

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Fakultät 3

Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen

Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik

Zentrum für Energietechnologie

Forschungszentrum 3E

Siemens-Halske-Ring 13

03046 Cottbus



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Untersuchung der Auswirkungen des Kabelzubaus auf die Sternpunktterdung anhand eines für Brandenburg typischen 110-kV-Modellnetzes

Studie

im Auftrag des

Ministeriums für Wirtschaft und Energie

des Landes Brandenburg

unter Mitwirkung der

E.DIS AG

MITNETZ STROM mbH

WEMAG Netz GmbH

Lehrstuhl Energieverteilung und Hochspannungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Peter Scheffler

Koordinatoren:

Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz

Dr.-Ing. Klaus Pfeiffer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Formel- und Abkürzungsverzeichnis	4
1 Einleitung	6
2 Ausgangssituation und Beherrschung des Erdschlussreststromes bei Kabelzubau	8
2.1 Bildung von Teilnetzen unter Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung	9
2.2 Einsatz von Trenntransformatoren unter Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung.....	12
2.3 Umstellung der Resonanzsternpunktterdung auf die niederohmige Sternpunktterdung	13
3 Darstellung des Modellnetzansatzes zur Untersuchung der Sternpunktterdungsumstellung	18
3.1 Umspannwerke	18
3.2 Kabel und Freileitung.....	19
3.3 Modellnetz	20
4 Grenzen der Resonanzsternpunktterdung.....	21
5 Auslegungsberechnungen für die Dimensionierung der niederohmigen Sternpunktterdung anhand des Modellnetzes	23
5.1 Theoretische Grundlagen - Einflussgrößen auf die Auslegungsberechnung.....	23
5.2 Berechnungen - Kabelzubau im Modellnetz	30
5.3 Berechnung - Festlegung von Grundvarianten	31
5.4 Signifikante Ergebnisse der Berechnungen.....	31
6 Auswirkungen auf den Netzschutz	34
6.1 Erforderliche Anpassungen der Schutztechnik zur Einhaltung der Fehlerklärungs- bzw. Abschaltzeiten	36
7 Konzeptvorschlag für die Vorgehensweise der Umstellung auf eine niederohmige Sternpunktterdung	40
7.1 Grundlagen der Vorgehensweise	40
7.2 Erläuterung der Vorgehensweise an einem Beispielnetz (Netzausschnitt)	41
7.3 Aspekte zur Versorgungszuverlässigkeit während der Umstellung	48
8 Kosten der Sternpunktterdungsumstellung.....	50
9 Zeitaufwand für die Sternpunktterdungsumstellung	57
10 Zusammenfassung und Handlungsempfehlung	59
11 Literaturverzeichnis.....	62

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

$3I_0$	Dreifacher Nullstrom der Leitung
$3I_0^A$	Dreifacher Nullstrom der Leitung Seite A
$3I_0^B$	Dreifacher Nullstrom der Leitung Seite B
Z_P^A	Kettenleiterimpedanz der Seite A
Z_P^B	Kettenleiterimpedanz der Seite B
I_E^A	Erdungsstrom der Seite A
I_E^B	Erdungsstrom der Seite B
I_M^A	Strom über den Mastausbreitungswiderstand der Seite A
I_M^B	Strom über den Mastausbreitungswiderstand der Seite B
I_k''	Erdkurzschlussstrom
Z_Q	Erdseilimpedanz
A	Ampere
ABB	Technologiekonzern ABB
Al	Aluminium
AWE	Automatische Wiedereinschaltung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
d_M	Abstand zwischen zwei Hochspannungsmasten
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ETG	Energietechnische Gesellschaft im VDE
G1	Grundvariante 1
G2	Grundvariante 2
G3	Grundvariante 3
HöS	Höchstspannung
HS	Hochspannung
I_{CE}	kapazitiver Erdschlussstrom
I_E	Erdungsstrom
I_F	Fehlerstrom
I_N	über den geerdeten Sternpunkt des Transformators fließender Strom
I_{Rest}	Erdschlussreststrom
I_{RS}	über den Ausbreitungswiderstand des Maschenerdes fließender Strom
JF	Bezeichnung des Mastkopfbildes
K0xx	Bezeichnung Knotenumspannwerk im Modellnetz
km	Kilometer
kV	Kilovolt
L0xx	Bezeichnung der Leitung im Modellnetz
MS	Mittelspannung

n	Anzahl n
NOSPE	Niederohmige Sternpunktterdung
NVP0xx	Bezeichnung Netzverknüpfungspunkt im Modellnetz
r_E	Reduktionsfaktor
R_{ES}	Ausbreitungswiderstand des Maschenerdes
RESPE	Resonanzsternpunktterdung
R_{ET}	Ausbreitungswiderstand des Mastes (nach [DIN50522-11])
R_M	Mastausbreitungswiderstand
Schneider Electric	Unternehmen im Bereich Energie-Management und Automation
Siemens	Technologiekonzern Siemens
SS	Sammelschiene (im Umspannwerk)
St	Stahl
TGL	Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (Normenwerk der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik)
U_E	Erderspannung
UMZ-Schutz	unabhängiger Maximalstromzeitschutz
U_{TP}	Berührungsspannung
UW	Umspannwerk
V0xx	Bezeichnung Verteilumspannwerk im Modellnetz
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
Z_E	Gesamterdungsimpedanz
Z_P	Kettenleiterimpedanz Erdseil-Maste
δ	Erdfehlerfaktor

1 Einleitung

Mit dem am 05. August 2011 in Kraft getretenen „Gesetz über Maßnahmen zur Beschleunigung des Netzausbaus Elektrizitätsnetze“ vom 28.07.2011 hat sich die Rechtslage bezüglich der Verlegung von Hochspannungskabeln in Erde im 110-kV-Hochspannungsbereich weitgehend geändert. Hochspannungsleitungen auf neuen Trassen sind zukünftig unter bestimmten Voraussetzungen als Kabel in Erdverlegung auszuführen. Diese neue Rechtslage erfordert eine wissenschaftliche Untersuchung der durch die Verlegung von Hochspannungskabeln in Erde zu betrachtenden technischen Aspekte. Da das existierende Hochspannungsnetz - von einigen wenigen Abschnitten abgesehen - bislang ein Freileitungsnetz ist, bedeutet der Übergang zum Kabel in Erdverlegung eine technische Herausforderung für den Netzbetrieb. Zu erwarten ist, dass sich das Verhältnis Kabel in Erdverlegung zu Freileitung zukünftig ständig erhöhen wird. Es ist damit eine stetige Überprüfung notwendig, ob die bestehende technische Auslegung beibehalten werden kann. Ziel muss es sein, weiterhin ein hohes Maß an Versorgungszuverlässigkeit gewährleisten zu können.

Eine wichtige Ausgangsbasis für die Durchführung der Maßnahme ist damit die von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft und Europaangelegenheiten Mitte des Jahres 2011 fertiggestellte Studie zur Netzintegration der Erneuerbaren Energien im Land Brandenburg. Mit der Studie wurde der Netzausbaubedarf für das Land Brandenburg auf Basis der damals aktuellen EEG-Prognose ermittelt. Danach sind bis zum Jahr 2020 auf circa 1.500 km Trassenlänge 110-kV-Hochspannungsleitungen zu errichten. Die Ermittlung dieses Ausbaubedarfs basiert allerdings - ausgehend von der damaligen Rechtslage - auf einem Freileitungskonzept. Gleichwohl bilden die der Studie zugrunde liegenden Daten eine wichtige Grundlage für die vorgesehene Untersuchung von technischen Fragen der Verlegung von Hochspannungskabeln in Erde.

Da alle Netzbetreiber, die eine 110-kV-Hochspannungsebene betreiben, sich gleichermaßen mit diesen technischen Fragen befassen müssen, ist eine Bündelung der diesbezüglichen Aktivitäten sinnvoll. Das Ministerium für Wirtschaft und Europaangelegenheiten des Landes Brandenburg, welches Anfang November 2014 in das Ministerium für Wirtschaft und Energie des Landes Brandenburg umbenannt worden ist, hat die Initiative ergriffen, im Rahmen des vom Land Brandenburg gegründeten „Fachforum Netzausbau“ unter Einbeziehung der im

Land Brandenburg tätigen Netzbetreiber E.DIS AG, MITNETZ STROM mbH und WEMAG Netz GmbH sowie unter Mitwirkung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg sich für ein gemeinsames Vorgehen auszusprechen. Das Fachforum Netzausbau hat beschlossen, dass in einer Arbeitsgruppe dieses Fachforums unter Leitung des Ministeriums für Wirtschaft und Energie und unter wissenschaftlicher Begleitung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg Abstimmungen über ausgewählte technische Fragestellungen, die durch den Einsatz von Hochspannungskabeln bedingt sind, erfolgen.

In Ergänzung zu den durch das Ministerium für Wirtschaft und Energie des Landes Brandenburg in Auftrag gegebenen Gutachten [HOF-10] und [HOF-11] verfolgt diese Studie das Ziel, Möglichkeiten zur Beherrschung des Erdschlussreststromes bei Kabelzubau sowie die Darstellung eines möglichen Lösungsansatzes hinsichtlich der Umstellung der Sternpunkterdung aufzuzeigen. Weiterhin wird anhand eines typischen brandenburgischen 110-kV-Modellnetzes auf zu erwartende Kosten und Zeitaufwände für die aufgezeigte Umstellungsvariante der Sternpunkterdungsart eingegangen, die einen Rückschluss auf reale Verteilnetze zulässt.

2 Ausgangssituation und Beherrschung des Erdschlussreststromes bei Kabelzubau

Die ständige Zunahme der installierten Leistungen von dezentralen EEG-Erzeugungsanlagen führt zu einem umfangreichen Netzausbau in allen Netzebenen. Damit sind insbesondere die 110-kV-Verteilnetzbetreiber in Brandenburg konfrontiert, da bei ihnen eine große Anzahl von leistungsstarken Wind- und Photovoltaikanlagen direkt an das 110-kV-Verteilnetz angeschlossen sind. Dem gegenüber steht der hierzu geringe Lastbedarf in Brandenburg.

Verursacht durch die geplanten umfangreichen Netzausbaumaßnahmen im 110-kV-Verteilnetz und der Vielzahl direkt angeschlossener Wind- und Photovoltaikanlagen gilt es, die temporäre Schwächung des Netzes infolge der geplanten Baumaßnahmen zu beherrschen.

Der erforderliche Ausbau der 110-kV-Verteilnetze wird in Übereinstimmung mit der gegenwärtigen Auffassung der Rechtssprechung zunehmend mit Kabel anstatt mit Freileitungen erfolgen. Durch den zunehmenden Einsatz von Hochspannungskabeln in den 110-kV-Verteilnetzen wird der Kabelanteil in den bestehenden Freileitungsnetzen zukünftig stark ansteigen. Jedoch unterscheiden sich die elektrischen Eigenschaften von Hochspannungskabeln zum Teil erheblich von denen einer vergleichbaren Freileitung. Insbesondere die Leiter-Erde-Kapazitäten von Hochspannungskabeln sind wesentlich größer als die von Freileitungen, wodurch diese deutlich stärker zum kapazitiven Erdschlussstrom und letztlich zum Erdschlussreststrom beitragen als vergleichbare Freileitungen. Damit ist der Sternpunktbehandlung der 110-kV-Verteilnetze eine intensive Aufmerksamkeit zu schenken.

In den ostdeutschen Verteilnetzen kommt die Resonanzsternpunkterdung zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um Netze mit Erdschlusskompensation. In Netzen mit Erdschlusskompensation werden ein oder mehrere Transformatoren über Erdschlusslöschspulen, sogenannte Petersenspulen, geerdet. Die Gesamtinduktivität der Erdschlusslöschspulen wird auf die Gesamtkapazität des Netzes abgestimmt. Im Falle eines Erdschlusses fließt dann über die Fehlerstelle nur der Erdschlussreststrom I_{Rest} . [OED-11] Das heißt, dass die im Netz vorhandenen Erdschlusslöschspulen in Summe so abgestimmt werden, dass der am Fehlerort auftretende kapazitive Erdschlussstrom weitgehend kompensiert wird. Durch diese Ab-

stimmung können auftretende Lichtbögen in der Regel selbstständig löschen. Ein zeitweiliger Weiterbetrieb des betreffenden Leitungsabschnittes ohne sofortige Unterbrechung ist möglich [OED-11].

Entscheidend für den Kabelzubau in resonanzsternpunktgeerdeten Netzen ist unter anderem die Löschgrenze. Die Löschgrenze steht für den Erdschlussreststrom I_{Rest} , der maximal auftreten darf, damit ein Lichtbogen sicher selbstständig löscht. [OBK-08] In Deutschland beträgt der zulässige Reststrom in der 110-kV-Spannungsebene 130 A [HEU-10] [DIN0228-87]. An der Obergrenze von 130 A wird in der sich im Entwurf befindlichen Norm E DIN VDE 0845-6-2 (VDE 0845-6-2):2010-02 festgehalten. Darüber hinaus wird in der gleichen Norm darauf hingewiesen, dass Erfahrungswerte zeigen, dass Erdschlussrestströme von 200 A zugelassen werden können. [DIN0845-10] Nach [DIN50522-11] beträgt der Erdschlussreststrom I_{Rest} 10% vom kapazitiven Erdschlussstrom I_{CE} . Demzufolge ist ein kapazitiver Erdschlussstrom von 1300 A als maximaler Wert anzusehen.

Die Beherrschung beziehungsweise Begrenzung des Erdschlussreststromes infolge des Kabelzubaus ist möglich durch

- a) Erdschlussreststromkompensation,
- b) Aufteilung des bestehenden Verteilnetzes in mehrere kleinere Teilnetze unter Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung,
- c) Einsatz von sogenannten Trenntransformatoren vor und hinter jeder Kabelstrecke,
- d) Änderung der Resonanzsternpunktterdung auf eine andere Sternpunktterdungsart.

Im Folgenden soll auf die Varianten b) und c) in den Kapiteln 2.1 und 2.2 detaillierter eingegangen werden. Variante d) wird im Kapitel 2.3 ausführlich beschrieben.

2.1 Bildung von Teilnetzen unter Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung

Die Bildung von Teilnetzen dient dem Zweck, die Resonanzsternpunktterdung trotz Kabelzubau beizubehalten. Durch das Auftrennen von Netzen wird der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} verringert. Bis zum Erreichen der Löschgrenze, bei dem ein auftretender Lichtbogen noch sicher selbstständig erlischt, kann das Verteilnetz mit Kabeln ausgebaut werden.

Für die Bildung von Teilnetzen bedarf es der rechnerischen Untersuchung zwischen geplantem Kabelzubau und optimaler Trennstelle zwischen den Teilnetzen. Wichtig ist, dass die Teilnetze eine vergleichsweise unveränderte Beibehaltung der Betriebsführung des Netzes aufweisen. Dies bedeutet, dass die technische Auslegung der Teilnetze überprüft werden muss und gegebenenfalls technische Anpassungen erforderlich sind. Folglich ergeben sich Kriterien, die bei der Gestaltung der Teilnetze eine Rolle spielen. Diese sind:

- a) Gewährleistung der (n-1)-Sicherheit,
- b) Entwicklung der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in den Netzregionen,
- c) Zukünftige Entwicklungen der Teilnetze,
- d) Überprüfung der Erdschlusskompensation in den Teilnetzen,
- e) Überprüfung der Blindleistungskompensation in den Teilnetzen,
- f) Auswirkungen auf den Netzschutz,
- g) Auswirkungen auf Schritt- und Berührungsspannungen,
- h) Störungsverhalten.

Gewährleistung der (n-1)-Sicherheit

Die Teilnetze müssen für eine sichere Betriebsführung und zur Aufrechterhaltung der Versorgungszuverlässigkeit (n-1)-sicher ausgeführt werden [VDE4202-13]. Das bedeutet, dass jedes Teilnetz eine (n-1)-sichere Anzahl an Umspannwerken einschließlich einer (n-1)-sicheren Anzahl an Leistungstransformatoren mit Anschluss an das überlagerte Höchstspannungsnetz aufweisen muss. Hierdurch kann es erforderlich werden, dass zur Sicherstellung des (n-1)-Kriteriums neue Netzanbindungen an das überlagerte Höchstspannungsnetz, sogenannte Netzverknüpfungspunkte, geschaffen werden müssen. Eine Teilung des Verteilnetzes ohne zusätzliche Maßnahmen führt durch die Reduktion des Vermaschungsgrades zu einer Verringerung der Versorgungszuverlässigkeit [OBK-08].

Entwicklung der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in den Netzregionen

Das Verhältnis der Last zur EEG-Einspeisung nimmt eine entscheidende Rolle in der Bildung von Teilnetzen ein. Ist das Ungleichgewicht zwischen Last und EEG-Einspeisung zu groß, entsteht ein zusätzlicher Lastfluss in den Teilnetzen. Ist die EEG-Einspeisung in einem Teilnetz deutlich größer als die Lastabnahme, ist mit einer Energierückspeisung aus diesem Teilnetz in das überlagerte Übertragungsnetz zu rechnen. Infolgedessen werden der HöS-/HS-Netzverknüpfungspunkt und die Leitungen zu diesem Netzverknüpfungspunkt übermäßig stark ausgelastet, wodurch ein weiterer Netzausbaubedarf erforderlich ist.

Zukünftige Entwicklungen der Teilnetze

Findet eine Teilnetzbildung statt, ist die zukünftige Netzentwicklung bei der Gestaltung der Teilnetze einzubeziehen. Hierbei sind die Einspeisepunkte aus dem überlagerten Übertragungsnetz und die absehbare Entwicklung der EEG-Einspeisungen und der Lasten zu berücksichtigen [VDE4202-13].

Überprüfung der Erdschlusskompensation in den Teilnetzen

Die Auslegung und Wirksamkeit der Erdschlusslöschspulen in den Teilnetzen muss überprüft werden. Ziel ist es, dass keine unkompenzierten Teilnetze durch die Auftrennung entstehen. Es ist eine gleichmäßige Verteilung der Erdschlusslöschspulen in allen Teilnetzen anzustreben.

Überprüfung der Blindleistungskompensation in den Teilnetzen

Bei einer Teilnetzbildung unter Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung bedarf es der Berechnung der neuen Strom- und Spannungsverteilungen mithilfe einer Lastflussberechnung. Generell ergeben sich durch die Kabel neue Ladeströme und Netzverluste. In Abhängigkeit von den Ergebnissen kann es notwendig sein, zusätzliche Ladestromspulen zur Blindleistungskompensation zu integrieren. [VDE4202-13]

Auswirkungen auf den Netzschutz

Behält man bei der Teilnetzbildung die Resonanzsternpunktterdung bei, so kann das Schutzkonzept im Allgemeinen beibehalten werden. [VDE4202-13] weist daraufhin, dass sich durch die veränderten Einspeisepunkte der minimale Kurzschlussstrom verändern kann, wodurch eine Überprüfung der Anregebedingung der Schutzeinrichtungen zu empfehlen ist.

Auswirkungen auf Beeinflussungsspannungen

In Netzen mit Resonanzsternpunktterdung können die Beeinflussungen von Fernmelde- und Rohrleitungen außer Acht gelassen werden, da die Löschbedingung nach VDE 0228-2:1987-12 eingehalten werden muss [HAU-83].

Auswirkungen auf Schritt- und Berührungsspannungen

Auswirkungen auf die Schritt- und Berührungsspannungen werden nicht erwartet. Die einpoligen Fehlerströme werden in jedem Teilnetz kompensiert und die Höhe der Fehlerströme über die Erdungsanlagen verbleibt auf vergleichbarem Niveau wie vor der Teilnetzbildung.

Störungsverhalten

Bei einer Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung ist mit vergleichbarem Störungsverhalten zu rechnen [VDE4202-13]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Verfügbarkeit der Gesamtnetze durch die Teilnetzbildung aufgrund der Verringerung des Verschmutzungsgrades ändert.

2.2 Einsatz von Trenntransformatoren unter Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung

Bei einem Trenntransformator handelt es sich um einen 110-/110-kV-Transformator, der die Netzspannung im Übersetzungsverhältnis 1:1 überträgt. Der Vorteil des Trenntransformators besteht darin, dass mit dessen Hilfe eine Auftrennung des Nullsystems von Hochspannungsnetzgruppen realisiert werden kann. Das heißt, dass das Nullsystem unterbrochen und in zwei voneinander getrennte Teil-Nullsysteme aufgeteilt wird. Dadurch wird auch eine Verringerung des kapazitiven Erdschlussstromes I_{CE} im Vergleich zum Betrag vor der Auftrennung des Nullsystems erreicht, da der kapazitive Erdschlussstrom ein Nullstrom ist. Somit kann bezüglich des kapazitiven Erdschlussstromes ein vergleichbarer Effekt wie bei einer Netztrennung erzielt und die Einhaltung der Löschgrenze erreicht werden.

Zu beachten ist jedoch, dass kein Einfluss auf die symmetrischen Lastflüsse besteht, da die Gesamtmitimpedanz des Netzes durch den Trenntransformator nicht unterbrochen wird.

In der Umsetzung wird vor und hinter jedem zugebauten Kabel jeweils ein Trenntransformator gesetzt.

Abbildung 2.1 zeigt die schematische Darstellung eines Kabelzubaues unter Verwendung von 110-/110-kV-Trenntransformatoren vor und hinter dem zugebauten Kabel.

