



Kevin Wolfgang Grilz, BSc

**Geräuschemissionen
von
AC/DC-Hybridfreileitungen**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler

Dipl.-Ing. Oliver Pischler

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Die aktuelle, europaweite Wende im Energieerzeugungssektor verlangt auch eine Umstrukturierung im Bereich der Energieübertragung. Eine effektive und relativ kostengünstige Möglichkeit für ein Upgrade des Energieübertragungsnetzes bietet die Umrüstung von bestehenden AC-Freileitungen auf eine AC/DC-Hybridfreileitung. Bei deren Betrieb treten noch unzureichend beforschte Effekte bezüglich des, für Genehmigungsverfahren essentiellen, Geräuschemissionsverhaltens auf, welche im Zuge dieser Masterarbeit untersucht wurden. Dabei stellte sich die Fragen, inwieweit diese Effekte dieses Geräuschemissionsverhalten beeinflussen und welche Unterschiede diesbezüglich bei diversen Witterungseinflüssen und Oberflächeneigenschaften von Leiterseilen auftreten. In diesem Zusammenhang wird detailliert auf die Beeinflussung der jeweiligen elektrischen Randfeldstärken aufgrund von wechselseitigen Kopplungsmechanismen eingegangen. Hierzu werden Feldsimulationen einer Mastkonfiguration mit Hilfe des, an der TU Graz entwickelten, Simulationsprogrammes *OHL AN Analyzer* durchgeführt.

Außerdem wurde in der vorliegenden Arbeit die, nach aktuellem Stand der Wissenschaft, gültigen Theorien zur Entstehung von Geräuschemissionen von AC- und DC-Freileitungen unter besonderer Berücksichtigung unterschiedlicher Umweltbedingungen vorgestellt. Dabei wird auch spezielles Augenmerk auf die dazugehörigen Prognoseformeln gelegt, wonach schließlich die Gleichungen nach EPRI bzw. BPA angewendet und die Geräuschemissionen einer beispielhaften Hybridfreileitung berechnet werden.

Zur Untersuchung des Geräuschemissionsverhaltens von Leiterseilen unter Hybridbedingungen, unterschiedlichen Umwelteinflüssen und unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit wurden zwei Messreihen durchgeführt. Als Vorversuche wurden die Emissionen von 1 m langen Leiterseilmustern im Extremklimalabor untersucht. In den diesbezüglichen Ergebnissen zeigten sich bereits ähnliche Tendenzen, wie in jenen aus der zweiten Messreihe im Nikola-Tesla-Labor. Dort wurden unter realitätsnahen Bedingungen ähnliche Versuche an zwei 10 m langen 4er-Leiterseilbündeln mit unterschiedlich hydrophilen Oberflächen durchgeführt. Während dieser Versuche wurde besonderes Augenmerk auf die, unter Hybridbedingungen auftretende, tonale 50-Hz-Schallemission gelegt, wobei eine deutliche Abhängigkeit von der Höhe des eingekoppelten Feldes nachgewiesen werden konnte.

Schlüsselwörter: Geräuschemission, Hybridfreileitung, AC, DC, Geräuschemissionsprognose, tonale Komponenten, 50-Hz-Schallemission

Abstract

The current, European turnaround in the energy generation sector also requires a restructuring in the field of energy transmission. The conversion of existing AC overhead lines to an AC/DC hybrid overhead line offers an effective and relatively inexpensive option for upgrading the energy transmission network. During their operation, insufficiently researched effects regarding the noise emission behavior, which is essential for the approval process, occur, which were examined in the course of this master thesis. The question arose as to what extent these effects influence this noise emission behavior and what differences arise in this regard with various weather influences and surface properties of conductor cables. In this context, the influencing of the respective electrical boundary field strengths due to mutual coupling mechanisms is discussed in detail. For this purpose, field simulations of a tower configuration are carried out with the help of the simulation program OHL AN Analyzer developed at TU Graz.

In the present work the theories that are valid according to the current state of science regarding the generation of noise emissions from AC and DC overhead lines, with special consideration of different environmental conditions, were presented. Special attention is also paid to the associated forecast formulas, after which the equations according to EPRI or BPA are finally applied and the noise emissions of an exemplary hybrid overhead line are calculated.

Two series of measurements were carried out to investigate the noise emission behavior of conductor cables under hybrid conditions, different environmental influences and different surface properties. The emissions of 1 m long conductor rope samples were examined in the extreme climate laboratory as preliminary tests. There were already tendencies towards the results from the second series of measurements in the Nikola Tesla laboratory. Similar tests were carried out under realistic conditions on two 10 m long 4-wire bundles with different hydrophilic surfaces. During these tests, particular attention was paid to the tonal 50 Hz sound emission that occurs under hybrid conditions, with a clear dependency on the height of the coupled field being demonstrated.

Keywords: audible noise, hybrid overhead line, AC, DC, audible noise prediction, tonal components, 50-Hz-sound power level

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	3
3	Entstehung von Geräuschemissionen	5
3.1	Koronaentladungen.....	5
3.2	Tropfenbildung.....	6
3.3	Geräusche bei DC	6
3.3.1	Geräuschspezifische Besonderheiten einer DC-Freileitung	6
3.3.2	Polaritätseffekt.....	7
3.4	Geräusche bei AC.....	10
3.4.1	Koronageräusche	10
3.4.2	Tonale Schallemissionen.....	10
4	Prognose von Geräuschemissionen	13
4.1	Überblick.....	13
4.2	Prognose nach EPRI (Electric Power Research Institute)	15
4.2.1	EPRI – AC.....	15
4.2.2	EPRI - DC.....	17
4.3	Prognosen nach BPA (Bonneville Power Administration).....	17
4.3.1	BPA – AC.....	17
4.3.2	BPA – DC.....	18
5	Reduktion der Geräuschemissionen	20
5.1	Allgemeines	20
5.2	Seil- und Bündelgeometrie.....	20
5.3	Leiteseiloberfläche.....	22
6	Felder bei Hybridleitungen	24
6.1	Allgemeines	24
6.2	Kapazitive Kopplung (Elektrostatistische Induktion).....	26
6.3	Induktive Kopplung	26
6.4	Ohmsche Kopplung (Ionenstromkopplung)	27
6.5	Simulation und Berechnung	28
7	Geräuschemissionen bei Hybridfreileitungen	31
7.1	Besonderheiten aufgrund der wechselseitigen Kopplung	31
7.1.1	Einfluss des DC-Offsets auf das AC-System	31
7.1.2	Einfluss des AC-Rippels auf das DC-System.....	32
7.2	Geräuschemissionsprognose für Hybridfreileitungen	33
7.2.1	Grundlagen.....	33
7.2.2	Berechnungsbeispiel: AC-System einer Hybridfreileitung	33
7.2.3	Berechnungsbeispiel: DC-System einer Hybridfreileitung	35
7.2.4	Vergleich der Ergebnisse.....	36
7.2.5	Beeinflussung der reduzierenden Effekte durch hydrophile Oberflächen ..	38
8	Ziele der Laborversuche	39
8.1	Fragestellungen	39
8.2	Vorgehensweise	39
8.3	Erzeugung des AC/DC-Mischfeldes nach DIN EN 60060-1	40
8.4	Nachbildung des natürlichen Regens.....	41
8.5	Durchgeführte Messungen.....	41
8.5.1	Geräuschmessung in Anlehnung an ISO 3744	41
8.5.2	Teilentladungsmessung nach IEC 60270	42

9	Aufbauten zu den Laborversuchen	44
9.1	Labor 1: Extremklimalabor	44
9.1.1	Allgemeiner Aufbau	44
9.1.2	DC-Hochspannungshalle	45
9.1.3	Extremklimalabor	47
9.2	Labor 2: Nikola-Tesla-Labor	49
10	Messmethodik	54
10.1	Übersicht	54
10.1.1	Labor 1: Extremklimalabor	54
10.1.2	Labor 2: Nikola-Tesla-Labor	55
10.1.3	Flussdiagramm	57
10.2	Messablauf	59
10.2.1	Methodik der Geräusch- und Teilentladungsmessungen	59
10.2.2	Prüfung auf TE-Freiheit und Konditionierung	60
10.2.3	Messung der Hintergrundgeräusche	61
10.2.4	Spannungsfahrten	62
10.2.5	Abtrocknungen	62
11	Auswertung	63
11.1	Auswertung der Geräuschmessungen	63
11.1.1	Eliminierung von Störgeräuschen	63
11.1.2	Flussdiagramm zur Berechnung des Schalleistungspegels gemäß ISO 3744	64
11.1.3	Berechnung des Schalleistungspegels anhand von ISO 3744	65
11.2	Auswertung der TE-Aufzeichnungen	67
12	Ergebnisse und Diskussion	69
12.1	Auswertemethodik	69
12.2	Beeinflussung des AC-Systems durch den DC-Offset	70
12.2.1	A-gewichteter Schalleistungspegel L_{wA}	70
12.2.2	50-Hz-Schalleistungspegel L_{w50Hz}	72
12.2.3	100-Hz-Schalleistungspegel L_{w100Hz}	74
12.2.4	Mittlere Teilentladungsamplitude Q_{avg}	76
12.2.5	Beeinflussung des Abtrocknungsverhaltens durch den DC-Offset	77
12.3	Beeinflussung des DC-Systems durch den AC-Rippel	78
12.3.1	A-gewichteter Schalleistungspegel L_{wA}	78
12.3.2	50-Hz-Schalleistungspegel L_{w50Hz}	80
12.3.3	100-Hz-Schalleistungspegel L_{w100Hz}	82
12.3.4	Mittlere Teilentladungsamplitude Q_{avg}	84
12.3.5	Beeinflussung des Abtrocknungsverhaltens durch den AC-Rippel	85
13	Ausblick	87
14	Zusammenfassung	89
	Literaturverzeichnis	94
	Anhang	100

1 Einleitung

Die Abkehr von fossilen Energieträgern und der dadurch entstehende vermehrte Einsatz erneuerbarer Energiequellen führt zu einer erheblichen Veränderung des europäischen Energiemarktes. Viele der sogenannten „Erneuerbaren“, wie beispielsweise Offshore-Windparks oder große Photovoltaikanlagen, sind dargebotsabhängig und dezentral errichtet, was zu hohen Leistungsschwankungen und großen Distanzen zwischen Erzeuger und Verbraucher führen kann. Als Beispiel hierfür dient die aktuelle Situation in Deutschland, wo die durch große Offshore-Windparks im Norden erzeugte elektrische Energie in das Zentrum oder in den Süden des Landes transportiert werden muss. Um den sicheren und wirtschaftlichen Transport der elektrischen Energie gewährleisten zu können, ist es notwendig das aktuell bestehende Energieübertragungsnetz zu erneuern und auszubauen.

Obwohl diese sogenannte Energiewende nicht nur in Fachkreisen, sondern auch in der Bevölkerung weitestgehend Gehör und Akzeptanz gefunden hat, führt der bevorstehende Bau von zusätzlichen Leitungstrassen immer wieder zu zahlreichen Konflikten mit Grundeigentümern und Anrainern. Diese Konfliktbewältigung nimmt mittlerweile ein Vielfaches der Zeit des eigentlichen Leitungsbaus in Anspruch, was natürlich zu großen Verzögerungen und damit verbundenen höheren Kosten führt. Weltweit versuchen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) die Akzeptanz in der Bevölkerung zu steigern, indem sie neue Ansätze wie beispielsweise eine frühzeitige Einbindung und offene Kommunikation oder den Bau von optisch ansprechenden Mastkonfigurationen testen [1].

Eine Möglichkeit der Akzeptanzsteigerung stellt die Erhöhung der Übertragungskapazität durch den Ausbau (Upgrading) bestehender Leitungstrassen dar. Hierfür wird bereits nach innovativen Lösungen, wie supraleitende Kabel oder synthetisch erzeugte chemische Energieträger, geforscht. Ein bis dato wenig beachtetes Konzept ist die AC/DC-Hybridfreileitung. Hierbei wird ein dreiphasiges System einer bereits bestehenden mehrsystemigen AC-Hochspannungsfreileitung mit Gleichspannung betrieben. Dadurch können die Übertragungsverluste bei großen Entfernungen verringert und die Übertragungskapazität um mindestens 30 % bis 50 % erhöht werden [1]. Ein ca. 340 km langes derartiges Projekt wird zur Zeit in Deutschland unter dem Namen „Ultranet“ von den ÜNB Amprion und TransnetBW geplant und soll die dortige Übertragungskapazität auf 2 GW erhöhen [2].

Ein wesentlicher Teil eines solchen Vorhabens ist die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Im zugehörigen UVP-Gesetz ist festgelegt, dass der Projektwerber der Behörde eine Beschreibung des Vorhabens und dessen Auswirkungen auf die Umwelt vorlegen muss [3]. Darunter fallen auch die in dieser Masterarbeit behandelten Geräuschemissionen. Aufgrund dieser sehr

zeitintensiven und kostspieligen UVP und um potentiellen Konflikten mit der Bevölkerung entgegenzuwirken, sind die ÜNB bestrebt, diese Geräuschemissionen den Vorgabewerten entsprechend gering zu halten.

In der vorliegenden Masterarbeit soll die Entstehung von Teilentladungen an Hybridfreileitungsseilen und die damit verbundenen Geräuschemissionen bei unterschiedlichen äußeren Einflüssen (Regenraten) untersucht werden. Hierbei stellt sich die Frage, inwieweit dieses Geräuschemissionsverhalten durch eine Überlagerung eines Wechselfeldes zu den elektrischen Randfeldstärken des DC-Systems bzw. eines Gleichfeldes zu den Randfeldstärken des AC-Systems beeinflusst wird. Dabei soll im Nikola-Tesla-Labor der TU Graz an Leiterseilen mit unterschiedlichen hydrophilen Eigenschaften die wechselseitige Kopplung durch Beaufschlagung mit einer sogenannten Mischspannung, deren Erzeugung eine wesentliche versuchstechnische Herausforderung darstellt, simuliert werden.

2 Aufgabenstellung

Beim Betrieb einer Wechsel- (AC) bzw. Gleichspannungsfreileitung (DC) entsteht um die Leiterseile eine elektrische Wechsel- bzw. Gleichfeldstärke. An Hybridfreileitungen befinden sich AC- und DC-Systeme auf einem gemeinsamen Mast und sind somit in sehr geringer Entfernung zueinander angeordnet, wodurch eine wechselseitige Beeinflussung (Kopplung) und eine dadurch entstehende Überlagerung des AC- und DC-Feldes stattfindet (Mischfeld).

Im Zuge dieser Masterarbeiten wurde untersucht, inwieweit sich das Geräuschemissionsverhalten von AC/DC-Hybridfreileitungen aufgrund dieser wechselseitigen elektromagnetischen Kopplung und der dadurch veränderten Randfeldstärken an den Oberflächen des Leiterseilbündels verändert. Die dahingehend durchgeführten Versuche sollten Aufschluss auf den Einfluss unterschiedlich hydrophiler Oberflächen auf das Geräuschespektrum bei relevanten Regenraten geben. Außerdem sollten diesbezügliche Unterschiede bei verschiedenen Polaritäten der DC-Feldanteile aufgezeigt sowie das Abtrocknungsverhalten unter Mischfeldbeanspruchung untersucht werden.

Dazu wurden unterschiedliche Leiterseilprüflinge in 4er-Bündel-Anordnung auf eine definierte Höhe im Nikola-Tesla-Labor der TU Graz montiert und mit einer Mischspannung (variable AC- und DC-Anteile) beaufschlagt. Mit Hilfe dieser Mischspannung kann das elektrische Mischfeld, welches durch die wechselseitige Kopplung zwischen AC- und DC-System entsteht, unter Verwendung eines einzelnen Prüflings nachempfunden werden. Die Herausforderungen dabei bestanden in der Erzeugung dieser Mischspannung an einem Knotenpunkt des Systems (Leiterseilprüfling) und der separaten Regelung des AC- und DC-Anteils.

Es ist davon auszugehen, dass diese Mischfeldbeanspruchung der Leiterseile Veränderungen im Teilentladungs- und Geräuschemissionsverhalten hervorruft. Da nach aktuellem Stand der Forschung die Geräuschintensität von AC-Freileitungsseilen bei feuchtem Wetter (Regen, Schnee, Nebel, Raureif) besonders hoch ist, sollten die Versuche zu dieser Arbeit unter diesen Bedingungen durchgeführt werden. Dazu wurden mit Hilfe einer Regenanlage diverse Wetterbedingungen durch unterschiedliche Regenraten simuliert.

Die unter Mischspannung und feuchtem Wetter entstehenden Geräusche, die sogenannten Schalldruckpegel, sollten mit hochempfindlichen Messmikrofonen an definierten Messpunkten gemessen und aufgezeichnet werden. Dieser Schalldruckpegel hängt allerdings von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen ab, wodurch dieser nur schwer mit anderen Laborversuchen oder Realbedingungen vergleichbar ist. Daher war es notwendig diese Umgebungsbedingungen zu quantifizieren und die Geräuschemission des Leiterseilprüflings, den sogenannten Schalleistungspegel, zu berechnen.

Zur Herstellung einer Korrelation zwischen Geräuschen und Teilentladungen, wurden zusätzlich Teilentladungsmessungen nach IEC 60270 durchgeführt sowie langzeitbelichtete Fotos mit einer Tageslichtkamera erstellt.

Um ein Gefühl für die Messmethodik und erste Abschätzungen der Geräuschemissionen für die Versuche im Nikola-Tesla-Labor zu bekommen, war es erforderlich, im Vorfeld Versuche im kleineren Maßstab im Extremklimalabor des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz sowie Simulationen mit dem Programm *ElecNet* durchzuführen. Mit den hierbei ermittelten Ergebnissen sollten schließlich die, für die Versuche im Nikola-Tesla-Labor notwendigen, spannungsabhängigen Feldstärkewerte und Versuchsabläufe ermittelt werden.

Die Messungen wurden mit Leiterseilen mit unterschiedlich hydrophilen Oberflächen wiederholt, um festzustellen, ob die bekannten Oberflächenbehandlungen zur Geräuschemissionsreduktion auch unter hybriden Bedingungen ihre Funktionalität beibehalten.

Nach der Auswertung und graphischen Darstellung der Ergebnisse sollte schlussendlich das Geräuschemissionsverhalten von Freileitungen bei Beanspruchung mit unterschiedlichen AC-Feldstärken und überlagerten positiven und negativen DC-Offsets bzw. DC-Feldstärken mit überlagertem AC-Rippel bei verschiedenen Regenintensitäten beurteilt werden. Zusätzlich wurde das Abtrocknungsverhalten unter definierten Mischfeldbeanspruchungen untersucht.

3 Entstehung von Geräuschemissionen

3.1 Koronaentladungen

Die Entstehung von Geräuschemissionen an Freileitungen ist maßgeblich auf Koronaentladungen zurückzuführen, welche zur Kategorie der äußeren Teilentladungen zugehörig sind und vor allem an stark inhomogenen Geometrien (unebene Oberflächen) auftreten. Um ein Verständnis für dieses Phänomen zu bekommen, werden nachfolgend die dazugehörigen Effekte und Besonderheiten erläutert.

Eine Koronaentladung ist die lokale Ionisation der Umgebungsluft einer Elektrode, welche auf eine hohe elektrische Feldstärke an der Elektrodenoberfläche (Randfeldstärke) zurückzuführen ist. Diese Art von Teilentladungen tritt u. a. bei AC- sowie bei DC-Höchstspannungsfreileitungen auf und ist daher ein wichtiger Bestandteil für Geräuschemissionen an Freileitungen.

Wird eine Freileitung korrekt dimensioniert, sollte bei trockenen, sauberen und unbeschädigten Leiterseiloberflächen keine Korona auftreten. Da allerdings aufgrund von unterschiedlichen Einflüssen, wie beispielsweise Montageschäden, Schmutzpartikel oder Wassertropfen, der Idealzustand in der Praxis nicht eingehalten werden kann, muss immer mit dem Auftreten von Koronaaktivitäten gerechnet werden (Bild 3.1.1). Diese „Störstellen“ an der Leiteroberfläche verursachen eine Erhöhung des lokalen elektrischen Feldes. Erreicht dieses einen Wert, bei welchem die Umgebungsluft eine Stoßionisation erfährt, wird diese Koronaentladung genannt. Durch diese wird die Luft lokal geringfügig, aber schockartig erwärmt, was einen akustischen Puls zur Folge hat. Die Gesamtheit dieser Pulse entlang eines Leitungsabschnittes erzeugt ein breitbandiges Geräusch, welches als „Knistern“ oder „Prasseln“ wahrgenommen wird [4].

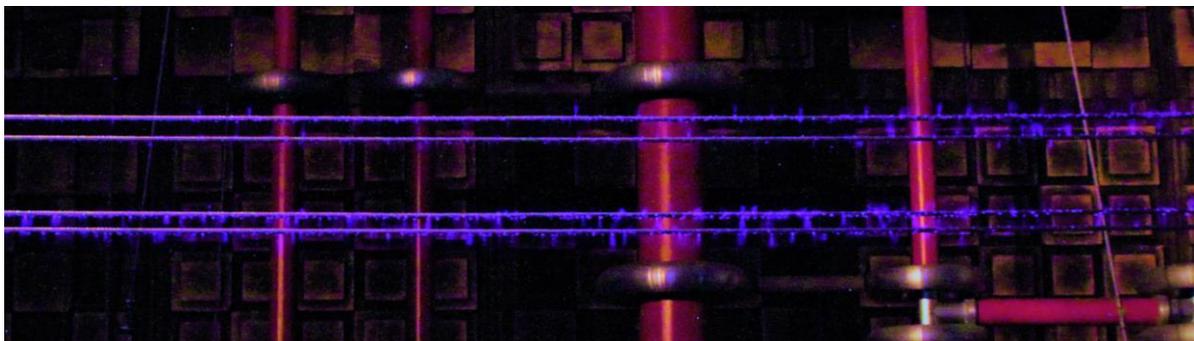


Bild 3.1.1: Sichtbare Koronaentladungen an einem 4er-Bündel

Beeinflusst werden diese Koronaentladungen im Wesentlichen durch die Geometrie der Elektroden (Leiterseile und Erde), die Höhe und Verteilung des elektrischen Feldes sowie der Art

und Beschaffenheit des Isolationsmediums (Umgebungsluft) zwischen den Elektroden. Bei Wechselspannungen setzen sie sich aus Teilentladungen während der positiven bzw. negativen Halbwelle zusammen, wobei während der jeweiligen Halbwelle unterschiedliche Entladungsmechanismen stattfinden [5].

Der Spannungswert, ab der diese Entladungsmechanismen auftreten wird als Koronaeinsatzspannung U_e bezeichnet. Die Höhe dieser Koronaeinsatzspannung ist von der lokalen elektrischen Randfeldstärke sowie von der Spannungspolarität (Polaritätseffekt) abhängig.

3.2 Tropfenbildung

Grund für die Geräuschemissionen einer Hochspannungsfreileitung bei feuchtem Wetter ist, wie bereits in Kapitel 3.1 angedeutet, die Ansammlung von Wassertropfen an der Leiterseiloberfläche. Durch diese Wassertropfen erfährt das elektrische Feld eine lokale Erhöhung, wodurch an diesen Stellen vermehrt Koronaentladungen einsetzen. Außerdem erfahren die Tropfen durch das elektrische Feld eine kegelförmige Verformung, was zu einer zusätzlichen Felderhöhung und einer Intensivierung des Koronaverhaltens führt. Diese kegelförmige Deformation eines Flüssigkeitstropfens im elektrischen Feld wird als *Taylor-Kegel* oder *Taylor-Konus* bezeichnet und ist nach dem Wissenschaftler *Geoffrey Ingram Taylor* benannt, der diesen Effekt erstmals 1964 beschrieb [6].

Aufgrund dieses Tropfenverhaltens ist schlechtes Wetter, wie Regen, Schnee oder Nebel, das „worst case“-Szenario für AC-Freileitungen.

3.3 Geräusche bei DC

3.3.1 Geräuschspezifische Besonderheiten einer DC-Freileitung

Die emittierte Schalleistung von Onset-Streamern positiver Polarität, welche eine hohe Pulsamplitude und eine geringe Frequenz aufweisen, ist laut [7] deutlich höher als jene der negativen Trichel Streamer, welche mit geringer Pulsamplitude aber hoher Frequenz auftreten (Tabelle 3.3.1).

Zusätzlich haben Forschungen des EPRI (Electric Power Research Institute) ergeben, dass Schmutzpartikel in der Luft und Insekten, welche hauptsächlich bei Schönwetter angetroffen werden, meist negativ geladen sind und somit vom positiven Pol angezogen werden. Dadurch sind bei DC-Systemen die Geräuschemissionen des positiven Pols so dominant, dass jene des negativen Pols meist vernachlässigt werden können. Daher gelten als „worst case“-Szenario für DC-Freileitungen sommerliche Schönwetterbedingungen [8].

Bei feuchtem Wetter bilden sich, wie in Kapitel 3.1 erwähnt, Wassertropfen an der Leiterseiloberfläche, was im Allgemeinen zu einer lokalen Feldverzerrung und zu Koronaentladungen führt. Um einen koronierenden DC-Leiter bildet sich allerdings, im Gegensatz zu einem AC-Leiter, aufgrund des elektrischen Gleichfeldes eine Raumladungszone aus. Diese Raumladungszone schirmt weitere Koronaquellen (Tropfen) ab und ermöglicht somit eine Reduzierung der Geräuschemissionen bis zu einer kritischen Dichte an Koronaquellen, wie sie bei starkem Regen auftreten [8].

3.3.2 Polaritätseffekt

In einem stark inhomogenen Feld ist eine deutliche Polaritätsabhängigkeit der Koronaeinsetzspannung U_e und der Durchschlagspannung¹ U_d zu beobachten. Bei negativer Spannung setzen die Koronaentladungen früher ein, ein Durchschlag findet allerdings erst bei relativ hohen Spannungen statt. Bei positiver Spannung tritt der jeweils umgekehrte Effekt auf. Die Ursache für dieses Verhalten ist die Entstehung einer positiven Raumladungszone an der spitzen Elektrode, wie im betrachteten Fall einer Freileitung (Spitze) [10].

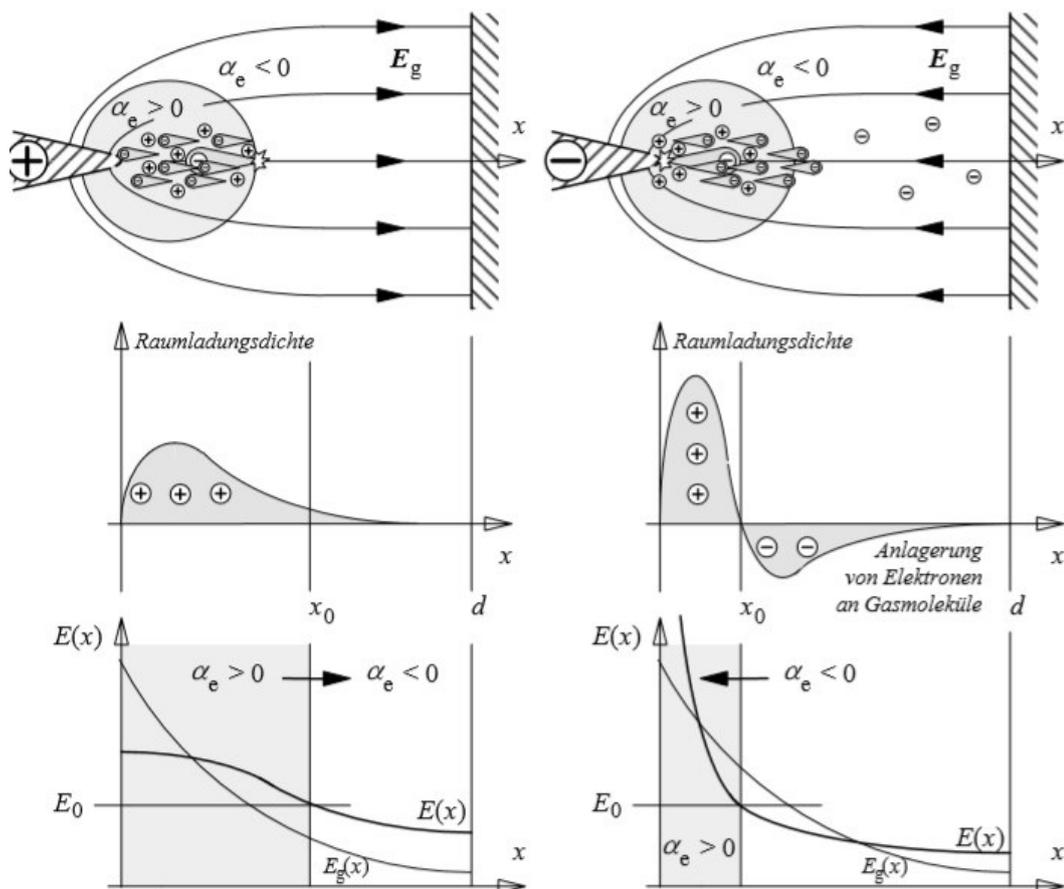


Bild 3.3.1: Polaritätseffekt im stark inhomogenen Feld bei einer Nadelelektrode mit positiver Polarität (links) und negativer Polarität (rechts) [10]

¹ „...Spannung, welche überschritten werden muss, damit ein Spannungsdurchschlag durch ein Material bzw. einen Stoff (z. B. einen Isolator) erfolgt.“ [9].

Bei **positiver Polarität** der Hochspannungselektrode (Spitze) müssen die Elektronenlawinen² aufgrund dessen, dass die Feldstärke E direkt an der Kathode viel zu gering ist, im Gasvolumen starten (Bild 3.3.1 links oben). Nach dem Start der ersten Lawine, ausgelöst durch äußere Strahlung, und nach Erreichen der kritischen Elektronenzahl N_{krit} , entstehen durch Photoionisation weitere Folgelawinen und somit eine stabil glimmende Vorentladung. Vor der positiven Spitze bildet sich eine positive Raumladungswolke aus Ionen, welche aufgrund ihrer Masse träger sind als die leichteren Elektronen. Dadurch wird die elektrische Feldstärke E vor der positiven Elektrode reduziert und im feldschwachen Bereich erhöht (Bild 3.3.1 links Mitte). Somit kommt es zu einer Verschiebung der Ionisationsgrenze mit $\alpha_e = 0$ in Richtung $x = x_0$ (Bild 3.3.1 links unten), was beim Steigern der Spannung zu günstigen Bedingungen für die Bildung von Streamern in den Feldschwachen Bereich, bis hin zum Durchschlag, führt. [10]

Bei **negativer Polarität** der Hochspannungselektrode muss ein Startelektron direkt an der Elektrodenspitze zur Verfügung stehen [10]. Nach Erreichen der Koronaeinsatzspannung U_e entsteht eine unregelmäßige Folge von Koronaimpulsen, welche von der Austrittsarbeit des Kathodenmaterials abhängig ist [10, 12]. Diese wachsen in das feldschwache Gebiet hinein (Bild 3.3.1 rechts oben). Nach Überschreitung der Ionisationsgrenze $\alpha_e = 0$ wird die Elektronenzahl N in den Lawinen aufgrund von Anlagerungen an elektronegativen Gasmolekülen reduziert, wodurch dort eine negative Raumladung entsteht (Bild 3.3.1 rechts Mitte). Im Gegenzug dazu bildet sich wiederum eine positive Raumladungswolke an der Spitze der Kathode, woraufhin sich eine erhebliche Erhöhung der Feldstärke vor der Elektrodenspitze und eine gleichmäßigere Feldstärkeverteilung bis zur Gegenelektrode ergibt (Bild 3.3.1 rechts unten). Gleichzeitig verschiebt sich wiederum die Ionisationsgrenze $\alpha_e = 0$, hierbei allerdings zu kleineren Werten $x = x_0$. Durch den Zuwachs der negativen Raumladung im feldschwachen Bereich der Kathode kann die elektrische Feldstärke E so weit reduziert werden, dass die Vorentladung erlischt und erst nach Abwandern der negativen Ionen zur Anode wieder zündet. Dadurch entsteht eine regelmäßige Folge von Impulsen, den sogenannten Trichel-Impulsen [13]. Wenn die Spannung erhöht wird bis die Anzahl der abfließenden Ionen den neugebildeten entspricht, gehen diese Trichel-Impulse schließlich in eine gleichmäßige Entladung über. [10]

In der Literatur wird zwischen vier positiven und drei negativen Entladungsformen unterschieden (Bild 3.3.2) [14].

² „...die Gesamtheit der Elektronen, die ein einzelnes, an der Kathode startendes Elektron durch fortgesetzte Stoßionisation in einem Gas unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes auf seinem Wege zur Anode erzeugt.“ [11].

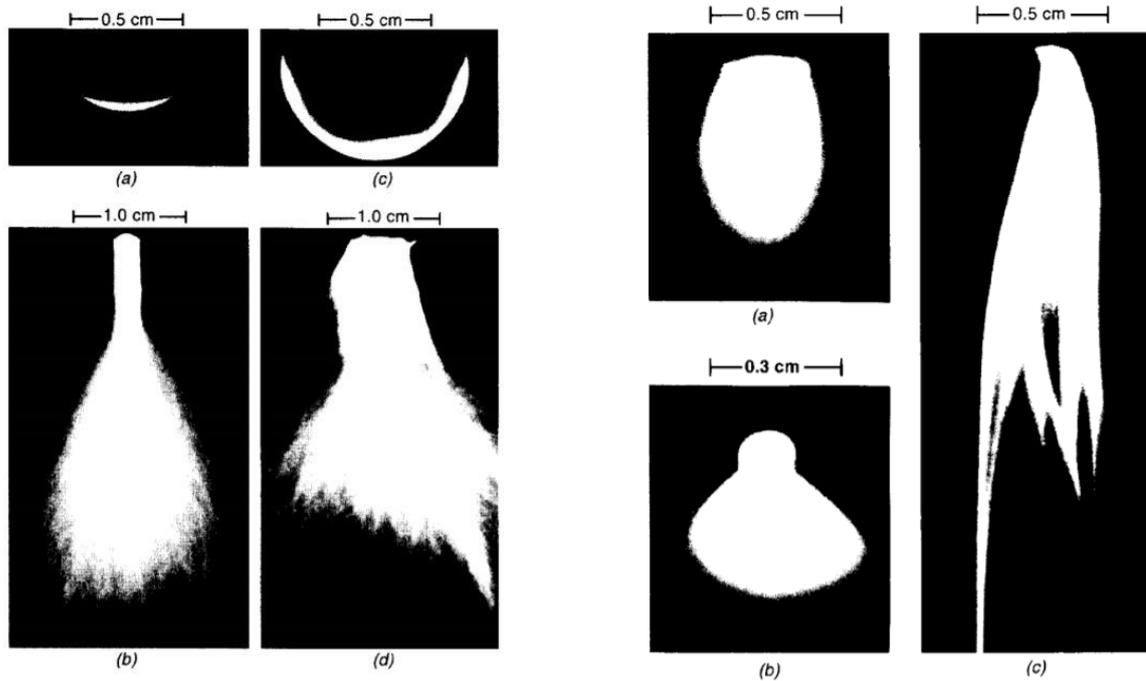


Bild 3.3.2: Aufnahmen der Entladungsformen von positiven (links) und negativen (rechts) Koronaentladungen [14]

Links: (a) Burst Corona, (b) Onset Streamer, (c) Positive Glow, (d) Breakdown Streamer
 Rechts: (a) Trichel Streamer, (b) Negative Glow, (c) Negative Streamer

Diese positiven und negativen Entladungsformen weisen verschiedene Geräuschemissionscharakteristika auf, welche in Tabelle 3.3.1 zusammengefasst sind.

Tabelle 3.3.1: Eigenschaften der Geräuschemissionen von DC-Korona [7]

positive Entladungen	negative Entladungen
hohe Schallamplitude	geringe Schallamplitude
geringere Anzahl an Pulsen	hohe Anzahl an Pulsen
treten zufällig auf	dauerhaftes Auftreten
niedrigere Frequenzen im Frequenzspektrum	höhere Frequenzen im Frequenzspektrum

3.4 Geräusche bei AC

3.4.1 Koronageräusche

Auch bei AC-Freileitungen besteht aufgrund der positiven und negativen Halbwellen des elektrischen Wechselfeldes eine Abhängigkeit zwischen Koronaentladungen und Polarität (siehe Kapitel 3.1 und 3.3.2). Hierzu ist anzumerken, dass die Entladungen aufgrund des Polaritätseffektes vorwiegend zuerst während der negativen Halbwelle auftreten. Dadurch ist die Einsetzspannung U_e der intensiveren, positiven Entladungen höher als jene der negativen. Im Gegenzug kann festgestellt werden, dass bei gleicher Spitzenspannung die Pulszahl der negativen Korona viel höher ist, als jene der positiven. [7]

Außerdem wird in [7] angedeutet, dass der Geräuschemissionslevel der AC-Korona höher ist, als jener der DC-Korona, wodurch vor allem die Betrachtung von Hybridleitungen bei schlechten Wetterbedingungen Priorität hat.

Durch den Betrieb mit hohen Wechselspannungen kann es zu weiteren Effekten kommen, welche ein niederfrequentes Brummen, die sogenannten tonalen Schallemissionen, erzeugen. Dieses Brummen tritt bei einem Vielfachen der doppelten Netzfrequenz auf, wobei der größte und somit lauteste Anteil auf die doppelte Netzfrequenz $2 \cdot f_N = 100 \text{ Hz}$ fällt. [15]

3.4.2 Tonale Schallemissionen

Die niederfrequenten tonalen Schallemissionen erhielten bis Ende der 90er Jahre nur wenig Beachtung, da sie für die Gesamtbewertung nur einen geringen Beitrag lieferten. Erste Ideen zur Entstehung dieser Anteile wurden erst im Jahr 2000 von *Maruvada* [16] bzw. 2002 von *Teich* und *Weber* [17] publiziert. Da diese Schallpegel meistens sehr gering sind, werden sie im täglichen Leben von anderen Geräuschen überdeckt. Allerdings kann es in Ruhezeiten durchaus dazu kommen, dass diese Emissionen als sehr störend empfunden werden. [18]

In Bild 3.4.1 ist die Bedeutung dieser tonalen Geräuschemission deutlich zu erkennen. Im Vergleich zu den restlichen Terzbändern sind diese besonders ausgeprägt, wodurch dieser auch bei der Bewertung der Geräuschemissionen gesonderte Aufmerksamkeit zukommt. Das dadurch entstehende, niederfrequente Brummen dringt leicht durch Mauerwerk und wird somit vom Menschen als besonders störend empfunden.

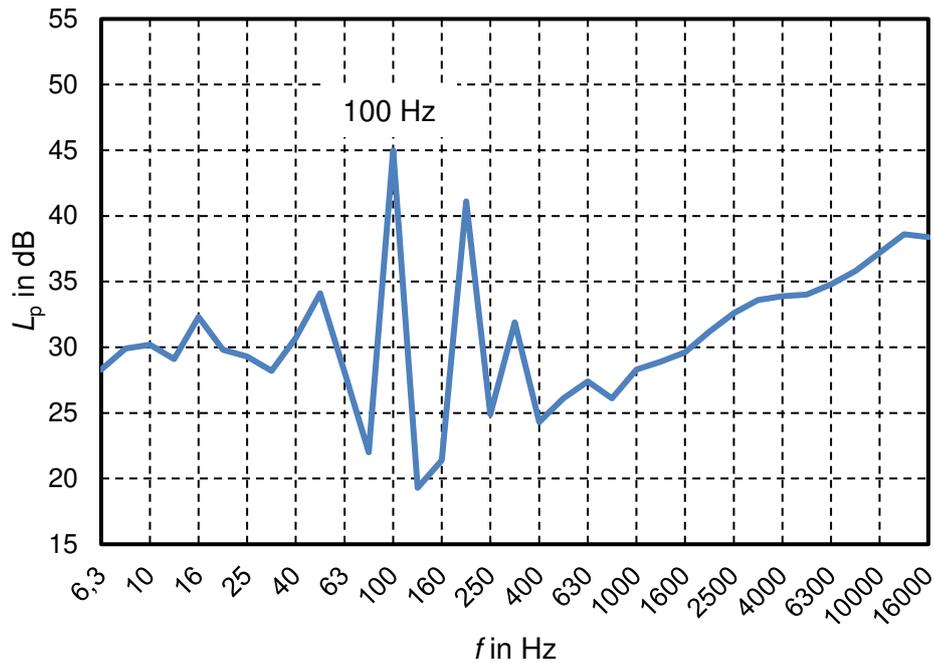


Bild 3.4.1: Beispiel für ein Frequenzspektrum der Geräuschemissionen einer AC-Freileitung ($E_{AC} = 15,4 \text{ kV/cm}$)

In Bild 3.4.1 ist zu erkennen, dass bei AC-Freileitungen die Komponente bei einem Vielfachen der doppelten Nennfrequenz $2 \cdot f_N = 100 \text{ Hz}$ besonders ausgeprägt ist.

