außerdem ist es wichtig, dass Vorschriften zum Arbeitsschutz eingehalten und stets mit Bedacht behandelt werden.

Ziel ist eine angeleitete, aber selbstständig durchgeführte Lösung eines Problems, mithilfe der einzelnen Bearbeitungsverfahren durchführen zu können.

2.2 Werkstückherstellung mithilfe verschiedener Metallbearbeitungsverfahren

In der Metallverarbeitung gibt es verschiedene Verfahren zur Herstellung eines Werkstückes. Diese Verfahren werden in Hauptgruppen zusammengefasst und unterscheiden sich in ihren Eigenschaften der Bearbeitung und Veränderung von Rohmaterialien.

Eines dieser Verfahren ist das Trennen. Hierbei handelt es sich um ein spanendes Fertigungsverfahren.

Die spanende Fertigung beschreibt ein Verfahren zur Bearbeitung verschiedener Werkstoffe mit Hilfe von Werkzeugen, bei denen Material vom Werkstoff herausgeschnitten wird, um dessen Form oder Oberfläche zu verändern. Das abgetragene Material wird auch als Span bezeichnet. Zu den spanenden Fertigungsverfahren zählen z. B. das Feilen, Schleifen, Sägen, Bohren, Drehen und Fräsen. Jedes dieser Verfahren hat seine eigenen Eigenschaften und bietet sowohl Vor- als auch Nachteile. [7]

Das Feilen wird meist von Hand ausgeführt, mit sogenannten Werkstattfeilen und dient zur präzisen Bearbeitung von Werkstücken. Eine Werkstattfeile hat wie im Bild zu sehen einen Griff, an dem das Blatt befestigt ist. Auf diesem Blatt gibt es Einkerbungen, welche auch wie Zähne aussehen können. Diese sogenannten Hiebe, welche maschinell in das Blatt gefräst werden oder von Hand eingeschlagen werden, sorgen für den Abtrag des Materials an dem zu bearbeitenden Werkstück. Dies hat zur Folge, dass nur kleinere Arbeiten mit der Feile getätigt werden können, da andernfalls dieses Verfahren zu zeitaufwendig ist. Im Gegensatz zur maschinellen Bearbeitung, wie z. B. beim Fräsen oder Drehen, bietet das Feilen den großen Vorteil, dass auch filigrane Arbeiten auf engem Raum getätigt werden können.



Abbildung 2.1: Werkstattfeile [6]

Zudem unterscheiden sich Feilen in ihrer Hiebzahl. Diese gibt an, wie viele Zähne sich auf einem Centimeter des Blattes befinden. Es gibt Feilen mit wenigen Hieben, welche ihren Anwendungsbereich in der Bearbeitung von weichen Werkstoffen wie Aluminium haben, aber auch zur Grobbearbeitung genutzt werden, um möglichst viel Material abzutragen. Feilen

mit einer großen Anzahl von Hieben tragen nur wenig Material ab und sind meist ungeeignet für weiche Werkstoffe, da die Späne in den Zwischenräumen stecken bleiben, dafür erzeugen diese meist eine glatte Oberfläche mit einer höheren Güte. Die Güte ist eine Oberflächenangabe, welche zur Aussage bringt, wie rau oder glatt diese ist. [8]

Das Fräsen ist neben dem Drehen eines der wichtigsten Metallbearbeitungsverfahren. Die Verfahren unterscheiden sich in den Anwendungsbereichen und Bearbeitungsverfahren.

Hierbei sind Werkstücke, die gedreht werden immer symmetrisch, da ausschließlich Runde Werkstoffe verarbeitet werden können. Dies liegt daran, dass beim Drehen das Werkstück um die eigene Achse und beim Fräsen das Werkzeug gedreht wird.

Das Drehen wird z. B. bei Bolzen, Schrauben oder Unterlagscheiben angewandt und das Fräsen bei z. B. Nuten, Formänderungen oder Bohrungen. Heutzutage unterscheidet man zwischen zwei Arten des Fräsens und Drehens, dem konventionellen und dem Computerized Numerical Control (CNC) Fräsen oder Drehen. Beide Verfahren bieten einen sehr hohen Grad an Genauigkeit und finden einen großen Anwendungsbereich in der Fertigung präziser Werkstücke. Das Fräsen oder Drehen bringt den großen Vorteil mit sich, dass viel Material abgetragen werden kann, jedoch die Qualität des Werkstücks erhalten bleibt. Durch die CNC Technologie ist das Fertigen gleichaussehender Teile automatisiert und für den Fließbandbetrieb ideal. Dies bedeutet, dass es für die Fertigung höher Stückzahlen optimiert wurde. Somit bietet dies Unternehmen die Chance Kosten durch schnelle und präzise Fertigung zu reduzieren. Allerdings gibt es auch Nachteile beim Fräsen oder Drehen, da die Werkstoffe und Werkzeuge sehr großer Hitze ausgesetzt sind und somit die Gefahr herrscht, dass sich die Eigenschaften z. B. des Metalls negativ verändern. Jede Metallart hat ihre eigene Anordnung der Atome, welche die Gitterstruktur ausbilden und durch Hitze verändert werden kann. Durch eine solche Änderung in der Anordnung können sich die Eigenschaften des Metalls verändern, z. B. im Bereich der Umformbarkeit oder Bruchfestigkeit. Um diese thermische Belastung einzuschränken, werden oftmals Kühlflüssigkeiten verwendet. Diese bestehen aus einem Gemisch aus Öl und chemischen Zusätzen, welche die Eigenschaft mit sich bringen, gut Wärme aufzunehmen und ein gutes Schmierverhalten aufzuweisen. Dadurch wird die Reibung zwischen Material und Werkzeug minimiert, wodurch weniger Reibungswärme entsteht. [7]

Ein weiteres Verfahren zur Bearbeitung von Werkstoffen, ist die Umformung. Der große Unterschied zu spanenden Fertigungsverfahren ist hierbei, dass kein Material abgetragen wird, sondern die Form des Werkstücks verändert wird. Da die meisten Metalle die Eigenschaft einer guten Verformbarkeit haben, wird dieses Verfahren überwiegend in der Metallindustrie verwendet. Zu solchen Verfahren zählen z. B. Walzen, Schmieden und Biegen. Das Verfahren ist einfach in der Anwendung und flexibel einsetzbar. Allerdings beschränkt sich dies

auf einfache Problemstellungen, denn sobald ein komplexes Werkstück benötigt wird, reicht dieses Verfahren nicht mehr aus. Ein großer Nachteil beim Biegen ist, dass man einen Mindestbiegeradius einhalten sollte, da sich das Material sonst verjüngt oder gar bricht. Dies bedeutet, dass sich die Dicke des Materials an der biegenden Stelle stark verringert. Um dieses Verhalten zu unterbinden, sollte der Biegeradius vor Beginn der Arbeit beachtet werden. Dazu muss je nach Metallart ein Radius von ein- oder zweifacher Stärke des Materials genommen werden. [1]

Das letzte wichtige Verfahren ist das Fügen. Hierbei werden mindestens zwei Werkstücke zu einer dauerhaften Verbindung gefügt. Zu den wichtigsten Fügeverfahren zählt das Schweißen, welches in Unternehmen einen großen Anwendungsbereich findet. Sei es in der Verbindung und dem Bau von Rohren oder Schiffen, als auch in der Lösung von schnellen Problemen vor Ort, wie z. B. zur Reparatur von Beschädigungen an Wasser- oder Gasrohren. Jeder Einsatzbereich hat andere Anforderungen an das Schweißen, was eine Vielfalt an Schweißmethoden und Verfahren voraussetzt.



Abbildung 2.2: MAG-Schweißen [5]

Eines dieser Verfahren ist das Lichtbogenhandschweißen, in dem mit Hilfe elektrischen Stroms ein Lichtbogen erzeugt wird, der die Materialien schmilzt und bei anschließender Aushärtung miteinander verbindet. Ein Lichtbogen ist eine leitende Verbindung zwischen Metall und Schweißdraht über die Luft, bei der sehr hohe Temperaturen entstehen, welche zum Schmelzen des Drahtes und Metalls führen. Dieses sogenannte Schmelzbad muss durch Zufuhr von einem geeigneten Schutzgas, meist Argon umhüllt sein, um eine Oxidation mit dem Umgebungssauerstoff zu verhindern. Bei einer Oxidation entsteht eine chemische Re-

aktion des Metalls mit dem Umgebungssauerstoff, bei der sich eine Verbindung zwischen Metall und Sauerstoff ausbildet. Chemische Reaktionen mit Sauerstoff werden im allgemeinen als Oxidationen bezeichnet. Diese Oxidation würde zu einer Verschlechterung der Qualität und zu einer Versprödung der Schweißnaht führen. Dies hat zur Folge, dass diese nicht belastungsfähig ist. Die Verwendung von Schutzgas wird nur in den Methoden des Metall-Inertgas- (MIG), Metall-Aktivgas- (MAG) und Wolfram-Inertgas-Schweißens (WIG) verwendet, da es bei diesen Methoden keine andere Möglichkeit zum Schutz des Schmelzbades gibt. Dieses sorgt bei MIG dafür, dass das Schmelzbad nicht mit dem Schutzgas reagiert. Dieses Inerte Verhalten beschreibt eine Reaktionsträgheit, ganz im Gegenteil zum MAG-Schweißen. Hier ist es ein reaktionsfreudiges Gas, auch als Aktivgas bezeichnet, welches mit dem permanent nachgeführten Schweißdraht reagiert. Beim WIG-Schweißen wird ein Inertes Gas verwendet, um die Schweißspitze, welche aus Wolfram besteht vor Reaktionen zu schützen, da diese nicht schmilzt. Bei dieser Methode erzeugt diese nur den Lichtbogen zwischen Metall und Spitze, wodurch das Metall schmilzt und gefügt werden kann, mithilfe von externer Drahtzugabe. Diese drei Methoden bieten den großen Vorteil einer hohen Produktivität, wie auch eine gute Automatisierung, da der Schweißdraht von einer Trommel automatisch und kontinuierlich zugeführt wird.

Im Gegensatz zu diesen Methoden steht das Elektrohandschweißen mit einer Stabelektrode. Hierbei wird kein Schutzgas benötigt, da sich das Schweißbad durch die entstehende Schlacke und den Rauch selbst vom Umgebungssauerstoff isoliert. Die Stabelektrode ist ein Metallstab, welcher von einem Brennstoff umhüllt ist, der die Reaktion beim Schweißen fördert und für die Isolierung des Sauerstoffes sorgt.



Abbildung 2.3: Elektrodenschweißen [3]

Beim Schmelzen dieses Stabs entsteht das Nebenprodukt Schlacke, welches sich auf dem geschweißten Metall absetzt und dieses isoliert, bis es vollständig ausgehärtet ist. Dies bietet dem Anwender den großen Vorteil, dass diese Methode nahezu überall anwendbar ist und keine großen Geräte mit Schutzgaszufuhr benötigen. Deshalb wird diese Methode auch häufig im Außenbereich angewandt. Der größte Nachteil ist hierbei die hohe Rauchentwicklung und das Entfernen der Schlacke. Hierzu sollte in geschlossenen Räumen immer eine Absaugung gewährleistet sein, da die Dämpfe gesundheitsschädlich sind. Zudem ist es beim Schweißen allgemein von hoher Relevanz, dass ein Augenschutz, wie auch eine geeignete persönliche Schutzausrüstung (PSA) getragen wird, um sich vor Funken und Strahlung durch den Lichtbogen zu schützen. [16]

2.3 Erstellung von elektrischen Schaltungen

Im Bereich der Elektrotechnik sollen grundlegende Kenntnisse erlernt werden. Dazu sollen Problemstellungen zunächst theoretisch betrachtet werden, um diese dann Anhand von Versuchsaufbauten praktisch zu betrachten. Dies findet zunächst im Bereich der Gleichstromlehre statt und wird anschließend im Drehstrombereich behandelt. Hier ist es von entscheidender Rolle, dass auch wichtige Regeln und Vorschriften zur Arbeitssicherheit erlernt und beachtet werden, um Arbeitsunfälle zu verhindern.

Ziel ist eine eigenständige Bearbeitung von Problemstellungen und das Erlernen von neuen elektrotechnischen Grundlagen, welche als Hilfestellung zur zielorientierten Bearbeitung dienen.

2.4 Die Integration von Elektrotechnik in den beruflichen Alltag

Im Folgenden geht es um die Lösung von Problemen im Bereich der Elektrotechnik. Hierzu bezieht sich der erste Teil auf die Lösung von Gleichstromproblemen und der zweite Teil auf die Lösung von Wechsel- bzw. Dreiphasenwechselstromproblemen.

