

Michael Hanner BSc

Berührungsspannungen in PV-Freiflächenanlagen durch Erdfehler in nahen Hochspannungsanlagen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

1. Betreuerin: Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl
2. Betreuer: Dipl.-Ing. BSc Benjamin Jauk
3. Betreuer: Ing. Wolfgang Reisinger (Netz OÖ GmbH)

Institut für Elektrische Anlagen und Netze – IEAN

Graz, September 2024

Danksagung

Ich möchte mich hiermit von ganzem Herzen bei Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Katrin Friedl bedanken, die mich seitens der Technischen Universität Graz während der gesamten Erarbeitungszeit zielstrebig unterstützte und mir immer mit Rat und Tat bei etwaigen Problemen zur Seite stand. Sie konnte mich für verschiedene Ideen und Herangehensweisen inspirieren. Dipl.-Ing. Benjamin Jauk, der mich vor allem bei diversen Fragestellungen zur Anwendung des Erdungsprogramms willensstark unterstützte. Ich danke ihm herzlich dafür.

Weiterer herzlicher Dank gilt der Netz OÖ GmbH, insbesondere Dipl. Ing. Ewald Traxler, der mir ermöglichte, im Rahmen eines Werkvertrages, diese Masterarbeit zu verwirklichen. Ebenso gilt großer Dank Ing. Wolfgang Reisinger, der die grundsätzliche Themenstellung zur Erstellung dieser Arbeit ins Leben gerufen hat. Er stand mir tagtäglich mit seiner unverzichtbaren Hilfe und seinen ehrlichen Bemühungen zur Seite und konnte mich auch in stressigen Zeiten stark motivieren, für das ich sehr dankbar bin.

Abstract

Due to the increasing expansion of ground-mounted PV-systems, there is a growing number of approaches to high-voltage systems such as substations and high-voltage pylons. The resulting electrical interference can lead to potential differences in the event of a ground-fault in the high-voltage system, resulting in step- and touch-voltages occurring within the ground-mounted PV-system. These could pose a danger to people and animals within the PV system.

The goal is to show which touch- and step-voltages occur within the PV-system when approaching a high-voltage system, the distances that must be maintained for an acceptable level of risk and the effectiveness of individual measures, such as additional equipotential bonding.

The calculation and evaluation of prospective step- and touch-voltages, as well as the development of the required simulation models, are explained in detail. Several scenarios are used to evaluate prospective step- and touch-voltages that may occur in the PV-system during an earth-fault in a high-voltage system when a ground-mounted PV-system is located near a high-voltage system.

The analysis considers, on one hand, the approach to a substation and, on the other hand, to a high-voltage pylon. In each of these scenarios, detailed considerations and specific aspects are examined.

Special attention is given to analyzing the impact of various measures that can be taken when a ground-mounted PV-system is approaching a high-voltage system.

Keywords:

electrical influence, PV ground-mounted systems, high-voltage systems, touch voltage, step voltage, equipotential bounding, earth-fault

Kurzfassung

Durch den steigenden Ausbau von PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) kommt es vermehrt zu Annäherungen mit Hochspannungsanlagen wie Umspannwerke und Hochspannungsmaste. Die hiermit hervorgerufene elektrische Beeinflussung kann im Falle eines Erdfehlers in der Hochspannungsanlage zu Potentialunterschieden und somit zum Auftreten von Schritt- und Berührungsspannungen in der PV-FFA führen. Diese können eine Gefahr für Personen sowie Tiere innerhalb der PV-FFA darstellen.

Ziel ist es aufzuzeigen, welche Berührungs- und Schrittspannungen innerhalb der PV-FFA bei der Annäherung an Hochspannungsanlagen auftreten, welche Abstände für ein akzeptierbares Risiko einzuhalten sind und welche Wirksamkeit einzelne Maßnahmen, wie z.B. zusätzlicher Potentialausgleich haben.

Die Berechnung und Auswertung von Schritt- und Berührungsspannungen sowie die Entwicklung der erforderlichen Simulationsmodelle werden detailliert erläutert.

Anhand unterschiedlicher Szenarien werden Schritt- und Berührungsspannungen evaluiert, die bei einem Fehler in einer Hochspannungsanlage auftreten können, wenn eine PV-FFA in unmittelbarer Nähe errichtet wird.

Grundlegend wird einerseits die Annäherung an ein Umspannwerk, andererseits an einen Hochspannungsmast betrachtet. In jedem dieser Szenarien werden jedoch detaillierte Betrachtungen und spezifische Aspekte näher untersucht.

Besonderes Augenmerk wird auf die Analyse des Einflusses verschiedener Maßnahmen gelegt, die bei der Annäherung einer PV-FFA an eine Hochspannungsanlage ergriffen werden können.

Stichwörter:

elektrische Beeinflussung, PV-Freiflächenanlagen, Hochspannungsanlagen, Berührungsspannung, Schrittspannung, Potentialverschleppung, Potentialausgleich, Erdfehler

Abkürzungsverzeichnis

AR	Ausbreitungsrichtung
CAD	Computerunterstütztes Erstellen von Zeichnungen
EA	Erdungsanlage
EIWOG	Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz
EN	Europäische Norm
ES	Erdungssystem
FL	Freileitung
IEAN	Institut für Elektrische Anlagen und Netze
LA	Längsausdehnung
LL	Leerlauf
NaN	Not a Number
OVE	Österreichischer Verband für Elektrotechnik
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlage
SE	Strahlenerder
SF	Spannfeld
TE	Tiefenerder
UW	Umspannwerk

Symbolverzeichnis

a_{ES}	Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem der Hochspannungsanlage
F	Faktor, welcher das Verhältnis von unbeeinflusster Erdungsspannung zur zulässigen Leerlauf-Berührungsspannung angibt
g	Greifweite
I_E	Erdungsstrom
I_F	Erdfehlerstrom
L_E	Länge des Erders
l_{SF}	Spannfeldlänge einer Freileitung
n_{SF}	Anzahl der Spannfelder einer Freileitung
r_E	Reduktionsfaktor
r_Q	Radius des Erdseils
R_E	Erdungswiderstand
R_M	Mastausbreitungswiderstand
R'_Q	längenspezifischer Gleichstromwiderstand des Erdseils
U_E	Erdungsspannung
$U_{E,B}$	Bezugswert der Erdungsspannung (unbeeinflussten Zustand)

U_S	Schrittspannung
U_T	Berührungsspannung
U_{Tp}	zulässige Berührungsspannung
U_{vS}	Leerlauf-Schrittspannung
U_{vT}	Leerlauf-Berührungsspannung
U_{vTp}	zulässige Leerlauf-Berührungsspannung
Z_E	Erdungsimpedanz
Z_T	Körperimpedanz
δ_E	Eindringtiefe in das Erdreich
μ_0	Permeabilität des Vakuums
μ_r	relative Permeabilität
ω	Kreisfrequenz
ρ_E	spezifischer Erdwiderstand
φ	Erdoberflächenpotential
$\varphi_{\max,PV}$	maximal auftretendes elektrisches Potential an einem leitfähigen Teil der PV-FFA
\underline{Z}_∞	Kettenleiterimpedanz
\underline{Z}_{QQE}	Schleifenimpedanz bei Rückleitung über Erde

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsfragen	2
1.3	Methodik	3
2	Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV	4
2.1	Erklärung benötigter Begrifflichkeiten	4
2.2	Auslegung von Erdungsanlagen hinsichtlich zulässiger Berührungsspannung	7
2.3	Grenzwerte der Berührungsspannungen	8
2.4	Grenzwerte der Schrittspannungen	10
3	Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung	12
3.1	Ablauf	12
3.2	XGSLab®	14
3.2.1	Allgemeines zu XGSLab	14
3.2.2	Anwendung von XGSLab im Rahmen dieser Arbeit	14
3.3	MATLAB®	15
3.3.1	Auswertung Leerlauf-Berührungsspannung	15
3.3.2	Auswertung Schrittspannung	18
3.4	Bezogene Größen	22
3.4.1	Methodik	22
3.4.2	Zahlenbeispiel	22
4	Modellerstellung	24
4.1	Modellierung PV-FFA	24
4.2	Modellierung 110-kV-Freileitung	26
4.2.1	Mastmodellierung	26
4.2.2	Freileitungsmodellierung	26
4.2.3	Ermittlung Kettenleiterimpedanz durch Berechnung	27
4.2.4	Ermittlung Kettenleiterimpedanz durch Simulation	29
4.3	Modellierung Umspannwerk	33
5	Untersuchungsszenarien und Ergebnisse	34
5.1	Allgemeine Erklärungen der betrachteten Szenarien	34
5.2	PV-FFA im Bereich einer 110-kV-Freileitung	36
5.2.1	Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen	38

Inhaltsverzeichnis

5.2.2	Verbindung der Erdungssysteme	43
5.2.3	Variation des Potentialausgleichsystems	48
5.2.4	Beidseitige Mastverbindung	54
5.2.5	Modifizierung des Mast-Erdungssystems	59
5.3	PV-FFA im Bereich eines Umspannwerkes	64
5.3.1	Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen	66
5.3.2	Verbindung der Erdungssysteme	70
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	75
6.1	Problemstellung, Ziel	75
6.2	Methodik	75
6.3	Auswertung von LL-Schritt- und Berührungsspannungen	76
6.4	Annäherung an 100-kV-Mast	76
6.5	Annäherung an Umspannwerk	78
6.6	Schlussfolgerung	79
6.7	Ausblick	82
7	Anhang	83
7.1	Simulationsergebnisse	83
7.1.1	PV-FFA im Bereich einer 110-kV-Freileitung	83
7.1.2	PV-FFA im Bereich eines Umspannwerks	92
	Literatur	103

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Bedingt durch die Energiewende und den vorangetriebenen Bedarf an erneuerbaren Energien hat der Ausbau von Photovoltaikanlagen in den vergangenen Jahren erheblich zugenommen. Größere Photovoltaikanlagen, welche immer häufiger als Freiflächenanlagen (PV-FFA) umgesetzt werden, gewinnen hierbei zunehmend an Bedeutung. Durch diese Entwicklung kommt zu einer vermehrten Annäherung von PV-FFA an Hochspannungsanlagen. Die hiermit hervorgerufene elektrische Beeinflussung kann im Falle eines Erdfehlers in der Hochspannungsanlage zu Potentialunterschieden und somit zum Auftreten von Schritt- und Berührungsspannungen in der PV-FFA führen. Diese können eine Gefahr für Personen sowie Tiere innerhalb der PV-FFA darstellen.

Netzbetreiber sind gefordert, eine Stellungnahme gegenüber der Behörde hinsichtlich der elektrischen Beeinflussung und den Anforderungen des Personenschutzes im Erdfehlerfall abzugeben.

Im Falle eines Erdschlusses der Hochspannungsanlage im erdschlusskompensierten Hochspannungsnetz kommt es zu einem Stromfluss über die Erdungsanlage in das Erdreich. Im Erdreich bildet sich ein Spannungstrichter aus. Die Erdungsspannung U_E ist hierbei die Potentialdifferenz zwischen der HS-Erdungsanlage und der entfernten Bezugserde. Befindet sich eine PV-FFA im Nahbereich einer erdschlussbehafteten Hochspannungsanlage, kommt es, aufgrund der erdfühligen Rammfundamente der PV-FFA, zu einer elektrischen Beeinflussung (Kopplung).

Berührt eine Person ein leitfähiges Teil der PV-FFA, so greift diese einen Teil des Oberflächenpotentials gegen Bezugserde ab (Berührungsspannung U_T) und ein unter Umständen lebensgefährlicher Strom fließt über die Person.

Wenn sich die Person in der PV-FFA befindet, kann ebenso ein Teil des Spannungstrichters durch die Füße überbrückt werden, hierbei spricht man von der sogenannten Schrittspannung (U_S).

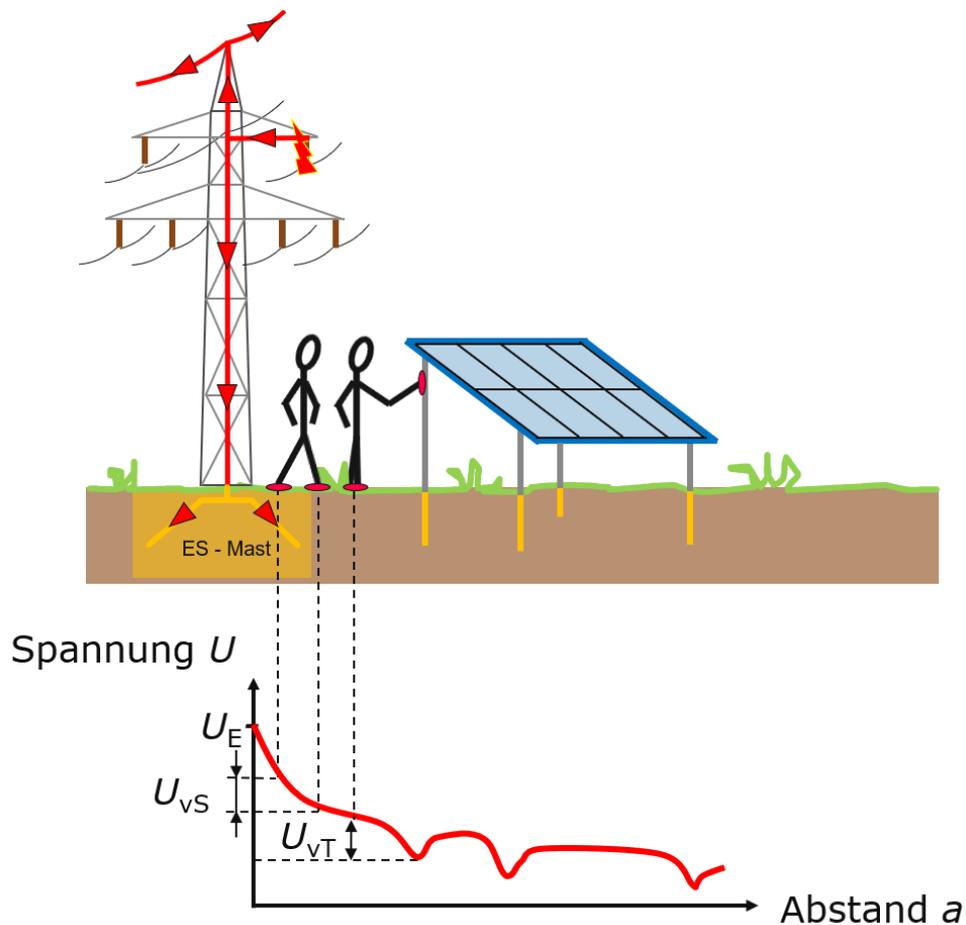


Abbildung 1.1: Veranschaulichung der Beeinflussung von PV-FFA durch Hochspannungsanlagen

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel der gegenwärtigen Arbeit ist es aufzuzeigen, welche Berührungs- und Schrittspannungen innerhalb der PV-FFA bei der Annäherung an Hochspannungsanlagen auftreten, welche Abstände für ein akzeptierbares Risiko einzuhalten sind und die welche Wirksamkeit einzelne Maßnahmen, wie z.B. zusätzlicher Potentialausgleich haben.

Es gilt somit, folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- Wo und in welcher Höhe treten Schritt- und Berührungsspannungen an einer PV-FFA bei einem Fehler in einer nahegelegenen Hochspannungsanlage auf?
- Welche Abstände müssen bei der Annäherung von einer PV-FFA an eine Hochspannungsanlage eingehalten werden, um einen ausreichenden Personenschutz zu gewährleisten?

- Welche Maßnahmen können bei der Annäherung von PV-FFA an Hochspannungsanlagen gesetzt werden und wie wirken sich diese aus?

1.3 Methodik

Anhand unterschiedlicher Szenarien und Parametervariationen wird die Beeinflussung von PV-FFA durch Hochspannungsanlagen untersucht. Einerseits wird die Annäherung einer PV-FFA an einen fehlerbehafteten Hochspannungsmast und andererseits an ein fehlerbehaftetes Umspannwerk betrachtet. Hierbei werden unterschiedliche zu treffende Maßnahmen (Verbindung der Erdungssysteme, Abänderung der Erdungsanlagen, ...) simulativ näher evaluiert.

Auftretende Schritt- und Berührungsspannungen innerhalb der PV-FFA werden mittels Simulation in XGSLab[®] und Matlab[®] berechnet und veranschaulicht. Um auch PV-FFA auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (z.B. Tierhaltung) einzubeziehen (sogenannte Agri-PV's) werden sämtliche Berührungsspannungen sowie Schrittspannungen neben einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m auch auf 2 m betrachtet.

Sämtliche Berechnungsergebnisse sind auf die Erdungsspannung der beeinflussenden Anlage im unbeeinflussten Zustand $U_{E,B}$ (sprich gänzlich ohne PV-FFA) bezogen.

2 Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselfspannungen über 1 kV

Gemäß OVE E 8101 [1], OVE -Richtlinien (R6 [2], R11 [3]) , ÖVE/ÖNORM EN 50522:2022 [4], OVE EN 50341-1 [5] sowie den Nationalen Normativen Festlegungen (NNA) für Österreich [6] werden im folgenden wesentliche für die Arbeit benötigte Begriffe und Formelzeichen erläutert.

2.1 Erklärung benötigter Begrifflichkeiten

Photovoltaik Anlage (PV-Anlage)

"Gesamtheit der errichteten Betriebsmittel und Bauteile einer PV-Anlage" [1]

PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) bzw. PV-Freiflächenkraftwerke

"eine PV-Anlage, die nicht auf einem Gebäude oder an einer Fassade, sondern auf Erdniveau montiert ist" [3]

Erder

"leitfähiges Teil, das in ein bestimmtes leitfähiges Medium, zum Beispiel Beton oder Koks, eingebettet sein kann und in elektrischem Kontakt mit Erde steht" [4]

Erdungsanlage

"Gesamtheit der zum einzelnen oder gemeinsamen Erden eines Betriebsmittels oder einer Anlage erforderlichen Verbindungen und Erder" [4]

Tiefenerder

"in den Erdboden getriebener, aus einem Metallstab bestehender Erder" [4]

Potentialsteuerender

"Leiter, der durch Form und Anordnung mehr zur Potentialsteuerung als zum Erreichen eines bestimmten Ausbreitungswiderstandes verwendet wird" [4]

spezifischer Erdwiderstand ρ

"spezifischer Widerstand einer charakteristischen Probe einer Bodenart" [4]

Erdungsstrom I_E

"Strom, der über die Erdungsimpedanz in die Erde fließt" [4]

Erdfehlerstrom I_F

"Strom, der vom Betriebsstromkreis zur Erde oder zu geerdeten Teilen an der Fehlerstelle (Ort des Erdfehlers) fließt" [4]

Erdungsspannung (EPR) U_E

"Spannung zwischen einer Erdungsanlage und der Bezugserde" [4]

Erdungsimpedanz Z_E

"Impedanz bei einer gegebenen Frequenz zwischen einem Punkt in einem System oder einer Anlage oder einem Betriebsmittel und der Bezugserde" [4]

Erdoberflächenpotenzial φ

"Spannung zwischen einem Punkt auf der Erdoberfläche und der Bezugserde" [5]

Körperimpedanz Z_T

"Impedanz des menschlichen Körpers" [4]

Berührungsspannung U_T

"Spannung zwischen leitfähigen Teilen, wenn diese gleichzeitig berührt werden" [4]

Leerlauf-Berührungsspannung U_{vT}

"Spannung zwischen gleichzeitig berührbaren leitfähigen Teilen, wenn diese leitfähigen Teile nicht berührt werden " [4]

zulässige Leerlauf-Berührungsspannung U_{vTp}

"Grenzwert für die Leerlauf-Berührungsspannung U_{vT} " [4]

Schrittspannung U_S

"Spannung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche, die 1 m voneinander entfernt sind, was als Schrittlänge eines Menschen angenommen wird " [4]

Leerlaufschrittspannung U_{vS}

Spannung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche, die 1 m voneinander entfernt sind, was als Schrittlänge eines Menschen angenommen wird, wenn diese nicht berührt werden

Potentialverschleppung

"Verschleppung des Potentials einer Erdungsanlage durch einen mit dieser verbundenen Leiter (z. B. Kabelschirm, PEN-Leiter, Rohrleitung, Gleise) in Gebiete mit geringer oder keiner Potentialanhebung gegenüber der Bezugs Erde, sodass an diesem Leiter ein Potentialunterschied gegen die Umgebung abgreifbar ist " [4]

Netz mit Erdschlusskompensation

"Netz, in dem mindestens ein Sternpunkt eines Transformators oder Sternpunktbildners über eine Erdschlusslöschspule geerdet ist, wobei die resultierende Induktivität aller Erdschlusslöschspulen im Wesentlichen auf die Erdkapazität des Netzes für die Betriebsfrequenz abgestimmt ist " [4]

Reduktionsfaktor r_E

"das Verhältnis des Erdungsstromes zur Summe der Nullströme in den Leitern des Betriebsstromkreises einer Drehstromleitung ($r = I_E / (3 \cdot I_0)$), bei entsprechender Entfernung vom Ort des Kurzschlusses und von der Erdungsanlage der Station " [4]

2.2 Auslegung von Erdungsanlagen hinsichtlich zulässiger Berührungsspannung

Die Norm OVE EN 50522 [4] schlägt für die korrekte Auslegung einer Erdungsanlage, die nicht Teil eines globalen Erdungssystems ist, hinsichtlich zulässiger Berührungsspannung folgendes Flussdiagramm vor:

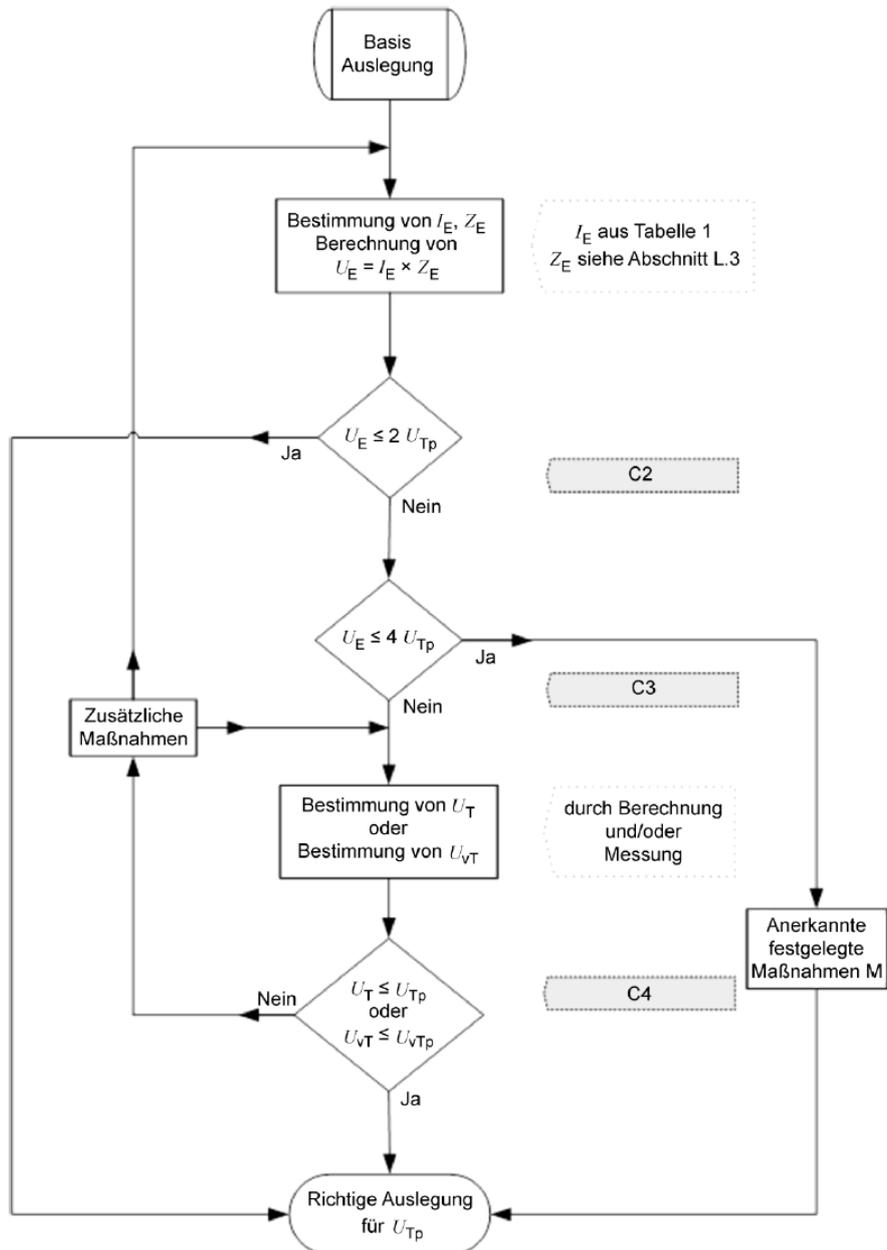


Abbildung 2.1: Flussdiagramm zur Auslegung einer Erdungsanlage hinsichtlich zulässiger Berührungsspannung, Quelle: [5]

Ziel einer korrekten Auslegung ist grundsätzlich die Einhaltung der zulässigen Werte für Berührungsspannungen bzw. LL- Berührungsspannungen (C4). Diese Bedingung kann durch Berechnung oder Messung der auftretenden Berührungsspannungen überprüft werden. In den meisten Fällen erweist es sich jedoch praktikabler, die auftretende Erdungsspannung U_E zu ermitteln. Falls die Erdungsspannung kleiner ist als das Zweifache der zulässigen Berührungsspannung (C2) kann davon ausgegangen werden, dass sämtliche Berührungsspannungen (auch hinsichtlich Spannungsverschleppung) eingehalten werden. Für Werte der Erdungsspannung kleiner dem Vierfachen der zulässigen Berührungsspannung (C3) wird die Bedingung ebenso erfüllt, hierbei müssen jedoch Spannungsverschleppungen mithilfe von anerkannten festgelegten Maßnahmen vermieden werden.

2.3 Grenzwerte der Berührungsspannungen

In Abbildung 2.2 ist der Berührungsstromkreis als Ersatzschaltbild gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [4] dargestellt. Hierbei stellt die Impedanz Z_T die Körperimpedanz dar, an dieser darf eine zulässige Berührungsspannung U_{Tp} abfallen. Der Fußwiderstand R_F sowie Handwiderstand R_H stellen zusätzliche elektrische Widerstände (R_A) dar, wobei sich R_F in zwei weiteren Widerständen (R_{F1} und R_{F2}) unterteilt. Der Widerstand R_{F1} stellt beispielsweise den Widerstand eines Schuhwerkes dar. Der Ausbreitungswiderstand des Standortes ist abhängig vom spezifischen Bodenwiderstand am jeweiligen Standort und wird durch den Widerstand R_{F2} repräsentiert. Die Spannungsquelle U_{vTp} ist der Grenzwert der Potentialdifferenz, die im Berührungsstromkreis als Quellenspannung wirkt, durch den die Sicherheit einer Person sichergestellt ist, wenn bekannte zusätzliche Widerstände (R_A) verwendet werden. I_B bezeichnet den Körperstrom für den Strompfad linke Hand zu den Füßen (Herzstromfaktor $HF = 1$). [4, Vgl.]

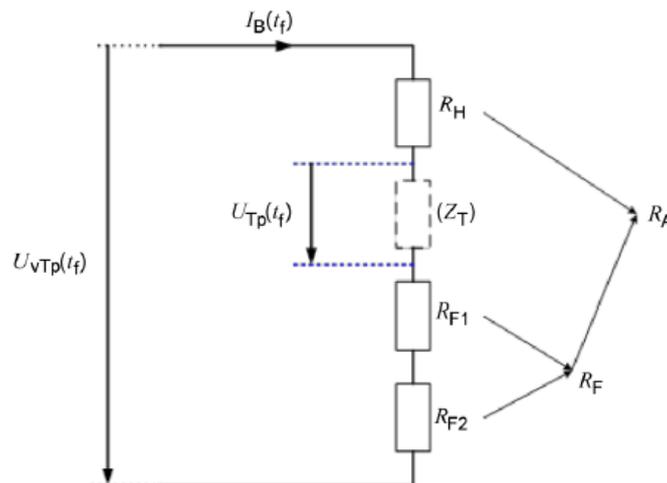


Abbildung 2.2: Ersatzschaltbild des Berührungsstromkreises, Quelle: [4]

2 Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV

Durch Berücksichtigung der Fehlerdauer t_f , der Empfindlichkeit des Herzmuskels zum Fibrillieren (Herzfaktor HF), der Körperimpedanz Z_T sowie des Strompfades (Hand gegen Füße einschließlich Korrekturfaktor für die Körperimpedanz BF) kann die zulässige Berührungsspannung U_{Tp} für jedes Berührungsszenario bestimmt werden [4, Vgl.]:

$$U_{Tp}(t_f) = I_B(t_f) \cdot \frac{1}{HF} \cdot Z_T(U_T) \cdot BF \quad (2.1)$$

Durch entsprechende Gewichtung und Mittelwertbildung von verschiedenen Berührungsspannungskonfigurationen ergeben sich folgende Grenzwerte der Berührungsspannung U_{Tp} (Abbildung 2.3). Diese Werte beziehen sich auf den unmittelbaren Hautkontakt (blanke Haut).

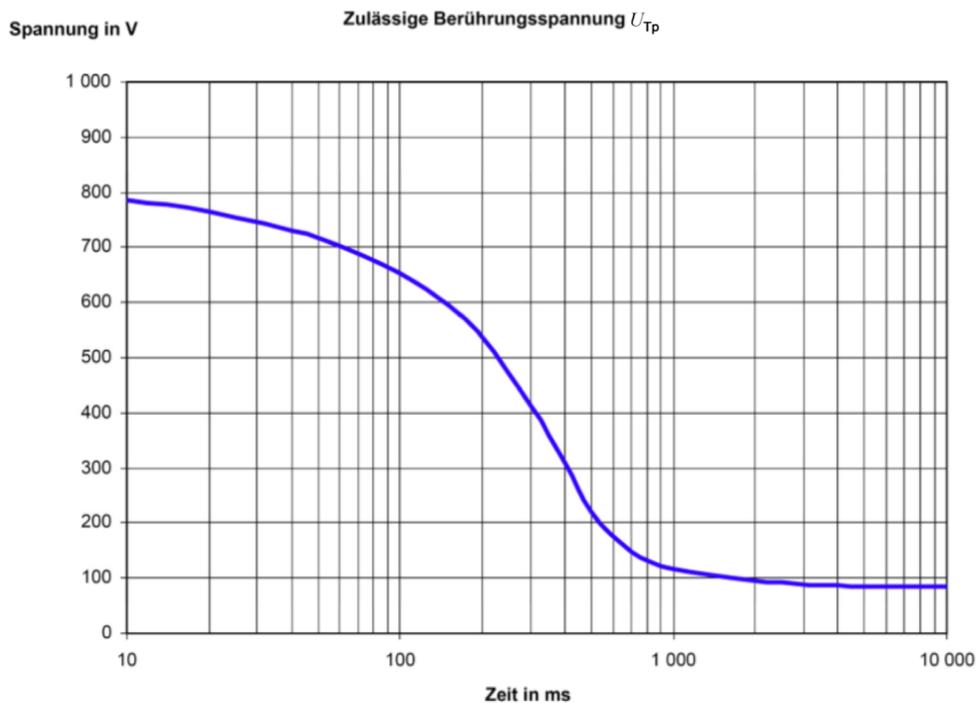


Abbildung 2.3: Kennlinie zulässige Berührungsspannung, Quelle: [4]

Die zulässige LL-Berührungsspannung U_{vTp} lässt sich basierend auf dem Ersatzschaltbild 2.2 mit der zulässigen Berührungsspannung U_{vT} wie folgt berechnen [4, Vgl.]:

$$U_{vTp}(t_f) = U_{Tp}(t_f) + \frac{I_B(t_f)}{HF} \cdot (R_H + R_F) \quad (2.2)$$

2 Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV

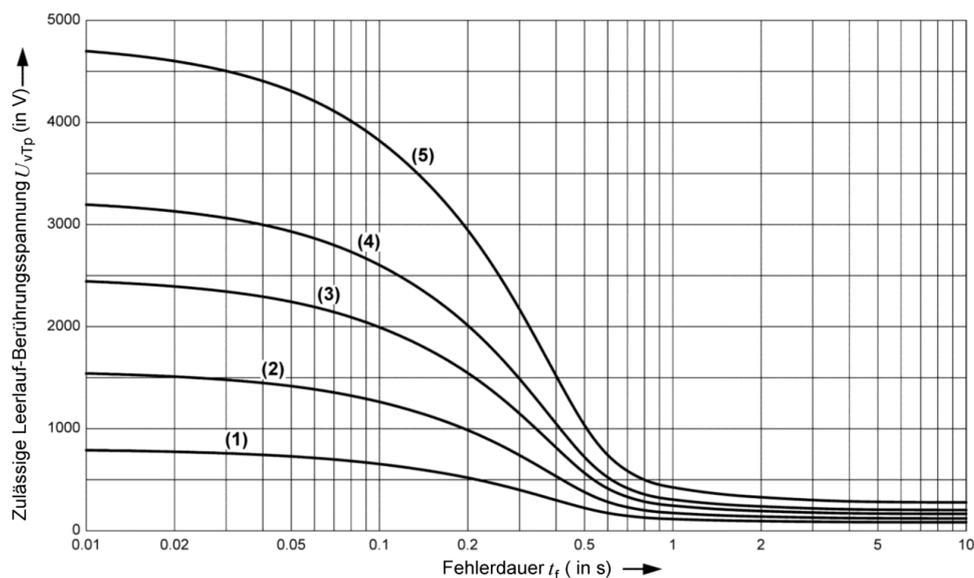


Abbildung 2.4: Kennlinien LL-Berührungsspannung, Quelle: [4]

Durch unterschiedliche Widerstandswerte der zusätzlichen Widerstände R_A ergeben sich somit auch unterschiedliche Kennlinien der zulässigen LL-Berührungsspannung U_{vT} (Abbildung 2.4).