Der einzelne Kabelnetzabschnitt in Abbildung 2.1 ist niederohmig geerdet. Dadurch können einpolige Fehler gegen Erde in Schnellzeit erfasst und abgeschaltet werden. Hiedurch wird ein stehender Erdschluss vermieden, welcher zudem durch die erhöhte Spannungsbeanspruchung (Verlagerungsspannung) der beiden gesunden Außenleitern zu einem Doppelerdschluss führen könnte. [HAU-83]

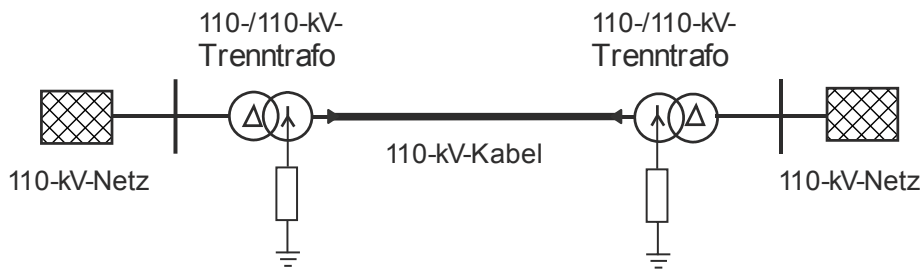


Abbildung 2.1: Kabelzubau unter Verwendung von 110-/110-kV-Trenntransformatoren

In Abhängigkeit der erforderlichen Übertragungskapazität muss eventuell die Verlegung paralleler Kabel in Betracht gezogen werden.

2.3 Umstellung der Resonanzsternpunktterdung auf die niederohmige Sternpunktterdung

Die niederohmige Sternpunktterdung eignet sich für Hochspannungsnetze ab der 110-kV-Spannungsebene [OED-11]. Bei der niederohmigen Sternpunktterdung, auch NOSPE genannt, werden Sternpunkte ausgewählter HS-/MS-Transformatoren im 110-kV-Netz über niederohmige Impedanzen geerdet. Die auftretenden Erdfehlerströme lassen sich über die NOSPE-Impedanzen beeinflussen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Impedanz der niederohmigen Sternpunktterdung weisen die einpoligen Fehler kurzschlussartigen Charakter auf, so dass die einpoligen Erdfehlerströme Werte im kA-Bereich annehmen. Daher spricht man im Gegensatz zur Resonanzsternpunktterdung von Erdkurzschlüssen anstatt von Erdschlüssen [HOF-10]. Die Erdkurzschlussströme erreichen eine Größenordnung von 5 bis 10 kA [HOF-10]. Die Sternpunkt-Erde-Verbindung kann induktiven oder resistiven Charakter aufweisen. Entsprechend der Fachliteratur können beide Varianten eingesetzt werden. [OED-11] bevorzugt die induktive niederohmige Sternpunktterdung. [HER-02] und [DOE-07] bevorzugen stattdessen eine ohmsche Auslegung der niederohmigen Sternpunktterdung.

Bei der Auslegung der niederohmigen Sternpunktterdung sind die Abhängigkeiten zwischen der Begrenzung des einpoligen Fehlerstromes, der Auslegung des Schutzes mit Fehlerstromerfassung und Fehlerabschaltzeit sowie der Einhaltung der zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen entsprechend Abbildung 2.2 zu berücksichtigen.

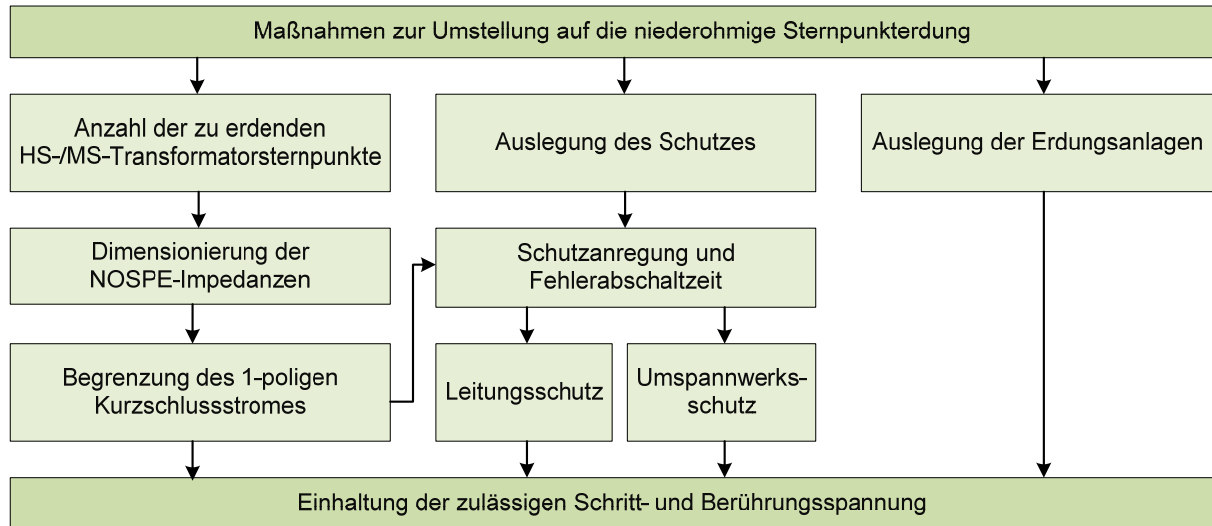


Abbildung 2.2: Maßnahmen zur Umstellung auf die niederohmige Sternpunktterdung (verändert nach [HOF-10])

Zur Festlegung des einpoligen Kurzschlussstromes und der NOSPE-Impedanzen ergeben sich nach Abbildung 2.3 zwei gegenläufige Tendenzen.

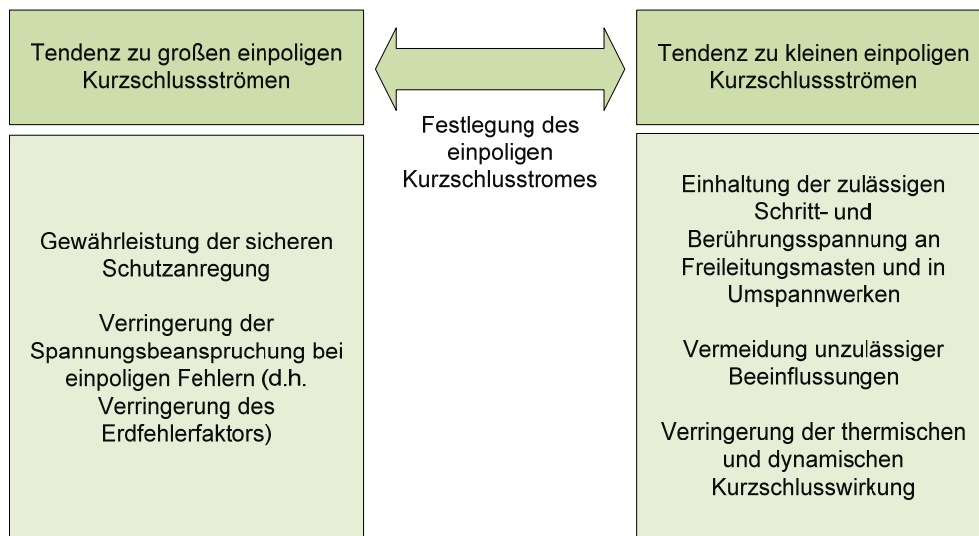


Abbildung 2.3: Kriterien zur Festlegung des einpoligen Kurzschlussstromes

Bei der Umstellung der Resonanzsternpunktterdung auf die niederohmige Sternpunktterdung sind im einzelnen die folgenden Kriterien zu beachten:

- a) Auslegung und Wirksamkeit der niederohmigen Sternpunktterdung,
- b) Auswirkungen auf den Netzschutz,

- c) Isolationskoordination und Überspannungsschutz,
- d) Auswirkungen und Anforderungen an die Betriebsmittel,
- e) Auswirkungen auf die Schritt- und Berührungsspannungen (Erdungsanlagen),
- f) Auswirkungen auf die Beeinflussungsspannungen.

Auslegung und Wirksamkeit der niederohmigen Sternpunktterdung

Im Fehlerfall kommt es zur Abschaltung fehlerhafter Leitungen und dadurch zu einer möglichen Netztrennung. Die Sternpunktterdung im verbliebenen Netz darf sich nicht ändern [MEL-12]. Das bedeutet, dass die Anzahl an erforderlich geerdeten Sternpunkten auch bei einer etwaigen Netzteilung nicht verringert werden darf, sodass womöglich ein isoliertes Netz entsteht. Dies ist in vermaschten Netzen nicht möglich, sondern kann nur bei Netzausläufern auftreten. Eine gleichmäßige Verteilung der niederohmig geerdeten Sternpunkte in den Teilnetzen ist anzustreben. Zusätzlich sollte zur Sicherstellung des (n-1)-Kriteriums die Sternpunktterdung (n-1)-sicher ausgeführt werden.

Eine beidseitige Sternpunktterdung bei HS-/MS-Transformatoren mit einer Kombination von hochspannungsseitiger niederohmiger Sternpunktterdung (NOSPE) und mittelspannungsseitiger Resonanzsternpunktterdung (RESPE) ist nach [BAL-88] nicht zulässig. Die Ursache ist in der wechselseitigen Beeinflussung durch die Kopplung beider Nullsysteme zu suchen. Abweichungen hiervon können sich nach [MOO-13] ergeben, wenn einzelfallbezogene sachgerechte Prüfungen stattfinden und der HS-/MS-Transformator als Grundvoraussetzung mit einer Ausgleichswicklung ausgestattet ist.

Für die dargestellte Problematik der beidseitigen Sternpunktterdung bieten sich folgende Lösungsmöglichkeiten an:

- a) Anschluss der NOSPE-Impedanzen am hochspannungsseitigen Transformatorsternpunkt bei gleichzeitigem Einsatz von mittelspannungsseitigen Sternpunktbildnern für die mittelspannungsseitige RESPE.
- b) Einsatz von hochspannungsseitigen Sternpunktbildnern zum Anschluss der NOSPE und Beibehaltung des direkten Anschlusses der RESPE am mittelspannungsseitigen Transformatorsternpunkt.

Auswirkungen auf den Netzschutz

Die Auslegung des Netzschutzes ist bei einer Änderung der Sternpunktbehandlung zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Einpolige Fehler müssen vom Netzschutz als Kurzschluss erkannt werden und diese unter Einhaltung der Schritt- und Berührungsspannungen sowie der thermischen Belastbarkeit des zu schützenden Objektes selektiv innerhalb der zulässigen Abschaltzeit abgeschaltet werden [VDE4202-13]. Der einpolige Erdkurzschluss ist orts- und fehlerimpedanzabhängig. Dies zieht eine Überprüfung der Erdkurzschlussströme nach [DIN60909-02] nach sich. In den Berechnungen sind die ungünstigsten Fehlerorte und Fehlerimpedanzen zu verwenden.

Isolationskoordination und Überspannungsschutz

Entsprechend [OED-11] liegt der Erdfehlerfaktor δ bei einer strombegrenzenden Sternpunktterdung in Abhängigkeit der NOSPE-Impedanz zwischen $1,4 < \delta < 1,8$. Übereinstimmend mit [VDE4202-13] ergeben sich geringere Spannungsbeanspruchungen, die in der Regel eine Überprüfung der Auslegung der Überspannungsleiter nach sich zieht. Bei Metalloxidableitern ergibt sich aus den kurzen Abschaltzeiten ein geringerer Wert für die zulässige Dauerspannung. Es bedarf einer Abstimmung der unterschiedlichen Typen der Überspannungsableiter [VDE4202-13]. Weiterhin kann die Löschspannung aufgrund der reduzierten Verlagerungsspannungen um 10 bis 20 Prozent reduziert werden [HAU-83].

Auswirkungen und Anforderungen an die Betriebsmittel

Die Gefahr von Doppelerdschlüssen im Fehlerfall ist gegenüber der Resonanzsternpunktterdung aufgrund der verringerten Verlagerungsspannung der beiden gesunden Leiter und der selektiven Erfassung des Erdkurzschlusses durch den Netzschutz geringer. Jeder Erdkurzschluss führt zur Abschaltung der fehlerbehafteten Betriebsmittel durch den Netzschutz. Die Einführung einer automatischen Wiedereinschaltung (AWE) steigert die Versorgungszuverlässigkeit für Verbraucher. Eine AWE kann ein- oder dreipolig ausgeführt werden. Die dreipolige AWE unterbricht kurzzeitig sowohl den fehlerbehafteten Leiter als auch die beiden gesunden Leiter. Bei der einpoligen AWE wird hingegen nur der fehlerbehaftete Leiter kurzzeitig unterbrochen. Die beiden gesunden Leiter erlauben eine Energieübertragung während der AWE des fehlerbehafteten Leiters. Aus Sicht der Versorgungszuverlässigkeit und der Spannungsqualität ist die einpolige AWE der dreipoligen AWE vorzuziehen. Nicht ausgeschlossen ist, dass die kapazitive Speisung des Lichtbogens durch die beiden gesunden Leiter zur erfolglosen AWE führen kann [HOF-11].

Eine AWE wird nur auf Freileitungsabschnitten durchgeführt. Dies bedeutet, dass

- a) bei einem Fehler auf einem Kabel eine AWE nicht durchgeführt werden sollte,
- b) bei einem Fehler außerhalb des Kabels (Fehler auf dem Freileitungsabschnitt einer gemischten Freileitungs- und Kabelstrecke) die AWE durch das Zuschalten auf den etwaig weiterhin anstehenden Fehler den Kabelschirm thermisch so beanspruchen kann, so dass das Kabel nachhaltig beginnende Schäden aufweist.

Nach [VDE4202-13] ist zudem eine Überprüfung an Transformatoren notwendig. Hierzu zählen die Auswahl von geeigneten Transformatorsternpunkten, die Sternpunktbelastbarkeit sowie die Einhaltung der Nichtübertragung einer Nullspannung in das unterlagerte Netz. Ebenso sind nach [VDE4202-13] die Schaltgeräte hinsichtlich ihrer Bemessungskurzschlussströme und der Eignung für eine einpolige automatische Wiedereinschaltung zu überprüfen.

Auswirkungen auf die Schritt- und Berührungsspannungen (Erdungsanlagen)

Infolge des höheren einpoligen Kurzschlussstromes ist eine Überprüfung der Erdungsanlagen nach DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1):2011-11, DIN EN 50522 (VDE 0101-2):2011-11 und DIN EN 50341-1 (VDE 0210-1):2010-04 inklusive der Schritt- und Berührungsspannungen notwendig [VDE4202-13].

Potenzialverschleppung von Mittelspannungskabeln an angrenzende Mittelspannungstransformatorstationen

In Anlehnung an [FIC-07] ist damit zu rechnen, dass es bei einpoligen hochspannungsseitigen Fehlern in HS-/MS-Umspannwerken, in denen NOSPE-Impedanzen angeschlossen sind, über die an den HS-/MS-Umspannwerken angeschlossenen Mittelspannungskabel zu einer Potenzialverschleppung in die angrenzenden MS-Stationen kommt, da die Kabelschirme sowohl in den HS-/MS-Umspannwerken als auch in den angrenzenden MS-Stationen geerdet sind. Um eine Potenzialverschleppung zu vermeiden, wäre eine Auftrennung der Erdungsanlagen in den HS-/MS-Umspannwerken erforderlich. Eine Betrachtung dieser Umstände und der daraus abzuleitenden technischen und finanziellen Aufwendungen sind jedoch nicht Bestandteil dieser Studie.

Die in den nachfolgenden Kapiteln durchgeführten weiteren Untersuchungen beziehen sich auf die Umstellung der Sternpunktterdungsart von der Resonanzsternpunktterdung auf die niederohmige Sternpunktterdung.

3 Darstellung des Modellnetzansatzes zur Untersuchung der Sternpunktterdungsumstellung

Um eine rechnerische Untersuchung der für die Umstellung der Sternpunktterdung genannten Kriterien durchführen zu können, bedarf es dem Aufbau eines Modellnetzes, welches einem realen 110-kV-Verteilnetz nahe kommt. Mittels diesem Modellnetz sind rechnerische Untersuchungen von Veränderungen ausgehend von einem gegenwärtig typischen 110-kV-Verteilnetz hin zu einem 110-kV-Verteilnetz mit Kabelzubau möglich. Für die Modellnetzbildung ist es erforderlich, grundlegende Festlegungen entsprechend den nachfolgenden Unterkapiteln zu treffen.

3.1 Umspannwerke

Das Modellnetz untergliedert sich in drei Umspannwerksarten. Diese unterteilen sich in

- Netzverknüpfungspunkt,
- Knotenumspannwerk,
- Verteilumspannwerk.

Netzverknüpfungspunkt

Netzverknüpfungspunkte stellen Umspannwerke dar, die eine direkte Anbindung zum Übertragungsnetzbetreiber besitzen. Sie stellen somit eine Kopplung der 110-kV-Verteilnetzebene mit der 380-kV- beziehungsweise 220-kV-Spannungsebene des Übertragungsnetzes dar. Netzverknüpfungspunkte weisen 110-kV-seitig eine Doppelsammelschiene auf. Über Kabel und Freileitungen erfolgt die Verbindung zu Knoten- und Verteilumspannwerken im 110-kV-Verteilnetz.

Knotenumspannwerke

Bei Knotenumspannwerken handelt es sich um Umspannwerke in Verteilnetzen, die mit einer Doppelsammelschiene ausgestattet sind und in der Regel in einem Abstand von 40 bis 70 Kilometern zueinander errichtet werden. Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft die Anordnung.

Verteilumspannwerke

Verteilumspannwerke in Verteilnetzen unterscheiden sich entsprechend in Verteilumspannwerke als Einschleifung und in Verteilumspannwerke als Einfach- und Doppelstich. Abbildung 3.2, Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 spiegeln diese Konstellation wider.

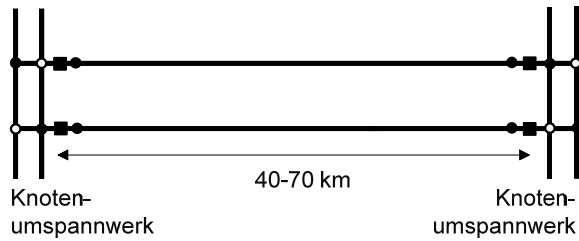


Abbildung 3.1: Knotenumspannwerke

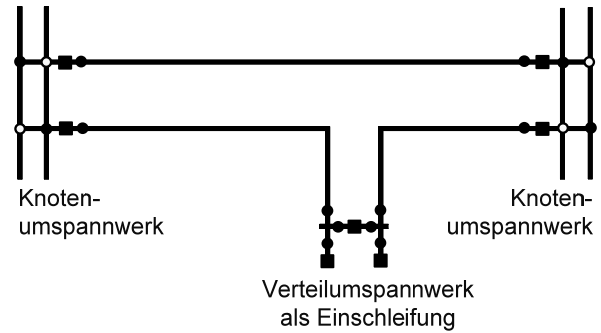


Abbildung 3.2: Verteilumspannwerk als Einschleifung

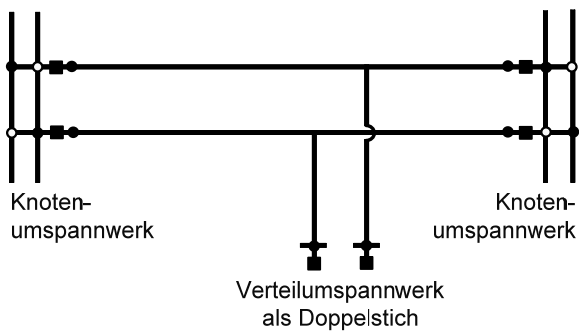


Abbildung 3.3: Verteilumspannwerk als Doppelstich

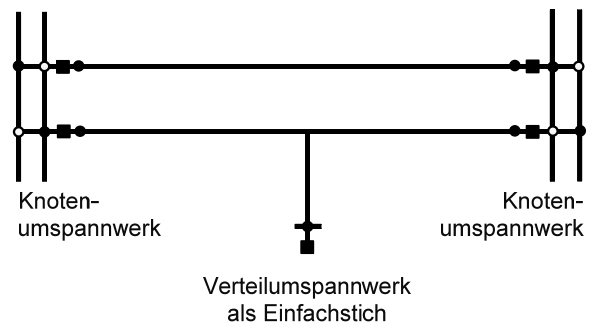


Abbildung 3.4: Verteilumspannwerk als Einfachstich

3.2 Kabel und Freileitung

Typen und Systemlänge der Kabel und Freileitungen

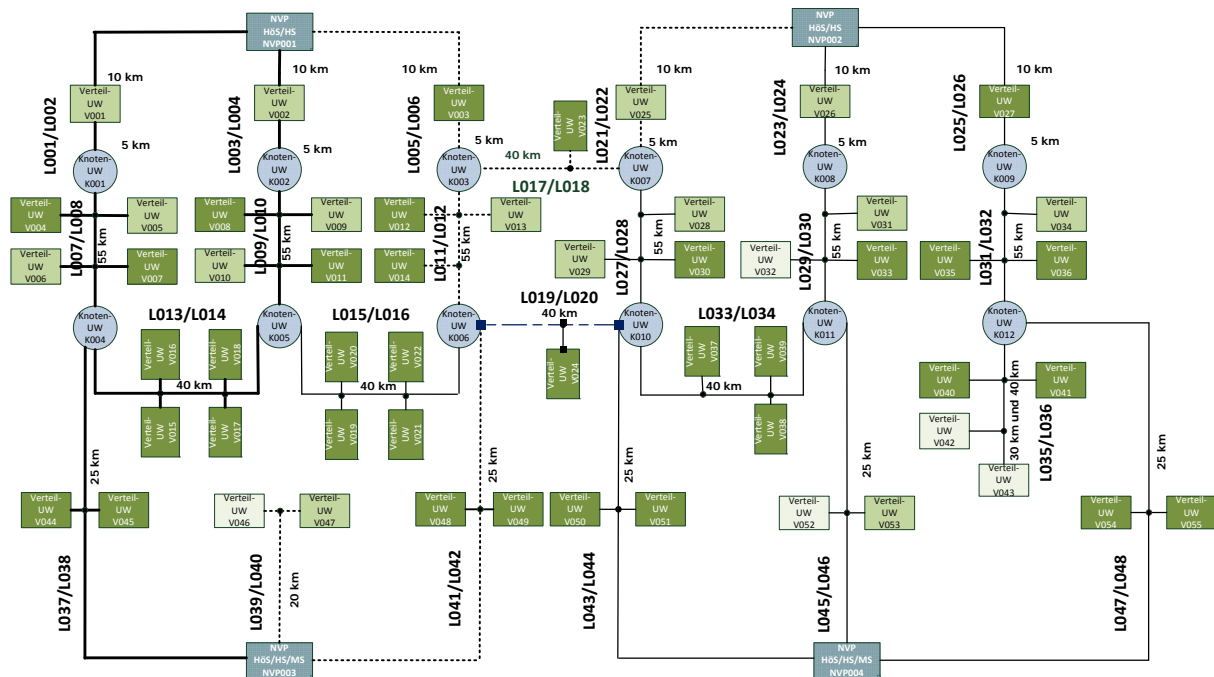
Das Modellnetz besteht im Ausgangszustand sowohl aus Freileitungen als auch aus einer Kabelstrecke mit einer Systemlänge von 40 Kilometern. Entsprechend Tabelle 3.1 kommen bei Freileitungen die Freileitungstypen 150/25 Al/St, 210/36 Al/St und 265/35 Al/St zum Einsatz. Beim Kabel wird der Kabeltyp NA2XS(FL)2Y 1x1000 RM/50 64/110 kV als Einleiterkabel verwendet. Die Netzgröße besteht in Summe aus einer Systemlänge von 1.606 Kilometern.