In der Gleichstromlehre gibt es z. B. Formeln für Parallel oder in Reihe geschaltete Widerstände, die Kirchhoffschen Gesetze oder das ohmsche Gesetz. Diese Formeln dienen dazu, das Verhalten von Widerständen zu beschreiben, um daraus praktische Schlüsse in der Anwendung dieser zu ziehen. Die Kirchhoffschen Gesetze befassen sich mit dem Verhalten von Spannung, Strom und Widerstand bei geschlossenen Stromkreisen oder einzelnen Punkten, an denen mehrere Kabel zusammenlaufen, den sogenannten Knotenpunkten. Das ohmsche Gesetz dient zum Berechnen des Verhaltens an statischen Punkten im Stromkreis und beschreibt das Verhalten zwischen Strom, Spannung und Widerstand. Ein Widerstand hat unter anderem den Nutzen, die Spannung oder den Strom zu verringern, um den Verbraucher zu schützen. Je nachdem, welches Problem zu lösen ist, muss der Widerstand parallel, in Reihe oder beides in Kombination verwendet werden. Da es allerdings nur festgelegte Widerstandswerte zu kaufen gibt und meist auch nicht alle im Unternehmen vorhanden sind, müssen verschiedene Größen miteinander kombiniert werden. Durch die Verwendung der Formel für parallelgeschaltete Widerstände, kann man z. B. durch die Verwendung zweier $100\ \Omega$ Widerstände herausfinden, dass dadurch ein $50\ \Omega$ Widerstand entsteht. Dies kann beliebig oft angewandt werden, wobei die Formel 1.1 zur Berechnung von parallelen Widerständen nur für eine maximale Anzahl von zwei Widerständen und die Formel 1.2 für eine unbegrenzte Anzahl von Widerständen zählt.

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad (2.2)$$

Zudem ist bei parallelgeschalteten Widerständen zu beachten, dass die Spannung, welche über den Widerständen abfällt gleich bleibt und diese Art der Verschaltung zu einer Reduktion des Stroms führt. Um den gesamten Strom über den Widerständen zu berechnen, kann folgende Formel angewandt werden.

$$I_{\text{ges}} = \frac{U}{R_{\text{ges}}} \quad (2.3)$$

Bei einer Reihenschaltung von Widerständen ist die Berechnung deutlich einfacher, da sich diese lediglich addieren. Somit können beliebig viele Widerstände in Reihe geschaltet wer-

den, um den Gesamtwiderstand zu erhöhen.

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + \dots \quad (2.4)$$

Allerdings ist bei einer Reihenschaltung zu beachten, dass eine Reduktion der Spannung über den Widerständen stattfindet, weshalb dieser Typ Verschaltung angewandt wird bei Verbrauchern, die eine geringere Spannung benötigen, als die anliegende. Zudem ist es möglich beide Typen der Verschaltung zu kombinieren. Hierbei ist dann jeweils zu beachten, welche der Formeln angewandt werden muss, da beide Typen vorhanden sind. Wichtig dabei zu beachten ist, dass das Schaltbild in einzelnen Teilschritten berechnet wird und die beiden Formeln für die Reihen- und Parallelschaltung nicht vermischt werden. Allgemein gilt, dass von innen nach außen gerechnet wird. Im folgenden Beispiel wird eine solche Schaltung nochmals genauer erläutert.

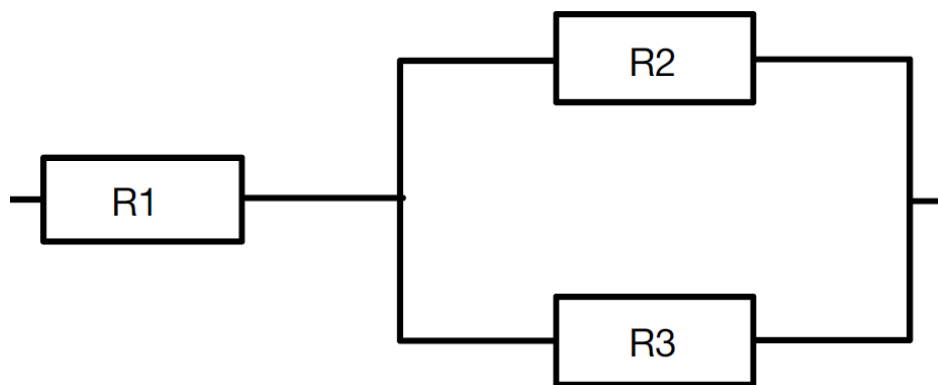


Abbildung 2.4: Gemischte Schaltung (eigene Darstellung)

Hier ist es wichtig zuerst die Parallelschaltung zwischen R_2 und R_3 zu berechnen, um einen Gesamtwiderstand zu erhalten. Mit Hilfe dieses Gesamtwiderstandes kann nun die Reihenschaltung zwischen $R_{2,3}$ und R_1 berechnet werden. Schließlich wird ein Gesamtwiderstand erhalten, über dem die angelegte Spannung abfällt. [17]

Eine weitere wichtige Formel zur Berechnung von Gleichstromkreisen, ist die Knotenregel. Diese findet sich auch im 1. Kirchhoffschen Gesetz wieder und sagt aus, dass an jedem Knotenpunkt in einem Stromnetz gleichviele Ströme hinein-, als auch wieder hinausfließen. So kann an jedem Knotenpunkt, welcher nicht die gleichen Ströme wie ein anderer Knoten hat, eine Knotengleichung aufgestellt werden.

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 \quad (2.5)$$

Gibt es allerdings noch eine unbekannte Variable, dann kann die Schaltung nicht alleinig mit der Knotenregel berechnet werden, sondern benötigt zusätzlich die Anwendung des 2.

Kirchhoffschen Gesetzes, der Maschenregel. Diese Regel besagt, dass alle Spannungen in einer Masche, das heißt in einem geschlossenen Stromkreis von Widerständen, Spannungsquellen, etc. in Summe Null ergeben. In Kombination mit der Knotenregel kann nun fast jedes einfachere Problem in einem Gleichstromkreis gelöst werden.

$$U_1 + U_2 + U_3 - U_4 - U_5 = 0 \quad (2.6)$$

Dieses Verhalten von Widerständen in Bezug auf Strom und Spannung kann durch einfache Versuche nachgewiesen werden. Einer dieser Versuche wäre z. B. , dass man einen einfachen Stromkreis aufbaut, der einen Widerstand und einen Verbraucher z. B. eine Glühbirne beinhaltet. Wird nun mit der Größe des Widerstands variiert, kann bei gleichbleibender Spannung festgestellt werden, dass die Glühbirne dunkler wird, je größer der Widerstand wird.

Ein weiterer Versuch kann durchgeführt werden, indem man zwei Glühbirnen beim ersten Durchgang in Reihe schaltet und beim zweiten Durchgang parallelschaltet. Es konnte beobachtet werden, dass die Glühbirnen bei der Parallelschaltung heller leuchten, als bei der Reihenschaltung. Dies liegt daran, dass in der Reihenschaltung Spannung über der ersten Glühbirne abfällt, da diese einen Widerstand im Stromnetz darstellt. Somit liegt an der zweiten Glühbirne eine geringere Spannung an und Folge dessen leuchtet diese weniger. Bei einer Parallelschaltung ist dies nicht der Fall, da dort an jeder Glühbirne gleichviel Spannung anliegt. Es sinkt lediglich der Strom an jeder Glühbirne. [17]

Das nächste Thema im Bereich Elektrotechnik ist der Wechselstrom bzw. Drehstrom. Diese Art des Stroms hat einen großen Anwendungsbereich im deutschen Stromnetz, aber wird auch in jedem Haushalt oder Firma verwendet. Um nun mit diesem sicher umgehen zu können, sei es bei Reparaturen im Stromnetz oder bei der alltäglichen Verwendung von Haushaltgeräten, muss es Fachkräfte geben, die sich um die ordnungsgemäße Installation und den Bau kümmern. Dazu werden Sie immer zu den aktuellen Sicherheitsstandards informiert und werden gegebenenfalls nachgeschult, z. B. im Bereich Arbeiten unter Spannung (AuS) für Stromnetz Monteure.

Die Installation der Kabel, Lampen, Steckdosen und Lichtschalter werden in der Regel von einem ausgebildeten Elektriker durchgeführt. Hierbei wird meist eine Leitung mit drei oder fünf Adern des Typs NYM-J vom Sicherungskasten aus verlegt und durch Fehlerstromschutzschalter (FI) / Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD) abgesichert. Diese haben die wichtige Aufgabe den Stromfluss zu unterbrechen, um den Menschen vor einem elektrischen Schlag zu schützen, beispielsweise bei einem defekten Haushaltsgerät aus Metall. Deshalb ist es auch von hoher Relevanz, dass Elektroinstallationsschaltungen von einem ausgebildeten Elektriker installiert werden, um zu gewährleisten, dass alle Kabel ordnungsgemäß

angeschlossen wurden. Zusätzlich prüft dieser mit geeichten Messgeräten, ob die FIs und/oder RCDs an denen die Steckdosen angeschlossen sind bei den vorgeschriebenen Werten auslösen.

Beim Bau von Elektrogeräten oder Verlängerungsleitungen ist es ebenfalls wichtig diese vor Verkauf und Inbetriebnahme zu prüfen, ob alle Bauteile nach der Produktion intakt sind. Hier muss zuerst eine Sichtkontrolle auf Beschädigung nach Protokoll durchgeführt werden, da Haushaltsgeräte keine FIs oder RCDs verbaut haben. Anschließend werden die Geräte an ihren Steckern mit Messgeräten gemessen, um festzustellen ob sie alle Grenzwerte einhalten. Hierbei wird vor allem auf den Isolationswiderstand, den Bemessungsdifferenzstrom und die Auslösezeit geachtet.

Die Auslösezeit wird gemessen, um zu prüfen, ob der RCD bei einem möglichen Fehlerstrom in einer festgelegten Zeitspanne auslöst. Dieser Wert liegt normalerweise im zweistelligen Millisekunden Bereich. Hierbei ist wichtig, dass der Grenzwert von 200 ms nicht überschritten wird, um eine rechtzeitige Unterbrechung von lebensgefährlichen Strömen auf den menschlichen Körper zu unterbrechen. [15] [14]

2.5 Herausforderungen in der Metallbearbeitung und Elektrotechnik

Die Problemstellungen aus den Bereichen Metallbearbeitung und Elektrotechnik führten zur Erlernung verschiedener Methoden zur Metallbearbeitung oder zur Lösung von Problemstellungen in der Elektrotechnik. Dazu zählen die Verfahren aus dem Bereich der Metallbearbeitung, wie z. B. dem Feilen, Fräsen und Drehen, welche für vielfältige Problemstellungen angewandt werden können. Zudem kann dieses Verfahren mit mathematischen Theoremen verknüpft werden, um z. B. durch numerische Verfahren, wie in der CNC Technik, Werkstücke präzise zu fertigen. Ein großes Problem dabei ist nur, dass für solch komplexe Maschinen meist Personal mit hoher Fach Expertise und langjähriger Erfahrung benötigt wird. Um dieses Problem ein wenig einzudämmen gibt es auch noch die genannte Methode des kommerziellen Fräsens, in der keine Kenntnisse zu mathematischen Theoremen vorausgesetzt werden. Die Qualität des Endproduktes liegt hierbei in der Hand des Mitarbeitenden und seiner Konzentration, da es bei kleinen Unaufmerksamkeiten schnell zu Fehlern oder Abweichungen im Werkstück kommen kann. Dies führt wiederum zu einer Steigerung der nicht brauchbaren Werkstücke, auch genannt als Ausschuss.

Auch in der Elektrotechnik ist es von Wichtigkeit bestimmte Verfahren zur Bearbeitung von Aufgaben kennenzulernen, da dies ebenfalls das Verständnis für bestimmte Lösungswege fördert. Dieses Verständnis kann anschließend genutzt werden neue Probleme zu lösen und einen zielgerichteten Lösungsweg zu finden. Dies konnte vor allem anhand des Beispiels der RCD Messung gezeigt werden, da diese nicht nur in der Theorie und in der Produktion genutzt wird, sondern auch wichtig für die Arbeit im Niederspannungsbereich ist. Zudem fördert das Wissen über die Vorgehensweise einer Elektroinstallationsschaltung die Ingenieursfähigkeiten und führt zur Entwicklung eines praktischen Verständnisses. Zudem wurden praktische Verknüpfungen zu bereits erlernten Vorlesungsinhalten geschaffen. Diese sorgten für eine weitere Vertiefung dieser und brachten eine Erweiterung des Verständnisses mit sich.