Werden beispielsweise keine zusätzlichen Übergangswiderstände R_A (z.B. Handschuhe, Schuhwerk), welche die zulässige LL-Berührungsspannung U_{vTp} senken würde, berücksichtigt, entspricht die Kennlinie (1) in Abbildung 2.4 jener der in Abbildung 2.3. Betrachtet man erdschlusskompensierte Hochspannungsnetze, so können hierbei Fehlerströme über einen längeren Zeitraum, sprich deutlich über 10 s hinaus auftreten (ganz rechts in der Kennlinie (1)). Für Fehlerdauern länger als 10 s ist die zulässige Berührungsspannung mit 80 V festgelegt. Das Risiko für Personen ist vertretbar, wenn sämtliche auftretende Berührungsspannungen U_T kleiner als die zulässige Berührungsspannung U_{Tp} ist. [4, Vgl.]

2.4 Grenzwerte der Schrittspannungen

Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522 [4] müssen grundsätzlich sowohl Berührungsspannungen als auch Schrittspannungen betrachtet werden. Da bei der Berechnung der Schrittspannungen ein anderer Stromweg durch den Körper berücksichtigt wird (Herzstromfaktor HF = 0,04) sind jedoch die Grenzwerte für die Schrittspannungen wesentlich höher als jene der Berührungsspannung. Es gilt somit im Allgemeinen, dass die Anforderungen an die Schrittspannungen erfüllt sind, wenn die Berührungsspannungen eingehalten werden. Schrittspannungen sollten jedoch bei hohen Werten der Erdungsspannung U_E sowie am Anlagenrand betrachtet werden. Hierbei gilt Gleichung 2.1, mit einem Herzfaktor HF von 0,04 (von einem Fuß zum anderen) und einem Bodyfaktor BF von 1 (von einem Fuß zum

2 Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV

anderen). [4, Vgl.]

Für Tiere ist die Schrittspannung bedeutsamer, da hier das Potential zwischen Vorder- und Hinterbeine abgegriffen werden kann und dazwischen das Herz liegt. Aus diesem Grund werden hinsichtlich landwirtschaftlich genutzten PV-FFA (Agri-PV) auch Schrittspannungen analysiert für eine Schrittweite von 1 m und 2 m.

3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

3.1 Ablauf

Abbildung 3.1 veranschaulicht die Methodik zur Berechnung von Potentialanhebungen sowie auftretende Schritt- und Berührungsspannungen für die gegenwärtige Arbeit.

Zuerst wird mittels eines externen CAD Programms ein 3D-Drahtmodell aller relevanten Leiter erstellt (siehe Modellierung in Kapitel 4).

Das dabei entstandene dxf-File wird in XGSLab[®], einem Programm zur Berechnung/Simulation von Erdungssystemen (nähere Informationen in Kapitel 3.2), importiert. Da dieses Modell noch keine Informationen über die Materialeigenschaften und Abmessungen der Leiter beinhaltet, wird dies beim Import festgelegt. XGSLab[®] ist grundsätzlich in der Lage Berührungs- sowie Schrittspannungen zu berechnen und zu veranschaulichen.

Aufgrund der Tatsache, dass jedoch keine Berechnung der Schrittspannung mit einer Schrittweite von 2 m (angenommener Abstand bei Tieren) möglich ist, sowie der eingeschränkten grafischen Veranschaulichung (Ausblendung von Bereichen z.B. im Mastinneren), wird dies mit MATLAB[®] durchgeführt.

Hierzu werden aus XGSLab[®] folgende zwei Dateien exportiert:

- Elementdatei: listet die Position sowie etwaige Eigenschaften der leitfähigen Elemente (z.B. Potential) auf
- Erdoberflächenpotential: gibt das an der Erdoberfläche herrschende Oberflächenpotential abhängig von der Position wieder

Diese obige gelisteten Dateien werden mittels MATLAB[®] (R2021b) eingelesen und daraus die LL-Schritt- und Berührungsspannung entsprechend 3.3.1 und 3.3.2 ermittelt.

3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

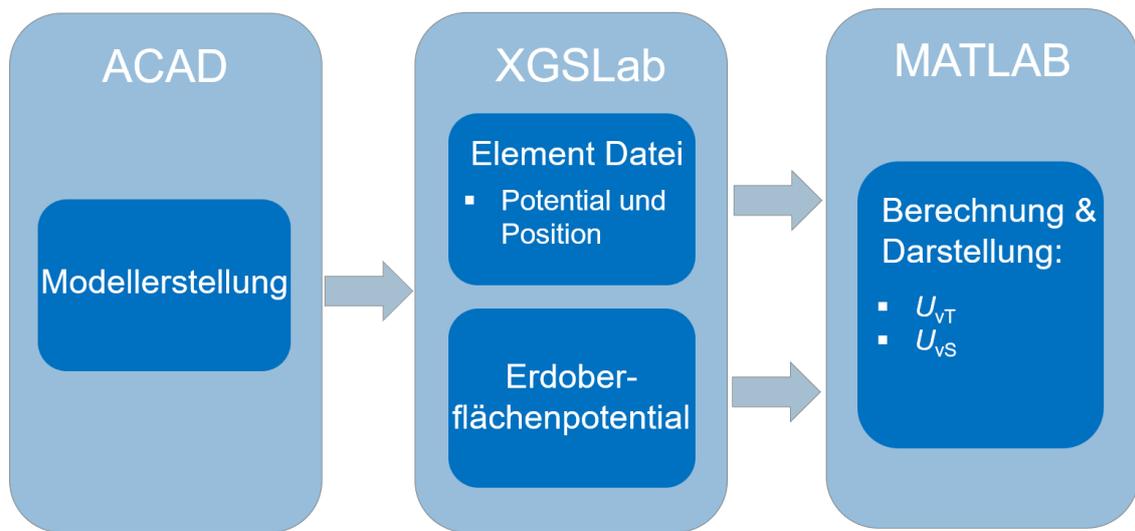


Abbildung 3.1: Veranschaulichung der Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

3.2 XGSLab[®]

3.2.1 Allgemeines zu XGSLab

XGSLab stellt ein Softwarepaket dar, mit welchem es möglich ist, unter Berücksichtigung verschiedener auswählbarer Normen, Berechnungen bzw. Simulationen für Erdungssysteme und elektromagnetische Interferenz-Analysen durchzuführen.

Es umfasst somit mehrere Module:

- GSA (Grounding System Analysis)
- GSA_FD (GROUNDING SYSTEM ANALYSIS in the FREQUENCY DOMAIN)
- XGSA_FD (OVER AND UNDERGROUND SYSTEM ANALYSIS in the FREQUENCY DOMAIN)
- XGSA_TD (OVER AND UNDERGROUND SYSTEM ANALYSIS in the TIME DOMAIN)
- NETS (NETWORK SOLVER) SHIELD (Lightning Shielding)

[7, Vgl.]

Die Software benutzt dabei die PEEC-Methode (Partial-Element-Equivalent-Circuit). Dies ist ein numerisches Verfahren zur Berechnung von elektromagnetischen Feldproblemen. Dabei werden verteilte Systeme (z.B. Leitungen, Rohrleitungen, usw.) in geeigneter Weise unterteilt (diskretisiert) und in π -Ersatzglieder umgewandelt. Die einzelnen Elemente dieser Ersatzschaltungen (partielle Elemente) werden entsprechend ihrer Feldgleichungen berechnet. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass alle auftretenden Komponenten in diskrete Elemente (Quellen, Widerstände, Induktivitäten und Kondensatoren) umgewandelt werden. Diese Methode lässt sich auch mit anderen Netzwerken koppeln, sodass der Einfluss von z.B. elektromagnetischen Feldern auf Netzwerkstrukturen analysiert werden kann. Mit dem Programm können somit auch Erdungsanlagen und Beeinflussungen unter Berücksichtigung von Kopplungen untersucht werden. [8]

3.2.2 Anwendung von XGSLab im Rahmen dieser Arbeit

Im Zuge dieser Masterarbeit wird XGSLab[®] (Version 10.3.14.1) verwendet, um das Erdoberflächenpotential sowie Eigenschaften der leitfähigen Elemente (Potential, Strom, ...) zu berechnen. Das verwendete Modul hierbei ist XGSA FD.

Aufgrund der bereits erwähnten Vorteile werden sämtliche Berechnungen für Berührungs- und Schrittspannungen in MATLAB[®] durchgeführt.

3.3 MATLAB[®]

3.3.1 Auswertung Leerlauf-Berührungsspannung

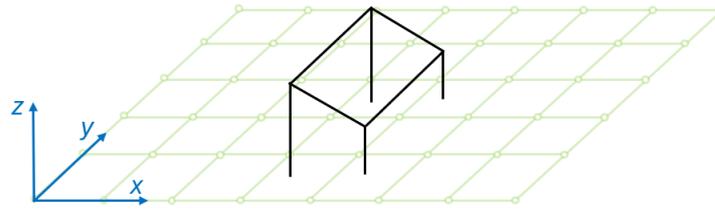
Abbildung 3.2 veranschaulicht die grundlegende Funktionsweise zur Berechnung der LL-Berührungsspannung. Ausgangslage hierbei ist einerseits das von XGSLab[®] berechnete Erdoberflächenpotential für jeden Koordinatenpunkt in einem 1 m x 1 m Raster (grün). Andererseits das aus der Elementdatei ermittelte Potential aller leitfähigen Elemente (schwarz) (a).

Zuerst erfolgt eine Segmentierung, hierbei werden die leitfähigen Teile in mehrere Elemente unterteilt. Ebenso erfolgt eine lineare Interpolation des Erdoberflächenpotentials von einer 1 m x 1 m Maschenweite auf 0,1 m x 0,1 m (b).

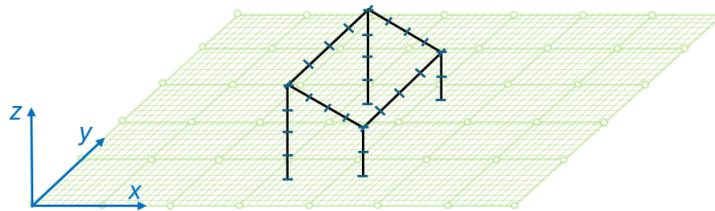
Sämtliche leitfähige Objekte, welche sich unterhalb der Erdoberfläche und über einer Höhe von 3 m in z-Richtung befinden, sind nicht berührbar und werden somit nicht betrachtet. Ebenso Elemente, deren Berührung nicht von Interesse ist, beispielsweise die beeinflussende Hochspannungsanlage. Für eine einfachere und schnellere Berechnung werden die vernachlässigbaren Längsspannungsabfälle in z-Richtung nicht berücksichtigt, es erfolgt eine 2D Betrachtung (c).

Nun erfolgt die eigentliche Berechnung der LL-Berührungsspannung. Iterativ werden für jeden Punkt des interpolierten Erdoberflächenpotentials alle leitfähigen Elemente, welche sich innerhalb des Radius bzw. der Griffweite g befinden, gesucht. Befindet sich kein leitfähiges Element in diesem Radius, wird NaN zugewiesen. Anschließend wird jenes Element, welches den höchsten absoluten Wert des Potentials aufweist, ermittelt. Die Differenz dieses Potentials und des Erdoberflächenpotentials am entsprechenden Punkt ergibt die LL-Berührungsspannung U_{vT} (c). Es ergibt sich somit eine Auflistung der LL-Berührungsspannung für jeden Punkt des interpolierten Erdoberflächenpotentials.

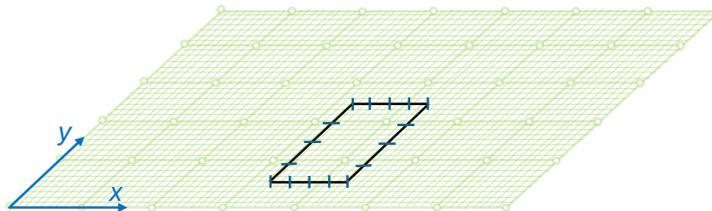
3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung



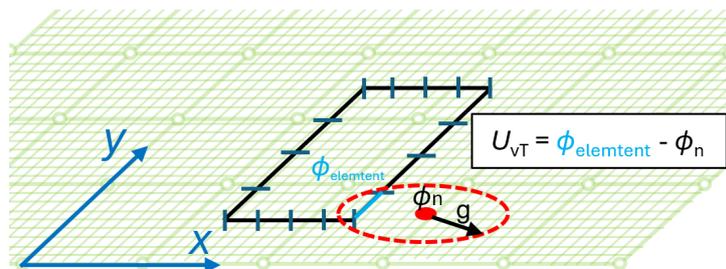
(a) Ausgangslage: Elementdata (schwarz) & Erdoberflächenpotential (grün)



(b) Segmentierung und Interpolation



(c) 2D-Betrachtung



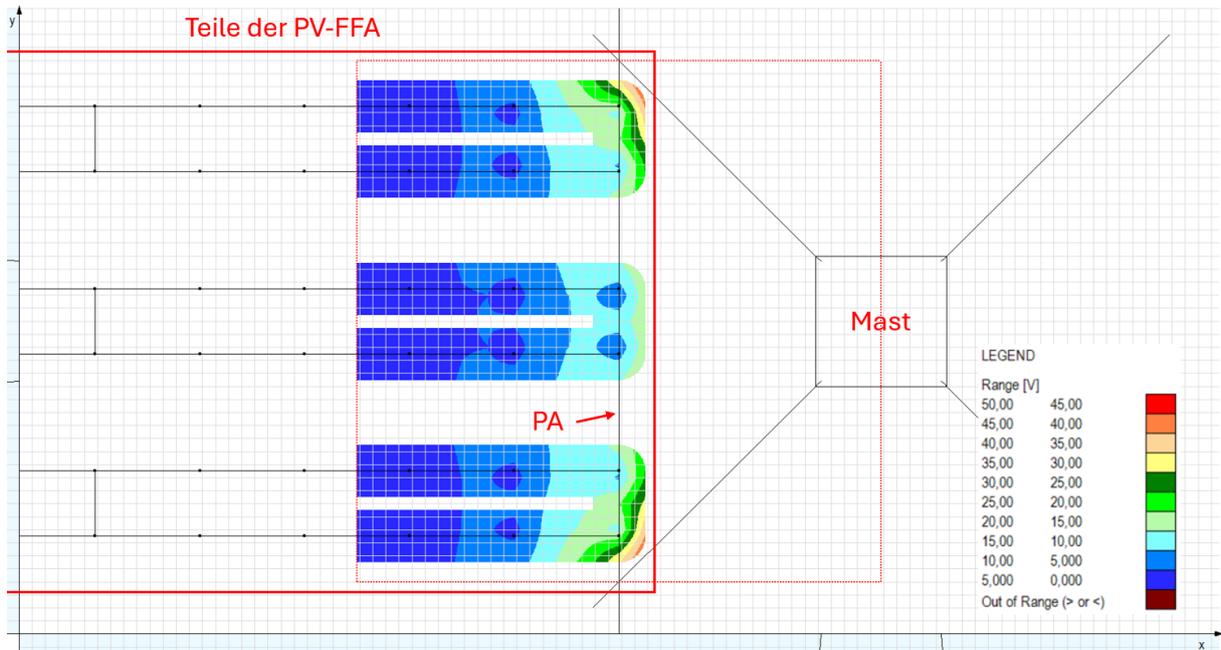
(d) Berechnung

Abbildung 3.2: Veranschaulichung der Berechnung der LL-Berührungsspannungen

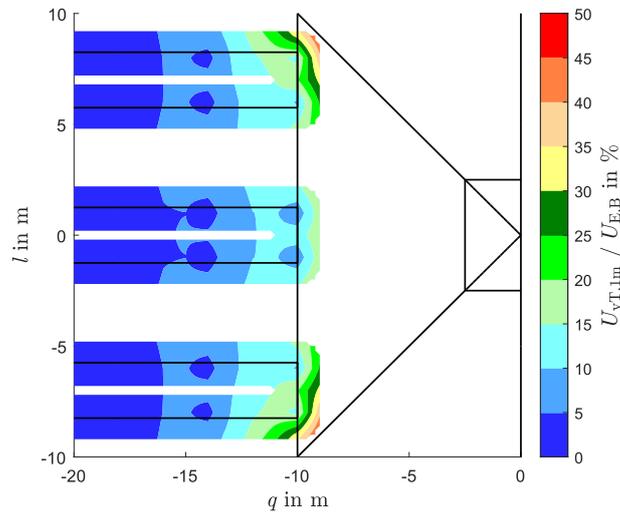
Abbildung 3.3 zeigt den Vergleich zwischen den berechneten Verteilungen der LL-Berührungsspannung in MATLAB® und XGSLab®. Als Beispiel wird hierbei eine PV-FFA neben einen 110-kV-Mast gewählt. Der Fehlerstrom wird am Mast injiziert. Zu sehen ist jeweils die Draufsicht. Die schwarzen Linien zeigen jeweils die leitfähige Elemente. In einem Radius von $g = 1$ m um die berührbaren Teile der PV-FFA ist die Höhe der bezogenen LL-Berührungsspannung

3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

farblich dargestellt. Sämtliche Berührungsspannungen sind auf die Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand $U_{E,B}$ bezogen (siehe Kapitel 3.4). Der Verlauf der Spannungen sowie die Extremwerte (siehe Tabelle 3.1) weisen nur geringfügige Abweichungen auf, welche auf die angenommenen erwähnten Vereinfachungen und Interpolationen zurückzuführen sind.



(a) XGSLab®



(b) MATLAB®

Abbildung 3.3: auftretende LL-Berührungsspannungen bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden ($g = 1 \text{ m}$)

3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

Tabelle 3.1: maximaler und minimaler Wert der LL-Berührungsspannung bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden

Berechnungsmethode	$U_{vT} / U_{E,B}$ in %	
	minimal	maximal
XGSLab [®]	4	43
Matlab [®]	2	44

3.3.2 Auswertung Schrittspannung

Die Berechnung der Schrittspannung erfolgt ausgehend vom Erdoberflächenpotential für jeden Koordinatenpunkt in einem 1 m x 1 m Raster (Abbildung 3.3 (a)). Im ersten Schritt wird das 1 m x 1 m Erdoberflächenpotential auf ein 0,1 m x 0,1 m Raster linear interpoliert (b).

Die Berechnung der Schrittspannung erfolgt iterativ. Für jeden Koordinatenpunkt des Erdoberflächenpotentials werden hierbei alle Punkte, welche sich innerhalb eines Radius bzw. einer Schrittweite s befinden, gesucht. Von diesen Punkten wird jener, der den Maximalwert des Absolutbetrages aufweist, ermittelt. Die Differenz dieses Wertes und des Erdoberflächenpotentials an der jeweiligen Stelle ergibt die LL-Schrittspannung U_{vS} .

3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

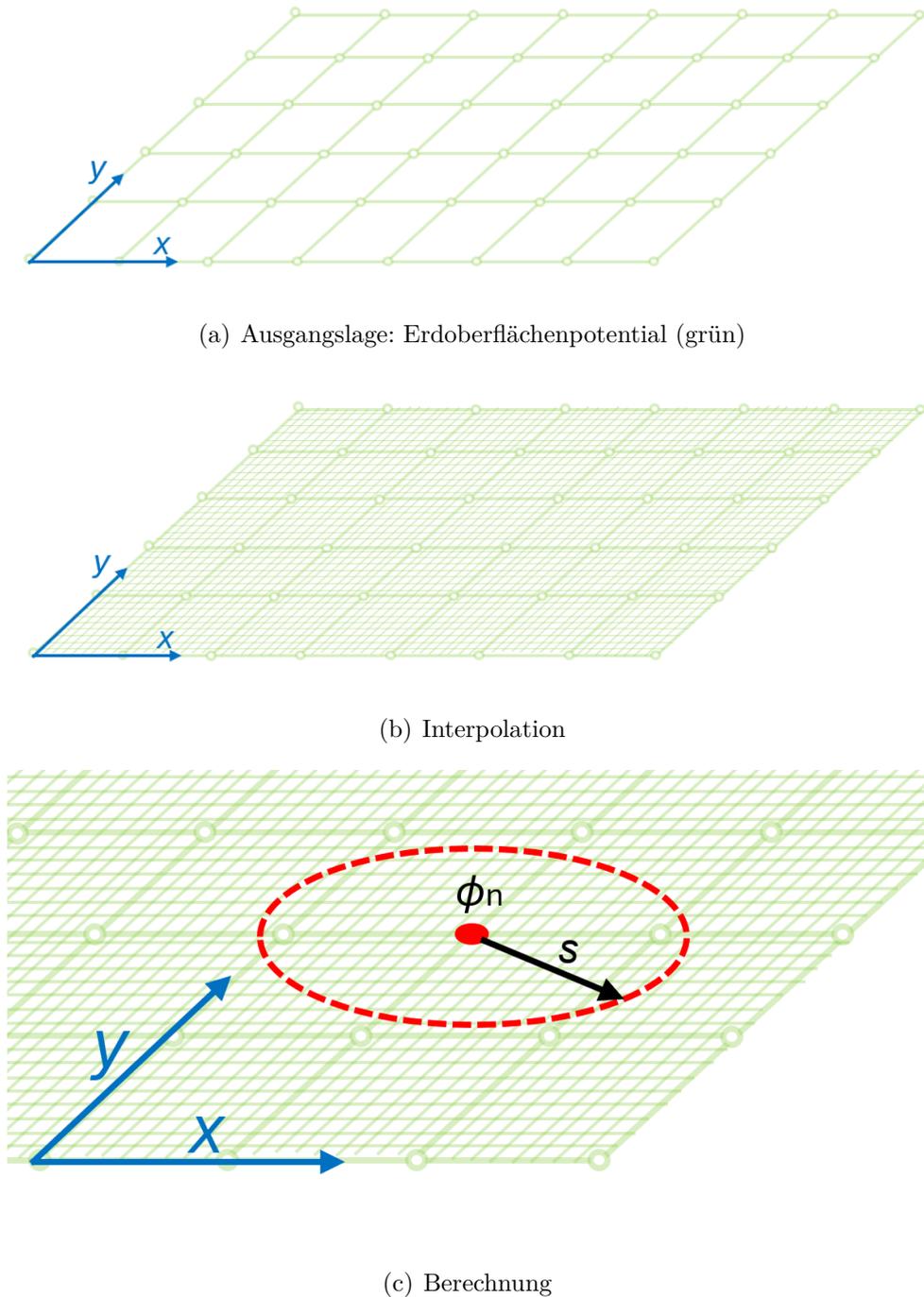
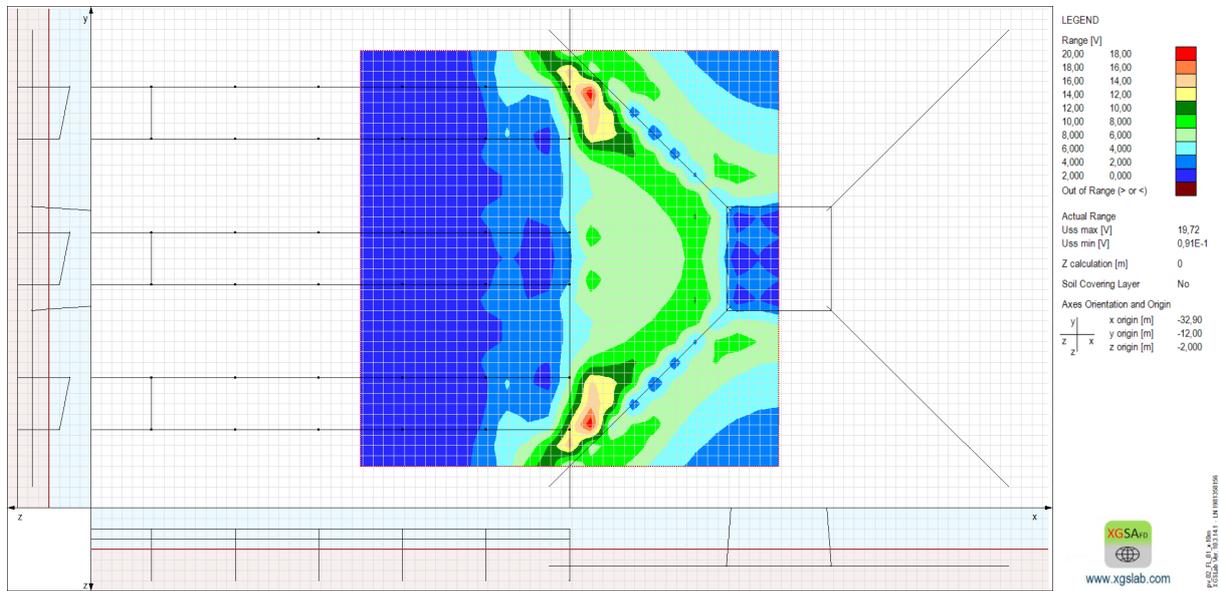


Abbildung 3.4: Verifizierung der Berechnung von LL-Schrittspannungen

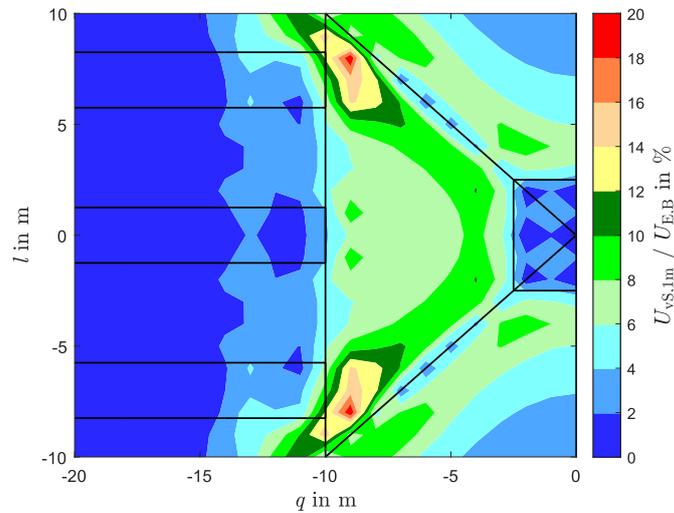
Abbildung 3.5 zeigt den Vergleich zwischen den berechneten Verteilungen der LL-Schrittspannungen mit einer Schrittweite s von 1 m in MATLAB und XGSLab. Als Beispiel zur Verifizierung wird hierbei die selbige Anordnung wie bei der Berechnung der bezogenen LL-Berührungsspannung gewählt.

3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

Es zeigt sich, dass der Verlauf der Spannungen sowie die Extremwerte (siehe Tabelle 3.2) nahezu ident sind.



(a) XGSLab®



(b) MATLAB®

Abbildung 3.5: auftretende LL-Schrittspannungen bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden ($s = 1$ m)

3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

Tabelle 3.2: maximaler und minimaler Wert der LL-Schrittspannung bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden

Berechnungsmethode	$U_{vS} / U_{E,B}$ in %	
	minimal	maximal
XGSLab [®]	0	20
Matlab [®]	0	20

3.4 Bezogene Größen

3.4.1 Methodik

Alle Berechnungsergebnisse sind auf die Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand ($U_{E,B}$) bezogen, sprich gänzlich ohne PV-FFA.

Grund hierfür ist, da die Erdungsspannung der bestehenden unbeeinflussten Hochspannungsanlage (z.B 110-kV-Mast) dem Netzbetreiber grundsätzlich bekannt ist. Falls nicht, gilt es mittels einer Erdungsmessung die Erdungsimpedanz Z_E zu erfassen. Multipliziert mit dem Erdungsstrom und entsprechenden Reduktionsfaktoren von Kabelschirmen oder Erdseilen führt dies zur unbeeinflussten Erdungsspannung $U_{E,B}$. Mittels den bezogenen Größen, beispielsweise der bezogenen LL-Berührungsspannung $U_{VT}/U_{E,B}$ ist es nun leicht möglich, den tatsächlichen Wert der LL-Berührungsspannung zu ermitteln.

Vorteilhaft ist somit die leichte Umrechnung auf andere Erdfehlerströme und Erdungsimpedanzen.

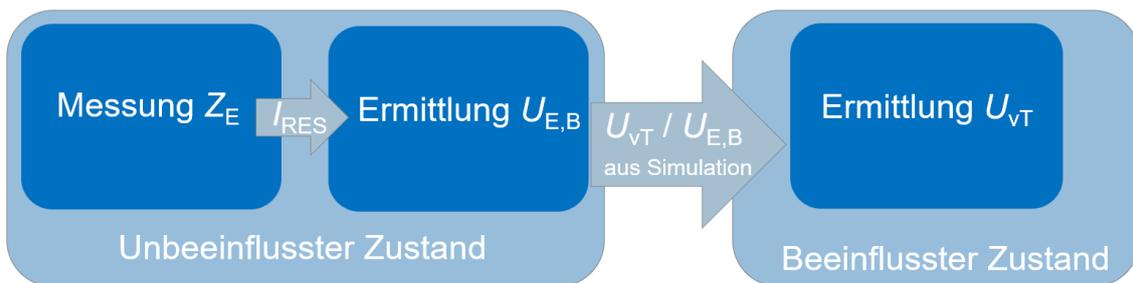


Abbildung 3.6: Veranschaulichung der Methodik von bezogenen Größen

3.4.2 Zahlenbeispiel

Zur besseren Verständlichkeit der bezogenen Größen folgt ein Zahlenbeispiel.

Angenommen wird hierbei eine geplante Errichtung einer PV-FFA in einem Abstand von 12 m zu einem 110-kV-Freileitungsmast. Es stellt sich die Frage, welche Berührungsspannungen hierbei im Fehlerfall an der PV-FFA auftreten.