Tabelle 3.1: Verteilung der Kabel- und Freileitungstypen im Modellnetz im Ausgangszustand

Kabel- / Freileitungstyp	Systemlänge [km]	prozentuale Verteilung
150/25 Al/St TGL 6926 110 kV	773	48%
210/36 Al/St TGL 6926 110 kV	301	19%
265/35 Al/St JF ABB 110 kV	492	31%
Kabel 1x1000 RM/50 64/110 kV	40	2%
Summe: 1.606		

3.3 Modellnetz

Neben der Wahl der Betriebsmittelparameter spielt die Festlegung der Netztopologie eine große Rolle. Diese wurde in Anlehnung an real existierende vermaschte Netzstrukturen in der 110-kV-Verteilnetzebene gewählt. Auf Basis der vorangegangenen Kapitel wird das Modellnetz nach Abbildung 3.5 aufgebaut. Mit Hilfe des Modellnetzes werden rechnerische Untersuchungen durchgeführt.



Legende:











-  Netzverknüpfungspunkt bestehend aus Höchst- und Hochspannungsebene
-  Netzverknüpfungspunkt bestehend aus Höchst-/Hoch- und Mittelspannungsebene
-  Knotenspannwerk mit Doppelsammelschiene und 2 HS-/MS-Transformatoren
-  Verteilungsspannwerk mit Einzelsammelschiene
a) mit 2 HS-/MS-Transformatoren als Einschleifung
-  Verteilungsspannwerk mit Einzelsammelschiene
b) mit 1 HS-/MS-Transformator als Einfachstich
-  Verteilungsspannwerk mit Einzelsammelschiene
c) mit 2 HS-/MS-Transformatoren als Doppelstich
-  Freileitung 150/25 A/St
-  Freileitung 210/35 A/St
-  Freileitung 265/35 A/St
-  1 System Freileitung 210/35 A/St (mit UW-Einschleifung) und 1 System Kabel

Abbildung 3.5: Modellnetz im Ausgangszustand nach Kapitel 3.2 (ohne Modellnetzerweiterung durch Kabelzubau)

4 Grenzen der Resonanzsternpunktterdung

Ausgehend von einem reinen Freileitungsmodellnetz (Modellnetz im Ausgangszustand ohne 40 km Kabel) wird in Abbildung 4.1 der Kabelanteil in diesem Modellnetz erhöht und der kapazitive Erdschlussstrom I_{CE} bestimmt. Punkt 1 in Abbildung 4.1 gibt den I_{CE} im reinen Freileitungsmodellnetz an. Anschließend wird mit Punkt 2 ein 40 km langer Freileitungsabschnitt durch eine Kabelstrecke ersetzt wird (Modellnetz im Ausgangszustand). Mit Punkt 3 beginnt der weitere Kabelzubau. Es werden in weiteren Schritten (Punkt 3 bis 5) Kabel im Netz hinzugebaut, sodass in Summe ein Kabelanteil von 290 km im Modellnetz erreicht wird. Die Systemlänge des Modellnetzes erhöht sich durch den Zubau von 250 km Kabel und dem Ersatz von 40 km Freileitungsstrecke durch eine Kabelstrecke auf 1.856 km.

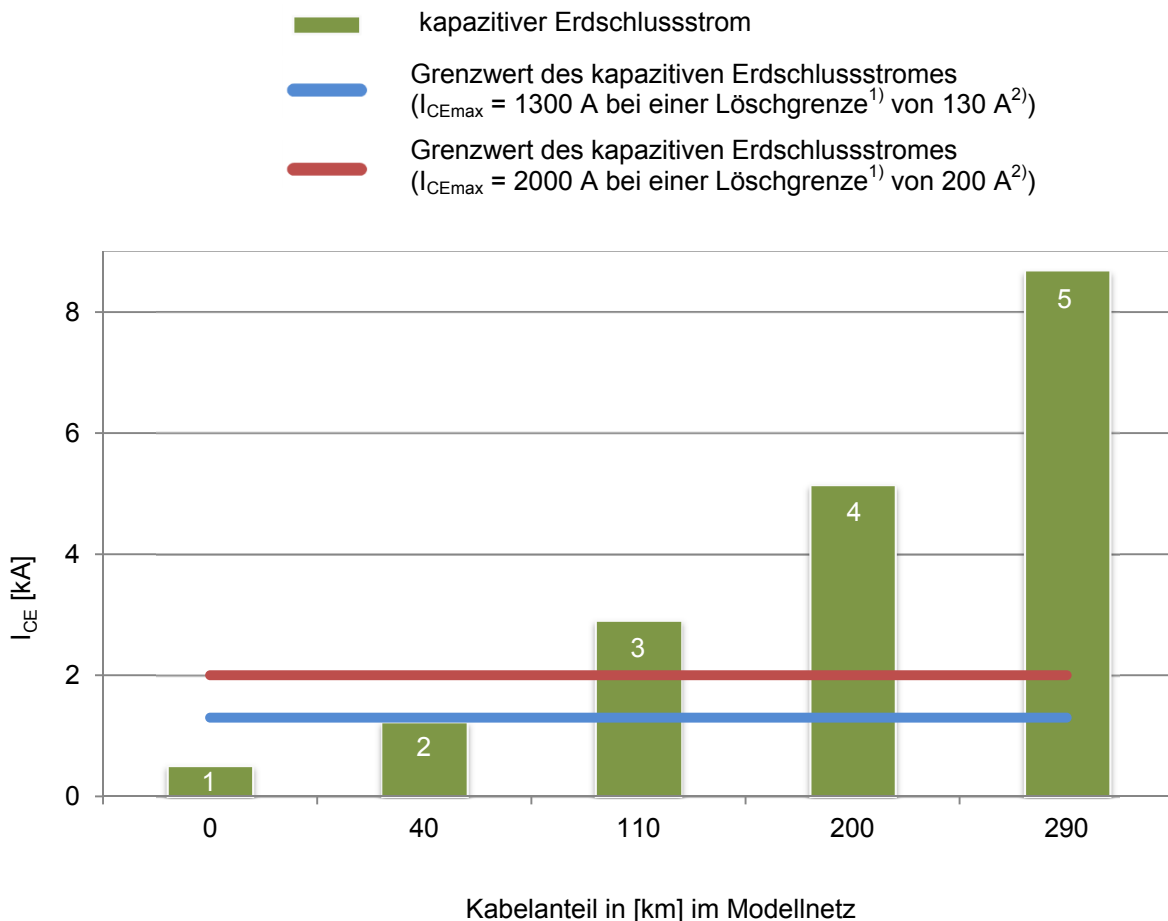


Abbildung 4.1: Zunahme des kapazitiven Erdschlussstromes I_{CE} in Abhängigkeit vom Kabelanteil im Modellnetz

Fußnote 1) Mit DIN VDE 0845-6-2 (VDE 0845-6-2):2014-09 wird aus dem Begriff „Löschgrenze“ der DIN VDE 0228-2:1987-12 die „Obergrenze für Erdschlussrestströme“

Fußnote 2) Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2 beträgt die Löschgrenze 10% vom kapazitiven Erdschlussstrom I_{CE}

Aus Abbildung 4.1 und gemäß Kapitel 2 wird deutlich, dass bereits mit einem Kabelanteil von 42 km (Systemlänge) die Löschgrenze von 130 A erreicht ist. Selbst bei einer zulässigen Löschgrenze von 200 A beträgt der maximal mögliche Kabelanteil in einem gegenwärtig resonanzsternpunktgeerdeten Netz circa 70 km (Systemlänge). Diese Werte zeigen beispielhaft, dass bereits ein geringer Zubau mit Kabeln in einem erdschlusskompensierten Netz Maßnahmen erfordert, um die zulässige Löschgrenze nicht zu überschreiten (siehe Kapitel 2).

5 Auslegungsberechnungen für die Dimensionierung der niederohmigen Sternpunktterdung anhand des Modellnetzes

Im Rahmen der Studie werden mit dem Modellnetz verschiedene Untersuchungen zu den Themengebieten

- Auslegung der niederohmigen Sternpunktterdung (Anzahl geerdeter Sternpunkte, Einsatz verschiedener Impedanzen),
- Einhaltung der zulässigen Erderspannungen,
- Einhaltung der zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen,
- maximal zulässige Fehlerdauern t_F im Fehlerfall,
- Auswirkungen auf die bestehende Schutztechnik (Einsatz anderer Schutzgeräte),
- Einbindung von Sternpunktbildnern,
- Anpassung der Erdung,
- Konzeptvorschlag für die Umstellung der Resonanzsternpunktterdung auf die niederohmige Sternpunktterdung im laufenden Netzbetrieb,
- Kosten der Umstellung der Sternpunktterdungsart,
- Zeitbedarf für die Umstellung der Sternpunktterdungsart,

durchgeführt.

5.1 Theoretische Grundlagen - Einflussgrößen auf die Auslegungsberechnung

Ausbreitungswiderstände der Erdungsanlagen der Umspannwerke

Für die Berechnung der Erderspannungen U_E bei einpoligen Fehlern in Umspannwerken bedarf es der Ermittlung der Ausbreitungswiderstände der Erdungsanlagen in HS-/MS-Umspannwerken. Der Teilstrom I_N , der über einen vorhandenen niederohmig geerdeten Sternpunkt ins das Netz zurückfließt (siehe Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2), sorgt für eine Verringerung des Fehlerstromes, welcher über die Erdungsanlage fließt. Dies wirkt sich verringern auf die Erderspannung aus. Niederohmig geerdete Sternpunkte sind jedoch nicht in jedem HS-/MS-Umspannwerk vorhanden. Dies berechtigt zu der Vorgehensweise, dass der Teilstrom I_N mit Null angenommen werden kann und dadurch der gesamte einpolige Kurzschlussstrom, der in die Erde fließt, bei der Berechnung der Erderspannung im Umspannwerk berücksichtigt wird. Es ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\underline{I}_F = 3 \cdot \underline{I}_0 + \underline{I}_N \quad (5.1)$$

$$\underline{I}_E = r_E \cdot (\underline{I}_F - \underline{I}_N) \quad (5.2)$$

$$\underline{U}_E = \underline{I}_E \cdot \underline{Z}_E \quad (5.3)$$

$$\underline{Z}_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + n \cdot \frac{1}{\underline{Z}_P}} \quad (5.4)$$

$$\underline{U}_E \leq 2 \cdot \underline{U}_{TP} \quad (5.5)$$

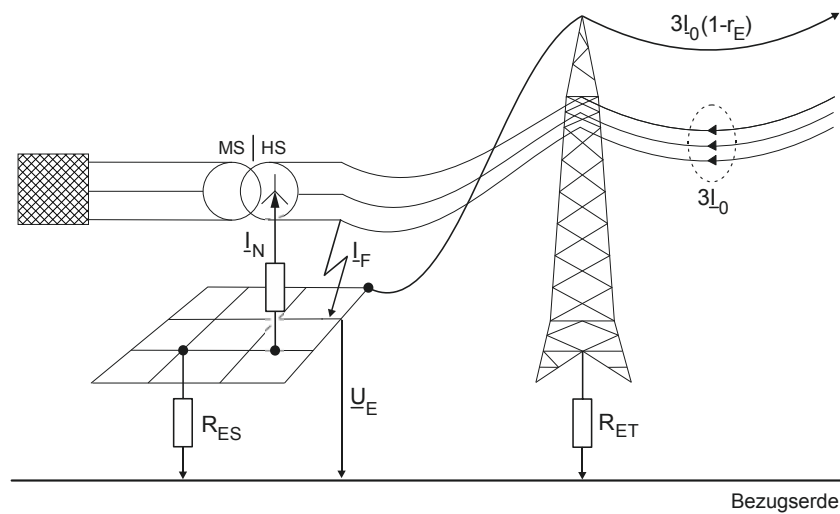


Abbildung 5.1: Ströme, Spannungen und Widerstände bei einem Erdfehler in einem Umspannwerk mit niederohmiger Sternpunktterdung (verändert nach [DIN50522-11] und [OED-11])

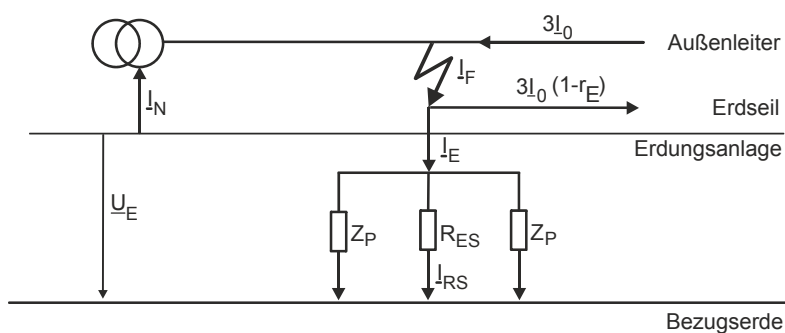


Abbildung 5.2: Ersatzschaltbild für Ströme, Spannungen und Widerstände bei einem Erdfehler in einem Umspannwerk mit niederohmiger Sternpunktterdung zur Berechnung der Erderspannung U_E (verändert nach [DIN50522-11])

Kettenleiterimpedanz

Nach Abbildung 5.3 ergibt sich bei einem Erdkurzschluss an einem stationsfernen Freileitungsmast die relevante Gesamterdungsimpedanz Z_E für die Berechnung der Erderspannung U_E aus der Parallelschaltung des Mastausbreitungswiderstandes R_M an der Fehlerstelle mit den Erdseilimpedanzen Z_Q und den benachbarten Masten.

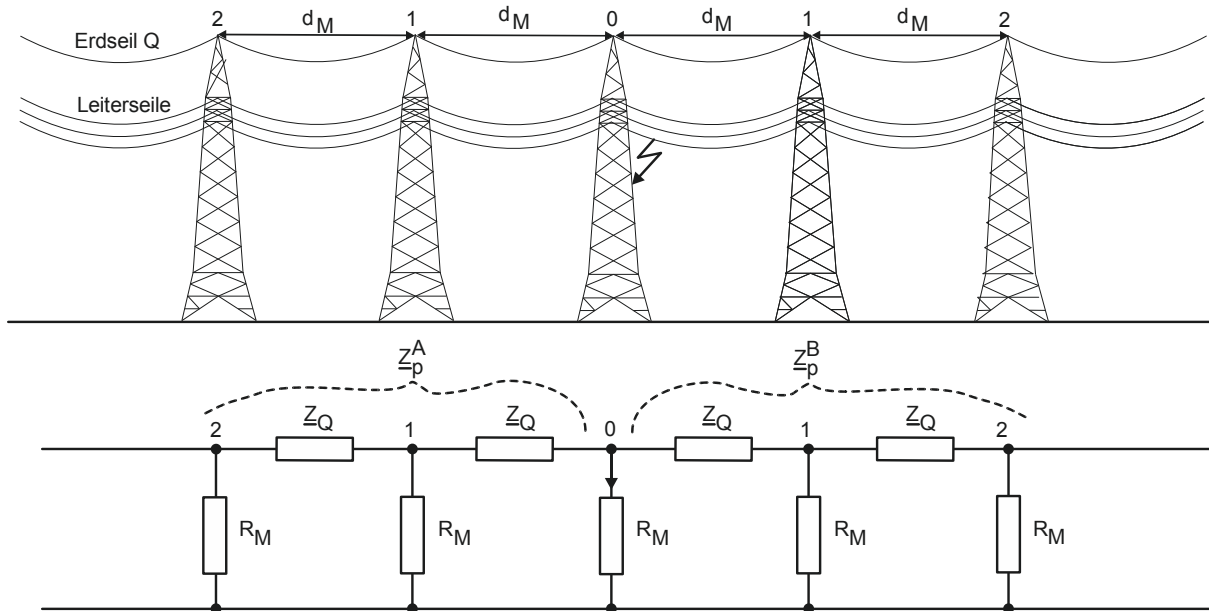


Abbildung 5.3: Ersatzschaltbild zur Berechnung der Gesamterdungsimpedanz bei Fehler auf einer Freileitung über die Kettenleiterimpedanz Erdseil – Mast Z_P für eine Kette mit dem Längsglied Z_Q (verändert nach [OED-11])

Als Kettenleiterimpedanz Z_P bezeichnet man die Parallelschaltung aus Erdseilimpedanzen Z_Q und Mastausbreitungswiderstand R_M . Weisen die Spannfelder die gleiche Länge auf und besitzen sie den gleichen Mastausbreitungswiderstand, so ergibt sich die Kettenleiterimpedanz Z_P zu: [OED-11]

$$Z_P \approx \frac{Z_Q}{2} + \sqrt{R_M \cdot Z_Q} \quad (5.6)$$

Geht man von symmetrischen Verhältnissen der Seiten A und B aus, weist die Kettenleiterimpedanz Z_P der Seiten A und B bei einem von beiden Seiten A und B gespeisten Erdkurzschlussstrom den gleichen Wert auf (siehe Gleichung 5.7).

$$Z_P = Z_P^A = Z_P^B \quad (5.7)$$

Auf Basis des Ersatzschaltbildes aus Abbildung 5.3 kann die Ermittlung der Kettenleiterimpedanz Z_P entsprechend Abbildung 5.4 vereinfacht werden:

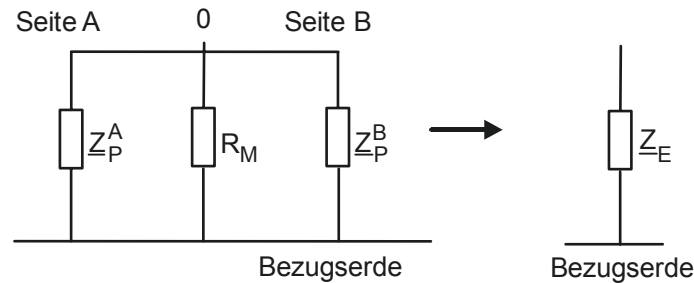


Abbildung 5.4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der Gesamterdungsimpedanz bei einem Fehler auf der Freileitung

Durch die Parallelschaltung lässt sich die resultierende Gesamterdungsimpedanz Z_E ermitteln. Aufgrund der Erdseile fließt nur ein Teilstrom des auftretenden Erdkurzschlussstroms zur Erde. Der andere Teilstrom fließt über die Erdseile ab. Für die Berechnung der Erdspeisung ist daher gemäß Abbildung 5.5 nur der Teilstrom des Gesamtkurzschlussstromes relevant, der über die Gesamterdungsimpedanz Z_E fließt.

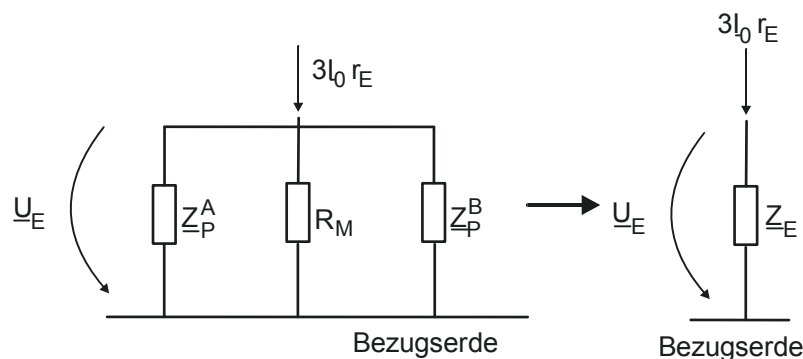


Abbildung 5.5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der Gesamterdungsimpedanz Z_E und des Erdfehlerstroms $3I_0 r_E$ bei einem Fehler auf der Freileitung

Zur Ermittlung der Kettenleiterimpedanz und der daraus resultierenden Erdungsimpedanz ist die Erdseilkombination

ES 1 x A1St 95/55 // LWL 1 x 52/25 Ay/Aw

mit einer durchschnittlichen Spannfeldweite von 300 m zugrunde gelegt worden.

Unter Verwendung der Masttypen

- Energiebau Horizontal J
- TGL 6926

sind unter Variation der Mastausbreitungswiderstände die resultierenden Erdungsimpedanzen Z_E ermittelt worden. Abbildung 5.6 gibt die ermittelten Erdungsimpedanzen Z_E in Abhängigkeit von der Entfernung zum Umspannwerk für die Mastausbreitungswiderstände R_M mit 5, 10 und 15 Ω wider. Ab einer Entfernung von circa 21 Masten, also circa 6 km vom Umspannwerk entfernt, stellt sich eine Gesamterdungsimpedanz von 0,46 bis 0,80 Ω je nach Mastausbreitungswiderstand stationär ein.