Durch diese erlernten Strukturen wurden verschiedenste Aufgaben und Probleme unter Anwendung der genannten Verfahren erarbeitet und gelöst. Dazu zählten z. B. die Herstellung von Teilen eines Schraubstockes, sowie der Aufbau von elektrischen Schaltungen.

3 Betriebsaufgaben im Stromnetz der TWS Netz GmbH

3.1 Kontrollen und Untersuchungen gefundener Schäden im Stromnetz

Unter dem Begriff Betrieb wird in der Firma TWS Netz GmbH das Betreiben von vorhandenen Anlagen, letztlich die Aufrechterhaltung der Versorgung definiert. Die Betriebsaufgaben haben hierbei im Bereich der Stromversorgung in Form von Kontrollen vorbeugenden Charakter. Sie setzen sich fort in der Untersuchung gefundener oder gemeldeter Schäden mit rechtzeitiger Bekanntgabe erforderlicher Sperrungen, der Errichtung von Umgangsleitungen, dem Stellen von Notversorgungen, Abstellungen, Umstellungen und ähnlichem.

Allgemeine Betriebsaufgaben sind hierbei die Überprüfung vorhandener Anlagen auf einwandfreien, betriebssicheren Zustand. Neben von Dritten gemeldeten Schäden und Mängel sind es diese allgemeinen Betriebsaufgaben, die zu Instandsetzungsaufgaben führen. Spezielle Betriebsaufgaben sind Aufgaben, die im Zusammenhang mit Neubau, Instandsetzungs- oder Fremdaufträgen anfallen. Das Stromnetz ist aufgeteilt in vier verschiedene Spannungsebenen:

- Höchstspannung: Sie dient zur Übertragung von Strom über große Distanzen und wird mit 380 kV betrieben. Durch die hohe Spannung sinken die Leistungsverluste bei der Übertragung über große Distanzen. Dieses Netz wird genutzt, um den Strom von Kraftwerken aus in ganz Deutschland zu verteilen.
- Hochspannung: Dieses Netz wird genutzt, um den Strom regional zu Verteilen und Umspannwerke in größeren Städten mit Strom zu versorgen. In Baden-Württemberg ist dieser Betreiber die Netze BW, welcher die lokalen Umspannwerke versorgt und dort den Strom von 110 kV auf 20 kV transferiert.

3 Betriebsaufgaben im Stromnetz der TWS Netz GmbH

- **Mittelspannung:** Das Mittelspannungsnetz wird mit 20 kV betrieben und wird verwendet, um den Strom mit geringeren Leistungsverlusten zu den Umspannstationen (Ust.) zu übertragen. Es wird hauptsächlich für kleinere Strecken genutzt und dient zur Versorgung von ländlichen Regionen oder Stadtteilen.
- **Niederspannung:** Dieses Netz wird mit 0,4 kV betrieben und dient zur Versorgung von Firmen und privaten Immobilien. Es wird ausschließlich über geringe Distanzen genutzt und wird durch eine hohe Anzahl an Umspannstationen möglichst kurzgehalten, da die Leistungsverluste sehr hoch sind bei großen Strecken.

Das Niederspannungs- und Mittelspannungsnetz im Stadtgebiet Ravensburg und Weingarten wird von der TWS Netz GmbH als Netzbetreiber betrieben. [15]

Die Aufgaben im Niederspannungsnetz betreffen überwiegend die Kabelverteilerschränke und beziehen sich auf die Sichtkontrolle von intakten Sicherungen, angesammelten Verunreinigungen und sicherheitsrelevanten Beschädigungen. Des Weiteren müssen Holz oder Stahlmasten, an denen Freileitungen hängen in regelmäßigen Abständen kontrolliert und dokumentiert werden, um Beschädigungen und Morschheit frühzeitig zu erkennen. Im Mittelspannungsnetz sind die Aufgabenbereiche ein wenig umfangreicher, da dies ausschließlich blanke Freileitungen oder im Boden verbaute Kabel sind. Hier ist ebenfalls eine wichtige Aufgabe die Masten zu kontrollieren und zu dokumentieren, um einen digitalen Zugriff und Informationsaustausch zu schaffen. Bei diesen Freileitungen ist eine wichtige Aufgabe zu überprüfen ob Äste hineinragen, um dies ggf. zu melden und in regelmäßigen Abständen zu entfernen. Außerdem müssen Umspannstationen von Pflanzen befreit werden, um einen einfachen Zugang zu gewährleisten. Zudem ist es wichtig diese auf Feuchtigkeitseintritt, Verschmutzung und Beschädigung zu kontrollieren, da Sie einen wichtigen Knotenpunkt zwischen Mittel- und Niederspannung darstellen. Des Weiteren sind in vielen Ust. Schwefelhexafluorid (SF₆) Anlagen verbaut, um die Mittelspannungsanlagen zu isolieren. Diese müssen auf ausreichend Gasdruck geprüft werden, um die Isolation zu gewährleisten.

3.2 Maßnahmen zur Vorbeugung von Schäden im Stromnetz

Um das Niederspannungsnetz der TWS Netz GmbH intakt und größtenteils störungsfrei zu halten, müssen immer wieder vorbeugende Maßnahmen getroffen werden. Eines dieser Maßnahmen bezieht sich auf die Kontrolle der Kabelverteilerschränke (KVS), welche im gesamten Netz verteilt stehen. Ein KVS ist eine Schaltstelle im Niederspannungsnetz. Dabei wird auf eine Sammelschiene eingespeist und auf Abgangsstränge verteilt. Es treffen zwei Stromkreise in einem KVS zusammen, diese können durch eine Längstrennung voneinander getrennt werden. In einem KVS befinden sich NH-Sicherungen zur Verteilung der elektrischen Energie im Niederspannungsnetz der TWS Netz GmbH.

Diese können bei Gelegenheit, Bauarbeiten oder gezielter Kontrolle geöffnet werden und anschließend auf Mängel kontrolliert werden. Dabei ist es wichtig auf die KVS-Karte zu schauen, um anschließend zu überprüfen, ob die richtigen Leisten, mit den richtigen Sicherungen eingesichert sind. Auf der KVS-Karte stehen alle wichtigen Informationen zum KVS, darunter die Anzahl der Leisten, mit der zugehörigen Kabelbezeichnung und der vorgegebenen Sicherung, welche verwendet werden soll. Außerdem wird überprüft, ob die bereits vorhandenen Sicherungen intakt oder welche kaputt sind. Sicherungen haben die wichtige Aufgabe, bei einem Fehler im Kabel oder beim Anschluss sofort auszulösen, um Gefahren, wie einen Lichtbogen frühestmöglich zu unterbinden.

Lichtbogen Ein Lichtbogen ist ein helles und sehr heißes Licht, welches entsteht, wenn elektrischer Strom über eine Luftstrecke geleitet wird und keine direkte Verbindung zwischen den Leitern besteht.

Zudem sollen Sie die angeschlossenen Verbraucher in diesem Fall Häuser schützen. Eine ausgelöste Sicherung kann schnell erkannt werden, da diese ein sogenanntes Fährnchen besitzt, welches sich bei Auslösung aufstellt. Dieser Mechanismus wird ausgelöst durch einen Draht, welcher mit dem Fährnchen verbunden ist und im inneren der Sicherung schmilzt, sobald der maximale Strom überschritten wird. Anschließend stellt sich dieses Fährnchen bzw. Metallplättchen durch einen federnden Mechanismus auf und signalisiert somit die Auslösung. In diesem KVS sind 4 Kupferschienen installiert. Drei dieser Kupferschienen sind bestimmt für die drei Leiter im Dreiphasenwechselstrom und die übriggebliebene Schiene ist für den Schutzleiter (PEN). Diese Schienen nennt man auch Sammelschienen, weil dort die Leisten montiert sind. Jede Leiste hat die Funktion, dass an diese die vier Adern des Kabels angeschlossen werden können und separat eingesichert werden können. Das Einsichern beschreibt den Prozess, in der man die Sicherungen in die Leisten hineinsteckt und somit eine Verbindung zwischen Kabel und Sammelschiene herstellt. Dieser Prozess ist wichtig, da jede



Abbildung 3.1: Lichtbogen [4]

Leiste mit der Sammelschiene verbunden ist und durch das gezielte Einsichern verschiedene Kabel in Betrieb genommen werden können. Durch das Einsichern wird eine Verbindung zwischen der Sammelschiene und dem Kabel hergestellt. Diese Verbindung, welche über die Sicherung hergestellt wird, sorgt für eine Übertragung des Stroms. Jede Leiste hat ebenfalls einen Anschluss für den PEN-Leiter. Dieser ist zugleich der PE als auch der N Leiter in einem Dreiphasensystem und hat unter anderem die Aufgabe des Rückleiters bei einem unsymmetrischen Dreiphasenwechselstromverbrauch. Ein unsymmetrischer Verbraucher stellt z. B. ein Haus dar, da jeder der drei Leiter mit einem unterschiedlichen Widerstand belastet wird und somit die Ströme der Leiter verschieden sind. Um nun einen möglichen Kurzschluss, heißt die Verbindung zwischen zwei stromführenden Leitern zu verhindern, müssen die KVS regelmäßig kontrolliert und gesäubert werden, sodass diese gar nicht erst entstehen können. [18]

Eine weitere Maßnahme betrifft die Freileitungen im Stromnetz, da diese oftmals an Holzmasten befestigt sind und witterungsbedingt an Stabilität verlieren. Eine Freileitung ist definiert durch ein Kabel, welches an der freien Luft an einem Masten befestigt wird und entweder isoliert oder blank ist. Bei einem nicht isolierten, also blanken Kabel sind die einzelnen Adern aufgeteilt und in einem sicheren Abstand getrennt voneinander befestigt. Dies ist notwendig, um einen Kurzschluss zwischen den stromführenden Leitern, den Adern, zu verhindern. Um zu gewährleisten, dass die befestigte Freileitung Stürmen standhält, müssen die Holzmasten kontrolliert werden. Dazu ist jeder Mast im System hinterlegt und muss nach einem festgelegten Protokoll geprüft werden. Darunter ist die Beschriftung, der Zustand, die

Isolatoren und die Trassenart zu prüfen, sowie ob dieser einen Anker, eine Strebe, eine Kabelaufführung, einen Überspannungsableiter oder eine Erdung hat. Der Anker ist ein Stahlseil, welches an der Spitze des Masts befestigt wird und über einen Stahlstab im Boden befestigt ist. Er kompensiert die auftretenden Zugkräfte im Mast und verhindert so ein Umkippen. Eine Zugkraft beschreibt die Kraft, welche auftritt, wenn an beiden Seiten eines Seils gezogen wird.

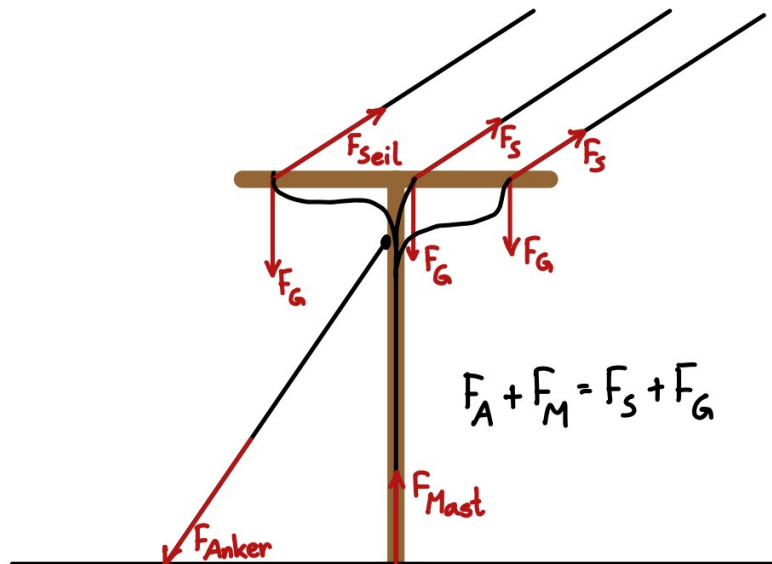


Abbildung 3.2: Kräfte im Freileitungsmast (eigene Darstellung)

Auf dem Bild wird gezeigt, wie der Anker das Umkippen des Masts verhindert, indem er die entstehenden Zugkräfte durch die Freileitungsseile entlang des Ankers aufnimmt. Somit entsteht ein Kräftegleichgewicht zwischen der Seilkraft der Freileitung und der Zugkraft im Anker, womit der gemeinsame Punkt im Mast auf der Stelle gehalten wird und nicht wegkippt. Die Strebe ist ein zusätzlicher Holzmast, der schräg am eigentlichen Mast befestigt wird und dient ebenfalls zur Abstützung des Masts. Sie sorgt für die Aufnahme von Druckkräften, welche entstehen, wenn der Mast gegen die Strebe drückt. Diese Kräfte wollen die Holzstrebe zusammendrücken und sorgen somit für die entstehende Druckkraft. Im Gegensatz zum Seil zieht der Mast nicht an der Strebe, sondern er drückt dagegen. Die Trasse beschreibt eine Freileitung, welche durch die Landschaft verläuft und kann unterschiedlich aussehen, deshalb ist es wichtig die Trassenart zu notieren, um wichtige Informationen über die Anordnung der Seile zur Verfügung zu haben. Anschließend wird der Zustand des Masten geprüft, indem mit einem Hammer dagegen geklopft wird. So kann je nach Geräusch ermittelt werden, ob der jeweilige Mast morsch oder noch in Ordnung ist. Ein Mast kann morsch werden durch Verwitterung oder Tierbefall. Bei entsprechender Beschädigung muss der Mast ausgetauscht werden. Hierzu wird der Abschnitt, indem der Mast getauscht werden soll entschert. Dies bedeutet, dass auf einem Stück zwischen zwei KVS die Sicherungen

entfernt werden, sodass kein Strom mehr fließt und gefahrenfrei an der Freileitung gearbeitet werden kann. Anschließend ist es möglich den beschädigten Mast auszutauschen und den Abschnitt wieder in Betrieb zu nehmen.