Zuerst wird die Erdungsimpedanz des Masts durch Messung ermittelt, diese beträgt beispielsweise:

$$\underline{Z}_E = R_E = 1,5 \, \Omega \quad (3.1)$$

Es wird der Fehlerfall eines einpoligen Erdschlusses an einem 110-kV-Freileitungsmast angenommen, entsprechend [9] wird ein maximaler Erdschlussreststrom am Mast 132 A angenommen. Es ergibt sich somit eine unbeeinflusste Erdungsspannung von:

$$U_{E,B} = R_E \cdot I_{RES} = 1,5 \, \Omega \cdot 132 \, A = 198 \, V \geq 2 \cdot U_{Tp} \quad (3.2)$$

3 Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung

Entsprechend Abbildung 2.1 übersteigt dies den zweifachen Wert der zulässigen Berührungsspannung U_{Tp} . Es muss somit überprüft werden, ob die zulässige Berührungsspannung bzw. LL-Berührungsspannung eingehalten wird.

Aus entsprechenden Simulationen ist beispielsweise bekannt, dass in diesem Szenario die bezogene LL-Berührungsspannung folgenden Wert aufweist:

$$U_{vT}/U_{E,B} = 30 \% \quad (3.3)$$

Mit diesem Ergebnis und der ermittelten Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand kann nun die absolute LL-Berührungsspannung berechnet werden:

$$U_{vT} = 30 \% \cdot U_{E,B} = 30 \% \cdot 198 \text{ V} = 59,4 \text{ V} \quad (3.4)$$

Nun kann eine Bewertung mit der maximal zulässigen LL-Berührungsspannung U_{vT} durchgeführt werden.

Ein weiterer Vorteil der Verwendung von bezogenen Größen ist die Unabhängigkeit des spezifischen Bodenwiderstandes. Würde sich dieser in diesem Beispiel verdoppeln, würde sich ebenso die Erdungsspannung und die absolute Berührungsspannung verdoppeln. Die bezogene Berührungsspannung, welche eine Relation zum unbeeinflussten Zustand wiedergibt, bleibt unverändert.

Es können somit gut Vergleiche der Auswirkungen zwischen unterschiedlichen Szenarien durchgeführt werden.

4 Modellerstellung

4.1 Modellierung PV-FFA

Um ein möglichst realitätsgetreues Modell einer PV-FFA zu erhalten, werden sämtliche Materialeigenschaften sowie Abmessungen von einer bereits existierenden Anlage im Verteilnetz der Netz OÖ GmbH übernommen.

Diese Anlage weist ein Blitzschutzsystem auf. Die Errichtung von PV-FFA ist landerbezogen in Ausführungsgesetzen zum ElWOG geregelt, aus diesem lässt sich grundsätzlich keine direkte Verpflichtung zur Herstellung eines Blitzschutzsystems ableiten. Das erstellte Modell wird somit ohne Blitzschutzsystem erstellt [10].

Die Grundfläche des in Autocad® erstellten Basismodells (siehe Abbildung 4.2) der PV-FFA beträgt 100 m x 100 m. In dieser befinden sich insgesamt 15 Modultische, welche einen Abstand von 4,5 m zueinander aufweisen.

Abbildung 4.1 zeigt eine typische Anordnung eines Modultisches einer PV-FFA. Die einzelnen Modultische bestehen aus einem Rahmen, auf denen die PV-Module montiert werden, es besteht somit entlang der Modulreihen eine leitfähige Verbindung.

Gemäß OVE EN 8101 [1] gilt es metallische, betriebsmäßig nicht stromführenden Teile der PV-Anlage (Montagegestell, Tragsysteme u. dgl.) mit Schutzpotentialausgleichsleiter untereinander und auf möglichst kurzem Weg mit der Hauptpotentialausgleichsschiene zu verbinden. Hierbei müssen die Verbindungspunkte der Konstruktionen so ausgeführt sein, dass ein dauerhafter Potentialausgleich aller Metallteile sichergestellt ist.

In der Realität wird dies meist durch den PEN-Leiter der jeweils an den Enden der Modultische montierten Wechselrichter gewährleistet. Im Modell wird der Potentialausgleich somit mit einer einseitigen Verbindung der Modultische nachgebildet.

Der Querschnitt des Potentialausgleiches variiert und wird in den entsprechenden Kapiteln angegeben.

Die Rahmen der Modultische sind mit erdfühligem Rammfundamenten verschraubt und stellen somit eine Anordnung von mehreren Tiefenerdungen dar. Die Rammtiefe ist abhängig von den Trageigenschaften des Erdreichs. In diesem Modell wird eine durchschnittliche Rammtiefe von 1,5 m angenommen. Innerhalb der Modulreihe beträgt der Abstand zwischen den Rammfundamenten längs des PV-Tisches 4 m und quer 2,5 m.

Folgend eine Auflistung der im Modell verwendeten Materialien:

4 Modellerstellung

- Potentialausgleich: isolierter Kupferrunddraht (4 mm^2 , 16 mm^2 , 79 mm^2) entsprechend dem Kapitel)
- Rammfundamente: verzinkter Stahl, $80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$
- Rahmen: verzinkter Stahl, $150\text{ mm} \times 40\text{ mm}$

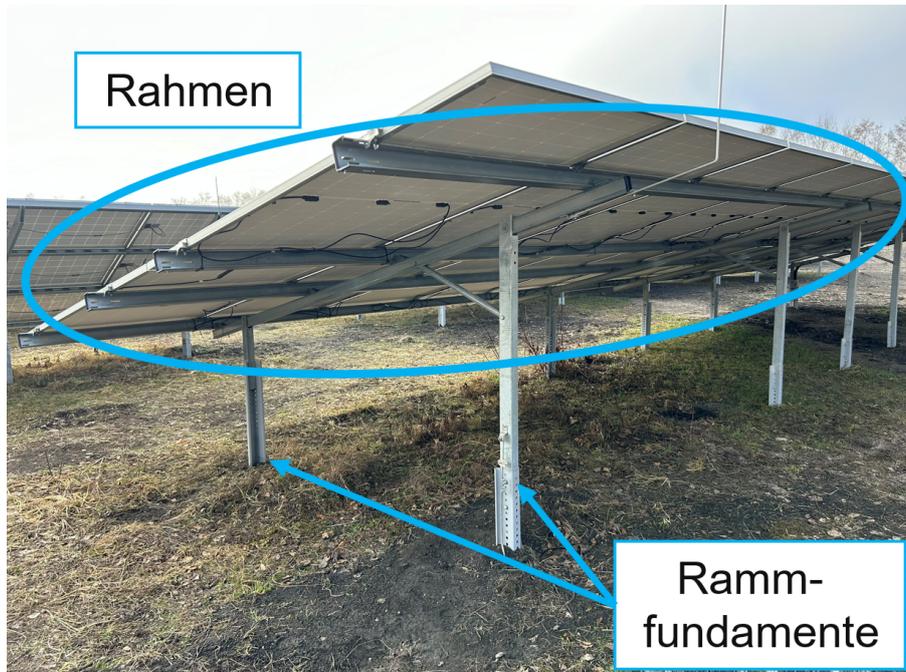
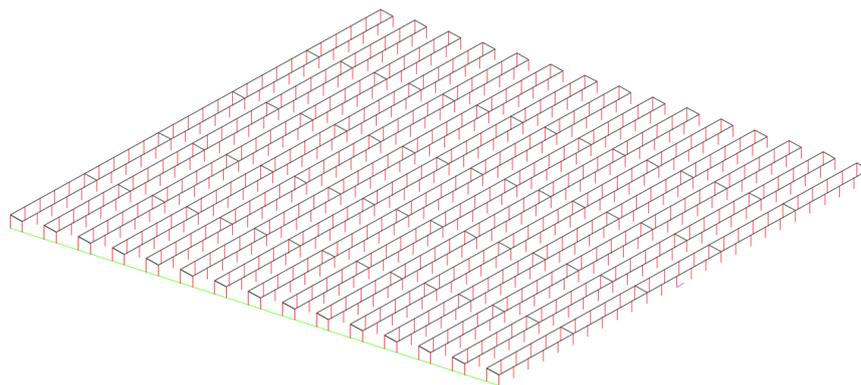


Abbildung 4.1: Montagegestell einer PV-FFA



Rammfundamente
Rahmen
Potentialausgleich

Abbildung 4.2: Erstellte Autocadmodell der PV-FFA

4.2 Modellierung 110-kV-Freileitung

4.2.1 Mastmodellierung

Der Stahlgittermast ist wie in Abbildung 4.3 ersichtlich mit vier Leitern pyramidal nachgebildet. Der Mast weist eine Höhe von 34 m auf. Das Erdungssystem ist entsprechend der von der Netz OÖ GmbH verwendeten Standarderdungsanlage für 100-kV-Maste nachgebildet.

Hierbei liegt der Fundamenterder in einer Tiefe von 0,8 m und weist eine Kantenlänge von 5 m auf. Von jeder Ecke entspringt in einem Winkel von 45° ein Strahlenerder mit einer Länge von 10 m.

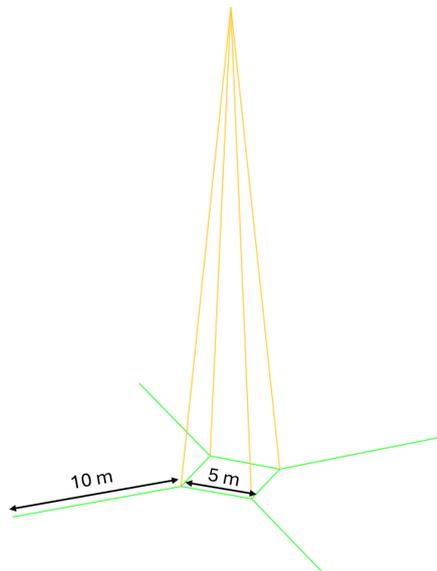


Abbildung 4.3: Modell 110-kV-Mast

4.2.2 Freileitungsmodellierung

Die Spannfeldlänge (SF), also der Abstand zwischen zwei Masten, beträgt 250 m. Da aufgrund der beschränkten Anzahl von Elementen im Simulationsprogramm keine beliebig lange Freileitung dargestellt werden kann, muss ein Kompromiss hinsichtlich der Leitungslänge gefunden werden. Um etwaige Effekte benachbarter Masten nicht zu vernachlässigen, sind somit 6 Spannfeldlängen (in Abbildung 4.4 zur besseren Übersicht nur 3 dargestellt) berücksichtigt. Um die restliche Leitungslänge nachzubilden, wird die Freileitung mit der rechnerisch ermittelten Kettenleiterimpedanz (4.2.3), welche die Anordnung Erdseil und Ausbreitungswiderstand nachfolgender Spannfeldlängen modelliert, abgeschlossen. Dieses Modell der Freileitung berücksichtigt somit die Kettenleiterimpedanz, jedoch keine Reduktionsfaktoren des Erdseils. Aufgrund der Tatsache, dass sämtliche Szenarien mit bezogenen

4 Modellerstellung

Größen betrachtet werden (siehe Kapitel 3.4), ist die Erdungsimpedanz der Freileitung auf die Ergebnisse grundsätzlich nicht ausschlaggebend. Um jedoch ein realitätsgetreues Freileitungsmodell zu haben, das außerhalb dieser Arbeit verwendet werden kann, wird dies jedoch berücksichtigt.

Die Gesamtimpedanz des Freileitungsmodells beträgt bei einem spezifischen von $100 \Omega\text{m}$:

$$|Z_M| = 0,46 \Omega \quad (4.1)$$

Dieser Wert deckt sich gut mit internen Messungen der NetzOÖ GmbH.

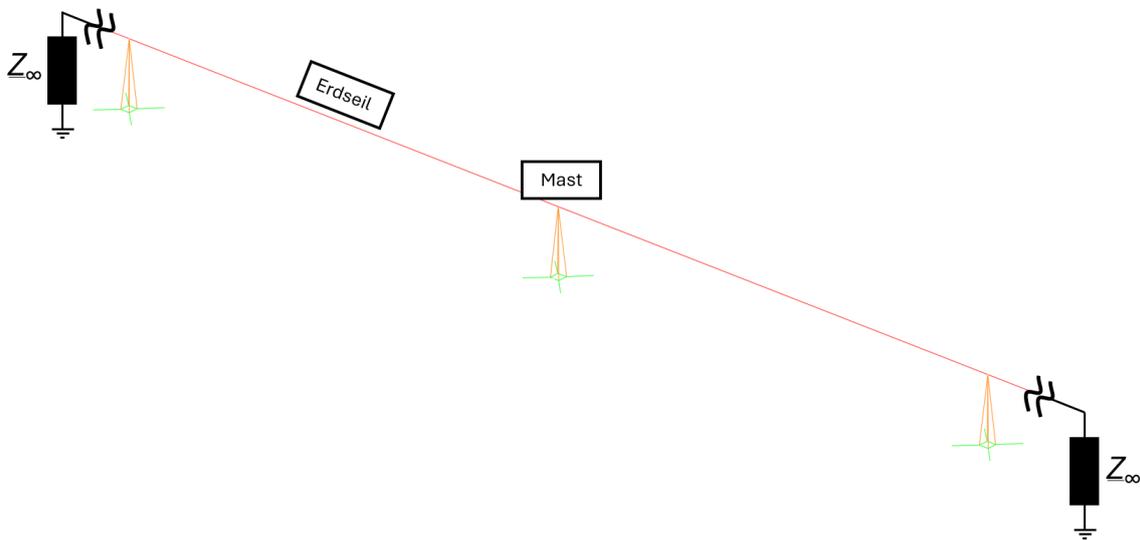


Abbildung 4.4: Modell 110-kV-Freileitung

4.2.3 Ermittlung Kettenleiterimpedanz durch Berechnung

Die Berechnung erfolgt mit den Formeln aus [11], [12] sowie [13].

Folgende Parameter werden hierfür angenommen:

- Radius des Erdseils: $r_Q = 10,8 \text{ mm}$
- Gleichstromwiderstand des Erdseils bei 20°C : $R'_Q = 0,1669 \Omega/\text{km}$
- relative Permeabilität: $\mu_r \approx 1$
- Permeabilität des Vakuums: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
- Kreisfrequenz: $\omega = 50 \text{ Hz}$

4 Modellerstellung

- spezifischer Erdwiderstand: ρ_E : 100 Ωm
- Spannungsfeldlänge einer Freileitung: $l_{SF} = 250$ m

In Abbildung 4.5 ist die homogene Kettenleiterstruktur einer Freileitung, bestehend aus Erdseil-Erde-Schleifenimpedanzen \underline{Z}_{QQE} und Mastausbreitungswiderständen R_M , dargestellt.

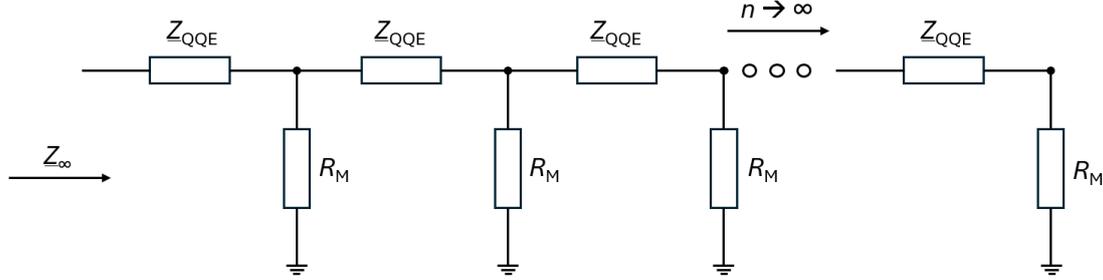


Abbildung 4.5: Homogene Kettenleiterstruktur einer Freileitung

Gemäß [11] erfolgt die Berechnung der Schleifenimpedanz bei Rückleitung über das Erdreich:

$$\underline{Z}'_{QQE} = R'_Q + \omega \cdot \frac{\mu_0}{8} + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\mu_r}{4} + \ln \left(\frac{\delta_E}{r_Q} \right) \right) \simeq (0,167 + j0,729) \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (4.2)$$

$$\underline{Z}_{QQE} = \underline{Z}'_{QQE} \cdot l_{SF} = (0,167 + j0,729) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 0,25 \text{ km} = (41,8 + j183) \text{ m}\Omega \quad (4.3)$$

Die Eindringtiefe in das Erdreich bzw. die äquivalente Tiefe des Erdrückstroms entsprechend [13]:

$$\delta_E = 1,8514 \cdot \sqrt{\frac{\rho_E}{\omega \cdot \mu_0}} = 931,8 \text{ m} \quad (4.4)$$

Der Ausbreitungswiderstand eines Masts wurde simulationstechnisch mittels XGSLab ermittelt und beträgt bei der verwendeten Standarderdungsanlage:

$$R_M = 3,21 \Omega \quad (4.5)$$

4 Modellerstellung

Ein homogener Kettenleiter weist die Struktur einer unendlichen Reihe auf:

$$\underline{Z}_\infty = \underline{Z}_{\text{QQE}} + \frac{1}{\frac{1}{\underline{R}_E} + \frac{1}{\underline{Z}_\infty}} \quad (4.6)$$

Die Schleifenimpedanz ergibt sich somit gemäß [11] durch Lösung der obigen quadratischen Gleichung zu:

$$\underline{Z}_{\infty, \text{ber}} = \frac{\underline{Z}_{\text{QQE}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\underline{Z}_{\text{QQE}}}{2}\right)^2 + R_M \cdot \underline{Z}_{\text{QQE}}} \sim \frac{\underline{Z}_{\text{QQE}}}{2} + \sqrt{R_M \cdot \underline{Z}_{\text{QQE}}} = (0,628 + j0,575) \Omega \quad (4.7)$$

Würde man einen inhomogenen Kettenleiter betrachten, so kann die Gesamtimpedanz durch schrittweises Berechnen einer Serien- und Parallelschaltung ermittelt werden, hierbei hat man jedoch eine endliche Anzahl von Kettengliedern.[12]

4.2.4 Ermittlung Kettenleiterimpedanz durch Simulation

Ausgangslage hierbei ist ein Mast, in dem ein Strom von 100 A injiziert wird. Schrittweise wird jeweils eine Spannfeldlänge hinzugefügt und der komplexe Wert der Erdungsspannung \underline{U}_E erfasst. Bei den einzeln hinzugefügten Spannfeldern handelt es sich um eine Hintereinanderschaltung komplexer Spannungsteiler. Der Verlauf der Erdungsspannung, abhängig von der Anzahl der hintereinander geschalteten Spannfelder, ist in Abbildung 4.6 ersichtlich. Wie in Tabelle 4.1 ersichtlich, kommt es ab einer Spannfeldlänge von 22 zu keiner wesentlichen Änderung der Erdungsspannung mehr.

4 Modellerstellung

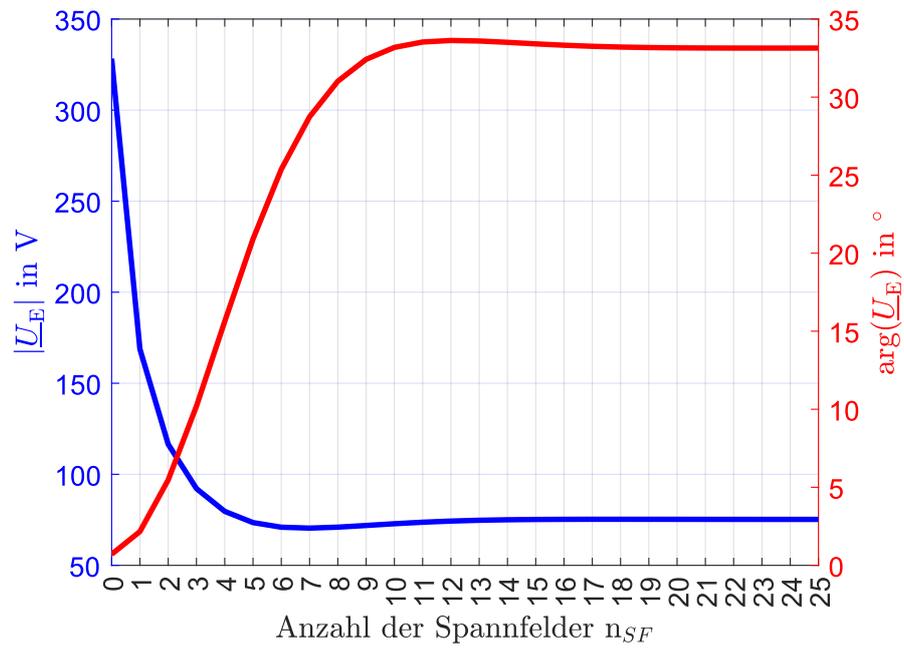


Abbildung 4.6: komplexe Erdungsspannung \underline{U}_E am strominjizierten Mast nach Betrag und Phase abhängig von der Anzahl hinzugefügter Spannfelder n_{SF}

4 Modellerstellung

Tabelle 4.1: komplexe Erdungsspannung \underline{U}_E am strominjizierten Mast nach Betrag und Phase abhängig von der Anzahl hinzugefügter Spannfelder n_{SF}

n_{SF}	$ \underline{U}_E $ in V	$\arg(\underline{U}_E)$ in $^\circ$
1	328,27	0,7
2	138,76	2,1
3	116,5	5,4
4	79,63	10,2
5	73,47	15,6
6	70,93	20,9
7	70,43	25,37
8	70,96	28,73
9	71,88	31,0
10	72,84	32,4
11	73,67	33,1
12	74,3	33,5
13	74,74	33,6
14	75,02	33,5
15	75,18	33,4
16	75,26	33,3
17	75,29	33,2
18	75,29	33,2
19	75,28	33,1
20	75,26	33,1
21	75,25	33,1
22	75,23	33,1
23	75,23	33,1
24	75,23	33,1
25	75,23	33,1

Die Gesamtimpedanz nach dem dritten Spannfeld wird durch Auswertung des Potentials und des Stromes im Erdseil ermittelt und beträgt:

$$\underline{Z}_{\infty, \text{sim}} = (0,69 + j0,64) \Omega \quad (4.8)$$

In Tabelle 4.2 ist die komplexe Erdungsspannung am strominjizierten Mast $|\underline{U}_E|$ abhängig von der Variante ersichtlich.

4 Modellerstellung

Tabelle 4.2: Erdungsspannung \underline{U}_E am strominjizierten Mast bei unterschiedlichen Varianten

Variante	$ \underline{U}_E $ in V	$\arg(\underline{U}_E)$ in °
25 Spannfelder	75,23	33,14
Abschluss nach 3 SF mit $\underline{Z}_{\infty,ber}$	76,12	30,46
Abschluss nach 3 SF mit $\underline{Z}_{\infty,sim}$	74,19	33,56

Der Vergleich zwischen den Varianten zeigt nur geringfügige Unterschiede. Für die Modellierung der Freileitung wird jene Variante gewählt, bei der die Freileitung nach drei Spannfeldlängen mit der berechneten Kettenleiterimpedanz abgeschlossen wird, verwendet (Abschluss nach 3 SF mit $\underline{Z}_{\infty,ber}$).

4.3 Modellierung Umspannwerk

Abbildung 4.7 zeigt das modellierte Erdungssystem des Umspannwerkes. Hierbei wird eine Grundfläche von 100 m x 50 m angenommen. Die Maschenweite des Erdungssystems beträgt 10 m und befindet sich 0,8 m unter der Erdoberfläche. Die Leiter werden als Kupfer mit einem Querschnitt von 120 mm² gemäß internen Richtlinien der Netz OÖ angenommen.

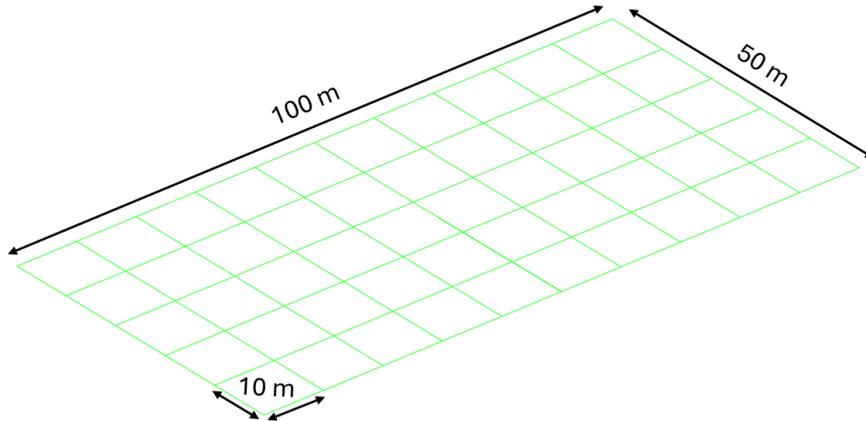


Abbildung 4.7: Modell Umspannwerk

Aufgrund der Tatsache, dass sämtliche Szenarien mit bezogenen Größen betrachtet werden (siehe Kapitel 3.4) ist die Erdungsimpedanz des Umspannwerkes grundsätzlich nicht ausschlaggebend. Auf eine Reduzierung der Erdungsimpedanz durch einen Abschlusswiderstand oder Freileitungsabgänge wird somit verzichtet.

Vollständigkeitshalber wird der Betrag der Erdungsimpedanz dennoch angegeben, dieser beträgt bei einem spezifischen Bodenwiderstand von 100 Ωm:

$$|Z_{E,UW}| = 0,64 \Omega \quad (4.9)$$

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

5.1 Allgemeine Erklärungen der betrachteten Szenarien

Anhand unterschiedlicher Szenarien wird nun die Beeinflussung von PV-FFA durch Hochspannungsanlagen näher untersucht. Einerseits wird entsprechend Abbildung 5.1 die Annäherung einer PV-FFA an einen fehlerbehafteten 110-kV-Freileitungsmast, andererseits an ein fehlerbehaftetes Umspannwerk, betrachtet.

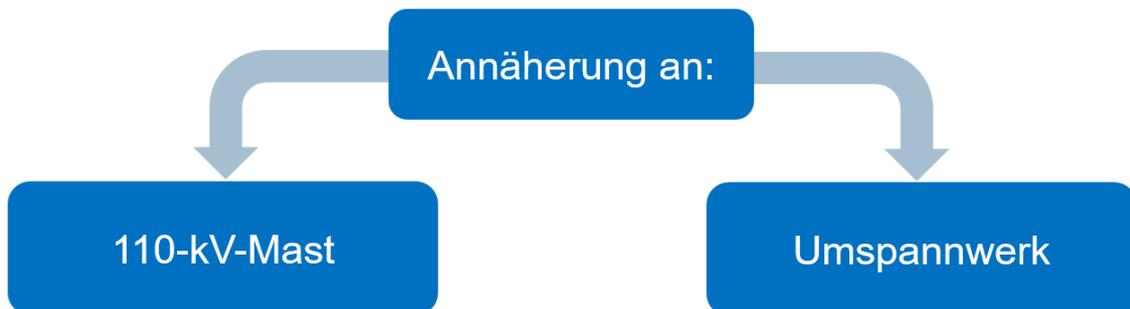


Abbildung 5.1: Überblick Szenarienbetrachtung

Hierzu wird die auftretende LL-Berührungsspannung U_{vT} sowie die auftretende LL-Schrittspannung U_{vS} bewertet.

Um auch PV-FFA auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (z.B. Tierhaltung) miteinzubeziehen (sogenannte Agri-PV's) werden sämtliche Berührungsspannungen sowie Schrittspannungen neben einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m auch auf 2 m betrachtet. Die Methodik zur Berechnung der Berührungs- und Schrittspannung ist in Kapitel 3 erläutert.

Wie in Kapitel 3.4 erklärt, sind sämtliche Berechnungsergebnisse auf die Erdungsspannung der beeinflussenden Anlage im unbeeinflussten Zustand $U_{E,B}$ (sprich gänzlich ohne PV-FFA) bezogen.

Die LL-Berührungsspannungen beziehen sich entsprechend der Griffweite g immer auf eine

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Berührung eines leitfähigen Teiles der PV-FFA. LL-Schrittspannungen werden innerhalb eines Umkreises von 5 m um die PV-FFA ausgewertet.

5.2 PV-FFA im Bereich einer 110-kV-Freileitung

Auftretende Berührungsspannungen sowie Schrittspannungen bei der Annäherung einer PV-FFA an eine 110-kV-Freileitung werden in diesem Abschnitt anhand unterschiedlicher Szenarios bzw. Maßnahmen, welche in Abbildung 5.2 aufgelistet sind, behandelt.

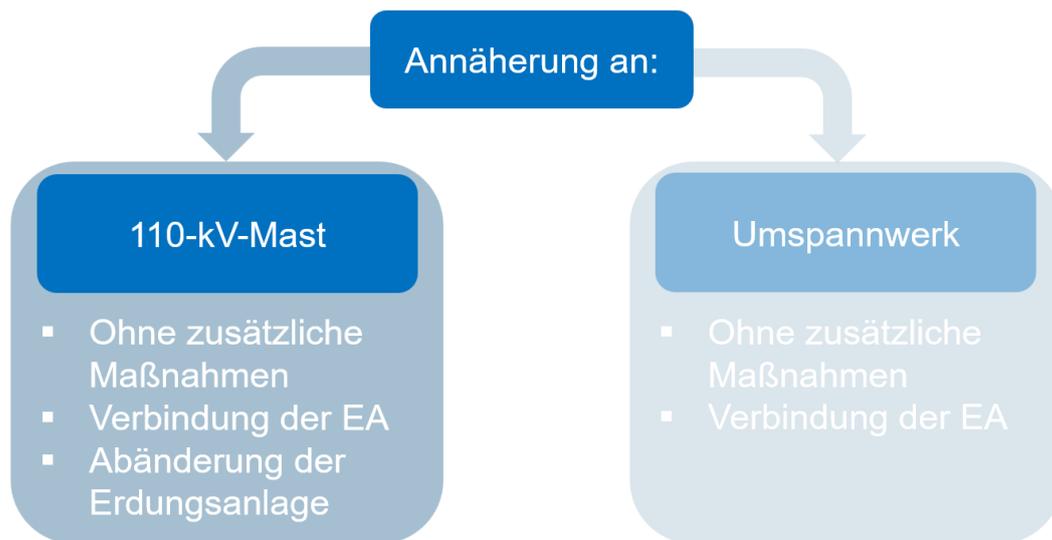


Abbildung 5.2: Überblick Szenarienbetrachtung - 110-kV-Mast

In Abbildung 5.3 ist das Grundmodell, sprich der unbeeinflusste Zustand, ersichtlich. Für sämtlich nun folgende betrachtete Szenarien wird der Ursprung des Koordinatensystems in den Mittelpunkt des fehlerbehafteten Masts gelegt. Jene Richtung längs der Leitungsachse wird mit "l", jene quer zur Leitungsachse mit "q" gekennzeichnet. Der Fehlerstrom wird direkt am Mast, gekennzeichnet mittels eines roten Blitzes, injiziert.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

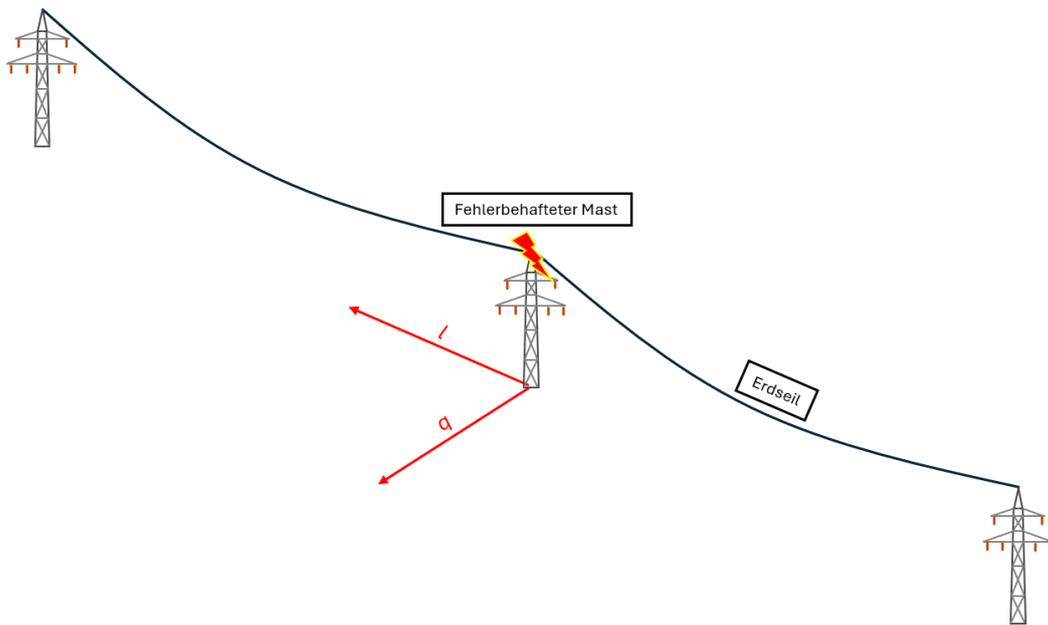


Abbildung 5.3: Veranschaulichung der Ausgangslage für Annäherung an 110-kV-Mast

5.2.1 Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen

Erklärung des Szenarios

Wie in Abbildung 5.4 ersichtlich, wird hierbei der Einfluss der Annäherung einer PV-FFA ohne zusätzliche Maßnahmen an eine 110-kV-Freileitung bei unterschiedlichen Annäherungsrichtungen untersucht. Die Annäherung erfolgt einerseits längs zur Leitungsachse (Variation in l-Richtung), andererseits quer der Leitungsachse (Variation in q-Richtung). Zur besseren Übersicht wird der variierende Abstand einerseits von der PV-FFA zum Mastmittelpunkt (a_M) sowie zum Erdungssystem der beeinflussenden Hochspannungsanlage (a_{ES}) angegeben. Bei jenen Annäherungsabständen, wo sich die PV-FFA direkt über dem Erdungssystem des HS-Masts befindet, wird sichergestellt, dass keine Verbindung zwischen dem Erdungssystem besteht. Es wurde hierbei ein einseitiger Potentialausgleich der Modulreihen mit einer Querschnittsfläche von 4 mm^2 gewählt.