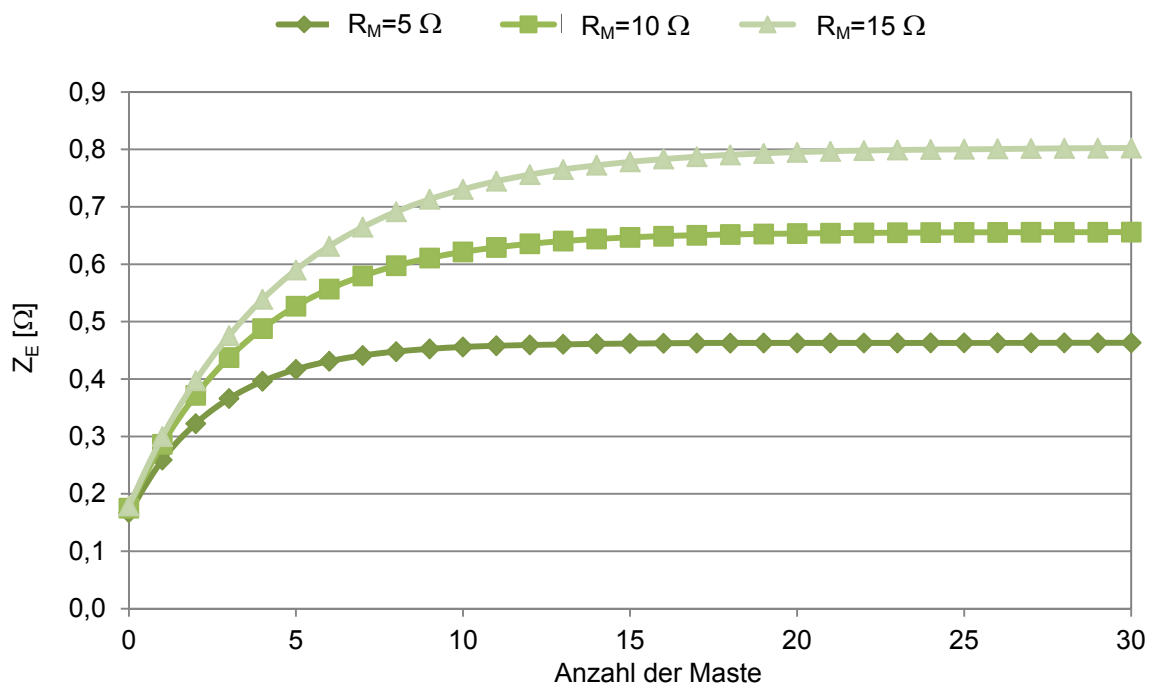


Abbildung 5.6: Berechnete Gesamterdungsimpedanz Z_E unter Berücksichtigung von Mastausbreitungswiderständen R_M mit 5, 10 und 15 Ω , sowie mit der Erdseilkombination ES 1 x AlSt 95/55 // LWL 1 x 52/25 Ay/Aw

Fehlerstrom an der Fehlerstelle

Nach [OED-11] ergibt sich der Fehlerstrom I_{k1} an der Fehlerstelle zu:

$$\underline{I}_{k1} = 3 \cdot \underline{I}_0^A + 3 \cdot \underline{I}_0^B \quad (5.8)$$

Der Fehlerstrom I_{k1} berechnet sich durch die Addition der beiden Teilströme der Seiten A und B. Diese können durch die Einzelbetrachtung der Seiten A und B ermittelt werden.

Für die Seite A ergibt sich nach [OED-11] (siehe Abbildung 5.7):

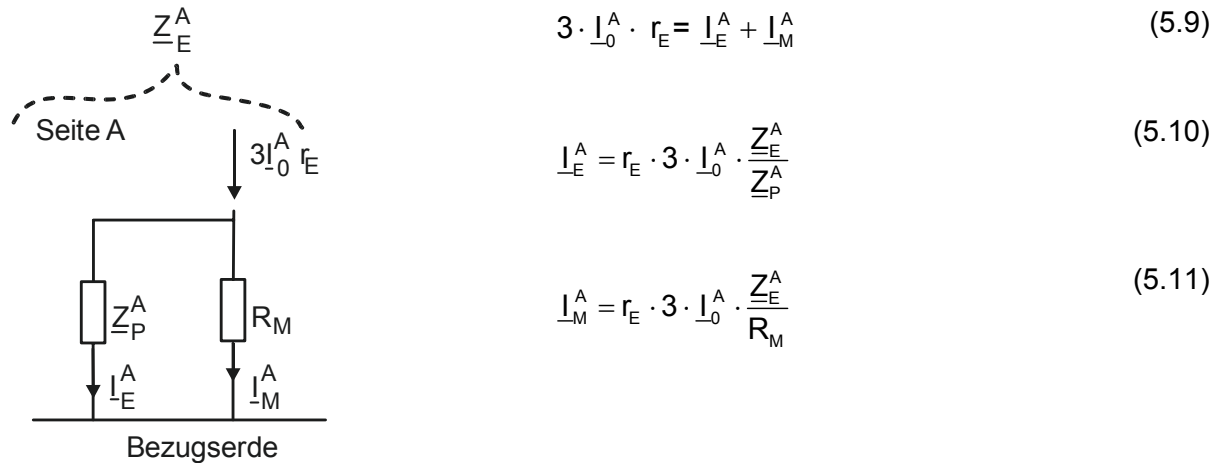


Abbildung 5.7: Ersatzschaltbild der Stromverteilung auf Seite A

Analog für Seite B folgt:

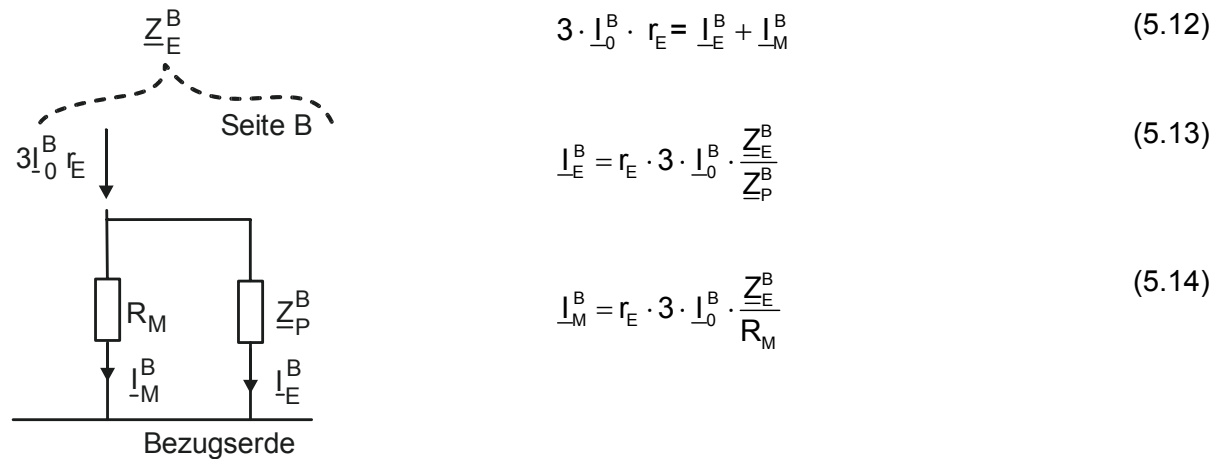


Abbildung 5.8: Ersatzschaltbild der Stromverteilung auf Seite B

Ausbreitungswiderstände der Erdungsanlagen der Umspannwerke

Der Ausbreitungswiderstand der Erdungsanlagen in Umspannwerken wird einheitlich für das gesamte Netz in Anlehnung an reale Werte auf einen Wert von

$$\underline{Z}_E = 0,2 \, \Omega \quad (5.15)$$

festgelegt.

Zulässige Schritt- und Berührungsspannung

Bei der Schrittspannung handelt es sich um die Spannung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche, welche einen Meter voneinander entfernt sind. Diese ein Meter werden als Schrittlänge eines Menschen angenommen. Bei der Berührungsspannung handelt es sich um die Spannung zwischen leitfähigen Teilen für den Fall, dass diese beiden leitfähigen Teile gleichzeitig von einem Menschen berührt werden. Der Wert der Berührungsspannung kann durch die Impedanz des mit diesen leitfähigen Teilen in elektrischem Kontakt stehenden Menschen beeinflusst werden. [DKE-14]

Gemäß der DIN EN 50522 ist eine zulässige Berührungsspannung zwischen bloßen Händen und bloßen Füßen nach Abbildung 5.8 einzuhalten. Bei einer Stromflussdauer von mehr als 10 s wird eine zulässige Berührungsspannung U_{TP} von 80 V angesetzt. [DIN50522-11]

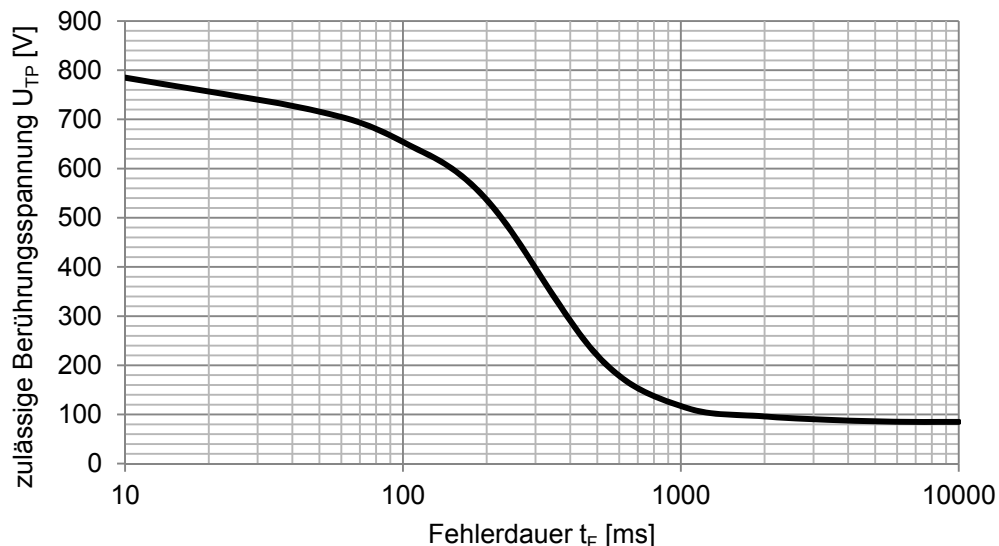


Abbildung 5.8: Zulässige Berührungsspannung U_{TP} (nach [DIN50522-11])

Somit ergibt sich nach Abbildung 5.8 eine zulässige Schritt- und Berührungsspannung, die von der Fehlerdauer t_F abhängig ist. Abbildung 5.9 stellt den Zusammenhang der Auslegung von Erdungsanlagen im Hinblick auf die zulässige Berührungsspannung U_{TP} durch Überprüfung der Erderspannung U_E oder der Berührungsspannung U_T dar.

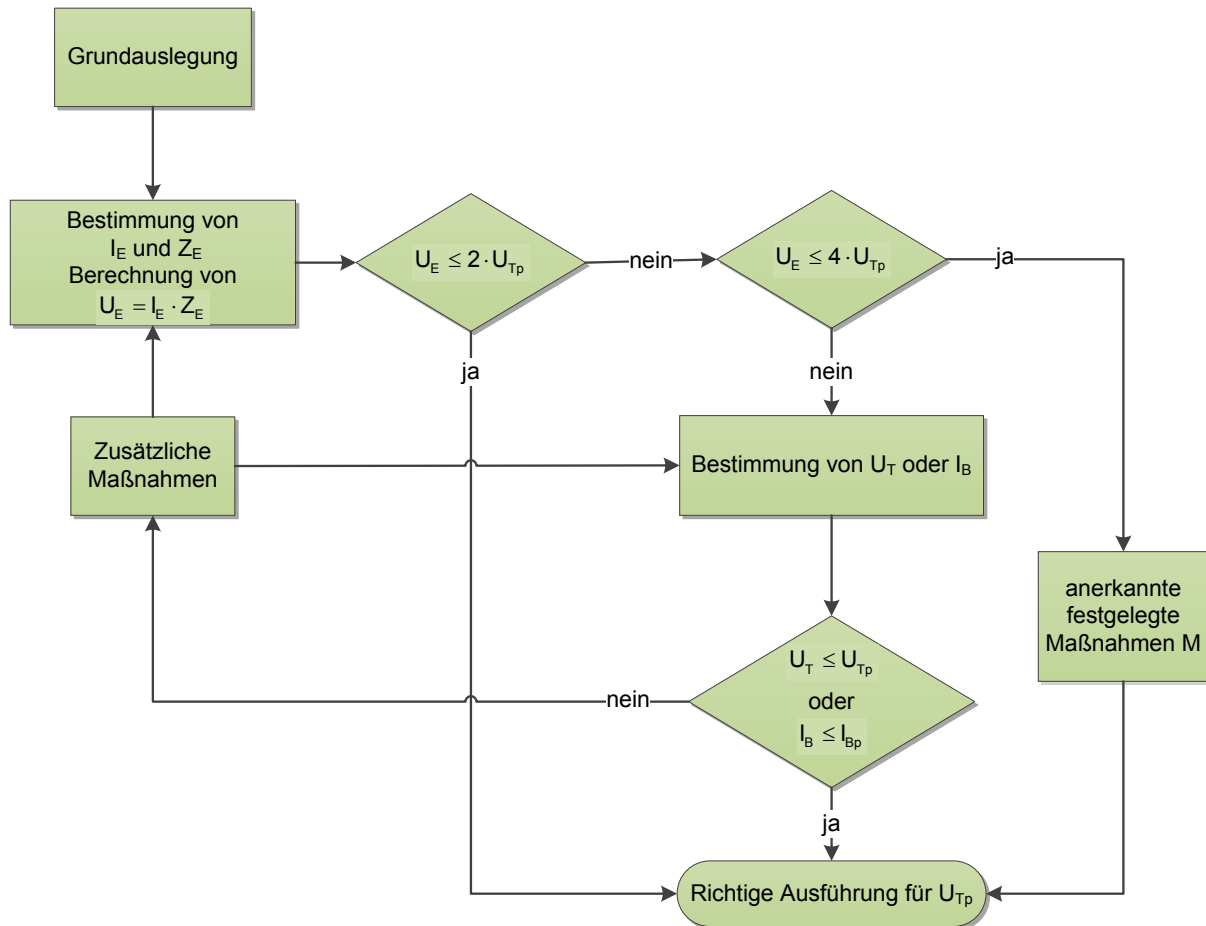


Abbildung 5.9: Auslegung von Erdungsanlagen im Hinblick auf die zulässige Berührungsspannung U_{TP} durch Überprüfung der Erderspannung U_E oder der Berührungsspannung U_T (nach [DIN50522-11])

5.2 Berechnungen - Kabelzubau im Modellnetz

In Hinblick auf die Untersuchung des Kabelzubaus wird das Modellnetz ausgehend von den bereits vorhandenen 40 km Kabel (Ausgangszustand) um weitere 250 km Kabel erweitert. Der Kabelzubau erfolgt mit 160 km Kabel des Typs 1x1000 RM/50 64/110 kV und 90 km Kabel des Typs 1x1200 RM/50 64/110 kV. Dadurch ergibt sich nach Tabelle 5.1 eine Gesamtsystemlänge von 1.856 km für das Modellnetz.

Tabelle 5.1: Verteilung der Kabel- und Freileitungstypen im Modellnetz nach dem Kabelzubau

Kabel- / Freileitungstyp	Systemlänge [km]	prozentuale Verteilung
150/25 Al/St TGL 6926 110 kV	773	42%
210/36 Al/St TGL 6926 110 kV	301	16%
265/35 Al/St JF ABB 110 kV	492	27%
Kabel 1x1000 RM/50 64/110 kV	200	11%
Kabel 1x1200 RM50 64/110 kV	90	5%
	Summe: 1.856	

5.3 Berechnung - Festlegung von Grundvarianten

Zur rechnerischen Untersuchung werden drei Grundvarianten hinsichtlich der Anzahl der niederohmig geerdeten Sternpunkte festgelegt. Die Grundvariante G1 weist Sternpunkterdungen in Netzverknüpfungspunkten und in Knotenumspannwerken auf. Darauf aufbauend verfügt die Grundvariante G2 zusätzlich über Sternpunkterdungen in Verteilumspannwerken, an denen Hochspannungskabel angeschlossen sind. Dem anschließend verfügt die Grundvariante G3 zusätzlich über Sternpunkterdungen in weiteren Verteilumspannwerken.

Die Grundvariante G1 besitzt 14 niederohmig geerdete Sternpunkte. Die Grundvariante G2 weist 21 und die Grundvariante G3 28 niederohmig geerdete Sternpunkte auf.

5.4 Signifikante Ergebnisse der Berechnungen

Auf Basis der Modellnetzauslegung ist die Erderspannung für unterschiedliche Anzahlen von niederohmig geerdeten Sternpunkten (Grundvariante G1 bis G3) mit jeweils unterschiedlichen NOSPE-Widerständen berechnet und mit der zulässigen Erderspannung verglichen worden. Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 geben an, bei wie viel Prozent der Leitungen und Umspannwerke eine Einhaltung der zulässigen Erderspannung in Abhängigkeit von der Grundvariante und der Fehlerdauer t_F erreicht worden ist.

Eine höhere Anzahl an geerdeten Sternpunkten führt zu einer Erhöhung der einpoligen Fehlerströme, wodurch die Erderspannungen ansteigen. Zusätzlich ist erkennbar, dass die Fehlerdauer t_F einen entscheidenden Einfluss auf die Einhaltung der zulässigen Erderspannung und damit der Schritt- und Berührungsspannung hat. Es wird deutlich, dass sich die Fehlerdauer t_F im unteren hundert Millisekundenbereich bewegen sollte. Als Grenzwert, bis zu der eine Abschaltung eines Fehlers erfolgen sollte, sind 150 ms anzusehen. Bereits ab 200 ms

nimmt die prozentuale Einhaltung der zulässigen Erderspannung U_E ab. Fehlerklärungszeiten im Sekundenbereich führen unweigerlich zu einer Nichteinhaltung der zulässigen Erderspannung U_E . Die Berechnungen mit dem Modellnetz zeigen, dass mit einer Fehlerklärungszeit von einer Sekunde nur in maximal ein Prozent der Fälle eine Einhaltung der zulässigen Erderspannung U_E erzielt werden kann. Eine Einhaltung der zulässigen Erderspannung U_E bei Fehlerdauern im Sekundenbereich ist generell nicht gegeben.

Tabelle 5.2 Darstellung der Einhaltung der zulässigen Erderspannung U_E bei einem Fehler am Umspannwerk in Abhängigkeit der gewählten Grundvariante in Prozent (prozentual bezogen auf die Gesamtanzahl an Umspannwerken):

NOSPE-Widerstand	Grundvariante	Fehlerdauer t_F				
		100 ms	150 ms	200 ms	500 ms	1000 ms
60 Ω	G1	98%	97%	87%	18%	1%
	G2	86%	84%	76%	17%	1%
	G3	81%	80%	65%	14%	1%
80 Ω	G1	100%	100%	93%	19%	1%
	G2	93%	90%	80%	17%	1%
	G3	85%	82%	71%	16%	1%
100 Ω	G1	100%	100%	100%	19%	1%
	G2	97%	94%	84%	17%	1%
	G3	89%	85%	75%	17%	1%

Nach [VDE0141-00] müssen für Masten in Tabelle 5.3 keine Grenzwerte der Berührungs- und Erderspannungen eingehalten werden, wenn eine automatische Schnellausschaltung des Erdfehlerstromes erfolgt. Ausnahme hiervon stellen Masten in Freibädern sowie auf Spiel-, Sport- und Campingplätzen dar. Dort muss sichergestellt werden, dass die zulässige Berührungsspannung stets eingehalten wird. [VDE0141-00] Zum Nachweis der Einhaltung der Berührungsspannung ist an solchen Masten eine Vor-Ort-Messung zu empfehlen.

Tabelle 5.3: Darstellung der Einhaltung der zulässigen Erderspannung U_E bei einem Fehler auf der Freileitung in Abhängigkeit der gewählten Grundvariante in Prozent (prozentual bezogen auf die Gesamtanzahl an Leitungen):

NOSPE-Widerstand	Grundvariante	Fehlerdauer t_F				
		100 ms	150 ms	200 ms	500 ms	1000 ms
60 Ω	G1	39%	39%	36%	16%	1%
	G2	37%	36%	34%	16%	1%
	G3	35%	35%	32%	14%	1%
80 Ω	G1	41%	40%	37%	16%	1%
	G2	38%	38%	35%	16%	1%
	G3	37%	35%	33%	15%	1%
100 Ω	G1	42%	41%	38%	17%	1%
	G2	39%	38%	35%	16%	1%
	G3	38%	37%	33%	16%	1%

6 Auswirkungen auf den Netzschutz

Um die Auswirkungen einer Sternpunkterdungsumstellung auf den Netzschutz betrachten zu können, wird zuvor kurz auf die Grundlagen der Schutztechnik eingegangen. Die Schutztechnik ist nach den ihr zugrunde liegenden Schutzprinzipien einteilbar. Unter Schutzprinzipien versteht man Grundsaltungen, die eine spezifische Detektion von Netzfehlern ermöglichen und Kriterien für die Abschaltung betreffender Betriebsmittel beinhalten. Die technische Umsetzung kann digital, elektronisch und elektromechanisch erfolgen. Zu den Schutzprinzipien zählen beispielsweise der Distanzschutz, der Vergleichsschutz, der Überstromschutz oder der Erdschlussschutz. [SCH-12] In der Schutztechnik wird zwischen dem Haupt- und dem Reserveschutz unterschieden.