Entstehung der $2f$ -Komponente

Straumann und *Semmler* haben in [19] die These von *Teich* und *Weber* [17], dass die Hauptursache für die $2f$ -Schallemission die Oszillation der Wassertropfen an der Leiterseiloberfläche aufgrund des elektrischen Wechselfeldes ist, entkräftet. Während dieser Forschungen im High Voltage Laboratory der ETH Zürich wurde durch Anbringung mechanischer Störstellen auf ein Leiterseil gezeigt, dass diese tonalen Komponenten ihren Ursprung in der gasförmigen Umgebung (Luft) haben müssen [19].

In weiterer Folge entwickelte *Straumann* eine Theorie, in der die Entstehung der tonalen Emissionen eine Folge des periodischen Ionendriftes und der damit einhergehenden elastischen Zusammenstöße mit den neutralen Gasteilchen der Umgebungsluft ist. Die dadurch entstehende geringe, pulsformige Erhöhung der Umgebungstemperatur führt schließlich zu einer periodischen Änderung des Gasvolumens und somit zur $2f$ -Schallemission. [20]

In Bild 3.4.2 ist diese Bewegung der Ionen in der Umgebung eines Leiters schematisch dargestellt. Die Kraft f_i , welche das elektrische Feld auf die Ionen ausübt, wird auf das umgebende Gas abgeleitet. Alle Kräfte f_i summieren sich zu einer Resultierenden F . [21]

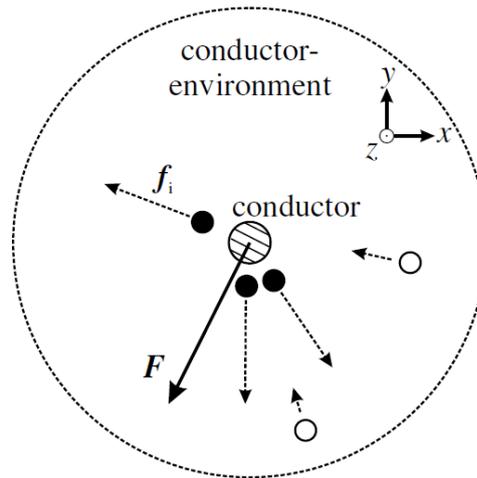


Bild 3.4.2: Ionen beider Polaritäten (● und ○) im elektrischen Nahfeld eines Leiters [21]

In all diesen Theorien geht allerdings deutlich hervor, dass die $2f$ -Komponente der Geräuschemissionen an Freileitungen aufgrund des dafür benötigten elektrischen Wechselfeldes ausschließlich bei Wechselspannung auftritt.

4 Prognose von Geräuschemissionen

4.1 Überblick

In der Literatur sind zahlreiche Prognoseformeln zur Berechnung des Schalleistungs- und Schalldruckpegels zu finden. Ein Überblick hierzu wird in [22 – 26] gezeigt.

Folgende Begriffe sind zu unterscheiden:

Schalleistungspegel L_w (Ursache)

„Schalleistungspegel kennzeichnen die Geräuschentwicklung, die zum Beispiel durch ein Produkt unter spezifischen Betriebsbedingungen hervorgerufen wird.“ [27]

Schalldruckpegel L_p (Wirkung)

„Der Schalldruckpegel (oft auch nur als Schallpegel bezeichnet) gibt an, wie laut ein Geräusch ist.“ [28]

A-gewichteter Schalldruckpegel L_{pA}

„Um der unterschiedlichen Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs für unterschiedlich hohe Töne (Frequenz) Rechnung zu tragen, wird aus dem Schalldruckpegel der sogenannte A-gewichtete Schalldruckpegel gebildet.“ [28]

Als Kennzeichnung für einen A-gewichteten Schallpegel wird allgemein die Einheit dB(A) verwendet.

Alle Prognoseformeln basieren auf dem Schema aus Bild 4.1.1. Dabei lässt sich der Schalldruckpegel L_p aus dem Schalleistungspegel L_w , welcher anhand von leitungsspezifischen Parametern und der maximal auftretenden Randfeldstärke prognostiziert wird, und einem umgebungsbedingten Ausbreitungsmodell (geometrische Verdünnung und Ausbreitungsdämpfung) berechnen.

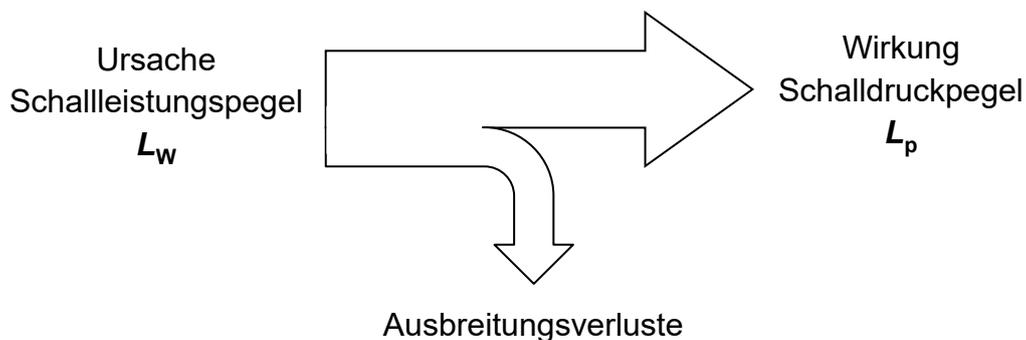


Bild 4.1.1: Schematische Darstellung zur Begriffsbestimmung

Diese Berechnungsmethoden weisen allerdings Mängel in Bezug auf die Berücksichtigung der Witterungsverhältnisse auf, welche nicht als Parameter, sondern indirekt über die Statistikpegel berücksichtigt werden. Damit begrenzt sich der Anwendungsbereich dieser Gleichungen auf Orte ähnlicher Niederschlagscharakteristik [29].

Die beiden verbreitetsten Methoden zur Berechnung der A-gewichteten Geräuschemissionen sind die Methode nach EPRI (Electric Power Research Institute) [5, 30] und nach BPA (Bonneville Power Administration) [23], welche im Folgenden beschrieben werden.

Alle Gleichungen wurden auf die Einheiten aus Tabelle 4.1.1 normiert.

Tabelle 4.1.1: Beschreibung der verwendeten Formelzeichen

Legende	
d	Teilleiterdurchmesser in cm
d_{eq}	Bündeldurchmesser in cm (Durchmesser des Kreises, der durch die Zentren der Teilleiter führt)
D	Abstand der Phase zum Messpunkt in m (Beobachtungspunkt)
E_{max}	Arithmetischer Mittelwert aller maximalen zeitlichen und örtlichen elektrischen Randfeldstärken der Teilleiter in kV_{peak}/cm (Höhe über Grund für die Berechnung: minimale Höhe + 1/3 des Durchhanges)
k	Korrekturfaktor zur Umrechnung auf Regenrate r
n	Anzahl der Teilleiter eines Bündels
K_n	Korrekturkonstante für $n < 3$: 7,5 dB für $n = 1$ 2,6 dB für $n = 2$
L_{ges}	Gesamtschallpegel in dB(A) für alle N Phasen (anwendbar zur logarithmischen Addition aller Schallpegel)
L_p	Schalldruckpegel in dB(A) über 20 μPa
$L_{p,r}$	Schalldruckpegel in dB(A) bei einer Regenrate r in mm/h^3
L_w	Längenbezogener Schalleistungspegel in dB(A) über 1 W/m (EPRI) bzw. 1 pW/m (BPA)
ΔL	Korrekturterm: Differenz zwischen L_{p5} und L_{p50}
N	Anzahl der Phasen des Systems

Beispiele für diese Berechnungsmethoden werden in Kapitel 7.2, mit den ermittelten Feldstärkewerten einer realitätsnahen Mastkonfiguration aus Kapitel 6.5, durchgeführt.

³ Die Indizes 5 bzw. 50 beschreiben die statistischen Pegel bei Regen, welche zu 5 bzw. 50 Prozent der Zeit überschritten werden (somit gilt: $L_{p5} > L_{p50}$).

4.2 Prognose nach EPRI (Electric Power Research Institute)

4.2.1 EPRI – AC

Diese Gleichungen sind auf alle Bündelgeometrien anwendbar [25].

Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche hat eine Fachgruppe für Hochspannungstechnologie der ETH Zürich [29, 31] unterschiedliche Formeln zur Prognose des A-Pegels untersucht, wobei sich der EPRI-Ansatz [5] als am geeignetsten herausstellte. Begründet wird dies dahingehend, als dass dieser Ansatz als einziger eine nachvollziehbare Abhängigkeit der Regenintensität („*heavy rain*“ und „*wet-conductor*“) berücksichtigt. Es wird auch darauf hingewiesen, dass der relativ geringe Einfluss anderer Umweltbedingungen, wie Nebel oder Schnee, sowie der Leiterseiltemperatur, aufgrund fehlender Daten, ignoriert werden. [32]

Im Folgenden wird die Prognose des Schallimmissionspegels nach EPRI [5] beschrieben, welche sich auf die Verteilung der Regenintensität in Pittsfield (Massachusetts) und auf moderat gealterte Leiterseile beziehen.

Um die Geräuschemissionen an einer Freileitung während starkem Regen („*heavy rain*“ – 6,5 mm/h [5]) zu berechnen, werden folgende Gleichungen⁴ verwendet.

Schallleistungspegel L_{w5} einer Phase mit n Teilleitern bei starkem Regen:

Für $n < 3$

$$L_{w5} = 20 \cdot \lg(n) + 44 \cdot \lg(d) - \frac{665 \cdot \sqrt{2}}{E_{\max}} + K_n - 39,1 \quad (1)$$

Für $n \geq 3$

$$L_{w5} = 20 \cdot \lg(n) + 44 \cdot \lg(d) - \frac{665 \cdot \sqrt{2}}{E_{\max}} + \left(\frac{22,9 \cdot (n - 1) \cdot d}{d_{\text{eq}}} \right) - 46,4 \quad (2)$$

Schalldruckpegel L_{p5} einer Phase mit n Teilleitern bei starkem Regen:

$$L_{p5} = L_{w5} + 114,3 - 10 \cdot \lg(D) - 0,02 \cdot D \quad (3)$$

Die Summanden in Gleichung (3) beschreiben hierbei das Ausbreitungsmodell von EPRI. Der erste Term basiert auf der Dichte der Umgebungsluft, der Ausbreitungsgeschwindigkeit, der

⁴ Diese Gleichungen wurden so abgeändert, sodass für E_{\max} , anstatt des Effektivwertes, der Spitzenwert eingesetzt werden kann.

Leitungslänge (unendlich) und dem Bezugsschalldruckpegel (20 µPa). Der zweite Term beschreibt die geometrische Verdünnung und der dritte Term die molekulare Absorption.

Zur Berechnung des Schalldruckpegels bei nassem Leiter L_{p50} („*wet-conductor*“ – 0,75 mm/h [5]) muss ein Korrekturfaktor ΔL zum Schalldruckpegel bei starkem Regen L_{p5} addiert werden.

Für $n < 3$

$$\Delta L = 8,2 - \frac{346,48 \cdot \sqrt{2}}{E_{\max} \cdot d^{0,24}} \quad (4)$$

Für $3 \leq n \leq 8$

$$\Delta L = 10,4 - \frac{346,48 \cdot \sqrt{2}}{E_{\max} \cdot d^{0,24}} + 8 \cdot (n - 1) \cdot \frac{d}{d_{\text{eq}}} \quad (5)$$

Für $n > 8$

$$\Delta L = 10,4 - \frac{346,48 \cdot \sqrt{2}}{E_{\max} \cdot d^{0,24}} + \frac{8 \cdot (n - 1) \cdot d}{d_{\text{eq}}} - \frac{3,55 \cdot (n - 8) \cdot \sqrt{2}}{E_{\max}} \quad (6)$$

Somit ergibt sich für L_{p50} :

$$L_{p50} = L_{p5} + \Delta L \quad (7)$$

Mit der logarithmischen Summe der jeweiligen Schallpegel L aller N Phasen, kann der Gesamtschallpegel L_{ges} berechnet werden.

$$L_{\text{ges}} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \quad (8)$$

Zur Berechnung des Schalldruckpegels bei einer beliebigen Regenrate, wird im *Transmission Line Reference Book* von EPRI [5] ein Korrekturfaktor k angegeben. Dieser basiert auf der Forschungsarbeit von *Lundquist* [33], der einen logarithmischen Zusammenhang zwischen dem A-gewichteten Schalldruckpegel und der Regenrate beschreibt.

$$k = \frac{L_{p5} - L_{p50}}{\lg \left(\frac{6,5}{0,75} \right)} = 1,07 \cdot \Delta L \quad (9)$$

Nun kann der Schalldruckpegel $L_{p,r}$ für eine bestimmte Regenrate r berechnet werden.

$$L_{p,r} = L_{p50} + k \cdot \lg\left(\frac{r}{0,75}\right) \quad (10)$$

4.2.2 EPRI - DC

Alle Parameter gelten für den positiven DC-Pol bei schönem Wetter im Sommer. Die Geräuschemissionen des negativen DC-Pols werden vernachlässigt [34].

Für $n < 3$

$$L_w = -252,38 + 124 \cdot \lg\left(\frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}\right) + 25 \cdot \lg(d) + 18 \cdot \lg(n) + K_n \quad (11)$$

Für $n \geq 3$

$$L_w = -252,38 + 124 \cdot \lg\left(\frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}\right) + 25 \cdot \lg(d) + 18 \cdot \lg(n) \quad (12)$$

Um den Schalleistungspegel bei starkem Regen oder feuchtem Wetter (nasses Leiterseil) zu ermitteln, müssen 6 dB(A) vom Schalleistungspegel bei schönem Wetter L_w subtrahiert werden.

Der Schalldruckpegel L_p bei allen Wetterbedingungen kann wiederum gemäß des Ausbreitungsmodell von EPRI mit Gleichung (3) berechnet werden.

4.3 Prognosen nach BPA (Bonneville Power Administration)

4.3.1 BPA – AC

Diese Gleichungen sind für alle Bündelgeometrien, einen Spannungsbereich von 230 – 1500 kV, einer Anzahl n von bis zu 16 Teilleitern und einen Teilleiterdurchmesser d von 2 cm bis 6,5 cm anwendbar [25].

Die BPA-Methode basiert auf manuellen Kurzzeitmessungen sowie auf gesammelten Daten aus Langzeitmessungen von in Betrieb befindlichen Freileitungen mit moderat gealterten Seilen. Die Langzeitmessungen der Geräuschemissionen und der Regenintensität zeigen, dass hierbei der A-gewichtete L_{50} -Pegel bei einer Regenrate von 1 mm/h auftritt. Die Berechnungsmethode nach BPA beinhaltet keine separate Gleichung zur Ermittlung der Schallpegel bei

starken Regen. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass bei Bedarf für starkem Regen zum L_{50} -Pegel 3,5 dB(A) addiert werden müssen.

Der Berechnungsvorgang nach BPA [22, 23] erfolgt ähnlich wie in Kapitel 4.2.

Für $n < 3$

$$L_{w50} = 55 \cdot \lg(d) + 120 \cdot \lg(E_{\max}) - 127,7 \quad (13)$$

Für $n \geq 3$

$$L_{w50} = 55 \cdot \lg(d) + 120 \cdot \lg(E_{\max}) + 26,4 \cdot \lg(n) - 140,7 \quad (14)$$

Nun kann mit Hilfe des Ausbreitungsmodells von BPA aus [23] der Schalldruckpegel berechnet werden:

$$L_{p50} = L_{w50} - 5,8 - 11,4 \cdot \lg(D) \quad (15)$$

Hierbei beinhaltet der erste Summand (Konstante) die Dichte der Umgebungsluft, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle, den Reflexionskoeffizienten des Bodens (gutes Schallabsorbierendes Medium) sowie die Leitungslänge (unendlich). Der zweite Term beschreibt die geometrische Verdünnung und die molekulare Absorption.

Für die Berechnung des Gesamtschalldruckpegels kann wiederum Gleichung (8) herangezogen werden.

4.3.2 BPA – DC

Diese Gleichungen sind für alle Bündelgeometrien, einer Anzahl n von 4 bis 8 Teilleitern und einem Teilleiterdurchmesser d von bis zu 5 cm anwendbar [22, 25].

Die Gleichungen wurden anhand von Messergebnissen für schönes Wetter im Herbst entwickelt und sind somit auch für diese Witterung gültig. Im Sommer bzw. Winter sind auf die Ergebnisse 2 dB(A) zu addieren bzw. subtrahieren. Daten von [35] zeigen, dass die durchschnittlichen Geräuschemissionswerte bei HVDC während schlechtem Wetter um 6 – 11 dB(A) geringer sind als bei schönem Wetter [23].

Alle Parameter gelten für den positiven DC-Pol. Die Geräuschemissionen des negativen DC-Pols werden wiederum vernachlässigt. Bei mehreren bipolaren Leitungen sind die Emissionswerte der positiven Pole zu berechnen und anschließend laut Gleichung (8) logarithmisch zu addieren [22].

Die folgenden Gleichungen wurden aus [22, 23] entnommen..

Für $n < 3$

$$L_w = 40 \cdot \lg(d) + 86 \cdot \lg(E_{\max}) - 87,6 \quad (16)$$

Für $n \geq 3$

$$L_w = 40 \cdot \lg(d) + 86 \cdot \lg(E_{\max}) + 25,6 \cdot \lg(n) - 94,8 \quad (17)$$

Der Schalldruckpegel L_p kann wiederum mit Gleichung (15) berechnet werden.

5 Reduktion der Geräuschemissionen

5.1 Allgemeines

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, ist die Intensität und das Auftreten der „knisternden“ und „prasselnden“ Geräusche von den, entlang der Leiterseiloberfläche auftretenden, Teilentladungen abhängig. Diese sind wiederum auf die elektrische Randfeldstärke und die Umgebungsbedingungen zurückzuführen.

Um nun Möglichkeiten für die Reduktion dieser Geräuschemissionen zu erarbeiten, stellt sich die Frage, welche Einflüsse die typischerweise mit einer Freileitung assoziierten Parameter auf die Geräuschemissionen haben. Das Geräuschemissionsverhalten ist maßgeblich von der Koronaaktivität und somit von der lokalen elektrischen Randfeldstärke abhängig. Daher ist es notwendig, Strategien zu entwickeln, welche diese Randfeldstärke reduzieren.

5.2 Seil- und Bündelgeometrie

Aus der Theorie ist bekannt, dass durch eine Erhöhung des Leiterdurchmessers eine Verminderung der Leiterrandfeldstärke erreicht werden kann [10]. In der Praxis werden beispielsweise Seile, in denen Kunststoffdrähte zur Vergrößerung des Seildurchmessers miteingeflochten werden, verwendet. Diese Aussage ist allerdings nur teilweise korrekt. Unter Einfluss von feuchtem Wetter und der dadurch erhöhten Tropfenbildung an der Oberfläche von Leiterseilen mit größerem Durchmesser kann es bei höheren Spannungen zur gleichen oder sogar teilweise schlechteren Emissionscharakteristiken als bei dünneren Leiterseilen kommen [36]. Dadurch werden in der Regel bei Hochspannungsfreileitungen mit Spannungsebenen ab 245 kV (manchmal auch darunter) Leiterseilbündel eingesetzt [10].

Ein solches Leiterseilbündel besteht aus mehreren parallelen Teilleitern, welche in regelmäßigen Abständen, zur Einhaltung des Teilleiterabstandes, durch starre Klemmverbindungen bzw. Abstandhalter (Bild 5.2.1) miteinander verbunden sind.

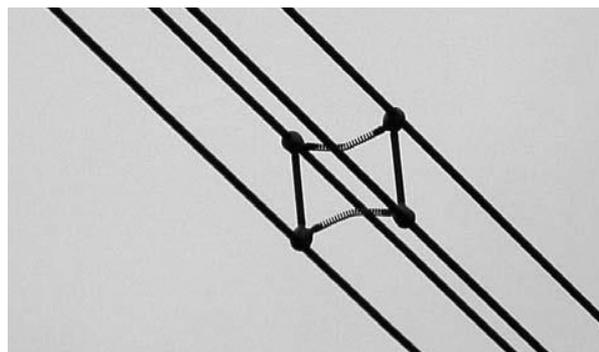
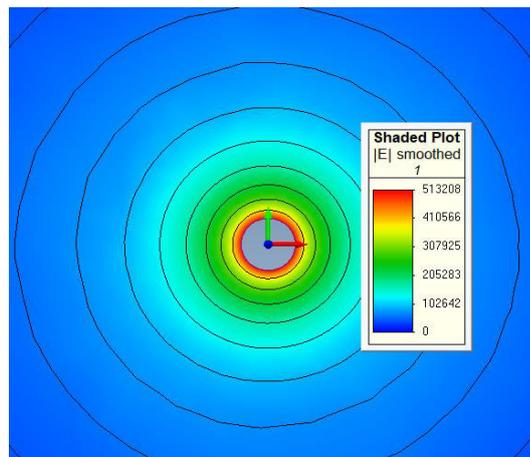


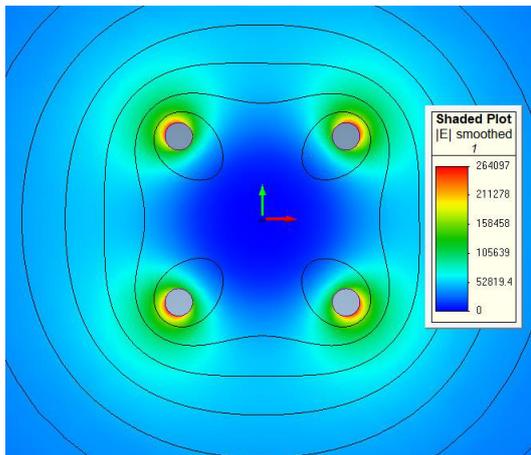
Bild 5.2.1: Abstandhalter in einem 4er-Leiterseilbündel

Dies bringt nicht nur Vorteile beim Geräuschemissionsverhalten aufgrund der geringeren Krümmung der Äquipotentiallinien (Reduktion der Randfeldstärke), sondern unterstützt auch den Leistungstransport durch den besseren Kühleffekt.

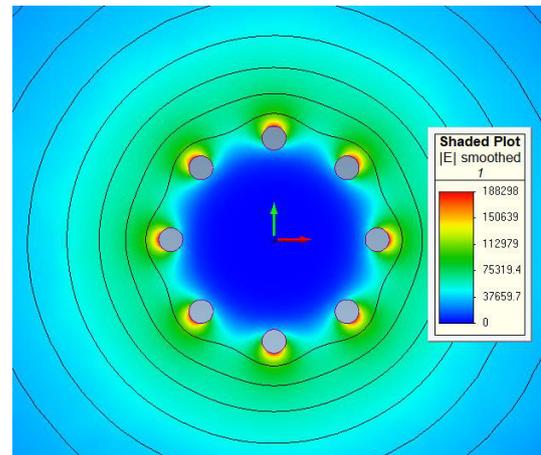
In Bild 5.2.2 ist jeweils die elektrische Feldverteilung mit unterschiedlicher Teileiterzahl mit Hilfe des FEM-Feldrechenprogrammes *ElecNet* dargestellt. Dabei wurden typische Werte für den Teileiterradius r und den aufgespannten Radius der Teileiterzentren R sowie eine sehr weit entfernte Kathode angenommen. Zur weiteren Vereinfachung des Simulationsmodells wurden die Leiterseile als glatte Zylinder modelliert.



U	r	$ E_{max} $
kV	cm	kV/cm
100	3,5	5,13



U	r	R	n	$ E_{max} $
kV	cm	cm	-	kV/cm
100	3,5	30	4	2,64



U	r	R	n	$ E_{max} $
kV	cm	cm	-	kV/cm
100	3,5	30	8	1,88

Bild 5.2.2: Darstellung des elektrischen Feldes bei unterschiedlichen Bündelkonfigurationen

Diese Feldsimulation bestätigt die Aussage, dass sich die maximale Randfeldstärke E_{max} infolge einer Erhöhung der Teileiterzahl n reduziert.

In den meisten Teilen Europas werden Teilleiterabstände (Abstand zwischen den Teilleitern) von 400 mm verwendet. Dieser Abstand ist ein sogenanntes Pareto-Optimum zwischen minimaler elektrischer Randfeldstärke E und maximaler natürlicher Leistung S_{nat} . Forschungen in [37] haben ergeben, dass durch eine Verringerung des Teilleiterabstandes eine Verringerung der Geräuschemissionspegel erreicht werden kann. Diese Erkenntnis kann in sehr geräuschsensiblen Gebieten eingesetzt werden [37].

5.3 Leiterseiloberfläche

Eine weitverbreitete Technik zur Geräuschemissionsreduktion von Leiterseilen ist die Oberflächenbehandlung. Das Ziel hierbei ist es, durch Beeinflussung der Tropfenbildung bei feuchtem Wetter, die lokalen elektrischen Randfeldstärken zu verringern und somit der Entstehung von Teilentladungen vorzubeugen. Dies kann durch Aufrauen der Oberfläche mit Hilfe von Glasperlen oder Sand bzw. durch Beschichtung mit speziellen, hydrophilen⁵ Lackierungen erfolgen. Durch diese Oberflächenbehandlungen können sich die Wassertropfen anlegen, wodurch sehr geringe Kontaktwinkel⁶ möglich sind (Bild 5.3.1).



Bild 5.3.1: Vergleich der Tropfenbildung zweier Leiterseile aus Süddeutschland [39]
Oben: ACSR (Al/St) 265/35 – Alter: 10 Monate
Unten: ACSR (Al/St) 380/50 – Alter: 25 Jahre

Diese Zunahme der Hydrophilie kann aber auch durch natürliche, alterungsbedingte Oberflächenerosion erfolgen. Dabei wittert, aufgrund jahrelanger Beanspruchung durch die unterschiedlichen Umwelteinflüsse (Regen, Hagel, etc.), die Oberfläche des Leiterseils ab. Somit

⁵ Hydrophil = wasserliebend

⁶ Winkel zwischen Oberfläche und Wassertropfen, gemessen an Tripelpunkt. Je geringer der Kontaktwinkel, desto besser die Hydrophilie [38].

verringern sich auch die Geräuschemissionen mit zunehmendem Alter von Leiterseilen (Bild 5.3.2). Zusätzlich wurde erkannt, dass die Differenz zwischen gealterten und neuen Leitern ausgeprägter ist, je geringer die Regenraten sind [39, 40].

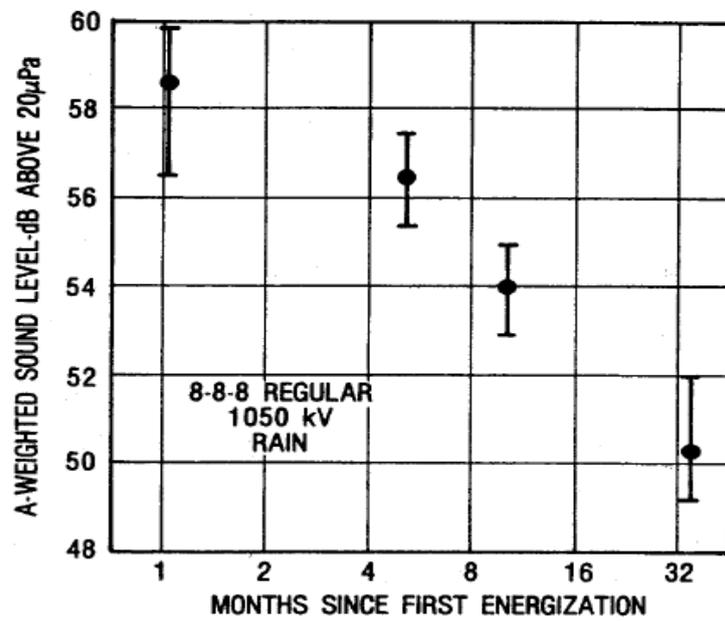


Bild 5.3.2: Reduzierung der Geräuschemissionen aufgrund des Alterungseffektes [5]

6 Felder bei Hybridleitungen

6.1 Allgemeines

Eine Hybridleitung ist die Kombination von mindestens einem Dreiphasen-Wechselstromsystem (AC) mit mindestens einem (bipolaren) Gleichstromsystem (DC) auf einem Mast. Diese Innovation ermöglicht es, die Vorteile beider Technologien zu nutzen. Dafür wird ein bereits bestehendes AC-System, nach Möglichkeit ohne Leitungsumbau, mit DC betrieben, was eine Erhöhung der Übertragungskapazität zur Folge hat. Damit können näher gelegene Verbraucher mit Hilfe des einfach transformierbaren AC-Systems versorgt und mit dem DC-System kann die elektrische Energie auf lange Strecken verlustarm übertragen werden. Bild 6.1.1 stellt eine diesbezügliche Umrüstung schematisch dar.

Bisher gibt es weltweit noch kaum Erfahrungen mit dem Parallelbetrieb von AC- und DC-Systemen. Aufgrund dessen müssen die dabei auftretenden elektromagnetischen Wechselwirkungen zwischen den Stromkreisen, die zu Änderungen des elektrischen Feldes und der damit verbundenen Koronaaktivität führen, untersucht werden.

Prinzipiell kann diese wechselseitige Beeinflussung der Leiterseilrandfeldstärken auf drei Kopplungsarten zurückgeführt werden:

- Kapazitive Kopplung bzw. elektrostatische Induktion
- Induktive Kopplung und
- Ohmsche Kopplung

In [41] wurde kürzlich diese wechselseitige Beeinflussung quantifiziert. Dabei wurden Simulationen einer definierten, hybriden Mastkonfiguration, unter Berücksichtigung aller Kopplungsmechanismen, durchgeführt. Diese haben gezeigt, dass unter diesen Bedingungen am AC-System ein DC-Offset von bis zu 30,8 % von $E_{AC,rms}$ und am DC-System ein AC-Rippel von bis zu 12 % von E_{DC} hervorgerufen wird.

In den nachfolgenden Experimenten (Kapitel 8 bis 12) wird allerdings nicht zwischen den jeweiligen Kopplungsmechanismen unterschieden, sondern ausschließlich unterschiedlich hohe AC- und DC-Feldstärkeamplituden betrachtet.

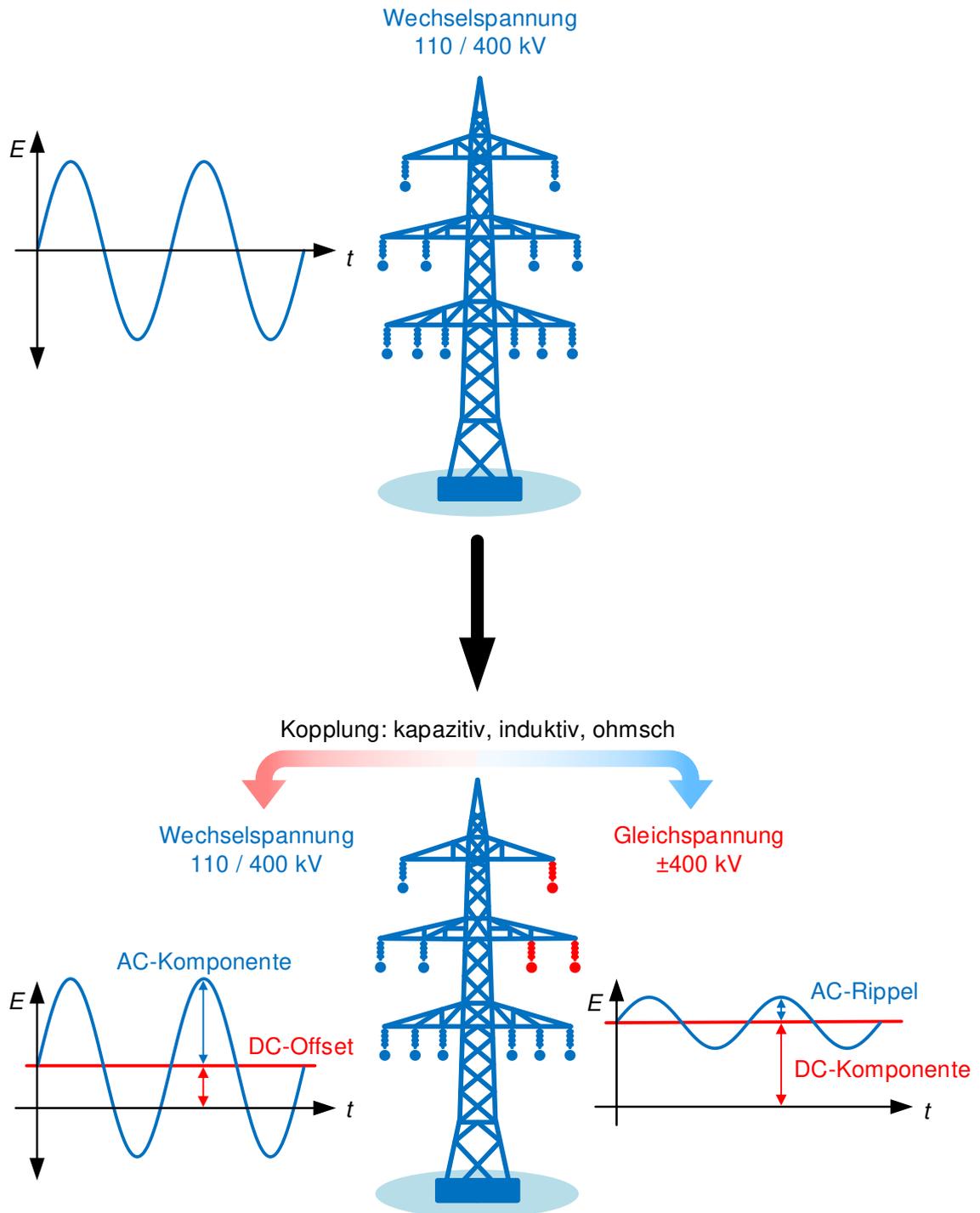


Bild 6.1.1: Umrüstung einer bestehenden AC-Freileitung zu einer Hybridfreileitung mit dazugehörigen Randfeldstärkeverläufen

6.2 Kapazitive Kopplung (Elektrostatiche Induktion)

Aufgrund des elektrischen Feldes zwischen zwei Elektroden unterschiedlichen Potentials werden über eine sogenannte Koppelkapazität Ladungen von einer Elektrode zur anderen verschoben. Diese Koppelkapazität ist direkt proportional zur Länge der parallel geführten Leitungen und verringert sich mit wachsendem Abstand zwischen den Leitern [42].

Unter hybriden Bedingungen wird der Randfeldstärke eines AC-Leiterseils ein negativer DC-Offset überlagert (Bild 6.1.1), wenn sich dieses im Einflussbereich eines positiven DC-Leiters befindet. Vice versa entsteht ein positiver DC-Offset im Einflussbereich eines negativen DC-Pols [43].

Die elektrischen Randfeldstärken der Pole des DC-Systems werden unter Hybridbedingungen mit einem AC-Rippel überlagert (Bild 6.1.1). Dieser AC-Rippel erhöht die maximale Randfeldstärke des DC-Leiters [44].

Durch diese Effekte könnten die Koronaentladungen und -verluste sowie das damit verbundene Geräuschemissionsverhalten beeinflusst werden, was es im Zuge der vorliegenden Arbeit zu untersuchen gilt.

6.3 Induktive Kopplung

Als induktive Kopplung wird in weiterer Folge die Spannung bezeichnet, welche gemäß des Faradayschen Gesetzes durch das zeitlich veränderliche, magnetische Feld aufgrund des AC-Betriebsstromes in das DC-System induziert wird. Diese induzierte Spannung ist abhängig vom elektrischen Wechselstrom im AC-System, der Länge der Freileitung und der Distanz zwischen AC- und DC-System. Je größer der Abstand zwischen den Systemen ist, desto geringer ist die Höhe der induzierten Spannung. Allerdings kann diese Kopplungsart laut *Ibrahim et al.* aufgrund der, im Vergleich zur Betriebsspannung, sehr geringen induzierten Spannung vernachlässigt werden [44].

Die induktive Kopplung ist allerdings laut [45] im Hinblick auf die dadurch hervorgerufene Stromwelligkeit im DC-System (stationärer Zustand) und im Falle eines Fehlers von Interesse. Durch die Induktion wird dem DC-Strom ein AC-Rippel überlagert, was zu einem Spannungsabfall an der Glättungsdrossel und aufgrund des rückwirkenden Effektes des Umrichters zu einer DC-Komponente im Umrichtertransformator führt [45].

6.4 Ohmsche Kopplung (Ionenstromkopplung)

Je nach geometrischer Anordnung der AC/DC-Hybridfreileitung kann ein Teil der vom DC-System produzierten Ionen in Richtung des AC-Systems driften. Dort werden diese absorbiert und tragen zum DC-Strom im Leiterseil und somit zum DC-Offset des elektrischen Mischfeldes bei. Genauso kann die DC-Komponente des hybriden Feldes am AC-System dazu führen, dass Ionen vom AC-System zum DC-System driften und dort einen Beitrag zum Koronastrom⁷ leisten [14].

Experimente an zwei parallelen Bündelleitern (AC und DC) haben gezeigt, dass der Einfluss der Ohmschen Kopplung erst deutlich zum Tragen kommt, wenn einer der beiden Leiter Koronaentladungen erzeugt. Tritt an beiden Leiterbündeln Korona auf, wird der Effekt der Ionenstromkopplung noch deutlich gesteigert. [46]

Die DC-Ströme im AC-System sind außerdem wegen des dadurch entstehenden DC-Offsets in Transformatoren von Interesse. Ein Offset des AC-Stromes in einer oder mehrerer Phasen des AC-Systems erzeugt einen magnetischen Fluss im Transformatorkern, wodurch der Sättigungsbereich erreicht werden kann und die Windungsströme ansteigen. Ist dies der Fall, werden die magnetischen Verluste, die mechanische Oszillationen und Geräuschemissionen erhöht sowie die Blindleistungsaufnahme verändert. Außerdem erfolgt eine Beschleunigung des Alterungsverhaltens des Transformators. [14, 47]

Die Ohio State University hat in mehreren Hybridversuchen in Bezug auf die Ionenstromkopplung herausgefunden, dass bei einer Steigerung der AC-Spannung die Koronaeinsatzspannung des DC-Leiters verringert und der Koronastrom des DC-Leiters erhöht wird. In der Literatur ist seit langem bekannt, dass AC-Leiter eine bestimmte Menge an DC-Ionen „aufsameln“, wenn diese in der Nähe eines koronierenden DC-Leiters sind [14, 48]. AC-Leiter können auch in Hybridanordnungen einen DC-Strom erzeugen, da ein naher DC-Pol einen DC-Offset im elektrischen Feld des AC-Leiters hervorruft, was dazu führt, dass mehr Teilentladungen einer Polarität auftreten. Dabei werden Ionen der entgegengesetzten Polarität aus Umgebung des AC-Leiters emittiert, sodass diese in der entgegengesetzten Sinushalbwelle nicht wieder zum AC-Leiter zurückkehren können und ihren *drift* in Richtung DC-Leiter fortführen. Dies bedeutet, dass eine Erhöhung der AC-Spannung zu einer Steigerung des DC-Koronastromes im AC-Leiter führt (Bild 6.4.1). [14]

⁷ Koronastrom bzw. Ionenstrom: Ionen einer Polarität, die den Nahbereich eines Leiters verlassen und gleichzeitige Absorption von Ionen anderer Polarität [14].