Des Weiteren wird hierbei ebenso untersucht, welchen Einfluss eine PV-FFA mit erhöhter Längsausdehnung (200 m statt 100 m) auf die LL-Schritt- und Berührungsspannungen aufweist. Diese Betrachtung erfolgt bei einem Abstand von 5 m zum Erdungssystem und wird in q-Richtung durchgeführt.

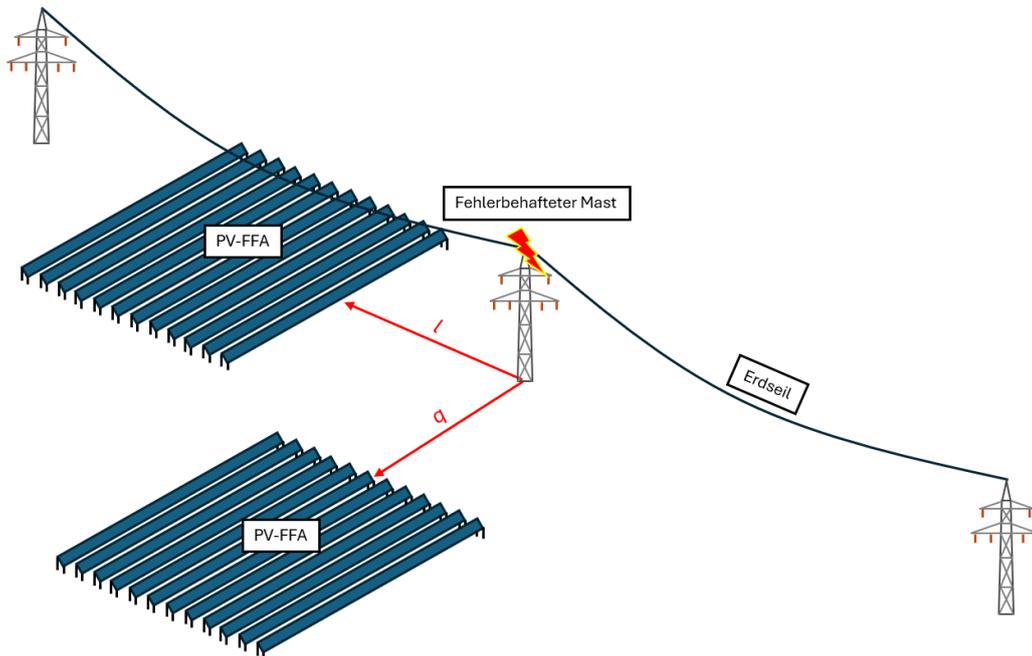


Abbildung 5.4: Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast in q- und l- Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen

Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 5.5 ist der Verlauf der LL-Berührungsspannungen bzw. LL-Schrittspannungen abhängig vom Abstand zum Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung und entsprechender Griffweite g dargestellt.

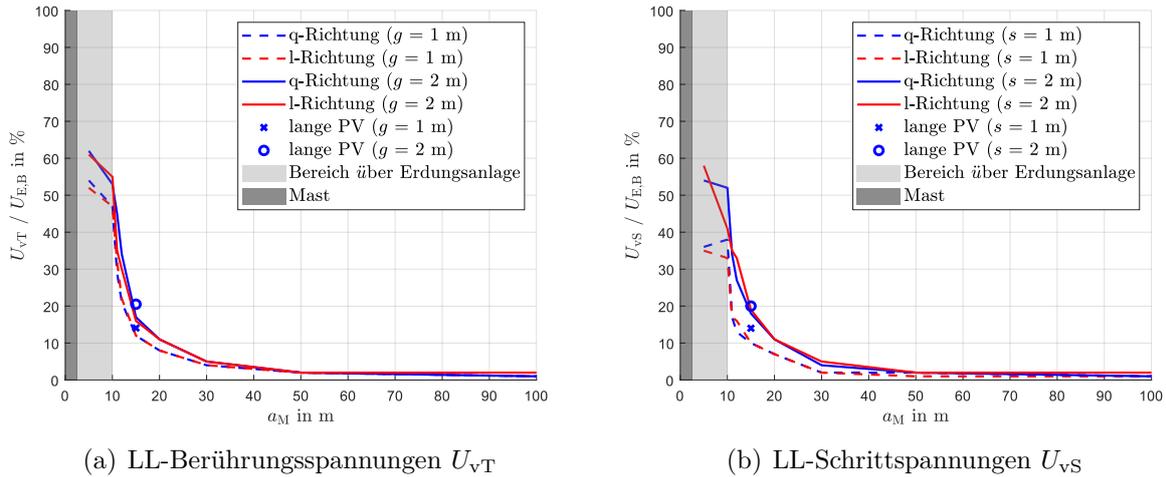


Abbildung 5.5: LL-Berührungsspannung U_{VT} sowie LL-Schrittspannungen U_{VS} bei einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m sowie 2 m abhängig vom Abstand zum Mastmittelpunkt a_M in q- und l-Richtung

Hierbei erkennt man, dass LL-Berührungsspannungen sowie Schrittspannungen im Bereich, wo sich die PV-FFA über dem Erdungssystem des HS-Masts befindet, deutlich erhöht sind. Der Höchstwert für die LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ist bei einem Abstand a_M von 5 m und beträgt hierbei 54 % der Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand, jener für die LL-Schrittspannung liegt bei 36 %.

Anzumerken sei, dass es in diesem Bereich zu einer ungewollten Verbindung der Erdungssysteme von Mast und PV-FFA kommen kann, dies spiegelt sich in Kapitel 5.2.2 wider. Befindet sich die PV-FFA außerhalb dieses Bereiches, so sinken diese Spannungen schnell ab.

Bei einem Abstand von 10 m zum Erdungssystem des Masts fallen die Berührungsspannungen unter einen Wert von 10 %, Schrittspannungen bei einem Abstand von 5 m ($s = 1$ m) bzw. 10 m ($s = 2$ m). Ab einem Abstand von 40 m zum Erdungssystem kommt es zu keiner nennenswerten ohmschen Beeinflussung mehr.

Vergleicht man in Abbildung 5.4 die unterschiedlichen Annäherungsrichtungen, so zeigt sich, dass die Richtung und somit der Einfluss des benachbarten HS-Masts, in der die Annäherung einer PV-FFA an einem HS-Mast erfolgt, keinen nennenswerten Einfluss auf die LL-Berührungsspannung sowie LL-Schrittspannung aufweist. Bei einem Abstand a_M

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

von 100 m und einer Schrittweite von Griffweite von 2 m erkennt man in l-Richtung die Annäherung zum nächsten Masten. Die variierenden Werte der Schrittspannungen für eine Schrittweite von $s = 2$ m im Bereich des Masts, sind auf die unterschiedliche Anordnung der PV-Modultische in q- und l- Richtung und die numerische Berechnung zurückzuführen.

Die Abbildungen 5.6 und 5.7 zeigen die Draufsicht der Verteilung der LL-Berührungsspannungen sowie LL-Schrittspannungen bei einer Griffweite von $g = 1$ m und einem Abstand a_M von 5 m sowie 20 m.

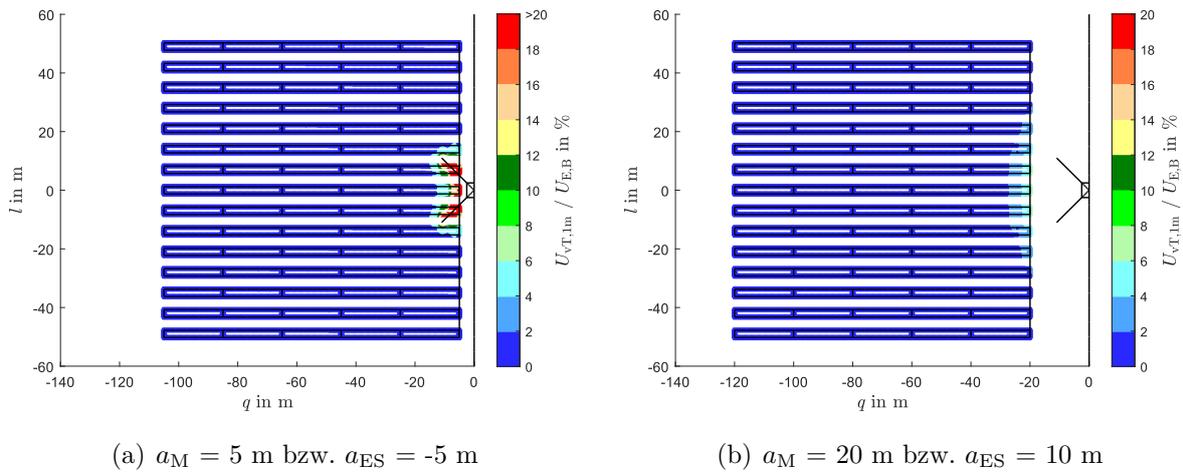


Abbildung 5.6: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite $g = 1$ m ($U_{vT,1m}$)

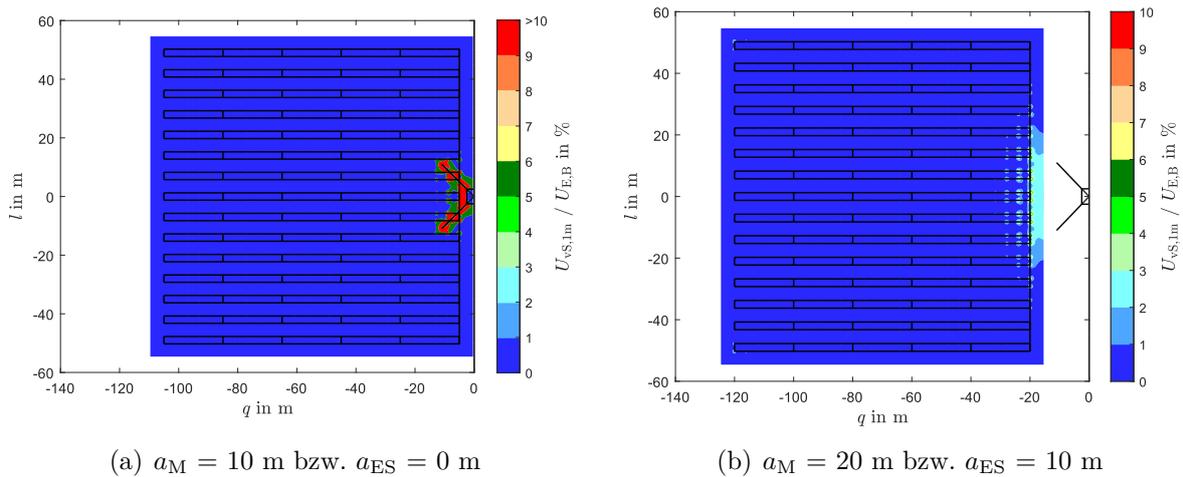


Abbildung 5.7: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 1 m ($U_{vS,1m}$)

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Bei allen Abstandsvariationen liegen die höchst auftretenden LL-Berührungss- und Schrittspannungen im Bereich um den HS-Mast an (Abbildung 5.5, 5.6). Im Bereich, wenn sich die PV-FFA direkt über dem Erdungssystem des Masts befindet, treten die höchsten Werte über dem Erdungssystem des Masts auf. Der ungünstigste Fall ist somit, wenn sich eine Person über dem Erdungssystem des Masts befindet und ein leitfähiges Element der PV-FFA berühren würde.

In Abbildung 5.8 ist das Ergebnis einer Liniensimulation für das Erdoberflächenpotential φ sowie die LL-Berührungsspannung mit einer Griffweite $g = 1 \text{ m}$ bei unterschiedlichen Beeinflussungsszenarien (unbeeinflusst, mit PV, mit längerer PV) ersichtlich.

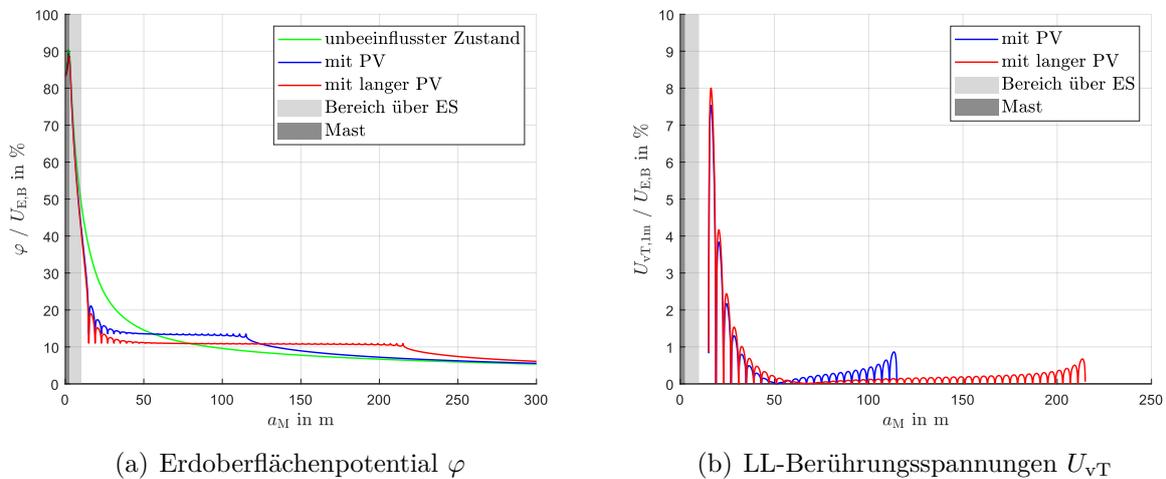


Abbildung 5.8: Liniensimulation entlang der q-Richtung bei unterschiedlichen Beeinflussungsszenarien

In den Szenarien, in denen sich eine PV-FFA befindet, ist in dem entsprechenden Bereich eine Plateaubildung des Erdoberflächenpotentials erkennbar. Dabei zeigt sich, dass das Plateau bei der längeren PV-FFA eine niedrigere Höhe aufweist und sich stärker dem Potential der entfernten Erde annähert. Der höckerförmig abfallende Verlauf des Erdoberflächenpotentials im Annäherungsbereich des Masts zeigt bei der längeren PV-FFA eine geringfügig größere Differenz zwischen Amplitude und Plateauniveau als bei der nicht ausgedehnten PV-FFA. Dies führt auch zu leicht höheren LL-Berührungsspannungen bei der PV-FFA mit erhöhter Längsausdehnung (Abbildung 5.8 b). Entsprechend den Grafiken mit der Draufsicht erkennt man auch hier im Linienplot, dass die maximalen Werte für LL-Berührungsspannungen in der PV-FFA im Annäherungsbereich des Masts auftreten. Ebenso an der gegenüberliegenden sind leichte Erhöhungen zu erkennen, jedoch wesentlich geringer.

Die Liniensimulation wurde entlang der oberen Rammfundamente der mittleren PV-Modultischreihe gewählt. Es handelt sich somit nicht um die maximalen auftretenden

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Werte der gesamten PV-FFA, sondern nur jene entlang der Linie. Entsprechende Werte für die LL-Schritt- und Berührungsspannungen sind in Abbildung 5.15 bei einem Abstand von 5 m zum Erdungssystem eingezeichnet. Vergleicht man diese mit der kürzeren PV-FFA, so zeigen sich nur geringfügige Erhöhung der Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannung. Von weiteren Betrachtungen von PV-FFA mit erhöhter Längsausdehnung wird somit für nun folgende Kapitel abgesehen.

5.2.2 Verbindung der Erdungssysteme

Erklärung des Szenarios

Es wird untersucht, wie sich eine Verbindung der Erdungssysteme von PV-FFA und HS-Mast auf LL-Schritt- und Berührungsspannungen auswirkt. Die PV-FFA wird somit gemäß Abbildung 5.9 mit dem Erdungssystem des HS-Masts mittels einem isolierten Leiter (40x4 mm Stahlbänderder, ideal isoliert) verbunden. Der Abstand wird hierbei wiederum in q- und l- Richtung entsprechend variiert.

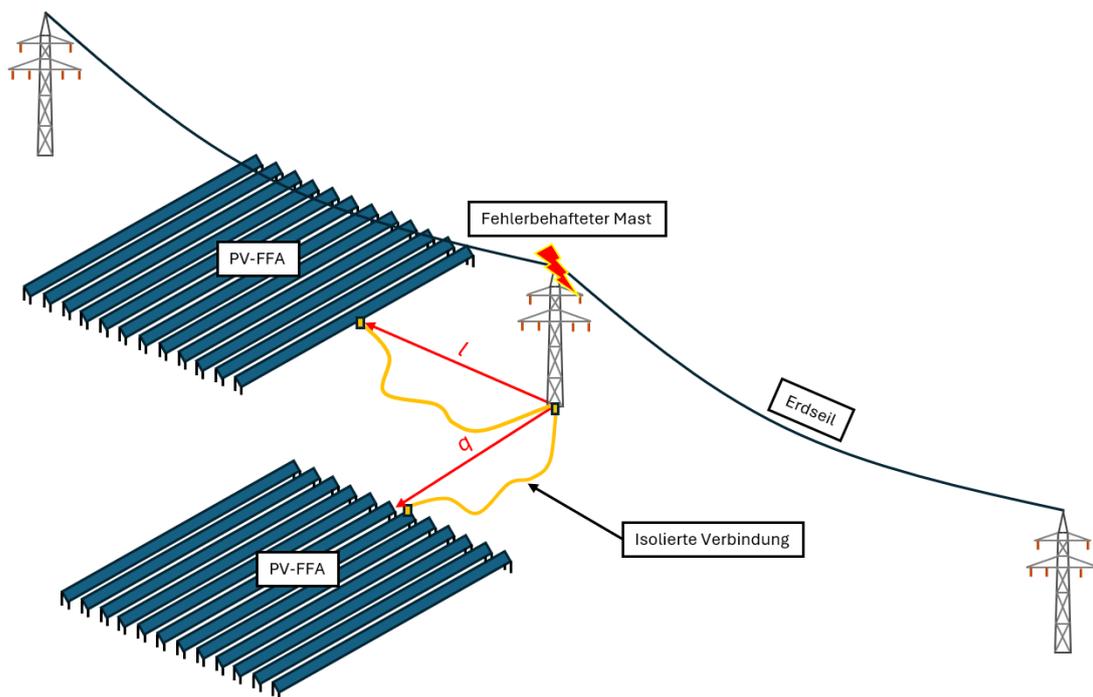


Abbildung 5.9: Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast in q- und l- Richtung mit isolierter Verbindung zwischen PV-FFA und HS-Mast

Ergebnisse und Diskussion

Durch die Verbindung von PV-FFA mit dem Erdungssystem des HS-Masts kommt es durch die Erweiterung des Erdungssystems zu einer Reduzierung der Erdungsspannung. Unabhängig vom Abstand beträgt die Erdungsspannung rund 65 % von jener im unbeeinflussten Zustand (siehe Tabelle 7.4).

In Abbildungen 5.10 und 5.11 sind die Verläufe der LL-Berührungsspannungen bzw. LL-Schrittspannungen abhängig vom Abstand a_{EA} bzw. a_M in q- und l-Richtung und der Griffweite g dargestellt. Die roten Punkte geben jene Werte für LL-Berührungsspannungen bzw. LL-Schrittspannungen wieder, wenn die PV-Modultische in l-Richtung längs zur Ausbreitungsrichtung angeordnet sind (selbige Anordnung wie in q-Richtung).

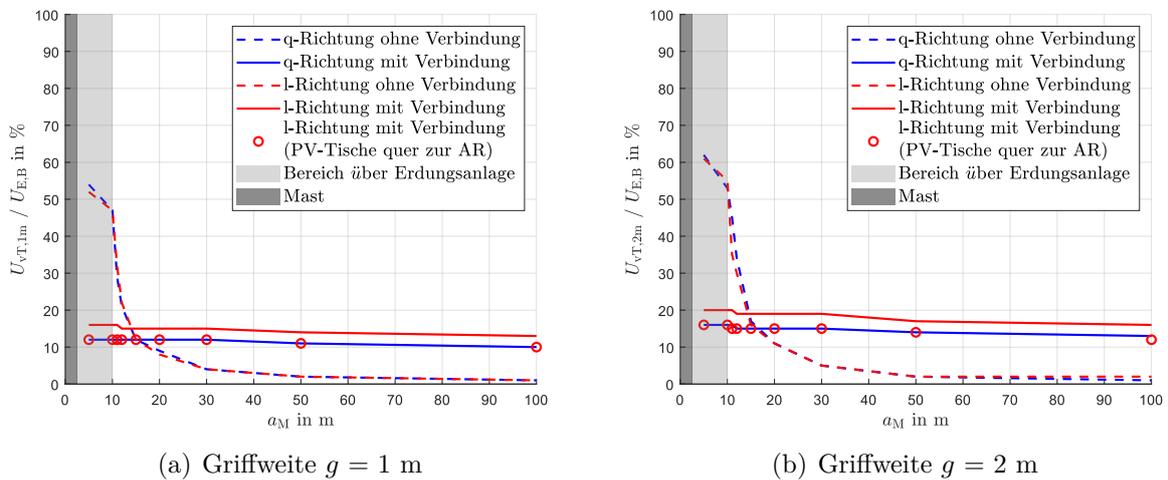


Abbildung 5.10: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand a_M in q- und l- Richtung mit und ohne isolierter Verbindung

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

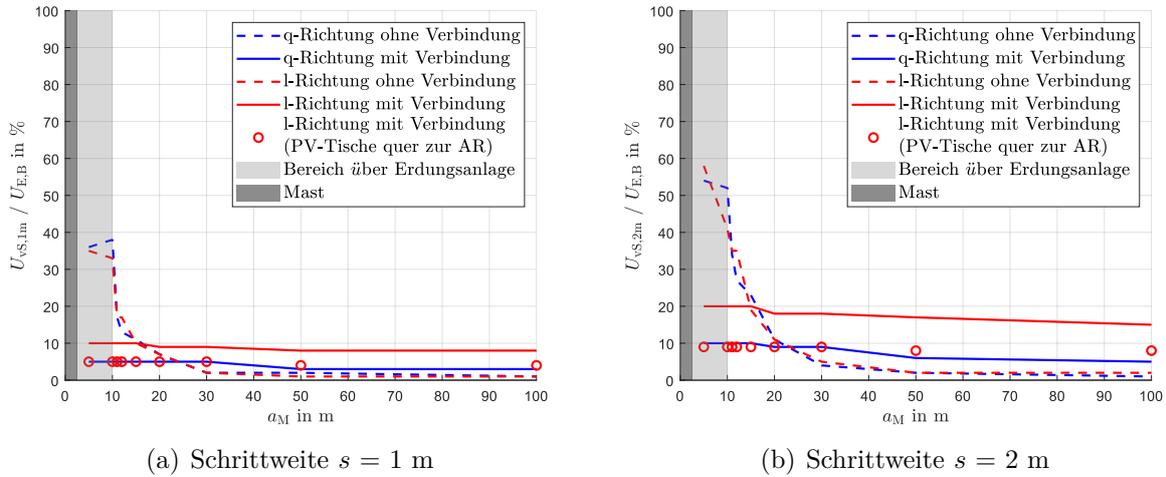


Abbildung 5.11: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) abhängig vom Abstand a_M in q- und l-Richtung mit und ohne isolierter Verbindung

Betrachtet man die LL-Schritt- und Berührungsspannungen abhängig vom Abstand zum Mast (siehe Abbildung 5.10 und 5.11) so erkennt man, dass diese nun einen vom Abstand unabhängigen konstanten Wert aufweisen. Im Gegensatz zum Szenario ohne zusätzliche Maßnahmen zeigt sich nun, bei der Verbindung der Erdungssysteme ein Unterschied der Annäherungsrichtungen. Der Unterschied ist bei den Schrittspannungen am größten ausgeprägt, hierbei unterscheiden sich die Richtungen um das Doppelte. Dies lässt sich jedoch auf die Anordnung der PV-Tische zurückführen. Entsprechend der Abbildung 5.9 ist die Modulanordnung in q-Richtung längs und in l-Richtung quer zur Ausbreitungsrichtung. Würde man jedoch in l-Richtung die Modultische gleich anordnen wie in q-Richtung, so ergeben sich idente Schritt- und Berührungsspannungen (rote Kreise in Abbildungen 5.10 und 5.11). Es lässt sich somit festhalten, dass kein Unterschied der Annäherungsrichtungen bzw. des Einflusses vom benachbarten Mast, bei gleicher PV-Modultischenanordnung, herrscht. Für sämtlich nun folgende Szenarien wird somit nur noch eine Annäherungsrichtung betrachtet. Die Anordnung der Modultische bzw. des Potentialausgleiches ist bei der Maßnahme der Verbindung der Erdungssysteme von Bedeutung und wird explizit in Kapitel 5.2.3 näher betrachtet.

Für Abstände unter 5 m zum Erdungssystem des Masts kommt es bei der Verbindung der Erdungssysteme zu einer drastischen Reduktion der Berührungsspannungen. Selbiges zeigt sich bei den Schrittspannungen ab einem Abstand von 15 m zum Erdungssystem. In diesem Bereich erfolgt eine Reduzierung der LL-Schritt- und Berührungsspannung bis zu ca. 45 %. Über einen Abstand von 5 m bzw. 15 m kommt es aufgrund der Potentialverschleppung zu einer Verschlechterung der Situation.

Abbildungen 5.12 und 5.13 zeigen die Draufsicht der Verteilung der LL-Berührungsspannungen

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

sowie LL-Schrittspannungen bei einer Griffweite von $g = 1$ m und einem Abstand a_M von 20 m bzw. a_{EA} von 10 m ohne (getrennte Erdungssysteme) und mit isolierter Verbindung (verbundene Erdungssysteme).

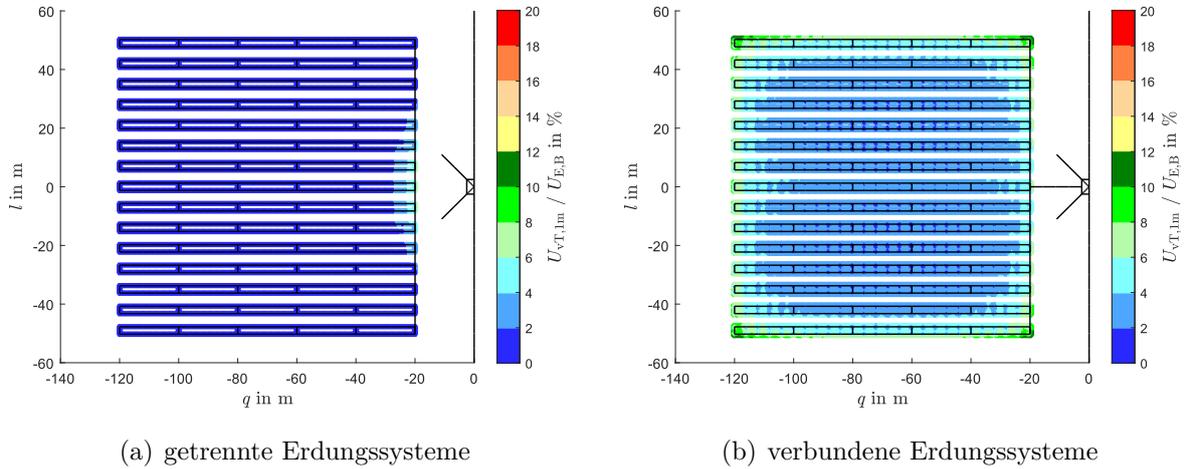


Abbildung 5.12: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand $a_M = 20$ m bzw. $a_{EA} = 10$ m in q-Richtung

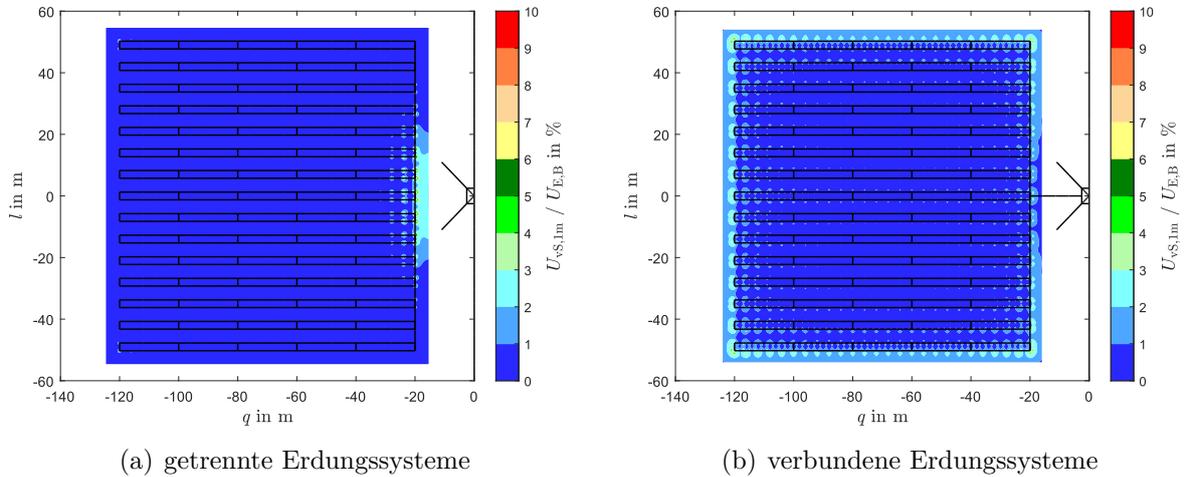


Abbildung 5.13: LL-Schrittspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand $a_M = 20$ m bzw. $a_{EA} = 10$ m in q-Richtung

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

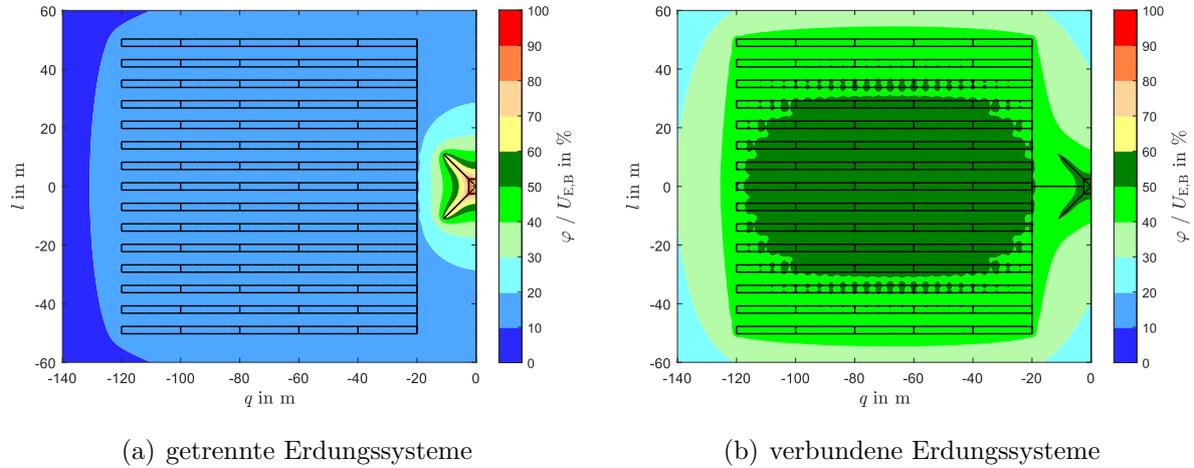


Abbildung 5.14: Erdoberflächenpotential φ bei einem Abstand $a_M = 20$ m bzw. $a_{EA} = 10$ m in q-Richtung mit und ohne isolierter Verbindung (Verb.)