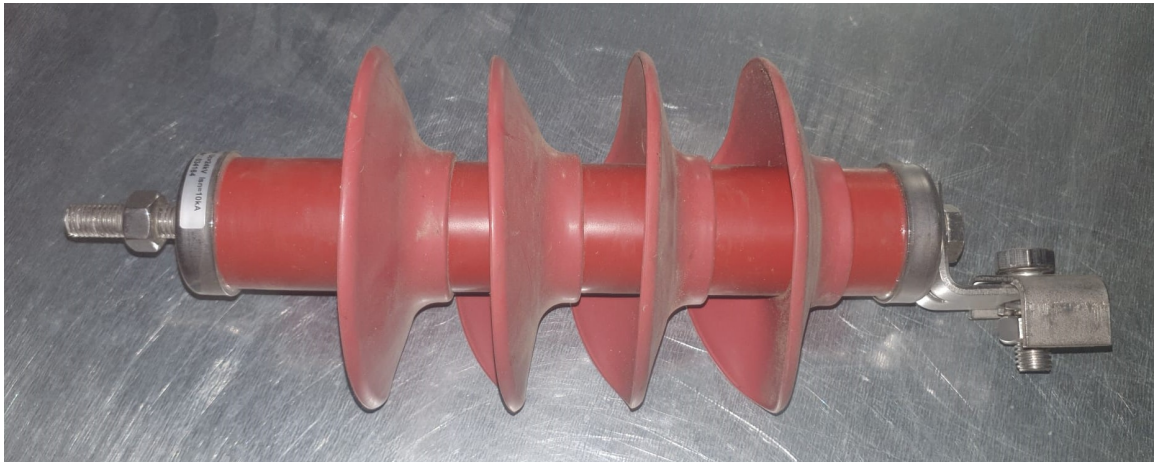


Abbildung 3.3: Freileitungsisolator (eigene Darstellung)

Unter der Prüfung der Isolatoren versteht man die Sichtkontrolle auf Beschädigungen und die Notierung des Materials, da es entweder Keramik oder Kunststoff Isolatoren sein können. Diese haben den Nutzen, die unter Spannung stehenden Freileitungsseile vom Masten zu isolieren, sodass dieser nicht unter Spannung steht. Wie im Bild zu sehen, haben Isolatoren einen speziellen Aufbau, sodass der Strom den längst möglichen Weg überwinden muss, um an das andere Ende zu gelangen. Die tellerförmigen Ringe dienen zur Verlängerung des zurückzulegenden Wegs. Die Beschriftung eines Masten beinhaltet die Nummer, den Typ und die Höhe, welches wichtige Informationen zur Wiedererkennung darstellen. Eine Kabelaufführung beschreibt, wenn an einem solchen Mast ein Niederspannungskabel aus der Erde nach oben geführt wird und in eine Freileitung übergeht. Der Überspannungsableiter und die Erdung sind ein optionales Bauteil an einem Masten und sorgen bei Blitzeinschlag oder anderen Störungen in der Leitung für eine Ableitung der Spannung in die Erde.

Im Mittelspannungsnetz werden häufiger Stahlmasten verwendet, welche ebenfalls einer solchen Kontrolle unterliegen. Das Mittelspannungsnetz besteht entweder aus Kabeln, welche im Erdreich verlegt werden oder aus den typischeren Freileitungen. Das Mittelspannungsnetz in Deutschland führt eine Spannung von 20.000 Volt (20 kV) und die Kabel haben nur die drei Adern L1, L2 und L3. Im Gegensatz zum Niederspannungsnetz, also bis 400 Volt, besitzen diese Leitungen keinen PEN Leiter, da es symmetrisch betrieben wird. Dies bedeutet, dass sich die Spannungen und Ströme gegenseitig aufheben, weil diese gleich groß und lediglich Phasenverschoben sind. Die Verschiebung der Phase kommt von der Erzeugung des Stromes, da sich im inneren eines Generators ein Magnet dreht, welcher zu unterschiedlichen Zeiten bei den drei Spulen vorbeikommt. Diese Spulen bestehen aus ringförmig aufgewickelter Kupferdraht, welche auf das Magnetfeld des drehenden Magneten reagieren und

die Elektronen in Bewegung bringen. Durch die Bewegung der Elektronen, also der kleinsten negativ geladenen Teilchen im Kupferdraht, entsteht eine Differenz in der Anzahl der Elektronen, welche sich im Draht befinden. Durch diese Differenz, auch Potentialdifferenz genannt, definiert sich eine messbare Spannung zwischen den zwei Enden des Drahtes. Diese Spannung wird nun im deutschen Stromnetz genutzt und über Kabel oder Freileitungen verteilt. Das eine allzeitige Versorgungssicherheit herrscht, müssen diese regelmäßig überprüft und im System aufgenommen werden, um eine schnelle Informationsbereitstellung bei Störungen zu gewährleisten. Hierzu wird jeder Mast im Freileitungsnetz auf Beschädigungen geprüft und es werden wichtige Informationen zur Höhe, Befestigungs-, Isolator- und Trassenart dokumentiert. Dies erfolgt nach dem oben genannten Mastprotokoll und wird in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Außerdem ist wichtiger Bestandteil dieser Kontrolle, dass überprüft wird, ob Äste in die blanken Seile hineinhängen, da diese bei Berührung oder Annäherung zu einem Kurzschluss oder Brand führen können. Um dies zu vermeiden, werden bekannte Stellen frühzeitig von Ästen befreit und neu gemeldete Orte kontrolliert und ggf. freigeschnitten. Dieses Freischneiden mit Hilfe von Forstwerkzeugen, wie Kettensägen oder Handsägen, wird ausasten genannt.

Nicht nur Freileitungen oder KVS müssen kontrolliert werden, sondern auch die Schnittstellen zwischen Nieder- und Mittelspannungsnetz. Die Umspannstation transferiert die Mittelspannung mit Hilfe von Transformatoren zur Niederspannung. Ein Transformator ist ein Bauteil im Stromnetz, welches dafür sorgt, eine Eingangsspannung z. B. 20 kV umzuwandeln in eine Ausgangsspannung von 0,4 kV. Dazu besitzt dieser einen Eisenkern, der mit zwei verschiedenen Spulen umwickelt ist, an diese dann die Mittel- und Niederspannung angeschlossen werden kann. Durch die unterschiedliche Wicklungszahl der beiden Spulen ist es möglich die Spannung zu verringern. Mit folgender Formel kann berechnet werden, wie hoch die Wicklungszahl sein muss, wenn man z. B. eine Eingangsspannung U_1 auf eine Ausgangsspannung U_2 transferieren möchte.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (3.1)$$

Stellt man eine Rechnung zu einem alltäglichen Gebrauch der TWS Netz GmbH auf, in dem eine 20 kV Einspeisung in eine 0.4 kV Spannung umgewandelt werden soll, dann kommt man auf folgende Rechnung:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{20000\text{V}}{400\text{V}} = 50 \quad (3.2)$$

Diese sagt nun aus, dass ein Transformator ein 50-faches Verhältnis der Spulenwicklungen benötigt, um Mittelspannung in Niederspannung zu transferieren. Diese unterschiedlichen

Spannungen müssen getrennt voneinander sein und dürfen lediglich über die Spulen magnetisch gekoppelt werden. Dazu muss es in den Umspannstationen trocken und sauber sein, da sonst die Gefahr herrscht, dass eine leitende Verbindung zwischen Mittel- und Niederspannung hergestellt wird. Dies hätte zur Folge, dass es zu einem Kurzschluss kommt und der Transformator zerstört wird. Um es gar nicht erst so weit kommen zu lassen, müssen Umspannstationen bei Besuch sauber gehalten werden und bei festgestelltem Feuchtigkeitseintritt so schnell wie möglich renoviert werden. [18]

Zudem gibt es auch im Mittelspannungsnetz Abzweige zwischen verschiedenen Kabeln. Diese Abzweige werden in Schaltwerken realisiert. Sie funktionieren wie ein großer Bahnhof, in dem einzelne Mittelspannungskabel, von z. B. Umspannwerken oder anderen Mittelspannungskreisen hineinkommen und auf einer Sammelschiene, ähnlich wie im KVS zusammenlaufen. Von dieser Sammelschiene aus können Kabel abgehen und neue Stromkreise bilden. Diese sind deutlich aufwendiger zu schalten, da es in diesem Netz keine Sicherungen zum Umschalten verschiedener Kabel gibt, sondern nur die sogenannten Lasttrennschalter. Diese funktionieren wie Lichtschalter, in denen eine Metallstange zwischen die beiden Kontakte geschaltet wird, sobald man diesen einschalten möchte. Hierbei wird zwischen zwei Typen unterschieden, dem luft- und dem gasisolierten Trennschalter. Der luftisolierte Lasttrennschalter ist sehr pflegeleicht, da man ihn nur selten prüfen muss und dieser langlebig in seiner Funktion ist. Er muss lediglich ausgetauscht werden, wenn ein Defekt im Schaltvorgang vorliegt, z. B. der Metallschalter schließt nicht mehr mit den Kontakten. Bei den gasisolierten Schaltanlagen muss darauf geachtet werden, dass der Gasdruck immer ausreichend hoch ist, da diese auf wesentlich kleinerem Raum gebaut sind und somit nur durch das Gas isoliert werden. Diese Schalter funktionieren gleich, wie die luftisolierten, allerdings wird das Gas Schwefelhexafluorid (SF_6) angewandt um eine Isolierung zu schaffen. Dies hängt mit der engen Bauweise der Anlagen zusammen und hätte ohne Gasisolierung die Folge, dass der Strom von dem einen auf den anderen Schalter überspringt und einen Kurzschluss erzeugt. Ein Überspringen ist eine Verbindung zwischen zwei Leitern über die Luft mit Entstehung eines Lichtbogens und ohne direkten Kontakt der Leiter. Fällt bei Kontrolle dieser SF_6 Zelle auf, dass der Druck zu gering ist, muss diese ausgetauscht werden durch eine neue Zelle. Eine Zelle definiert sich durch einen Block, indem sich drei Schalter für ein Mittelspannungskabel mit drei Adern befinden. SF_6 ist ein chemisch hergestelltes Gas, welches sehr gut isoliert und daher oft bei Schaltern für Mittel- und Hochspannungsanlagen eingesetzt wird. Dieses Gas hat den großen Nachteil, dass es schlecht für die Umwelt ist, weil es zur Erderwärmung beiträgt, wenn es freigesetzt wird. Daher sind die SF_6 Schalter luftdicht abgekapselt zur Zelle selbst, um jeglichen Austritt des Gases zu verhindern. Beim Austausch muss die alte Zelle zum Hersteller oder zu zertifizierten Recyclingunternehmen zurückgebracht werden, um das noch vorhandene Gas rückzugewinnen und die Umwelt zu schützen. [15]