Hauptschutz

Beim Hauptschutz handelt es sich um einen Selektivschutz, der mit Priorität bei der Einleitung der Fehlerbeseitigung oder einer Handlung zur Beendigung eines anormalen Zustandes handelt [DKE-14]. Es handelt sich beim Hauptschutz somit um eine Einrichtung, welche die Ermittlung und Abschaltung von Fehlern im betrachteten elektrischen Netz realisieren soll. Der Hauptschutz veranlasst die Abschaltung von fehlerhaften Betriebsmitteln oder führt entsprechend programmierte Funktionen aus. Der Hauptschutz betrachtet hierbei immer den vorgegebenen Selektionsabschnitt, welche durch Leistungsschalter begrenzt werden.

Ziel des Hauptschutzes ist es, Fehler in schnellstmöglicher Kommandozeit zu erfassen und selektiv abzuschalten.

Reserveschutz

Beim Reserveschutz handelt es sich um einen Selektivschutz. Dieser wird aktiv, wenn nach einer vorgesehenen Zeit ein Netzfehler nicht beseitigt oder an anormaler Zustand im Netz nicht erkannt worden ist. Ursache für das Aktivwerden des Reserveschutzes kann ein Ausfall oder Funktionsversagen einer anderen Selektivschutzeinrichtung oder ein Versagen des Ausschaltens eines zugeordneten Leistungsschalters sein. [DKE-14] Der Reserveschutz wird als letzte Instanz aktiv, um bei einem Fehler die im Selektionsabschnitt vorhandenen Betriebsmittel vor Zerstörung zu schützen.

Die Schutztechnik ist jedoch auch nach den ihr zugrunde liegenden zu schützenden Betriebsmitteln einteilbar. Hierzu gehören beispielsweise der Leitungsschutz, der Sammelschienenschutz, der Transformatorschutz und der Generatorschutz. Bei den Betriebsmitteln können die Schutzprinzipien einzeln oder in Kombination zum Einsatz kommen. [SCH-12]

Zusätzlich unterscheidet man den Reserveschutz in Abhängigkeit des Standortes nach erster und zweiter Ordnung. Der Reserveschutz erster Ordnung befindet sich ortsnah, das heißt an einem der Leitung direkt zugeordnetem Umspannwerk. Der Reserveschutz zweiter Ordnung befindet sich ortsforn, das heißt an einem der Leitung nicht direkt zugeordnetem Umspannwerk.

Die Schutzfunktion des Schutzes lässt sich anhand der Schutz Aufgabe in die Schutzobjekte Leitungsschutz, Kupplungsschutz und Sammelschienenschutz unterteilen.

Leitungsschutz

Für den Schutz der Leitungen gegen Kurzschlüsse kommt der Distanzschutz, der UMZ-Schutz als auch der Differenzialschutz infrage. Zur Erreichung einer Selektivität und hohen Zuverlässigkeit werden Schutzprinzipien miteinander gepaart. Hierdurch kann eine optimale Begrenzung der mechanischen und thermischen Auswirkungen im Fehlerfall gewährleistet werden. [SCH-12]

Der Leitungsschutz schützt eine Leitung, die durch zwei Leistungsschalter, jeweils am Beginn und am Ende der Leitung, begrenzt wird. Der Leitungsschutz wird im Regelfall durch einen Distanzschutz realisiert. Es ist ein Einsatz des Distanzschutzes mit Überstrom- und Unterimpedanzanregung möglich. Zur Erfassung der Erdschlussrichtung wird das Erdschlusswischerverfahren eingesetzt. Kann der Distanzschutz aufgrund des Ausfalls der Messspannung die Schutzfunktion nicht wahrnehmen, wird der Schutz durch den unabhängigen Maximalstromzeitschutz (UMZ-Schutz) gewährleistet [SIE-95] [SIE-12]. Der UMZ-Schutz wird aktiv, wenn ein eingestellter Stromwert überschritten wird.

Kupplungsschutz

Der Kupplungsschutz arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie der Leitungsschutz. Die Staffelung entspricht ebenfalls dem Leitungsschutz. Befindet sich der Fehler außerhalb des Schutzbereiches der Sammelschiene, wird zuerst die Leitung abgeschaltet. Da die Kupplung

höhergestaffelt ist, löst sie somit erst später aus. Befindet sich der Fehler auf der Sammelschiene, wird die Kupplung zuerst abgeschaltet.

Sammelschienenenschutz

Kurzschlüsse an Sammelschienen führen in der Regel zu sehr hohen Kurzschlussströmen, die eine hohe mechanische und thermische Belastung für die Betriebsmittel bedeuten und daher direkt abgeschaltet werden müssen. Der Sammelschienenenschutz hat zu unterscheiden, ob sich der Kurzschluss direkt auf der Sammelschiene und in einem Abgang befindet. [SCH-12]

Je nach Speisung der Sammelschienen kommen unterschiedliche Schutzkonzepte zur Anwendung. Bei einfach gespeisten Sammelschienen ist ein Schutz bereits mit einem unverzögerten UMZ-Relais möglich. Es ist ausreichend, wenn der betreffende Leistungsschalter geöffnet wird. Speisen alle Abzweige auf einen Kurzschluss in der Sammelschiene, sind alle Leistungsschalter der Sammelschiene zu öffnen. Dies wird durch Richtungsrelais verwirklicht. Der Schutz wird ausgelöst, wenn alle Richtungsrelais einen Stromfluss in Richtung Sammelschiene erkannt haben. [SCH-12]

Ein Sammelschienenendifferenzialschutz ist derzeit nur bei Übergabestellen zum Übertragungsnetzbetreiber vorhanden.

Bei Mehrfachsammschienenanlagen sollte jede Sammelschiene einem Differenzialschutz zugeordnet werden. Dieser kann die Sammelschienen selektiv schützen. Beim Ansprechen des Differenzialschutzes erfolgt die Öffnung der Kupplung zur anderen Sammelschiene. [SCH-12]

6.1 Erforderliche Anpassungen der Schutztechnik zur Einhaltung der Fehlerklärungs- bzw. Abschaltzeiten

Bei einer niederohmigen Sternpunktterdung befinden sich Fehlerklärungszeiten im Sekundenbereich weit außerhalb des zulässigen Bereiches. Die Auswertung der Berechnungen nach Kapitel 5 zeigte, dass zur Einhaltung der zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen Fehlerklärungszeiten im unteren hundert Millisekundenbereich zu realisieren sind. Derartige Fehlerklärungszeiten entsprechen denen in der Übertragungsebene, wo nach [VDN-07] die Fehlerklärungszeit bei 150 ms liegt. Diese Fehlerklärungszeit ist mit Einführung

der niederohmigen Sternpunktterdung in der 110-kV-Verteilnetzebene ebenfalls anzustreben. Dies ist darin begründet, dass selbst Fehlerklärungszeiten von 500 ms die Einhaltung der zulässigen Schritt- und Berührungsspannung im Fehlerfall nicht sicherstellen können (siehe Kapitel 5.4).

Es zeigt sich, dass mit dem gegenwärtig in den 110-kV-Netzen vorhandenen digitalen Distanzschutz die geforderten Schritt- und Berührungsspannungen nicht eingehalten werden können. Die Fehlerklärungszeit bewegt sich im Sekundenbereich und damit weit außerhalb des zulässigen Rahmens. Demzufolge sind Maßnahmen zur Verringerung der Fehlerklärungszeit erforderlich.

Mithilfe der Signalübertragung kann beim digitalen Distanzschutz die Fehlerklärungszeit verkürzt werden. Der Distanzschutz mit Signalvergleich kann als ortsnaher Reserveschutz 1. Ordnung eingesetzt werden.

Darüber hinaus wird empfohlen, einen Differenzialschutz, der ebenfalls mit einer Signalübertragung ausgestattet ist, aufzubauen. Der Differenzialschutz ist als Hauptschutz auszulegen. Die Empfehlung zur Schutzumstellung ist in Abbildung 6.1 im Überblick dargestellt.

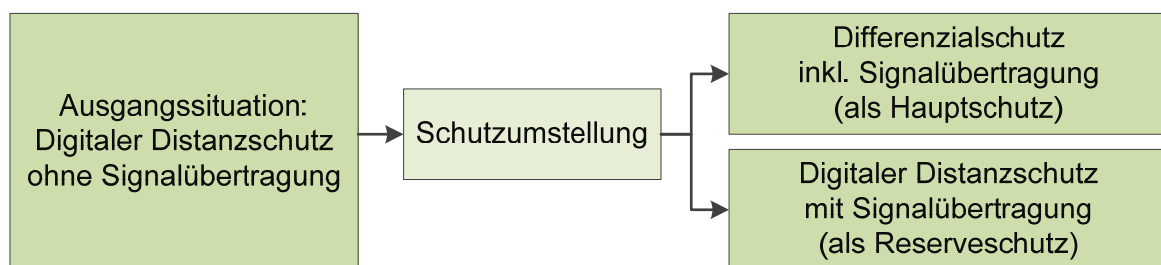


Abbildung 6.1: Empfehlung der Schutzumstellung

Grundsätzlich ist anzumerken, dass auf dem Markt verschiedene Hersteller von Differenzialschutz- und Distanzschutzgeräten, wie beispielsweise ABB, Siemens und Schneider Electronic existent sind, deren Produkte zum Einsatz kommen können.

Im Folgenden werden die empfohlenen Schutzprinzipien kurz dargestellt.

6.1.1 Differenzialschutz

Beim Differenzialschutz handelt es sich um einen unverzögerten Schutz, welcher streng selektiv und schnellstmöglich erfolgt. Es findet ein phasenselektiver Stromvergleich an beiden Enden der Leitung statt. Die Stromwerte werden stets lokal gemessen und miteinander verglichen (siehe Abbildung 6.2). [SIE-05]

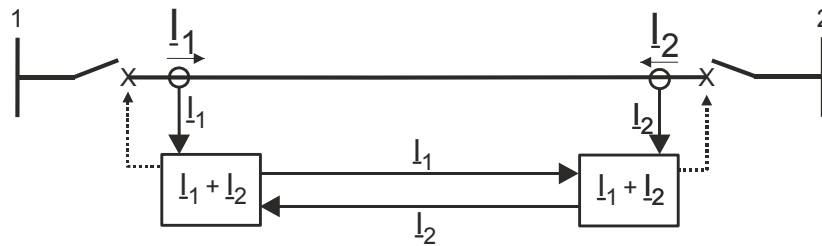


Abbildung 6.2: Differenzialschutz für eine Leitung (verändert nach [SIE-05])

Mittels der Signalübertragung wird der Stromvergleich realisiert. Analog zur Signalübertragung beim digitalen Distanzschutz, findet die Kommunikation über Kupferadern, ISDN, Lichtwellenleiter und das digitale Kommunikationsnetz statt. [SIE-05]

Die Kommunikation wird hierbei als Ringtopologie oder Kettentopologie aufgebaut. Die Ringtopologie besitzt den entscheidenden Vorteil, dass der Verlust einer Datenverbindung zu keinen Problemen führt. In diesem Fall erfolgt eine automatische Umschaltung in eine Kettentopologie. [SIE-13b]

Der Mehrenden-Leitungsdifferenzialschutz und Distanzschutz Siemens SIPROTEC 4 7SD52/53 eignet sich beispielsweise für den Einsatz als Differenzialschutz. Nach [SIE-13b] vereint er sowohl den Leitungsdifferenzialschutz als auch den Distanzschutz in einem Gerät. Zusätzlich kann er zwei bis sechs Leitungsenden ein- und dreiphasig überwachen. An jedem Leitungsende wird der Differenzialstrom ermittelt. Bei schwachen Einspeisebedingungen, insbesondere wenn der Differenzialschutz mit einer Überstromanregung kombiniert wird, beherrscht er das Auslösen aller Leitungsenden durch eine phasenselektive Schaltermitnahme. [SIE-13b]

In der Praxis zeigt es sich, dass der Differenzialschutz aufgrund seiner vorgenannten Eigenschaften als Hauptschutz Anwendung findet.

6.1.2 Distanzschutz mit Signalübertragung

Nach [SIE-11] bietet der Distanzschutz mit Signalübertragung die Möglichkeit, Fehler auf 100% der Leitungsstrecke unverzögert und selektiv abzuschalten. Der Distanzschutz mit Signalübertragungsverfahren kann Informationen mit der Gegenstation austauschen und weiterverarbeiten. Die Signalübertragung kann über die konventionellen Wege mittels Empfangs- und Sendekontakte oder alternativ durch eine Signalübertragung mittels digitaler Kommunikationsverbindung realisiert werden.

Beim Übertragungsverfahren unterscheidet man das Mitnahmeverfahren (untergreifend) und das Vergleichsverfahren (übergreifend). Beim Mitnahmeverfahren wird der Schutz mit normaler Staffelkennlinie eingestellt. Kommt es zu einem Auslösekommando in erster Zone, wird dies dem anderen Leitungsende über einen Übertragungsweg mitgeteilt. Dort führt das empfangene Signal zur Auslösung, entweder durch Aktivierung der Übergreifzone oder durch direktes Auslösekommando. [SIE-11]

Beim Vergleichsverfahren ist im Schutz von vornherein eine schnelle übergreifende Zone wirksam. Diese kann aber nur auslösen, wenn ein Fehler auch am anderen Leitungsende in einer übergreifenden Zone erkannt wird. Es kann ein Freigabesignal oder ein Blockiersignal übertragen werden. [SIE-11]

Die Signalübertragung kann durch verschiedene Möglichkeiten realisiert werden. Grundsätzlich kommen drei Übertragungswege in Frage. Zum einen mittels einer direkten Verbindung durch eine Monomodefaser, die bis zu einer Wegstrecke von 100 km verlegbar ist. Alternativ besteht die Möglichkeit, ein Steuerkabel zu verwenden. Hierbei ist zu beachten, dass das Steuerkabel nur bis maximal 15 km ohne Unterbrechung verlegbar ist. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Nutzung eines digitalen Kommunikationsnetzes per Funk. Diese Signalübertragungsstrecke kann sowohl einfach als auch redundant ausgelegt werden. Signalübertragungsstrecken können mittels Kupferadern, ISDN, Lichtwellenleiter und dem digitalen Kommunikationsnetz realisiert werden. [SIE-13a] [SIE-05]

Die vorstehenden Ausführungen wurden nur beispielhaft anhand von Schutzgeräten der Firma Siemens gemacht. Generell erfüllen die Schutzgeräte aller namhafter Hersteller die erläuterten Spezifikationen.

7 Konzeptvorschlag für die Vorgehensweise der Umstellung auf eine niederohmige Sternpunktterdung

7.1 Grundlagen der Vorgehensweise

Dieses Kapitel zeigt einen Konzeptvorschlag, mit dem eine Umstellung der Sternpunktterdungsart durchgeführt werden kann. Das Konzept gliedert sich in zwei wesentliche Bestandteile. Dies sind erstens der Umbau und zweitens die Umstellung (siehe Abbildung 7.1).

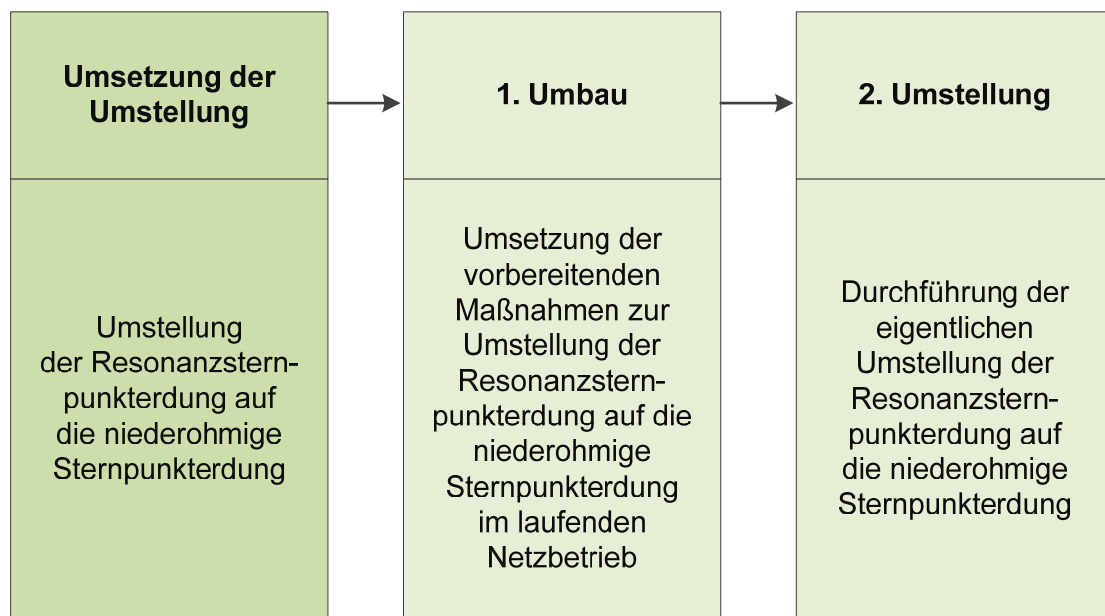


Abbildung 7.1: Umstellung der Resonanzsternpunktterdung auf niederohmige Sternpunktterdung

Umbau

Der Umbau führt alle Maßnahmen auf, die vorbereitend zur Umstellung im laufenden Netzbetrieb umgesetzt werden können. Dazu zählen:

- Austausch der Strom- und Spannungswandler,
- Austausch beziehungsweise Umbau der dreipolig schaltenden Leistungsschalter gegen einpolig schaltende Leistungsschalter,
- Aufbau von Schaltfeldern für die Sternpunktbildner (siehe Kapitel 2.3) mit Leistungsschalter, Trenn- und Erdungsschalter sowie Einbindungsvorbereitungen in die Schutztechnik,
- Austausch der Schutztechnik oder paralleler Aufbau der (neuen) Schutztechnik,
- Anpassungen der Umspannungs- und Masterdungen (sofern erforderlich).

Umstellung

Sind alle vorbereitenden Maßnahmen erfolgreich durchgeführt, ist ein Beginn der eigentlichen Umstellung möglich. Schrittweise werden Teile des Gesamtnetzes auf die niederohmige Sternpunktterdung umgestellt (siehe Kapitel 7.2).

7.2 Erläuterung der Vorgehensweise an einem Beispielnetz (Netzausschnitt)

Im Nachfolgenden wird an einem Beispielnetz die Vorgehensweise von Umbau und Umstellung beispielhaft wiedergegeben. Abbildung 7.2 zeigt das Beispielnetz.

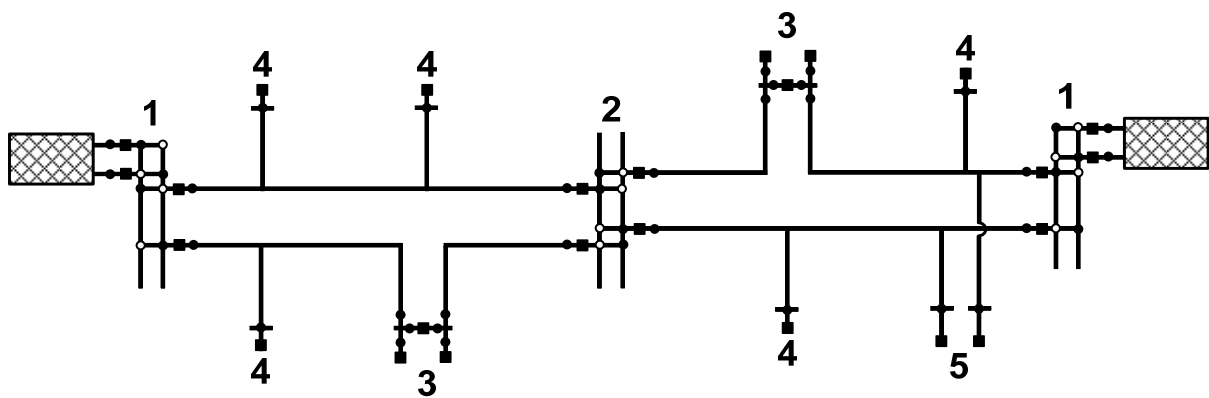


Abbildung 7.2: Ausgangssituation des Beispielnetzes

Jeweils zwei Sammelschienen weisen die Netzverknüpfungspunkte (1) und das Knotenumspannwerk (2) auf. Je nach Art und Weise des Aufbaus können die Netzverknüpfungspunkte neben den HöS-/HS-Transformatoren auch über HS-/MS-Transformatoren verfügen. Im Beispielnetz weisen die Netzverknüpfungspunkte (1) und das Knotenumspannwerk (2) zwei HS-/MS-Transformatoren auf, welche jeweils an einer Sammelschiene angeschlossen sind (HS-/MS-Transformatoren sind in Abbildung 7.2 und Abbildung 7.3 nicht dargestellt).

Verteilungspannwerke können unterdessen in Form einer Einschleifung (3), eines Einfachstichs (4) oder eines Doppelstichs (5) aufgebaut sein. Im Beispielnetz sind den Verteilungspannwerken mit einem Aufbau als Einschleifung (3) und als Doppelstich (5) zwei HS/MS-Transformatoren zugeordnet worden. Die Verteilungspannwerke als Einfachstich (4) verfügen nur über einen HS-/MS-Transformator.

Hochspannungsseitig sind nicht an allen Umspannwerken Erdschlusslöschspulen angeschlossen. Mittelspannungsseitig sind an jedem HS-/MS-Transformator Erdschlusslöschspulen angeschlossen, da die Mittelspannungsnetze überwiegend resonanzsternpunktgeerdet betrieben werden. Auf Basis des Beispielnetzes soll an den Netzverknüpfungspunkten (1), am Knotenumspannwerk (2) sowie an beiden Verteilumspannwerken als Einschleifung (3) die niederohmige Sternpunktterdung errichtet werden.