Betrachtet man die Abbildungen 5.12 sowie 5.13 so erkennt man, dass nun die höchsten LL-Schritt- sowie Berührungsspannungen bei verbundenen Erdungssystemen nicht mehr im Nahbereich des Masts auftreten, sondern nun im Randgebiet der PV-FFA. Die maximalen Werte liegen hierbei an den Ecken der PV-FFA. Die PV-FFA wirkt entsprechend dem Erdoberflächenpotential φ (Abbildung 5.14) ähnlich einer Äquipotentialfläche.

5.2.3 Variation des Potentialausgleichsystems

Erklärung des Szenarios

Im vorherigen Kapitel 5.2.2 zeigt sich, dass die Anordnung der PV-Modultische bzw. der Potentialausgleich bei verbundenen Erdungssystemen einen Einfluss auf Schritt- und Berührungsspannungen an der PV-FFA aufweist. Dies wird nun näher betrachtet. Um die Auswirkungen besser zu veranschaulichen, wird eine PV-FFA mit einer erhöhten Längsausdehnung, wie in Abbildung 5.15 ersichtlich, verwendet. Der Abstand zwischen Mast und PV-FFA ist bei verbundenen Erdungssystemen nicht von Bedeutung, es wird ein exemplarischer Abstand von 20 m gewählt.

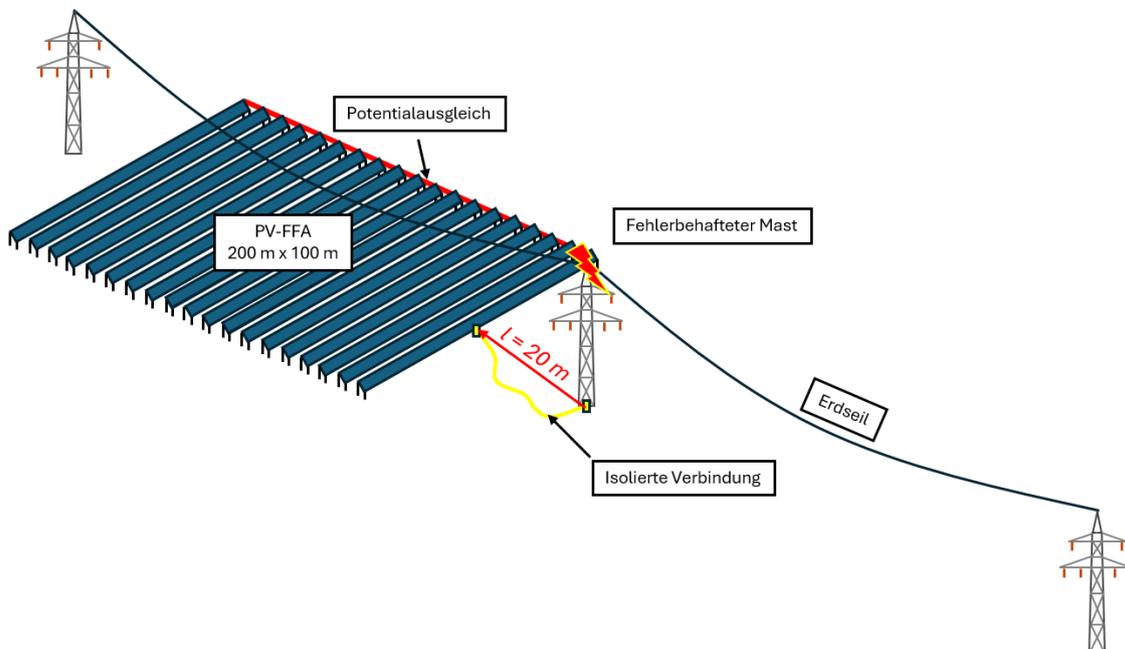


Abbildung 5.15: Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast bei einem Abstand a_M von 20 m bzw. a_{EA} von 10 m mit isolierter Verbindung und größerer Längsausdehnung der PV-FFA bei unterschiedlichen Potentialausgleichssystemen

Das in den vorherigen Szenarien verwendete Grundmodell weist einen Potentialausgleichsleiter mit einer Querschnittsfläche von 4 mm^2 an einer Seite der endenden PV-Modultische auf (Abbildung 5.16 (a)). Einerseits wird nun untersucht, wie sich die Anordnung des Potentialausgleichsleiters auswirkt, andererseits dessen Querschnitt. Es wird somit die Auswirkung eines Potentialausgleichsleiters an beiden Enden der PV-Modultische betrachtet (Abbildung 5.16 (b)), ebenso ein vermaschtes Potentialausgleichssystem (Abbildung 5.16 (c)). Von Potentialausgleichsleiter entlang der Modultische wird abgesehen, es zeigt

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

sich, dass es, aufgrund der guten Leitfähigkeit innerhalb der Modultische, zu keinem signifikanten Spannungsabfall entlang dieser kommt.

Des Weiteren wird von einer Variation des einseitigen PA abgesehen. Es wird vorausgesetzt, dass sich dieser, zur besseren Stromaufteilung, immer an jener Seite der Verbindung der Erdungssysteme befindet. Der Querschnitt wird entsprechend jeder Anordnung zwischen 4 mm^2 , 16 mm^2 und 79 mm^2 (entspricht der Querschnittsfläche eines Runddrahtes mit $d = 10 \text{ mm}$) variiert.

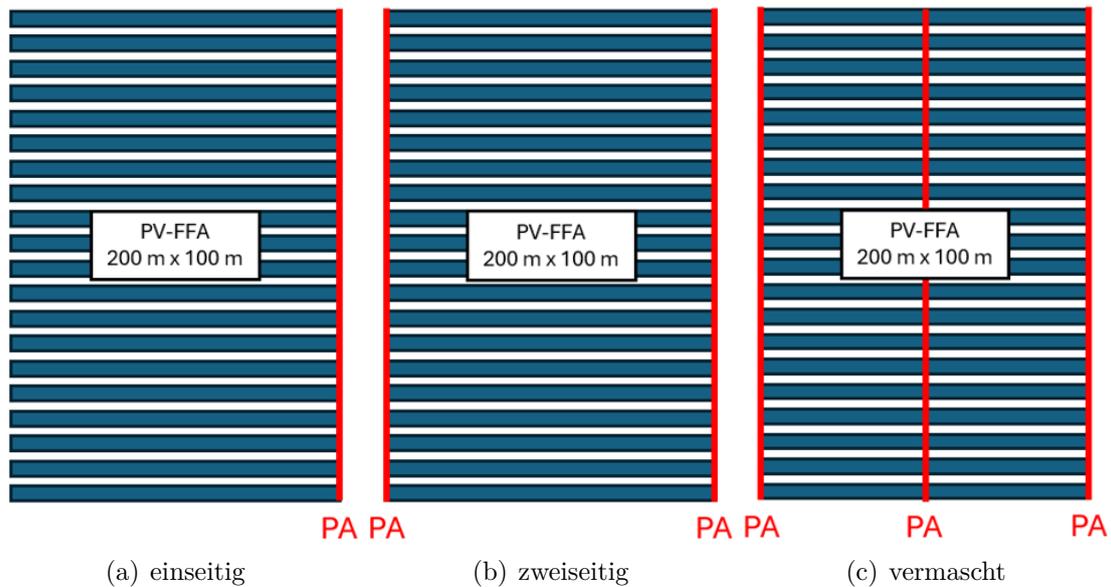


Abbildung 5.16: Veranschaulichung unterschiedlicher Variationen der Anordnung von Potentialausgleichsleiter

Ergebnisse und Diskussion

LL-Berührungsspannungen entsprechend der Griffweite g abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Modultische gibt Abbildung 5.17 wieder. Entsprechendes für die LL-Schrittspannung in Abbildung 5.18.

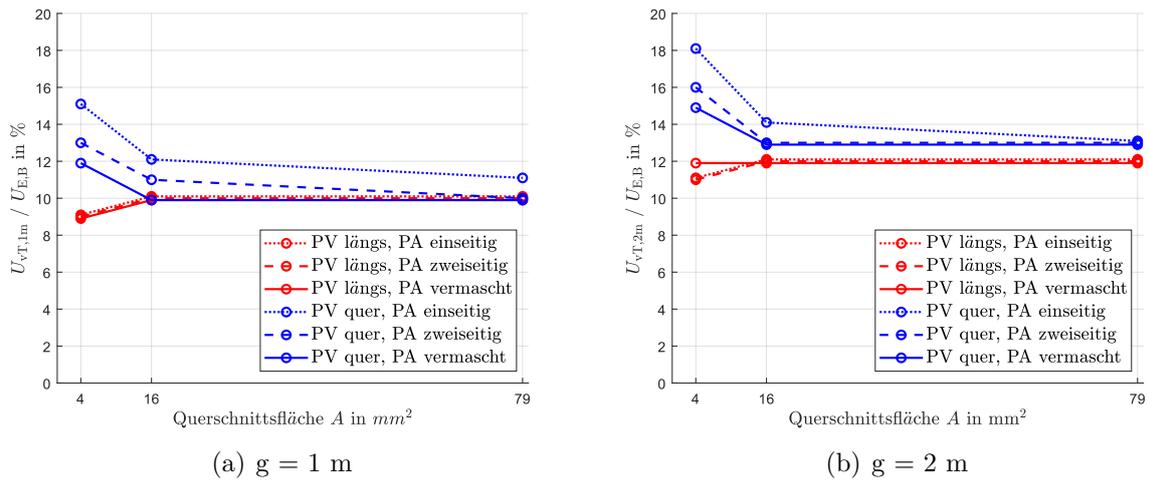


Abbildung 5.17: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters und der Anordnung der Modultische

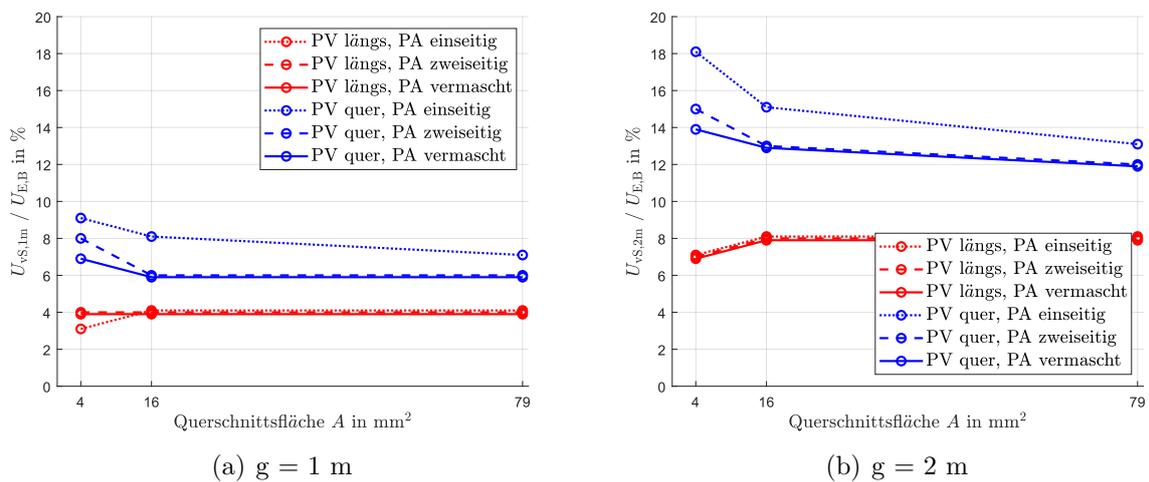


Abbildung 5.18: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters und der Anordnung der Modultische

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Als Maß für die Bewertung des Potentialausgleiches wird die an der PV-FFA maximal auftretende bezogene Spannungsdifferenz $\Delta U_{\max, \text{PV}} / U_{\text{E,B}}$ der berührbaren Teile verwendet (siehe Abbildung 5.19).

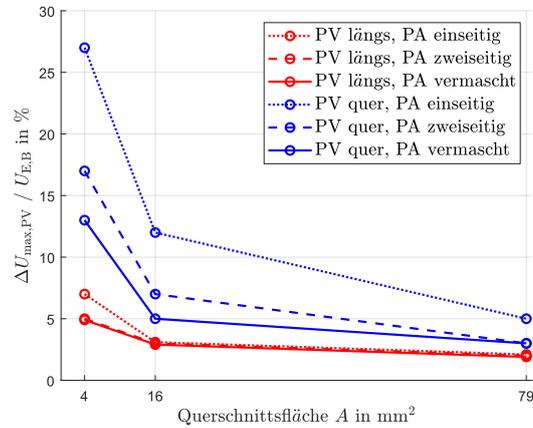


Abbildung 5.19: maximal auftretende Spannungsdifferenz zwischen den berührbaren Teilen der PV-FFA $\Delta U_{\max, \text{PV}}$ abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters und der Anordnung der Modultische

Abbildungen 5.17, 5.18 sowie 5.19 zeigen alle, dass, wenn die PV-Modultische längs zur Ausbreitungsrichtung sind, der Querschnitt und die Anordnung des Potentialausgleichsleiters keinen Einfluss auf die LL-Schritt- und Berührungsspannungen haben. Begründbar ist dies mit folgender Abbildung 5.20, welche die Potentialverteilung der leitfähigen Teile der PV-FFA bei unterschiedlicher Anordnung der Modultische wiedergibt.

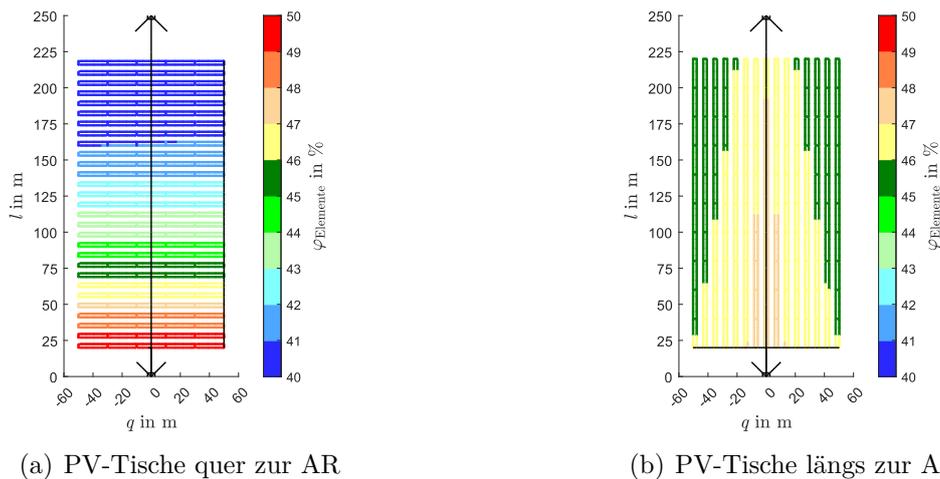


Abbildung 5.20: Potentialverteilung der berührbaren Teile der PV-FFA $\varphi_{\text{Elemente}}$ mit einseitigem Potentialausgleichsleiter und einem Querschnitt von $A = 16 \text{ mm}^2$

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Hier erkennt man, dass der Spannungsabfall entlang der Modulreihen, aufgrund der guten Leitfähigkeit innerhalb derer, gering ist. Die maximale Spannungsdifferenz ist hierbei unter 7 % für alle Anordnungen und Querschnitte des Potentialausgleichsleiter (Abbildung 5.19). Die Anordnung längs der Ausbreitungsrichtung repräsentiert somit eine PV-FFA mit ausreichendem Potentialausgleich. Dessen Verteilung der Berührungsspannung (Abbildung 5.21 (a)) zeigt hierbei, dass diese in der Höhe gleichmäßig an den Ecken verteilt sind. Gleiches gilt für Schrittspannungen.

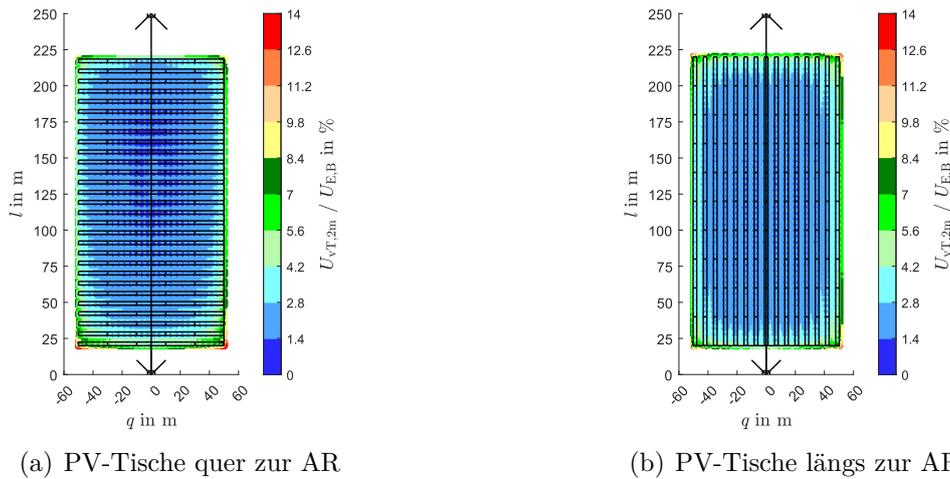


Abbildung 5.21: LL-Berührungsspannungen bei einer Griffweite g von 2 m ($U_{vT,1m}$) mit einseitigem Potentialausgleichsleiter und einem Querschnitt von $A = 16 \text{ mm}^2$

Sind jedoch die Modultische, bei gleicher Ausgangslage (16 mm^2 , PA einseitig), quer zur Ausbreitungsrichtung, so zeigt sich die Wichtigkeit eines ausreichend guten Potentialausgleiches. Besonders zeigen sich die Unterschiede bei den Schrittspannungen mit einer Schrittweite s von 2 m (siehe Abbildung 5.18 (b)).

In Abbildung 5.20 (b) erkennt man, dass es entlang der Ausbreitungsrichtung zu einem Spannungsabfall von rund 12 % kommt. Dieser wird durch den Potentialausgleichsleiter verursacht. Entlang der Modulreihen ist der Spannungsabfall wiederum vernachlässigbar. Vergleicht man nun die Verteilungen der LL-Berührungsspannungen (Abbildung 5.21) so fällt auf, dass diese an den Ecken an der Seite des fehlerbehafteten Masts erhöht sind. Betrachtet man des Weiteren die LL-Schritt- und Berührungsspannungen (Abbildungen 5.17, 5.18) sowie die maximal auftretende Spannungsdifferenz (Abbildung 5.19) so erkennt man, dass je höher der Querschnitt und die Anzahl der Potentialausgleichsleiter ist, diese sinken. Die größte Auswirkung zeigt eine Querschnittserhöhung von 4 mm^2 auf 16 mm^2 . Hierbei sinkt die maximal auftretende Spannungsdifferenz bei einer vermaschten Anordnung von 27 % auf 12 %.

Je höher der Querschnitt bzw. die Anzahl der Potentialausgleichsleiter ist, je mehr nähert man sich der PV-Modulanordnung in längs-Richtung an.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Beim Unterschied zwischen der Anzahl der bzw. Anordnung der Potentialausgleichsleiter zeigt sich, dass dies keinen nennenswerten Einfluss auf die Verteilung der LL-Schritt- und Berührungsspannungen hat. Eine höhere Anzahl wirkt nur wie eine Erhöhung des Querschnitts des Potentialausgleichsleiters.

Zusammenfassend sei zu erwähnen, dass bei der Maßnahme der Verbindung der Erdungssysteme ein ausreichender Potentialausgleich gewährleistet sein muss. Hierbei ist aufgrund des Spannungsabfalles der Querschnitt von essenzieller Bedeutung.

Für nun folgende Szenarien bei Verbindung der Erdungssysteme wird ein zweiseitiger Potentialausgleich mit einer Querschnittsfläche von 16 mm^2 verwendet.

5.2.4 Beidseitige Mastverbindung

Erklärung des Szenarios

Im Falle einer erhöhten Längsausdehnung der PV-FFA innerhalb eines Spannungsfeldes kann es zu einer Annäherung an zwei Masten kommen. Es stellt sich somit die Frage, wie sich eine zweiseitige Verbindung im Gegensatz zu einer einseitigen Mastverbindung auswirkt.

Untersucht wird dies entsprechend Abbildung 5.22. Der Abstand zwischen Mast und PV-FFA ist bei verbundenen Erdungssystemen nicht von Bedeutung, es wird ein exemplarischer Abstand von 20 m zum fehlerbehafteten Mast gewählt. Um etwaige Einflüsse eines nicht ausreichenden Potentialausgleiches zu vermeiden, wird eine zweiseitiger Potentialausgleich mit einer Querschnittsfläche von 16 mm^2 gewählt.

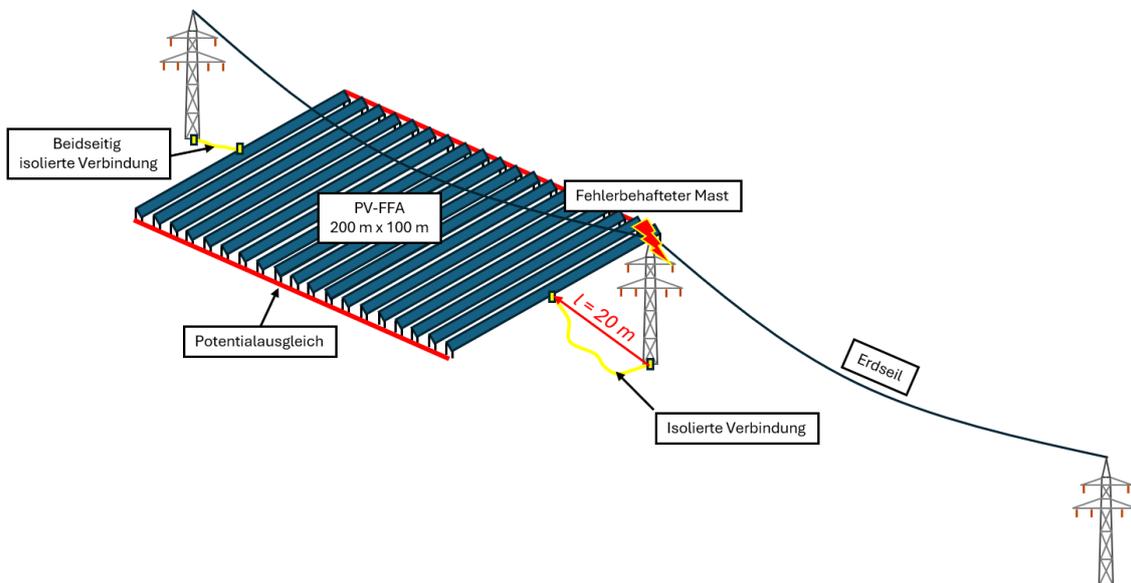


Abbildung 5.22: Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast bei einem Abstand a_M von 20 m bzw. a_{EA} von 10 m mit isolierter Verbindung und veränderter Längsausdehnung der PV-FFA bei beidseitiger Mastverbindung

Ergebnisse und Diskussion

Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, \text{PV}}$ sind in Tabelle 5.1 bei einseitiger und zweiseitiger Mastverbindung dargestellt.

Tabelle 5.1: Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, \text{PV}}$ in % abhängig von der Variante bei veränderter Längsausdehnung und beidseitiger Verbindung der Erdungssysteme

Variante	$U_E / U_{E,B}$ in %	$\varphi_{\max, \text{PV}} / U_{E,B}$ in %
einseitige Verbindung	64	49
beidseitige Verbindung	64	49

Die Erdungssysteme der Masten sind über das Erdseil miteinander verbunden. Verglichen mit der einseitigen Mastverbindung, kommt es somit bei der beidseitigen Mastverbindung zu keiner Erweiterung des bestehenden Erdungssystems, die Erdungsspannung bleibt gemäß Tabelle 5.1 unverändert.

In Tabelle 5.2 und 5.3 sind die LL-Berührungsspannungen bzw. LL-Schrittspannungen bei einseitiger und zweiseitiger Mastverbindung gelistet.

Tabelle 5.2: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig von der Variante bei veränderter Längsausdehnung und beidseitiger Verbindung der Erdungssysteme

Variante	$U_{vT,1m} / U_{E,B}$ in %	$U_{vT,2m} / U_{E,B}$ in %
einseitige Verbindung	10,7	13,4
beidseitige Verbindung	10,7	13,5

Tabelle 5.3: LL-Schrittspannung bei einer Griffweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) abhängig von der Variante bei veränderter Längsausdehnung und beidseitiger Verbindung der Erdungssysteme

Variante	$U_{vS,1m} / U_{E,B}$ in %	$U_{vS,2m} / U_{E,B}$ in %
einseitige Verbindung	6,5	12,9
beidseitige Verbindung	6,5	13

Betrachtet man die LL-Schritt und Berührungsspannungen in Tabelle 5.2 und 5.3 so zeigt sich, dass sich diese kaum ändern.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Durch die beidseitige Verbindung kommt es jedoch zu Anhebungen des Potentials der leitfähigen Elemente an der PV-FFA im Bereich des benachbarten Masts (siehe Abbildung 5.23).

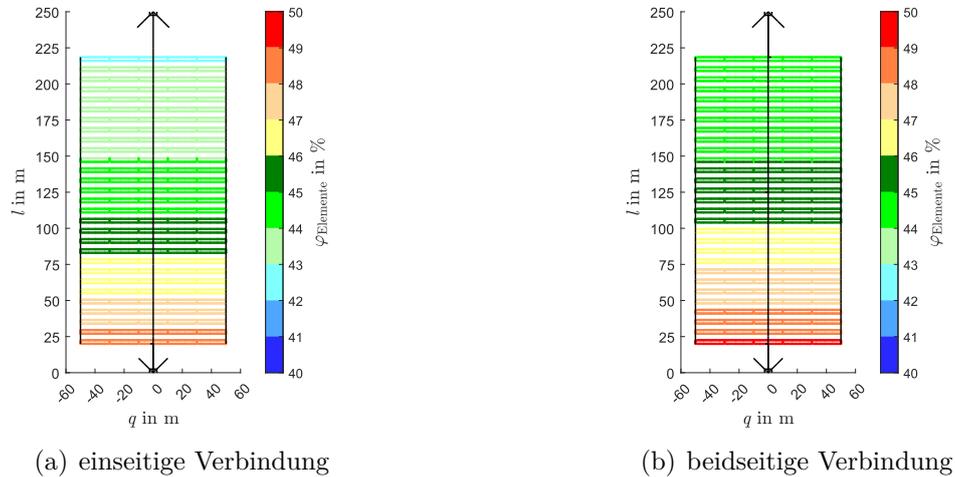


Abbildung 5.23: Potentialverteilung der berührbaren Teile der PV-FFA $\varphi_{\text{Elemente}}$ bei ein- und beidseitiger Mastverbindung

Abbildung 5.24 gibt das zugehörige Erdoberflächenpotential wieder.

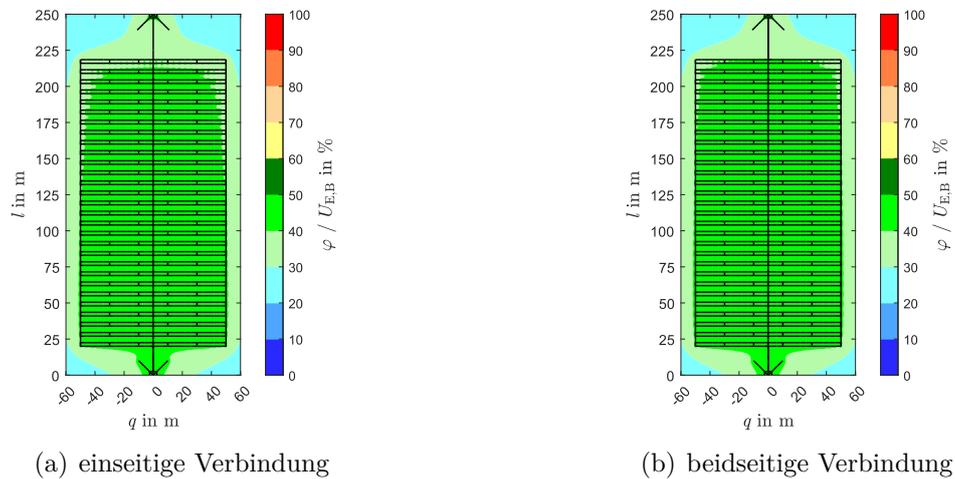


Abbildung 5.24: Erdoberflächenpotential φ bei ein- und beidseitiger Mastverbindung

Hierbei stellt man bei der beidseitigen Mastverbindung eine geringfügige Erhöhung innerhalb der PV-FFA in der Nähe des Masts fest.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Abbildungen 5.25 und 5.26 zeigen die Draufsicht der Verteilung der LL-Berührungsspannungen sowie LL-Schrittspannungen bei einseitiger und beidseitiger Verbindung mit einer Griffweite von $g = 2$ m bzw. Schrittweite s von 2 m.