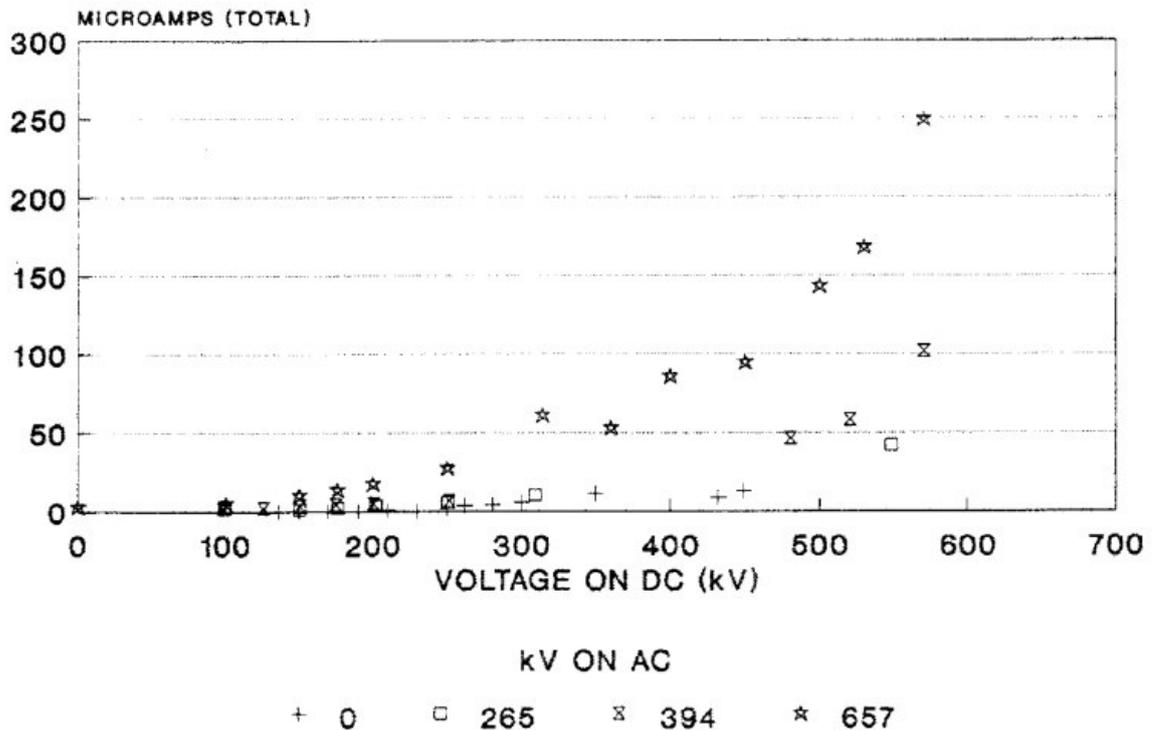


Bild 6.4.1: Messung des DC-Koronastromes im AC-Leiter [49]

6.5 Simulation und Berechnung

Im Zuge dieser Arbeit wurden Simulationen zum Kopplungsverhalten zwischen AC- und DC-Freileitungen durchgeführt. Dabei wurde mit dem, an der TU Graz entwickelten, Simulationsprogramm *OHL AN Analyzer* eine, in [50] vorgestellte, Maststruktur (Bild 6.5.1) nachgebildet. Die daraus resultierenden Feldstärkewerte wurden anschließend berechnet und mit den Ergebnissen aus [50] verglichen.

Sowohl das in [50] verwendete Feldsimulationsprogramm sowie der *OHL AN Analyzer* basieren auf dem CSM- bzw. CST-Verfahren [51, 52]. Diese Methode berücksichtigt ausschließlich die Effekte der kapazitiven Kopplung. Die induktive Kopplung, die Raumladungen und somit die Effekte der Ionenstromkopplung werden nicht berücksichtigt.

Diesbezüglich wurde allerdings von der ETH-Zürich das Programm *IMoC (Iterative Method of Characteristics)* entwickelt, welches die Ionenstromkopplung miteinbezieht. Die damit durchgeführten Simulationen einer realitätsnahen Mastkonfiguration haben gezeigt, dass durch diesen Kopplungseffekt ein bis zu doppelt so hoher DC-Offset, im Vergleich zu der hier verwendeten Simulationsmethode, zu erwarten ist. [41]

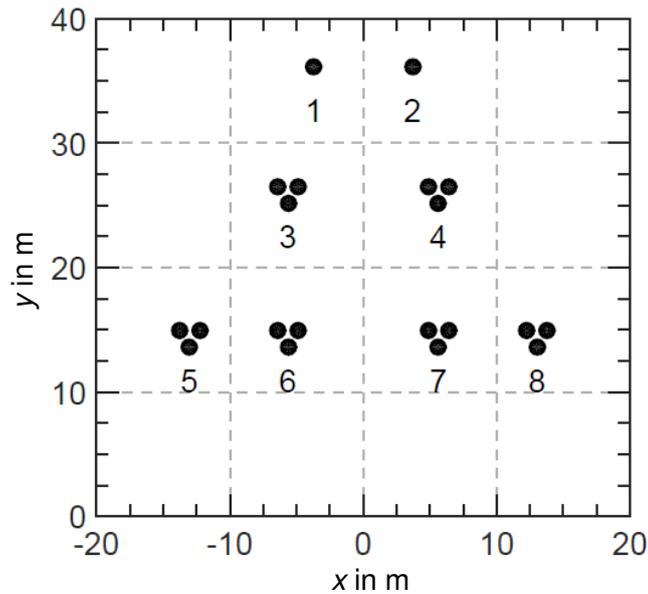


Bild 6.5.1: US-Design (US-C) der Leiteranordnung eines Hochspannungsmastes [50]

Tabelle 6.5.1: Werte für gegebene Mastkonfiguration aus [50]

Leiter		$U_{L-N,peak}$	x	y	n	a	d
Nr.	Art	in kV	in m	in m	-	in cm	in cm
1	GND 1	0	-3,70	36,14	1	-	1,1
2	GND 2	0	3,70	36,14			
3	DC +	500	-5,64	26,07	3	45,72	3,82
4	DC -	-500	5,64	26,07			
5	DC N	0	-13,03	14,49			
6	AC R	288	-5,64	14,49			
7	AC S	288	5,64	14,49			
8	AC T	288	13,03	14,49			

a Teilleiterabstand $U_{L-N,peak}$ Phasenspannung (Spitzenwert)
 d Teilleiterdurchmesser x horizontale Position des Bündelzentrums
 n Anzahl der Teilleiter y Höhe des Bündelzentrums über Grund

Da das MATLAB-Programm *OHL AN Analyzer* auf dem CSM-Verfahren basiert, ist eine sehr rasche Berechnung der maximalen lokalen elektrischen Randfeldstärke $E_{max,L}(t)$ jedes einzelnen Teilleiters zu definierten Zeitpunkten t möglich.

Mit dieser lokalen Randfeldstärke (entlang des Teilleiterumfangs variierend) und den daraus berechneten zeitdiskreten Feldstärken $E_{max}(t)$ kann schließlich das zeitliche und lokale Maximum E_{max} sowie Minimum E_{min} der Randfeldstärke jedes einzelnen Teilleiters bestimmt werden. Mit diesen beiden Werten und den Gleichungen aus Kapitel 4 ist es wiederum möglich, die Geräuschemissionswerte zu berechnen.

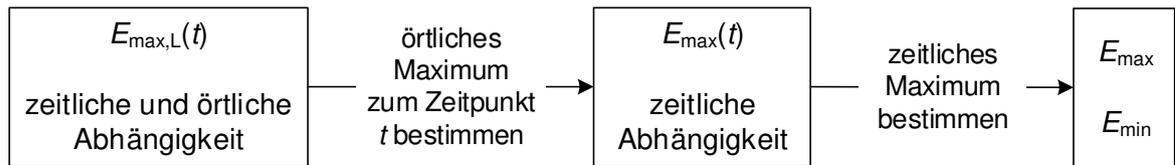


Bild 6.5.2: Ablauf zur Ermittlung von E_{\max} bzw. E_{\min}

Tabelle 6.5.2 und Tabelle 6.5.3 zeigen die ermittelten zeitlichen und lokalen Randfeldstärken der gegebenen Mastkonfiguration. Außerdem wurde der jeweils zugehörige Wechselanteil $E_{\max,AC}$ und Gleichanteil $E_{\max,DC}$ berechnet. Um einen besseren Vergleich zu ermöglichen, wurde die Formatierung der Originaltabelle aus [50] an Tabelle 6.5.3 angepasst.

Tabelle 6.5.2: Ermittelte Randfeldstärken gemäß [50] für gegebene Mastkonfiguration

Leiter		$E_{\max,AC}$	$E_{\max,DC}$	E_{\max}	E_{\min}
Nr.	Art	in kV/cm	in kV/cm	in kV/cm	in kV/cm
1	GND 1	0,88	-8,10	-	-
2	GND 2	1,44	8,10	-	-
3	DC +	1,47	23,83	-	-
4	DC -	0,99	-23,83	-	-
5	DC N	3,38	-1,67	-	-
6	AC R	19,38	-1,34	18,04	-20,72
7	AC S	20,48	1,35	22,33	-19,63
8	AC T	19,75	1,68	21,43	-18,07

Tabelle 6.5.3: Mit Simulationsprogramm *OHL AN Analyzer* ermittelte und berechnete Randfeldstärken

Leiter		$E_{\max,AC}$	$E_{\max,DC}$	E_{\max}	E_{\min}
Nr.	Art	in kV/cm	in kV/cm	in kV/cm	in kV/cm
1	GND 1	0,88	-8,29	-7,41	-9,18
2	GND 2	1,45	8,29	9,74	6,84
3	DC +	1,46	23,79	25,26	22,33
4	DC -	1,00	-23,79	-22,79	-24,79
5	DC N	3,40	-1,68	1,71	-5,08
6	AC R	19,29	-1,35	17,94	-20,64
7	AC S	20,77	1,35	22,12	-19,42
8	AC T	19,65	1,69	21,33	-17,96

Hierbei ist zu erkennen, dass die selbstermittelten Randfeldstärken um maximal 2,4 % (GND 1 und GND 2) von denen aus [50] abweichen, worauf die weiteren Berechnungen mit den selbstermittelten Werten aus Tabelle 6.5.3 durchgeführt wurden.

7 Geräuschemissionen bei Hybridfreileitungen

7.1 Besonderheiten aufgrund der wechselseitigen Kopplung

7.1.1 Einfluss des DC-Offsets auf das AC-System

Bei Hybridfreileitungen treten die Koronaeffekte von DC (Kapitel 3.3) und AC (3.4) parallel auf. Die gegenseitige Beeinflussung des elektrischen Feldes der AC- und DC-Systeme verursachen deutliche Änderungen im Korona- und Geräuschemissionsverhalten [41].

In [53] wurde eine signifikante Erhöhung der AC-Geräuschemissionen von bis zu 10 dB festgestellt, nachdem der negative DC-Pol unter Spannung gesetzt und dadurch ein positiver DC-Offset im Feld des AC-Systems hervorgerufen wurde. Vice versa wurde eine Dämpfung der AC-Geräuschemissionen nach Aktivierung des positiven DC-Pols erkannt. Eine weitere Hybrid-Testserie in [49] hat, für einen relativ geringen positiven DC-Offset ausgehend vom negativen DC-Pol, eine Steigerung der AC-Geräuschemissionen um 2-3 dB und eine geringe Verringerung aufgrund eines negativen Offsets ergeben. [8]

In aktuelleren Forschungsergebnissen [41] wurde allerdings eine Zunahme der Geräuschintensität bei den meisten betrachteten AC-Feldstärken und negativer Offset-Polarität festgestellt. Bei hohen AC-Randfeldstärken mit negativem Offset kann allerdings auch, wie in [53], ein geräuschreduzierender Effekt festgestellt werden, was mit dem reduzierten auftreten der intensiven, positiven Entladungen erklärt wird.

Nicht nur die Koronaaktivität, sondern auch die tonalen Komponenten des Geräuschemissionsspektrums werden laut [41] durch das Auftreten eines Offsets am AC-System beeinflusst. Versuche zu dieser Masterarbeit (Kapitel 12.2.2) bestätigen die Aussagen in [41], dass die $2f$ -Komponente (100 Hz) kaum durch einen Offset beeinflusst wird, sich allerdings ein deutlicher Anstieg der $1f$ -Komponente (50 Hz - Bild 7.1.1) zeigt.

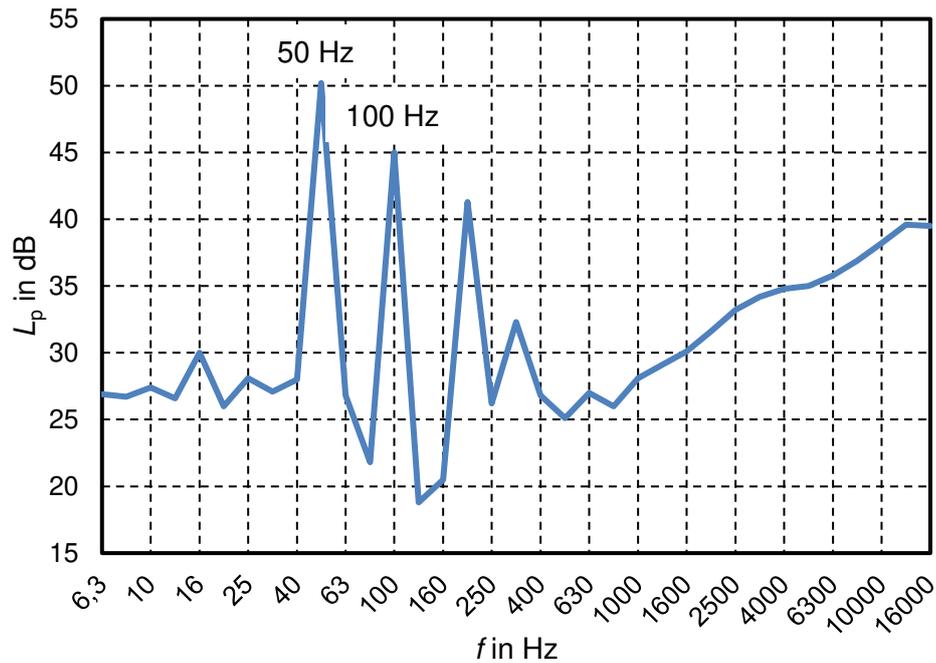


Bild 7.1.1: Beispiel für ein Frequenzspektrum der Geräuschemissionen eines AC-Systems einer Hybridfreileitung ($E_{AC} = 15,4 \text{ kV/cm}$; $E_{DC} = 5,8 \text{ kV/cm}$)

7.1.2 Einfluss des AC-Rippels auf das DC-System

Ein, der DC-Randfeldstärke überlagerter, AC-Rippel verursacht gemäß [41] eine Erhöhung des Geräuschemissionslevels des DC-Systems, was auf eine Steigerung der Teilentladungsaktivität zurückgeführt werden kann. Zusätzlich haben Versuche bei einer Regenrate von 3 mm/h in [41] und [44] gezeigt, dass die Zunahme des Geräuschpegels des positiven DC-Pols höher ist, als jene des negativen DC-Pols. Dies kann wiederum auf die, in der Literatur oft bestätigte Aussage zurückgeführt werden, dass die positiven Entladungen meistens vom lautereren, sogenannten „*Streamer*“-Typ und die negativen vom leiseren, dem sogenannten „*Trichel*“-Typ sind (siehe Kapitel 3.3.2) [7].

Allerdings wird auch hier, ähnlich wie bei der Beeinflussung des AC-Systems durch den DC-Offset (Kapitel 7.1.1), nicht nur das Verhalten der Koronaaktivitäten, sondern auch das Frequenzspektrum der Geräuschemissionen beeinflusst. Aufgrund des hierbei entstehenden, wenn auch geringen, Wechselfeldes, kann an DC-Systemen unter Hybridbedingungen das Auftreten tonaler Komponenten gemessen werden [44].

7.2 Geräuschemissionsprognose für Hybridfreileitungen

7.2.1 Grundlagen

In [53] wird die Verwendung der bereits existierenden Prognoseformeln für Berechnungen der Geräuschemissionen von AC-Leitern in Hybridkonfigurationen empfohlen. Allerdings müssen diese so modifiziert werden, dass der Spitzenwert (inklusive DC-Offset) anstatt des RMS-Wertes der maximalen elektrischen Feldstärke (Kapitel 4.2 und 4.3) berücksichtigt wird.

Eines der Probleme bei der Verwendung der bestehenden Prognoseformeln zur Berechnung der Geräuschemissionen durch Hybridfreileitungen ist, dass die AC-Gleichungen auf Regenwetter und die DC-Gleichungen auf Schönwetter basieren. Die Prognose der Hybridfreileitungen kann allerdings nur für Regen- oder Schönwetter erfolgen. Daher müssen die jeweiligen Ergebnisse der AC- bzw. DC-Gleichungen angepasst werden. Bei AC-Leitungen müssen zur Ermittlung der Schönwetterwerte 25 dB(A) vom berechneten Schlechtwetterwert L_{50} und zur Berechnung der Schlechtwetterwerte für DC-Leitungen vom Schönwetterwert 6 dB(A) subtrahiert werden. [53]

Bei den folgenden Berechnungsbeispielen wird das jeweilige „worst case“-Szenario für die Geräuschemissionen des AC- bzw. DC-Systems betrachtet.

7.2.2 Berechnungsbeispiel: AC-System einer Hybridfreileitung

Folgende Beispiele zeigen die Berechnung des Schalldruckpegels einer Wechselspannungsphase (AC R) aus der hybriden Mastanordnung von Kapitel 6.5.

Die hier dargestellten Berechnungsbeispiele wurden mit den Werten aus Tabelle 6.5.3 Leiter-Nr. 6 und den Gleichungen aus Kapitel 4 durchgeführt.

Da in diesem Fall $|E_{\min}| > E_{\max}$ ist, wird für alle Werte $E_{\max} = |E_{\min}|$ eingesetzt.

Da die negativen Trichel-Pulse geringere Geräuschemissionen verursachen als positive, müssen laut [34] für $|E_{\min}| > E_{\max}$ 4 dB vom Ergebnis aus Gleichung (1) oder (2) subtrahiert werden.

Berechnung nach EPRI (Electric Power Research Institute)

Bündeldurchmesser:

$$d_{\text{eq}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \cdot 2 = \frac{45,72}{\sqrt{3}} \cdot 2 = 52,79 \text{ cm}$$

Schalleistungspegel bei starkem Regen:

Für $n \geq 3$

$$L_{w5} = 20 \cdot \lg(3) + 44 \cdot \lg(3,82) - \frac{665 \cdot \sqrt{2}}{20,64} + \left(\frac{22,9 \cdot (3 - 1) \cdot 3,82}{52,79} \right) - 46,4 - 4$$

$$L_{w5} = -57,50 \text{ dB(A)}$$

Abstand zum Messpunkt:

Der Messpunkt befindet sich in diesem Fall in einer Höhe von 1,5 m und einem horizontalen Abstand von 15 m vom äußersten, rechten Leiterseilbündel.

$$D = \sqrt{(13,3 - x + 15)^2 + (y - 1,5)^2} = \sqrt{(13,3 + 5,64 + 15)^2 + (14,49 - 1,5)^2}$$

$$D = 36,09 \text{ m}$$

Schalldruckpegel bei starkem Regen:

$$L_{p5} = -57,50 + 114,3 - 10 \cdot \lg(36,09) - 0,02 \cdot 36,09$$

$$L_{p5} = 40,50 \text{ dB(A)}$$

Korrekturterm:

Für $3 \leq n \leq 8$

$$\Delta L = 10,4 - \frac{346,48 \cdot \sqrt{2}}{20,64 \cdot 3,82^{0,24}} + 8 \cdot (3 - 1) \cdot \frac{3,82}{52,79} = -5,65 \text{ dB(A)}$$

Schalldruckpegel bei nassen Leiterseilen:

In [50] werden die Werte der Schalldruckpegel für nasse Leiterseile L_{p50} (*wet conductor*) angegeben, weshalb diese auch hierbei berechnet wurden.

$$L_{p50} = 38,68 - 5,59 = 34,85 \text{ dB(A)}$$

AC-Gesamtschalldruckpegel bei nassen Leiterseilen:

$$L_{p50,ges} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{34,85}{10}} + 10^{\frac{44,71}{10}} + 10^{\frac{43,82}{10}} \right)$$

$$L_{p50,ges} = 47,54 \text{ dB(A)}$$

Berechnung nach BPA (Bonneville Power Administration)

Schalleistungspegel bei nassen Leiterseilen:

Für $n \geq 3$

$$L_{w50} = 55 \cdot \lg(3,82) + 120 \cdot \lg(20,64) + 26,4 \cdot \lg(3) - 140,7 - 4$$

$$L_{w50} = 57,67 \text{ dB(A)}$$

Schalldruckpegel bei nassen Leiterseilen:

$$L_{p50} = 57,67 - 5,8 - 11,4 \cdot \lg(36,09)$$

$$L_{p50} = 34,12 \text{ dB(A)}$$

AC-Gesamtschalldruckpegel bei nassen Leiterseilen:

$$L_{p50,ges} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{34,12}{10}} + 10^{\frac{43,38}{10}} + 10^{\frac{42,81}{10}} \right)$$

$$L_{p50,ges} = 46,38 \text{ dB(A)}$$

7.2.3 Berechnungsbeispiel: DC-System einer Hybridfreileitung

Folgende Beispiele zeigen die Berechnung des Schalldruckpegels des positiven DC-Pols (+ DC) aus der hybriden Mastanordnung von Kapitel 6.5 für schönes Wetter.

Die hier dargestellten Berechnungsbeispiele wurden mit den Werten aus Tabelle 6.5.3 Leiterbündel 3 und den Gleichungen aus Kapitel 4 durchgeführt.

Der Messpunkt befindet sich in diesem Fall in einer Höhe von 1,5 m und einem horizontalen Abstand von 15 m vom äußersten, linken Leiterseilbündel.

Berechnung nach EPRI (Electric Power Research Institute)

Schalleistungspegel bei Schönwetter:

Für $n \geq 3$

$$L_w = -252,38 + 124 \cdot \lg \left(\frac{23,79}{\sqrt{2}} \right) + 25 \cdot \lg(3,82) + 18 \cdot \lg(3)$$

$$L_w = -58,56 \text{ dB(A)}$$

Schalldruckpegel bei Schönwetter:

$$L_p = -58,56 + 114,3 - 10 \cdot \lg(33,24) - 0,02 \cdot 33,24$$

$$L_p = 39,86 \text{ dB(A)}$$

Berechnung nach BPA (Bonneville Power Administration)

Schalleistungspegel bei Schönwetter:

Für $n \geq 3$

$$L_w = 40 \cdot \lg(3,82) + 86 \cdot \lg(23,79) + 25,6 \cdot \lg(3) - 94,8$$

$$L_w = 59,07 \text{ dB(A)}$$

Schalldruckpegel bei Schönwetter:

Wie in 4.3.2 beschrieben, müssen für die worst-case-Betrachtung „Schönwetter im Sommer“ zusätzlich 2 dB zum Ergebnis von Gleichung (15) addiert werden.

$$L_p = 59,07 - 5,8 - 11,4 \cdot \lg(33,24) + 2$$

$$L_{p50} = 37,92 \text{ dB(A)}$$

7.2.4 Vergleich der Ergebnisse

Die berechneten Gesamtschalldruckpegel der einzelnen Systeme können nun mit jenen aus [50] verglichen werden.

Tabelle 7.2.1: Vergleich der ermittelten Gesamtschalldruckpegel mit den Werten von Tabelle 4 aus [50]

	EPRI		BPA	
	AC	DC	AC	DC
	L_{p50} in dB(A)	L_p in dB(A)	L_{p50} in dB(A)	L_p in dB(A)
Werte aus [50]	48,0	39,9	46,7	37,9
Eigene Berechnungen	47,54	39,86	46,38	37,92

Die berechneten Schalldruckpegel aus den elektrischen Feldstärken der eigens durchgeführten Simulation stimmen sehr gut mit denen aus [50] überein.

Zusätzlich wurde hierbei auch mit Hilfe von Gleichung (8) und den Erkenntnissen aus 7.2.1 der Gesamtschalldruckpegel der gegebenen Hybridfreileitung für schlechtes Wetter berechnet. Dabei müssen 6 dB von den berechneten DC-Schalldruckpegel L_p abgezogen werden, um von den Schönwetterwerten auf Schlechtwetterwerte schließen zu können.

Bild 7.2.1 zeigt den Verlauf des nach EPRI und BPA prognostizierten A-gewichteten Schalldruckpegels L_{pA} für feuchtes Wetter in Abhängigkeit des horizontalen Abstandes x zum Mastzentrum. Die hierzu benötigten Werte wurden anhand der Gleichungen aus Kapitel 4 und den Berechnungsbeispielen aus Kapitel 7.2 ermittelt.

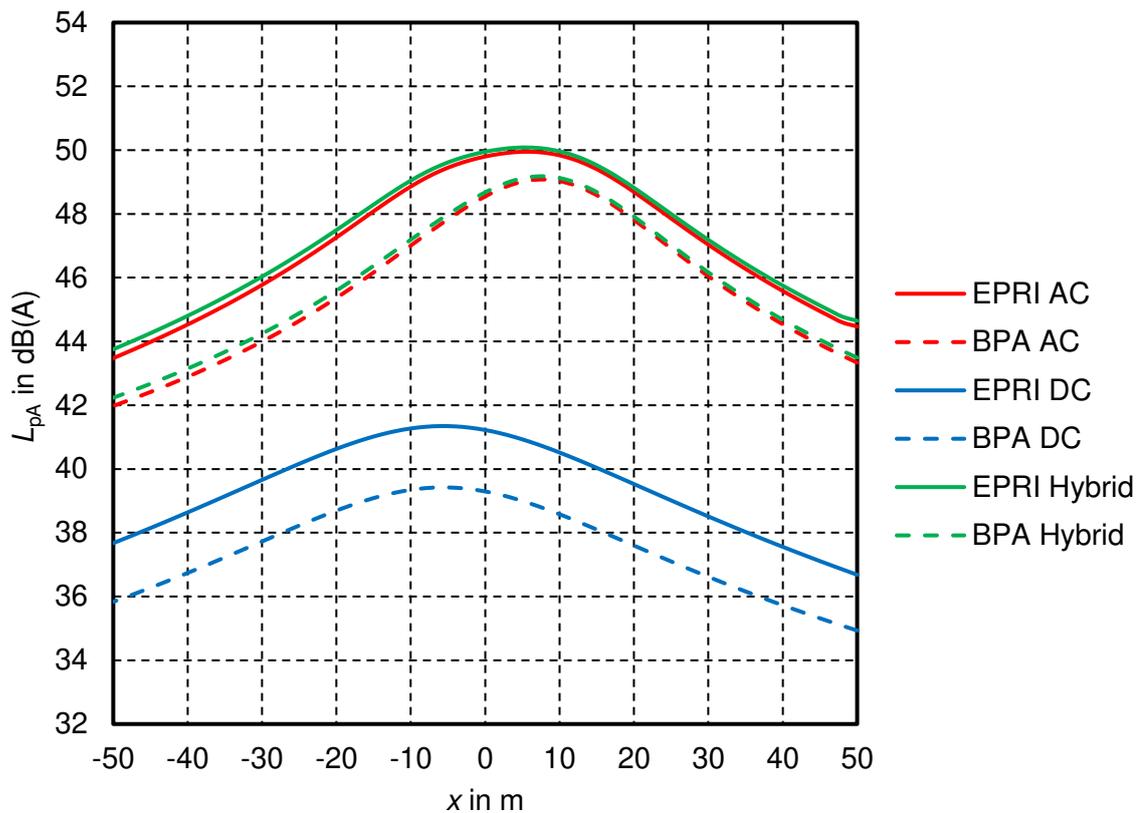


Bild 7.2.1: Prognostizierter horizontaler Verlauf des A-gewichteten Schalldruckpegels für die Mastkonfiguration laut Bild 6.5.1

Die Erwartungen, dass bei schlechtem Wetter die Geräuschemissionen des Wechselspannungssystems deutlich dominieren, wurden erfüllt. Dies zeigt sich darin, dass die jeweiligen Gesamtpegel der gegebenen Hybridfreileitung nur sehr geringe Abweichungen von den reinen AC-Pegeln aufweisen, wodurch die Aussage getätigt werden kann, dass bei schlechtem Wetter die Berechnung der Geräuschemissionen des DC-Systems vernachlässigbar sind. Vice versa verhält es sich mit den Pegeln des AC-Systems bei Schönwetter.

7.2.5 Beeinflussung der reduzierenden Effekte durch hydrophile Oberflächen

Es besteht die Vermutung, dass ein Unterschied zwischen blanken und oberflächenbehandelten Seilen besteht, solange die Koronaaktivität hoch genug ist, um signifikante Geräuschlevel zu verursachen. Dieser Schwellwert der elektrischen AC-Randfeldstärke (Koronaeinsetzfeldstärke) wird jedoch unter Einfluss eines DC-Offsets reduziert [41].

Im Allgemeinen behalten laut [41, 43] die Oberflächenbehandlungen an AC-Leiteseilen ihre Wirksamkeit auch unter Hybridbedingungen bei, wobei bei den dort durchgeführten Versuchen behandelte Seile weniger durch den DC-Offset beeinflusst werden, als unbehandelte. Im Gegensatz dazu haben Forschungen in [41, 44] gezeigt, dass ein AC-Rippel eine drastische Reduzierung des emissionsmindernden Effektes aufgrund von Oberflächenbehandlungen hervorruft.

Dieses Verhalten kann auf die Beeinflussung des Verhaltens von Wassertropfen an hydrophilen Oberflächen zurückgeführt werden, wobei die auftreffenden Wassertropfen an der Oberseite abfließen und sich an der Unterseite des Leiteseils sammeln (Kapitel 5.3). Unter Einfluss eines DC-Feldes schirmen die Raumladungen, welche aufgrund von Koronaentladungen an den Wassertropfen entstehen, benachbarte Wassertropfen ab. Sind nun aufgrund einer hydrophilen Oberfläche weniger Tropfen aktiv, dürften die Vorteile dieser Oberflächeneigenschaft reduziert werden. Ein zusätzlicher AC-Rippel könnte eine zusätzliche Schwankung der Raumladungen hervorrufen, was zu einer weiteren Reduzierung des Schirmungseffektes führen könnte. [41]

8 Ziele der Laborversuche

8.1 Fragestellungen

Ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung wurde in den Kapiteln 3 bis 7 aufgezeigt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Entstehungsursachen von Geräuschemissionen sowie die Effekte bei AC und DC bereits intensiv untersucht wurden. Außerdem wurden in Kapitel 6 und 7 einige Besonderheiten in Bezug auf Hybridfreileitungen aufgezeigt, mit welchen sich diese Arbeit auseinandersetzt.

Folgende Fragestellungen wurden bezüglich der Geräuschemissionen von Hybridfreileitungen behandelt:

- Welchen Einfluss haben unterschiedlich hohe AC-Rippel auf das Geräuschemissionsverhalten des DC-Systems?
- Welchen Einfluss haben unterschiedlicher DC-Offsets (pos. und neg.) auf das Geräuschemissionsverhalten des AC-Systems?
- Welche Beeinflussungen ergeben sich durch unterschiedliche Regenintensitäten?
- Behalten hydrophile Oberflächen ihre Wirksamkeit bei?
- Ändert sich das Abtrocknungsverhalten von AC- bzw. DC-Leitungen unter Hybridbedingungen?

8.2 Vorgehensweise

Um die unterschiedlichen Effekte des Geräuschemissionsverhaltens bei Hybridleitungen untersuchen zu können, wurden zahlreiche Laborversuche im Extremklimalabor und Nikola-Tesla-Labor der TU Graz durchgeführt. Dabei wurden Leiterseilprüflinge bei verschiedenen Witterungsverhältnissen und mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften untersucht.

Hierbei dienten die Messungen im Extremklimalabor als Vorversuche, um das Geräuschemissionsverhalten bei unterschiedlichen Mischfeldverhältnissen in Abhängigkeit der Randfeldstärke zu untersuchen sowie wichtige Erfahrungen mit den Messinstrumenten und -abläufen zu erhalten. Diesbezügliche Ergebnisdiagramme sind im Anhang C dargestellt und werden im weiteren Verlauf nicht weiter behandelt.

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden in den Laboren folgende Anzahl an Versuchen durchgeführt:

- Vorversuche im Extremklimalabor: 57 Prüfungen an 3 Prüflingen
- Nikola-Tesla-Labor: 112 Prüfungen an 2 Prüflingen

8.3 Erzeugung des AC/DC-Mischfeldes nach DIN EN 60060-1

Um die Mischfelder, welche durch die wechselseitige Kopplung der AC- und DC-Systeme bei Hybridfreileitungen entstehen (Kapitel 6), nachzubilden, wurden in beiden Versuchsreihen die Prüflinge (Kapitel 10.1) mit einer sogenannten Mischspannungen (AC und DC überlagert) beaufschlagt. Das Verhältnis zwischen AC- und DC-Anteil sowie die dazugehörigen Amplituden dieser Mischspannung musste geregelt werden können. Durch Variation der Spannungshöhen wurden Wechselfelder mit überlagerten, positiven und negativen DC-Offsets (Gleichfelder) sowie Gleichfelder mit überlagertem AC-Rippel (Wechselfelder) nachgebildet.

Zur Vermeidung, dass der Kern des Wechselspannungstransformators aufgrund des überlagerten Gleichstromes in Sättigung getrieben wird, muss bei dieser Art von Mischspannungserzeugung ein sogenannter Schutzkondensator C_{Schutz} zwischen Wechselspannungstransformator und Prüfling eingebaut werden (Bild 8.3.1). Damit wird verhindert, dass der Gleichanteil der Mischspannung auf die Hochspannungsseite des AC-Transformators übertragen wird.

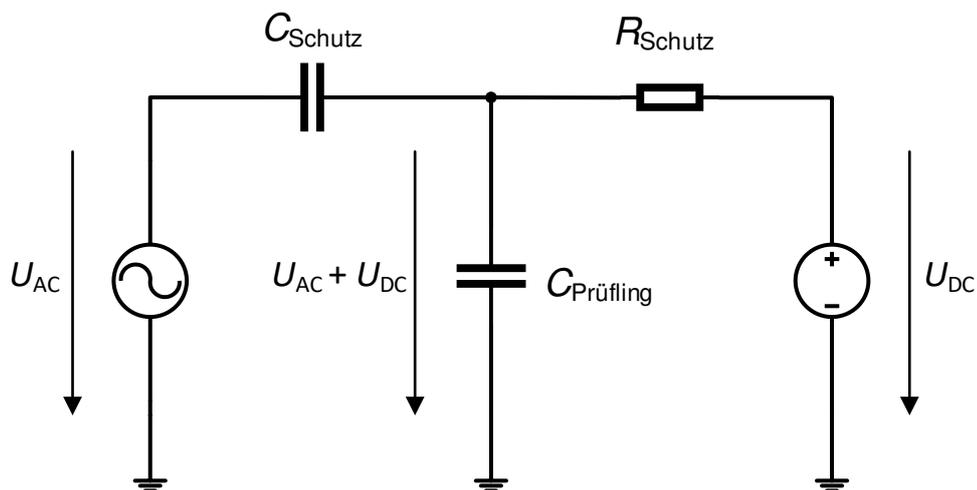


Bild 8.3.1: Grundschiung zur Erzeugung der Mischspannung

Aufgrund der Glättungskondensatoren in der Gleichspannungsanlage, welche eine hohe Kapazität aufweisen müssen, um eine Gleichspannung mit einer Welligkeit $< 3\%$ [54] zu erzeugen, entsteht eine sehr geringe Impedanz gegen Erde. Dies würde dazu führen, dass der,

durch den Wechselspannungstransformator getriebene, Wechselstrom nahezu unbegrenzt gegen Erde abfließen (Erdschluss) und auf einen sehr hohen Wert ansteigen kann. Um dies zu verhindern, wird zum Schutz des Transformators (Extremklimalabor) bzw. der Gleichspannungskaskade (Nikola-Tesla-Labor) ein hochohmiger Widerstand R_{Schutz} zwischen Prüfling und die jeweilige Gleichspannungsanlage geschaltet (Bild 8.3.1). Dieser Schutzwiderstand begrenzt den Wechselstrom und führt die überschüssige Energie in Form von Wärme ab. Die dadurch entstehende Temperaturerhöhung des ohmschen Widerstandes muss während der Versuche mit eingeschaltetem Wechselspannungstransformator ständig überwacht werden, um der Überhitzung und Zerstörung dieses Bauteil vorzubeugen.

8.4 Nachbildung des natürlichen Regens

Eines der Messziele bestand darin, das Geräuschemissionsverhalten von Leiterseilprüflingen mit unterschiedlich hydrophilen Oberflächen bei definierten Regenraten zu untersuchen. Im Zuge ähnlicher Versuche wurde bereits das Emissionsverhalten von Leiterseilprüflingen bei einer Regenrate von 3 mm/h erforscht [41]. Daher wurden für diese Masterarbeit Regenraten von 1,5 und 6 mm/h gewählt. Diese wurden mit Hilfe von Regensimulationsanlagen nachgebildet, mit denen Grazer Stadtwater auf den Prüfling aufgebracht wurde. Der Flüssigkeitsdurchfluss konnte hierbei mit einem Durchflussregler variiert werden. Um die störenden Aufprallgeräusche der künstlich erzeugten Regentropfen und die Schallreflexionen des Bodens zu minimieren, wurden unter den Prüflingen Kunststoffdämmmatten ausgelegt [55]. Mit diesen Maßnahmen war es möglich, die zahlreichen Messungen unter stets gleichen Bedingungen durchzuführen.

8.5 Durchgeführte Messungen

8.5.1 Geräuschemessung in Anlehnung an ISO 3744

Die ISO 3744 beschäftigt sich mit der Ingenieursmethode zur Berechnung des Schallleistungspegels anhand von, an mehreren Messpunkten gemessenen, Schalldruckpegeln im freien Feld über einer reflektierenden Fläche [56]. Dabei wird auf die Art der Schallquelle, auf die akustischen Umgebungsbedingungen sowie auf die normative Messung der Schalldruckpegel Rücksicht genommen.

Die Messung der Geräuschemissionen und die anschließende Auswertung wurde in Anlehnung an ISO 3744 durchgeführt. Die Abweichungen zu dieser Norm bestanden in der Verwendung von nur zwei Mikrofonen, wodurch die Genauigkeitsklasse „Grade 2“ nicht erreicht werden konnte.

Zur Messung des Geräuschemissionsspektrums des untersuchten Leiterseilbündels wurden zwei identische Systeme der Firma NTi, bestehend aus einem Mikrofon, einem XL2 Audio und Acoustic Analyzer und einem Verbindungskabel zwischen Mikrofon und XL2, eingesetzt (im Weiteren NTi rechts und NTi links genannt). Mit Hilfe von trittschallgedämpften Stativen wurden die Mikrofone in einer definierten Entfernung vom Zentrum des Leiterseilprüflings und einer Höhe von 1,5 m in einem geerdeten Metallkäfig aufgestellt. Dieser diente zur Abschirmung dieses Messinstrumentes vor dem auftretenden elektrischen Feld, wodurch die Entstehung von Teilentladungen an der Mikrofonspitze verhindert werden konnte.

Verwendete Audio-Messgeräte der Firma NTi Audio AG:

- XL2 Audio and Acoustic Analyzer
- Mikrofon M2230
- Vorverstärker MA220
- ASD Cable
- Software XL2 Data Explorer

8.5.2 Teilentladungsmessung nach IEC 60270

Um die vorhandenen Geräuschemissionen den Teilentladungen (TE) und Spannungsstufen zuordnen zu können, wurden zu allen Versuchen auch die auftretenden Teilentladungen sowie die dominanten Spannungen (ohne Überlagerungsanteil) gemessen. Die TE-Messung wurde gemäß IEC 60270 mit $f_C = 1$ MHz und $\Delta f = 9$ kHz durchgeführt [57]. Die hierbei verwendeten Komponenten sind in Tabelle 9.1.1 bzw. Tabelle 9.2.1 beschrieben.

Hierzu wird ein Koppelkondensator C_k parallel zum Prüfling eingebaut, welcher für die hochfrequenten TE-Pulse eine sehr geringe Impedanz darstellt. In Serie zum Koppelkondensator befindet sich eine Vierpol-Messimpedanz Z_M , welcher die TE-Impulse vom Hochspannungskreis entkoppelt. Zusätzlich beinhaltet die Messimpedanz einen Überspannungsschutz, welcher bei $90 V_{\text{peak}}$ auslöst und so zuverlässig die TE-Messausrüstung schützt [58]. Das, über Koaxialkabel mit der Messimpedanz verbundene, TE-Messsystem ist wiederum über Lichtwellenleiter mit einem Glasfaser-Buscontroller verbunden und kann damit über einen PC und einer dazugehörigen Software gesteuert werden.

In Bild 8.5.1 ist die Grundschaltung der TE-Messvariante dargestellt, welche in den Laborversuchen verwendet wurde.