3.3 Die Bedeutung von Vorbeugungsmaßnahmen

Die Kontrolle und Pflege des Nieder- und Mittelspannungsnetzes der TWS Netz GmbH hat eine große Bedeutung für die Versorgungssicherheit im gesamten Versorgungsgebiet. Wie vorherig erläutert, benötigt es eine strukturierte und regelmäßige Begehung der kritischen Punkte im Netz. Dazu zählen vor allem die Freileitungsmasten aus Holz, wie auch die Ust., da Sie die Knotenpunkte im gesamten Netz darstellen. Durch die Versorgung der Ust. mit Mittelspannung, ist es überhaupt möglich ein Niederspannungsnetz zu betreiben. Um Störungen zu vermeiden werden regelmäßige Inspektionen, Wartungen und Überprüfungen durchgeführt. Zudem ist es wichtig, dass Stromnetz fortschreitend zu erneuern, um Schwachstellen früh genug zu erkennen und zu beseitigen. Aber nicht nur die Betreuung der Mittelspannung ist von Relevanz, sondern auch die Pflege des Niederspannungsnetzes, da hier die Verbraucher direkt angeschlossen sind und am schnellsten von Ausfällen betroffen sind. Dies wird durch die gezielte Pflege, Kontrolle und Instandhaltung erreicht, um den Kunden immer eine funktionierende Stromversorgung zu gewährleisten. Diese ist wichtig, um ein positives Image und eine zukunftsfähige Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Andernfalls kommt es zu einem Kundenrückgang, welcher die Zukunft des Unternehmens gefährdet. Des Weiteren sind Kontrollen bei SF₆ Anlagen enorm wichtig, da es sich um umweltschädliche Substanzen handelt und diese Auflagenkonform betrieben werden müssen, um die daraus folgenden Umweltbelastungen zu minimieren. Grundlegend wurden Strukturen zu verschiedenen Betriebsaufgaben, welche zielführend für ein stabiles Stromnetz sind, erlernt. Dazu wurden die Vorgehensweisen unter realen Bedingungen angewandt und vertieft.

3.4 Installation verschiedenster Kabelmuffentypen

Zu den Haupttätigkeitsbereichen des Betrieb Stromnetzes gehören die Kabelverbindungen, Kabelabzweige und Kabelenden, auch Muffen genannt. Diese bringen die Aufgaben der Installation mit sich und können je nach Anwendungsbereich verschiedene Arten der Installation aufweisen. Dazu zählen z. B. die Verbindungsmuffen, die Abzweigmuffen, aber auch spezielle Übergangsmuffen oder Kabelenden im Bereich der Nieder- und Mittelspannung. Zudem unterscheiden sich die Kabelverbindungen im Niederspannungsnetz, mit denen im Mittelspannungsnetz, da dort viel höhere Anforderungen an die Verbindungen gestellt werden und eine höhere Sicherheit vonnöten ist. Um solch eine Qualität zu gewährleisten, muss vorausgesetzt werden, dass jeder Mitarbeiter über die Vorgehensweise und den Umgang mit Material, sowie mit Gefahrstoffen informiert ist und dies bei seinem Problem anwenden kann. Diese Problemstellungen können sich unterscheiden von einem einfachen verbinden zweier Kabel, über den Übergang von verschiedenen Kabelquerschnitten, wie auch ein Abzweig von einem auf zwei neue Kabel. Bei Mittelspannungskabeln fällt der Abzweig weg, da dies technisch nicht möglich ist und somit in einem Schaltwerk oder in einer Ust. durch Lasttrennschalter erfolgt. Zudem fallen auch Kabelenden in den Bereich der Kabelmuffen. Hierbei wird zusätzlich unterschieden zwischen spannungsfesten und spannungsfreien Kabelenden.

Ziel ist das Installieren von Kabelmuffen verschiedener Typen. Zudem soll erlernt werden, wie diese bei verschiedenen Kabeln anzuwenden sind und was dabei zu beachten ist.

3.5 Stromnetzerweiterungen und -erneuerungen durch die Kabelmuffentechnik

Die erste Art der Kabelmuffen, ist die Verbindungsmuffe. Diese dient zur unterbrechungsfreien Verbindung zweier Kabel und findet meist ihren Einsatzbereich in der Verlängerung oder Reparatur vorhandener Kabel. Zudem kann diese Art der Muffe flexibel eingesetzt werden und bietet zwei verschiedene Methoden zur Montage. Eine dieser Methoden ist die Warmschrumpftechnik, in der die zusammengefügte Stelle mit Hilfe von Schrumpfschläuchen isoliert wird. Der Begriff warschrumpfen kommt vom Schrumpfen der Schläuche durch Hitze. Dieses sogenannte Schrumpfen beschreibt den Prozess, in dem sich der Kunststoffschlauch aufgrund seiner chemischen Eigenschaften als Thermoplaste zusammenzieht und nach abkühlen seine Form beibehält. Diese Eigenschaft der Umformbarkeit bei Wärmezufuhr beschreibt die thermoplastischen Kunststoffe. Um nun die beiden Kabel zu verbinden, werden sogenannte Schraubverbinder eingesetzt. Diese können auf ein abisoliertes Kabelende geschraubt werden und stellen eine Verbindung zwischen den Kabeln her.



Abbildung 3.4: Schraubverbinder Niederspannung (eigene Darstellung)

Der auf dem Bild zu sehende Schraubverbinder, wird ausschließlich im Bereich der Niederspannung eingesetzt, da dieser bis zu einem maximalen Aderquerschnitt von 150 mm^2 und 1 kV maximale Spannung einsetzbar ist. Dies ist ausreichend, da im Niederspannungsnetz

der TWS Netz GmbH ein Aderquerschnitt von max. 150 mm^2 eingesetzt wird. Dieser Aderquerschnitt, auch als Nennquerschnitt eines Kabels bezeichnet, gibt die dicke einer einzelnen Ader an, mit Hilfe der sichtbaren Fläche beim Durchtrennen einer Ader. Meist kommt vor diese Angabe noch eine andere Zahl, welche angibt, wie viele Adern ein Kabel hat. Eine solche Bezeichnung sieht wie im folgenden Beispiel aus: $4 \times 150 \text{ mm}^2$. Zur Installation werden die Schraubverbinder auf alle vier Adern eines Erdkabels des Typs NAYY geschraubt und anschließend mit separaten Schrumpfschläuchen isoliert, um einen Kurzschluss zwischen den Leitern zu verhindern. Dieser Erdkabeltyp besteht aus vier Aluminiumleitern, welche einzeln isoliert sind und durch eine zusätzliche Füllung zwischen Außenmantel und Aderisolierung vor Verdrehung geschützt werden. [11]

Um den Außenmantel zu ersetzen, wird bei einer Verbindungsmuffe ein großer Schrumpfschlauch über beide Kabel abgeschrumpft, um das gesamte Muffenpaket zu schützen, wenn es in der Erde liegt. Das Muffenpaket definiert sich aus dem Bündel der vier Schraubverbinder einer Verbindungsmuffe, den abgemantelten Adern der Kabel und dem darüber abgeschrumpften Mantelschlauch. [2]

Die Verwendung von Aluminiumkabel sind im Stromnetz geläufiger als die Verwendung von Kupferkabeln, da diese ein leichteres Gewicht aufweisen und Aluminium kosteneffizienter ist. Vergleicht man dieses Gewicht eines Aluminiumkabels des Typs NAYY mit einem Kupferkabel des Typs NYY, dann kommt man auf eine Reduzierung des Gewichts durch den Aluminiumleiter von ca. 3,5 Tonnen pro Kilometer Kabel. [12]

Dieser Leitungswiderstand kann berechnet werden, mit Hilfe des spezifischen Widerstandes, dem Querschnitt und der Länge des Kabels.

Der spezifische Widerstand ist eine konstante Größe für unterschiedliche Materialien und kann in folgender Tabelle abgelesen werden. Anschließend kann mit Hilfe der folgenden

Tabelle 3.1: Materialkonstanten [17]

Material	Symbol	spez. Widerstand in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	spez. Leitwert in $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$	Temperaturkoeffizient in $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ oder $\frac{1}{\text{K}}$
Aluminium	Al	0,028	36	0,004
Silber	Ag	0,016	63	0,004
Kupfer	Cu	0,018	56	0,004
Gold	Au	0,023	44	0,004
Platin	Pt	0,11	9	0,002
Eisen	Fe	0,125	8	0,005
Manganin	Cu, Fe, Mn, Ni	0,4	2,5	0,00001
Chromnickel	Cr, Ni, Fe	1	1	0,00005

Formel ein Leitungswiderstand für unterschiedliche Materialien, Querschnitte und Längen berechnet werden.

$$R_a = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad (3.3)$$

Dieser Muffentyp wird auch im Bereich der Mittelspannung verwendet, da es die beste Variante zur Verbindung zweier Kabel darstellt. Hier ist die Installation allerdings deutlich komplizierter, da die Verbindung höheren Spannungen standhalten und zudem auch noch besser isoliert werden muss, um Kurz- und Erdschlüsse zu vermeiden. Ein Erdschluss ist eine elektrische Verbindung zwischen stromführendem Leiter und der umliegenden Erde. Je nach Kabeltyp unterscheidet sich der Aufwand, um die Verbindungsmuffe zu installieren. Meist wird diese jedoch bei Kunststoffkabeln angewandt, welche drei einzelne Leiter eines bestimmten Querschnitts aufweisen. Ein solches Kabelbündel hat die Bezeichnung 3x1x300 mm² und sagt aus, dass es drei einzeln isolierte Leiter des Nennquerschnitts 300 mm² sind. Jedes einzelne Kabel benötigt somit eine eigene Muffe, welche nach Einhaltung der Anleitung installiert werden muss. Dies ist von enormer Wichtigkeit, da jede Produktionsreihe andere Vorgehensweisen zur Installation aufweisen kann und somit Fehler und sicherheitsrelevante Probleme entstehen können. Dies betrifft vor allem die exakte Länge der abzumantelnden Bereiche und Schichten der Isolierung, da Mittelspannungskabel verschiedene Isolierungsschichten besitzen, um den Leiter zu schützen. Ein Kabel des Typs NA2XS(F)2Y hat z. B. sieben Schichten um den Leiter herum. Dazu zählen drei leitfähige Schichten, welche dafür sorgen, dass die Spannung an die Isolierung geleitet wird und zwei Kunststoffisolierungsschichten. Die innere der beiden stellt eine Isolierung zwischen dem

Leiter und Kupferdrahtschirm her und die äußere stellt den Mantel dar, welcher das Kabel hauptsächlich vor äußeren Einflüssen schützt. Der sogenannte Kupferdrahtschirm ist bei Mittelspannungskabeln eine zusätzliche Erde und dient zudem auch noch zur Abschirmung von elektrischen Feldern. [10] Diese elektrischen Felder entstehen bei jedem stromdurchflossenen Leiter und müssen vor allem bei Mittelspannung eingedämmt werden. Um bei einer Verbindung zweier Leiter sicherzustellen, dass die Verbindung des Kupferdrahtschirmes besteht, muss dieser ebenfalls verbunden werden. Dies erfolgt meist durch einen kleinen Schraubverbinder. Der Aluminiumleiter selbst, wird durch einen großen Schraubverbinder, mit Hilfe von vier Schrauben verbunden. Diese Schrauben brechen an einem bestimmten Punkt von selbst ab, um immer ein ähnliches Drehmoment zu erreichen. Ein Drehmoment beschreibt die aufzuwendende Kraft bei einer Drehung einer Schraube. Nach installieren des Schraubverbinders, ist es wichtig jeglichen Freiraum mit beiliegendem Füllmaterial zu füllen, um jegliche Lufteinschlüsse zu vermeiden. Diese Lufteinschlüsse in einer Mittelspannungsverbindung würden zu Geräuschen im Isolator des nächstliegenden Schaltwerks führen und sind zu vermeiden. Anschließend wird ein Schrumpfschlauch, welcher für 20 kV geeignet ist über der Verbindung abgeschrumpft, um diese vor Kurzschlüssen zu schützen. Zuletzt ist es noch wichtig einen Mantelschrumpfschlauch über dem Paket aus Schraubverbinder und Kupferschirm abzuschrumpfen, um die gesamte Muffe vor äußeren Einflüssen zu schützen. Da Mittelspannungskabel drei dieser Kabel für die Phasen L1, L2 und L3 besitzen, muss dieser Prozess dreimal wiederholt werden, um eine Verbindung herzustellen. Eine weitere Methode stellt die Gießharzmethode dar, in der als Isolator ein Harz verwendet wird, welches in eine Form gegossen und anschließend ausgehärtet wird. Dieses Harz besteht aus einer zweiteiligen chemischen Mischung, welche nach vermischen miteinander reagiert und zu einer aushärtenden Kunststoffmasse wird. Diese Masse ist letztendlich isolierend und schützt nach Aushärtung die Muffe vor äußeren Einflüssen. Diese Methode wird nur noch bei Abzweigmuffen verwendet, da das Schrumpfverfahren deutlich schneller und einfacher anzuwenden ist. [2]