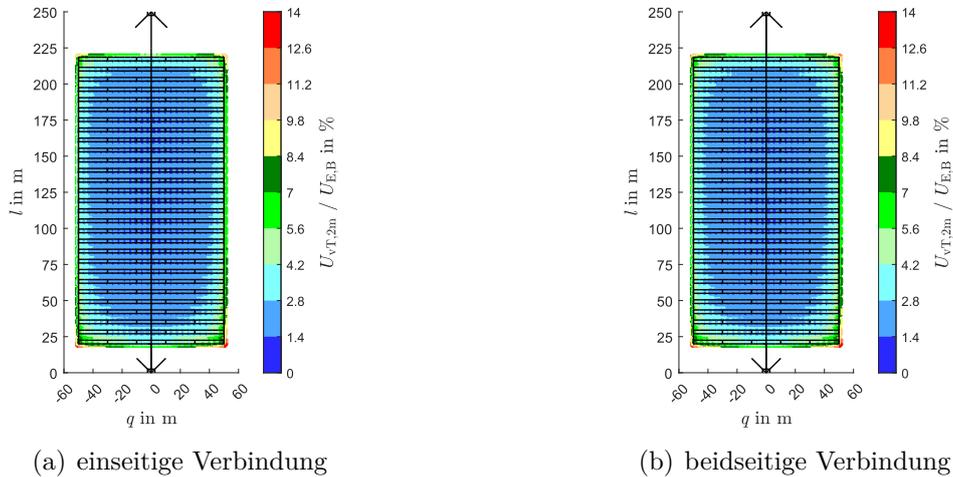


Abbildung 5.25: LL-Berührungsspannungen bei einer Griffweite g von 2 m ($U_{vT,2m}$) bei ein- und beidseitiger Mastverbindung

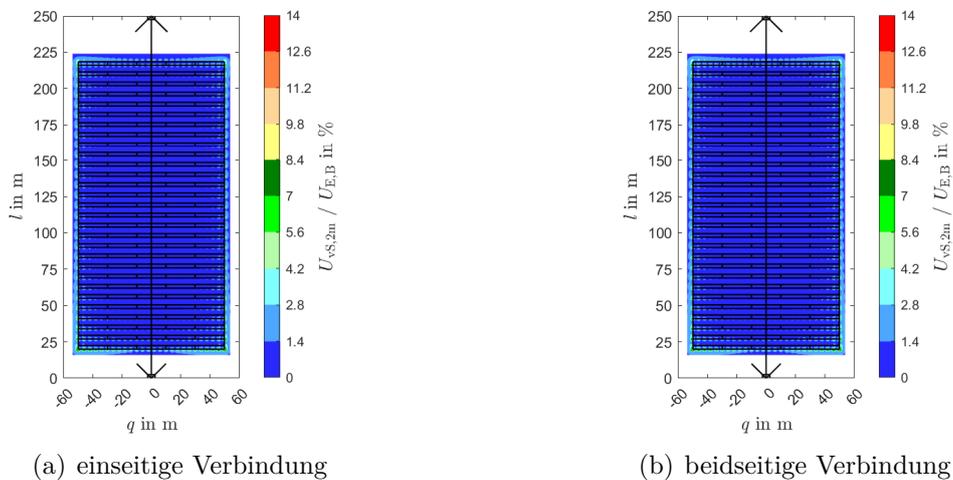


Abbildung 5.26: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 2 m ($U_{vS,2m}$) bei ein- und beidseitiger Mastverbindung

Die vorhin erwähnte Potentialanhebung wirkt sich somit auf die Verteilung der LL-Berührungsspannung (Abbildung 5.25) aus. Vergleicht man diese, so stellt man, an der Seite des benachbarten Masts, eine leichte Erhöhung dieser fest.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

Zusammenfassend lassen sich bei einer beidseitigen Verbindung keine signifikanten Änderungen hinsichtlich LL-Schritt- und Berührungsspannung ableiten. Die Situation wird im Bereich des benachbarten Masts geringfügig verschlechtert. Ebenso könnten sich, durch die nun entstandene leitfähige Verbindung, Kreisströme ausbilden.

5.2.5 Modifizierung des Mast-Erdungssystems

Erklärung des Szenarios

Bei einer Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen (Kapitel 5.2) zeigt sich, dass es zu erhöhten LL-Schritt- und Berührungsspannungen kommt, wenn sich Teile der PV-FFA über dem Erdungssystem des Masts befinden. Des Weiteren kann in diesem Bereich eine unbeabsichtigte Verbindung zwischen PV-FFA und dem Erdungssystem des Masts nicht ausgeschlossen werden.

Um diesen Nachteilen entgegenzuwirken, wird nun das Erdungssystem des Masts entsprechend modifiziert bzw. abgeändert. Untersucht wird somit eine Annäherung der PV-FFA quer zur Leitungsachse (siehe Abbildung 5.27) bei einem modifizierten Erdungssystem des Masts.

Ausgangslage für die Modifikation ist das seitens der NetzOÖ GmbH verwendete Erdungssystem für 110-kV-Masten. Hierbei liegt der Fundamenterder in einer Tiefe von 0,8 m und weist eine Kantenlänge von 5 m auf. Von jeder Ecke entspringt in einem Winkel von 45° ein Strahlenerder mit einer Länge von 10 m (Abbildung 5.28 (a)).

Bei der Modifikation werden nun jene Strahlenerder (blau) welche sich in Annäherungsrichtung der PV-FFA befinden, zu Tiefenerder abgewandt. Es ist somit nicht mehr möglich, dass die PV-FFA über dem Erdungssystem des Masts errichtet werden kann. Ebenso eine unbeabsichtigte Verbindung der Erdungssysteme hiermit ausgeschlossen werden.

Folgend eine Abschätzung für den Erdungswiderstand eines Strahlen- bzw. Bänderders, abhängig von der Erderlänge L und des spezifischen Bodenwiderstands ρ gemäß [14]:

$$R_{E,SE} \approx \frac{1 \dots 1,5 \cdot \rho}{L_E} \quad (5.1)$$

Die Abschätzung für den Erdungswiderstand R_E eines Strahlenerders (SE) ergibt sich aus [14]:

$$R_{E,TE} \approx \frac{2 \dots 3 \cdot \rho}{L_E} \quad (5.2)$$

Es zeigt sich somit eine Halbierung der Erderlänge von Strahlenerder zu Tiefenerder. Die Länge verkürzt sich somit von 10 m (Strahlenerder) auf 5 m (Tiefenerder), bei gleicher Erdungswirkung.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

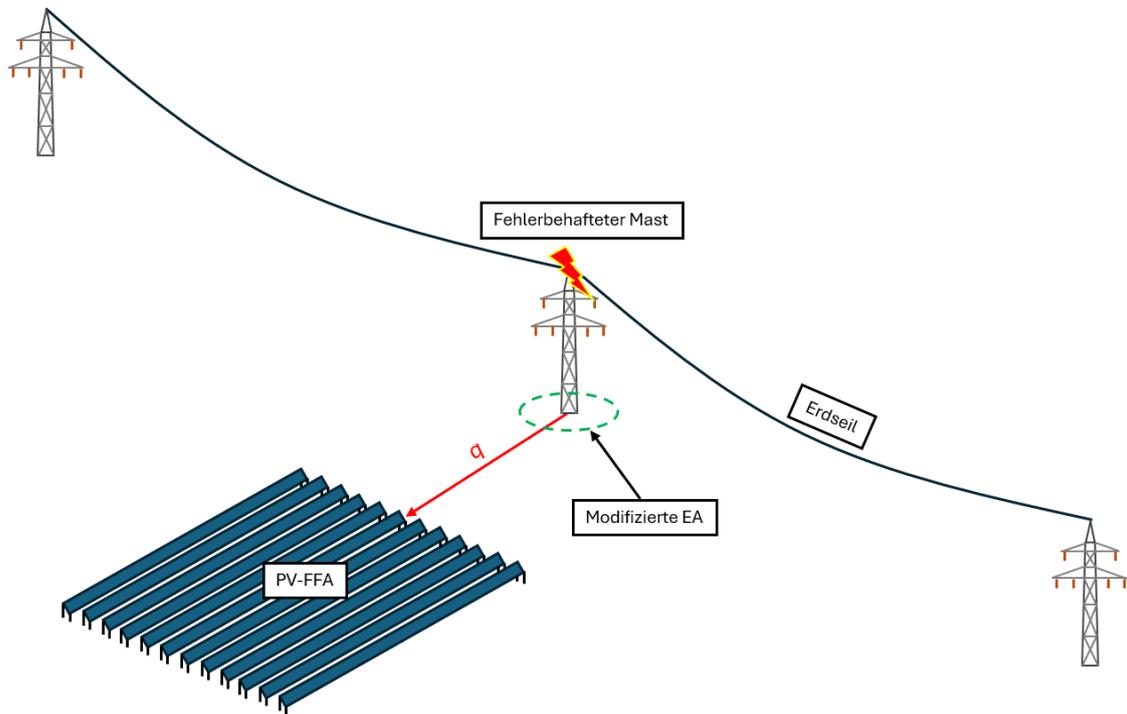


Abbildung 5.27: Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast mit modifiziertem Erdungssystem

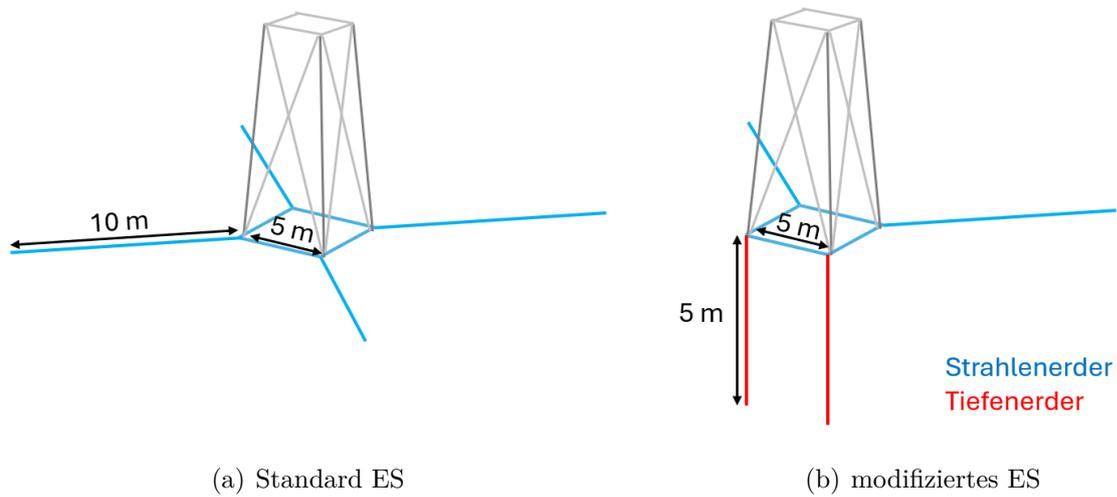
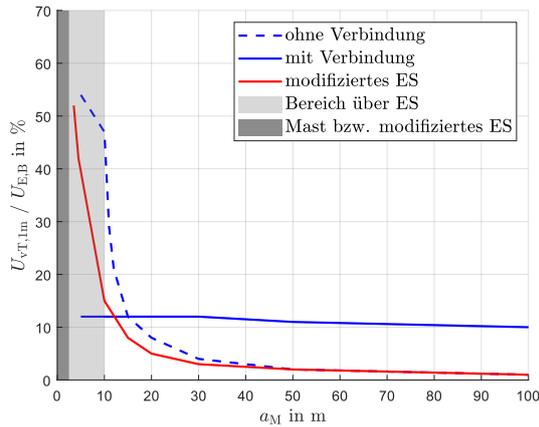


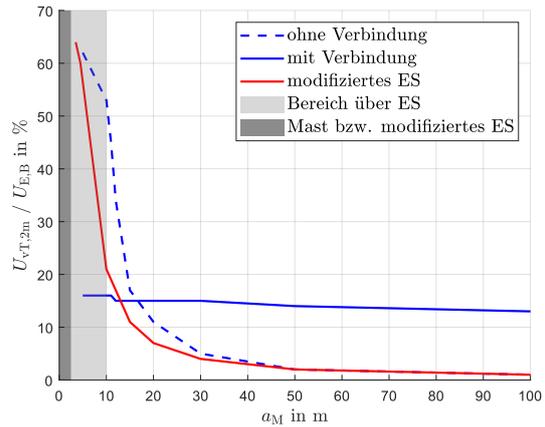
Abbildung 5.28: Erdungssysteme (ES) des Masts

Ergebnisse und Diskussion

In Abbildungen 5.29 und 5.30 sind die Verläufe der LL-Berührungsspannungen bzw. LL-schrittspannungen abhängig vom Abstand a_{EA} bzw. a_M in q- und l-Richtung und der Griffweite g dargestellt.

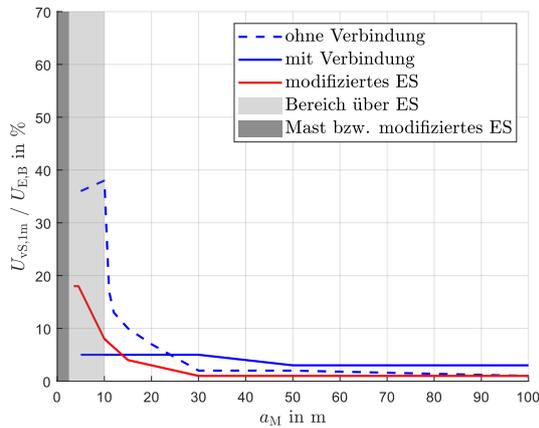


(a) Griffweite $g = 1$ m

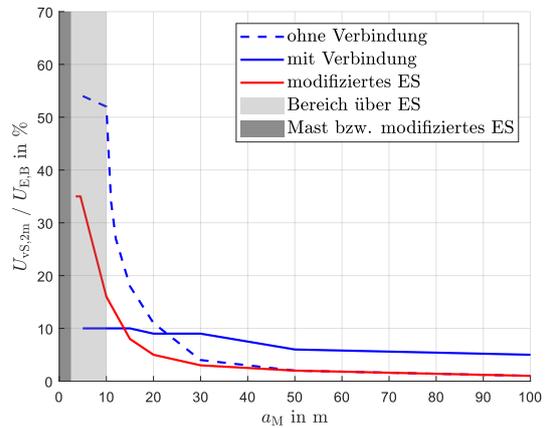


(b) Griffweite $g = 2$ m

Abbildung 5.29: Vergleich von LL-Berührungsspannungen bei Annäherung an Mast in q-Richtung



(a) Schrittweite $s = 1$ m



(b) Schrittweite $s = 2$ m

Abbildung 5.30: Vergleich von LL-Schrittspannungen bei Annäherung an Mast in q-Richtung

Vergleicht man den Verlauf der Schritt- und Berührungsspannungen zwischen dem Ursprungsszenario (ohne Verbindung) und jenem des nun modifizierten Erdungssystems

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

(Abbildungen 5.29, 5.30), so lässt sich eine Reduzierung dieser Werte erkennen. Die Modifizierung der Erdungsanlage wirkt wie eine Verschiebung des Verlaufes „ohne Verbindung“ in Richtung des Masts. Eine weitere Annäherung der PV-FFA an den Mast, bei gleichbleibenden Werten für Schritt- und Berührungsspannungen, ist somit gegeben. Für das modifizierte Erdungssystem zeigt sich, dass der Wert der LL-Berührungsspannung ($g = 1 \text{ m}$) bei einem Abstand von ca. 10 m zum Erdungssystem 10 % beträgt. Vergleicht man dies mit der Maßnahme ohne Verbindung, beträgt der Abstand zum Erdungssystem hierbei ebenfalls ca. 10 m.

Abbildungen 5.31 und 5.32 zeigen die Draufsicht der Verteilung der LL-Berührungsspannungen sowie LL-Schrittspannungen bei einer Griffweite von $g = 1 \text{ m}$ und einem Abstand a_M von 10 m ohne Maßnahmen sowie mit modifizierten Erdungssystem.

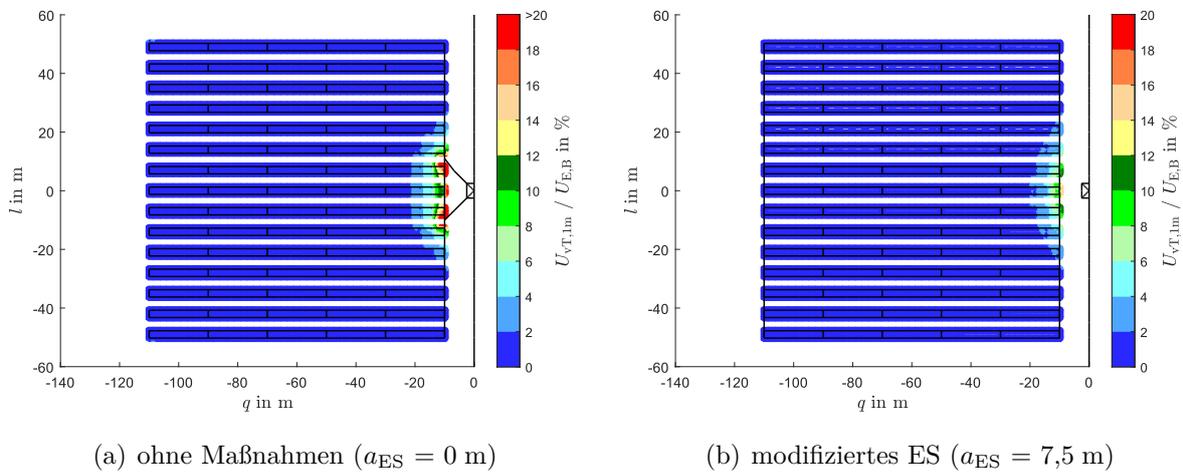


Abbildung 5.31: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite $g = 1 \text{ m}$ ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Mastmittelpunkt von $a_M = 10 \text{ m}$

In Abbildung 5.32 ist der Verlauf der zugehörigen LL- Schrittspannung ersichtlich.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

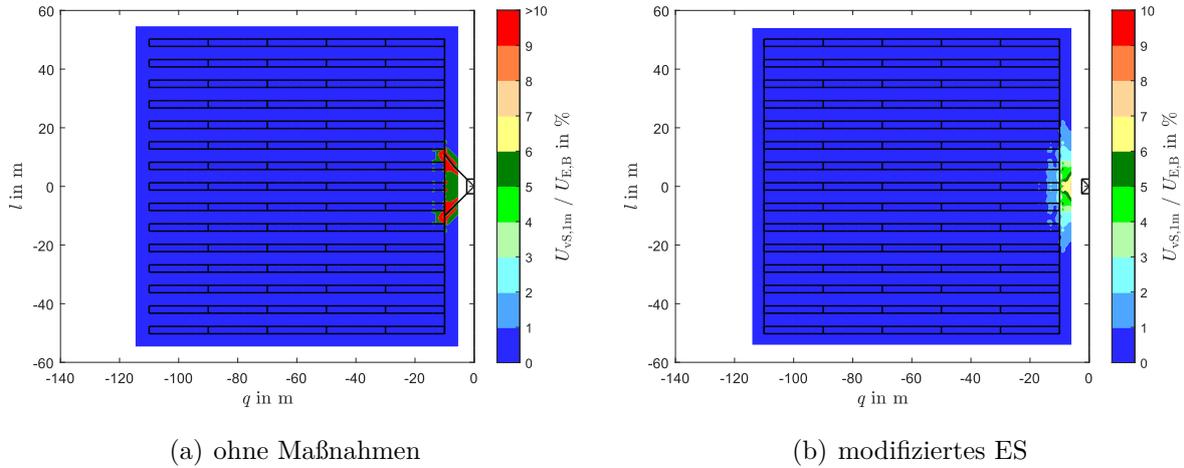


Abbildung 5.32: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 1 m ($U_{vS,1m}$) und einem Abstand zum Mastmittelpunkt von $a_M = 10$ m

Betrachtet man die Verteilungen der LL-Schritt- und Berührungsspannungen, so weisen diese wiederum erhöhte Werte um den fehlerbehafteten Mast auf.

Durch die Abänderung der Erdungsanlage von Strahlenerder zu Tiefenerder schließt nun das Erdungssystem mit dem Mast ab. Der ungünstige Fall, bei dem sich eine Person über dem Erdungssystem des Masts befindet und ein leitfähiges Teil der PV-FFA berühren kann, ist nun nicht mehr möglich. Ebenso kann es durch die Montage der Rammfundamente zu keiner unbeabsichtigten Verbindung zwischen der PV-FFA und dem Erdungssystem des Masts kommen.

5.3 PV-FFA im Bereich eines Umspannwerkes

In diesem Abschnitt werden nun auftretende Berührungsspannungen sowie Schrittspannungen bei der Annäherung einer PV-FFA an ein Umspannwerk anhand unterschiedlicher Szenarios bzw. Maßnahmen, welche in Abbildung 5.36 aufgelistet sind, behandelt.

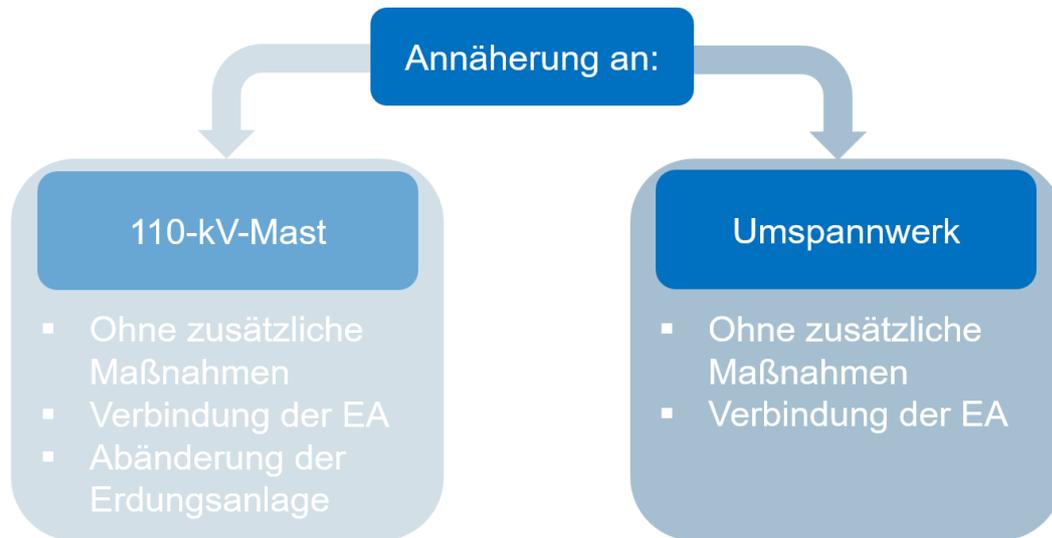


Abbildung 5.33: Überblick Szenarienbetrachtung - Umspannwerk

Das Grundmodell, welches den unbeeinflussten Zustand darlegt, ist in Abbildung 5.35 ersichtlich. Im Gegensatz zum Szenario bei der Annäherung an einen 110-kV-Mast ist es hierbei nicht möglich, dass sich die PV-FFA über dem Erdungssystem des Umspannwerkes befinden kann. Das Erdungssystem des Umspannwerkes schließt mit dem Objekt ab. Relevant sind somit die Abstände von Beginn der PV-FFA zum Erdungssystem. Aufgrund dieser Tatsache wurde der Ursprung des Koordinatensystems nicht vom Mittelpunkt des Umspannwerkes, sondern von einer der äußeren Ecken gewählt (siehe Abbildung 5.35). Jene Richtung zur Längsseite des Umspannwerkes wird mit "l", jene zur Querseite mit "q" gekennzeichnet. Der Fehlerstrom wird in der Mitte des Umspannwerkes, gekennzeichnet mittels eines roten Blitzes, injiziert.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

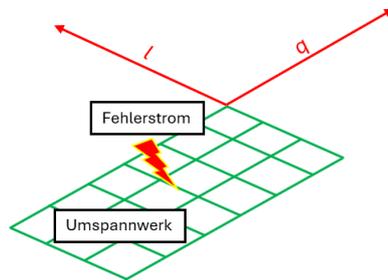


Abbildung 5.34: Veranschaulichung der Ausgangslage für Annäherung an Umspannwerk

5.3.1 Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen

Erklärung des Szenarios

Wie in Abbildung 5.35 ersichtlich, wird hierbei der Einfluss der Annäherung einer PV-FFA ohne zusätzliche Maßnahmen an ein Umspannwerk bei unterschiedlichen Annäherungsrichtungen untersucht. Die Annäherung erfolgt einerseits zur Längsseite des Umspannwerks (Variation in l -Richtung), andererseits zur Querseite des Umspannwerks (Variation in q -Richtung).

Bei der Variation q - Richtung wird die PV-FFA versetzt (bündig mit Oberkante des Umspannwerks) angenähert, um auftretende Effekte durch unterschiedliche Längsausdehnung der PV-FFA näher zu betrachten.

Das hierbei betrachtete Modell der PV-FFA weist einen beidseitigen Potentialausgleich mit einer Querschnittsfläche von 16 mm^2 auf.

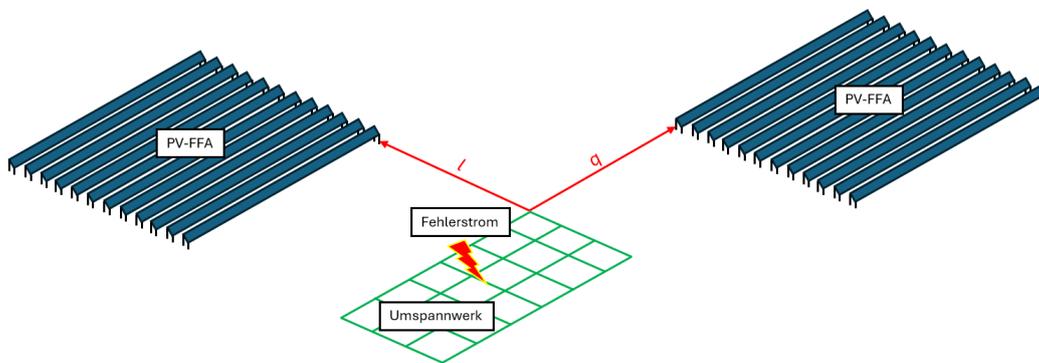


Abbildung 5.35: Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an Umspannwerk in q - und l - Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen

Ergebnisse und Diskussion

In Abbildung 5.36 ist der Verlauf der LL-Berührungsspannungen bzw. LL-Schrittspannungen abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} in q - und l -Richtung und entsprechender Griffweite g dargestellt.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

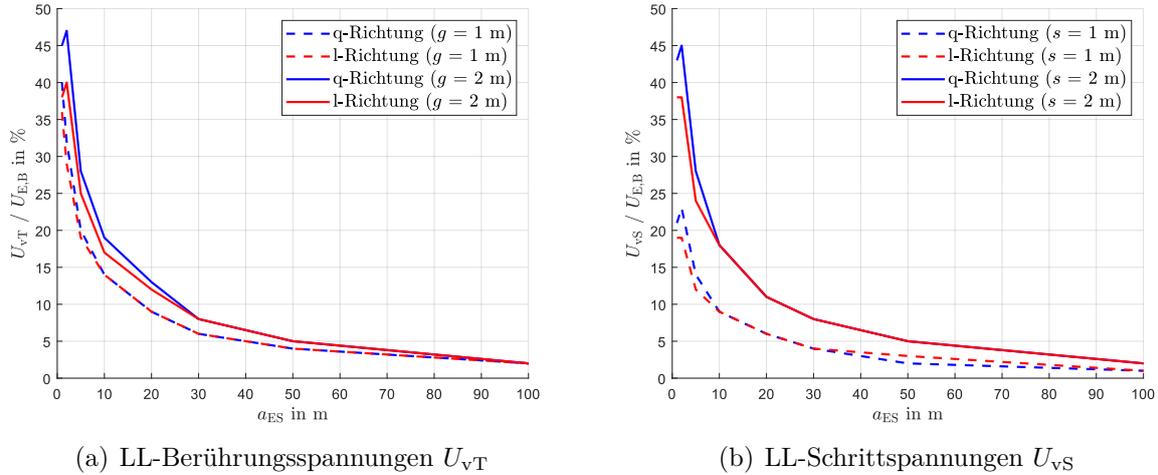


Abbildung 5.36: LL-Berührungsspannung U_{vT} sowie LL-Schrittspannungen U_{vS} bei einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m sowie 2 m abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen

Höchste Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannungen treten grundsätzlich auf, wenn sich die PV-FFA direkt neben dem Umspannwerk befindet ($a_{ES} = 1$ m). Hierbei beträgt der maximale bezogene Wert der LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite von 1 m rund 40 %. Bei weiterer Entfernung sinken die Werte. Ab einem Abstand von 20 m sinken die LL-Berührungsspannungen für eine Griffweite von 1 m unter 10 %, jene für eine Griffweite von 2 m ab 30 m. Für die LL-Schrittspannung trifft diese Aussage ab einem Abstand von ca. 10 m ($s = 1$ m) bzw. ca. 20 m ($s = 2$ m) zu.

Auffällig ist die Differenz zwischen verschiedenen Schrittweiten s im unmittelbaren Nahbereich des Umspannwerks. Da sämtliche Schrittspannungen in einem Bereich von 5 m um die PV-FFA untersucht werden, ist auch jener Fall berücksichtigt, dass sich ein Tier ($s = 2$ m) gleichzeitig auf der PV-FFA und dem Umspannwerk befindet. Bei einem Abstand a_{ES} von 2 m zwischen PV-FFA und Umspannwerk wirkt sich dies am höchsten aus (siehe Spitze in 5.36 (b)).

Die Werte abhängig von der Simulationsrichtung (q- oder l- Richtung) weisen nur geringfügige Unterschiede auf.

Abbildung 5.37 gibt den Unterschied des Verlaufes von LL-Schritt- und Berührungsspannungen zwischen der Annäherung an ein Umspannwerk sowie der bereits in Kapitel 5.2 betrachteten Annäherung an einen Hochspannungsmast wieder.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

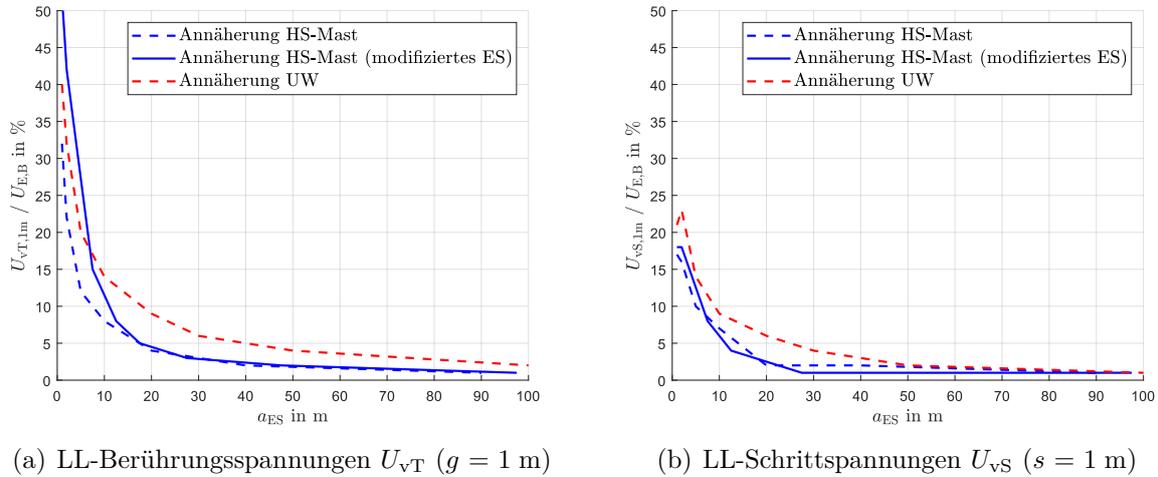


Abbildung 5.37: LL-Berührungsspannung U_{VT} sowie LL-Schrittspannungen U_{VS} bei einer Annäherung an ein UW und einen HS-Mast mit einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} (jeweils die maximalen Werte von q- und l-Richtung)

Es ist ersichtlich, dass der Verlauf der LL-Berührungsspannungen von der Größe und Form des Erdungssystems abhängt. Bei kleineren Erdungssystemen (wie beim modifizierten Mast) fällt das Potential zu Beginn sehr stark ab, hier kann gerade im Nahbereich durch Spannungsverschleppung durch die PV-FFA ein höheres Potential abgegriffen werden. Bei größeren Erdungssystemen wie dem Umspannwerk hingegen fällt das Potential langsamer ab. Dadurch können die Berührungsspannungen zwar im Nahbereich niedriger sein, allerdings wirkt eine Spannungsverschleppung im fernerem Bereich stärker als die von kleinen Erdungssystemen, wo der Potentialverlauf schon sehr flach ist.