Zur weiteren Veranschaulichung des Konzeptes werden den einzelnen Umspannwerken Buchstaben zugeordnet (siehe Abbildung 7.3).

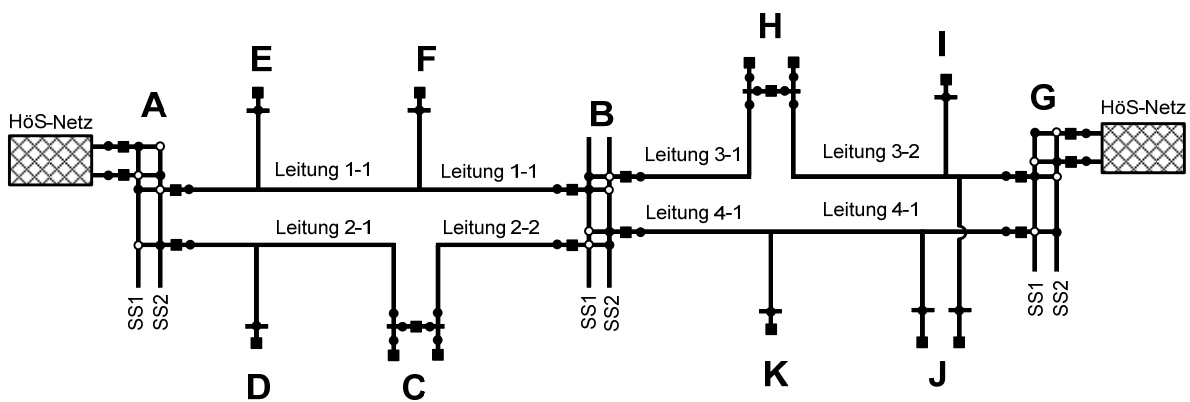


Abbildung 7.3: Zuweisung von Umspannwerks- und Leitungsbezeichnungen für das Beispielnetz

Das Konzept basiert darauf, dass die Umstellung der Erdschlusskompensation auf die niederohmige Sternpunktterdung nach der Umstellung einer Leitung im Netz fortschreitend hintereinander bewerkstelligt wird. Dies heißt, dass alle vorbereitenden Umbaumaßnahmen für eine Umstellung der Sternpunktbehandlung schon vor der tatsächlichen Umstellung auf die niederohmige Sternpunktterdung fertiggestellt beziehungsweise in diesem Punkt vorbereitet sein müssen (siehe Abbildung 7.1).

Umbau im ersten Netzabschnitt

Die vorbereitenden Umbaumaßnahmen zur Umstellung vollziehen sich deckungsgleich mit Abbildung 7.4 sowohl im Netzverknüpfungspunkt (A), im Knotenumspannwerk (B) und in den Verteilumspannwerken (C, D, E, F). Die Maßnahmen sind Bezug nehmend zu Kapitel 7.1 im laufenden Betrieb durchzuführen.

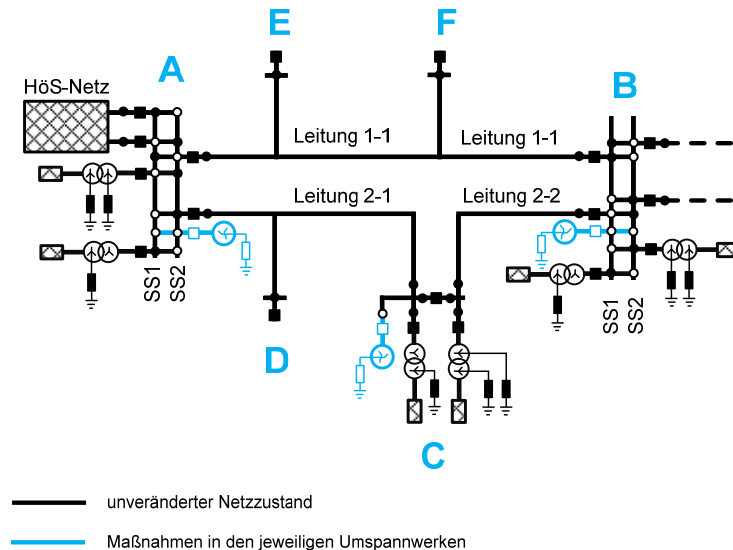


Abbildung 7.4: Maßnahmen in den Umspannwerken A, B, C, D, E, F

Es ist davon auszugehen, dass neue Strom- und Spannungswandler notwendig sein werden. Diese können von der Funktion her auch als Kombiwandler eingesetzt werden. Die gegebenenfalls bereits vorhandenen Kombiwandler, unter Umständen getrennt als Strom- und Spannungswandler, sind in den Umspannwerken gegen Neue zu tauschen. Der Tausch ist darin begründet, dass der Kombiwandler drei Schutzkerne aufweisen muss. Je ein Schutzkerne wird notwendig für den Differenzialschutz, den Distanzschutz sowie für den Sammelschienenschutz. Die gegenwärtig vorhandenen Kombiwandler weisen in der Regel jedoch keine drei Schutzkerne auf, so dass die Anzahl erhöht werden muss. Dies ist nur im Rahmen eines kompletten Tausches des Kombiwandlers, gegebenenfalls getrennt als Strom- und Spannungswandler, möglich.

Parallel dazu findet der Aufbau der neuen Schutztechnik statt. Ein Umbau bestehender Schutztechnik wird in der Praxis keine Anwendung finden. Dies ist in den Abkündigungsfristen der Schutztechnik begründet. Es ist anzustreben, dass die neue Schutztechnik so eingebaut wird, dass ein Betrieb mit Erdschlusskompensation und ab Umstellung ein Betrieb im niederohmig geerdeten Netz zu realisieren ist. Als Haupt- und Reserveschutz sind die Vor-

schläge nach Kapitel 6 umzusetzen. Zu beachten ist, dass schutztechnische Maßnahmen eine Anpassung der Bedienoberfläche in der Schaltwarte und der Wartentechnik benötigen.

Zur Einhaltung der Schritt- und Berührungsspannung ist es in einem niederohmig geerdeten Netz notwendig, einen Fehler unmittelbar abzuschalten. Durch eine kurzzeitige Unterbrechung des Fehlerstromes mit anschließender Wiedereinschaltung können in der Regel viele Fehler geklärt werden, ohne dass es einer Abschaltung bedarf. Dieser Zyklus wird automatische Wiedereinschaltung (AWE) genannt. Zur Vermeidung einer Versorgungsunterbrechung, also nach [DKE-14] das Aussetzen der Energielieferung an Kunden, eignet sich eine einpolige automatische Wiedereinschaltung (siehe Kapitel 2.3). Die im resonanzsternpunktgeerdeten Netz bislang eingesetzten Leistungsschalter können nur dreipolig schalten. Bei einpoligen Fehlern würde durch eine dreipolige AWE die Leitung kurzzeitig dreipolig ausgeschaltet werden. Eine kurzzeitige einpolige Unterbrechung führt jedoch zu geringeren Auswirkungen auf die Stromversorgung bei den Verbrauchern, da bei einer einpoligen Unterbrechung eine unsymmetrische Stromversorgung über die zwei verbliebenen nicht fehlerbehafteten Leiter erfolgt. Diesbezüglich ist es von Vorteil, einen Austausch der dreipolig schaltenden Leistungsschalter gegen einpolig schaltende Leistungsschalter vorzunehmen. Notwendige Stahl- und Fundamentarbeiten sind überdies die Folge dieses Austausches.

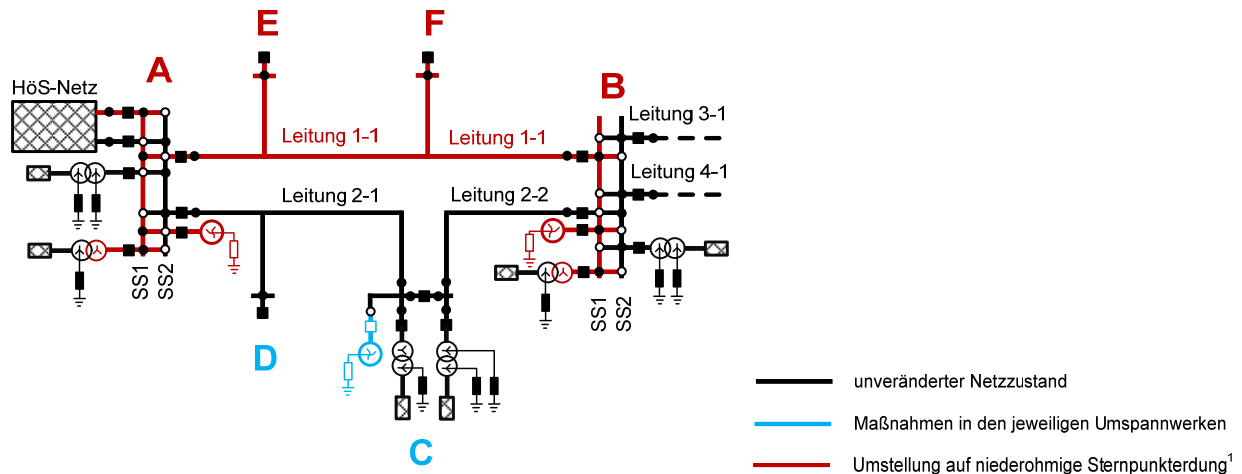
Gemäß Kapitel 2.3 wird im Rahmen dieses Konzeptes auf Sternpunktbildner hochspannungsseitig zurückgegriffen. Insofern gehört der Aufbau eines Schaltfeldes zur Errichtung des Sternpunktbildners zu einer dieser Maßnahmen. Der Aufbau eines eigenen Schaltfeldes für den Sternpunktbildner besitzt den Vorteil, dass die anfallenden Montagearbeiten ohne größeren Einfluss auf den laufenden Netzbetrieb durchgeführt werden können. Je nach Abstand zu anderen Betriebsmitteln können Abschaltungen benachbarter Anlagenteile für Montagearbeiten erforderlich werden. Es ist vorgesehen, an den Sternpunktbildner den NOSPE-Widerstand anzuschließen. Zur Sicherung der Schaltfähigkeit als auch für Wartungsmaßnahmen wird empfohlen, das Schaltfeld mit einem Leistungsschalter und einem Trennschalter inklusive Erder auszurüsten. Darüber hinaus fallen zu jedem Betriebsmittel notwendige Fundament-, Stahlbau- und Montagearbeiten an.

Maßnahmen an Umspannwerkserdungen und an Potentialsteuerungen sind ebenso vorbereitend umzusetzen.

Umstellung des ersten Netzabschnittes

Mit Abschluss der vorbereitenden Maßnahmen in den Umspannwerken A, B, C, D, E, F nach Abbildung 7.4, ist die Inbetriebnahme der neuen Sternpunktterdungsart umsetzbar. Die Umstellung erfolgt ausgehend vom Netzverknüpfungspunkt (A) hin zum Knotenumspannwerk (B). Die zwischen dem Netzverknüpfungspunkt (A) und dem Knotenumspannwerk (B) angeschlossenen Verteilumspannwerke (C, D, E, F) sind von der Umstellung ebenfalls betroffen. Zur Wahrung einer zeitlich umsetzbaren Umstellung von RESPE auf NOSPE findet die Umstellung in einzelnen Abschnitten statt. Zuerst wird die Sammelschiene 1 (SS1) des Netzverknüpfungspunktes (A) mit der NOSPE in Betrieb genommen. Die ankommenden Leitungen 1-1 und 2-1 werden auf die Sammelschiene 2 (SS2) geschaltet, damit die Versorgung aufrecht erhalten werden kann. Mit Inbetriebnahme der SS1 als NOSPE wird der Sternpunktbildner mit NOSPE-Widerstand in Betrieb genommen. Es ist grundlegend zu beachten, dass stets eine galvanische Trennung zwischen dem RESPE- und NOSPE-Netz gewährleistet wird. Entsprechende leittechnische Verriegelungssperren sind zu hinterlegen. Weiterhin wird die vorbereitete neue Schutztechnik ebenfalls vollständig in Betrieb genommen.

Ist die Inbetriebnahme der Sammelschiene erfolgreich verlaufen, wird ein HS-/MS-Transformator hochspannungsseitig mit der Sternpunktterdungsart NOSPE betrieben. Unmittelbar an diese Inbetriebnahme findet die weiterführende Umstellung mit der Inbetriebnahme der Umspannwerke (B) SS1, (E) und (F) als NOSPE gemäß Abbildung 7.5 statt. Gleichlaufend wird der Sternpunktbildner mit dem NOSPE-Widerstand des Knotenumspannwerks (B) in Betrieb genommen. Die Leitung 1-1 wird hierzu galvanisch von SS2 im Knotenumspannwerk (B) getrennt. Die Leitungen 2-2, 3-1 und 4-1 sind nur noch an SS2 im Knotenumspannwerk (B) anzuschließen.



¹ Leistungsschalter und Trennschalter werden zur optisch besseren Darstellung trotz Umbau- oder Zubaumaßnahmen weiterhin schwarz dargestellt.

Abbildung 7.5: Inbetriebnahme Knotenumspannwerk (B) SS1 sowie Verteilumspannwerk (E) und (F) mit niederohmiger Sternpunktterdung

Ist die Umstellung im Netzverknüpfungspunkt (A), im Knotenumspannwerk (B) und in den Verteilumspannwerken (E) und (F) mit Erfolg umgesetzt worden, steht direkt die Umstellung in den Verteilumspannwerken (C) und (D) an. Die ausstehenden Maßnahmen sind mit der Inbetriebnahme der NOSPE abzuschließen. Es ist ein Augenmerk darauf zu richten, dass leittechnisch die Verriegelungssperre zwischen den Sammelschienen 1 und 2 im Knotenumspannwerk (B) eingerichtet ist. Die NOSPE auf Sammelschiene 1 ist stets galvanisch von der RESPE auf Sammelschiene 2 zu trennen. Außerdem ist die Erdschlusslöschspule im Netzverknüpfungspunkt (A) und im Verteilumspannwerk (C) außer Betrieb zu nehmen und in einen nicht mehr zuschaltbaren Zustand zu versetzen. Die Demontage der Erdschlusslöschspule ist folgend ausführbar.

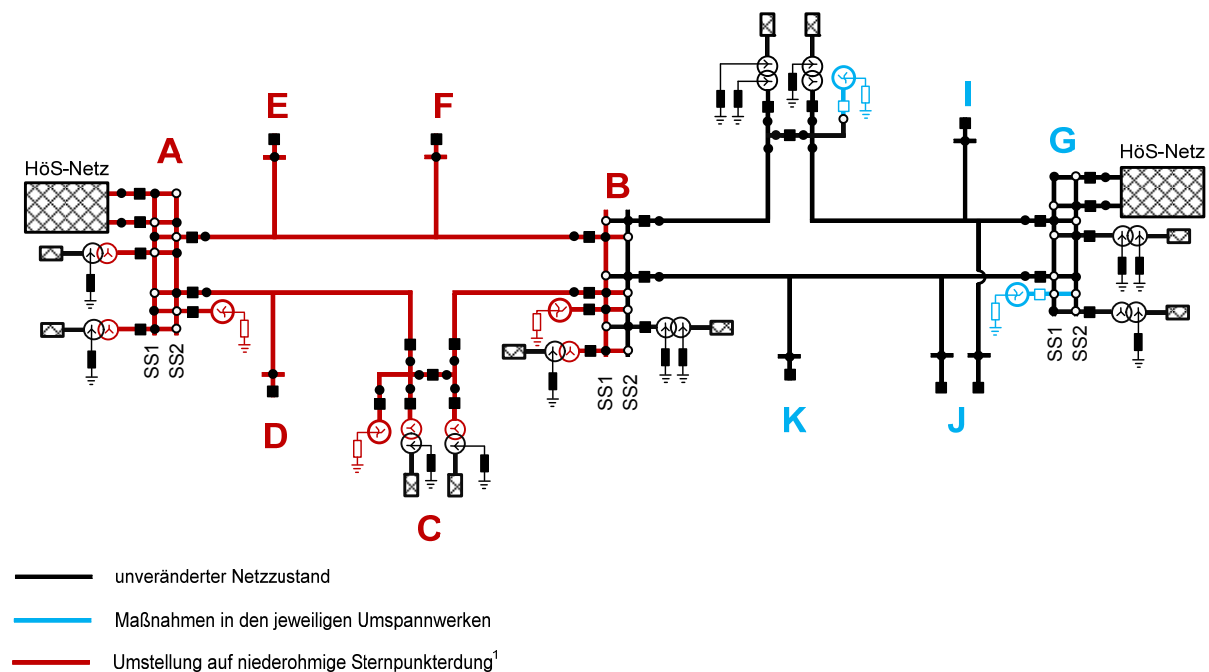
Mit Inbetriebnahme der Verteilumspannwerke (C) und (D) und der galvanischen Trennung zwischen Sammelschiene 1 und Sammelschiene 2 im Knotenumspannwerk (B) haben sich zwei Teilnetze gebildet. Das eine Teilnetz wird mit NOSPE (rot) und das andere Teilnetz mit RESPE betrieben.

Ein galvanisch getrennter Betrieb beider Teilnetze ist ausnahmslos möglich. Eine Kopplung beider Teilnetze ist jedoch ausgeschlossen. Hierdurch sind Einschränkungen in der Versorgungszuverlässigkeit zu erwarten. Daraus leitet sich ab, dass zügig nacheinander umgestellt

werden muss. In kurzer Zeit ist das niederohmig geerdete Netz mit mindestens zwei Netzverknüpfungspunkten zu verbinden, um damit die Einschränkung hinsichtlich des (n-1)-sicheren Betriebes so kurz wie möglich zu halten. Die Errichtung eines ausschließlich für diesen Zweck genutzten zusätzlichen Netzverknüpfungspunktes stellt in erster Linie eine theoretische Option dar. Die Kosten für den neuen Netzverknüpfungspunkt sowie das Erfordernis für eine in der Nähe verfügbare Leitung des Übertragungsnetzes wirken hier als Hemmnisse.

Umbau und Umstellung des zweiten Netzabschnittes

Das Konzept beruht darauf, das Netz vollständig auf NOSPE umzustellen. Aufgrund dessen sind Maßnahmen in allen Verteilungsspannwerken erforderlich. Dies gilt insbesondere für schutztechnische Ertüchtigungen (siehe Kapitel 6.1). Gemäß Abbildung 7.6 ist die Fortsetzung des Umbaus und der Umstellung in den Umspannwerken G, I, H, J, K auszuführen.



¹ Leistungsschalter und Trennschalter werden zur optisch besseren Darstellung trotz Umbau- oder Zubaumaßnahmen weiterhin schwarz dargestellt.

Abbildung 7.6: Fortsetzung des Umbaus in den Umspannwerken G, I, H, J, K

Die Maßnahmen sind in gleicher Vorgehensweise wie nach Abbildung 7.4 bis Abbildung 7.5 durchzuführen. Mit Abschluss der Umstellung ist das Netz in Abbildung 7.7 vollständig auf NOSPE umgestellt und der Ausgangsschaltzustand nach Abbildung 7.2 wiederhergestellt.

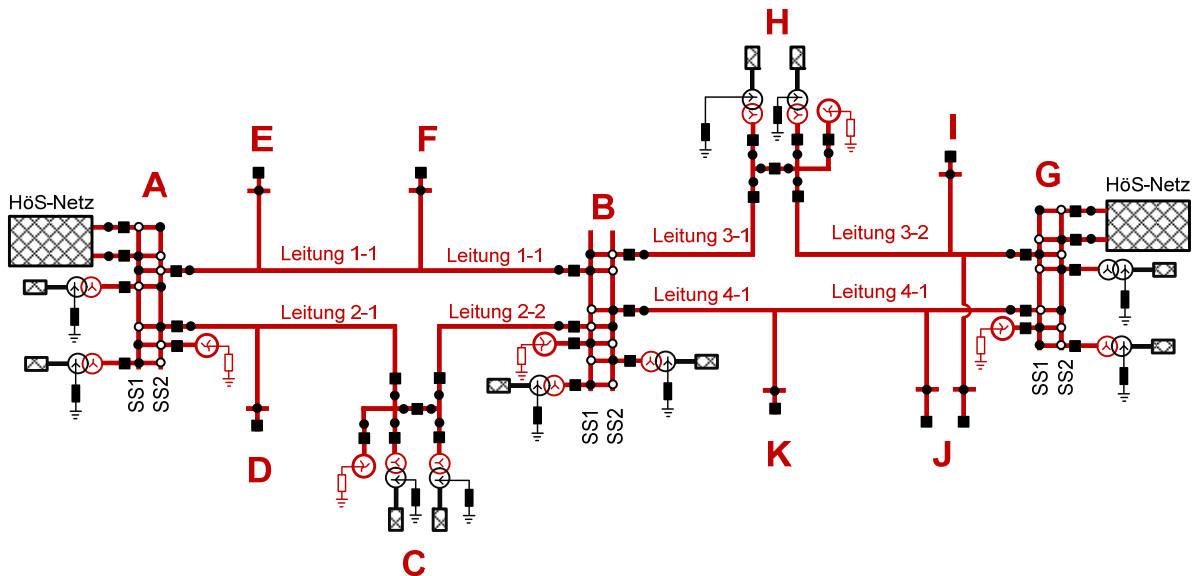


Abbildung 7.7: vollständige Umstellung auf die niederohmige Sternpunktterdung und Wiederherstellung des Ausgangsschaltzustandes nach Abbildung 7.2

7.3 Aspekte zur Versorgungszuverlässigkeit während der Umstellung

Im Rahmen der beschriebenen Umstellung auf die niederohmige Sternpunktterdung ist mit Einschränkungen gegenüber dem Normalbetriebszustand zu rechnen. Je nach Situation kann eine Verringerung der Versorgungszuverlässigkeit auftreten.