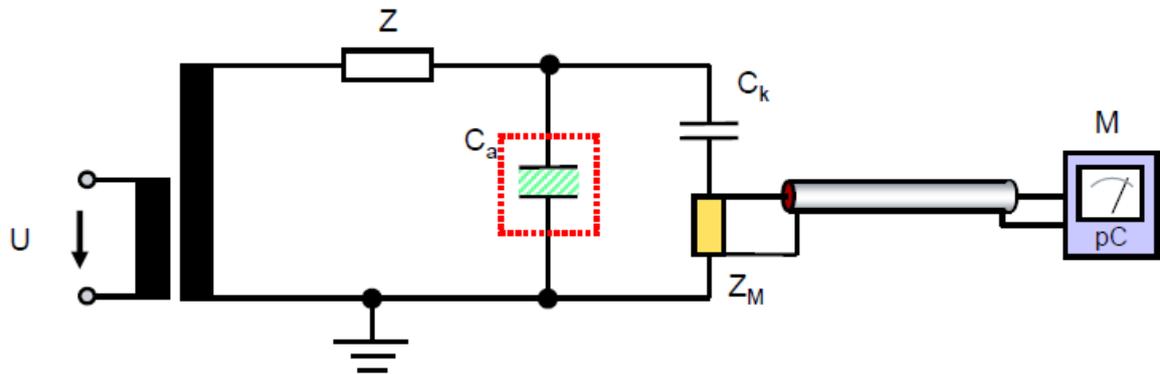


Bild 8.5.1: Grundschiung der verwendeten TE-Messanordnung (geerdeter Prüfling) [59]

C_a	Prüfling (Leiterseil - Erde)	C_k	Koppelkondensator
M	Messsystem	U	Versorgungsspannung
Z	Filter	Z_M	Vierpol-Messimpedanz

Um zu verhindern, dass die diversen Bauteile und Verbindungselemente während der Messungen störende Teilentladungen produzieren, wurden diese im Vorhinein bei der jeweils maximalen Spannungshöhe (AC + DC-Offset bzw. DC + AC-Rippel) mit Hilfe einer Koronakamera bzw. akustischen Ortungsinstrumenten lokalisiert und mit Westaflex-Schläuchen, Schirmringen und Schirmhauben abgeschirmt.

Verwendete TE-Messgeräte:

- OMICRON electronics GmbH
 - Vierpol-Messimpedanz CPL 542
 - TE-Messsystem MPD 600
 - Glasfaser-Buscontroller MCU 502
 - Software: MPD and MI 1.6.7.1

- Power Diagnostix Systems GmbH
 - TE-Kalibrator CAL1G

9 Aufbauten zu den Laborversuchen

9.1 Labor 1: Extremklimalabor

9.1.1 Allgemeiner Aufbau

Die ersten Versuche zu dieser Masterarbeit wurden im Extremklimalabor in Kombination mit der DC-Hochspannungshalle am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz durchgeführt. Dabei wurde der Schaltungsaufbau (Bild 9.1.1) mit dem vorhandenen MWB-Baukastensystem realisiert. Gesteuert werden die Transformatoren mit Hilfe von Regeltransformatoren vom Steuerraum des Extremklimalabors aus, wozu Kabelverbindungen zwischen den Räumen verlegt wurden.

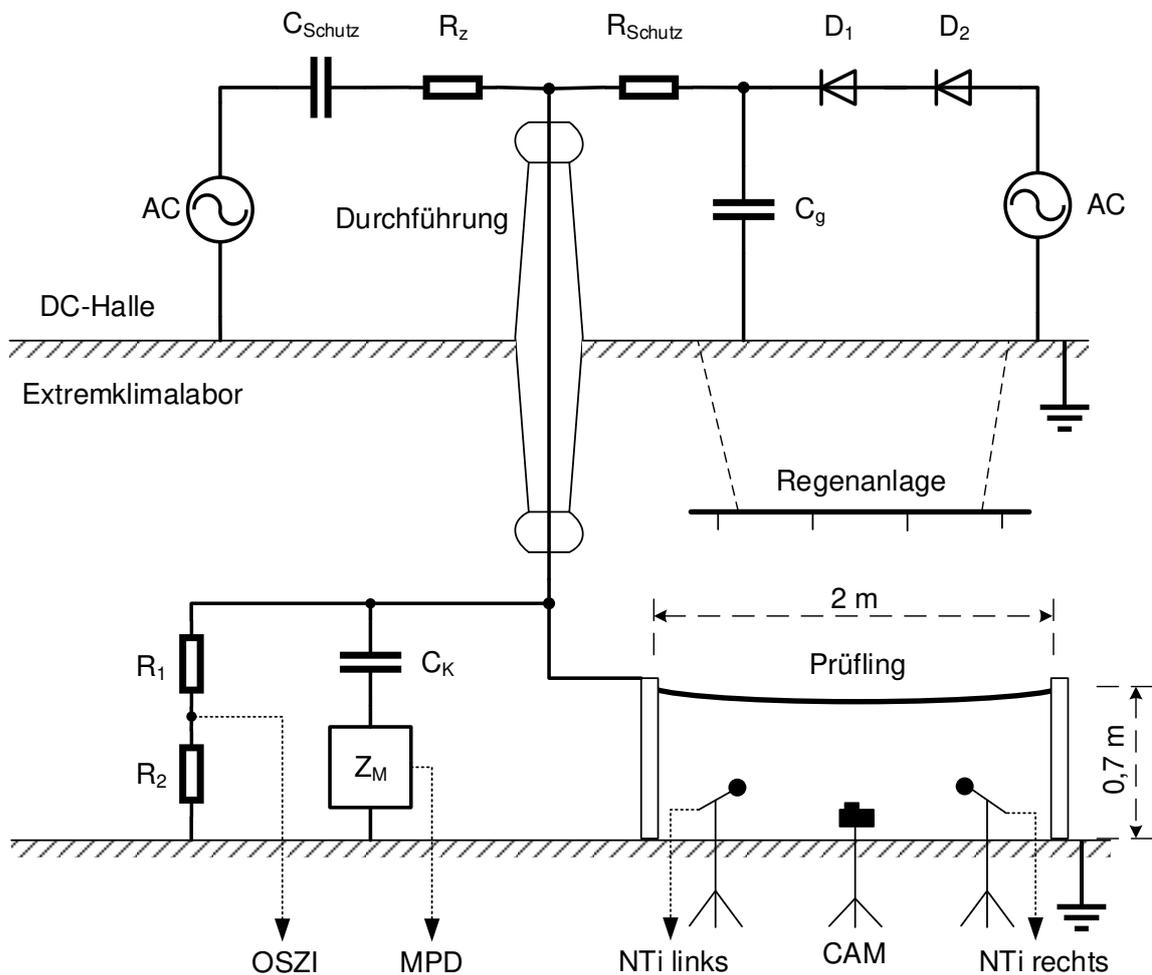


Bild 9.1.1: Schematische Darstellung des Laboraufbaus für Versuche im Extremklimalabor

Tabelle 9.1.1: Legende zu Bild 9.1.1 inkl. verwendeter Bauteilgröße

Formelzeichen	Name	verwendetes Bauteil
C_g	Glättungskondensator	100 pF
C_{Schutz}	Schutzkondensator	25 nF
R_1 / R_2	ohmscher Teiler	140 M Ω / 70 k Ω
R_z	Sperrimpedanz (ohmscher Widerstand)	50 k Ω
C_k	Koppelkondensator	100 pF
D_1 / D_2	Gleichrichterioden	140 kV, 500 k Ω
R_{Schutz}	Schutzwiderstand	10 / 140 M Ω
Z_M	Vierpol-Messimpedanz	CPL 542
CAM	Tageslichtkamera	CANON EOS 550D
MPD	TE-Messsystem	MPD 600
OSZI	Oszilloskop	Yokogawa DLM2054
NTi links/rechts	Schallpegelmesser	XL2 Audio and Acoustic Analyzer

9.1.2 DC-Hochspannungshalle

Akustische Optimierung

Um die Vibrationen der AC-Transformatoren zu dämpfen und somit nicht über das Mauerwerk in das darunterliegende Extremklimalabor zu übertragen, wurden Schwingungsdämpfer (*sound absorber*) zwischen dem jeweiligen Transformator und dem Fußboden angebracht.

Schaltungsaufbau – Beschreibung von Bild 9.1.2

Unter Verwendung der Hochspannungselemente des am Institut vorhanden MWB-Baukastensystems (Bild 9.1.2) konnte sehr einfach die zur Mischspannungserzeugung notwendige Schaltung realisiert werden. Beim Schaltungsaufbau war darauf zu achten, dass alle Bauteile korrekt geerdet sind und die, vom Hersteller vorgegebenen, Abstände aufgrund der Bauteilgröße und -länge eingehalten werden.

Mit dem Transformator (1) wird eine AC-Hochspannung erzeugt, welche über den Schutzkondensator C_{Schutz} (2) und einer Sperrimpedanz R_z (3) nahezu ohne Spannungsabfall an der Durchführung (9) anliegt.

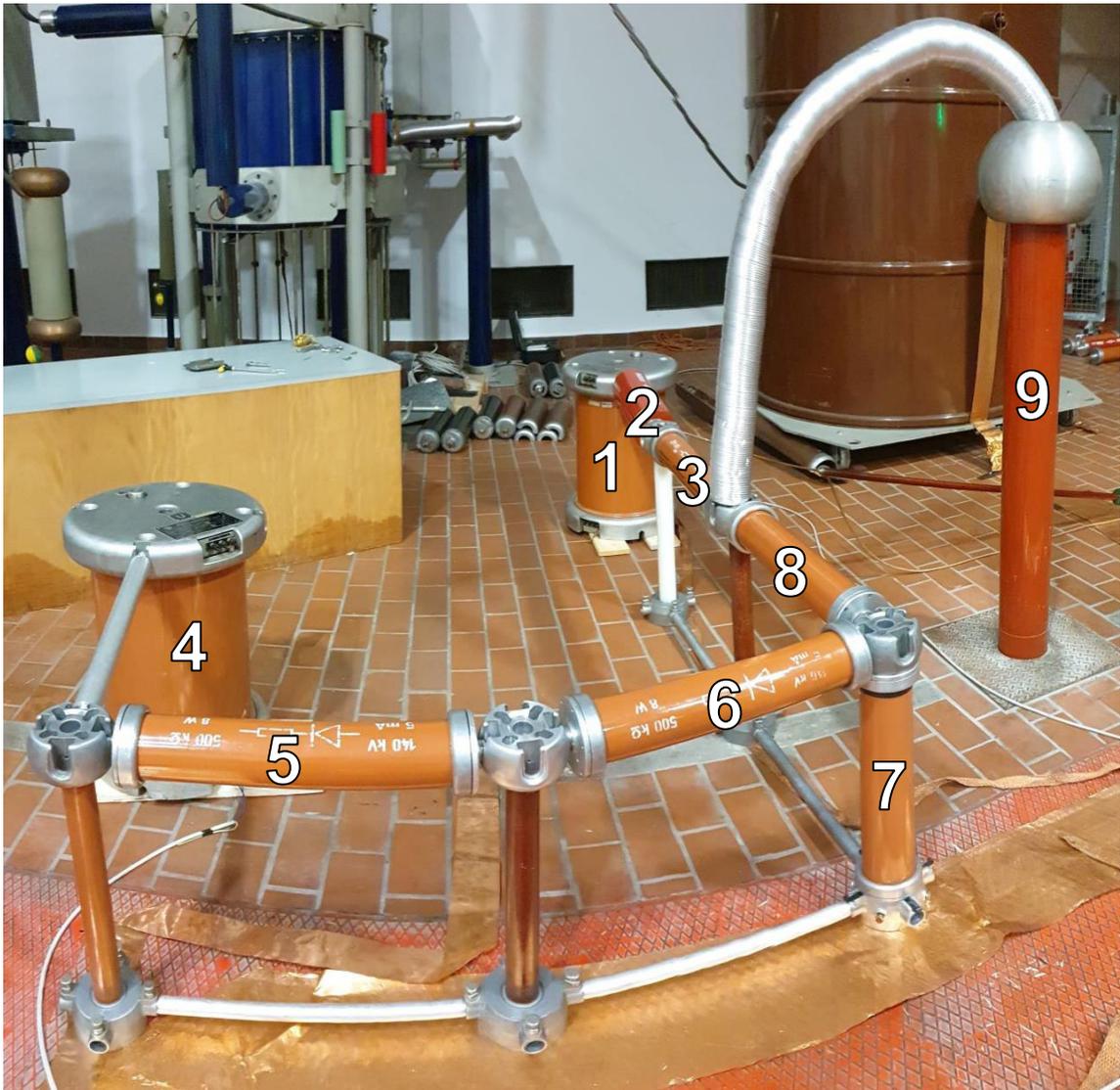


Bild 9.1.2: Foto des Versuchsaufbaus in der kleinen Hochspannungshalle

- | | |
|---|--|
| (1) AC-Transformator zur
Wechselspannungserzeugung | (5) Gleichrichterdiode D_1 |
| (2) Schutzkondensator C_{Schutz} | (6) Gleichrichterdiode D_2 |
| (3) Sperrimpedanz R_z | (7) Glättungskondensator C_g |
| (4) AC-Transformator zur
Gleichspannungserzeugung | (8) Schutzwiderstand R_{Schutz} |
| | (9) Durchführung ins Extremklimalabor |

Da zwischen Gleichspannungspotential (zwischen 7, 6 und 8) und sinusförmigen Wechselspannung am Transformator (4) die doppelte Potentialdifferenz auftritt, wurden zur Erzielung der Spannungsfestigkeit zwei baugleiche Dioden D_1 und D_2 (5 und 6) in Serie geschaltet. Die Glättung der, durch die Dioden erzeugten Halbwellen erfolgt mit Hilfe des Glättungskondensators C_g (7). Der Schutzwiderstand R_{Schutz} (8) hilft dabei, den sonst sehr hohen Wechselstrom über den Glättungskondensator zu begrenzen, wodurch R_{Schutz} sehr schnell an Temperatur gewinnt und ständig mit einer Wärmebildkamera überwacht werden muss (Kapitel 8.3).

Außerdem war es nötig diesen Schutzwiderstand zwischen DC-Spannungsfahrt mit AC-Rippel (10 M Ω) und AC-Spannungsfahrt mit DC-Offset (140 M Ω) zu wechseln. Mit $R_{\text{Schutz}} = 140 \text{ M}\Omega$ war es nicht möglich, die geforderte DC-Spannung von 100 kV zu erreichen (Längsspannungsabfall). Vice versa konnten mit $R_{\text{Schutz}} = 10 \text{ M}\Omega$ die AC-Spannungsfahrten nicht durchgeführt werden, da dieser Widerstand zu schnell überhitzte.

Die Umpolung der DC-Spannung konnte durch Umpolung (180°-Drehung) der Gleichrichterdiolen D_1 und D_2 realisiert werden.

Sicherheit

Da die Transformatoren in der DC-Hochspannungshalle vom Extremklimalabor aus gesteuert wurden, musste natürlich gewährleistet sein, dass sich während der Versuche keine Personen im Gefahrenbereich befinden. Daher wurde eine Webcam an einer geeigneten Position in der DC-Hochspannungshalle platziert, womit über eine Netzwerkverbindung dieser Bereich überwacht werden kann. Außerdem wurde der Gefahrenbereich mit Rollgittern abgesperrt sowie mit Gefahrenzeichen und –leuchten gekennzeichnet.

Die Temperaturüberwachung des Schutzwiderstandes R_{Schutz} erfolgte mit einer FLIR Wärmebildkamera, welche über eine USB-Schnittstelle mit einem PC verbunden wurde. Anschließend konnte auf diesen über eine Remoteverbindung zugegriffen werden, wodurch auch die Temperatur vom Steuerraum des Extremklimalabors aus überwacht werden konnte.

9.1.3 Extremklimalabor

In diesem 5 m x 4 m x 4 m großen Raum finden in der Regel Messungen an Hochspannungsbetriebsmitteln unter besonderen Klimabedingungen statt, wobei Temperaturen von -40 °C bis 80 °C bei einer Luftfeuchtigkeit von bis zu 95 % möglich sind [60]. An der Decke ist eine Durchführung installiert, welche eine elektrisch leitfähige Verbindung zwischen DC-Hochspannungshalle im darüber liegenden Stockwerk und dem Extremklimalabor ermöglicht.

Akustische Optimierung

In früheren Untersuchungen [55] wurde bereits Geräuschemissionsmessung von 2 m langen Leiterseilstücken im Extremklimalabor durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass dieser Raum in Richtung einer reflexionsarmen Messumgebung optimiert werden muss. Die ÖNORM EN ISO 3745 empfiehlt hierzu ein Prüfraumvolumen von mindestens dem 200-fachen Volumen der Schallquelle, was in diesem Fall problemlos erreicht wird. Aufgrund dessen wurde zur Optimierung der akustischen Bedingungen an sämtlichen Raumseiten sowie der Decke (mit Aussparung für die Durchführung) geraffter Bühnenmolton angebracht. Bühnenmolton besteht aus einem dicken (500 g/m²) und schwer entflammaren Vorhangstoff, welcher oft in der Veranstaltungstechnik Verwendung findet [55].

In Bild 9.1.3 sind außerdem blaue Kunststoffmatten zur Dämpfung der Geräusche, welche durch Aufschlagen der Wassertropfen auf den Boden entstehen, ersichtlich.



Bild 9.1.3: Foto des Versuchsaufbaus im Extremklimalabor

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| (1) Regenanlage | (5) Mitte: Koppelkondensator C_K |
| (2) Durchführung | Rechts: ohmscher Teiler R_1 / R_2 |
| (3) Kupferlitze in Westaflex-Schlauch | (6) Messimpedanz Z_M |
| (4) Leiterseilprüfling | (7) Messmikrofone in Schutzkäfigen |
| | (8) Tageslichtkamera |

Schaltungsaufbau – Beschreibung von Bild 9.1.3

Die, in der DC-Hochspannungshalle erzeugte, Mischspannung wurde über die Durchführung (2) in das Extremklimalabor geleitet. Dadurch konnte der Leiterseilprüfling (4) über eine, durch einen Westaflex-Schlauch gelegte, Kupferlitze (3) mit der Mischspannung versorgt werden. Das 2 m lange Leiterseilstück wurde an beiden Enden mit Schlauchschellen geklemmt und die 70 cm hohen Stützisolatoren aufgelegt.

Messaufbau anhand von IEC 60270 bzw. ISO 3744

Parallel zur Prüfkapazität (Leiteseil – Erde) wurde ein Koppelkondensator (5) mit serieller Messimpedanz (6) und ein ohmscher Teiler zur Messung der überlagerten Spannung (5 Rechts) installiert. Die Messimpedanz (6) wurde über Koaxialkabel mit dem TE-Messsystem verbunden, welches wiederum über LWL (Lichtwellenleiter) mit der MCU kommunizierte. Mit Hilfe der MCU und der dazugehörigen USB-Schnittstelle kann das TE-Messsystem über einen PC gesteuert werden. Da dieses auch über eine integrierte Spannungsmessung verfügt, war es möglich, auch die Prüfspannung mit dem TE-Messsystem aufzuzeichnen.

Zur Messung des DC-Offsets bzw. AC-Rippels wurde der ohmsche Teiler über Koaxialkabel mit einem Oszilloskop im Steuerraum des Extremklimalabors verbunden. Darauf konnte mit einem Maßstabsfaktor von 2000:1 der RMS-Wert der jeweiligen Spannungen angezeigt und über den Regeltransformator nachgeregelt werden.

Die Mikrofone zur spektralen Messung des Geräuschemissionsverhaltens (7) wurden in einer Entfernung von 1,5 m vom Leiteseilprüfling, einer Höhe von 1 m über dem Boden und einem Abstand von 0,5 m (links und rechts) der Leiteseilmitte platziert.

Sicherheit

Um ein unbedachtes Eintreten in das Extremklimalabor während eingeschalteten Transformatoren zu verhindern, wurde der Türkontakt mit den beiden Sicherheitskreisen verbunden. Dadurch war ein Einschalten bei offener Türe nicht möglich und die Spannungsversorgung wurde beim Öffnen der Türe unterbrochen.

9.2 Labor 2: Nikola-Tesla-Labor

Der grundlegende Schaltungsaufbau im Nikola-Tesla-Labor (Bild 9.2.1 und Bild 9.2.2) ist jenem in Kapitel 9.1 sehr ähnlich. Allerdings mussten hierbei, aus Gründen der Spannungsfestigkeit, zwei serielle Schutzkondensatoren verwendet werden. Außerdem waren eine Sperrimpedanz sowie eine Variation des Schutzwiderstandes nicht erforderlich. Weitere Abweichung sind lediglich in der Dimensionierung der einzelnen Komponenten zu finden.

Im Nikola-Tesla-Labor können grundsätzlich folgende Spannungshöhen erzeugt werden [60]:

- Wechselspannung: 1500 kV, 1500 kVA
- Gleichspannung: 1500 kV, 20 mA

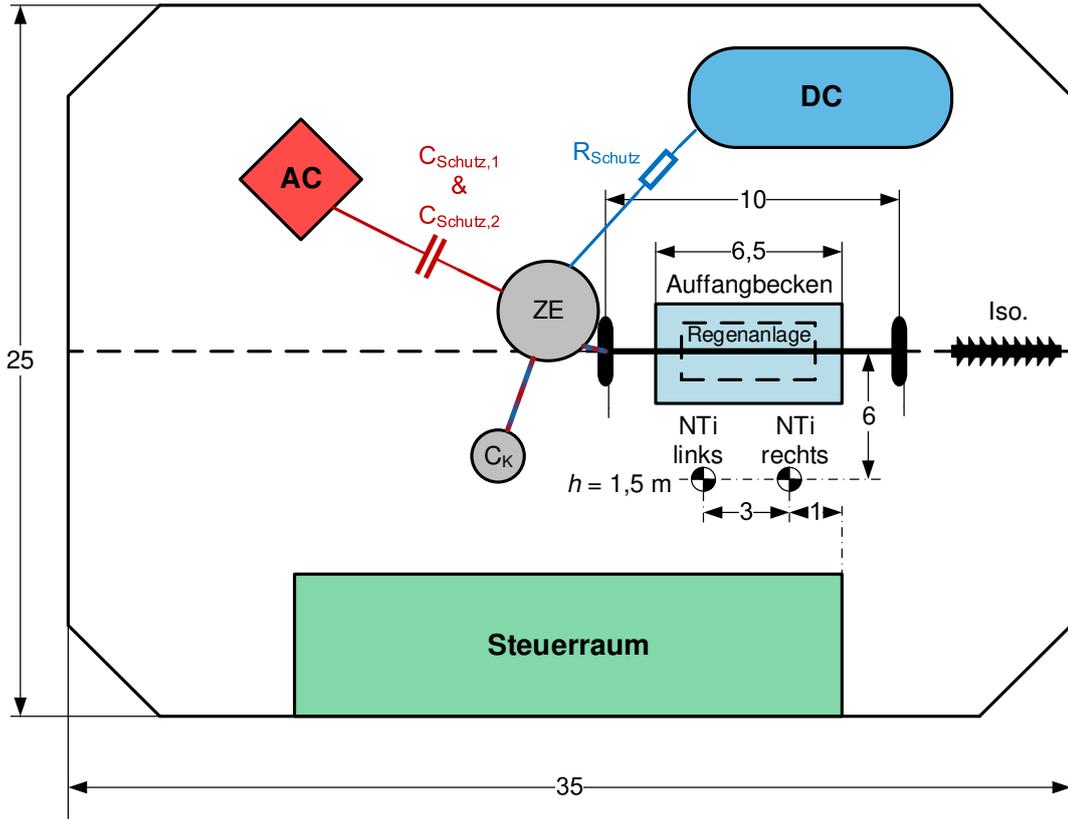


Bild 9.2.1: Schematische Darstellung des Laboraufbaus im Nikola-Tesla-Labor (Vogelperspektive)

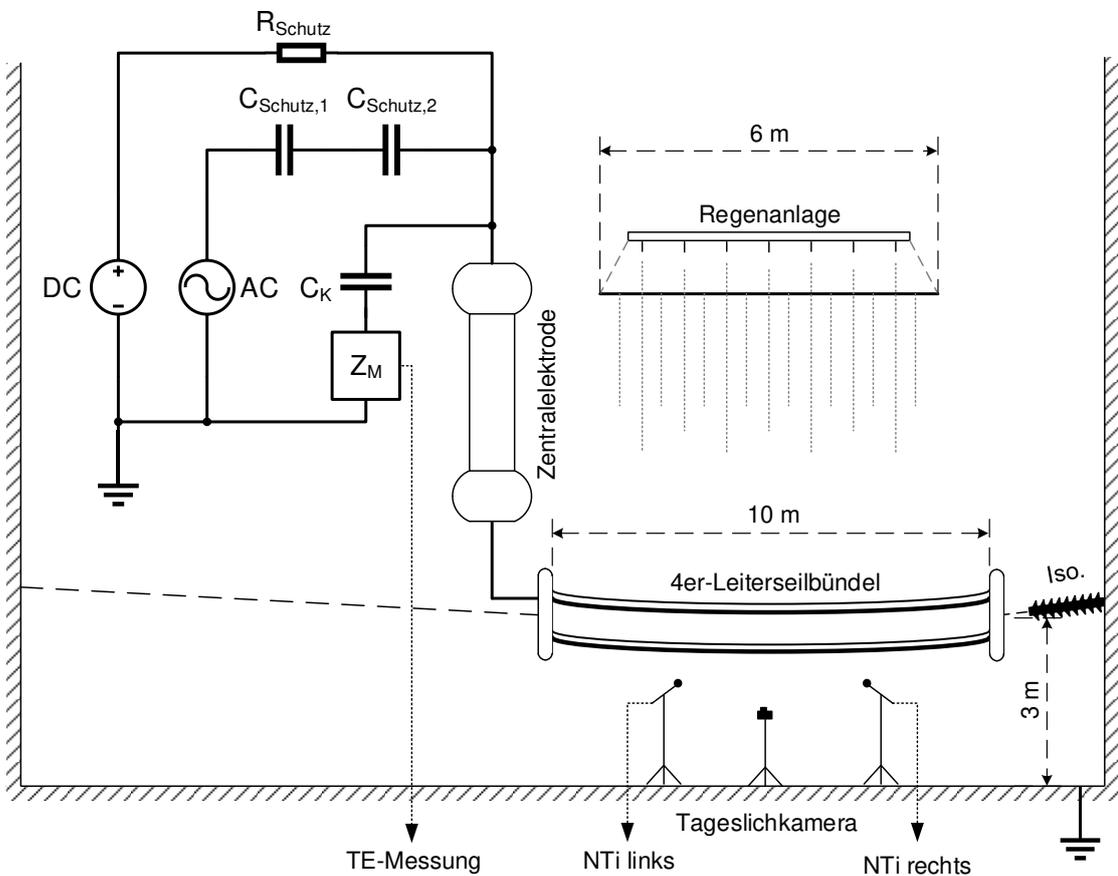


Bild 9.2.2: Schematische Darstellung des Laboraufbaus im Nikola-Tesla-Labor

Tabelle 9.2.1: Legende zu Bild 9.2.2 inkl. verwendeter Bauteilgrößen

Formelzeichen	Name	verwendetes Bauteil
AC	Wechselspannungskaskade	bis 1,5 MV
$C_{\text{Schutz},1}$	Schutzkondensator 1	200 nF
$C_{\text{Schutz},2}$	Schutzkondensator 2	200 nF
DC	Gleichspannungskaskade	bis $\pm 1,5$ MV
C_K	Koppelkondensator	1 nF
R_{Schutz}	Schutzwiderstand	15 M Ω
Z_M	Vierpol-Messimpedanz	CPL 542
CAM	Tageslichtkamera	CANON EOS 550D
Iso.	Isolator	MPD 600
MPD	TE-Messsystem	Yokogawa DLM2054
XL2 1 / XL2 2	XL2 Audio and Acoustic Analyzer	XL2 Audio and Acoustic Analyzer

Akustische Optimierung

Das Nikola-Tesla-Labor eignet sich aufgrund seiner Abmessungen besonders gut für Geräuschemessungen. Zusätzlich sind die Innenwände zur Geräuschkämpfung mit akustischen Dämmmaterial verkleidet, welche in die Halle ein- aber auch austretende Geräusche dämpft. Da die Geräuschemissionen der jeweiligen Leiterseilbündel unter schlechten Wetterbedingungen (Regen) gemessen wurden, musste auch hier, wie in 9.1.3, das sogenannte Regenrauschen mit Hilfe der blauen Kunststoffmatten minimiert werden. Hiermit war es möglich, das Hintergrundgeräusch bei einer Regenrate von 6 mm/h auf bis zu $L_{pA} = 25$ dB(A) zu reduzieren.

Schaltungsaufbau

Da in diesem Labor sehr ähnliche Versuche wie unter Kapitel 9.1 durchgeführt werden sollten, verhielt sich auch der Schaltungs- und Messaufbau sehr ähnlich dazu. Einzige Änderungen sind hierbei die Verwendung von zwei Schutzkondensatoren (2) aufgrund der Spannungsfestigkeit und das Entfallen der Gleichrichterschaltung.

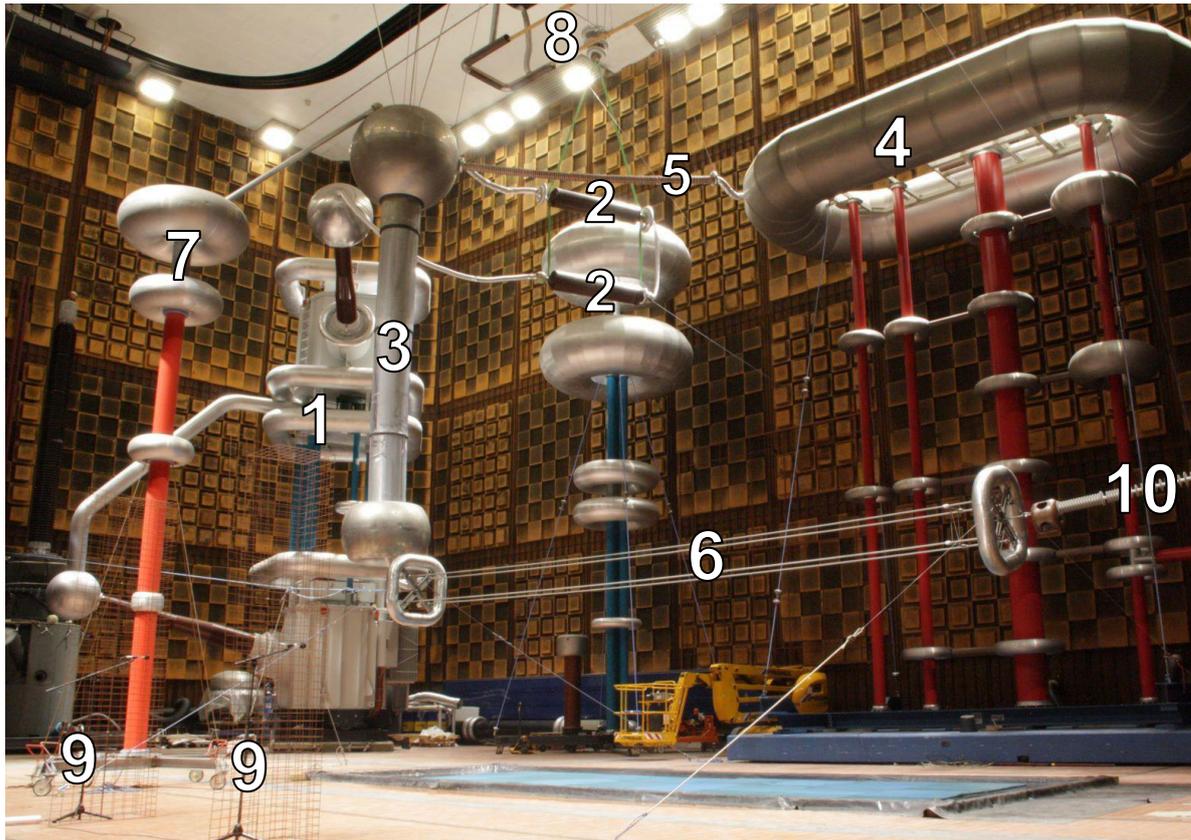


Bild 9.2.3: Foto des Versuchsaufbaus im Nikola-Tesla-Labor der TU Graz

- | | |
|---|-------------------------------------|
| (1) Wechselspannungskaskade | (6) 4er-Leiterseilbündel (Prüfling) |
| (2) Schutzkondensatoren $C_{\text{Schutz},1}$ und $C_{\text{Schutz},2}$ | (7) Koppelkondensator C_K |
| (3) Zentralelektrode (ZE) | (8) Regenanlage |
| (4) Gleichspannungskaskade | (9) Messmikrofone in Schutzkäfigen |
| (5) Schutzwiderstand R_{Schutz} | (10) Isolator |

Alle elektrischen Verbindungen zwischen den Bauteilen sind hierbei als Kupferlitzten in Westaflex-Schläuchen oder Aluminiumrohre ausgeführt.

Die 50-Hz-Wechselspannung wird an der 1,5-MV-Wechselspannungskaskade (1) erzeugt und über die Schutzkondensatoren $C_{\text{Schutz},1}$ und $C_{\text{Schutz},2}$ (2) an die ZE (3) übertragen. Auch die Gleichspannungskaskade (4) wurde wiederum über einen, an der TU Graz selbst hergestellten, Schutzwiderstand R_{Schutz} (5) mit der ZE (3) kontaktiert, welche wiederum mit dem Prüfling (6) verbunden wurde. Mit Seilen und Kettenzügen war es möglich, das Leiterseilbündel (6) unter der Regenanlage (8) auf einer Höhe von 3 m über dem Boden, gemessen vom Bündelzentrum, auszurichten. Die beiden Schutzelemente (2 und 5) wurden hierbei mit Kränen, Seilen und Bandschlingen an der Decke der Laborhalle befestigt.

Zur richtigen Montage des Prüflings und zur Einhaltung eines Teilleiterabstandes von 40 cm wurden Armaturen, wie Abstandhalter, Toroiden und Seilklemmen, verwendet. Der Durchhang konnte hierbei mit Hilfe eines Kettenzuges (gesamtes Bündel) und Justierschrauben (Teilleiter)

variiert werden. Um keine leitfähige Verbindung zwischen geerdeter Laborhalle und Prüfling herzustellen, musste dabei ein Kunststoffisolator (10) zwischen Kettenzug und Prüfling eingebaut werden. Die waagrechte Position um die Rotationsachse des Leiterseilbündels konnte mit Abspannseilen ausgerichtet werden.

Regenanlage

Die, an der TU Graz selbstgebaute, Regenanlage (Anhang B) besteht aus einem Tropfenspender sowie aus einem Metallgitter zur Zerstäubung und Verkleinerung der Tropfen. Um einen stets gleichmäßigen Wasserdurchfluss gewährleisten zu können, wurde diese Regenanlage mit einem, an der TU Graz selbst konstruiertem, Pumpensystem verbunden, welches wiederum mit Grazer Stadtwasser versorgt wird. Mit Hilfe des eingebauten Durchflussreglers können schließlich unterschiedlichste Regenintensitäten bei immer gleichbleibender Wasserqualität erzeugt und somit ein 6-m-langer Leiterseilabschnitt gleichmäßig beregnet werden. [61]

Messaufbau

Parallel zur Prüfkapazität (Leiterseil – Erde) wurde zur Messung der auftretenden Teilentladungen der Koppelkondensator C_K (7) über ein Aluminiumrohr mit der ZE (3) verbunden.

Zur Messung der Geräuschemissionen wurden die in 8.5.1 beschriebenen Mikrofone (9) in einer horizontalen Entfernung von 6 m zum Bündelzentrum, einer Höhe von 1,5 m über dem Laborboden und in einem Abstand von 3 m voneinander aufgestellt.

Die Spannungsmessung und -regelung erfolgte über die integrierten Messsysteme der AC- und DC-Anlage sowie mit Hilfe des TE-Messsystem.

Sicherheit

Das Nikola-Tesla-Labor verfügt über integrierte Sicherheitseinrichtungen. Dadurch werden die Spannungsversorgungen der AC- und DC-Anlage unterbrochen, sobald eine der Türen aus dem Steuerraum oder in die Laborhalle geöffnet oder einer der NOT-AUS-Schalter betätigt wird.

10 Messmethodik

10.1 Übersicht

10.1.1 Labor 1: Extremklimalabor

Bei der ersten Versuchsreihe im Extremklimalabor wurden insgesamt 57 Versuche bei einer Regenrate von 2 mm/h durchgeführt.

- Spannungsfahrten⁸
 - $U_{AC,rms}$: 0 – 100 kV in 5-kV-Schritten á 30 s
 - U_{DC} : 0 – 140 kV in 5-kV-Schritten á 30 s
- Prüflinge:
 - Blank neu: $d = 22,4$ mm, Oberfläche blank
 - Blank alt: $d = 22,4$ mm, Oberfläche gealtert
 - Glasgeperlt: $d = 22,4$ mm, Oberfläche glasperlenbestrahlt

Tabelle 10.1.1: Zusammenfassung der durchgeführten AC-Spannungsfahrten im Extremklimalabor

AC-Spannungsfahrten

U_{Offset} in kV	0	±10	±20	±30	±40	±50
Blank neu	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Blank alt	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Glasgeperlt	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gesamt: 33						

Tabelle 10.1.2: Zusammenfassung der durchgeführten DC-Spannungsfahrten im Extremklimalabor

DC-Spannungsfahrten

$U_{Rippel,rms}$ in kV	0	10	20	30	40	50
Blank neu	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Blank alt	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Gesamt: 24						

⁸ Aufgrund der begrenzten Spannungsfestigkeit der Durchführung musste darauf geachtet werden, dass eine maximale Höhe der Mischspannung von $\hat{U} = 100 \text{ kV} \cdot \sqrt{2}$ nicht überschritten wird.

10.1.2 Labor 2: Nikola-Tesla-Labor

Bei der zweiten Versuchsreihe im Nikola-Tesla-Labor wurden insgesamt 112 Versuche bei zwei unterschiedlichen Regenraten von 1,5 mm/h und 6 mm/h durchgeführt.