Die Abbildungen 5.38 und 5.39 zeigen die Draufsicht der Verteilung der LL-Berührungsspannungen sowie LL-Schrittspannungen bei einer Griffweite von $g = 1$ m und einem Abstand a_{ES} von 10 m jeweils in q- und l- Richtung.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

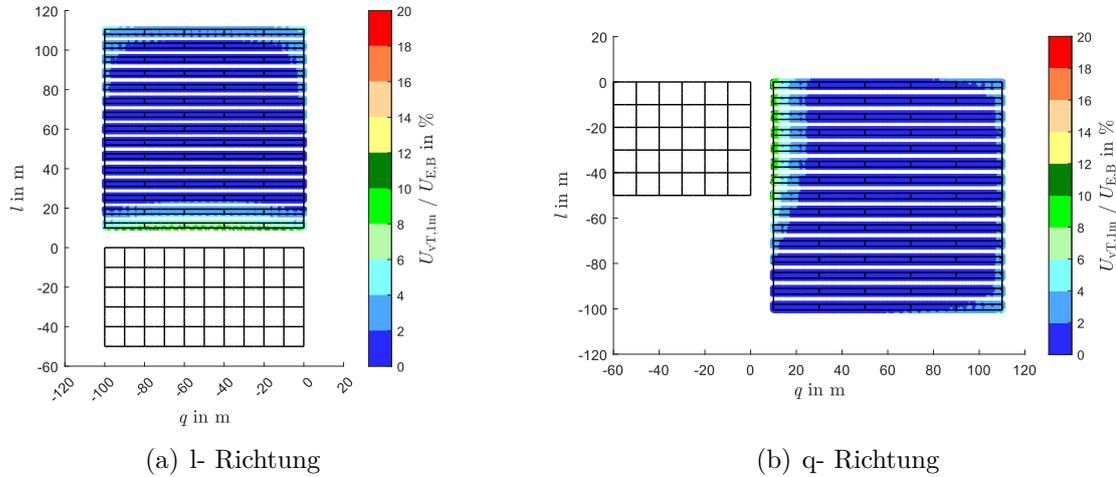


Abbildung 5.38: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite $g = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m

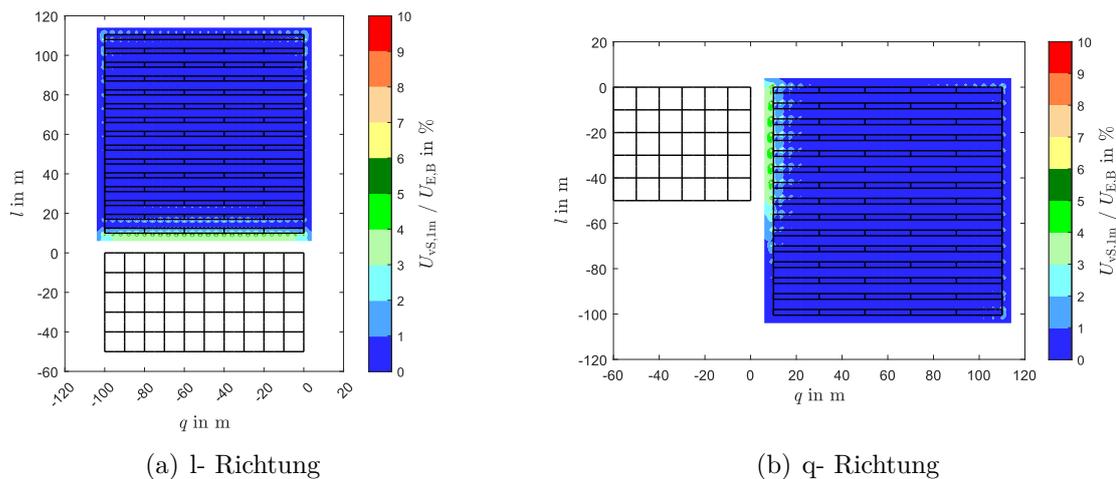


Abbildung 5.39: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite $s = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m

Bei allen Abstandsvariationen zeigt sich, dass die maximalen LL-Schritt- und Berührungsspannungen an der PV-FFA an der Annäherungsseite des Umspannwerks um dessen Umgebung auftreten (Abbildung 5.38, 5.39). Ebenso kommt es auch zu leichten Erhöhungen auf der gegenüberliegenden Seite der PV-FFA. In Bereichen von erhöhten LL-Schritt- und Berührungsspannungen könnten Maßnahmen wie beispielsweise eine Standortisolierung, Potentialsteuerung sowie eine Isolierung der leitfähigen Elemente zur Reduzierung dieser beitragen.

5.3.2 Verbindung der Erdungssysteme

Erklärung des Szenarios

Es wird untersucht, wie sich eine Verbindung der Erdungssysteme von PV-FFA und dem Umspannwerk auf LL-Schritt- und Berührungsspannungen auswirkt.

Die PV-FFA wird somit gemäß Abbildung 5.40 mit dem Erdungssystem des Umspannwerks mittels einem Leiter (40x4 mm Stahlbanderde) verbunden. Aus Gründen der Redundanz wäre eine zweifache Verbindung anzudenken, welche für Erdungsmessung auftrennbar ausgeführt ist. Die Verbindung wird als isoliert angenommen, dies würde auch in der Praxis Anwendung finden, um eine dauerhafte Verbindung (Korrosion, ...) zu gewährleisten. Der Abstand wird hierbei wiederum in q- und l- Richtung entsprechend variiert.

Bei der Verbindung der Erdungssysteme zeigte sich bereits bei der Annäherung an einen 110-kV-Mast die Wichtigkeit des Potentialausgleichsystems. Dies wurde bereits in Kapitel 5.2.3 behandelt. Das hierbei betrachtete Modell der PV-FFA weist einen beidseitigen Potentialausgleich mit einer Querschnittsfläche von 16 mm² auf, erhöhte Schritt- und Berührungsspannungen aufgrund eines nicht ausreichenden Potentialausgleiches sind somit vermieden.

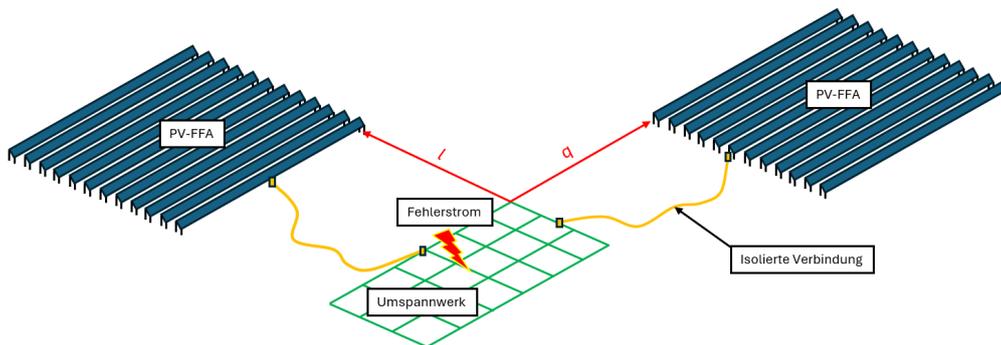


Abbildung 5.40: Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an Umspannwerk in q- und l- Richtung mit isolierter Verbindung

Ergebnisse und Diskussion

Durch die Verbindung von PV-FFA mit dem Erdungssystem des Umspannwerks kommt es durch die Erweiterung des Erdungssystems zu einer Reduzierung der Erdungsspannung. Unabhängig vom Abstand beträgt die Erdungsspannung rund 55-59 % von jener im unbeeinflussten Zustand (siehe Tabelle 7.19 im Anhang).

In Abbildung 5.41 sowie 5.42 ist der Verlauf der LL-Berührungsspannungen bzw. LL-Schrittspannungen abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung und entsprechender Griffweite g ohne sowie mit Verbindung der Erdungssysteme dargestellt.

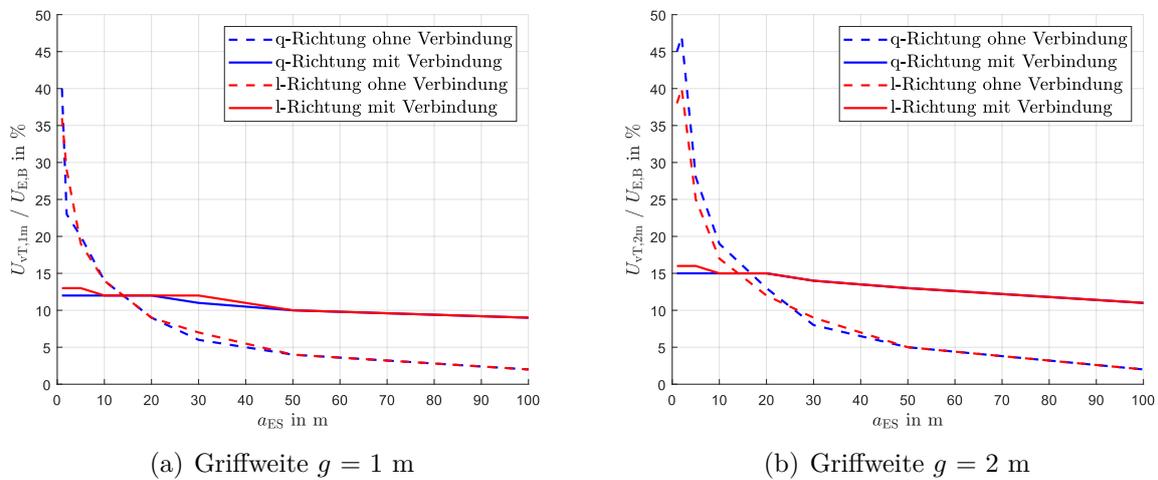
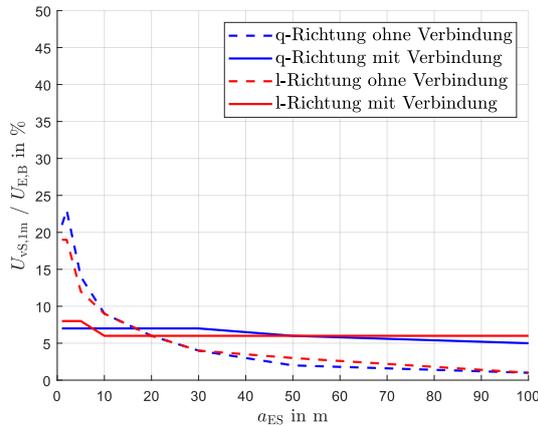
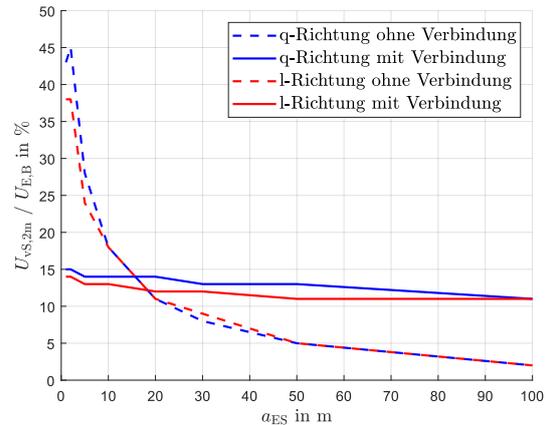


Abbildung 5.41: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung, mit und ohne isolierter Verbindung

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse



(a) Schrittweite $s = 1$ m



(b) Schrittweite $s = 2$ m

Abbildung 5.42: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung, mit und ohne isolierter Verbindung

Gleich wie bei der Verbindung der Erdungssysteme von PV-FFA mit einem 110-kV-Mast (Kapitel 5.2.2) zeigt sich auch hier, dass LL-Schritt- und Berührungsspannungen kaum vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} abhängen. Vergleicht man die Werte bei der Annäherung an ein Umspannwerk mit jenen der Annäherung an einen HS-Mast (siehe Kapitel 5.2.2) zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede. LL-Berührungsspannungen betragen für eine Griffweite von 1 m zwischen 9 % und 13 %. LL-Schrittspannungen zwischen 6 % und 7 % ($s = 1$ m).

Für Abstände kleiner 15 m kommt es durch die Verbindung der Erdungssysteme zu einer Reduzierung der bezogenen LL-Schritt- und Berührungsspannungen. Die maximale Reduzierung ist bei einem Abstand von 1 m und beträgt bei der LL-Berührungsspannung mit einer Reichweite von 1 m ca. 28 %. Über einen Abstand von 15 m kommt es aufgrund der Potentialverschleppung zu einer Verschlechterung der Situation.

Die Abbildungen 5.38 und 5.39 zeigen die Draufsicht der Verteilung der LL-Berührungsspannungen sowie LL-Schrittspannungen bei einer Griffweite von $g = 1$ m und einem Abstand a_{ES} von 10 m jeweils in q- und l- Richtung.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

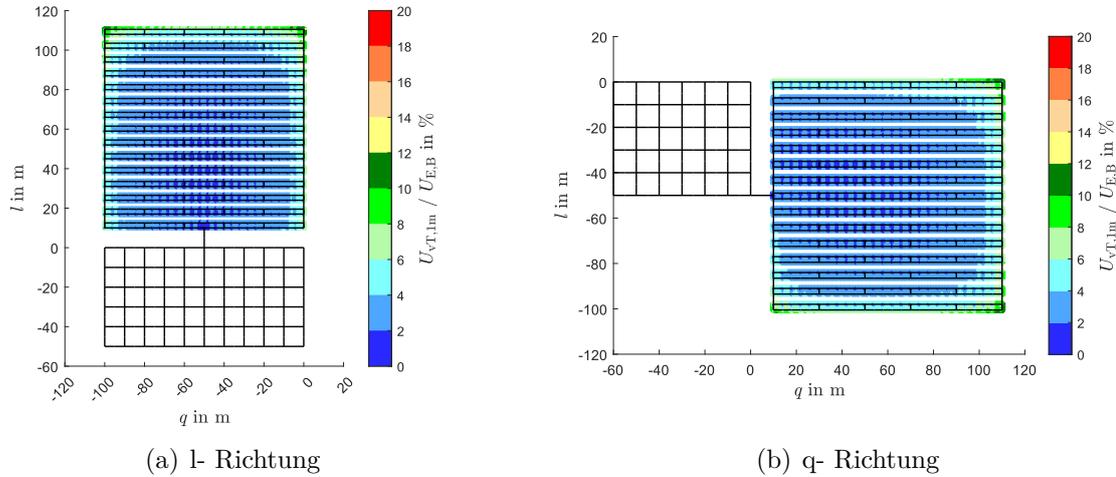


Abbildung 5.43: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite $g = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m

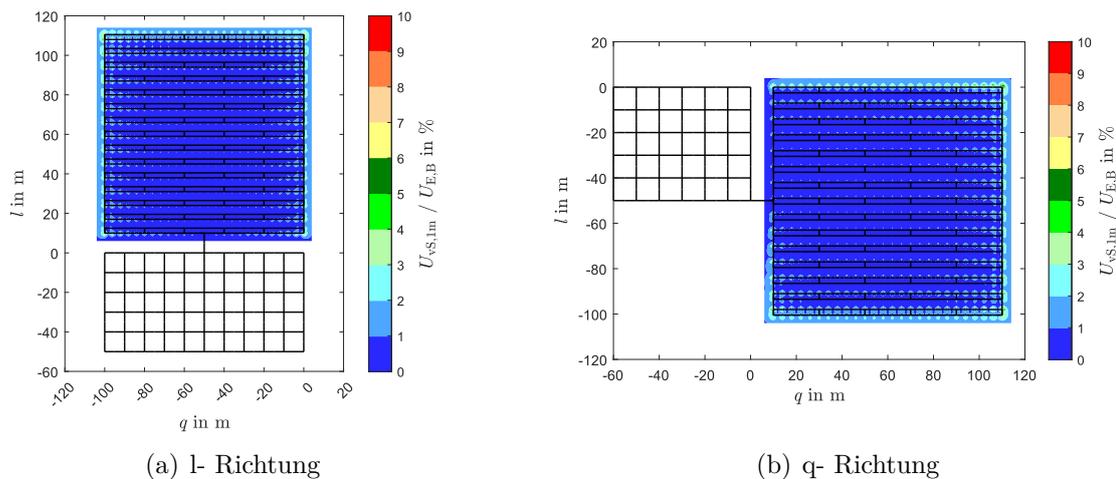


Abbildung 5.44: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite $s = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m

Betrachtet man Abbildung 5.43 sowie 5.44 so erkennt man, dass nun die höchsten LL-Berührungs- sowie Schrittspannungen bei verbundenen Erdungssystemen nicht mehr im Nahbereich des Umspannwerks auftreten, sondern nun im Randgebiet der PV-FFA. Genauer gesagt an jenen Randgebieten, die nicht direkt an das Umspannwerk angrenzen bzw. dessen abgewandt sind. Der höchste Wert liegt hierbei in den Ecken der PV-FFA. Abbildung 5.45) gibt das zugehörige Erdoberflächenpotential φ wieder, hierbei erkennt man, dass die PV-FFA zusammen mit dem verbundenen Umspannwerk ähnlich einer Äquipotentialfläche wirkt.

5 Untersuchungsszenarien und Ergebnisse

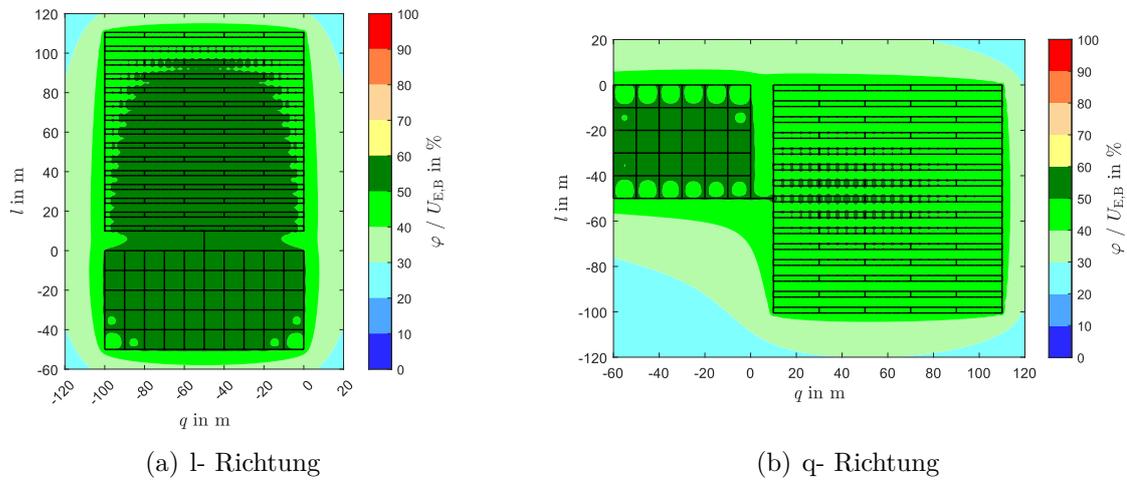


Abbildung 5.45: Erdoberflächenpotential φ bei einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m

Bei der Verbindung der Erdungssysteme sei noch auf die Wichtigkeit eines ausreichenden Potentialausgleiches hinzuweisen, dieses ist in Kapitel 5.2.3 für den Fall der Annäherung an einen Mast näher erläutert.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

6.1 Problemstellung, Ziel

Durch den stetig steigenden Ausbau von PV-FFA kommt es zu einer vermehrten Annäherung an Hochspannungsanlagen, wie Umspannwerke und Hochspannungsmasten. Das Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, welche elektrischen Beeinflussungen im Hinblick auf die Personengefährdung im Erdfehlerfall auftreten, falls sich eine PV-FFA einer Hochspannungsanlage nähert.

Folgende Forschungsfragen standen im Mittelpunkt:

- Wo und in welcher Höhe treten Schritt- und Berührungsspannungen an einer PV-FFA bei einem Fehler in einer nahegelegenen Hochspannungsanlage auf?
- Welche Abstände müssen bei der Annäherung von einer PV-FFA an eine Hochspannungsanlage eingehalten werden, um einen ausreichenden Personenschutz zu gewährleisten?
- Welche Maßnahmen können bei der Annäherung von PV-FFA an Hochspannungsanlagen gesetzt werden und wie wirken sich diese aus?

6.2 Methodik

Anhand unterschiedlicher Szenarien wird die Beeinflussung von PV-FFA durch Hochspannungsanlagen näher untersucht. Einerseits wird die Annäherung einer PV-FFA an einen fehlerbehafteten 110-kV-Freileitungsmast, andererseits an ein fehlerbehaftetes Umspannwerk, betrachtet.

Hierzu werden die auftretende LL-Berührungsspannung U_{vT} sowie die auftretende LL-Schrittspannung U_{vS} bewertet.

Um auch PV-FFA auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (z.B. Tierhaltung) miteinzubeziehen (sogenannte Agri-PV's) werden sämtliche Berührungsspannungen sowie Schrittspannungen neben einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m auch auf 2 m betrachtet.

Die LL-Berührungsspannungen beziehen sich entsprechend der Griffweite g immer auf eine Berührung eines leitfähigen Teiles der PV-FFA. LL-Schrittspannungen werden innerhalb eines Umkreises von 5 m um die PV-FFA ausgewertet.

Für eine universelle Verwendung der Ergebnisse werden sämtliche Berechnungsergebnisse auf die Erdungsspannung der beeinflussenden Anlage im unbeeinflussten Zustand $U_{E,B}$ (sprich gänzlich ohne PV-FFA) bezogen.

6.3 Auswertung von LL-Schritt- und Berührungsspannungen

Mittels eines externen CAD-Programmes werden sämtliche Modelle für 110-kV-Freileitung, Umspannwerk, sowie die PV-FFA erstellt. Die erstellten Modelle werden in XGSLab importiert. XGSLab berechnet das Potential der jeweiligen leitfähigen Element sowie das Erdoberflächenpotential. Aufgrund der Tatsache, dass jedoch keine Berechnung der Schrittspannung mit einer Schrittweite von 2 m (angenommener Abstand bei Tieren) möglich ist, sowie der eingeschränkten grafischen Veranschaulichung (Ausblendung von Bereichen z.B. im Mastinneren), wird die eigentliche Berechnung dieser in MATLAB[®] durchgeführt. Hierbei wird ein Programm entwickelt, welches aus den gegebenen Daten von XGSLab LL-Schritt- und Berührungsspannungen berechnet und dessen Verteilung veranschaulicht.

6.4 Annäherung an 100-kV-Mast

Hierbei werden folgende Annäherungsszenarien betrachtet:

- ohne zusätzliche Maßnahmen
- Verbindung der Erdungssysteme
- Modifizierung der Erdungsanlage

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Bei der Verbindung der Erdungssysteme wird die beidseitige Verbindung sowie unterschiedliche Konfigurationen des Potentialausgleichssystems untersucht.

Für alle Szenarien wird eine Annäherung längs zur Leitungssachse sowie quer zu dieser betrachtet. Ebenso wird der Abstand zwischen PV-FFA und Mast variiert.

Bei der Annäherung einer PV-FFA an einen fehlerbehafteten 110-kV-Mast ohne zusätzliche Maßnahmen zeigt sich, dass hierbei die höchsten Werte von LL-Schritt- und Berührungsspannungen in jenem Szenario auftreten, wo sich die PV-FFA direkt über dem Erdungssystem des Hochspannungsmasts befindet. Als ungünstigster Fall stellt heraus, wenn sich eine Person direkt über dem Erdungssystem des Hochspannungsmasts befindet und ein leitfähiges Teil der PV-FFA berührt. Hierbei können LL-Berührungsspannungen von bis zu 54 % der Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand auftreten. Des Weiteren sei anzumerken, dass es durch die Montage der Rammfundamente zu einer ungewollten Verbindung zwischen der PV-FFA und dem Erdungssystem kommen kann. Bei Abständen außerhalb des Mast-Erdungssystems zeigt sich eine drastische Reduzierung der LL-Schritt- und Berührungsspannungen. Bei einem Abstand von 10 m zum Erdungssystem des Masts fallen die Berührungsspannungen unter einen Wert von 10 %, Schrittspannungen bei einem Abstand von 5 m ($s = 1$ m) bzw. 10 m ($s = 2$ m).

Erhöhte Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannungen liegen in diesem Szenario im Bereich um den fehlerbehafteten Mast.

Die Annäherungsrichtung der PV-FFA an den Mast (q- bzw. l- Richtung) zeigt keinen nennenswerten Einfluss auf LL-Schritt- und Berührungsspannungen.

Eine zusätzliche Maßnahme ist, die PV-FFA mit dem Erdungssystem des Hochspannungsmasts zu verbinden. Hierbei zeigt sich, dass die Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannung nun einen vom Abstand unabhängigen konstanten Wert aufweisen. In diesem betrachteten Szenario beträgt die bezogene LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ca. 12 %. Für Abstände unter 5 m zum Erdungssystem des Masts kommt es bei der Verbindung der Erdungssysteme zu einer drastischen Reduktion der LL-Schritt- und Berührungsspannungen. Darüber hinaus stellt man fest, dass es aufgrund der Potentialverschleppung zu einer Verschlechterung der Situation kommt. Erwähnenswert ist hierbei die Verteilung der LL-Schritt- und Berührungsspannung, diese treten hierbei in den Randbereichen der PV-FFA auf. Die maximalen Werte sind an den Ecken der PV-FFA festzustellen. Bei ausreichendem PA ist die Ausrichtung der Modultische irrelevant.

Im Falle einer erhöhten Längsausdehnung der PV-FFA innerhalb eines Spannungsfeldes, stellt sich die Frage einer beidseitigen Verbindung zwischen PV-FFA und den benachbarten Masten. Durch die beidseitige Verbindung zeigen sich geringfügigen Erhöhungen der LL-Schritt und Berührungsspannungen im Bereich des nun zusätzlich verbundenen Masts, was jedoch nur vernachlässigbare Auswirkungen auf die maximalen LL-Werte hat. Durch

die beidseitige Verbindung können jedoch Kreisströme über die Schleife (Mast - Erdseil - Mast PV-FFA) fließen, dies wird jedoch nicht näher betrachtet.

Eine weitere Maßnahme stellt die Modifizierung der Masterdungsanlage dar, indem statt Strahlenerder Tiefenerder verwendet werden. Der ungünstige Fall, bei dem sich die PV-FFA über dem Erdungssystem des Masts befindet, ist somit nicht mehr gegeben. Durch diese Maßnahme steigt der Abstand zwischen dem Erdungssystem und der PV-FFA, wodurch auch die Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannungen sinken.

6.5 Annäherung an Umspannwerk

Hierbei werden folgende Annäherungsszenarien betrachtet:

- ohne zusätzliche Maßnahmen
- Verbindung der Erdungssysteme

Für alle Szenarien wird hierbei eine Annäherung zur Längsseite eines Umspannwerkes sowie zur Querseite betrachtet. Ebenso wird der Abstand zwischen PV-FFA und Mast variiert.

Bei der Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen zeigt sich wiederum, dass die höchsten Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannungen auftreten, wenn sich die PV-FFA direkt neben dem Umspannwerk befindet. Ab einem Abstand von 30 m zum Umspannwerk sinken alle LL-Berührungsspannungen unter 10 % bezogen auf die Erdungsspannung in unbeeinflussten Zustand. Im Vergleich zur Annäherung an einen HS-Mast zeigt sich hierbei, dass aufgrund der größeren Ausdehnung des Erdungssystems vom Umspannwerk die Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannungen langsamer abnehmen, mit zunehmendem Abstand zur Hochspannungsanlage.

Bei allen Abstandsvariationen beobachten man, dass die maximalen LL-Schritt- und Berührungsspannungen an der PV-FFA an der Annäherungsseite des Umspannwerks um dessen Umgebung auftreten.

Gleich wie bei der Verbindung der Erdungssysteme von PV-FFA mit einem 110-kV- Mast sind die LL-Schritt- und Berührungsspannungen beinahe unabhängig von der Entfernung zwischen dem Erdungssystem und der PV-FFA. LL-Berührungsspannungen betragen für eine Griffweite von 1 m zwischen 9 % und 13 %. LL-Schrittspannungen zwischen 6 % und 7 % ($s = 1$ m). Abstände kleiner 15 m weisen somit eine Reduzierung der Schritt- und Berührungsspannungen um max. 28 % auf. Über dessen Abstand wurde die Situation aufgrund der Potentialverschleppung verschlechtert.

Höchste Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannungen treten nun im Randbereich der PV-FFA auf.

Für Abstände kleiner 15 m führt die Verbindung zwischen dem Erdungssystem und der PV-FFA zu einer Reduktion der auftretenden Berührungsspannungen. Hingegen treten aufgrund der Potentialverschleppungen ab einem Abstand von 15 m höhere Berührungsspannungen bei Verbindung auf als ohne Verbindung auf.

6.6 Schlussfolgerung

Bei den betrachteten Szenarien (Annäherung UW, HS-Mast) und Annahmen zeigen sich bereits bei einer Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen schnell abklingende Werte für LL-Schritt- und Berührungsspannungen bei zunehmendem Abstand zwischen PV-FFA und der beeinflussenden Hochspannungserdungsanlage. Die auf die Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand (sprich ohne PV-FFA) bezogenen LL-Schritt- und Berührungsspannungen weisen bei einer Annäherung an ein Umspannwerk höhere Werte auf, verglichen mit der Annäherung an einen HS-Mast.

Für Abstände zwischen Hochspannungsanlage und PV-FFA größer 10 m (Annäherung Hochspannungsmast) bzw. 20 m (Annäherung Umspannwerk) treten hierbei in der PV-FFA bezogene LL-Berührungsspannungen, bei einer für die Norm relevanten Griffweite von 1 m, unter 10 % der Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand $U_{E,B}$ im Bereich um Hochspannungsanlage auf. Nur für sehr geringe Abstände (unter ca. 5 m) zwischen Hochspannungsanlage und PV-FFA können LL-Berührungsspannungen ($g = 1$ m) bis max. ca. 50 % von $U_{E,B}$ von auftreten. Eine zu treffende Maßnahme stellt somit ein ausreichender Abstand bzw. ein Schutzbereich um die Hochspannungsanlage, indem keine PV-FFA errichtet werden darf, dar. Ebenso können in Bereichen erhöhter LL-Schritt- und Berührungsspannungen Maßnahmen wie Standortisolierung, Potentialsteuerung sowie eine Isolierung der leitfähigen Elemente angedacht werden.

Sämtlich auftretende bezogene LL-Schrittspannungen sind geringer als die entsprechenden bezogenen LL-Berührungsspannungen. Da die Grenzwerte für Schrittspannungen aufgrund des unterschiedlichen Stromwegs deutlich höher sind, besteht somit keine Gefahr für Personen hinsichtlich auftretender Schrittspannungen, wenn die Grenzwerte für Berührungsspannungen eingehalten werden. Bezogene LL-Schritt- und Berührungsspannungen bei Schritt- und Griffweiten von 2 m (Berücksichtigung Agri-PV) unterscheiden sich mit jenen von 1 m um maximal 25 % von $U_{E,B}$. Deren Bewertung mit zulässigen Werten für Tiere ist nicht Gegenstand der gegenwärtigen Arbeit.

Für eine Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen ist für PV-FFA mit erhöhten Längsausdehnungen in Ausbreitungsrichtung des Spannungstrichters nur mit geringfügigen Erhöhungen von LL-Schritt und Berührungsspannungen zu rechnen.

Alle Maßnahmen, die zusätzlich getroffen werden könnten und untersucht wurden, zeigten Wirkung hinsichtlich der Reduktion von Schritt- und Berührungsspannung, jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen bzw. in bestimmten Situationen.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Durch einen entsprechenden Abstand bzw. Schutzbereich um die Hochspannungsanlage, in der keine PV-FFA errichtet werden darf, könnte das Auftreten von unzulässigen Schritt- und Berührungsspannungen im Bereich um die Hochspannungsanlage vermieden werden. Die Maßnahme der Verbindung der Erdungssysteme erweist sich nur als empfehlenswert, wenn die PV-FFA im unmittelbaren Nahbereich der Hochspannungsanlage errichtet wird. Hierbei gilt es, die nun erhöhten Schritt- und Berührungsspannungen im Randbereich der PV-FFA nicht außer Acht zu lassen. Ebenso muss ein ausreichender Potentialausgleich der leitfähigen Teile der PV-FFA gewährleistet werden.

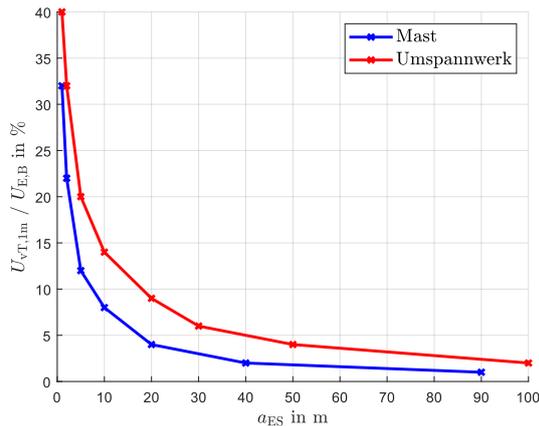
Überlappende nicht verbundene Erdungssysteme, wie es bei einer Annäherung an einen HS-Mast kommen kann, gilt es zu vermeiden. Bei der Annäherung an einen Hochspannungsmast kann durch eine Abänderung der Erdungsanlage eine weitere Annäherung bei gleichbleibenden Werten für Schritt- und Berührungsspannungen ermöglicht werden. Ebenso wird dadurch der ungünstige Fall von überlappenden Erdungssystemen und eine möglich unbeabsichtigte Verbindung derer ausgeschlossen. Eine geeignete Kombination von Schutzabstand und Abänderung der Erdungsanlage kann hierbei in Betracht gezogen werden.