Eingruppierung in laufende, anstehende und langfristig geplante Maßnahmen unabhängig von der Umstellung

Im Vorgriff auf Kapitel 9 wird die Umstellung nicht innerhalb kurzer Zeit zu bewältigen sein. Während der Umbau- und Umstellungsphase werden Einschränkungen gegenüber einem normalen Netzbetrieb auftreten, welche die Versorgungszuverlässigkeit beeinflussen können. Die Umstellung muss sich in laufende, anstehende und langfristig geplante Maßnahmen einordnen. Hierzu zählen Netzausbaumaßnahmen zur Erhöhung der Stromtransportkapazitäten, kleinere und größere Ertüchtigungsmaßnahmen von Betriebsmitteln als auch Wartungsmaßnahmen zur Gewährleistung eines zuverlässigen Netzbetriebes.

Vorhalten und Aufbau von Leitungsprovisorien

Im Rahmen der Umstellung auf die niederohmige Sternpunktterdung kann zur Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit auf den umzustellenden Leitungsabschnitt ein Leitungsprovisorium vorgehalten und gegebenenfalls zum Einsatz gebracht werden. Dies besitzt den Vorteil, dass bei einer etwaigen zeitlichen Verzögerung während der Umstellung oder zur Gewährleistung einer uneingeschränkten Versorgungszuverlässigkeit des Leitungsabschnittes keine Auswirkungen auf die Stromversorgung zu erwarten sind.

Zeitweilige Eingliederung eines bereits auf NOSPE umgestellten Leitungsabschnittes in das verbliebene RESPE-Netz (Erfordernis aus betrieblichen Gründen)

Führt man die Umstellung schrittweise durch und werden Netzbereiche bereits mit niederohmiger Sternpunktterdung betrieben, ist eine temporäre Wiedereingliederung dieser Netzbereiche in das verbliebene RESPE-Netz nur unter folgenden Voraussetzungen möglich:

- Umparametrierung der neuen Schutztechnik auf die alten Parameter für Resonanzsternpunktterdung,
- Vorhandensein von noch ausreichender Anzahl an Erdschlusslöschpulen im verbliebenen RESPE-Netz.

8 Kosten der Sternpunktterdungsumstellung

Ein maßgebendes Kriterium bei der Bewertung, ob eine Umstellung der Resonanzsternpunktterdung auf die niederohmige Sternpunktterdung erfolgen soll, werden die durch die Umstellung resultierenden Kosten sein. Auf Basis des Modellnetzes und dem dafür aufgestellten Mengengerüst sind beispielhaft die Kosten ermittelt worden. Diese setzen sich aus einer Vielzahl von Einzelmaßnahmen zusammen. Die Einzelmaßnahmen lassen sich in drei große Kategorien einteilen:

- Anpassung der Schutztechnik,
- Anpassung der Sternpunktterdung mittels des Einsatzes von Sternpunktbildnern,
- Anpassung der Erdung.

Jede der einzelnen Kategorien ist wiederum in einzelne Unterkategorien unterteilbar. Die Kategorie „Schutztechnik“ setzt sich zusammen aus:

- Sammelschienenschutz Feldeinheit (pro Feld),
- Sammelschienenschutz Zentraleinheit (pro UW),
- Leitungsdifferenzialschutz (pro Leitungsende),
- Signalvergleichsendgerät (pro Leitungsende),
- Aufbau Signalübertragungsstrecke (LWL, Steuerkabel, Funk),
- Wandler (Strom- und Spannungswandler / Kombiwandler),
- Leistungsschalter mit AWE-Funktion,
- Trenn- und Erdungsschalter,
- Überspannungsableiter.

Die Kategorie „Sternpunktterdung mittels des Einsatzes von Sternpunktbildnern“ beinhaltet die Unterkategorien:

- Sternpunktbildner,
- Stahlkonstruktion Sternpunktbildner,
- Stahlkonstruktion Sternpunktanlage,
- NOSPE-Widerstand (60, 80, 100 Ω),
- Kombiwandler,

- Leistungsschalter,
- Trennschalter,
- Erdungsschalter,
- Überspannungsableiter,
- notwendige Kabel- und Freileitungskomponenten,
- Wartenschrank.

Die Kategorie „Anpassung der Erdung“ beschäftigt sich mit:

- Potentialsteuerung für Maste,
- Potentialsteuerung für Umspannwerke,
- Maßnahmen an Umspannwerkserden.

Die Gesamtkosten werden in Minimum, Mittelwert und Maximum untergliedert, da die Ausgangskosten für die jeweiligen Kategorien einschließlich der Unterkategorien eine gewisse Bandbreite aufweisen.

Abbildung 8.1 stellt die Kosten auf Basis der Grundvarianten G1 bis G3 dar. Die Grundvarianten unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl der geerdeten Sternpunkte: G1 umfasst 14 niederohmig geerdete Sternpunkte. G2 umfasst 21 und G3 umfasst 28 niederohmig geerdete Sternpunkte.

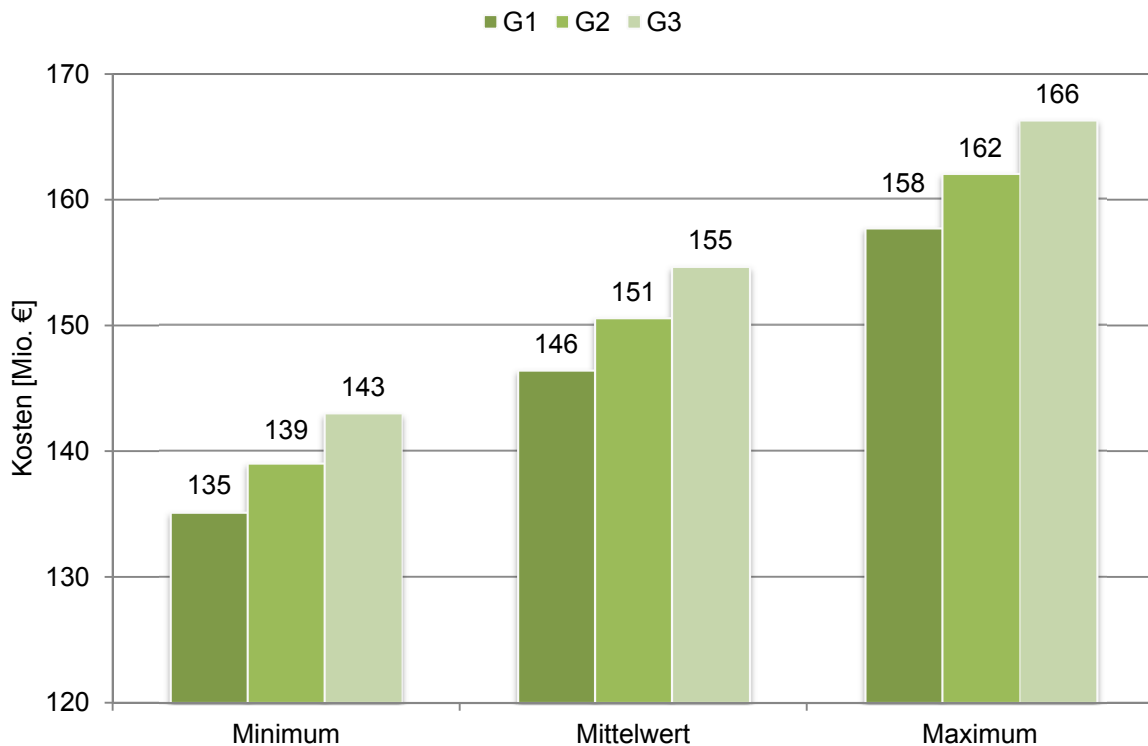


Abbildung 8.1: Mindestkosten für die Sternpunkterdungsumstellung auf Basis des Modellnetzes

Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 8.2 bis Abbildung 8.4) zeigen detailliert auf, wie sich die in Abbildung 8.1 dargestellten Gesamtkosten im Detail für die Grundvariante G1 unter Berücksichtigung der maximalen Kosten ein und derselben Maßnahme zusammensetzen.

Gemäß Abbildung 8.2 wird deutlich, dass die Kosten für den Aufbau der neuen Schutztechnik den größten Kostenanteil darstellen. Der Aufbau der neuen Schutztechnik beläuft sich auf 91,14 Mio. €. In der Modellbetrachtung wird angenommen, dass keine schutztechnische Kommunikationsverbindung zwischen jedem einzelnen Umspannwerk vorhanden ist, so dass der Aufbau einer Signalübertragungsstrecke kostenmäßig berücksichtigt wird. Deren Kosten betragen für das 1.856 km lange Modellnetz 51,03 Mio. €. Die Anpassungen der Erdung und der Einbau von Sternpunktbildnern belaufen sich auf einen Kostenanteil von 12,57 Mio. €.

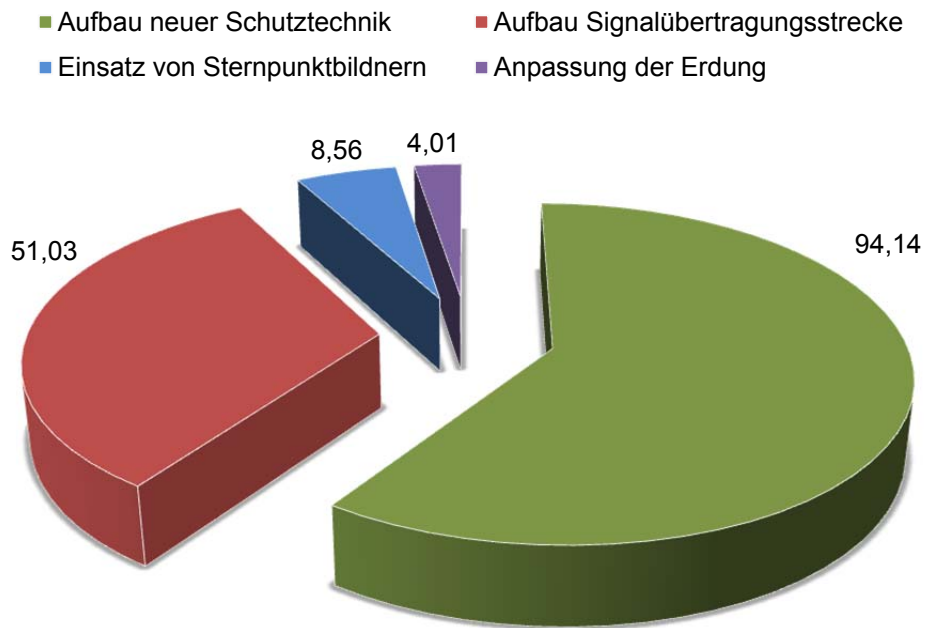


Abbildung 8.2: Zusammensetzung der Kosten [Mio. €] für die Grundvariante G1 beim Einsatz von Sternpunktbildnern und der Berücksichtigung der jeweils höchsten Kosten innerhalb einer Maßnahme

Abbildung 8.3 stellt die Kostenanteile detailliert dar, die für den Einbau der neuen Schutztechnik inklusive dem Aufbau einer Signalübertragungsstrecke erforderlich sind. Abbildung 8.4 geht auf die im Zusammenhang mit dem Einbau der Sternpunktbildner hervorgerufenen Kosten ein.

Zusätzlich zu den im Detail dargestellten Kosten der Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4 sind für die Anpassung der Erdung Kosten in Höhe von 4,01 Mio. € insbesondere für die Anpassung der Potenzialsteuerung an Masten zu berücksichtigen.

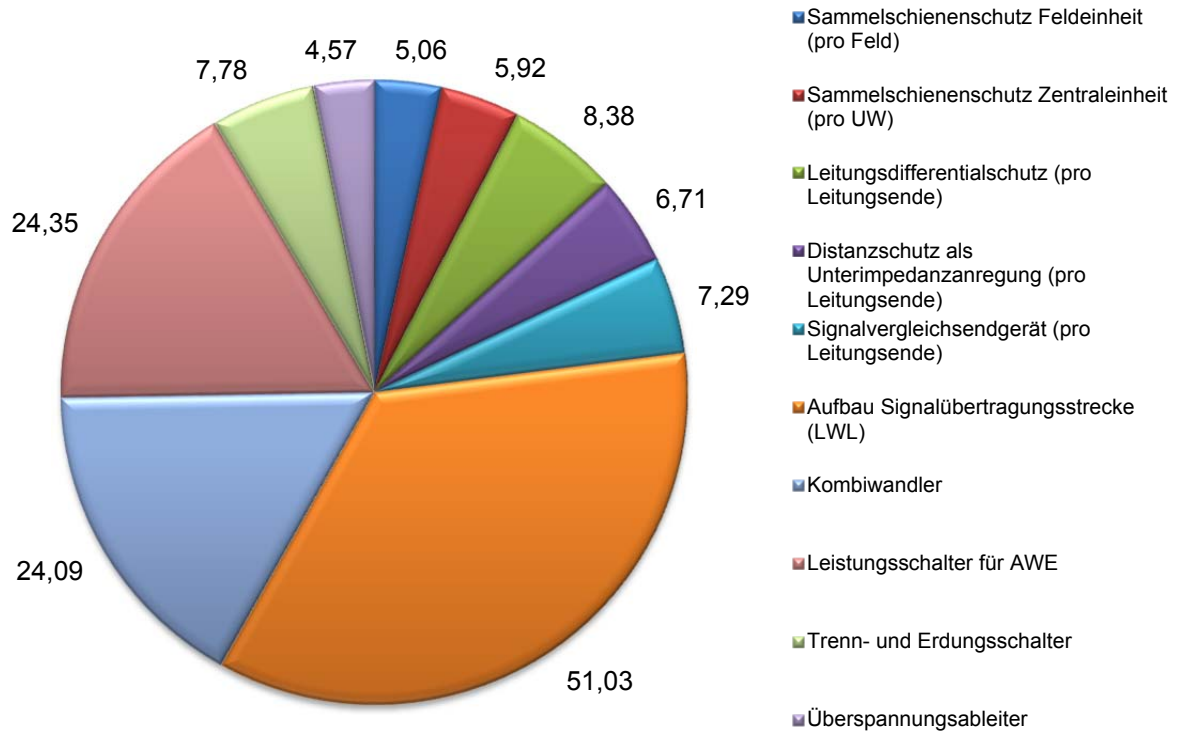


Abbildung 8.3: Zusammensetzung der Kosten [Mio. €] für den Aufbau der Schutztechnik in der Grundvariante G1 und der Berücksichtigung der jeweils höchsten Kosten innerhalb einer Maßnahme

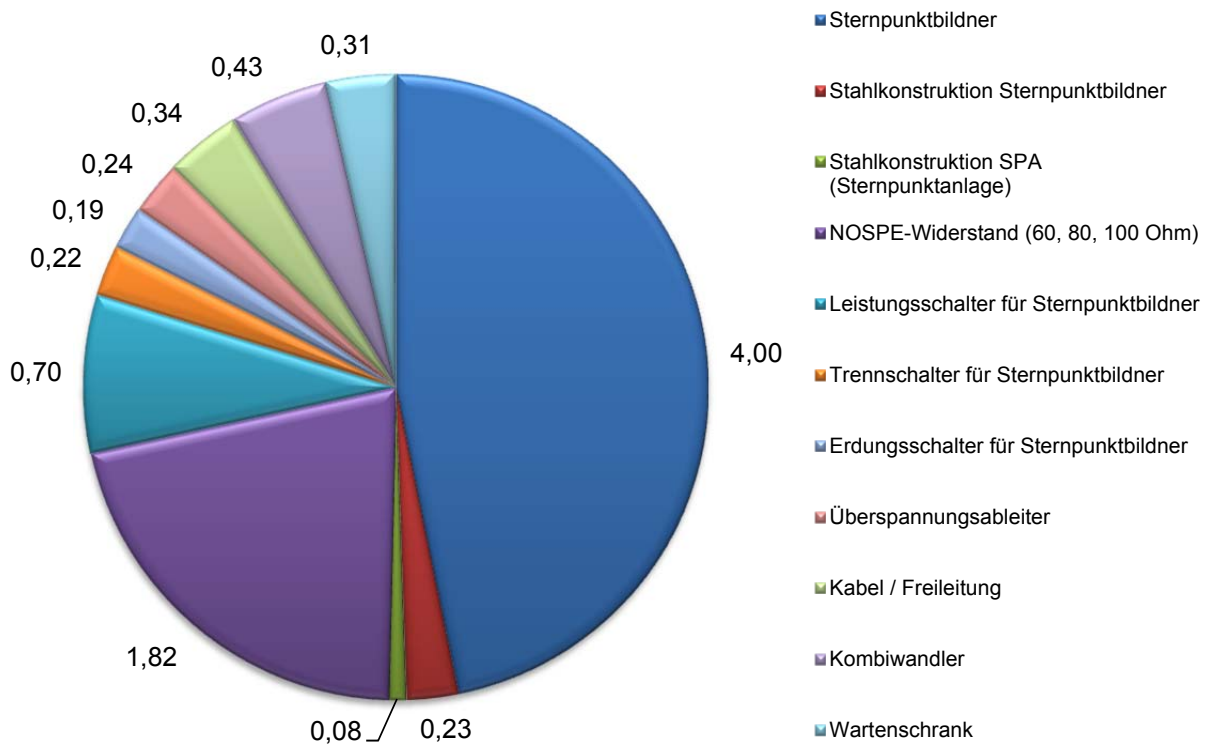


Abbildung 8.4: Zusammensetzung der Kosten [Mio. €] beim Einsatz von Sternpunktbildnern in der Grundvariante G1 und der Berücksichtigung der jeweils höchsten Kosten innerhalb einer Maßnahme

In der Betrachtung nicht berücksichtigt sind anfallende Personalkosten bei den Verteilnetzbetreibern, die für die Planung, Ausschreibung, Baukontrolle, Abnahme und Inbetriebnahme erforderlich sein werden. Darüber hinaus sind anfallende Neubaukosten von Betriebswartengebäuden insbesondere durch die neue Schutztechnik einzukalkulieren. Zusätzlich ist aufgrund des beträchtlich langen Zeitraums der Umstellung der Sternpunkterdung mit Kostensteigerungen durch Inflation und allgemeinen Preissteigerungen zu rechnen. Es sind daher gegenwärtig nicht exakt bezifferbare Kosten in Millionenhöhe zu denen in Abbildung 8.1 hinzu zu addieren.

Aufgrund von Bau- und Wartungsmaßnahmen als auch durch Störereignisse bedingt, bedarf es als Reservevorhaltung der Umstellung von weiteren Umspannwerken mit einer niederohmigen Sternpunkterdung. Als Reserve werden weitere Umspannwerke mit einer niederohmigen Sternpunkterdung ausgestattet, die im laufenden Netzbetrieb nicht aktiv niederohmig geerdet sind, sondern nur im Fall von Netzstörungen und bei etwaigen Teilnetzbildungen. Ziel ist es, stets die erforderliche Anzahl von niederohmig geerdeten Sternpunkten im Netz auch im Störfall und bei etwaiger Netztrennung vorweisen zu können. Berücksichtigt man hierfür eine Reserveumstellung für derartige Ereignisse in Höhe von 15 Prozent der geplanten Sternpunkterdungen, so sind der Abbildung 8.1 weitere ein bis drei Millionen Euro je nach Grundvariante hinzuzurechnen.

Analogiebetrachtung zur Kostenabschätzung für die Brandenburger Verteilnetze

Aufbauend auf dem Modellnetz (1.856 km Systemlänge) und dem dafür aufgestellten Mengengerüst sind beispielhaft die zu erwartenden Gesamtkosten ermittelt worden. Sie dienen als erste Einschätzung für die mindestens zu erwartenden Kosten bei einer Sternpunkterdungsumstellung für ein hinsichtlich der Systemlänge vergleichbares reales Netz.

Die Brandenburger Verteilnetze weisen unterteilt in die einzelnen Verteilnetzbetreiber eine Gesamtsystemlänge von gegenwärtig circa 5.130 km ohne den anstehenden Netzausbau auf. Die momentane Gesamtsystemlänge untergliedert sich gemäß Tabelle 8.1.

Tabelle 8.1: Übersicht der HS-Systemlängen je Verteilnetzbetreiber im Land Brandenburg

Verteilnetzbetreiber	HS-Systemlängen [km]		davon als HS-Freileitung [km]		davon als HS-Kabel [km]	
	ca.		ca.		ca.	
E.DIS AG	ca.	3.330	ca.	3310	ca.	19,6
MITNETZ STROM mbH	ca.	1.700	ca.	1.690	ca.	10
WEMAG Netz GmbH	ca.	100	ca.	98,6	ca.	1,4

Anhand dieser Angaben lassen sich näherungsweise Analogieschlüsse für zu erwartende Kosten für die Brandenburger Verteilnetze ziehen.

Für die Ermittlung der Gesamtkosten für die Brandenburger Verteilnetze ergibt sich unter Berücksichtigung von Tabelle 8.1 ein Skalierungsfaktor von 3,2 , mit dem die Angaben in Abbildung 8.1 zu multiplizieren sind. Dies stellt jedoch nur einen groben Orientierungswert dar. Vor allem zwischen dem Modellnetz und den realen Brandenburger Verteilnetzen ist hinsichtlich des Aufbaus von Signalübertragungsstrecken für das neue Schutzkonzept ein anderer Faktor anzunehmen. In den Brandenburger Verteilnetzen muss davon ausgegangen werden, dass Signalübertragungsstrecken bereits weitläufig vorhanden sind. Für etwaig anfallende Kosten zur Erschließung und Anbindung von Kommunikationswegen, vor allem hinsichtlich noch nicht angeschlossener Fremdumspannwerke, sind Analogien nur schwer darzustellen. Daher bietet die Kostenkalkulation nach Abbildung 8.1 und der genannte Kostenfaktor für die Brandenburger Verteilnetze nur eine grobe Approximation für die zu erwartenden Kosten bei den jeweiligen Verteilnetzbetreibern. Im realen Netz ist eine individuelle Kostenkalkulation unausweichlich.