- Geprüfte Leiterseile
 - Neuseil (Standard)
 - Bezeichnung: 264-AL1/34-ST1A
 - Baujahr: 2019
 - Oberfläche: blank neu
 - Altseil (Hydrophil)
 - Bezeichnung: 264-AL1/34-ST1A
 - Baujahr: 1962
 - Oberfläche: blank gealtert

Tabelle 10.1.3: Details zur Versuchsserie „AC-Spannungsfahrten“ im Nikola-Tesla-Labor

AC-Spannungsfahrten		
	Regenrate 6 mm/h	Regenrate 1,5 mm/h
$U_{AC,rms}$ in kV	50 ... 250	
Spannungsstufen	10 kV á 30 s	
U_{Offset} in kV	0, ±25, ±50, ±75, ±100	
Gesamt: 36		

Tabelle 10.1.4: Details zur Versuchsserie „DC-Spannungsfahrten“ im Nikola-Tesla-Labor

DC-Spannungsfahrten		
	Regenrate 6 mm/h	Regenrate 1,5 mm/h
U_{DC} in kV	50 ... 350 und -50 ... -350	
Spannungsstufen	20 kV á 30 s	
$U_{Rippel,rms}$ in kV	0, 25, 50, 75, 100	
Gesamt: 40		

Tabelle 10.1.5: Zusammenfassung der durchgeführten Abtrocknungen im Nikola-Tesla-Labor

Abtrocknung (15 min)

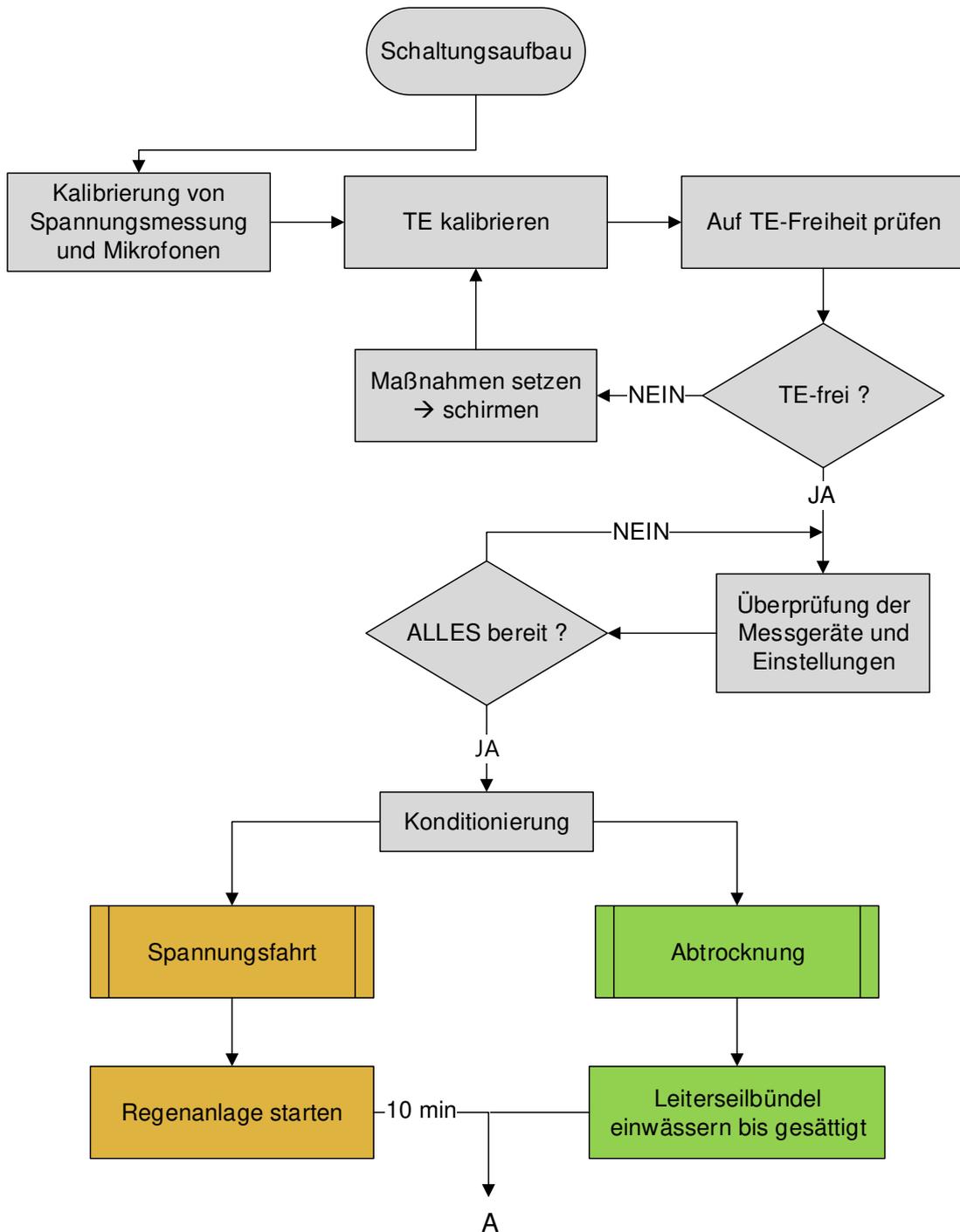
		U_{Rippel,rms} in kV			U_{AC,rms} in kV	
		0	50	75	170	220
U_{DC} in kV	-350	✓ ⁹	✓ ⁹	X	X	X
	-300	✓	✓	✓	X	X
	-200	✓	✓	X	X	X
U_{Offset} in kV	-50	X	X	X	✓	✓
	0	X	X	X	✓	✓
	50	X	X	X	✓	✓
U_{DC} in kV	200	✓	✓	X	X	X
	300	✓	✓	✓	X	X
	350	✓ ⁹	✓ ⁹	X	X	X
Gesamt: 36						

Die eingestellten Spannungswerte wurden anschließend auf die jeweiligen maximalen elektrischen Randfeldstärken umgerechnet. Da im Zuge dieser Masterarbeit Leiterseilprüflinge mit den gleichen Abmessungen sowie identische Bündelanordnungen wie in [41] verwendet wurden, konnte auch der Umrechnungsfaktor $k = 0,077 \text{ kV/cm}$ aus [41] entnommen werden.

⁹ Dieser Versuch wurde nur beim Altseil durchgeführt.

10.1.3 Flussdiagramm

Zur übersichtlichen Darstellung der Versuchsabläufe ist hier diesbezüglich ein Flussdiagramm dargestellt. Bei der Erstellung wurde darauf geachtet, dass alle wichtigen Schritte aufgezeigt wurden.



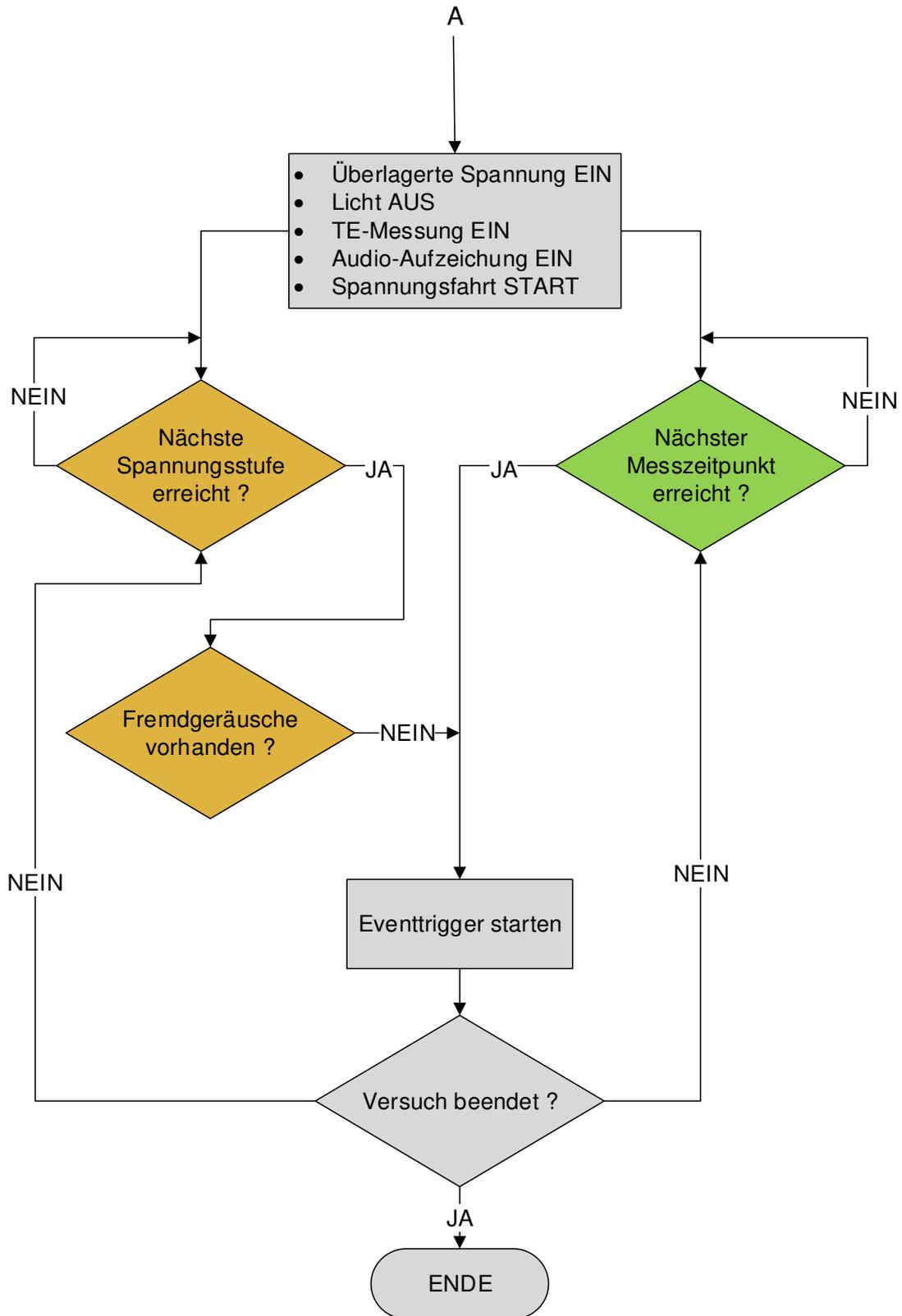


Bild 10.1.1: Flussdiagramm zur Beschreibung der Messabläufe

ORANGE: Ablauf bei Spannungsfahrten

GRÜN: Ablauf bei Abtrocknung

10.2 Messablauf

10.2.1 Methodik der Geräusch- und Teilentladungsmessungen

Geräuschmessung

Die Geräuschmessungen wurden mit den in Kapitel 8.5.1 beschriebenen Instrumenten durchgeführt. Mit Hilfe des *XL2 Audio and Acoustic Analyzers* war es möglich, zu jedem Messzeitpunkt einen sogenannten Eventtrigger zu starten. Dieser Eventtrigger konnte im Vorfeld auf eine definierte Zeitdauer – in diesem Fall 25 s – programmiert werden. Mit diesem war es deutlich einfacher, die spätere Auswertung für die einzelnen Spannungsstufen oder Abtrocknungszeitpunkte durchzuführen.

Ein Beispiel für die Audio-Aufzeichnung einer Messung ist in Bild 10.2.1 dargestellt. Hierbei beschreiben die grünen Flächen (Key 1) den Eventtrigger, welcher während der einzelnen Spannungsstufen aktiviert wurde. Zusätzlich sind hier der A-gewichtete, energieäquivalente Schalldruckpegel L_{Aeq} (blau) sowie die dazugehörige 50-Hz-Komponente (violett) erkennbar. Im unteren Bereich von Bild 10.2.1 ist eine dreidimensionale Darstellung des gesamten Frequenzspektrums ersichtlich, wobei die akustische Frequenz über der Systemzeit aufgetragen ist. Die Farben beschreiben hierbei die jeweilige Intensität (blau – gering, rot – hoch) der Frequenzkomponenten.

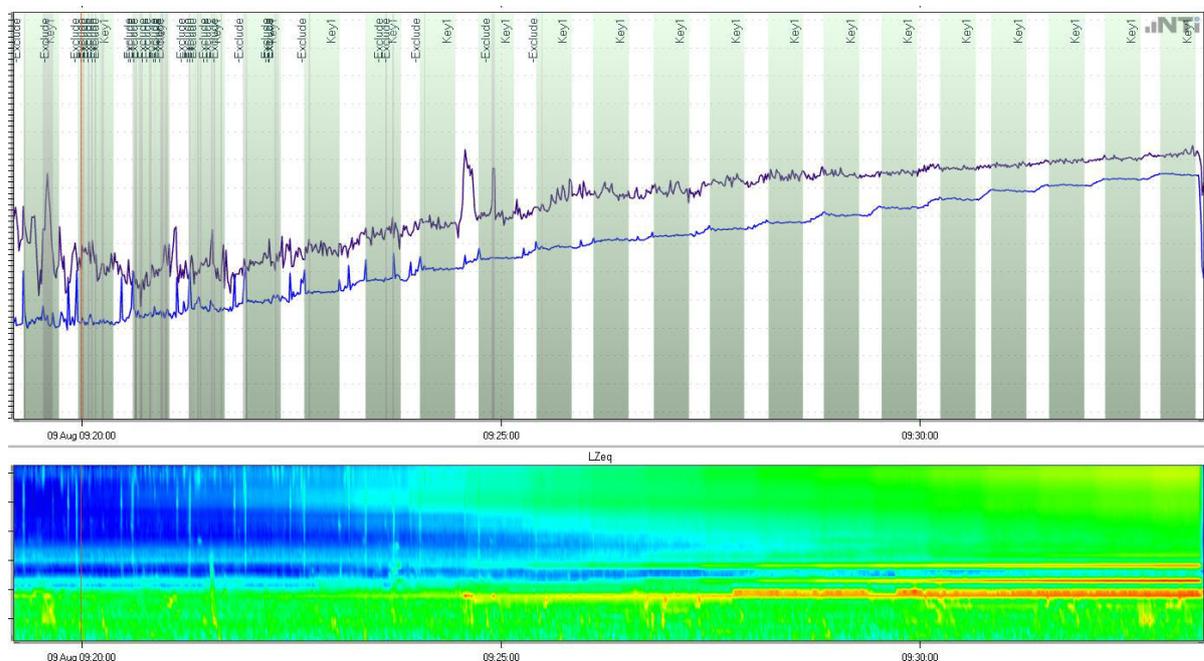


Bild 10.2.1: Beispiel: Audio-Stream der Geräuschmessungsdaten für AC-Spannungsfahrt, neues Leiterseil und Regenrate 6 mm/h
 $E_{AC} = 50$ bis 250 kV und $E_{DC} = +100$ kV

Teilentladungsmessung

Die TE-Messung nach IEC 60270 wurde mit den in 8.5.2 beschriebenen Instrumenten durchgeführt. Mit der Software *MPD and MI 1.6.6* konnten am Beginn der jeweiligen Versuche Aufzeichnungen der Teilentladungen gestartet werden.

In Bild 10.2.2 ist ein TE-Stream einer AC-Spannungsfahrt ($U_{AC} = 50 - 250$ kV) dargestellt. Im oberen Teil sind hier die einzelnen TE-Impulse als Punkte sowie eine Periode der aktuellen AC-Spannungsstufe dargestellt. Die Höhe der TE-Impulse beschreibt dabei deren Ladung und die unterschiedlichen Farben die TE-Anzahl in diesem Bereich. Im unteren Drittel werden zusätzlich die Spannungsstufen in RMS-Werten (rot) sowie der TE-Verlauf entlang der gesamten Versuchsdauer.

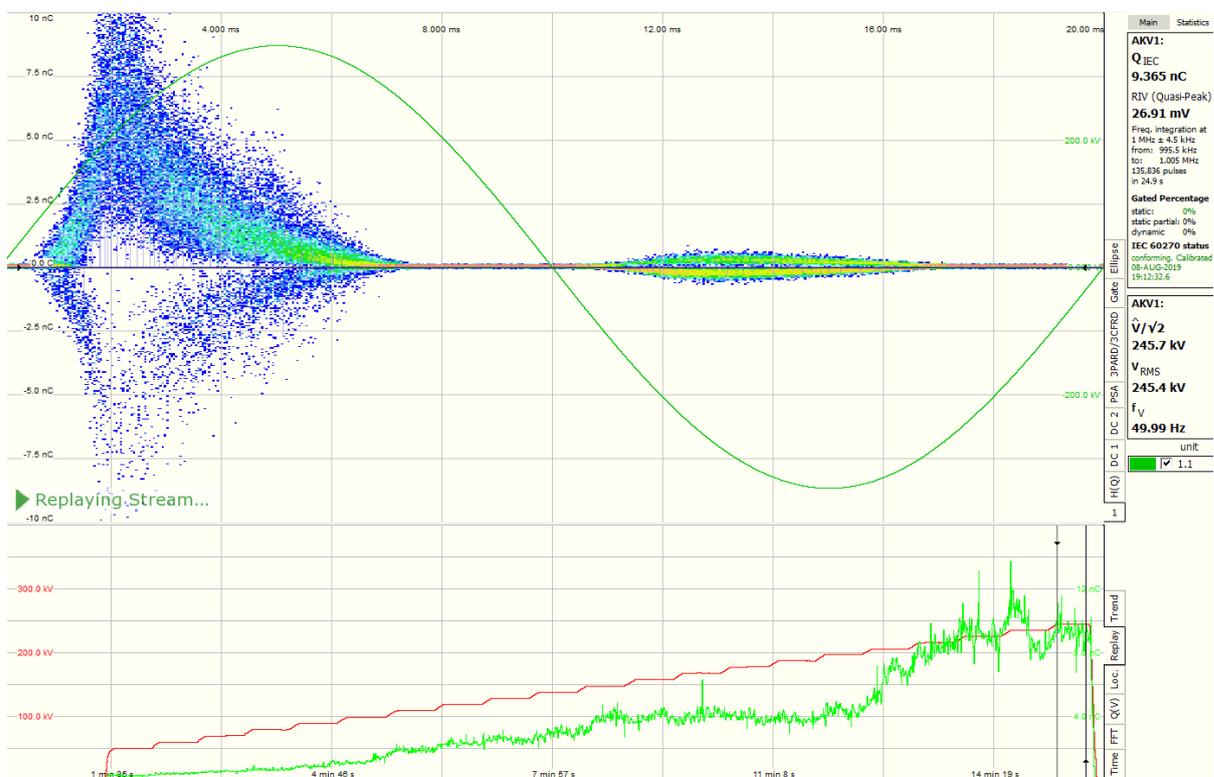


Bild 10.2.2: Beispiel: TE-Stream für AC-Spannungsfahrt, neues Leiterseil und Regenrate 6 mm/h
 $U_{AC} = 250$ kV ; $U_{DC} = +100$ kV ; $\Delta t = 25$ s

10.2.2 Prüfung auf TE-Freiheit und Konditionierung

Nach abgeschlossenem Schaltungsaufbau und erfolgreicher Kalibrierung der Spannungs-, Teilentladungs- und Geräuschemessung, musste das gesamte System auf Teilentladungsfreiheit geprüft werden.

Ziel der TE-Messungen war es, nur die, am nassen Leiterseil auftretenden, Teilentladungen zu untersuchen. Dazu musste der gesamte Schaltungs- und Messaufbau zuerst TE-frei sein. Dies bedeutet, dass im trockenen Zustand des Leiterseilprüflings keine Teilentladungen an Bauteilen auftreten dürfen. Wurden hierbei allerdings TE detektiert, wurde über die Regeltransformatoren die für diesen Versuch (AC-Spannungsfahrt oder DC-Spannungsfahrt) maximal zulässige Spannungshöhe eingestellt und mit einer Koronakamera visuell nach Teilentladungen am Aufbau im Extremklimalabor und in der kleinen Hochspannungshalle gesucht. Wurden schließlich TE vorgefunden, mussten weitere Maßnahmen bezüglich der Homogenisierung des elektrischen Feldes in diesem Bereich getroffen werden. Dies wurde solange wiederholt, bis der gesamte Aufbau TE-frei war.

Während des Aufbaus wurden die Leiterseilprüflinge auf Beschädigungen oder anhaftende Partikel untersucht und im Bedarfsfall davon befreit. Da es allerdings immer wieder dazu kommt, dass beispielsweise kleinste Fasern übersehen werden können, erfolgt vor Messbeginn zusätzlich eine Konditionierung. Hierzu wurde eine AC-Spannung von $U_{AC,rms} = 300 \text{ kV}$ für 5 min angelegt, wodurch diese eventuellen Unreinheiten, durch die erzeugte Entladungsenergie, verbrannt und somit entfernt werden konnten.

10.2.3 Messung der Hintergrundgeräusche

Für die spätere Auswertung der Messergebnisse war es nötig, die von Prüf- und Regenanlage ausgehenden Hintergrundgeräusche terzspektral aufzunehmen. Die daraus resultierenden Hintergrundschalldruckpegel können anschließend von den, während den Versuchen gemessenen, Schalldruckpegeln subtrahiert werden, wodurch schließlich die, rein vom Leiterseilbündel emittierten, Schalldruckpegel berechnet werden können (Fremdgeräuschkorrektur).

Diesbezüglich wurden Spannungsfahrten ohne kontaktierten Prüfling mit AC- und DC-Anlage durchgeführt und die Geräuschemissionen, wie in 10.2.1 beschrieben, aufgezeichnet. Die hierbei erhaltenen Ergebnisse werden maßgeblich vom niederfrequenten Brummen des AC-Transformators bestimmt und somit in weiterer Folge als „*Trafobrummen*“ bezeichnet.

Für die Hintergrundgeräusche ist allerdings auch das sogenannte „*Regenrauschen*“ verantwortlich, welches aufgrund der Tropfenaufschläge am Leiterseilbündel und, trotz der geräuschreduzierenden Maßnahmen, am Boden entstehen. Diese unterscheiden sich bei den jeweiligen Regenraten. Hierzu wurden kurze, 30-sekündige Geräuschemessungen unter künstlichem Regen ohne Spannung durchgeführt.

10.2.4 Spannungsfahrten

Um die Abhängigkeit der Geräuschemissionen bei unterschiedlichen AC- und DC-Randfeldstärken zu untersuchen wurden Spannungsfahrten für alle zu betrachtenden Überlagerungsspannungen und Regenraten durchgeführt. Diese wurden zur einfacheren Vergleichbarkeit der beiden Leiterseiltypen mit hydrophiler und Standardoberfläche so gewählt, dass in beiden Fällen das Grundrauschen im niedrigen sowie das Sättigungsverhalten im hohen Feldstärkebereich ersichtlich sind. Da bei den DC-Versuchen anhand der Ad-hoc-Werte kein Sättigungsbereich festgestellt werden konnte, wurde die maximale Prüfspannung hierbei durch die Isolationsfestigkeit des Gesamtsystems begrenzt. Daher ist in den diesbezüglichen Ergebnissen kein Sättigungsverhalten der Geräuschemissionen erkennbar.

Die Spannungsfahrten wurden laut Tabelle 10.1.3 und Tabelle 10.1.4 durchgeführt, wobei jede Spannungsstufe für 30 Sekunden gehalten und innerhalb dieser Stufen der Eventtrigger sowie die Auslösung der Tageslichtkamera gestartet wurde. Mit Hilfe der Instrumente zur Geräuschemessung war es auch möglich, die Aufzeichnungen live und verstärkt mitzuhören, wodurch während eventuell auftretenden, langen Störungsgeräuschen die jeweilige Spannungsstufe gehalten und der Start des Eventtriggers wiederholt werden konnte. Kurze Störungen innerhalb des Eventfensters konnten in der anschließenden Auswertung entfernt werden.

10.2.5 Abtrocknungen

Für die Untersuchung des jeweiligen Abtrocknungsverhaltens aus Tabelle 10.1.5 wurde die erforderliche AC- und DC-Spannung und die Versuchsdauer auf 15 min eingestellt. Um nun eine Abtrocknung des Leiterseilbündels realitätsnah simulieren zu können, war es nötig, vorher das gesamte Bündel ausreichend mit Grazer Stadtwasser zu sättigen. Ist diese Flüssigkeitssättigung eingetreten, musste der Versuch schnellstmöglich gestartet werden, um eine Verflüchtigung des aufgetragenen Wassers vor Messbeginn zu minimieren.

Die Messung erfolgte schließlich für eine Dauer von 15 min, wobei das Eventfenster des *XL2 Audio and Acoustic Analyzers* jeweils in Zeitabständen von einer Minute gestartet wurde.

11 Auswertung

11.1 Auswertung der Geräuschmessungen

11.1.1 Eliminierung von Störgeräuschen

Bei Geräuschmessungen werden sehr häufig störende Umgebungs- bzw. Hintergrundgeräusche (zufallende Türen, Flugzeuggeräusche, Vogelgezwitscher, etc.) mitaufgezeichnet. Daher gilt die Nachbearbeitung dieser Audio-Aufzeichnungen als essenzieller Teil der Geräuschauswertung. Im Zuge dieser Masterarbeit mussten alle Spannungsfahrten, Abtrocknungen sowie Hintergrundgeräuschmessungen für beide Messmikrofone separat abgespielt, auf eventuelle Störungen untersucht und diese aus der Bewertung genommen werden. Dies wurde mit Hilfe der Software *XL2 Data Explorer* realisiert, welche es ermöglichte, dass durch Verwendung eines sogenannte „Exclude-Markers“ die markierten Abschnitte (Bild 10.2.1 – grau) bei der späteren Ermittlung der Schalldruckpegel nicht berücksichtigt wurden. Anschließend konnten als Ergebnis die energieäquivalenten Schalldruckpegel (im Weiteren als Schalldruckpegel bezeichnet) von 36 Terzbändern (6,3 bis 20.000 Hz) in einer vorbereiteten Excel-Datei als Rohdaten gespeichert werden.

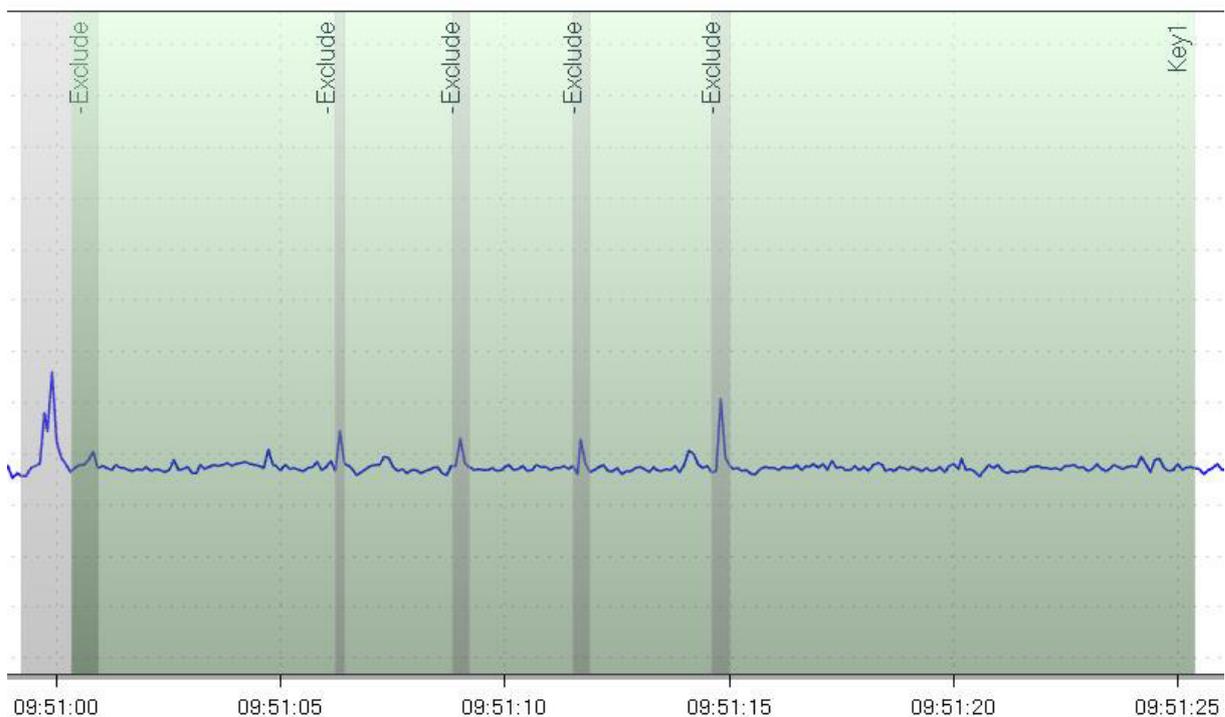


Bild 11.1.1: Ausschnitt aus Bild 10.2.1 zur Beschreibung der Störgeräuscheliminierung

11.1.2 Flussdiagramm zur Berechnung des Schalleistungspegels gemäß ISO 3744

Das hier dargestellte Flussdiagramm dient zur übersichtlichen Darstellung des Berechnungsvorganges gemäß ISO 3744 [56]. Alle benötigten Eingangsparameter sind in Tabelle 11.1.1 aufgelistet. Der detaillierte Berechnungsablauf wird in Kapitel 11.1.3 erläutert.

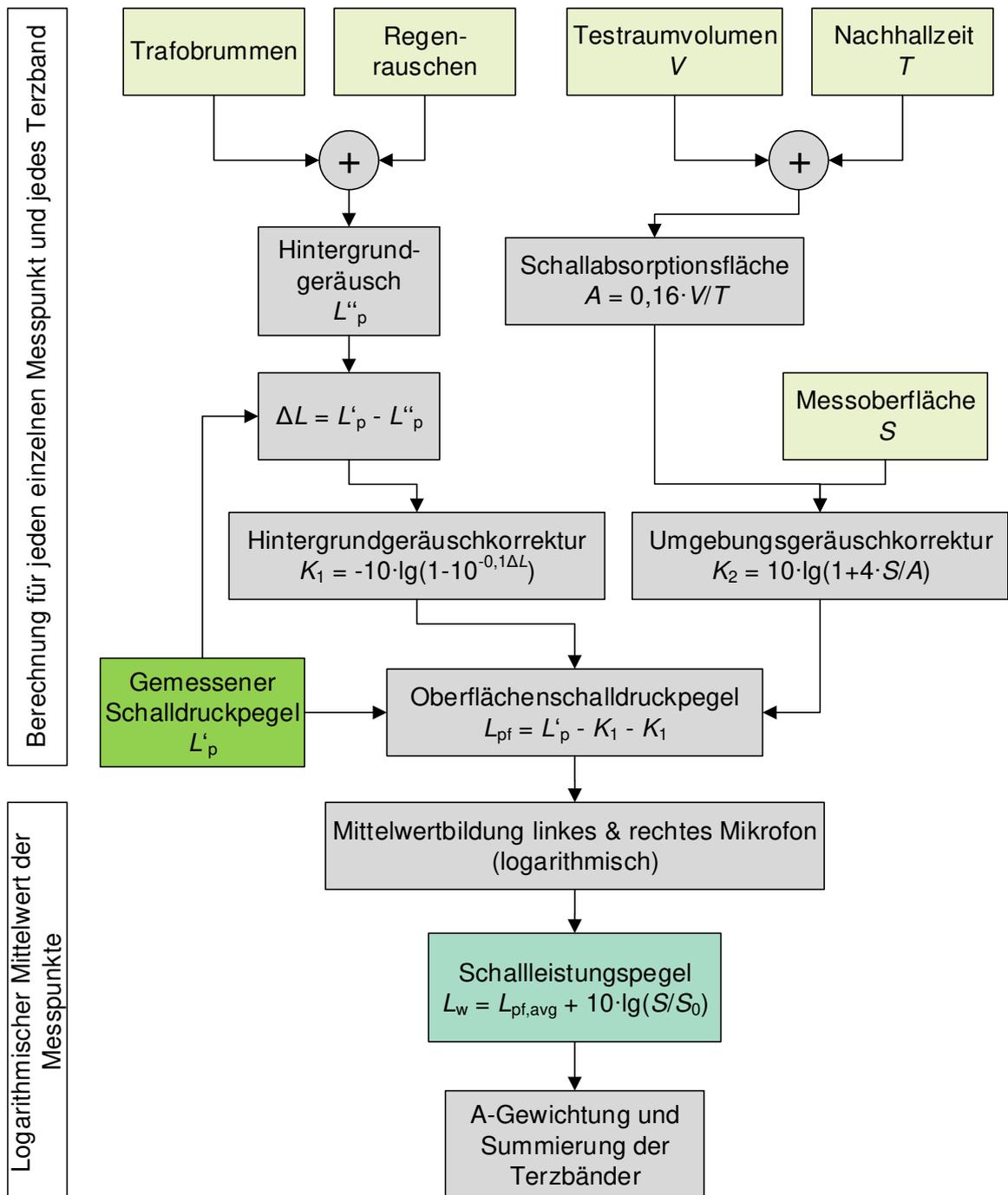


Bild 11.1.2: Flussdiagramm zur Berechnung des Schalleistungspegels gemäß ISO 3744 [56]

11.1.3 Berechnung des Schalleistungspegels anhand von ISO 3744

Die Grundlage für die Geräuschemissionsmessung ist die Messung des Schalldruckpegels L_p an den beiden Messmikrofonen. Die Ursache dieses Schalldruckpegels ist der sogenannte Schalleistungspegel L_w (siehe Kapitel 4.1), welcher im Falle dieser Masterarbeit vom Leiterseilbündel emittiert wird. Um nun zukünftige Laborversuche und Versuche unter anderen Umgebungsbedingungen mit jenen dieser Masterarbeit einfach vergleichen zu können, war es notwendig, im Zuge der Ergebnisauswertung, die gemessenen Schalldruckpegel auf die jeweiligen Schalleistungspegel umzurechnen.

Die verwendete Norm ISO 3744 beschreibt hierbei diese Umrechnung für Messungen unter den Bedingungen „*free field over a reflecting plane*“. Da das Nikola-Tesla-Labor eine sehr große räumliche Ausdehnung aufweist und über geräuschreduzierende Dämmplatten an den Innenwänden verfügt, kann diese Norm herangezogen werden. Allerdings müsste für eine normgerechte Messung, wie in 8.5.1 angedeutet, an neun Messpunkten gemessen werden, was aufgrund von nicht vorhandenem Messequipment nicht möglich war.

Gemäß ISO 3744 beträgt die Referenzschalleistung für alle nachfolgenden Auswertungen 1 pW.

Tabelle 11.1.1: Erforderliche Daten zur Berechnung des Schalleistungspegels

Bezeichnung	Ermittelt durch
Bezugsfläche S_0	$S_0 = 1 \text{ m}^2$ laut ISO 3744:1994 [56]
A-Gewichtungsfaktoren A_j	Online unter [62]
Messoberfläche S	Messoberfläche einer Linienschallquelle anhand von [63] $S = 2\pi \cdot l \cdot r = 2\pi \cdot 6 \text{ m} \cdot 6,2 \text{ m} = 233,73 \text{ m}^2$ (siehe ¹⁰)
Nachhallzeit T	Vorversuche von <i>Kurniawan</i> [25]
Regenrauschen RR	Geräuschmessung ohne Spannung bei aktivierter Regenanlage
Schalldruckpegel L_p ¹¹	An den beiden Messpunkten gemessen
Testraumvolumen V	Laborabmessungen laut [63] $V = 21,1 \text{ m} \cdot 25 \text{ m} \cdot 34,6 \text{ m} = 18.251,5 \text{ m}^3$
Trafobrummen TB	Geräuschmessung bei Spannungsfahrten ohne Leiterseilbündel (Leerfahrt)

¹⁰ Abstand zwischen Mittelpunkt des Leiterseilbündels und Messpunkt $D = 6,2 \text{ m} = \sqrt{(6\text{m})^2 + (1,5\text{m})^2}$

¹¹ In ISO 3744:1994 wird der gemessene Schalldruckpegel als L'_p angegeben.

Berechnungsbeispiel

Im Anschluss folgt ein Berechnungsbeispiel anhand des gemessenen 100-Hz-Schalldruckpegels $L_{p,100\text{Hz}}$ an einem Messpunkt bei $E_{AC} = 19,25 \text{ kV/cm}$ und $E_{DC} = +7,7 \text{ kV/cm}$ für das Standardleiterseilbündel und einer Regenrate von 6 mm/h.

Die folgenden Berechnungen müssen für jeden Messpunkt und alle Terzbänder separat durchgeführt werden.

Hintergrundgeräuschkorrektur K_1

$$L''_p = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{TB}{10}} + 10^{\frac{RR}{10}} \right) = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{47,2 \text{ dB}}{10}} + 10^{\frac{21,7 \text{ dB}}{10}} \right) = 47,21 \text{ dB}$$

$$\Delta L = L'_p - L''_p = 59,5 \text{ dB} - 47,21 \text{ dB} = 12,29 \text{ dB}$$

Bei der hier durchgeführten Auswertung gilt¹²:

Wenn $\Delta L < 0 \rightarrow$ dann $K_1 = 0 \rightarrow$ sonst:

$$K_1 = -10 \cdot \lg(1 - 10^{-0,1 \cdot \Delta L}) = -10 \cdot \lg(1 - 10^{-0,1 \cdot 12,29 \text{ dB}}) = 0,26 \text{ dB}$$

Umgebungsgeräuschkorrektur K_2

$$A = 0,16 \cdot \frac{V}{T} = 0,16 \cdot \frac{18.251,5 \text{ m}^3}{1,35} = 2163 \text{ m}^2$$

$$K_2 = 10 \cdot \lg \left(1 + 4 \cdot \frac{S}{A} \right) = 10 \cdot \lg \left(1 + 4 \cdot \frac{233,73 \text{ m}^2}{2163 \text{ m}^2} \right) = 1,56 \text{ dB}$$

Oberflächenschalldruckpegel L_{pf}

$$L_{pf} = L'_p - K_1 - K_2 = 59,5 \text{ dB} - 0,26 \text{ dB} - 1,56 \text{ dB} = 57,68 \text{ dB}$$

Die Oberflächenschalldruckpegel der einzelnen Messpunkte können nun logarithmisch addiert werden:

$$\begin{aligned} L_{pf,avg} &= 10 \cdot \lg \left(0,5 \cdot (10^{0,1 \cdot L_{pf,1}} + 10^{0,1 \cdot L_{pf,2}}) \right) = \\ &= 10 \cdot \lg \left(0,5 \cdot (10^{0,1 \cdot 57,68 \text{ dB}} + 10^{0,1 \cdot 52,91 \text{ dB}}) \right) = 55,92 \text{ dB} \end{aligned}$$

¹² In der Norm [56] wird hierbei das sogenannte 6-dB-Kriterium angewendet. Dieses wurde allerdings, aufgrund der Messungenauigkeiten durch die geringere Anzahl der Mikrofone, nicht angewendet.

Längenbezogener Schalleistungspegel L_w

Bei Schalleistungsberechnung einer Linienschallquelle (Freileitung) muss eine Längsabhängigkeit hergestellt werden. Da die Geräuschemissionen ausschließlich vom berechneten Seilabschnitt emittiert werden, wurde $l = 6$ m als Bezugslänge herangezogen.

$$L_w = L_{\text{pf,avg}} + 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{S_0}\right) - 10 \cdot \lg(l) = 55,92 \text{ dB} + 10 \cdot \lg\left(\frac{233,73 \text{ m}^2}{1 \text{ m}^2}\right) - 10 \cdot \lg(6)$$
$$L_{w,100\text{Hz}} = 71,82 \text{ dB}$$

Durch logarithmische Addition Schalleistungspegel aller einzelnen Terzbänder $L_{w,j}$ kann nun der Gesamtschalleistungspegel $L_{w,\text{ges}}$ berechnet werden. Der Index j beschreibt dabei die einzelnen Frequenzanteile bzw. Terzbänder.

$$L_{w,\text{ges}} = 10 \cdot \lg\left(\sum_{j=1}^{36} 10^{0,1 \cdot L_{w,j}}\right) = 77,10 \text{ dB}$$

A-gewichteter, längenbezogener Schalleistungspegel L_{wA}

Berechnung des A-gewichteten, längenbezogene Schalleistungspegels L_{wA} . Der Index j beschreibt dabei die einzelnen Frequenzanteile bzw. 36 Terzbänder.

$$L_{wA} = 10 \cdot \lg\left(\sum_{j=1}^{36} 10^{0,1 \cdot (L_{w,j} + A_j)}\right) = 67,13 \text{ dB(A)}$$

11.2 Auswertung der TE-Aufzeichnungen

Die Auswertung der TE-Aufzeichnungen erfolgte mit einem, am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz erstellten, MATLAB-Programm namens „*PD Analysis*“. Mit Hilfe dieses Tools war es möglich, die Teilentladungseigenschaften während der jeweiligen Spannungsstufen (Spannungsfahrt) bzw. der Messzeitpunkte (Abtrocknung) auszuwerten. Beispiele für die diesbezüglichen Einstellungen sind in Bild 11.2.1 und Bild 11.2.2 ersichtlich.

Steps (Spannungsfahrt)

Time Offset per Step: s

Voltage: from kV
to kV
in kV Steps
Take Values for: s

	Voltage in kV	Duration
1	50	00:00:25
2	60	00:00:25
3	70	00:00:25
4	80	00:00:25
5	90	00:00:25
6	100	00:00:25
7	110	00:00:25
8	120	00:00:25

Take cursor positions from Omicron

Bild 11.2.1: Eingestellte Werte zur TE-Auswertung am Beispiel der AC-Spannungsfahrt

Constant Voltage (Abtrocknung)

Spannung kV
Take Values for: s

Total Time: min
Take Values every: min
First Value: s
Last Value: s before end

Number	Time
1	00:00:00
2	00:01:00
3	00:02:00
4	00:03:00
5	00:04:00
6	00:05:00
7	00:06:00
8	00:07:00

Take cursor positions from Omicron

Bild 11.2.2: Eingestellte Werte zur TE-Auswertung am Beispiel der AC-Abtrocknung

Als Ergebnisse liefert dieses Programm zahlreiche Werte zur Charakterisierung von Teilentladungen, wobei die mittlere Ladungshöhe Q_{avg} , die Entladeleistung P_{dis} sowie die Anzahl n der auftretenden TE die TE ausreichend beschreiben und daher für die weitere Auswertung herangezogen wurden. Da allerdings für den Vergleich mit dem Geräuschemissionsverhalten ausschließlich die mittlere Ladungshöhe Q_{avg} ausschlaggebend ist, werden auch in weiterer Folge ausschließlich Diagramme mit diesen Werten dargestellt.

12 Ergebnisse und Diskussion

12.1 Auswertemethodik

In Bild 12.1.1 ist ein Beispiel für die Auswertung zur Erstellung aller weiteren Diagramme dargestellt. Hier sind die A-gewichtete Schallleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Randfeldstärke aufgetragen. Die diversen Linien beschreiben dabei den jeweiligen Verlauf mit überlagertem DC-Offset. Um die Auswirkungen des DC-Offsets auf das AC-System bzw. des AC-Rippels auf das DC-System gut darstellen zu können, werden im Folgenden Diagramme gezeigt, in welchen jeweils der dementsprechende Geräuschpegel (markierte Messpunkte) in Abhängigkeit des DC-Offsets bzw. AC-Rippels aufgetragen ist. Da die Messdaten für $E_{\text{Offset}} = \pm 1,9 \text{ kV/cm}$ und $E_{\text{Offset}} = \pm 5,8 \text{ kV/cm}$ keine Besonderheiten aufweisen, wurden diese sowohl in Bild 12.1.1, als auch in den Bildern in Anhang D nicht dargestellt.