Im Stromnetzerneuerungsprogramm der TWS Netz GmbH werden lang bestehende Kabelstrecken ersetzt. Dabei müssen Kabel mit verschiedenen Eigenschaften und Querschnitten verbunden werden. Die Kabelauftrennung findet ihre Anwendung bei Kabeln des Typs N(A)KBA, welche alle drei Adern in einem Kabel besitzen und für den Übergang auf einen aktuell verwendeten Kabeltypen, welcher im dreier Bündel vorhanden ist, erst aufgetrennt werden muss. Da ein Kabel des Typs N(A)KBA mit ölgetränktem Papier, einem Bleischirm und einem Jutemantel, heißt einem aus Pflanzen hergestelltem Stoff, isoliert ist, muss vor allem auf umweltgerechte Entsorgung und fachgerechtes Arbeiten unter der Benutzung von PSA geachtet werden. Zudem wird nach entfernen der Isolierung und auftrennen der einzelnen Adern eine abschrumpfbare Ölstoppkappe installiert, um austretendes Öl zu verhindern

und weitere Schädigung der Umwelt einzudämmen. Da dieser Kabeltyp meist einen im Verhältnis sehr kleinen Nennquerschnitt hat, muss zudem eine Übergangsmuffe zum Erhöhen des Kabelquerschnitts installiert werden. Diese Art der Muffe wird äquivalent zu einer Verbindungsmuffe installiert. Allerdings hat diese den entscheidenden Unterschied, dass der Schraubverbinder einschraubbare Plastikeinsätze hat, um auch kleinere Kabelquerschnitte zentriert einzuführen und festzuschrauben. Durch die Zentrierung ist gewährleistet, dass das Kabel immer mittig im Schraubverbinder liegt und nicht bei der Installation verrutscht. Diese Übergangsmuffen gibt es für verschiedene Kabeltypen und sind je nach Problemstellung auch mehrfach, z. B. um einen Zwischenübergang von 95 mm^2 auf 185 mm^2 zu schaffen, um dann auf 300 mm^2 zu verbinden. Kabelverbindungsmuffen und Übergangsmuffen tragen im Mittelspannungsnetz einen wichtigen Anteil in der Versorgungssicherheit, da sie für die Versorgung von Ust. verantwortlich sind und zur Erneuerung und Instandhaltung des Bestandsnetzes beitragen. [2]

Ein weiterer Muffentyp ist die Abzweigmuffe, welche ausschließlich im Niederspannungsnetz verwendet wird und nur in der Gießharzmethode verbaut wird. Diese Muffenart dient dazu eine Abzweigung des Stromkabels zu schaffen, um beispielsweise einen Haushalt anzuschließen. Für die Montage einer Abzweigmuffe wird beim Bestandskabel lediglich der Mantel, heißt die äußere Isolierschicht entfernt, um die einzelnen Adern freizulegen. Um nun einen Abzweig zu schaffen, wird mit Hilfe einer Kabelabzweigklemme ein Kontakt zum Bestandskabel hergestellt. Diese Abzweigklemme hat Spitzen, welche sich bei der Montage, also dem Festschrauben der Klemme um die Adern, durch die Isolierung drücken und sich in den Aluminiumleiter hineintreiben. Durch diese Kontaktpunkte kann nun der Strom fließen und somit können auch die einzelnen Adern in der richtigen Zuordnung an diese Klemme angeschlossen werden. Zuletzt muss noch die entfernte Isolierung wiederhergestellt werden. Dies erfolgt durch eine Plastikform, welche um das Abzweigungsbündel montiert und abgedichtet wird, sodass in diese das Gießharz eingefüllt werden kann. Nach Aushärtung stellt dieser Schutz aus Gießharz die neue Isolierung dar und sorgt für einen Schutz der betroffenen Stelle. Diese Art der Muffe hat eine wichtige Bedeutung im Stromnetz, da man es mit ihr flexibel erweitern kann und somit wenig Aufwand betreiben muss, um z. B. neue Häuser an das Netz anzuschließen. [2]

Ein letzter Typ, der auch zu den Kabelmuffen zählt, ist das Kabelende. Dieses gibt es in zwei verschiedenen Ausführungen, dem spannungsfesten und spannungsfreien Kabelende. Das spannungsfeste Kabelende wird verwendet, um unter Spannung stehende Kabelenden zu isolieren gegen Kurzschluss und zusätzlich zu schützen vor Korrosion oder Beschädigung im Erdreich. Ein Kabel, bzw. der metallische Leiter kann durch eintretende Feuchtigkeit oder dem Umgebungssauerstoff in der Erde korrodieren. Dadurch kann dieser unbrauchbar werden und muss somit durch ein Kabelende geschützt werden. Ein Kabelende kann gezielt

verlegt werden, wenn z. B. bekannt ist, dass in geraumer Zeit das Netzgebiet an dieser Stelle erweitert wird oder es kann entstehen durch die Erneuerung alter Kabel. Hierbei wird das alte Kabel meist nicht komplett aus dem Erdreich entfernt und wird nur versiegelt durch ein Kabelende. So ist gewährleistet, dass das Erdreich durch evtl. austretende Öle geschützt ist und das Kabel nicht korrodiert. Steht das Kabel unter Spannung muss darauf geachtet werden, dass ein spannungsfestes Kabelende montiert wird. Dieses unterscheidet sich zum normalen Kabelende darin, dass jede Ader einzeln mit einer schrumpfbaren Plastiktülle versiegelt wird und somit ein Kurzschluss zwischen den Adern vermieden wird. Eine Plastiktülle ist ein Plastikschauch, der an einem Ende verschlossen ist und wie eine Kappe über der Ader montiert wird. Um zusätzlich das austretende Öl von alten Kabeln zu stoppen und die offenen Adern bei z. B. spannungsfesten Kabelenden zu schützen, wird eine Endkappe über dem gesamten Kabel abgeschrumpft. Diese Endkappe ist bei spannungsfreien Kabelenden ausreichend und benötigt keine zusätzlichen Adertüllen. [2]

3.6 Die Bedeutung von Kabelmuffen im Stromnetz

Das Muffen von Kabeln im Nieder- und Mittelspannungsnetz stellt für Netzerweiterungen und -erneuerungen im Stromnetz der TWS Netz GmbH eine grundlegende Tätigkeit zur Erhaltung der Stromversorgung dar. Fehler in der Montage können dazu führen, dass die Isolierung nicht komplett wasserdicht ist und somit über die Zeit Wasser eintritt und die Muffe langsam kaputt geht. Dieses Wasser sorgt für kleinere Kurzschlüsse zwischen den Phasen, in denen zusätzlich Lichtbögen entstehen und den Leiter langsam schmelzen, bis dieser keinen Kontakt mehr hat. Deshalb muss die Anzahl der Muffen so gering wie möglich gehalten werden, um die Schwachstellen zu minimieren und somit eine Versorgungssicherheit herzustellen. Zudem wird der Kabelwiderstand so gering wie möglich gehalten, um Leistungsverluste durch Kabelwiderstände zu minimieren. Aber auch für den Umweltschutz sind z. B. Übergangsmuffen sehr wichtig, da andernfalls Öl aus alten Kabeln in das Erdreich sickern und dieses belasten würde. Zudem sind diese auch wichtig, wenn verschiedene Kabelquerschnitte verbunden werden, da nur sie für einen reibungslosen Übergang sorgen. Je nach Problemstellung gibt es verschiedene Techniken zur Installation, zwischen denen man auswählen kann. Dazu zählen die Warmschrumpf- oder Gießharztechnik. Beide Techniken wurden individuell an praktischen Problemen, wie z. B. Verbindungs-, Übergangs- und Abzweigmuffen angewandt. Zudem wurden die wichtigsten zu beachtenden Regeln erlernt, um jegliche Art der Kabelmuffe anwenden zu können.

3.7 Inspektion von Schaltfeldern im Stromnetz der TWS Netz GmbH

Ein wichtiger Tätigkeitsbereich in der TWS Netz GmbH betrifft die Schaltfelder. Diese haben die Aufgabe, dass sie kleinere Gebiete im Stromnetz versorgen. Dabei hat jedes Schaltfeld einen eigenen Transformator, der für die Stromversorgung sorgt. Eine der Hauptaufgaben ist es, diese Schaltfelder zu inspizieren, um zu gewährleisten, dass jedes intakt ist und mit dem richtigen Transformator verschalten ist. Sollte dies nicht der Fall sein, muss das Schaltfeld geändert werden. Änderungen können aber auch baubedingt vorgenommen werden und müssen ebenfalls überwacht und nach den Baumaßnahmen zurückgeschaltet werden. Es kann allerdings auch eine neue Verschaltung vorgenommen werden, wenn es vonnöten ist. Diese Aufgabe der richtigen Aufteilung von einem in zwei Schaltfelder gehört auch zum Aufgabenbereich des Stromnetzmonteurs und wird oftmals in der Niederspannung durchgeführt. Zu diesen Aufgaben gehören z. B. die Auftrennung, die Dokumentierung und die Erneuerung der Informationsmedien. Schaltfeldänderungen im Mittelspannungsnetz werden nur durchgeführt, wenn ein Stück der Leitung durch Baumaßnahmen ausgeschaltet werden muss. Die Aufgabe besteht dann darin die Schaltung durchzuführen und ggf. noch ein Mittelspannungskabel zu schneiden. Grundlegend soll erlernt werden, wie sich die Schaltfelder untereinander Verhalten und welche Dinge wichtig zu beachten sind, um bei jeder Aufgabenstellung eine möglichst geringe Netzbeeinträchtigung zu haben.

3.8 Schaltfeldmanagement für eine zuverlässige Stromversorgung

Das Niederspannungsnetz der TWS Netz GmbH unterteilt sich in eine Vielzahl von Schaltfeldern. Jedes Schaltfeld hat die Aufgabe einen kleinen Bereich im Gebiet abzudecken. Dabei teilt sich das Stromnetz in viele verschiedene Zweige, mit Hilfe von KVS und Umspannstationen auf. Da jeder KVS nur eine begrenzte Anzahl an Leisten hat, wie in Kapitel 3.2 erläutert und jeder Transformator nur eine begrenzte Leistung liefert, muss das Stromnetz unterteilt werden. Diese Unterteilung wird realisiert durch Schaltfelder, welche voneinander getrennt sind. Die Trennung der Schaltfelder untereinander spielt eine wichtige Rolle, da es im Falle einer Störung nur ein bestimmtes Schaltfeld betrifft. Somit kann die Störquelle eingegrenzt werden und es sind nur wenige Haushalte betroffen. Diese Auftrennung wird meist in KVS vorgenommen, da diese an andere Schaltfelder angrenzen. In diesen KVS finden sich nicht nur die Kabel des zugehörigen Schaltfeldes, sondern meist auch noch ein Kabel des angrenzenden Schaltfeldes. Dies hat den Hintergrund, dass bei einem Störfall oder Bauarbeiten die Leistung des Schaltfeldes erhöht oder gar ersetzt werden kann, wenn z. B. arbeiten am Transformator stattfinden und dieser sein Schaltfeld nicht versorgen kann. Jeder Transformator hat eine vorgegebene Nennleistung, mit der er bemessen wird. Diese Nennleistung bringt zur Aussage, wie viel Leistung ein Transformator übertragen kann, ohne etwas zu verbrauchen. Diese Leistung wird als Scheinleistung bezeichnet und hat die Einheit kVA. Diese beinhaltet die Wirkleistung und die Blindleistung. Die Wirkleistung bezieht sich auf die Leistung, die ein Verbraucher im Betrieb benötigt und wird in Watt (W) angegeben. Diese Leistung bezieht sich auf einen realen Verbrauch, heißt auf einen rein ohmschen Widerstand. Die Blindleistung hingegen ist die verbrauchte Leistung durch Verschiebung der Phase und wird in var angegeben. [9]