9 Zeitaufwand für die Sternpunkterdungsumstellung

Anhand der vorangegangenen Kapitel ist erkennbar, dass für eine Sternpunkterdungsumstellung verschiedene umfangreiche Einzelaufgaben erforderlich sind. Es müssen die Maßnahmen der einzelnen Kategorien (siehe Kapitel 8) umgesetzt werden. Die Summe der Maßnahmen führt zu einem hohen zeitlichen Planungs- und Durchführungsaufwand. Die Umstellung der Sternpunkterdungsart hat sich in vorhandene und zukünftig anstehende Baumaßnahmen von Hochspannungsprojekten sowie in planmäßige und erforderliche Wartungsmaßnahmen einzuordnen.

Anhand des Modellnetzes erfolgte eine Analyse des sich ergebenden Zeitaufwandes. Abbildung 9.1 zeigt den zu erwartenden Zeitaufwand in Jahren je Grundvariante.

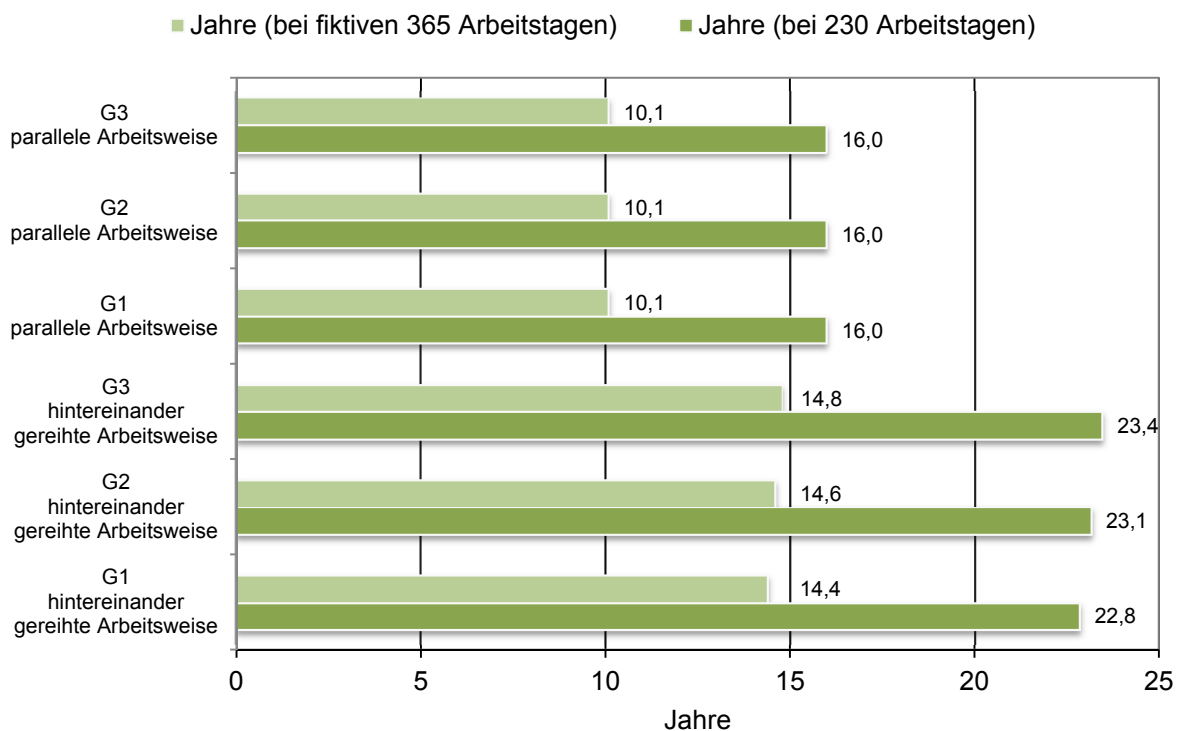


Abbildung 9.1: Zeitaufwand je Grundvariante in Abhängigkeit der Arbeitsweise

Führt man keine Minimierung des Zeitaufwandes durch, indem man auf parallel durchzuführende Arbeiten verzichtet, muss für den Umfang des Modellnetzes mit einem Zeitaufwand bei der Umstellung der Resonanzsternpunkterdung auf die niederohmige Sternpunkterdung von 23 Jahren gerechnet werden. Zwischen der Grundvariante G1 und G3 liegen bei dieser

Arbeitsweise 143 Arbeitstage dazwischen. Führt man die Arbeiten an 365 Arbeitstagen (fiktive Betrachtung) anstatt an 230 Arbeitstagen im Jahr durch, kann der Zeitaufwand von 23 Jahren auf circa 15 Jahren reduziert werden. Eine deutliche Reduzierung des Zeitaufwandes wird erreicht, indem man Arbeiten parallel ausführt. Das heißt, dass, während die Umstellung der Schutztechnik durchgeführt wird, auch die Maßnahmen an den Sternpunkterdungen und an den Erdungsanlagen stattfinden. Durch diese Vorgehensweise kann der Zeitaufwand auf bis zu 10 Jahre reduziert werden.

Nichtsdestotrotz bleibt zu berücksichtigen, dass der dargestellte Zeitaufwand auf Basis des Modellnetzes stattfand und von idealisierten Grundlagen ausgegangen worden ist. Dazu zählt die Annahme, dass das Netz für die Umbauarbeiten verfügbar ist. Im realen Netz müssen dagegen Koordinierungen hinsichtlich anstehender und in der Umsetzung befindlicher Baumaßnahmen von Hochspannungsprojekten, von Wartungsmaßnahmen als auch von Neuanschlüssen für Kunden erfolgen. Dies führt dazu, dass während der Umstellung auf die niederohmige Sternpunkterdung von einer Schwächung des Netzes im Vergleich zu einem Normalbetrieb ausgegangen werden kann. Infolgedessen können sich die in Abbildung 9.1 dargestellten Zeitaufwände mitunter deutlich nach oben korrigieren. Nicht zuletzt ist einzukalkulieren, dass für eine etwaige Umstellung sowohl ausreichend Personal bei den Verteilnetzbetreibern als auch bei den zu beauftragenden Firmen vorhanden sein muss.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für die Ermittlung der zu erwartenden Zeitaufwände für die Umstellung der Sternpunkterdungsumstellung im Modellnetz von Bedingungen ausgegangen wurde, die in der Praxis als idealisiert eingestuft werden können. Ziel von Abbildung 9.1 ist es, eine Orientierung aufzuzeigen, mit welchen Zeitaufwänden in etwa bei einer Umstellung zu rechnen sein wird.

10 Zusammenfassung und Handlungsempfehlung

Bei den gegenwärtigen 110-kV-Verteilnetzen in Freileitungsausführung handelt es sich um durch Elektroingenieurleistung jahrzehntelang optimierte Netze. Die Resonanzsternpunktterdung, welche überwiegend in den Verteilnetzen vorzufinden ist, besitzt den Vorteil, dass ein einpoliger Fehler bis zu zwei Stunden anstehen kann, bevor er abgeschaltet werden muss. Dieser Vorteil hat einen entscheidenden Einfluss auf die Versorgungszuverlässigkeit.

Die ständige Zunahme der installierten Leistungen von dezentralen EEG-Erzeugungsanlagen führt zu einem umfangreichen Netzausbau, da eine große Anzahl von leistungsstarken Wind- und Photovoltaikanlagen direkt an die 110-kV-Verteilnetze angeschlossen sind. Dem gegenüber steht ein hierzu geringer Lastbedarf in Brandenburg. Der erforderliche umfangreiche Ausbau der 110-kV-Verteilnetze wird zunehmend mit Kabeln anstatt mit Freileitungen erfolgen.

Bedingt durch den steigenden Kabelzubau und die elektrotechnisch unterschiedlichen Eigenschaften von Kabeln gegenüber Freileitungen wird die Grenze der Anwendbarkeit der gegenwärtig vorhandenen Resonanzsternpunktterdung schnell erreicht. Die Verteilnetzbetreiber können diese Beschränkung durch unterschiedliche Maßnahmen lösen. Hierzu zählen:

- Bildung von Teilnetzen unter Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung,
- Einsatz von Trenntransformatoren unter Beibehaltung der Resonanzsternpunktterdung,
- Umstellung der Resonanzsternpunktterdung auf die niederohmige Sternpunktterdung.

Sieht man keine Umstellung auf eine andere Sternpunktterdungsart vor, bedarf es unweigerlich der Verkleinerung des Netzes durch Bildung von Teilnetzen. Bei der Bildung von Teilnetzen wird das bestehende Netz in kleinere Netzgebiete unterteilt. Dies ermöglicht es, dass der Kabelzubau bis zum Erreichen des maximal möglichen kapazitiven Erdschlussstromes I_{CE} in jedem neu gebildeten Teilnetz umgesetzt werden kann. Zur Gewährleistung der (n-1)-Sicherheit ist der Neubau von weiteren Netzverknüpfungspunkten je neu gebildetem Teilnetz notwendig. Ergänzend müssen Einschränkungen hinsichtlich der Zusammenschaltbarkeit von Netzen hingenommen werden, was sich in einer daraus resultierenden verringerten Versorgungszuverlässigkeit widerspiegelt.

Um diese Einschränkung der fehlenden Zusammenschaltbarkeit von Netzen zu umgehen, eignet sich die vollständige Umstellung der Sternpunktterdungsart. Durch die Umstellung der Sternpunktterdungsart können die bisherigen Netzgebiete in ihrer Größe erhalten bleiben und mit Kabeln ohne Beschränkungen ausgebaut werden.

Um die Aspekte, die im Zusammenhang mit einer Umstellung der Sternpunktterdung stehen, untersuchen zu können, wurde ein 110-kV-Modellnetz erstellt, mit dem die erforderlichen Untersuchungen durchgeführt wurden. Der Schwerpunkt der rechnerischen Betrachtungen lag auf dem Zusammenhang zwischen der Sternpunktterdung, der Schutztechnik und den zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen.

Die Umstellung auf die niederohmige Sternpunktterdung zeigt gemäß Kapitel 5, dass zur Einhaltung der zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen ein Fehler unmittelbar abzuschalten ist. Die für das Modellnetz berechneten Kurzschlussströme liegen im Kiloampere-Bereich. Entsprechend der Norm sind diese Kurzschlussströme im unteren hundert Millisekundenbereich abzuschalten. Zur Erreichung dieser Fehlerklärungszeit ist eine Anpassung der bestehenden Schutztechnik unumgänglich. Dies führt in der Praxis dazu, dass eine neue Schutztechnik in Form eines Differenzialschutzes und eines Distanzschutzes mit Signalvergleich aufzubauen ist. Der Signalvergleich setzt den Aufbau von Signalübertragungsstrecken voraus.

Gemäß Kapitel 8 wird anhand des untersuchten Modellnetzes deutlich, dass die neue Schutztechnik und der Aufbau von Signalübertragungsstrecken einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Kosten haben. Ausgehend vom den Berechnungen zugrunde liegenden Modellnetz (Mischnetz mit 290 km Kabel und 1.566 km Freileitung) sind in der Grundvariante G1 und unter Berücksichtigung der jeweils höchsten Kosten innerhalb einer Maßnahme ca. 158 Mio. € einzukalkulieren. Der Aufbau von Sternpunktbildnern sowie die Anpassungen an den Mast- und Umspannwerkserdungen bedürfen einer Veranschlagung von ca. 13 Mio. €.

Im Einzelnen ist eine Vielzahl von Maßnahmen erforderlich, die über einen beträchtlich langen Zeitraum umzusetzen sind. Gemäß Kapitel 9 ist für das repräsentative Modellnetz mit einem Zeitaufwand von 16 Jahren bei paralleler und 23 Jahren bei sequenzieller Arbeitsweise unter Berücksichtigung von 230 Arbeitstagen pro Jahr zu rechnen.

Kapitel 7 zeigt einen Konzeptvorschlag auf, mit dem die Umstellung auf eine niederohmige Sternpunktterdung vollzogen werden kann. Bis zu einer vollständigen Umstellung der Sternpunktterdung entstehen aufgrund des schrittweisen Vorgehens zwischenzeitlich kleine Teilnetze mit NOSPE, die jedoch aufgrund geringerer Versorgungszuverlässigkeit nicht langfristig in diesem Zustand betrieben werden sollten.

Im Konzeptvorschlag ist erkenntlich, dass die Umstellung der Schutztechnik einen gewichtigen Anteil am Konzept trägt. Allerdings sind die Netzbetreiber auch aufgrund der Abkündigung von schutztechnischem Support und Ersatzteilversorgung gezwungen, Schutzgeräte neuer Modellreihen einzusetzen. So wird in der Praxis der schutztechnische Support noch einige wenige Jahre und die schutztechnische Ersatzteilversorgung nur noch circa weitere zehn Jahre nach Abkündigung durch den Hersteller gewährleistet. Auch hierdurch sind notwendige schutztechnische Anpassungen im bestehenden Verteilnetz in langfristigen zeitlichen Abständen erforderlich.

Berücksichtigt man zusätzlich den nicht von der Hand zu weisenden Vorteil der höheren Versorgungszuverlässigkeit, wenn Netze aufgrund gleicher Sternpunktterdung weiterhin zusammenschaltbar sind, ist auf Basis der Erkenntnisse mit dem Modellnetz eine Umstellung der Sternpunktterdungsart als eine mögliche Option gegeben. Diese Erkenntnis ist auf reale Verteilnetze übertragbar. Jedoch ist anzumerken, dass trotz dieser prinzipiellen Machbarkeit, die Umsetzung teuer, technisch aufwendig sowie nicht kurzfristig zu realisieren ist. Praktisch bestehen hierzu bisher keinerlei Erfahrungen, so dass mit weiteren Hemmnissen und Risiken zu rechnen ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine vollständige Umstellung der Sternpunktterdungsart möglich ist und eine technische Lösung im Hinblick auf die vorhandenen Grenzen des Kabelzubaus in den gegenwärtig resonanzsternpunktgeerdeten Netzen darstellt. Der immense Umfang an durchzuführenden technischen Maßnahmen sowie die damit einhergehenden organisatorischen Maßnahmen zeigen, dass eine Sternpunktterdungsumstellung im laufenden Netzbetrieb eine sehr große Herausforderung darstellt. Angesichts des mit der Umstellung verbundenen langfristigen Zeitrahmens im Bereich von Jahrzehnten und den zu veranschlagenden Kosten im dreistelligen Millionenbereich ist eine genaue Abwägung der Maßnahme durch den jeweiligen Verteilnetzbetreiber erforderlich.

11 Literaturverzeichnis

- [BAL-88] Balzer, Gerd:
ETG Fachbericht 24: Beidseitige Erdung von Transformatoren
Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 1988.
- [DIN0228-87] o.A.; DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der
Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:
DIN VDE 0228-2, Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen
Teil 2: Beeinflussung durch Drehstromanlagen
Berlin: VDE Verlag, 1987 (Dezember).
Die DIN VDE 0228-2:1987-12 wurde im September 2014 durch die DIN VDE 0845-6-2:2014-09 ersetzt.
- [DIN0845-10] o.A.; DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der
Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:
E DIN VDE 0845-6-2 (VDE 0845-6-2):2010-02, Maßnahmen bei Beeinflussung von Telekommunikationsanlagen durch Starkstromanlagen – Teil 2: Beeinflussung durch Drehstromanlagen.
Berlin: VDE Verlag, 2010.
Die Entwurfssfassung wurde im September 2014 durch die Endfassung ersetzt.
- [DIN50341-10] o.A.; DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der
Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:
DIN EN 50341-1 (VDE 0210-1):2010-04, Freileitungen über AC 45 kV – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
Berlin: VDE Verlag, 2010 (April).

- [DIN50522-11] o.A.; DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:
DIN EN 50522 (VDE 0101-2):2011-11, Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1kV.
Berlin: VDE Verlag, 2011.
- [DIN60909-02] o.A.; DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:
DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07, Kurzschlussströme in Drehstromnetzen.
Berlin: VDE Verlag, 2002.
- [DIN61936-11] o.A.; DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:
DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1):2011-11, Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil 1: Allgemeine Bestimmungen.
Berlin: VDE Verlag, 2011 (November).
- [DKE-14] o.A.; Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE
DKE-IEV Deutsche Online-Ausgabe des IEV
<https://www.dke.de/de/Online-Service/DKE-IEV/Seiten/IEV-Woerterbuch.aspx> (zuletzt aufgerufen am 03.09.2014)
Online-Wörterbuch, Frankfurt am Main: DKE, 2014.
- [DOE-07] Doemeland, Wolfgang; Götz, Karsten:
Handbuch Schutztechnik. Grundlagen, Schutzsysteme, Inbetriebsetzung.
8. Auflage, Berlin: VDE Verlag, 2007.

- [FIC-07] Fickert, Lothar; Renner, Herwig:
Energienetze - Teil 1: Elektrische Energienetze
[http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i2150/download/Lehre/
Energienetze/script%20energienetze.pdf](http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i2150/download/Lehre/Energienetze/script%20energienetze.pdf)
(zuletzt aufgerufen am 23.04.2015)
Vorlesungsskript WS 2007, Graz: Technische Universität Graz: 2007.
- [HAU-83] H. J. Haubrich; Seele, W.:
Kriterien zur Wahl der Sternpunktbehandlung in 110-kV-Netzen
Elektrizitätswirtschaft 82, Heft 22/1983, S. 823-828, 1983.
- [HER-02] Herold, Gerhard:
Elektrische Energieversorgung III
Drehstrommaschinen, Sternpunktbehandlung, Kurzschlussströme
Erlangen: J. Schlembach Fachverlag, 2002.
- [HEU-10] Heuck, Klaus; Dettmann, Klaus-Dieter; Schulz, Detlef:
Elektrische Energieversorgung.
*Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Stu-
dium und Praxis.*
8. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [HOF-10] Hofmann, Lutz; Oswald, Bernd R.:
Vergleich Erdkabel - Freileitung im 110-kV-Hochspannungsbereich
Gutachten der Leibniz Universität Hannover, Hannover: 2010.
- [HOF-11] Hofmann, Lutz; Oswald, Bernd R.:
Wirtschaftlichen Vergleich von Kabeln, Freileitungen und
*Freileitungen mit Zwischenverkabelung im 110-kV-
Hochspannungsbereich*
Gutachten der Leibniz Universität Hannover, Hannover: 2011.

- [MEL-12] Melzer, Helmut:
ETG Fachbericht 132: Die aktuelle Situation der Sternpunktbehandlung
in Netzen bis 110 kV (D-A-CH)
Berlin: VDE Verlag, 2012.
- [MOO-13] Moormann, Andreas; Vennegeerts, Hendrik; Büdenbender, Kathrin; Möl-
ler, Axel:
*Möglichkeiten und Grenzen der beidseitigen Sternpunktterdung bei HS-
/MS-Transformatoren*
Fachbeitrag im Magazin Netzpraxis, Jg. 52, Heft 12
- [OBK-08] Obkircher, Clemens:
Ausbaugrenzen gelöscht betriebener Netze
Dissertation an der Technischen Universität Graz, Graz: 2008.
- [OED-11] Oeding, Dietrich; Oswald, Bernd R.:
Elektrische Kraftwerke und Netze.
7. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2011.
- [SCH-11] o.A.; Schneider Electric:
MiCOM P54x Serie
Handbuch EnergyAutomation-DS-P54D-03.06-1353-GE,
Rueil - Malmaison Cedex, France.: Schneider Electric, 2011.
- [SCH-12] Schwab, Adolf J.:
Elektroenergiesysteme.
3. Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2012.
- [SIE-05] o.A.; Siemens AG:
Applikationen für SIPROTEC-Schutzgeräte
Katalog Siemens, o.O.: Siemens AG, 2005.

- [SIE-11] o.A.; Siemens AG:
SIPROTEC – Distanzschutz 7SA6 – Handbuch
Handbuch C53000-G1100-C156-8, o.O.: Siemens AG, 2011.
- [SIE-12] o.A.; Siemens AG:
*SIPROTEC 5 Leitungsschutz – Geräte 7SA8, 7SD8, 7SL8, 7VK8,
7SJ86*
Katalog Siemens, o.O.: Siemens AG, 2012.
- [SIE-13a] o.A.; Siemens AG:
SIPROTEC – Distanzschutz 7SA6
Katalog Siemens SIP Edition 7, o.O.: Siemens AG, 2013.
- [SIE-13b] o.A.; Siemens AG:
Leitungsdifferentialschutz 7SD52/53
Katalog Siemens SIP Edition 6, o.O.: Siemens AG, 2013.
- [SIE-95] o.A.; Siemens AG:
Digitaler Distanzschutz – SIPROTEC 7SA511 V3.2
Handbuch C53000-G1100-C98-6, o.O.: Siemens AG, 1995.
- [VDE0141-00] o.A.; VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
e.V.:
*Erdungen für spezielle Starkstromanlagen mit Nennspannungen über
1 kV*
Berlin: VDE Verlag, 2000 (Januar).
- [VDE4202-13] o.A.; VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
e.V.:
*E VDE-AR-N 4202, Vorgehensweise beim Einsatz von Kabeln in Hoch-
spannungsfreileitungsnetzen*
Berlin: VDE Verlag, 2013 (April).
Die Entwurfssfassung wurde im April 2015 durch die Endfassung ersetzt.

- [VDN-07] Berndt, Holger; Hermann, Mike; Kreye, Horst D.; Reinisch, Rüdiger;
 Scherer, Ulrich; Vanzetta, Joachim:
 *TransmissionCode 2007 - Netz- und Systemregeln der deutschen Über-
 tragungsnetzbetreiber*
 Version 1.1, Berlin: VDN, Verband der Netzbetreiber: 2007.
- [ZIE-08] Ziegler, Gerhard:
 Digitaler Distanzschutz – Grundlagen und Anwendungen
 2. Auflage, Erlangen: Siemens AG, Publicis Corporate Publishing: 2008.