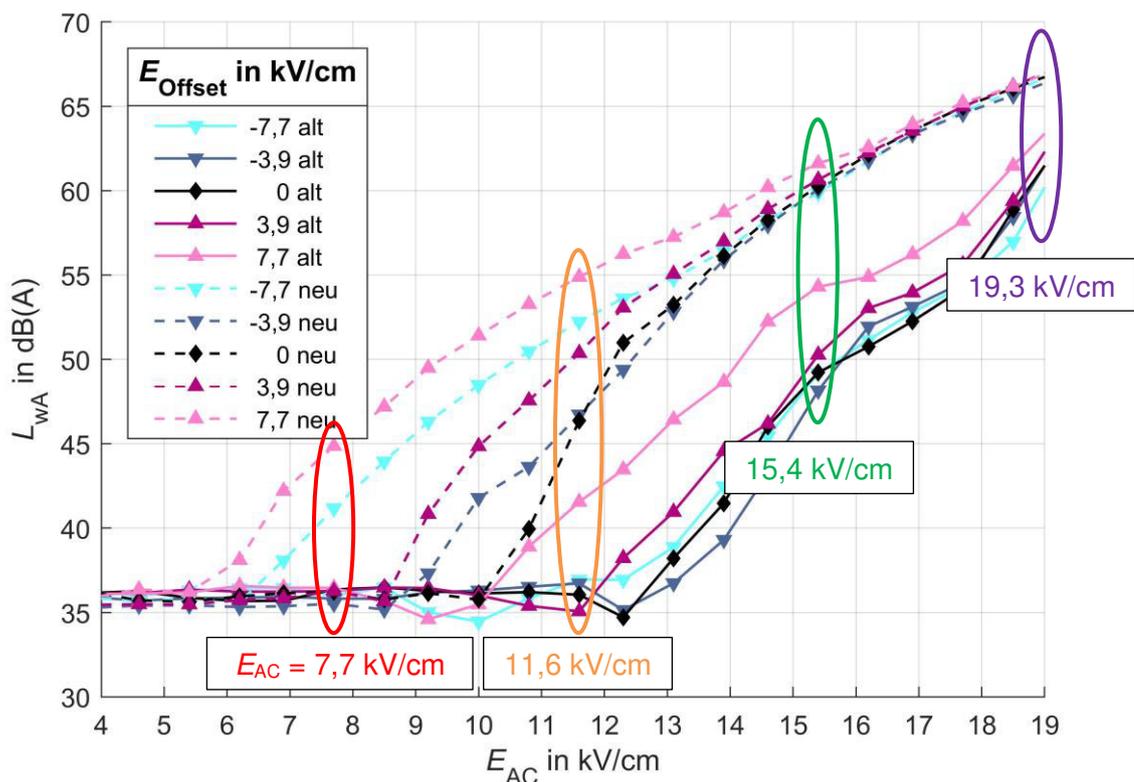


Bild 12.1.1: Beispiel für die Auswertung und Darstellung der Diagramme in Kapitel 12 anhand der Daten aus Bild 12.2.1

Es werden hier vor allem die Ergebnisse anhand von jeweils zwei Vergleichsdiagrammen diskutiert. Die hier zu erkennenden Tendenzen setzen sich auch für die jeweils andere Regenrate bzw. Oberflächenbeschaffenheit fort. Alle zugrundeliegenden Daten sind in den Diagrammen in Anhang D (AC-System) und Anhang E (DC-System) ersichtlich.

Um die Diskussionen übersichtlicher zu gestalten, wird separat auf den A-gewichteten, den 50-Hz- und den 100-Hz-Schalleistungspegel sowie auf das Teilentladungsverhalten eingegangen.

12.2 Beeinflussung des AC-Systems durch den DC-Offset

12.2.1 A-gewichteter Schalleistungspegel L_{WA}

Grundlegend kann eine Abhängigkeit des **A-gewichteten Schalleistungspegels** L_{WA} vom DC-Offset festgestellt werden. In Bild 12.2.1 und Bild 12.2.2 ist anhand der Steigung der Emissionskennlinien im hohen AC-Feldstärkebereich eine signifikante Erhöhung von L_{WA} bei positivem DC-Offset bzw. eine Verminderung aufgrund eines negativen DC-Offsets erkennbar. Dies ist, wie in Kapitel 7.1.1 angedeutet, auf die Erhöhung der positiven Halbwelle des elektrischen Wechselfeldes zurückzuführen, wodurch die Entstehung von positiven Onset-Streamern mit hoher Wiederholungsrate begünstigt wird (Bild 12.2.3).

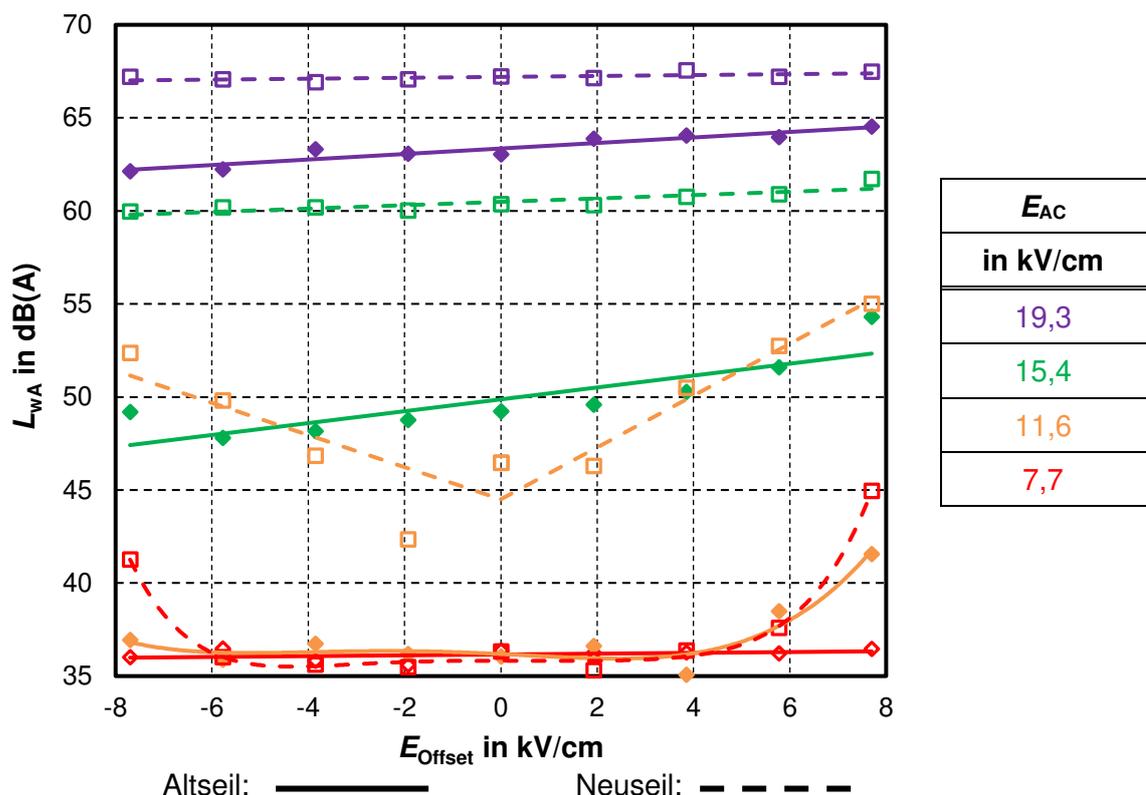


Bild 12.2.1: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit des DC-Offsets
Regenrate 1,5 mm/h – Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit

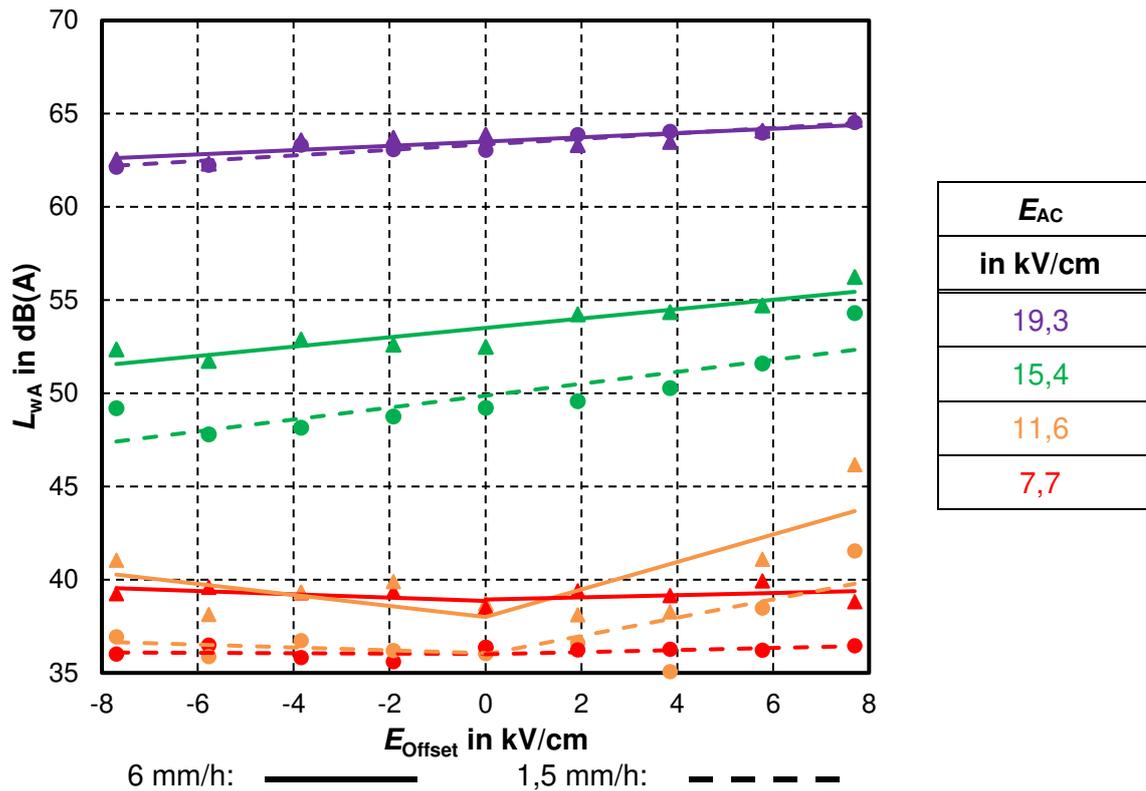


Bild 12.2.2: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit des DC-Offsets
Altseil (hydrophil) – Vergleich der Regenraten

Im Gegensatz dazu ist im moderaten AC-Feldstärkebereich (orange) auch eine Erhöhung des Schalleistungspegels durch einen negativen DC-Offset zu erkennen. Dies kann allerdings nicht mit der erhöhten Amplitude der Teilentladungen erklärt werden, welche bei negativem DC-Offset abnimmt. Laut [41] könnte hierfür die Erhöhung der Wiederholungsrate ausschlaggebend sein, welche, vor allem bei geringen AC-Randfeldstärken, mit steigendem Offset zunimmt (Bild 12.2.3). Um allerdings diese Aussage bekräftigen zu können, müssen diesbezüglich noch weitere Forschungsarbeiten durchgeführt werden.

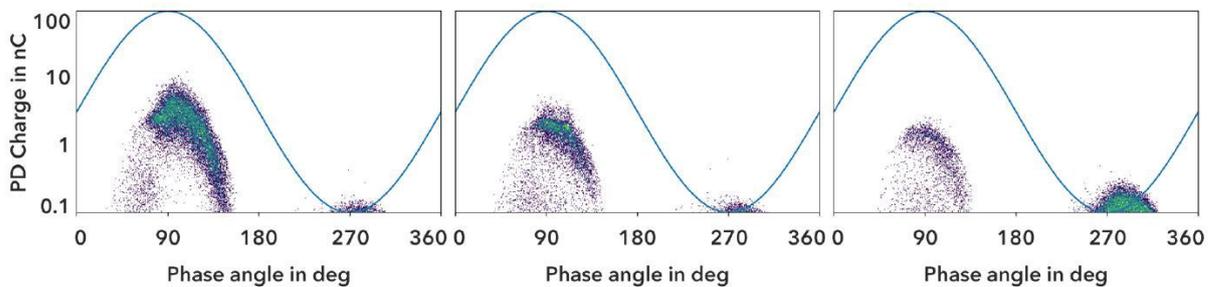


Bild 12.2.3: TE-Pattern mit
 $E_{AC} = 13,1$ kV/cm und
 $E_{Offset} = +7,7$ kV/cm, 0 kV/cm und $-7,7$ kV/cm (links nach rechts) [41]

Der Einfluss des DC-Offsets ist hierbei besonders im moderaten bis hohen AC-Feldstärkebereich sichtbar (orange, grün – betriebsrelevanter Feldstärkebereich). Hier ist außerdem die Abhängigkeit von der Regenrate bzw. der Leiterseiloberfläche besonders ausgeprägt, was bei sehr hohen AC-Feldstärken (violett) wieder ins Gegenteil umschlägt. Hier ist im Geräuschemissionsverlauf des A-gewichteten Schalleistungspegels L_{WA} ein Sättigungsverhalten zu erkennen (Anhang – Bild D.5). Dieser Sättigungseffekt setzt beim Standardseil deutlich früher ein (Anhang – Bild D.1). Dies ist auf die zahlreichen koronierenden Wassertropfen bei hohen Feldstärken zurückzuführen, welche mit ihren Koronaentladungen zur Schirmung der „Nachbartropfen“ beitragen.

Dass ein DC-Offset auch Einfluss auf die Koronaeinsatzspannung bewirkt, ist vor allem am Emissionsverhalten des Standard-Leiterseilbündels in Bild 12.2.1 bei geringer AC-Feldstärke (rot) ersichtlich. Diesbezüglich kann erkannt werden, dass sich die Geräuschemissionen ohne DC-Offset noch dem Grundrauschen zuzuordnen sind und sich mit höheren DC-Feldstärken ($E_{\text{Offset}} > 4 \text{ kV/cm}$ bzw. $E_{\text{Offset}} < -6 \text{ kV/cm}$) von diesem abheben.

Allgemein kann allerdings bestätigt werden, dass die Reduktion des Geräuschemissionsverhaltens aufgrund von hydrophilen Oberflächen auch unter Hybridbedingungen erhalten bleibt.

Zusammenfassend gilt, dass der Einfluss des DC-Offsets stark von der AC-Feldstärke und dem Einsetzen der Koronaentladungen abzuhängen scheint. Ist die AC-Feldstärke geringfügig höher als die Einsetzfeldstärke der Koronaentladungen, wird durch die Steigerung der maximalen Randfeldstärke, aufgrund eines positiven oder negativen Offsets, die Anzahl der aktiven Koronaquellen und somit die Geräuschemissionen erhöht. Werden jedoch bereits intensive Entladungen anhand der AC-Feldstärke produziert, kann ein Offset die Amplitude der intensiven Entladungen beeinflussen und zu einer Steigerung oder Reduzierung der Geräuschemissionen des AC-Systems führen.

12.2.2 50-Hz-Schalleistungspegel $L_{W50\text{Hz}}$

Die **50-Hz-Komponente** ist der Frequenzanteil, welcher die deutlichste Abhängigkeit vom DC-Offset aufweist (siehe Bild 7.1.1), was vor allem in Bild 12.2.4 und Bild 12.2.5 im hohen AC-Feldstärkebereich (violett) ersichtlich wird. Der Einfluss des DC-Offsets nimmt hierbei auch stark mit der Höhe der AC-Feldstärke zu, wodurch die Höhe dieser tonalen Komponente ein Resultat der Kombination aus DC-Offset und AC-Feldstärke ist. Die Entstehung dieser $1f$ -Komponente weist eine starke Ähnlichkeit mit jener der $2f$ -Komponente (siehe Kapitel 3.4.2) auf. Hierbei führt die Oszillation der Ionen zu einer periodische Erwärmung der Umgebungsluft, wobei die Kraft und thermische Energie während beider Halbwellen nahezu gleich hoch ist wie die äquivalente Ladungsintensität in der positiven und negativen Halbwelle [40]. Weicht diese

Balance zwischen positiver und negativer Halbwelle allerdings aufgrund eines DC-Offsets ab, ist laut [41] die Ionenbewegung einer Halbwelle stärker ausgeprägt, was zu der Entstehung der $1f$ -Komponente führen könnte.

In beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass die Höhe des 50-Hz-Schalleistungspegels, vor allem im oberen AC-Feldstärkebereich, nahezu unabhängig von der Polarität des DC-Offsets ist. Dies könnte damit begründet werden, dass bei der, in Kapitel 3.4.2 erläuterten, Temperaturerhöhung der Umgebungsluft aufgrund der Ionenoszillation, die Richtung der Ionenbewegung bei der Erwärmung keine Rolle spielt. Somit wäre die Amplitude dieser Komponente von der Polarität unabhängig.

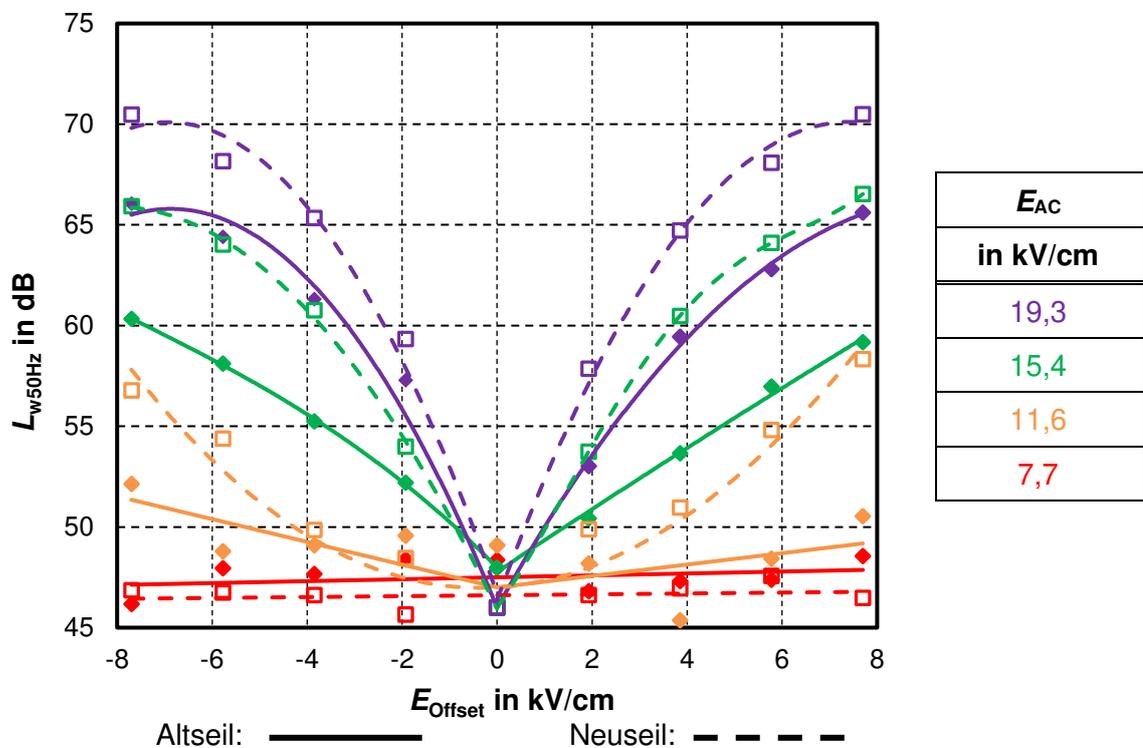


Bild 12.2.4: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit des DC-Offsets
Regenrate 1,5 mm/h – Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit

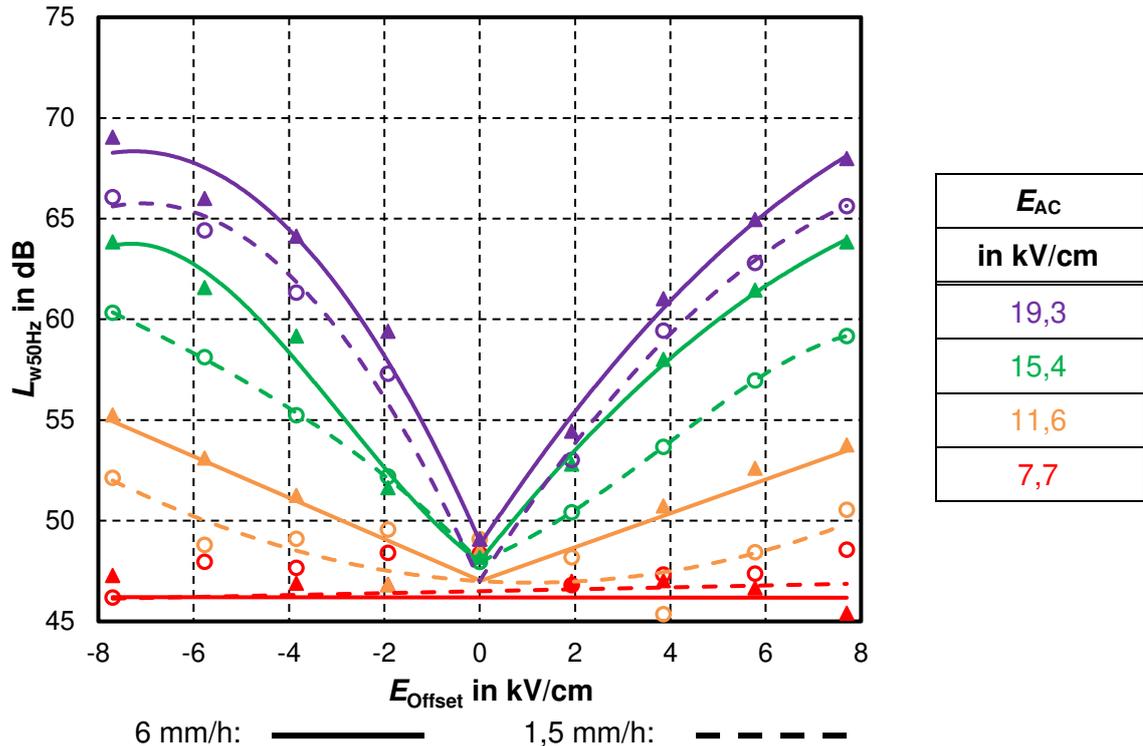


Bild 12.2.5: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit des DC-Offsets
Altseil (hydrophil) – Vergleich der Regenraten

Auch bei der 50-Hz-Komponente ist die Beeinflussung durch die Regenintensität erkennbar, welche mit steigendem Betrag des DC-Offsets deutlich zunimmt. Eine höhere Regenrate verursacht vor allem im moderaten AC-Feldstärkebereich einen höheren Emissionspegel.

Beim Oberflächenvergleich in Bild 12.2.4 spiegelt sich das vorteilhaftere Geräuschemissionsverhalten des hydrophilen Seiles unter schlechten Wetterbedingungen wider. Hier wird deutlich, dass die Differenz zwischen den beiden Seiltypen mit steigendem Betrag des DC-Offsets stark zunimmt.

12.2.3 100-Hz-Schalleistungspegel L_{w100Hz}

Hinsichtlich der **100-Hz-Komponente** (Bild 12.2.6 und Bild 12.2.7) konnte im Allgemeinen keine signifikante Abhängigkeit vom DC-Offset festgestellt werden. Somit treten hierbei dieselben Beeinflussungen des Emissionspegels durch die Regenrate und Oberflächenbeschaffenheit auf, wie bei reinen AC-Freileitungen. Daher wird auf diese Effekte nicht näher eingegangen.

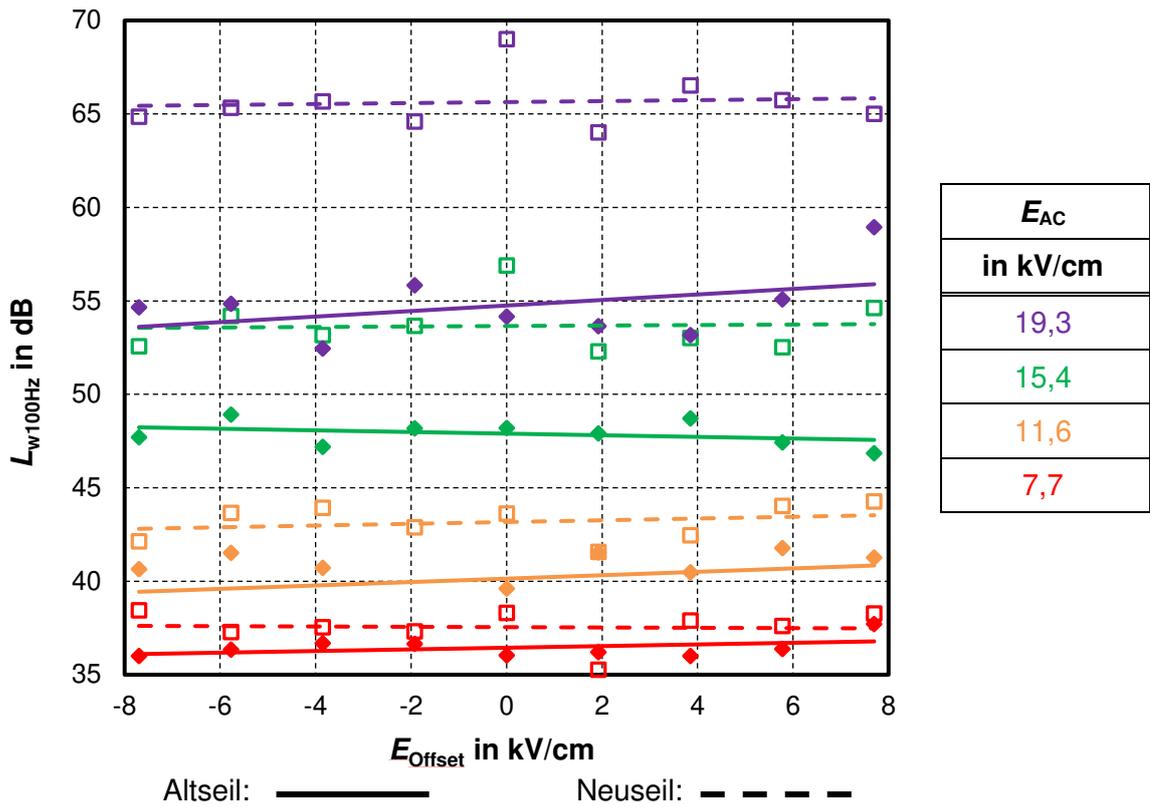


Bild 12.2.6: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit des DC-Offsets
Regenrate 1,5 mm/h – Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit

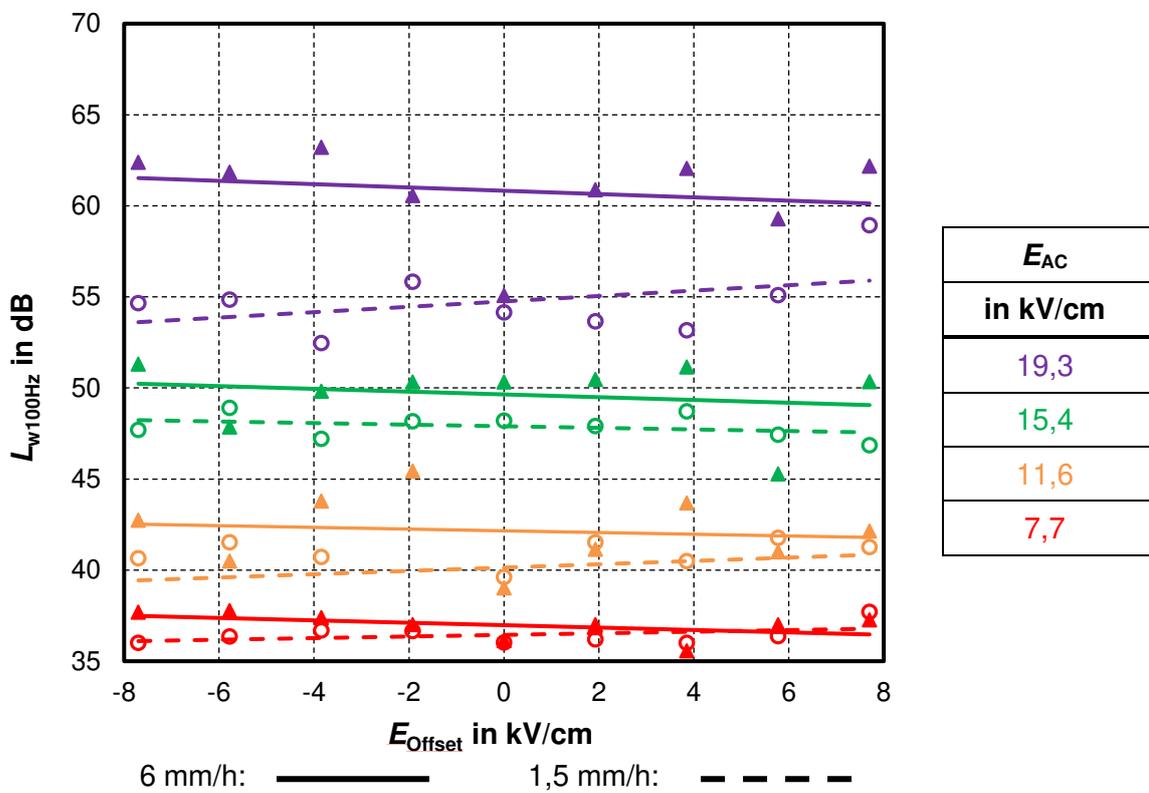


Bild 12.2.7: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit des DC-Offsets
Altseil (hydrophil) – Vergleich der Regenraten

12.2.4 Mittlere Teilentladungsamplitude Q_{avg}

Am **Teilentladungsverhalten** in Bild 12.2.9 und Bild 12.2.8 wird deutlich, dass vor allem im moderaten AC-Feldstärkebereich (orange, grün) eine starke Abhängigkeit zwischen TE und DC-Offset besteht. Ein negativer DC-Offset verursacht hierbei eine Verringerung der TE-Amplituden, was eine, wenn auch geringe, Korrelation zum A-gewichteten Gesamtgeräuschpegel darstellt.

Im oberen AC-Feldstärkebereich ist bei einer geringen Regenrate eine Zunahme der Entladungen mit positivem DC-Offset erkennbar. Dieses Verhalten tritt allerdings nicht bei der hohen Regenrate auf. Hierfür könnte wiederum der Schirmungseffekt der, an den zahlreichen Wassertropfen auftretenden, TE verantwortlich sein, was viele TE geringerer Ladung produziert. Im Gegensatz dazu verursachen weniger Tropfen auch weniger, aber intensivere Entladungen.

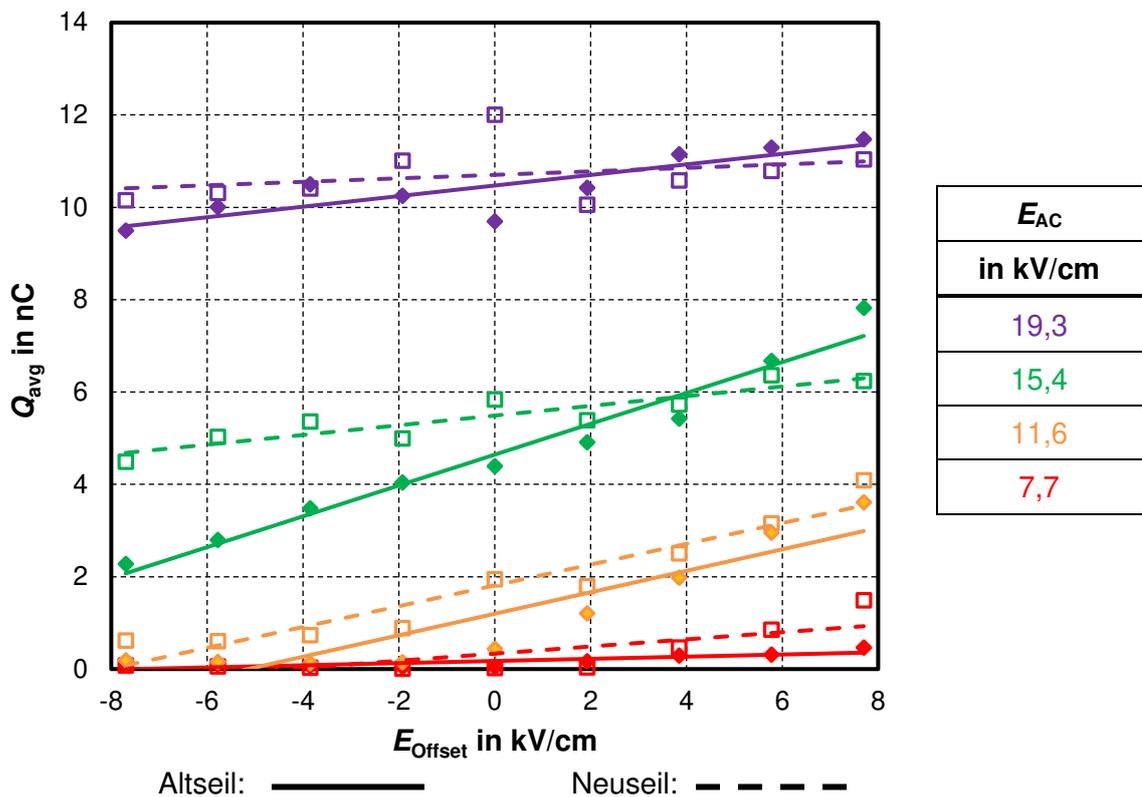


Bild 12.2.8: Mittlere Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit des DC-Offsets
Regenrate 1,5 mm/h – Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit

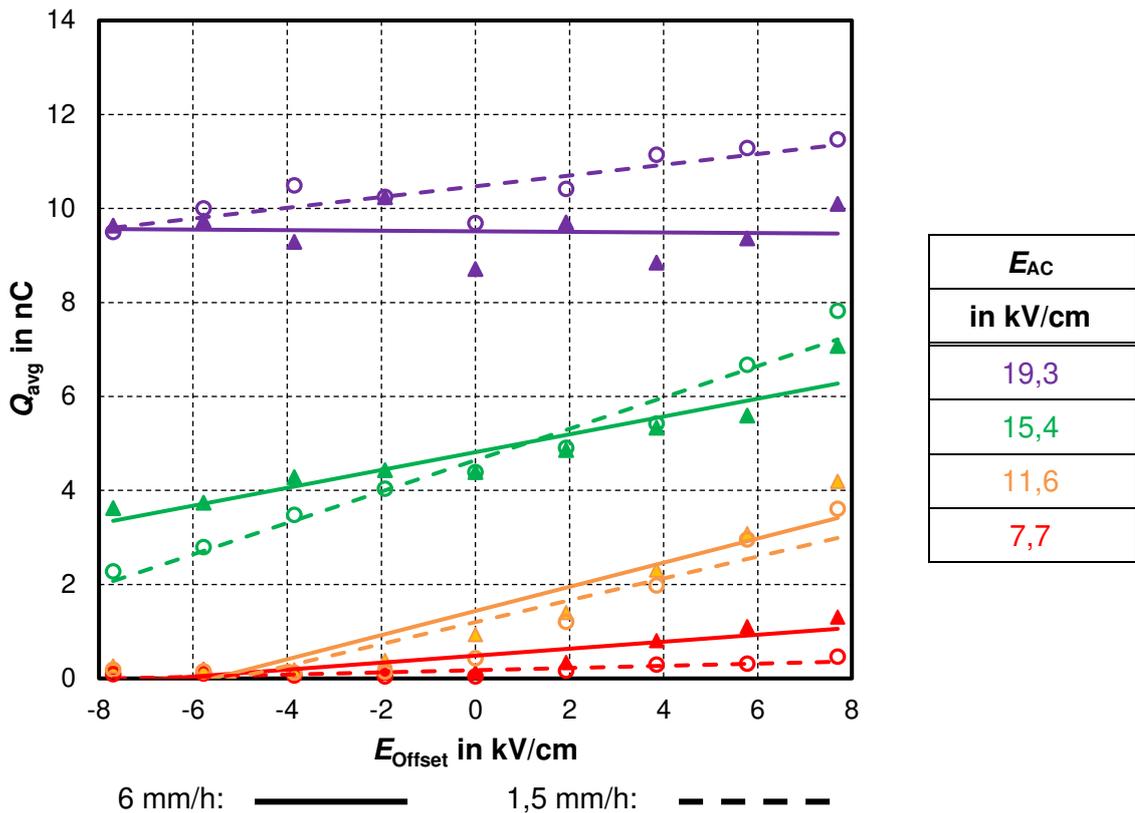


Bild 12.2.9: Mittlere Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit des DC-Offsets
Altseil (hydrophil) – Vergleich der Regenraten

In Bild 12.2.8 ist ein Unterschied zwischen den beiden Seiltypen bezüglich der Abhängigkeit des Teilentladungsverhaltens vom DC-Offset erkennbar. Im, für den Betriebsfall relevanten, moderaten AC-Feldstärkebereich wird diese Beeinflussung der Hydrophilie besonders deutlich, wobei am hydrophilen Seil bei einer Zunahme des DC-Offsets auch die TE stärker ansteigen als am Standardseil. Dieses Verhalten könnte wiederum mit dem geringeren Schirmungseffekt der DC-Raumladungszone bei geringem Regen erklärt werden (siehe Kapitel 3.3).

12.2.5 Beeinflussung des Abtrocknungsverhaltens durch den DC-Offset

Das Abtrocknungsverhalten wurde anhand der diesbezüglichen Diagramme in Anhang D untersucht. Hierbei wurde sehr schnell deutlich, dass sowohl ein positiver als auch ein negativer DC-Offset nur einen sehr geringen Einfluss auf das Abtrocknungsverhalten des AC-Systems hat und lediglich eine geringe Erhöhung der Schallpegel über den gesamten Zeitraum hervorruft. Ergänzend kann gesagt werden, dass ein DC-Offset bei geringen AC-Feldstärken zu einem tendenziell schlechteren Abtrocknungsverhalten führt.

Hinsichtlich des 100-Hz-Pegels weist das Abtrocknungsverhalten eine deutliche Verbesserung bei hohen AC-Feldstärken auf, wobei allerdings keine relevante Differenz zwischen Abtrocknung mit oder ohne DC-Offset festgestellt werden kann.

12.3 Beeinflussung des DC-Systems durch den AC-Rippel

12.3.1 A-gewichteter Schalleistungspegel L_{WA}

Anhand von Bild 12.3.2 und Bild 12.3.1 kann definitiv eine Abhängigkeit des **A-gewichteten Schalleistungspegels** L_{WA} des DC-Systems vom AC-Rippel festgestellt werden. Es ist ersichtlich, dass im Allgemeinen, vor allem bei hohen DC-Feldstärken, der negative DC-Pol geringere Geräuschemissionswerte aufweist als der positive. Diese Differenz wird mit der Erhöhung des AC-Anteils zusätzlich verstärkt. Somit kann gesagt werden, dass die Geräuschemissionen des positiven Pols bei zunehmendem AC-Rippel früher ansteigen und eine höhere Abhängigkeit desselben aufweisen als jene des negativen.

Der Einfluss des AC-Rippels wird in beiden Diagrammen besonders im unteren DC-Feldstärkebereich (**rot**) sichtbar, was aus den höheren Steigungen der Kurven hervorgeht. Somit kann festgestellt werden, dass der Einfluss des AC-Rippels umso höher ausfällt, je höher dessen prozentueller Anteil an der Gesamtfeldstärke ist.

Außerdem geht aus Bild 12.3.2 hervor, dass die Geräuschemissionen des DC-Systems eine deutlich geringere Abhängigkeit der Regenrate im Vergleich zu jenen des AC-Systems aufweisen. Wird durch Erhöhung des AC-Anteils der Bereich außerhalb des Grundstörpegels (**rot** – $E_{\text{Rippel}} = 4 \text{ kV/cm}$) erreicht, konvergieren die Messwerte aus den beiden Regenratenmessungen sehr schnell und die Regenrate hat somit keinen Einfluss mehr auf den A-gewichteten Schalleistungspegel. Bei geringem AC-Rippel und hohen DC-Feldstärken kann eine Korrelation mit den Aussagen aus der Literatur festgestellt werden, worin erklärt wird, dass die Geräuschintensität des DC-Systems mit höherer Regenrate geringer wird (Kapitel 3.3.1). Durch Steigerung des AC-Anteils, für welchen höhere Regenraten eine Verschlechterung des Geräuschverhaltens darstellen, wird dieser Effekt wieder kompensiert.