Diese entsteht an der Ausgangsseite des Transformators durch unsymmetrische Verbraucher und kann variieren. Um einen Transformator richtig zu bemessen in der Leistung wird dieser in VA angegeben, um die Verluste durch Blindleistung mit einzubeziehen. Je nach Größe des Transformators hat dieser unterschiedlich hohe Bemessungsleistungen, welche in der Dimensionierung des Schaltfeldes beachtet werden müssen. Die Dimensionierung beschreibt die Festlegung bestimmter Größen eines technischen Produkts, um die geforderten Probleme zu erfüllen. Diese entscheidet letztendlich darüber, wie viele Verbraucher über das Stromnetz an den Transformator angeschlossen werden können, ohne diesen zu überlasten. Ein Transformator kann grundsätzlich in einer Notsituation überlastet werden, allerdings funktioniert dies nur über einen kurzen Zeitraum und in einem gewissen Maß. Eine zu lange Überlastung würde zu einer Überschreitung der Grenztemperatur führen und hätte zur Folge, dass die Isolierfähigkeit des isolierenden Öls im inneren des Transformators abnimmt. [19]

Daher ist es für den Betrieb des Stromnetzes von hoher Relevanz die Umspannstationen so zu managen, dass jeder Transformator unter seiner Nennleistung arbeitet. Bei einem zu groß werdenden Schaltfeld, durch ein z. B. dazu kommendes Neubaugebiet, muss die vor Ort betroffene Umspannstation auf die maximale Nennleistung überprüft werden und entweder durch eine neue Umspannstation vergrößert, erweitert oder ergänzt werden. Eine Erweiterung dieser Art zieht eine Änderung des Schaltfeldes mit sich, um die Verbraucherleistung neu aufzuteilen. Diese Änderung muss zuerst im Schaltfeldplan angepasst werden, um jedem Mitarbeitenden des Stromnetzes eine aktuelle Auskunft zu bieten. In diesem Schaltfeldplan sind alle Schaltfelder des gesamten Stromnetzes eingezeichnet und farblich voneinander getrennt, um die einzelnen Stromkreise zu unterscheiden. Somit muss ein neues Schaltfeld eine neue farbliche Kennung bekommen und muss an den angrenzenden Stromkreisen aufgetrennt werden. Dieses sogenannte Auftrennen beschreibt den Prozess, in dem die Sicherungen im KVS entfernt werden, an der Stelle, wo das Kabel des neuen Schaltfeldes angeschlossen ist. Somit wird die Verbindung zur Sammelschiene unterbrochen und das Kabel wird nur noch von der neuen Ust. aus versorgt. Anschließend müssen an den geänderten KVS und Ust. die Stationskarten/KVS-Karten ausgetauscht werden, um auch dort ersichtlich zu machen, wie das neue Schaltfeld aufgebaut ist. Diese Information ist entscheidend, um bei einem Störfall im Schaltfeld schnell einzugrenzen, wo sich die Störung befinden könnte. Eine sogenannte Schaltzustandsstörung ist z. B. eine solche Art der Störung. Hierbei wurde eine ausgelöste Sicherung festgestellt oder eine Störung der Stromversorgung vom Kunden gemeldet, in der allerdings unbekannt ist, wo sich der Fehler befindet. Um eine solche Art der Störung zu beheben ist es wichtig ein ersichtliches Schaltfeld vorzufinden, um die Ursache auf ein bestimmtes Schaltfeld zu reduzieren. Zudem hilft die Selektivität des Schaltfeldes den Fehler weiter einzudämmen, da in einem selektiven Netz die Sicherungen zum Verbraucher kleiner dimensioniert sind. Dies bedeutet, dass für ein Kabel, welches von einer Umspannstation abgeht zu einem KVS eine höhere Sicherung, heißt gegen einen höheren Strom z. B. 250 A abgesichert ist und ein Kabel, welches zu einem Hausanschluss führt, nur mit z. B. 160 A abgesichert ist. Selektivität ist eine Funktion des Netzschutzes. Durch Selektivität in einem Stromkreis, wird bei einer Fehlerstelle nur die Schutzeinrichtung unmittelbar vor der Anlage ausgelöst. Dies wird im Stromnetz der TWS Netz GmbH durch Schmelzsicherungen in den Knotenpunkten gewährleistet. Die Schmelzsicherungen werden in den Anlagen mit unterschiedlichen Nennströmen eingebaut, um eine Abstufung zur Anlage hinzuerhalten. Zudem wird das Netz rund um eine Ust. mit der Stromnetzart des Maschennetzes betrieben. Ein Maschennetz beschreibt eine Stromnetzart, in der jeder Knotenpunkt, hier als KVS oder Ust. bekannt, von mehreren Verbindungsleitungen versorgt wird. Dies bringt den Vorteil, dass bei einem Kabelausfall durch Beschädigung oder Erneuerung der jeweilige KVS von mehreren Verbindungsleitungen aus versorgt wird. Somit ist immer eine Versorgung von mehreren Anschlussseiten gewährleistet, welches die Störan-

fälligkeit zusätzlich reduziert. Somit kann bei einem Kabelausfall jeder KVS weiterversorgt werden, da er von anderen Stromkreisen, den Maschen ebenfalls versorgt wird. Vereinzelt wird das Prinzip des Strahlennetzes verwendet, welches nur von einem Knoten aus versorgt wird. Kommt es bei einem solchen Netztyp zu einer Störung, fällt meist der Strom auf der gesamten Länge des Strahls aus, da diese Masche an keinen zweiten Knoten angebunden ist. [15]

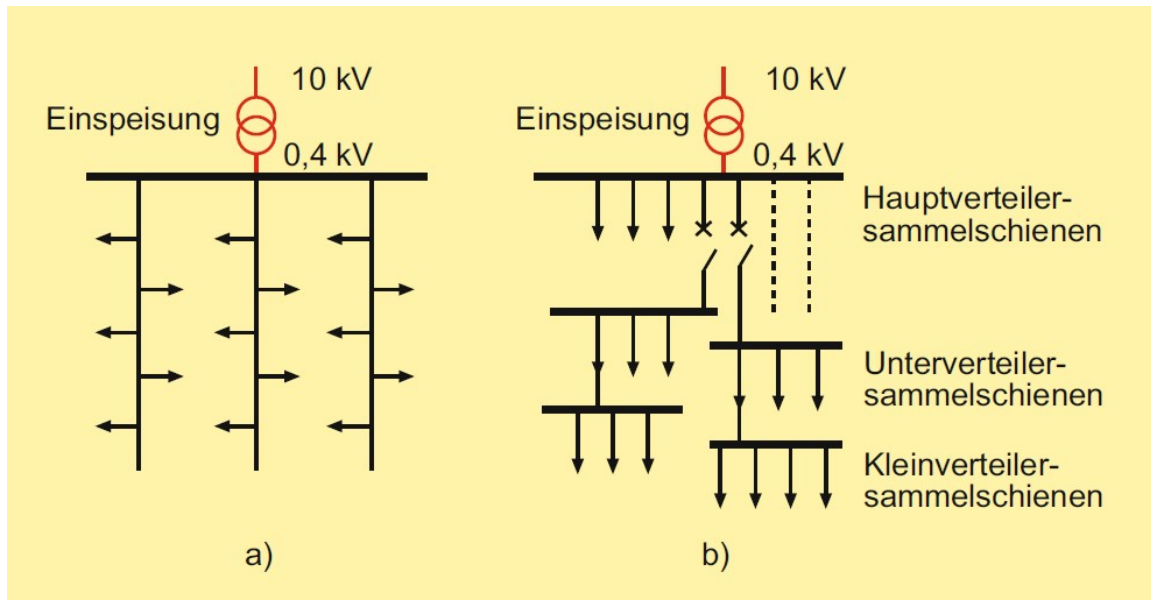


Abbildung 3.5: Strahlennetz [15]

Bei den Schaltkreisen im Mittelspannungsnetz ist das Management ein wenig komplizierter, da diese für die Hauptversorgung der Niederspannungsschaltfelder verantwortlich sind und eine der wichtigsten Knotenpunkte im Stromnetz darstellen. Aus diesem Grund ist es essenziell, diese im Ringnetz oder Maschennetz zu versorgen, um auch bei Störungen oder Bauarbeiten eine Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Bei einem Ringnetz hängt jede Masche auf zwei Knoten und kann somit ähnlich wie beim Maschennetz in abgewandelter Form von zwei Knoten aus versorgt werden. Änderungen in diesem Netz, z. B. durch Baustellen müssen immer so geplant werden, dass nur ein Teilstück des Ringes ausgeschaltet wird, um eine Versorgung weiter zu garantieren. Zudem sollte man in den Schaltplänen überprüfen, ob es an einer Ust. oder einem Schaltwerk in der Nähe der Baustelle eine offene Verbindung zu einer anderen Masche gibt, um diese ggf. dazuzuschalten. Dadurch kommt eine zusätzliche Verbindung im Knoten hinzu, welche bei unerwarteten Störungen größere Stromausfälle vermeiden kann, da der Knoten von mehreren Maschen versorgt wird. [15]

Grundsätzlich muss eine Schaltung im Mittelspannungsnetz beim Netzbetreiber des vorgelagerten Netzes beantragt werden. Dies bedeutet, dass die vorher höher gehende Netzebene

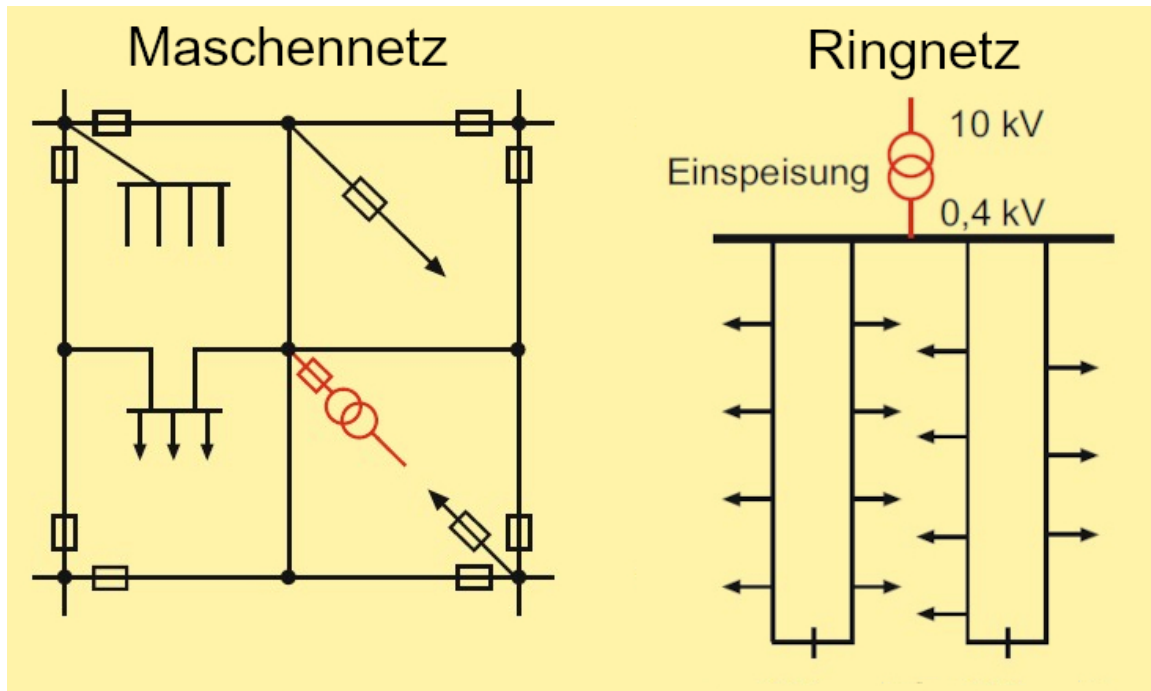


Abbildung 3.6: Maschen- und Ringnetz [15]

von einem anderen Netzbetreiber betrieben wird. In diesem Fall betrifft dies den Antrag bei der Netze BW GmbH als Leitstelle. Die Leitstelle ist eine Zentrale, in der das komplette Stromnetz der Umgebung überwacht wird und über jegliche Störung informiert wird. Sie ist Informationsempfänger und Vermittler für sämtliche Anliegen rund um ihr Einsatzgebiet und ist der erste Ansprechpartner für Mittelspannungsanliegen. Diese überprüfen anschließend ob eine Schaltung an den gewünschten Stellen möglich ist und geben diese dann frei. Dieser sogenannte Schaltantrag beinhaltet nicht nur die Genehmigung der Schaltung, sondern auch einen genauen Ablauf, wie diese stattzufinden hat. Darunter zählen die Tätigkeiten, des Ein- oder Ausschaltens des Lasttrennschalters, wie auch das Einlegen oder Entfernen der Erde. Die Schaltung des Lasttrennschalters bringt mit sich, ob das angeschlossene Mittelspannungskabel mit der Sammelschiene verbunden ist und unter Spannung steht oder nicht. Bei einem ausgeschalteten Kabel muss der Schalter für die Erde eingelegt werden. Dieser funktioniert gleich wie ein Lasttrennschalter, nur dass dieser dafür sorgt, dass das Kabel mit der Erde verbunden ist und somit sämtliche Fehlerströme in das Erdreich abgeleitet werden. Da dieses Netz im Ring- oder Maschenetz betrieben wird, reicht es nicht aus, den Lasttrennschalter von einer Seite auszuschalten. Dieser muss immer auf beiden Enden des Kabels ausgeschaltet werden, um eine Spannungsfreiheit herzustellen. Diese muss anschließend mit einem Mittelspannungsprüfer überprüft werden, um sicherzustellen, dass diese auch wirklich vorliegt. Ein Mittelspannungsprüfer ist ein Messgerät zur Feststellung der Spannung an Anlagen bis zu einer Nennspannung von 36 kV. Die Messspitze wird hierfür an die Phasen der Sammelschiene gehalten und zeigt anschließend an, ob eine Spannung anliegt. [13]

Nach feststellen der Spannungsfreiheit können nun arbeiten am Kabel oder in der Nähe des Kabels durchgeführt werden. Diese beziehen sich oftmals auf die Verlegung neuer Kabel, arbeiten von anderen Bauunternehmen in der Nähe des Kabels oder das Schneiden eines alten oder auszutauschenden Kabels.