Des Weiteren sei anzumerken, dass alle Ergebnisse auf die Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand bezogen sind. Diese ist jedoch unter anderem stark abhängig vom Erdungssystem sowie des spezifischen Bodenwiderstandes am jeweiligen Standort. Eine genauere Betrachtung, ob die Errichtung der PV-FFA beim jeweiligen Abstand und der gesetzten Maßnahme zulässig ist, muss unter Berücksichtigung der tatsächlichen Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand erfolgen. Diese unbeeinflusste Erdungsspannung ist dem Netzbetreiber grundsätzlich bekannt oder kann durch Messung ermittelt werden.

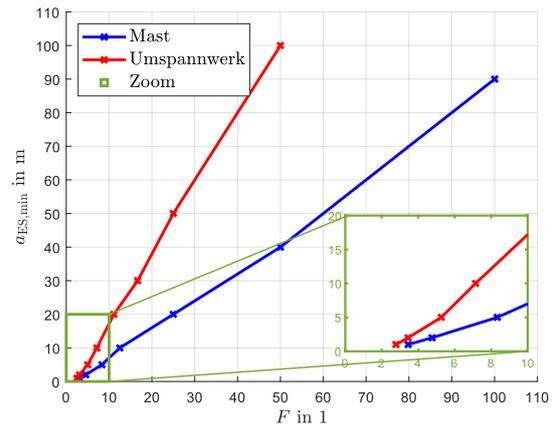
Mithilfe der Simulationsergebnisse der gegenwärtigen Arbeit ist es möglich, unter Berücksichtigung der Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand Aussagen über die Höhe der auftretenden LL-Schritt- und Berührungsspannungen bei bestimmten Szenarios zu treffen. Betrachtet man beispielsweise Abbildung 6.1 so erkennt man, dass hierbei das Verhältnis der LL-Berührungsspannung bezogen auf die Erdungsspannung im unbeeinflussten Zustand $U_{vT}/U_{E,B}$ abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} veranschaulicht ist. Es kann somit mithilfe der bekannten unbeeinflussten Erdungsspannung die auftretende LL-Berührungsspannung bei einem gewissen Abstand a_{ES} rechnerisch ermittelt werden. Die Ergebnisse können jedoch auch anders dargestellt bzw. interpretiert werden. Durch Kehrwertbildung der Werte von den Simulationsergebnissen (siehe Gleichung 6.1) sowie Vertauschung der Achsen entsteht Abbildung 6.1. Hierbei kann nun abhängig vom Verhältnis der unbeeinflussten Erdungsspannung zur entsprechenden zulässigen Berührungsspannung $U_{E,B}/U_{vTp}$ der erforderliche Mindestabstand zwischen PV-FFA und dem Erdungssystem der Hochspannungsanlage ermittelt werden. Ebenso können somit Aussagen getroffen werden, um welches Vielfaches der zulässigen Berührungsspannung U_{vTp} (Faktor F) die unbeeinflusste Erdungsspannung sein kann, um die entsprechend der Ausschaltzeiten vorgegebene zulässige Berührungsspannung U_{vTp} an der PV-FFA einzuhalten.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

$$\frac{U_{vT}}{U_{E,B}} = \frac{1}{F} \quad U_{vT} \xrightarrow{=U_{vTp}} \quad \frac{U_{E,B}}{U_{vTp}} = F \quad (6.1)$$



(a) $U_{vT}/U_{E,B}$ abhängig vom Abstand a_{ES}



(b) $F = U_{E,B}/U_{vTp}$ abhängig vom Mindestabstand $a_{ES,min}$

Abbildung 6.1: Vergleich unterschiedliche Darstellung bei Annäherung an Umspannwerk und HS-Mast (maximale Werte von q- und l-Richtung)

Für einen Faktor $F = 4$ kann davon ausgegangen werden, dass ein Abstand zwischen den Erdungssystemen a_{ES} von 5 m ausreichend ist, sodass die zulässigen Berührungsspannungen eingehalten werden. Bei höheren Faktoren F von z.B. 10 sind für Annäherungen zu einem kleinen Erdungssystem, wie einem Mast 10 m, für ein großes Erdungssystem wie ein Umspannwerk 20 m ausreichend.

Ein notwendiger Abstand zur Hochspannungsanlage kann sich auch aus anderen Aspekten (Instandhaltungsarbeiten, ...) ergeben, daher sind sämtliche Maßnahmen und Abstände jedenfalls mit dem Netzbetreiber abzustimmen.

6.7 Ausblick

In der aktuellen Arbeit wurde ausschließlich die Beeinflussung von PV-FFA im Falle eines Erdschlusses einer nahegelegenen Hochspannungsanlage untersucht. Dies stellt jedoch nur einen Teilaspekt dar und ist für eine gesamtheitliche Beurteilung hinsichtlich der Personengefährdung nicht ausreichend. Andere Szenarien, wie beispielsweise der Einfluss von transienten Stromimpulsen (Blitzeinschläge) stellen ebenfalls eine potenzielle Gefahr dar, diese gilt es weiter näher zu betrachten.

Auch die durch Simulation gewonnenen Ergebnisse könnten durch Messungen an realen PV-FFA verifiziert werden.

Ein weiterer Ansatz wäre die Analyse unterschiedlicher Bodenschichtungen und Bodenwiderstände und wie sich hierbei unterschiedliche Rammtiefen der Fundamente auswirkt.

Des Weiteren stellen sich Fragen nach der minimal benötigten Anzahl von Rammfundamenten, dem notwendigen Vermaschungsgrad der Modultische sowie die Auswirkung flächenmäßig größerer PV-FFA und die Betrachtung der ungünstigsten Fälle (Worst-Case-Betrachtung) hinsichtlich auftretender Schritt- und Berührungsspannungen.

In dieser Arbeit wurde ein Umspannwerk mit einer aufgespannten Fläche des Erdungssystems von 100 m x 50 m gerechnet, die Auswirkung auf unterschiedliche Flächen und deren Vergleich stellt eine weitere Forschungsfrage dar.

Durch die Maßnahme der Verbindung der Erdungssysteme kann es zu Potentialverschleppungen in das Niederspannungsnetz kommen, dessen Ausmaß könnte betrachtet werden.

7 Anhang

7.1 Simulationsergebnisse

7.1.1 PV-FFA im Bereich einer 110-kV-Freileitung

Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen

Tabelle 7.1: Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, \text{PV}}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA einseitig, 4 mm^2)

Abstand a_M in m	Abstand a_{ES} in m	$U_E / U_{\text{E,B}}$ in %		$\varphi_{\max, \text{PV}} / U_{\text{E,B}}$ in %	
		q- Richtung	l- Richtung	q- Richtung	l- Richtung
5	-5	98	98	18	19
10	0	98	98	15	17
11	1	99	99	14	15
12	2	99	99	14	15
15	5	99	99	13	14
20	10	99	99	13	14
30	20	99	99	11	12
50	40	99	99	10	11
100	90	99	99	8	11

7 Anhang

Tabelle 7.2: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA einseitig, 4 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{ES} in m	$U_{vT,1m} / U_{E,B}$ in %		$U_{vT,2m} / U_{E,B}$ in %	
		q-Richtung	l-Richtung	q-Richtung	l-Richtung
5	-5	54	52	62	61
10	0	47	47	53	55
11	1	29	32	45	35
12	2	21	22	34	36
15	5	12	12	17	16
20	10	8	8	11	11
30	20	4	4	5	5
50	40	2	2	2	2
100	90	1	1	1	2

Tabelle 7.3: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Abstand zum Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA einseitig, 4 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{ES} in m	$U_{vS,1m} / U_{E,B}$ in %		$U_{vS,2m} / U_{E,B}$ in %	
		q-Richtung	l-Richtung	q-Richtung	l-Richtung
5	-5	36	35	54	58
10	0	38	33	52	41
11	1	17	17	34	35
12	2	13	16	27	33
15	5	10	10	18	19
20	10	7	7	11	11
30	20	2	2	4	5
50	40	2	1	2	2
100	90	1	1	1	2

Verbindung der Erdungssysteme

Tabelle 7.4: Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, \text{PV}}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{EA} in m	$U_E / U_{E,B}$ in %		$\varphi_{\max, \text{PV}} / U_{E,B}$ in %	
		q- Richtung	l- Richtung	q- Richtung	l- Richtung
5	-5	65	67	60	50
10	0	65	67	60	49
11	1	65	67	60	49
12	2	65	67	60	49
15	5	65	67	60	49
20	10	65	67	60	48
30	20	65	67	60	48
50	40	65	68	60	44
100	90	68	70	48	39

Tabelle 7.5: Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, \text{PV}}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei selbiger PV-Modulanordnung wie in q-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{EA} in m	$U_E / U_{E,B}$ in %	$\varphi_{\max, \text{PV}} / U_{E,B}$ in %
5	-5	65	56
10	0	65	56
11	1	65	56
12	2	65	56
15	5	65	56
20	10	65	56
30	20	65	57
50	40	66	53
100	90	69	49

7 Anhang

Tabelle 7.6: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{EA} in m	$U_{vT,1m} / U_{E,B}$ in %		$U_{vT,2m} / U_{E,B}$ in %	
		q- Richtung	l- Richtung	q- Richtung	l- Richtung
5	-5	12	16	16	20
10	0	12	16	16	20
11	1	12	16	16	20
12	2	12	15	15	19
15	5	12	15	15	19
20	10	12	15	15	19
30	20	12	15	15	19
50	40	11	14	14	17
100	90	10	13	13	16

Tabelle 7.7: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Abstand zum Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{EA} in m	$U_{vS,1m} / U_{E,B}$ in %		$U_{vS,2m} / U_{E,B}$ in %	
		q- Richtung	l- Richtung	q-Richtung	l-Richtung
5	-5	5	10	10	20
10	0	5	10	10	20
11	1	5	10	10	20
12	2	5	10	10	20
15	5	5	10	10	20
20	10	5	9	9	18
30	20	5	9	9	18
50	40	3	8	6	17
100	90	3	8	5	15

7 Anhang

Tabelle 7.8: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei selbiger PV-Modulanordnung wie in q-Richtung und verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{EA} in m	$U_{vT,1m} /$ $U_{E,B}$ in %	$U_{vT,2m} /$ $U_{E,B}$ in %	$U_{vS,1m} /$ $U_{E,B}$ in %	$U_{vS,2m} /$ $U_{E,B}$ in %
5	-5	12	16	5	9
10	0	12	16	5	9
11	1	12	15	5	9
12	2	12	15	5	9
15	5	12	15	5	9
20	10	12	15	5	9
30	20	12	15	5	9
50	40	11	14	4	8
100	90	10	12	4	8

Variation des Potentialausgleichsystems

Tabelle 7.9: Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, \text{PV}}$ abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Anordnung der PV-Tische zur Ausbreitungsrichtung (AR) bei verbundenen Erdungssystemen ($a_M = 20 \text{ m}$)

Anordnung PV-Tische	Anordnung PA	$U_E / U_{E,B}$ in %			$\varphi_{\max, \text{PV}} / U_{E,B}$ in %		
		4 mm ²	16 mm ²	79 mm ²	4 mm ²	16 mm ²	79 mm ²
längs zur AR	einseitig	64	63	62	49	48	47
	zweiseitig	64	62	62	49	48	47
	vermascht	63	63	62	48	48	47
quer zur AR	einseitig	72	66	64	57	51	48
	zweiseitig	68	64	63	54	49	47
	vermascht	66	64	64	52	48	48

Tabelle 7.10: maximal auftretende Spannungsdifferenz zwischen den berührbaren Teilen der PV-FFA $\Delta U_{\max, \text{PV}}$ abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Anordnung der PV-Tische zur Ausbreitungsrichtung (AR) bei verbundenen Erdungssystemen ($a_M = 20 \text{ m}$)

Anordnung PV-Tische	Anordnung PA	$\Delta U_{\max, \text{PV}} / U_{E,B}$ in %		
		4 mm ²	16 mm ²	79 mm ²
längs zur AR	einseitig	7	3	2
	zweiseitig	5	3	2
	vermascht	5	3	2
quer zur AR	einseitig	27	12	5
	zweiseitig	17	7	3
	vermascht	13	5	3

7 Anhang

Tabelle 7.11: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Anordnung der PV-Tische zur Ausbreitungsrichtung (AR) bei verbundenen Erdungssystemen ($a_M = 20$ m)

Anordnung PV-Tische	Anordnung PA	$U_{vT,1m} / U_{E,B}$ in %			$U_{vT,2m} / U_{E,B}$ in %		
		4 mm ²	16 mm ²	79 mm ²	4 mm ²	16 mm ²	79 mm ²
längs zur AR	einseitig	9	10	10	11	12	13
	zweiseitig	9	10	10	11	12	12
	vermascht	9	10	10	12	12	12
quer zur AR	einseitig	15	12	11	18	14	13
	zweiseitig	13	11	10	16	13	13
	vermascht	12	10	10	15	13	13

Tabelle 7.12: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Anordnung der PV-Tische zur Ausbreitungsrichtung (AR) bei verbundenen Erdungssystemen ($a_M = 20$ m)

Anordnung PV-Tische	Anordnung PA	$U_{vS,1m} / U_{E,B}$ in %			$U_{vS,2m} / U_{E,B}$ in %		
		4 mm ²	16 mm ²	79 mm ²	4 mm ²	16 mm ²	79 mm ²
längs zur AR	einseitig	3	4	4	7	8	8
	zweiseitig	4	4	4	7	8	8
	vermascht	4	4	4	7	8	8
quer zur AR	einseitig	9	8	7	18	15	13
	zweiseitig	8	5	6	15	13	12
	vermascht	7	6	6	14	13	12

Modifizierung der Masterdungsanlage

Tabelle 7.13: Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, PV}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei modifiziertem Erdungssystem (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{ES} in m	$U_E / U_{E,B}$ in %	$\varphi_{\max, PV} / U_{E,B}$ in %
3,5	1	99	14
4,5	2	99	14
10	7,5	99	12
15	13,5	99	11
20	18,5	99	11
30	28,5	99	10
50	48,5	99	10
100	98,5	99	8

Tabelle 7.14: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei modifiziertem Erdungssystem (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{ES} in m	$U_{vT,1m} / U_{E,B}$ in %	$U_{vT,2m} / U_{E,B}$ in %
3,5	1	52	64
4,5	2	42	60
10	7,5	15	21
15	13,5	8	11
20	18,5	5	7
30	28,5	3	4
50	48,5	2	2
100	98,5	1	1

7 Anhang

Tabelle 7.15: LL-Schrittspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei modifiziertem Erdungssystem (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_M in m	Abstand a_{ES} in m	$U_{vS,1m} / U_{E,B}$ in %	$U_{vS,2m} / U_{E,B}$ in %
3,5	1	18	35
4,5	2	18	35
10	7,5	8	16
15	13,5	4	8
20	18,5	3	5
30	28,5	1	3
50	48,5	1	2
100	98,5	1	1

7.1.2 PV-FFA im Bereich eines Umspannwerks

Annäherung ohne zusätzliche Maßnahmen

Tabelle 7.16: Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, \text{PV}}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_{ES} in m	$U_E / U_{\text{E,B}}$ in %		$\varphi_{\max, \text{PV}} / U_{\text{E,B}}$ in %	
	q- Richtung	l- Richtung	q- Richtung	l- Richtung
1	92	89	31	39
2	93	91	30	37
5	96	93	28	34
10	97	96	26	31
20	98	97	23	27
30	99	98	20	24
50	99	99	17	20
100	99	100	13	14

Tabelle 7.17: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{\text{vT},1\text{m}}$) sowie 2 m ($U_{\text{vT},2\text{m}}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_{ES} in m	$U_{\text{vT},1\text{m}} / U_{\text{E,B}}$ in %		$U_{\text{vT},2\text{m}} / U_{\text{E,B}}$ in %	
	q-Richtung	l-Richtung	q-Richtung	l-Richtung
1	40	36	45	38
2	32	29	47	40
5	20	19	28	25
10	14	14	19	17
20	9	9	13	12
30	6	6	8	8
50	4	4	5	5
100	2	2	2	2

7 Anhang

Tabelle 7.18: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_{ES} in m	$U_{vS,1m} / U_{E,B}$ in %		$U_{vS,2m} / U_{E,B}$ in %	
	q-Richtung	l-Richtung	q-Richtung	l-Richtung
1	21	19	43	38
2	23	19	45	38
5	14	12	28	24
10	9	9	18	18
20	6	6	11	11
30	4	4	8	9
50	2	3	5	5
100	1	1	2	2

Verbindung der Erdungssysteme

Tabelle 7.19: Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, \text{PV}}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_{ES} in m	$U_E / U_{\text{E,B}}$ in %		$\varphi_{\max, \text{PV}} / U_{\text{E,B}}$ in %	
	q- Richtung	l- Richtung	q- Richtung	l- Richtung
1	55	58	52	58
2	55	58	52	58
5	55	58	52	56
10	55	58	52	56
20	55	58	51	53
30	55	58	49	51
50	56	58	46	48
100	58	59	10	41

Tabelle 7.20: LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{\text{vT},1\text{m}}$) sowie 2 m ($U_{\text{vT},2\text{m}}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_{ES} in m	$U_{\text{vT},1\text{m}} / U_{\text{E,B}}$ in %		$U_{\text{vT},2\text{m}} / U_{\text{E,B}}$ in %	
	q-Richtung	l-Richtung	q-Richtung	l-Richtung
1	12	13	15	16
2	12	13	15	16
5	12	13	15	16
10	12	12	15	15
20	12	12	15	15
30	11	12	14	14
50	10	10	13	13
100	9	9	11	11

7 Anhang

Tabelle 7.21: LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA beidseitig, 16 mm²)

Abstand a_{ES} in m	$U_{vS,1m} / U_{E,B}$ in %		$U_{vS,2m} / U_{E,B}$ in %	
	q-Richtung	l-Richtung	q-Richtung	l-Richtung
1	7	8	14	14
2	7	8	14	14
5	7	8	14	13
10	7	6	14	13
20	7	6	14	12
30	7	6	13	12
50	6	6	13	11
100	5	6	11	11

Abbildungsverzeichnis

1.1	Veranschaulichung der Beeinflussung von PV-FFA durch Hochspannungsanlagen	2
2.1	Flussdiagramm zur Auslegung einer Erdungsanlage hinsichtlich zulässiger Berührungsspannung, Quelle: [5]	7
2.2	Ersatzschaltbild des Berührungsstromkreises, Quelle: [4]	8
2.3	Kennlinie zulässige Berührungsspannung, Quelle: [4]	9
2.4	Kennlinien LL-Berührungsspannung, Quelle: [4]	10
3.1	Veranschaulichung der Auswertung von Berührungs- und Schrittspannung .	13
3.2	Veranschaulichung der Berechnung der LL-Berührungsspannungen	16
3.3	auftretende LL-Berührungsspannungen bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden ($g = 1$ m)	17
3.4	Verifizierung der Berechnung von LL-Schrittspannungen	19
3.5	auftretende LL-Schrittspannungen bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden ($s = 1$ m)	20
3.6	Veranschaulichung der Methodik von bezogenen Größen	22
4.1	Montagegestell einer PV-FFA	25
4.2	Erstellte Autocadmodell der PV-FFA	25
4.3	Modell 110-kV-Mast	26
4.4	Modell 110-kV-Freileitung	27
4.5	Homogene Kettenleiterstruktur einer Freileitung	28
4.6	komplexe Erdungsspannung \underline{U}_E am strominjizierten Mast nach Betrag und Phase abhängig von der Anzahl hinzugefügter Spannfelder n_{SF}	30
4.7	Modell Umspannwerk	33
5.1	Überblick Szenarienbetrachtung	34
5.2	Überblick Szenarienbetrachtung - 110-kV-Mast	36
5.3	Veranschaulichung der Ausgangslage für Annäherung an 110-kV-Mast . . .	37
5.4	Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast in q- und l- Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen	38
5.5	LL-Berührungsspannung U_{vT} sowie LL-Schrittspannungen U_{vS} bei einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m sowie 2 m abhängig vom Abstand zum Mastmittelpunkt a_M in q- und l-Richtung	39
5.6	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite $g = 1$ m ($U_{vT,1m}$)	40
5.7	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 1 m ($U_{vS,1m}$)	40

Abbildungsverzeichnis

5.8	Liniensimulation entlang der q-Richtung bei unterschiedlichen Beeinflussungsszenarien	41
5.9	Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast in q- und l- Richtung mit isolierter Verbindung zwischen PV-FFA und HS-Mast	43
5.10	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand a_M in q- und l- Richtung mit und ohne isolierter Verbindung	44
5.11	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) abhängig vom Abstand a_M in q- und l-Richtung mit und ohne isolierter Verbindung	45
5.12	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand $a_M = 20$ m bzw. $a_{EA} = 10$ m in q-Richtung	46
5.13	LL-Schrittspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand $a_M = 20$ m bzw. $a_{EA} = 10$ m in q-Richtung	46
5.14	Erdoberflächenpotential φ bei einem Abstand $a_M = 20$ m bzw. $a_{EA} = 10$ m in q-Richtung mit und ohne isolierter Verbindung (Verb.)	47
5.15	Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast bei einem Abstand a_M von 20 m bzw. a_{EA} von 10 m mit isolierter Verbindung und größerer Längsausdehnung der PV-FFA bei unterschiedlichen Potentialausgleichsystemen	48
5.16	Veranschaulichung unterschiedlicher Variationen der Anordnung von Potentialausgleichsleiter	49
5.17	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters und der Anordnung der Modultische	50
5.18	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters und der Anordnung der Modultische	50
5.19	maximal auftretende Spannungsdifferenz zwischen den berührbaren Teilen der PV-FFA $\Delta U_{\max,PV}$ abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters und der Anordnung der Modultische	51
5.20	Potentialverteilung der berührbaren Teile der PV-FFA $\varphi_{\text{Elemente}}$ mit einseitigem Potentialausgleichsleiter und einem Querschnitt von $A = 16 \text{ mm}^2$	51
5.21	LL-Berührungsspannungen bei einer Griffweite g von 2 m ($U_{vT,1m}$) mit einseitigem Potentialausgleichsleiter und einem Querschnitt von $A = 16 \text{ mm}^2$	52
5.22	Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast bei einem Abstand a_M von 20 m bzw. a_{EA} von 10 m mit isolierter Verbindung und veränderter Längsausdehnung der PV-FFA bei beidseitiger Mastverbindung	54
5.23	Potentialverteilung der berührbaren Teile der PV-FFA $\varphi_{\text{Elemente}}$ bei ein- und beidseitiger Mastverbindung	56
5.24	Erdoberflächenpotential φ bei ein- und beidseitiger Mastverbindung	56

Abbildungsverzeichnis

5.25	LL-Berührungsspannungen bei einer Griffweite g von 2 m ($U_{vT,2m}$) bei ein- und beidseitiger Mastverbindung	57
5.26	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 2 m ($U_{vS,2m}$) bei ein- und beidseitiger Mastverbindung	57
5.27	Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an 110-kV-Freileitungsmast mit modifizierten Erdungssystem	60
5.28	Erdungssysteme (ES) des Masts	60
5.29	Vergleich von LL-Berührungsspannungen bei Annäherung an Mast in q-Richtung	61
5.30	Vergleich von LL-Schrittspannungen bei Annäherung an Mast in q-Richtung	61
5.31	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite $g = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Mastmittelpunkt von $a_M = 10$ m	62
5.32	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 1 m ($U_{vS,1m}$) und einem Abstand zum Mastmittelpunkt von $a_M = 10$ m	63
5.33	Überblick Szenarienbetrachtung - Umspannwerk	64
5.34	Veranschaulichung der Ausgangslage für Annäherung an Umspannwerk . .	65
5.35	Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an Umspannwerk in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen	66
5.36	LL-Berührungsspannung U_{vT} sowie LL-Schrittspannungen U_{vS} bei einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m sowie 2 m abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen	67
5.37	LL-Berührungsspannung U_{vT} sowie LL-Schrittspannungen U_{vS} bei einer Annäherung an ein UW und einen HS-Mast mit einer Griffweite g bzw. Schrittweite s von 1 m abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} (jeweils die maximalen Werte von q- und l-Richtung)	68
5.38	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite $g = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m	69
5.39	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite $s = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m	69
5.40	Veranschaulichung des Szenarios - Annäherung von PV-FFA an Umspannwerk in q- und l-Richtung mit isolierter Verbindung	70
5.41	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung, mit und ohne isolierter Verbindung	71
5.42	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite s von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) abhängig vom Abstand zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung, mit und ohne isolierter Verbindung	72
5.43	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite $g = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m	73
5.44	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite $s = 1$ m ($U_{vT,1m}$) und einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m	73
5.45	Erdoberflächenpotential φ bei einem Abstand zum Erdungssystem von $a_{ES} = 10$ m	74

Abbildungsverzeichnis

6.1	Vergleich unterschiedliche Darstellung bei Annäherung an Umspannwerk und HS-Mast (maximale Werte von q- und l-Richtung)	81
-----	--	----

Tabellenverzeichnis

3.1	maximaler und minimaler Wert der LL-Berührungsspannung bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden	18
3.2	maximaler und minimaler Wert der LL-Schrittspannung bei unterschiedlichen Berechnungsmethoden	21
4.1	komplexe Erdungsspannung \underline{U}_E am strominjizierten Mast nach Betrag und Phase abhängig von der Anzahl hinzugefügter Spannfelder n_{SF}	31
4.2	Erdungsspannung \underline{U}_E am strominjizierten Mast bei unterschiedlichen Varianten	32
5.1	Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max,PV}$ in % abhängig von der Variante bei veränderter Längsausdehnung und beidseitiger Verbindung der Erdungssysteme	55
5.2	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig von der Variante bei veränderter Längsausdehnung und beidseitiger Verbindung der Erdungssysteme	55
5.3	LL-Schrittspannung bei einer Griffweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) abhängig von der Variante bei veränderter Längsausdehnung und beidseitiger Verbindung der Erdungssysteme	55
7.1	Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max,PV}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA einseitig, 4 mm ²)	83
7.2	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA einseitig, 4 mm ²)	84
7.3	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Abstand zum Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA einseitig, 4 mm ²)	84
7.4	Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max,PV}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm ²)	85

Tabellenverzeichnis

7.5	Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, PV}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei selbiger PV-Modulanordnung wie in q-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm ²)	85
7.6	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm ²)	86
7.7	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Abstand zum Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm ²)	86
7.8	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei selbiger PV-Modulanordnung wie in q-Richtung und verbundenen Erdungssystemen (PA einseitig, 4 mm ²)	87
7.9	Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, PV}$ abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Anordnung der PV-Tische zur Ausbreitungsrichtung (AR) bei verbundenen Erdungssystemen ($a_M = 20$ m)	88
7.10	maximal auftretende Spannungsdifferenz zwischen den berührbaren Teilen der PV-FFA $\Delta U_{\max, PV}$ abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Anordnung der PV-Tische zur Ausbreitungsrichtung (AR) bei verbundenen Erdungssystemen ($a_M = 20$ m)	88
7.11	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Anordnung der PV-Tische zur Ausbreitungsrichtung (AR) bei verbundenen Erdungssystemen ($a_M = 20$ m)	89
7.12	LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Querschnitt und der Anordnung des Potentialausgleichsleiters sowie der Anordnung der PV-Tische zur Ausbreitungsrichtung (AR) bei verbundenen Erdungssystemen ($a_M = 20$ m)	89
7.13	Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{\max, PV}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei modifiziertem Erdungssystem (PA beidseitig, 16 mm ²)	90
7.14	LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei modifiziertem Erdungssystem (PA beidseitig, 16 mm ²)	90

Tabellenverzeichnis

7.15 LL-Schrittspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Mastmittelpunkt a_M bzw. zum Erdungssystem a_{EA} bei modifiziertem Erdungssystem (PA beidseitig, 16 mm ²)	91
7.16 Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{max,PV}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA beidseitig, 16 mm ²) . . .	92
7.17 LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA beidseitig, 16 mm ²)	92
7.18 LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung ohne zusätzliche Maßnahmen (PA beidseitig, 16 mm ²)	93
7.19 Erdungsspannung an der Fehlerstelle U_E , max. Potential an PV-FFA $\varphi_{max,PV}$ abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA beidseitig, 16 mm ²)	94
7.20 LL-Berührungsspannung bei einer Griffweite g von 1 m ($U_{vT,1m}$) sowie 2 m ($U_{vT,2m}$) abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA beidseitig, 16 mm ²)	94
7.21 LL-Schrittspannung bei einer Schrittweite von 1 m ($U_{vS,1m}$) sowie 2 m ($U_{vS,2m}$) innerhalb der PV-FFA abhängig vom Abstand zwischen PV-FFA und Erdungssystem a_{ES} in q- und l-Richtung bei verbundenen Erdungssystemen (PA beidseitig, 16 mm ²)	95

Literatur

- [1] Ö. V. für Elektrotechnik, *OVE E 8101 - Elektrische Niederspannungsanlagen*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2019-01-01.
- [2] Ö. V. für Elektrotechnik, *OVE-Richtlinie R 11-1 - Zusätzliche Sicherheitsanforderungen*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2022-05-01.
- [3] Ö. V. für Elektrotechnik, *OVE-Richtlinie R 6-2-2 - Blitz- und Überspannungsschutz Teil 2-2*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2022-05-01.
- [4] Ö. V. für Elektrotechnik, *ÖVE/ÖNORM EN 50522 - Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2011-12-01.
- [5] Ö. V. für Elektrotechnik, *OVE EN 50341-1 - Freileitungen über AC 1 kV Teil 1: Allgemeine Anforderungen – Gemeinsame Festlegungen*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2020-04-01.
- [6] Ö. V. für Elektrotechnik, *OVE EN 50341-2-1 - Freileitungen über AC 1 kV Teil 2-1: Nationale Normative Festlegungen (NNA) für ÖSTERREICH basierend auf EN 50341-1:2012*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2020-08-01.
- [7] S. Srl. „XGSLab.“ (10. Aug. 2021), Adresse: <http://www.xgslab.com/general/xgslab/xgslab#modules> (besucht am 10.08.2021).
- [8] A. P. D.-I. D. K. Friedl, *Vorstudie - Elektrische Beeinflussung von PV-Großanlagen im Bereich von Hochspannungsanlagen*. TU Graz Institut für Elektrische Anlagen und Netze, 2023-10-01.
- [9] Ö. V. für Elektrotechnik, *ÖVE-B1/1976 - Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV*. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 1976-12-01.
- [10] B. D. und Wirtschaftsstandort, *Leitfaden elektrotechnische Sicherheitsanforderungen für PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA)*. BMDW, 2018-06-09.
- [11] B. R. O. Dietrich Oeding, *Elektrische Kraftwerke und Netze, 8. Auflage*. Springer-Verlag GmbH Deuschlang, 2011.
- [12] B. Andreas Paratscher, *Bestimmung und Verifikation der Erdungsimpedanz von Mittelspannungsstationen*. Institut für Elektrische Anlagen und Netze (TU Graz), 2021.
- [13] P. R. Schürhuber, *Vorlesung über Elektrische Energiesysteme 1*. TU Graz Institut für Elektrische Anlagen und Netze, 2024-03-25.

Literatur

- [14] W. Koch, *Erdungen in Wechselstromanlagen über 1kV*. Springer-Verlag Berlin / Göttingen / Heidelberg, 1955.