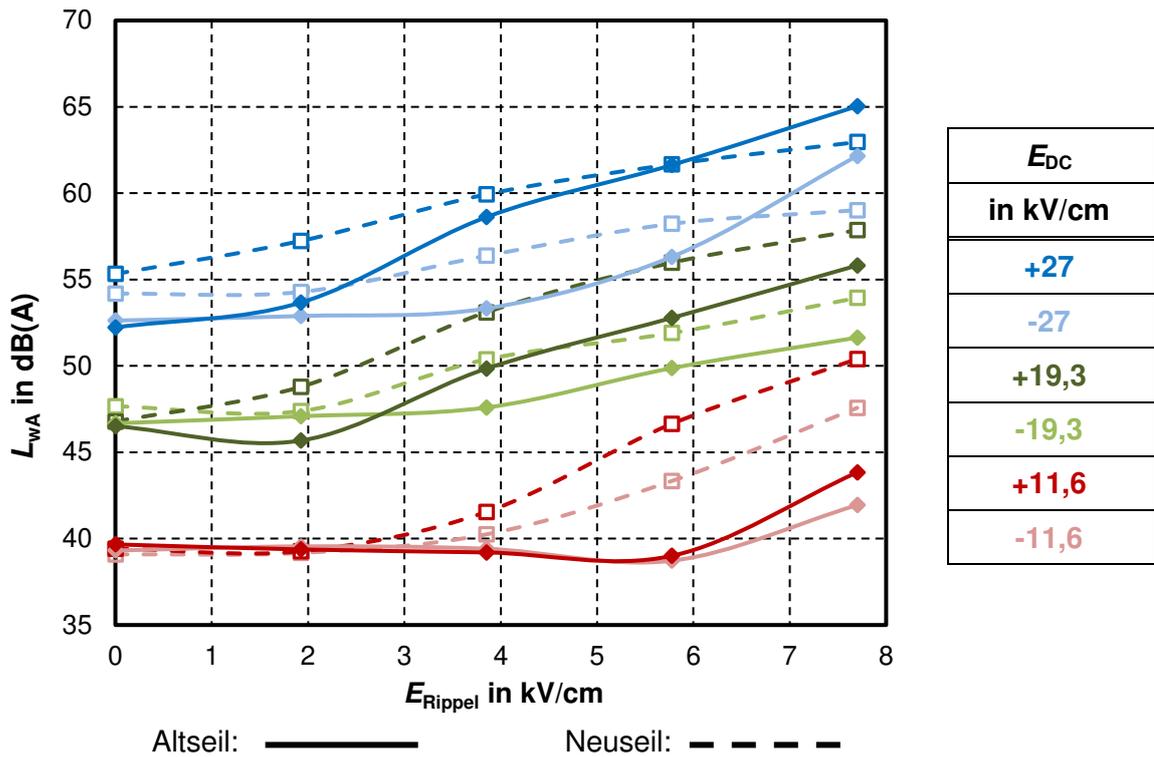


Bild 12.3.1: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit des AC-Rippels
Regenrate 6 mm/h – Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit

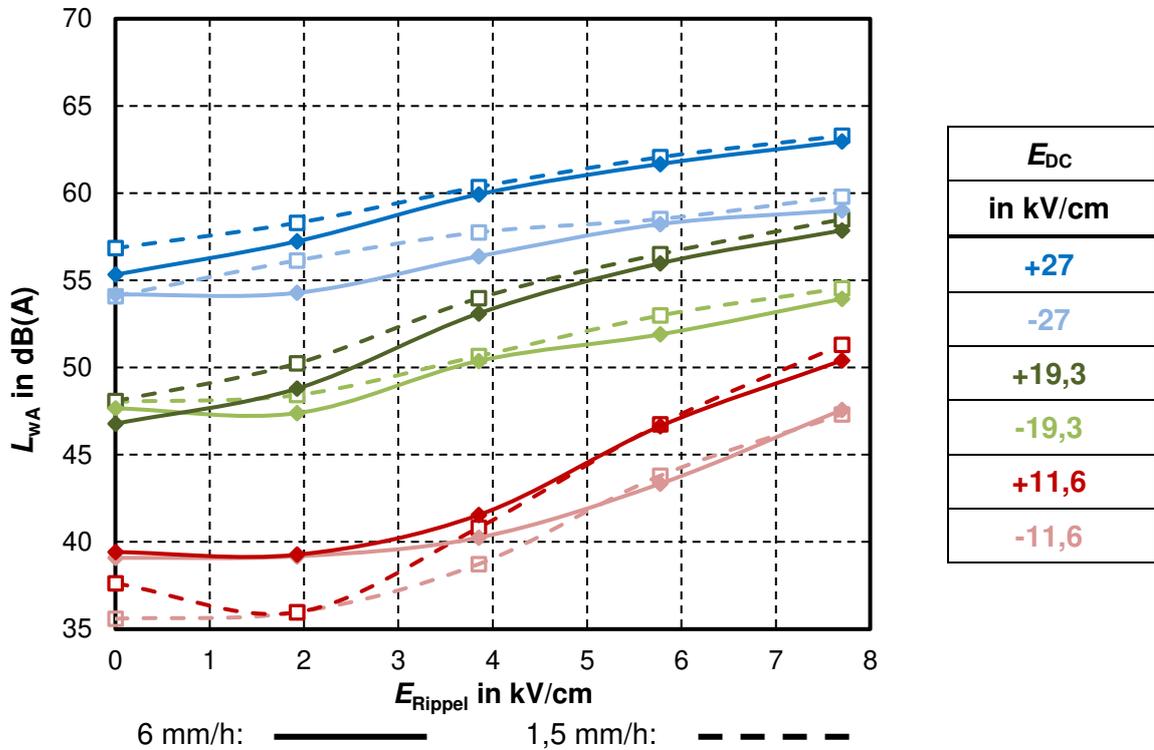


Bild 12.3.2: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit des AC-Rippels
Standardseil – Vergleich der Regenraten

Zum Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit in Bild 12.3.1 kann gesagt werden, dass im Allgemeinen das Standardseil lauter ist als das gealterte, hydrophile Leiterseil. Allerdings steigt mit zunehmendem AC-Rippel der A-gewichtete Schalleistungspegel des hydrophilen Leiterseilbündels schneller an als jener des Standardseils, wodurch sich bei sehr hohen AC- und DC-Feldstärken ($E_{DC} = +27 \text{ kV/cm}$ und $E_{\text{Rippel}} = 6 \text{ kV/cm}$) ein Schnittpunkt ergibt und im Weiteren der hydrophile Leiter lauter wird. Dieser Effekt kann mit dem derzeitigen Wissenstand nicht erklärt werden, wodurch diesbezüglich weitere Forschungsarbeiten notwendig sind.

12.3.2 50-Hz-Schalleistungspegel $L_{w50\text{Hz}}$

Der Einfluss des AC-Rippels auf den **50-Hz-Schalleistungspegel** $L_{w50\text{Hz}}$ des DC-Systems ist in Bild 12.3.4 und Bild 12.3.3 dargestellt. Hier wird deutlich, dass grundsätzlich die 50-Hz-Komponente mit Erhöhung des AC-Rippels steigt. Diese Steigung wird mit höherer DC-Feldstärke eindeutig größer, wodurch der Einfluss des AC-Rippels mit höherer DC-Feldstärke zunimmt.

Außerdem kann hier wiederum ein, wenn auch geringfügiger, höherer 50-Hz-Anteil des positiven DC-Pols festgestellt werden, welcher bei sehr hohen DC-Feldstärken mit steigendem AC-Rippel auch stärker zunimmt. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die sinusförmige Oszillation der positiven Raumladungswolke eine geringfügig höhere Temperatur- und somit Druckerhöhung der Umgebungsluft hervorruft und dadurch auch der Schalldruckpegel zunimmt.

Die Regenrate hat auch einen eher marginalen Einfluss auf die 50-Hz-Schallemission des DC-Systems. In Bild 12.3.4 ist zu erkennen, dass diese grundlegend bei der höheren Regenrate auch höher ausfällt, was entweder mit der Tropfenoszillationstheorie von *Teich* und *Weber* [17] oder mit der Tatsache, dass für das Auftreten dieser Komponente der AC-Anteil verantwortlich ist und dieser, wie in 12.2 ersichtlich, deutlich mit der Regenrate zunimmt, erklärt werden kann.

Mit der zweiten Theorie könnte auch das, durch die hydrophile Oberfläche, verbesserte Emissionsverhalten der 50-Hz-Komponente aus Bild 12.3.3 erklärt werden. Hierbei kann eine Absenkung dieses Schalleistungspegels über den gesamten Feldstärkebereich beobachtet werden.

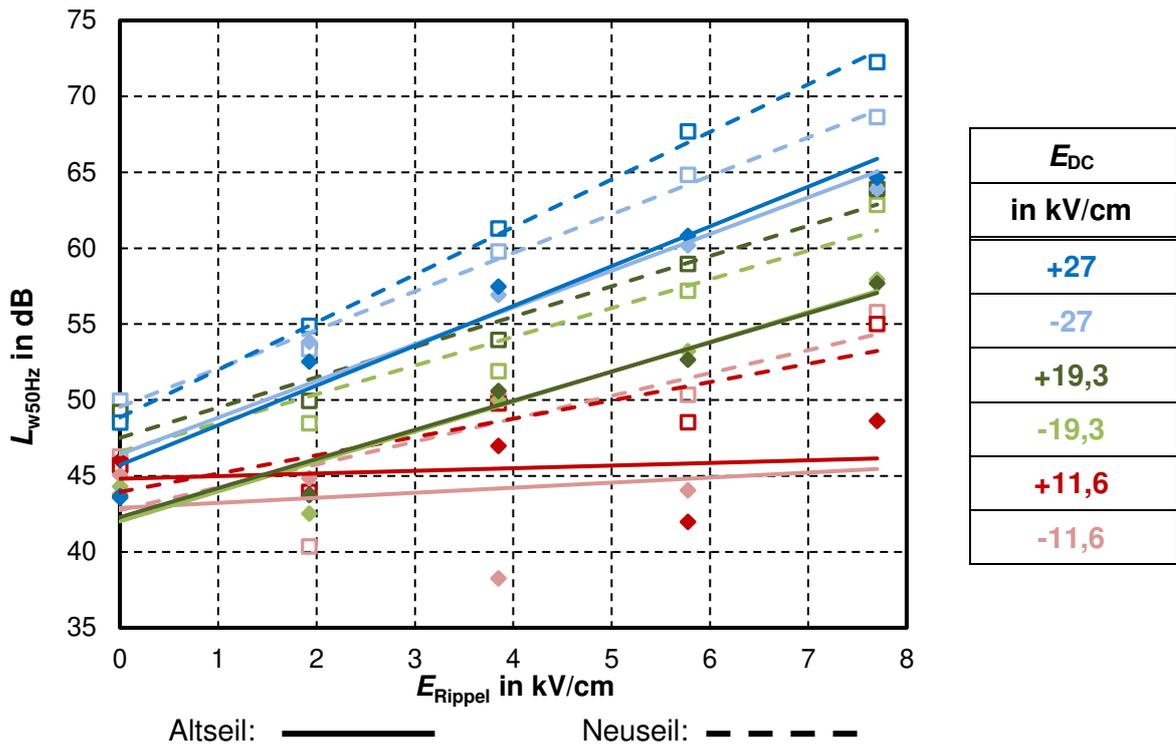


Bild 12.3.3: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit des AC-Rippels
Regenrate 6 mm/h – Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit

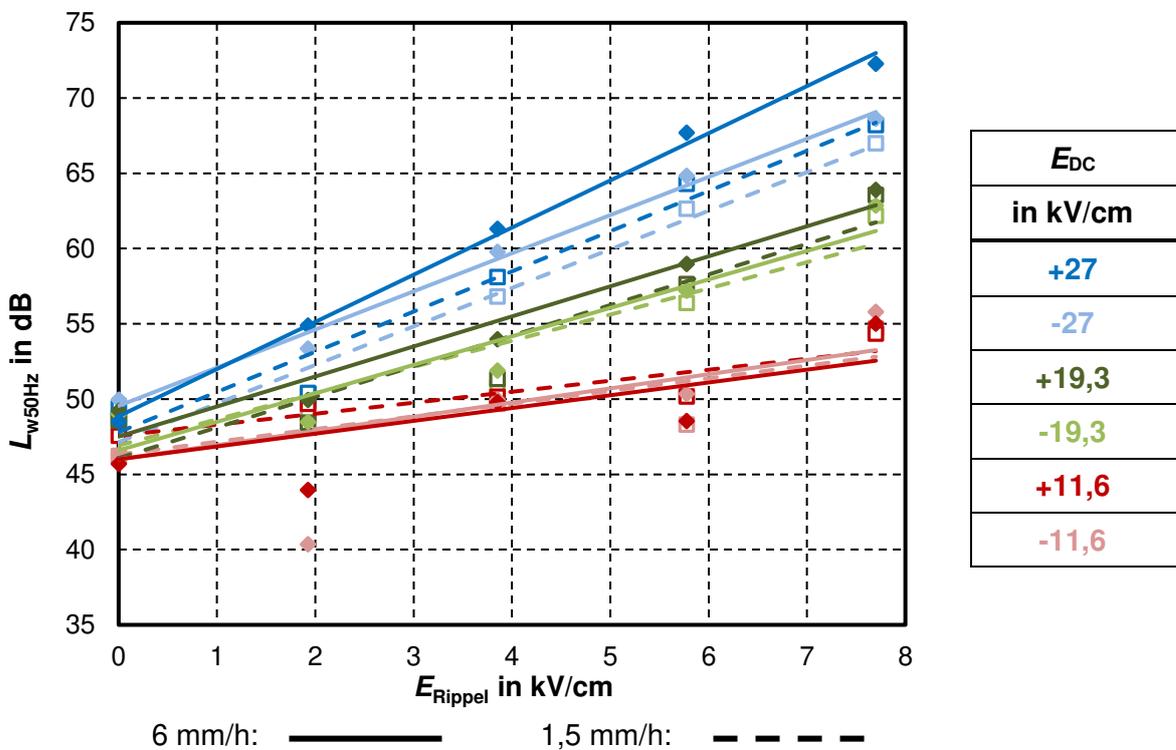


Bild 12.3.4: 50-Hz- Schalleistungspegel in Abhängigkeit des AC-Rippels
Standardseil – Vergleich der Regenraten

12.3.3 100-Hz-Schalleistungspegel $L_{w100\text{Hz}}$

Da die Entstehung des **100-Hz-Schalleistungspegels** $L_{w100\text{Hz}}$ auf die periodische Druckänderung der Umgebungsluft aufgrund eines sinusförmigen, elektrischen Wechselfeldes zurückzuführen ist, kann diese tonale Komponente auch am DC-System einer Hybridfreileitung auftreten. Je nach Höhe des überlagerten AC-Rippels kann diese 100-Hz-Emission mehr oder weniger stark ausgeprägt sein. Außerdem kann auch eine Erhöhung mit zunehmender DC-Feldstärke festgestellt werden.

Für diese Schallemission ist eine Polaritätsabhängigkeit ausschließlich im sehr hohen DC-Feldstärkebereich erkennbar. Hierbei ist bei positiver DC-Feldstärke eine höhere Abhängigkeit vom AC-Rippel und somit eine, mit steigendem AC-Rippel, höher werdende Differenz zwischen positiven und negativen DC-Pol ersichtlich. Dieser Effekt kann allerdings nicht für geringe und moderate DC-Feldstärken bestätigt werden.

Die Abhängigkeit der 100-Hz-Schallemission des DC-Systems von der Regenrate zeigt sich in Bild 12.3.6. Vor allem am Standardseil bei der höheren Regenrate von 6 mm/h wird dies deutlich. Hier kann eine Steigerung der Abhängigkeit vom AC-Rippel mit Erhöhung des DC-Feldstärkeanteils erkannt werden.

Beim hydrophilen Leiterseil bewegt sich die 100-Hz-Schallemission im Bereich des Grundstörspegels, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass in diesem Fall hydrophile Oberflächen einen starken positiven Einfluss haben.

Aufgrund der Bedeutung der 100-Hz-Komponente in den Genehmigungsverfahren, sollte diesen Effekten in zukünftigen Untersuchungen weiter Beachtung geschenkt werden.

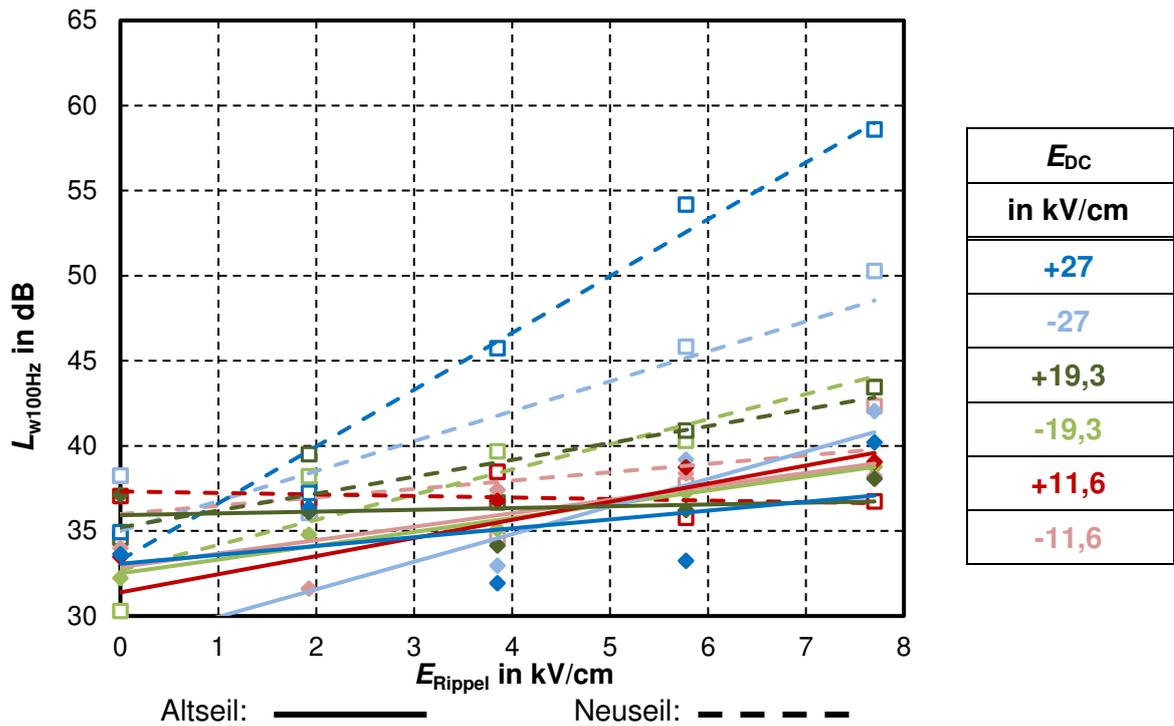


Bild 12.3.5: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit des AC-Rippels
Regenrate 6 mm/h – Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit

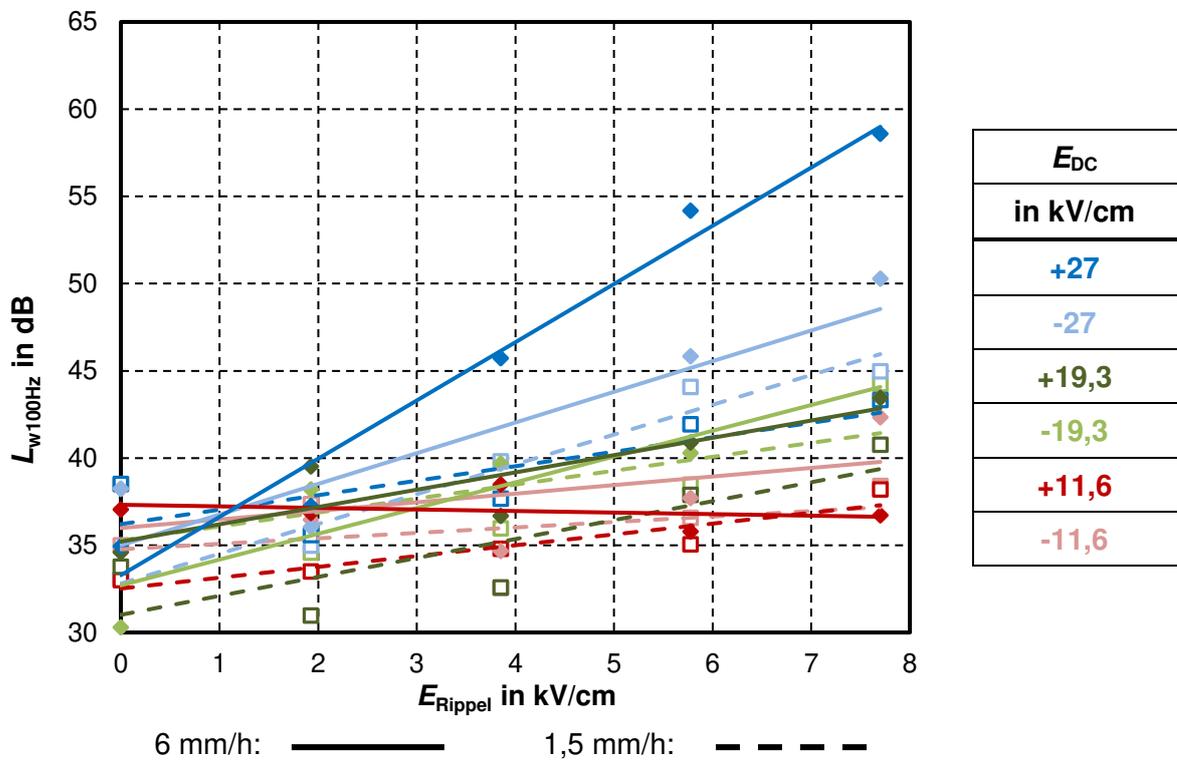


Bild 12.3.6: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit des AC-Rippels
Standardseil – Vergleich der Regenraten

12.3.4 Mittlere Teilentladungsamplitude Q_{avg}

Bild 12.3.8 und Bild 12.3.7 beschreiben das **Teilentladungsverhalten** des DC-Systems unter Hybridbedingungen. Hierbei kann sehr schnell festgestellt werden, dass die Regenrate nahezu keinen Einfluss hat, was mit den Aussagen aus über den A-gewichteten Schallleistungspegel (Kapitel 12.3.1) korreliert. Auch aus den Ergebnissen des hydrophilen Leiterseiles (Anhang E) zeigt sich ein sehr ähnliches Verhalten.

Aus beiden Diagrammen geht hervor, dass eine Erhöhung des AC-Rippels auch eine Erhöhung der TE-Amplitude hervorruft und dieser Einfluss mit zunehmender DC-Feldstärke zunimmt. Außerdem kann festgestellt werden, dass die mittleren Amplituden der negativen TE mit $Q_{avg} < 1$ nC sehr viel geringer ausfallen als jene der positiven, wodurch deren Messwerte in beiden Diagrammen nahe der Abszisse zu finden sind.

In Bild 12.3.7 kann ein deutlicher, negativer Einfluss einer hydrophilen Oberfläche auf das Teilentladungsverhalten festgestellt werden. Vor allem bei sehr hohen DC-Feldstärken ist diesbezüglich eine, mit steigendem AC-Rippel, zunehmend hohe Differenz zwischen Standard- und hydrophiler Oberfläche erkennbar.

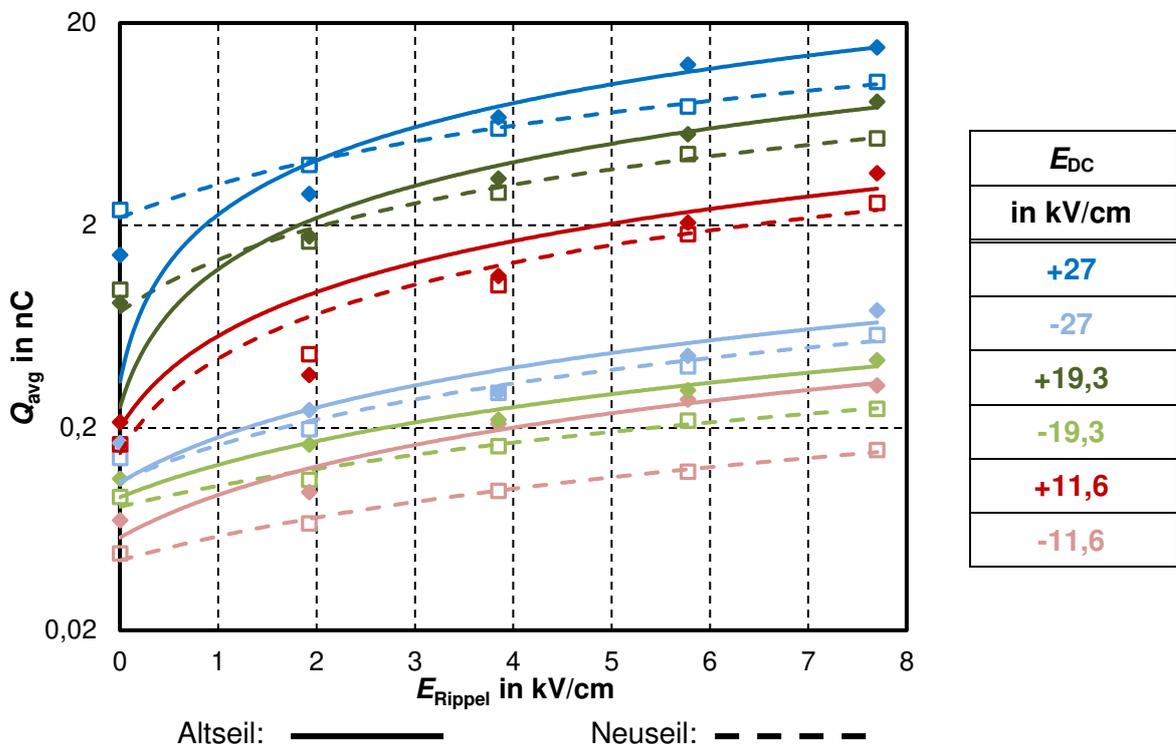


Bild 12.3.7: Mittlere Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit des AC-Rippels
Regenrate 6 mm/h – Vergleich der Oberflächenbeschaffenheit

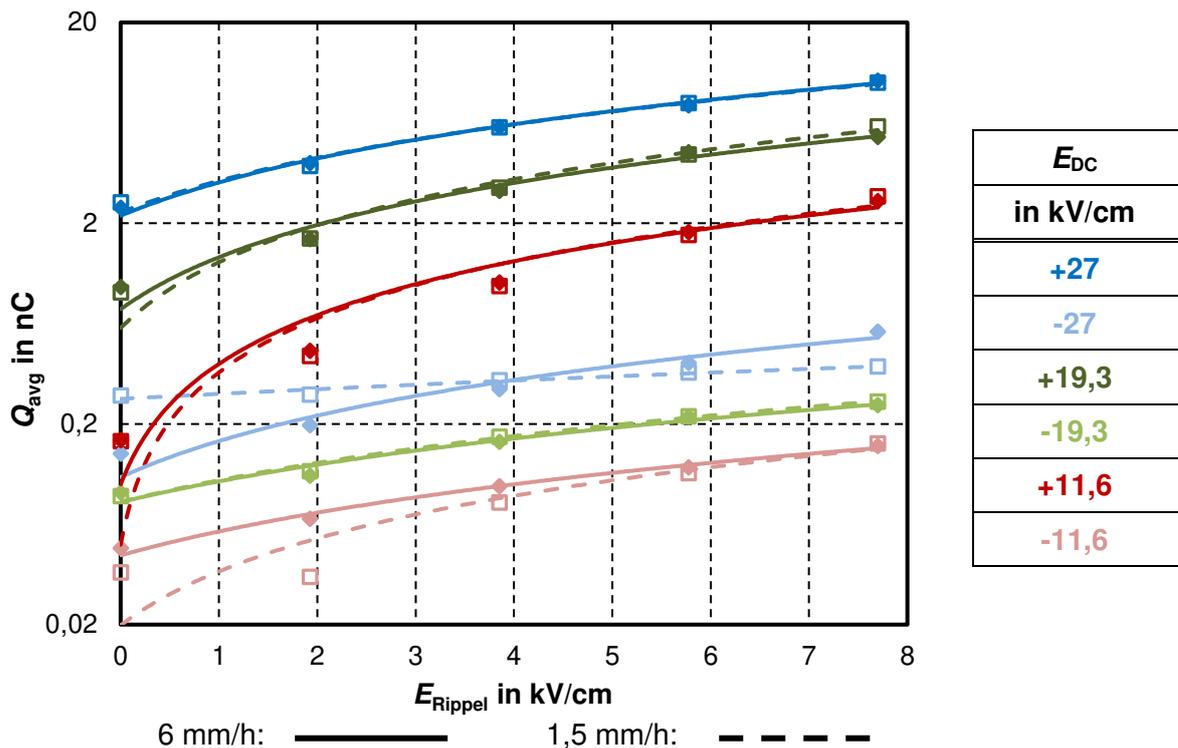


Bild 12.3.8: Mittlere Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit des AC-Rippels
Standardseil – Vergleich der Regenraten

12.3.5 Beeinflussung des Abtrocknungsverhaltens durch den AC-Rippel

Das Abtrocknungsverhalten des DC-Systems unter Hybridbedingungen wurde anhand der Diagramme in Anhang E untersucht. Aufgrund der etwas widersprüchlichen Ergebnisse zum **A-gewichteten Schalleistungspegel** können hierzu keine generellen Aussagen getroffen werden, wodurch diesbezüglich weitere Forschungsarbeiten notwendig sind.

Der **50-Hz-Schalleistungspegel** ist eindeutig sowohl von der Höhe des AC-Rippels, als auch vom Anteil der DC-Feldstärke abhängig. Es kann beobachtet werden, dass diese Komponente ohne Überlagerung eines AC-Rippels während des betrachteten Zeitraumes annähernd konstant bleibt. Tritt nun eine diesbezügliche Überlagerung auf, erhöht sich dieser Frequenzanteil um einige dB und verringert sich mit zunehmender Zeit, was mit der Tatsache erklärt werden kann, dass der AC-Anteil maßgeblich für diese tonale Komponente verantwortlich ist. Außerdem kann in jeglicher Hinsicht festgestellt werden, dass der Anteil des negativen DC-Pols geringer ausfällt, als jener des positiven.

Über den **100-Hz-Schalleistungspegels** kann ausgesagt werden, dass im betrachteten Zeitraum bei hohem AC-Rippel ($E_{Rippel} = 5,8 \text{ kV/cm}$) ein Abtrocknungsverhalten und eine Verringerung dieses Pegels erkennbar ist. Für alle anderen Messwerte sind die Schwankungsbreiten allerdings so groß, dass keine dezidierten Aussagen getroffen werden können.

Bei der Untersuchung des **Teilentladungsverhaltens** kann, wie in Kapitel 12.3.4 festgestellt werden, dass hier jene des positiven Pols stark dominieren. Es kann prinzipiell eine Zunahme der TE nach $t = 15$ min festgestellt werden, was mit den Aussagen über die höheren Emissionen eines DC-Systems in trockenem Zustand korreliert (Kapitel 3.3.1). Außerdem ist ein schnellerer Anstieg der mittleren TE-Amplitude bei höherer DC-Feldstärke erkennbar. Der AC-Rippel beeinflusst dieses Verhalten dahingehend, dass die TE-Amplitude über den gesamten betrachteten Zeitraum erhöht wird.

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass zusätzlich zu diesen Versuchen noch weitere Langzeitversuche notwendig sind, um definitive Aussagen über die Beeinflussungen des AC-Rippels auf das Abtrocknungsverhalten des DC-Systems zu tätigen.

13 Ausblick

In der vorliegenden Masterarbeit wurden die Auswirkungen der wechselseitigen Kopplung zwischen AC- und DC-System einer Hybridfreileitung auf das Geräuschemissionsverhalten bei unterschiedlichen Umweltbedingungen und Leiterseiloberflächen untersucht. Um eine Abschätzung der Umweltauswirkungen für das Genehmigungsverfahren durchführen zu können, ist es unabdingbar, diese zu kennen und zu berücksichtigen.

Dazu wurde das Emissionsverhalten von 4er-Bündelleitern mit einem Teilleiterabstand von 40 cm im Nikola-Tesla-Labor des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz untersucht. Um die dadurch erhaltenen Erkenntnisse über die Beeinflussung des Geräuschemissionsverhaltens durch einen DC-Offset bzw. AC-Rippel verallgemeinern zu können, ist es notwendig, weitere Forschungsarbeiten mit unterschiedlichen Bündelanordnungen und variablen Teilleiterabständen bei gleichen elektrischen Randfeldstärken durchzuführen.

Dabei sollte zukünftig vor allem den tonalen Komponenten Beachtung geschenkt werden, da diese, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, für den Menschen eine psychoakustische Belastung darstellen. Dies gilt hauptsächlich für die 50-Hz-Komponente, da diese, aufgrund der Mischfeldbeanspruchung, erstmals bei Hybridfreileitungen deutlich wahrzunehmen ist (Kapitel 12.2.2 und 12.3.2) und der humanmedizinische Einfluss dieser Geräuschemission in Zukunft noch größere Bedeutung zukommen könnte.

Im Zuge dieser Arbeit konnte auch eine tendenzielle Beeinflussung des Abtrocknungsverhaltens durch das vorherrschende Mischfeld beobachtet werden. Hierzu wurden Versuche mit einem Abtrocknungszeitraum von 15 min durchgeführt (Kapitel 10.2.5). Möglicherweise wurde dieser Zeitraum allerdings zu kurz festgelegt, um dezidierte Aussagen über dieses Verhalten tätigen zu können. Daher wird für weitere Untersuchungen zu dieser Thematik empfohlen, Langzeitversuche von mindestens 60 min durchzuführen.

In Kapitel 12.3 ist ein negativer Einfluss einer hydrophilen Oberfläche auf den A-gewichteten Schalleistungspegel bei sehr hohen DC-Randfeldstärken erkennbar. Da dies mit dem derzeitigen Wissenstand nicht erklärbar ist, ist auch hierzu weiterer Forschungsbedarf zur physikalischen Begründung dieses Effektes gegeben.

Außerdem ist eine Erhöhung des A-gewichteten Schalleistungspegels aufgrund eines negativen DC-Offsets am AC-System zu beobachten, was in der bisher veröffentlichten Literatur nur

sehr mangelhaft beschrieben wird. Eine mögliche Erklärung hierzu wird in Kapitel 12.2.1 aufgezeigt. Um diese Aussage bekräftigen zu können, sind allerdings weitere Untersuchungen notwendig.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass diese Arbeit eine Beschreibung der grundlegenden Effekte zum Verständnis und zur Quantifizierung des Einflusses von möglichen Feldkopplungen auf das Geräuschemissionsverhalten von Hybridfreileitungen liefert. Allerdings eröffneten sich im Laufe der Ergebnisauswertung weitere Fragestellungen:

- Auf welche Ursache ist die Erhöhung des A-gewichteten Schallleistungspegel durch einen negativen DC-Offset im moderaten AC-Feldstärkebereich zurückzuführen? Ist hierfür die Wiederholungsrate der Teilentladungen verantwortlich?
- Auf welchem physikalischen Effekt basiert die Abhängigkeit der 50-Hz-Komponente von der Regenintensität?
- Warum kann bei sehr hohen AC- und DC-Feldstärken ($E_{DC} = +27 \text{ kV/cm}$ und $E_{\text{Rippel}} = 6 \text{ kV/cm}$) beim hydrophileren Leiter (Altseil) im Vergleich zum Standardseil (Neuseil) ein höherer A-gewichteter Schallleistungspegel beobachtet werden?
- Wie verhalten sich die terzspektralen Schallkomponenten des DC-Systems über einen längeren Abtrocknungszeitraum?

14 Zusammenfassung

Um die aktuelle Wende im Energiesektor von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energiequellen erfolgreich umsetzen zu können, ist es notwendig neue Technologien zum Ausbau und zur Verbesserung des bestehenden Energienetzes einzusetzen. Eine Möglichkeit dazu bietet die Umrüstung von bestehenden AC- oder DC-Freileitungen zu sogenannten Hybridfreileitungen, wo sich mindestens ein AC- und ein DC-System einen Freileitungsmast teilen. Dabei entstehen aufgrund der wechselseitigen Beeinflussungen im Nahbereich der Leiterseile elektrische Mischfelder (Überlagerung von AC- und DC-Feld) Dadurch treten, im Vergleich zu reinen AC- oder DC-Feldern, Änderungen im Teilentladungs- und damit einhergehend im Geräuschemissionsverhalten auf, mit welchen sich diese Arbeit befasst.

Die Analyse des bisherigen Erkenntnisstands zur Entstehung von Geräuschemissionen an Freileitungen in Kapitel 3 zeigte, dass die Geräuschemissionen bei feuchten Wetterbedingungen (Nebel, Regen, Schnee, Raureif) maßgeblich von der Tropfenbildung an der Leiterseiloberfläche beeinflusst werden, da diese zu einer Verzerrung des elektrischen Feldes im Nahbereich des Leiterseiles führen. Hierzu ist bereits seit langem bekannt, dass diese Tropfen an AC-Freileitungen zu lauterem Geräuschen führen und somit in unserem Zustand von größerer Relevanz sind, wohingegen sommerliche Schönwetterbedingungen für DC-Freileitungen das „worst case“-Szenario darstellen. Bei AC gilt vor allem die tonale $2f$ -Schallemission als störend, wodurch dieser eine große Bedeutung für den Einfluss auf die Gesundheit des Menschen zukommt. Somit wird diese 100-Hz-Komponente bei der Beurteilung im Zuge der Umweltverträglichkeitsprüfung gesondert betrachtet.

Nach einem kurzen Überblick und der Erklärung der wichtigsten Begriffe der Akustik, wurde in Kapitel 4 auf die Gleichungen zur Geräuschemissionsprognose nach EPRI und BPA für AC- und DC-Freileitungen eingegangen. Hierzu wurde besonders der Einfluss der Regenintensität beleuchtet und die Umrechnung vom Schalleistungs- auf den Schalldruckpegel sowie die dazugehörige Ausbreitungsdämpfung erklärt.

Um die Geräuschintensität so gering wie möglich zu halten, gibt es zahlreiche Techniken zur Geräuschreduktion. Hierzu zählen die Oberflächenbehandlung von Leiterseilen und die Variation der Seil- und Bündelgeometrie, wobei die Wirksamkeit einige dieser Methoden in Kapitel 5 erläutert wurde. All diese Techniken zielen darauf ab, das elektrische Nahfeld zu homogenisieren und dadurch eine Verringerung der lokalen Randfeldstärke hervorzurufen.

In den Kapiteln 6 und 7 wird schließlich auf die Änderung des elektrischen Feldes bei Hybridfreileitungen infolge der unterschiedlichen Kopplungsmechanismen und des dadurch beeinflussten Geräuschemissionsverhaltens eingegangen. Hierbei wird zwischen der kapazitiven,

induktiven und ohmschen Kopplung unterschieden, welche in Summe ein sogenanntes Mischfeld (AC + DC-Offset bzw. DC + AC-Rippel) erzeugen. Vor allem die kapazitive und ohmsche Kopplung beeinflussen das elektrische Nahfeld bzw. die Koronaaktivität der Leiterseile, wodurch diese als hauptverantwortlich für die Geräuschemissionscharakteristik von Hybridfreileitungen gelten. Hier wurde erstmals auf die Entstehung der tonalen 50-Hz-Komponente eingegangen, welcher im Weiteren besondere Betrachtung geschenkt wird. Um die mögliche kapazitive Kopplung einer realen Hybridfreileitung zu quantifizieren, wurde auch das MATLAB-Tool *OHL AN Analyzer* der TU Graz zur Simulation von elektrischen Feldern an Freileitungen vorgestellt und mit den daraus ermittelten Feldstärkewerten ein Beispiel zur Berechnung der Geräuschemissionen von Hybridfreileitungen durchgeführt. In Kapitel 7.2 wird darauf verwiesen, dass die Schallemissionen von Hybridfreileitungen mit den bekannten Prognosegleichungen berechnet werden können, wobei jeweils die maximale elektrische Randfeldstärke (z.B. $E_{AC} + E_{Offset}$) herangezogen werden muss. Hierbei ist allerdings darauf zu achten, dass die Prognosegleichungen für die jeweiligen „worst case“-Szenarien gelten. Diese stellen für AC feuchtes Wetter, wie Regen, Nebel, Schnee oder Raureif und für DC sommerliche Schönwetterbedingungen dar. Diese Umgebungsbedingungen können allerdings an einem Ort nicht gleichzeitig auftreten, wodurch schließlich einer der ermittelten Schallpegel an die jeweils andere Umgebungsbedingung adaptiert werden muss.