Das Schneiden eines Mittelspannungskabels funktioniert mit Hilfe einer Sicherheitsschneid-anlage. Diese Anlage besteht aus einem hydraulischen Schneidkopf und einer zugehörigen Pumpe. Dies bedeutet, dass die gesamte Anlage mit einem nichtleitenden Öl betrieben wird, welches durch Erhöhen des Drucks dafür sorgt, dass sich der Schneidkopf schließt. Durch Schließen des Schneidkopfes wird das zu schneidende Kabel durchtrennt.



Abbildung 3.7: Mittelspannungsschneidgerät (eigene Darstellung)

Im Falle eines unter Spannung stehenden Kabels, sorgt das nichtleitende Öl dafür, dass keine Gefahr für Mitarbeitende entsteht und diese trotzdem das Kabel durchtrennen können. Vorausgesetzt wird, dass dieser Fall nicht eintritt. Dafür werden Maßnahmen getroffen, die die Überprüfung der Netzpläne beinhalten, um sicherzustellen, dass dieses Kabel inaktiv ist. Zudem muss vor jedem Kabelschnitt Rücksprache mit der zuständigen Leitstelle gehalten werden, welche zusätzlich die Spannungsfreiheit und die Zulassung zur Schneidung überprüft und freigibt.

3.9 Die Relevanz des Schaltfeldmanagements im Stromnetz der TWS Netz GmbH

Die Schaltfelder im Niederspannungsnetz haben einen großen Einfluss auf die Effektivität und Funktionalität des Stromnetzes. Um diese Eigenschaften jederzeit zu gewährleisten, ist es vonnöten diese Schaltfelder zu überwachen und zu managen. Zudem muss jedes Schaltfeld so zusammengestellt werden, dass selbst bei einem unerwarteten Ausfall eine Versorgungssicherheit hergestellt ist. Diese Sicherheit kommt vor allem aus den genannten Punkten der maximalen Nennleistung eines Transformators und den verschiedenen Netztypen. Die Nennleistung ist hinsichtlich einer Notsituation von enormer Relevanz, da diese entscheidend ist für ein stabiles Netz. Wie im Kapitel 3.8 erläutert, kann ein solcher Transformator auch über kürzere Zeit höhere Leistungen erbringen, welche meist nicht vonnöten sind, da die Schaltfelder so aufgeteilt wurden, dass genügend freie Leistung zur Verfügung steht. Sollte ein Transformator an seine Grenzen kommen, gibt es die Möglichkeit diesen durch einen größeren auszutauschen oder das Schaltfeld aufzuteilen und eine neue Ust. zu bauen. Nicht nur der Transformator sorgt für ein störungsfreies Netz, sondern auch die Selektivität. Auch der Netztyp, welcher im Kapitel 3.8 vorkommt, trägt zu einem stabilen Netz bei. Dies liegt vor allem an der Versorgung von zwei oder mehr Seiten, wie es im Ring- oder Maschennetz der Fall ist. Dadurch ist es zusätzlich möglich Baustellen zu realisieren, ohne Unterbrechungen im Stromnetz. Das Mittelspannungsnetz ist ein Hauptakteur, wenn es um die Versorgung des Niederspannungsnetzes geht und ist Grundvoraussetzung für eine funktionierende Stromversorgung. Dazu hat dies auch den Netztyp des Ring- oder Maschennetzes, um eine Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Diese Sicherheit kann durch ein Strahlennetz nicht erreicht werden, da es bei einer Störung zu einem Gesamtausfall auf der Länge des Strahls kommen würde. Zudem kann in einem Ring- oder Maschennetz flexibel geschaltet werden, um sich den aktuellen Vorkommnissen anzupassen. Die Rücksprache und Beantragung von Vorkommnissen im Mittelspannungsnetz mit der Leitstelle tragen zu einer Sicherheit in der Versorgung, als auch beim Mitarbeitenden vor Ort bei, da dieser über die Situation informiert ist und sich ggf. schützen kann. Dies erfolgt z. B. durch zusätzliche Spannungsprüfungen oder speziellem Werkzeug zum Schneiden von Kabeln unter Spannung. Dies dient vor allem dazu, vor dem Ernstfall geschützt zu sein, falls eine Fehlinformation durch das System übermittelt wurde. Die Problemstellungen im Stromnetz der TWS Netz GmbH wurden durch Anpassungen und Änderungen im Schaltfeld gelöst, um dem Verbraucher ein funktionierendes Netz zu gewährleisten. Dazu wurde theoretisches Wissen aus den Theoriephasen angewandt, um eine optimale Entscheidung in der Verschaltung zu treffen.

4 Zusammenfassung

Die Praxisarbeit konzentrierte sich auf die Betriebsaufgaben der Stromversorgung bei der TWS Netz GmbH. Dabei wurden verschiedene Aufgabenbereiche erkundet, um die wesentlichen technischen und organisatorischen Prozesse in der Stromversorgung zu erlernen. Diese Prozesse dienen nicht nur als Unterstützung bei Stromnetzproblemen, sondern fördern auch die theoretische und praktische Herangehensweise zur Lösung von Problemen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch Fertigkeiten in der Metallbearbeitung erarbeitet, welche das Verständnis für die richtige Auswahl von Werkzeugen und Verfahren zur Problemlösung förderten. Um solche Entscheidungen genauer zu treffen, wurden mathematische Theoreme im Bereich der Elektrotechnik erlernt und angewandt, insbesondere zur Berechnung von Stromkreisen, Leitungswiderständen und Transformatorleistungen. Diese Berechnungen tragen zur Stabilität und Zuverlässigkeit des Stromnetzbetriebs bei und dienen als Grundlage für die Planung von Erneuerungsbauten, um den Stromnetzbetrieb nachhaltig zu gewährleisten.

Es ist jedoch nicht ausreichend, das Stromnetz auf Grundlage theoretischer Werte zu verwalten, da Umwelteinflüsse ebenfalls eine erhebliche Rolle spielen. Regelmäßige Kontrollen des Stromnetzes sind daher entscheidend, um Abweichungen frühzeitig zu erkennen und zu beheben, insbesondere bei Freileitungen. Bei Erdkabeln sind präzise Montagestrukturen und die Wahrung der Anlagensauberkeit von besonderer Bedeutung, um eine störungsfreie Stromversorgung sicherzustellen. Dies gilt insbesondere für Schwachstellen wie Kabelmuffen, die anfällig für Netzstörungen sind, wenn bei der Montage nicht auf Genauigkeit geachtet wird.

Die Einhaltung von Richtlinien und Sicherheitsvorschriften, insbesondere im Mittelspannungsbereich, ist von großer Bedeutung, um Personenschäden zu vermeiden und Umweltauswirkungen zu minimieren. Das Ziel ist stets, eine stabile und leistungsfähige Stromversorgung für die Kunden sicherzustellen.

All diese Aktivitäten und Strukturen der TWS Netz GmbH fördern die Verknüpfung theoretischer Kenntnisse mit praktischen Herausforderungen und unterstützen die eigenständige Lösung von Problemen unter Anwendung ingenieurtechnischer Methoden.

Literatur

- [1] Dieter Arendes. *Einführung in die Umformtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023. ISBN: 978-3-658-42033-8. DOI: 10.1007/978-3-658-42034-5.
- [2] BBC Cellpack GmbH. *BBC Cellpack Produktkatalog*. URL: https://electricalproducts.cellpack.com/fileadmin/user_upload/bbcgroup.biz/downloads/eproducts/used/DE/Cellpack_Produktkatalog_DE_new.pdf (besucht am 27.09.2023).
- [3] *Bild Eletrodenschweißen*. URL: <https://schweissen-stuttgart.de/images/Elektrode-Kurs-Esslingen.jpg> (besucht am 26.09.2023).
- [4] *Bild Lichtbogen*. URL: https://www.pv-magazine.de/wp-content/uploads/sites/4/2022/09/03030_Lichtbogen_Lichtbogen.jpg (besucht am 26.09.2023).
- [5] *Bild MAG-Schweißen*. URL: <https://hangar44.de/wp-content/uploads/2020/07/Bild4.jpg> (besucht am 26.09.2023).
- [6] *Bild Werkstattfeile*. URL: <https://www.qy1.de/img/werkstattfeile-flachstumpf-314056.jpg> (besucht am 26.09.2023).
- [7] Jochen Dietrich und Arndt Richter. *Praxis der Zerspantechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. ISBN: 978-3-658-30966-4. DOI: 10.1007/978-3-658-30967-1.
- [8] Ralf Förster und Anna Förster. *Einführung in die Fertigungstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 978-3-662-54701-4. DOI: 10.1007/978-3-662-54702-1.
- [9] Markus Hufschmid. *Grundlagen der Elektrotechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. ISBN: 978-3-658-30385-3. DOI: 10.1007/978-3-658-30386-0.
- [10] NKT GmbH & Co. KG. *Datenblatt Mittelspannungskabel NA2XS(F)2Y*. URL: https://nkt.widen.net/content/graupnypdw/pdf/NA2XS_F_2Y-18_30_DSDEENACC_MV_DS_DE-EN.pdf?u=gj0n1y (besucht am 27.09.2023).

- [11] NKT GmbH & Co. KG. *Datenblatt Niederspannungskabel NAYY*. URL: https://nkt.widen.net/content/kylr5lgsli/pdf/NAYY-0.6_1-kV_DSDEENAPP_LV_DS_DE-EN.pdf?u=gj0nly (besucht am 27.09.2023).
- [12] NKT GmbH & Co. KG. *Datenblatt Niederspannungskabel NYY*. URL: https://nkt.widen.net/content/n5ywhdqqi6/pdf/NYY-0.6_1-kV_DSDEENAPP_LV_DS_EN-DE.pdf?u=gj0nly (besucht am 27.09.2023).
- [13] PFISTERER Kontaktsysteme GmbH. *Datenblatt Spannungsprüfer*. URL: <https://catalogue.pfisterer.com/de/93012001000020/> (besucht am 27.09.2023).
- [14] Siegfried Rudnik. *Erstprüfung von elektrischen Anlagen*. 6. überarbeitete Auflage. VDE-Schriftenreihe - Normen verständlich. Berlin, Offenbach: VDE VERLAG GMBH, 2020. ISBN: 978-3-8007-5261-4.
- [15] Adolf J. Schwab. *Elektroenergiesysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 978-3-642-21957-3. DOI: 10.1007/978-3-642-21958-0.
- [16] Ralf Späth. *Betriebsfeste Konstruktion und Berechnung von Schweißverbindungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023. ISBN: 978-3-658-40788-9. DOI: 10.1007/978-3-658-40789-6.
- [17] Wilfried Weißgerber. *Elektrotechnik für Ingenieure 1*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN: 978-3-658-21820-1. DOI: 10.1007/978-3-658-21821-8.
- [18] Wilfried Weißgerber. *Elektrotechnik für Ingenieure 2*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. ISBN: 978-3-8348-1031-1. DOI: 10.1007/978-3-8348-2072-3.
- [19] Torsten Werth. *Netzberechnung mit Erzeugungsprofilen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN: 978-3-658-12727-5. DOI: 10.1007/978-3-658-12728-2.