Zur Untersuchung des Einflusses der wechselseitigen Kopplung von AC- und DC-System auf das Geräuschemissionsverhalten von Hybridfreileitungen, wurden im Zuge der vorliegenden Masterarbeit zahlreiche Laborversuche in zwei Prüfserien und unterschiedlichen Laboren durchgeführt (Kapitel 8 bis 10). Hierbei wurde das entstehende elektrische Mischfeld mit Hilfe einer Mischspannung, welche von zwei separat zu regelnden Hochspannungsanlagen erzeugt wurde, simuliert. Dadurch war es möglich diese Versuche mit nur einem Leiterseilbündel als Prüfling durchzuführen, wobei verschiedenste Variationen von Mischfeldern untersucht werden konnten.

Die anschließende Auswertung der Geräuschemessung in Kapitel 11 erfolgte gemäß ISO 3744, welche die Methodik zur normativen Geräuschemessung sowie die Berechnung des Schallleistungspegels (Ursache) anhand des gemessenen Schalldruckpegels (Wirkung) beschreibt. Der Schalldruckpegel ist stark von den vorherrschenden Umgebungsbedingungen abhängig, wodurch dieser Rechenschritt für einen Vergleich mit Messungen unter anderen Umgebungsbedingungen notwendig war.

Die Ergebnisse aus den Laborversuchen (Kapitel 12) zeigten schließlich eine deutliche Abhängigkeit des Geräuschemissions- und Teilentladungsverhaltens von der Höhe und Art des auftretenden Mischfeldes.

Erkenntnisse zur Beeinflussung der Geräuschemissionscharakteristik des AC-Systems durch den DC-Offset:

- A-gewichteter Schallleistungspegel
 - Im moderaten AC-Feldstärkebereich ($E_{AC} = 10 - 15 \text{ kV/cm}$) findet eine Erhöhung durch einen positiven und negativen DC-Offset um bis zu 10 dB(A) statt.
 - Im hohen AC-Feldstärkebereich (ab $E_{AC} = 15 \text{ kV/cm}$) ist eine geringfügige Erhöhung durch einen positiven DC-Offset und eine geringe Verminderung durch einen negativen DC-Offset erkennbar.
 - Die Abhängigkeit des A-gewichteten Schallleistungspegels von der Regenrate bzw. der Leiterseiloberfläche ist im moderaten AC-Feldstärkebereich besonders ausgeprägt.
 - Die bekannten Oberflächenbehandlungen zur Verbesserung der Hydrophilie und damit einhergehend zur Reduktion der Geräuschemissionen behalten ihre Funktion auch unter Hybridbedingungen bei.
- 50-Hz-Schallleistungspegel
 - Diese Komponente weist eine starke Abhängigkeit von der Höhe des DC-Offsets auf.
 - Es kann allerdings eine Unabhängigkeit von der Polarität des DC-Offsets festgestellt werden.
 - Zwischen der Regenrate und dem 50-Hz-Schallleistungspegel kann eine positive Korrelation beobachtet werden. Treten also höhere Regenraten auf, kann von einer Erhöhung des 50-Hz-Emissionspegel ausgegangen werden.
 - Auch hierbei behalten die bekannten Oberflächenbehandlungen zur Verbesserung der Hydrophilie ihre Funktionalität bei und verringern den 50-Hz-Emissionspegel.
- 100-Hz-Schallleistungspegel
 - Es wurde kein Einfluss durch einen DC-Offset festgestellt.
- Abtrocknungsverhalten
 - Hierbei konnte eine geringe Erhöhung aller Schallpegel durch einen DC-Offset beobachtet werden.

Erkenntnisse zur Beeinflussung der Geräuschemissionscharakteristik des DC-Systems durch den AC-Rippel:

- A-gewichteter Schallleistungspegel
 - Durch eine Überlagerung der DC-Randfeldstärke mit einem AC-Rippel ist sowohl bei positiver als auch bei negativer Polarität eine Erhöhung des A-gewichteten Schallleistungspegels über den gesamten DC-Feldstärkebereich erkennbar.

- Der negative DC-Pol weist über den gesamten DC-Feldstärkebereich geringere Emissionswerte auf als der positive DC-Pol.
- Der Einfluss der Regenrate auf den A-gewichteten Schalleistungspegel fällt bei hohem AC-Rippel geringer aus.
- Bis $E_{DC} = 19,3 \text{ kV/cm}$ behalten die bekannten Oberflächenbehandlungen ihre Wirksamkeit bei. Bei höheren DC-Randfeldstärken kann beim Leiterseilbündel mit hydrophiler Oberfläche (Altseil) ein höherer A-gewichteter Schalleistungspegel als beim Standardseil (Neuseil) beobachtet werden.
- 50-Hz-Schalleistungspegel
 - Bei höheren DC-Feldstärken hat ein überlagerter AC-Rippel einen größeren Einfluss auf diese Emissionskomponente.
 - Die 50-Hz-Schallemission des positiven DC-Pols fallen geringfügig höher aus als jene des negativen DC-Pols.
 - Bei höheren Regenraten fallen auch diese Emissionswerte geringfügig höher aus.
 - Die bekannten Oberflächenbehandlungen verbessern die Emissionscharakteristik und behalten somit ihre Wirksamkeit bei.
- 100-Hz-Schalleistungspegel
 - Aufgrund des überlagerten AC-Rippels tritt nun auch am DC-System eine 100-Hz-Komponente auf.
 - Die Emissionswerte erhöhen sich mit steigendem AC-Rippel und zunehmender DC-Feldstärke.
 - Die Abhängigkeit dieser Komponenten vom AC-Rippel fällt bei hoher, positiver DC-Feldstärke höher aus.
 - Bei hohen Regenraten ist die Abhängigkeit dieser Emissionswerte vom AC-Rippel stärker ausgeprägt.
 - Die bekannten Oberflächenbehandlungen zur Verbesserung der Hydrophilie behalten ihre Wirksamkeit bei.
- Abtrocknungsverhalten
 - Im betrachteten Zeitraum kann eine Verringerung des 50-Hz-Schalleistungspiegels beobachtet werden.
 - Außerdem ist im betrachteten Zeitraum eine Verringerung der 100-Hz-Komponente bei hohem AC-Rippel erkennbar.

Mit Hilfe der Erkenntnisse dieser Masterarbeit ist es möglich, erste Abschätzungen über die Änderung des Geräuschemissionsverhaltens aufgrund der Umrüstung einer AC- bzw. DC-Freileitung auf eine Hybridleitung zu tätigen. Dies ermöglicht es bereits vor einer Umweltverträglichkeitsprüfung Minderungsmaßnahmen im Sinne eines optimalen Anrainerschutzes, wie

Leiteseiloberflächenbehandlungen oder entsprechende Mastkonfigurationen, zu tätigen. Somit kann möglichen Konfrontationen mit der Bevölkerung entgegengewirkt und etwaige Kosten durch eine Verzögerung des Genehmigungsverfahrens eingespart werden. Außerdem könnten die, in dieser Arbeit vorgestellten, Geräuschemissionsprognosegleichungen und das damit verbundene Berechnungsbeispiel für AC/DC-Hybridfreileitungen dabei helfen, die Planung zukünftiger Hybridfreileitungstrassen in Österreich oder Europa zu vereinfachen.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Franck: „Hybride Stromnetze für die Energiewende“, <https://www.ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2015/03/hybride-stromnetze-fuer-die-energiewende.html>, Zugriff am: 18.04.2019
- [2] J. Schindler: „Elektromagnetische Kopplungen hybrider AC-DC-Leitungen“, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2016
- [3] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus: „Bundesgesetz über die Prüfung der Umweltverträglichkeit (Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz 2000): UVP-G 2000“, <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010767>, Zugriff am: 26.12.2019
- [4] J. Engelen u. a.: „Ermittlung und Beurteilung von Koronageräuschen an Höchstspannungsfreileitungen“, Lärmbekämpfung, Bd. 6, Nr. 4, 2012
- [5] EPRI: "AC Transmission Line Reference Book: 200 kV and Above, Third Edition“, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 2005
- [6] G. Taylor: "Disintegration of Water Drops in an Electric Field“, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, No. 1382, 1964
- [7] X. Li et al.: "Comparison Between the Audible Noises Generated from Single Corona Source Under DC and AC Corona Discharge“, CSEE Power and Energy Syst., Vol.1, No. 3, 2015
- [8] S. Hedtke et al.: "Effect of Electrostatic Induction and Space Charges on the Audible Corona Noise of Hybrid AC/DC Transmission Lines“, 2nd International Colloquium on EHV and UHV (AC & DC), CIGRÉ, Montreal, Canada, 2016
- [9] Wikipedia: „Durchschlagspannung“, <https://de.wikipedia.org/wiki/Durchschlagspannung>, Zugriff am: 25.12.2019
- [10] A. Küchler: „Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen“, Springer Vieweg, Berlin, 4. Auflage, 2017
- [11] W. Legler: „Die Statistik der Elektronenlawinen in elektronegativen Gasen, bei hohen Feldstärken und bei großer Gasverstärkung“, Zeitschrift für Naturforschung, Vol. 16, Nr. 3, 1961

- [12] P. Schulz: „Elektronische Vorgänge in Gasen und Festkörpern“, G. Braun, Karlsruhe, 2. Auflage, 1974
- [13] G. Trichel: "The Mechanism of the Negative Point to Plane Corona Near Onset“, Department of Physics, University of California, Berkley, California, 1938
- [14] M. Pfeiffer: "Ion-Flow Environment of HVDC and Hybrid AC/DC Overhead Lines“, Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 2017
- [15] Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie: „Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen“, Wiesbaden, 2015
- [16] P. Maruvada: "Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines“, Research Studies Press, Baldock, England, 2000
- [17] T. Teich, H.-J. Weber: "Origin and Abatement of Tonal Emission from High Voltage Transmission Lines“, e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Vol. 119, No. 1, 2002
- [18] M. Semmler u. a.: „Tonale Schallemissionen von Hochspannungsfreileitungen: Mechanismus und Reduktionsmaßnahmen“, Bulletin SEV/VSE, Nr. 15, 2005
- [19] U. Straumann, M. Semmler: "About the Mechanism of Tonal Emission from High Voltage Transmission Lines“, 15th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Toulouse, France, 2004
- [20] O. Pischler: „Geräuschemissionen von Freileitungsseilen“, Masterarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Österreich, 2016
- [21] U. Straumann: "Mechanism of the Tonal Emission from AC High Voltage Overhead Transmission Lines“, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 44, No. 7, 2011
- [22] IEEE Corona and Field Effects Subcommittee: "A Comparison of Methods for Calculating Audible Noise of High Voltage Transmission Lines“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101, No. 10, 1982
- [23] V. Chartier, R. Stearns: "Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High Voltage AC and DC Lines“, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100, No. 1, 1981

- [24] IEEE Corona and Field Effects Subcommittee: "A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-98, No. 6, 1979
- [25] I. Kurniawan: "Surface Gradient Calculation and Audible Noise Prediction of Overhead Transmission Lines: Case Study: Indonesian 500 kV and European 400 kV Tower Setups", Masterarbeit, Bandung Institute of Technology, Bandung, Indonesien, 2018
- [26] K.-H. Yang et al.: "New Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead HVAC Lines Using Evolutionary Computations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, 2000
- [27] Umweltbundesamt Deutschland: „Grundlagen der Akustik“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verbraucherservice-laerm/grundlagen-der-akustik#text-part-2>, Zugriff am: 19.11.2019
- [28] Umweltbundesamt Österreich: „Schalldruckpegel, energieäquivalenter Dauerschallpegel und Lärmindizes“, <https://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/laerm/schalldruckpegel>, Zugriff am: 19.11.2019
- [29] U. Straumann, H.-J. Weber: „Abschlussbericht zum Projekt Corona Noise Reduction CONOR II“, ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnologie, 2009
- [30] EPRI: "Transmission Line Reference Book: 345 kV and above", Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1982
- [31] U. Straumann u.a.: „Schlussbericht des Projekts CONOR“, ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnologie, 2006
- [32] K. Heutschi: „Aufarbeitung des CONOR Forschungsergebnisse für den Vollzug – Update des Berichts: Empa-Nr. 452'574“, Empa, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik/Lärminderung, 2016
- [33] J. Lundquist: "Results from AC Transmission Line Audible Noise Studies at the Anneberg EHV Test Station", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, 1990
- [34] B. Clairmont, G. Johnson, L. Zaffanella: "The Effect of HVAC-HVDC Line Separation in a Hybrid Corridor", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, 1989

- [35] P. Maruvada et al.: "Corona Studies for Bipolar HVDC Transmission at Voltages Between ± 600 kV and ± 1200 kV, Part 1: Long-Term Bipolar Line Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100, No. 3, 1981
- [36] W. Pokorny et al.: "Investigation of Corona Effects from Wet Bundle Conductors for Application to UHV Configurations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-91, No. 1, 1972
- [37] O. Pischler, U. Schichler: "Bundle Conductor Geometry Optimization for Reducing Audible Noise of Overhead Power Lines", 20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentinien, 2017
- [38] T. Eibach: „Messung des Kontaktwinkels bei erzwungener dynamischer Be- und Entnetzung unter Verwendung eines reflektierten Laserstrahls“, Wissenschaftliche Prüfungsarbeit, Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz, 2012
- [39] U. Straumann, H.-J. Weber: "Potential Reduction of Audible Noise from New and Aged Overhead Transmission Line Conductors by Increasing their Hydrophilicity", 43rd International Conference on Large High Voltage Electric Systems, CIGRÉ, Paris, Frankreich, 2010
- [40] U. Straumann: „Berechnung und Reduktion der tonalen Geräuschemission von Hochspannungsfreileitungen“, Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 2007
- [41] O. Pischler et al.: "Corona Effects of Overhead Lines Under Mixed AC/DC Stresses", CIGRÉ, Chengdu 2019 Symposium, 2019
- [42] Deutsche Gesellschaft für EMV-Technologie e.V.: „Kapazitive Kopplung“, <https://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectid=857c163a%5F95e3%5F4c42%5F80c6da07c58ada5a>, Zugriff am: 09.01.2019
- [43] A. Pratama et al.: "Corona Effects on AC Circuits on an Indonesian 500 kV Hybrid Overhead Line", 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 2019
- [44] K. Ibrahim et al.: "Audible Noise and Corona Losses of DC Circuits on Hybrid Overhead Lines", 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 2019

- [45] B. Rusek et al.: "Ohmic Coupling Between AC and DC Circuits on Hybrid Overhead Lines", CIGRÉ Symposium, Auckland, Neuseeland, 2013
- [46] M. Pfeiffer, C. Franck, J. Schmutz: "DC Ion-Currents in AC Conductors in Hybrid AC/DC Transmission Systems", 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, UK, 2015
- [47] M. Beltle u. a.: „Auswirkungen von Gleichströmen auf Leistungstransformatoren“, 6. ETG-Fachtagung, VDE, Berlin, Deutschland, 2014
- [48] P. Maruvada, S. Drogi: "Field and Ion Interactions of Hybrid AC/DC Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, 1988
- [49] B. Clairmont et al.: "Hybrid Tower Study: Volume 3: Phase 3 – Scale Model Development and Full-Scale Tests", EPRI, Palo Alto, California, 1994
- [50] S. Hedtke et al.: "Audible Noise of Hybrid AC/DC Overhead Lines: Comparison of Different Prediction Methods and Conductor Arrangements", HVDC & Flexible AC Transmission System (FACTS) Conference, EPRI, Palo Alto, California, 2015
- [51] N. Malik: "A Review of the Charge Simulation Method and its Applications", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 1, 1989
- [52] M. Abou-seada, E. Nasser: "Digital Computer Calculation of the Potential and its Gradient of a Twin Cylindrical Conductor", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-88, No. 12, 1969
- [53] V. Chartier et al.: "Investigation of Corona and Field Effects of AC/DC Hybrid Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100, No. 1, 1981
- [54] Deutsches Institut für Normung: „Hochspannungs-Prüftechnik Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen“, DIN EN 60060-1 (IEC 60060-1:2010), 2011
- [55] L. Frauenlob: „Aufbau und Erprobung eines akustischen Messsystems für Geräuschemissionen von Freileitungsseilen“, Bachelorarbeit, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Technische Universität Graz, Graz, Österreich, 2018
- [56] Internationale Organisation für Normung: "Acoustics – Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure – Engineering Method in an Essentially Free Field over a Reflecting Plane", ISO 3744, 1994

- [57] International Electrotechnical Commission: "High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements", IEC 60270:2000, 2015
- [58] OMICRON electronics GmbH: „CPL 542/543: Vierpol-Messimpedanz“, <https://www.omicronenergy.com/de/produkte/cpl-542543/#intro>, Zugriff am: 22.10.2019
- [59] R. Schwarz: „Teilentladungen in der Energietechnik“, Lehrveranstaltung 433.035, TU Graz, 2019
- [60] U. Schichler: „Grundlagen der Hochspannungstechnik“, Lehrveranstaltung 433.100, TU Graz, 2014
- [61] T. Regmi, A. Thompson: "Rainfall Simulator for Laboratory Studies“, Applied Engineering in Agriculture, Vol. 16, No. 6, 2000
- [62] NTi-Audio AG: „Frequenzgewichtungen von Schallpegeln: Terzband-Gewichtungsfaktoren“, <https://www.nti-audio.com/de/service/wissen/frequenzgewichtungen-von-schallpegeln>, Zugriff am: 27.11.2019
- [63] I. Sattig: „Vergleichende Freifeld- und Labormessungen an verschiedenartigen Leiterseiltechniken und Ermittlung der verbessernden Wirkung auf die längenbezogene Schalleistung“, TÜV Technische Überwachung Hessen GmbH, Rüsselsheim, 2015

Anhang

- Anhang A:** Felder bei Hybridleitungen – Simulation
- Anhang B:** Fotos der Versuchsaufbauten
- Anhang C:** Messergebnisse: Extremklimalabor
- Anhang D:** Nikola-Tesla-Labor – Beeinflussung des AC-Systems
- Anhang E:** Nikola-Tesla-Labor – Beeinflussung des DC-Systems

Anhang A

Felder bei Hybridleitungen – Simulation

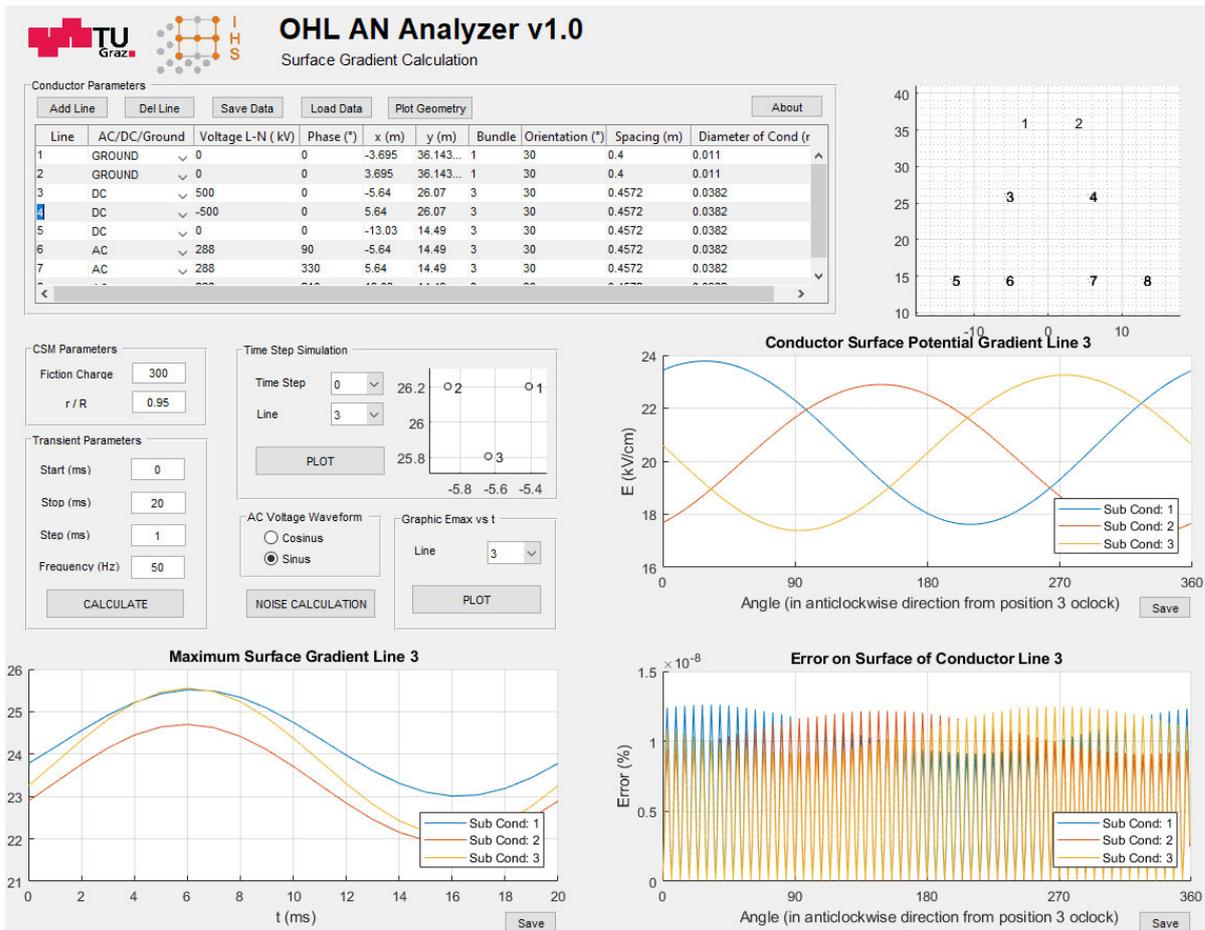


Bild A.1: Screenshot der Simulationssoftware *OHL AN Analyzer*
Plot: Leitung 3 (+DC)

Anhang B

Fotos der Versuchsaufbauten

Extremklimalabor

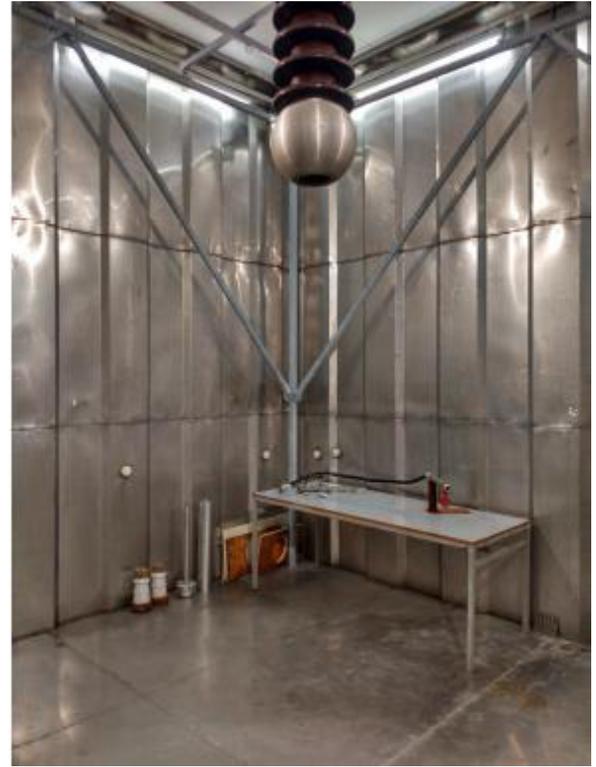


Bild B.1: Extremklimalabor ohne akustische Optimierung [55]



Bild B.2: Extremklimalabor mit 5 Raumseiten akustisch optimiert [55]

Nikola-Tesla-Labor

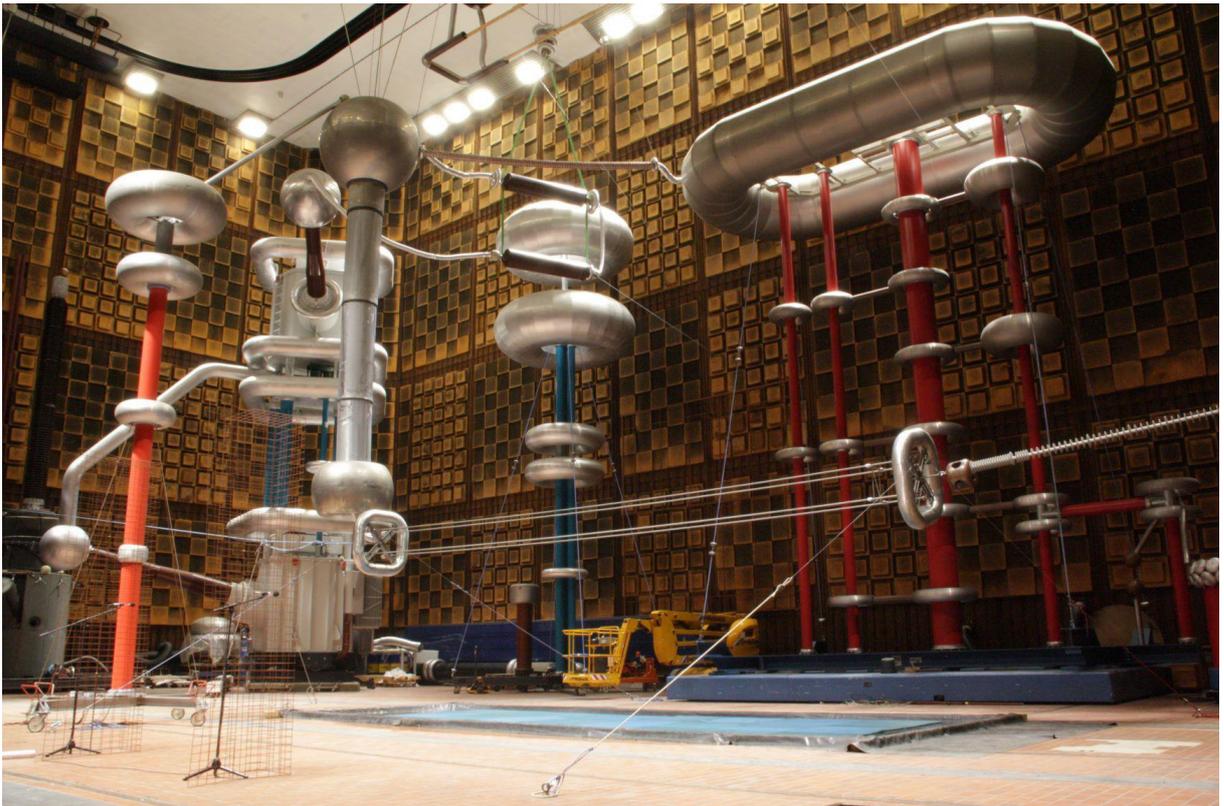


Bild B.3: Foto des Versuchsaufbaus im Nikola-Tesla-Labor



Bild B.4: Foto der Regenanlage im Nikola-Tesla-Labor [41]

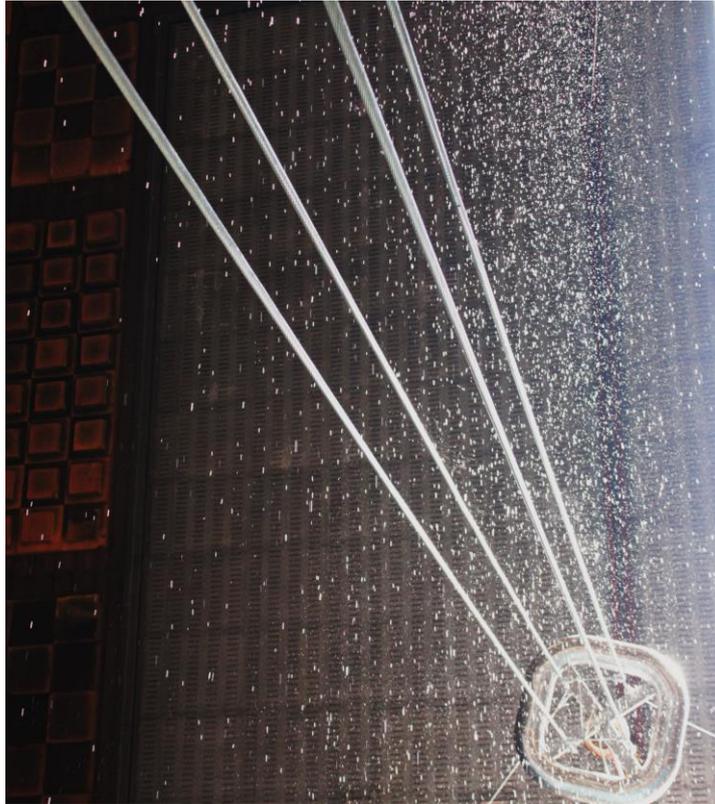


Bild B.5: Beregnung des Leiterseilbündels

Anhang C

Messergebnisse: Extremklimalabor

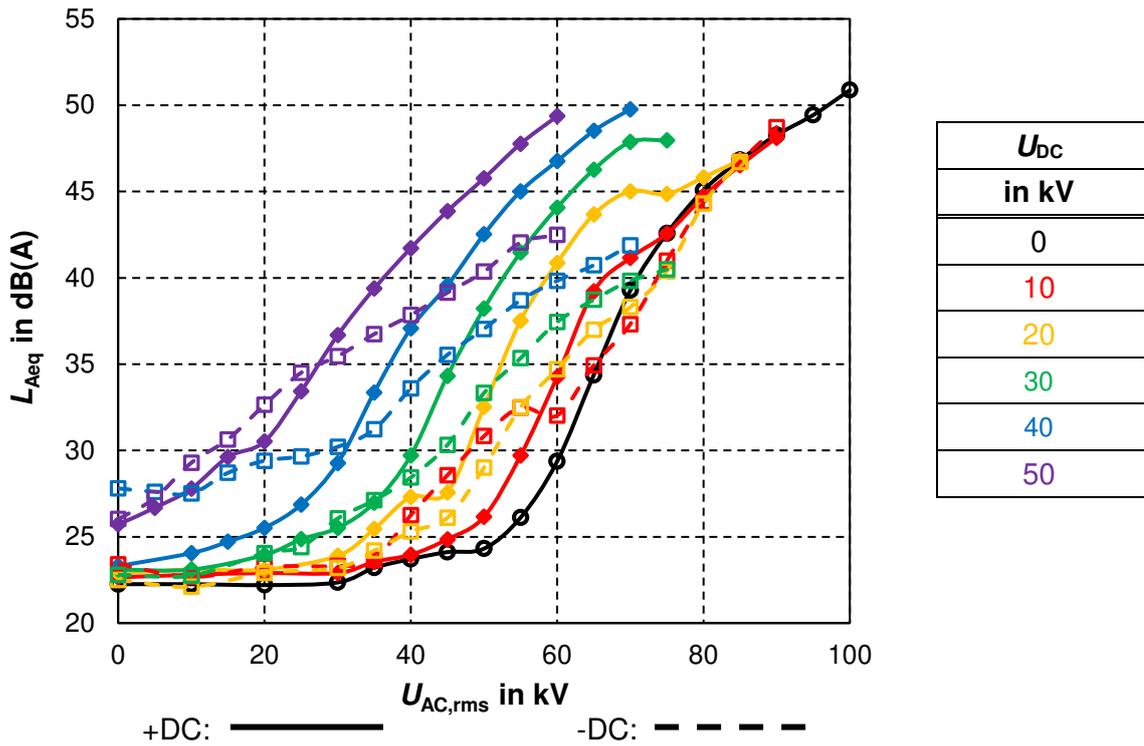


Bild C.1: A-gewichteter, energieäquivalenter Schalldruckpegel in Abhängigkeit der AC-Spannung – Blank neu

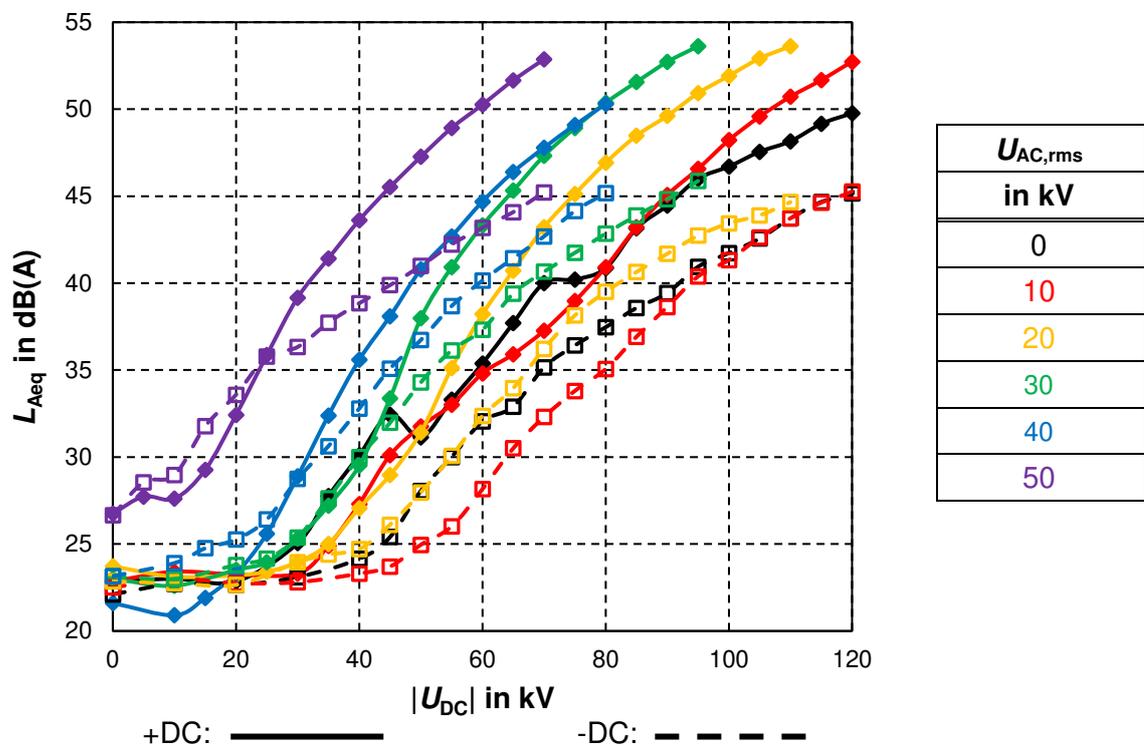


Bild C.2: A-gewichteter, energieäquivalenter Schalldruckpegel in Abhängigkeit der DC-Spannung – Blank neu

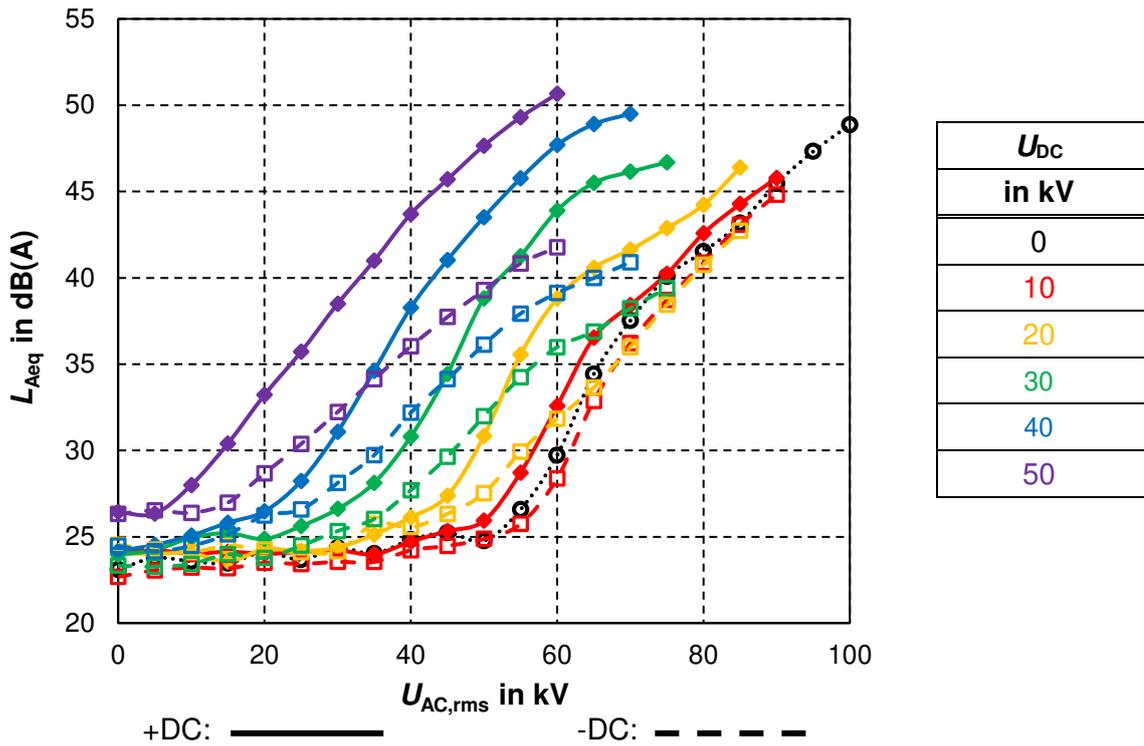


Bild C.3: A-gewichteter, energieäquivalenter Schalldruckpegel in Abhängigkeit der AC-Spannung – Blank alt

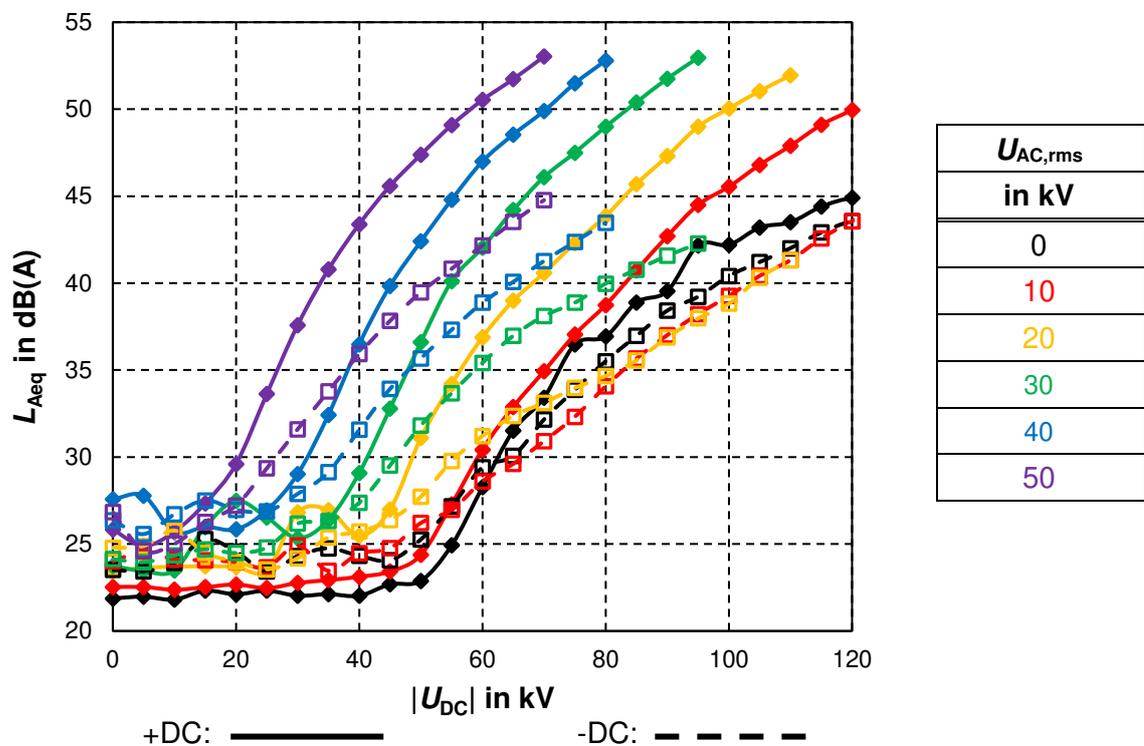


Bild C.4: A-gewichteter, energieäquivalenter Schalldruckpegel in Abhängigkeit der DC-Spannung – Blank alt

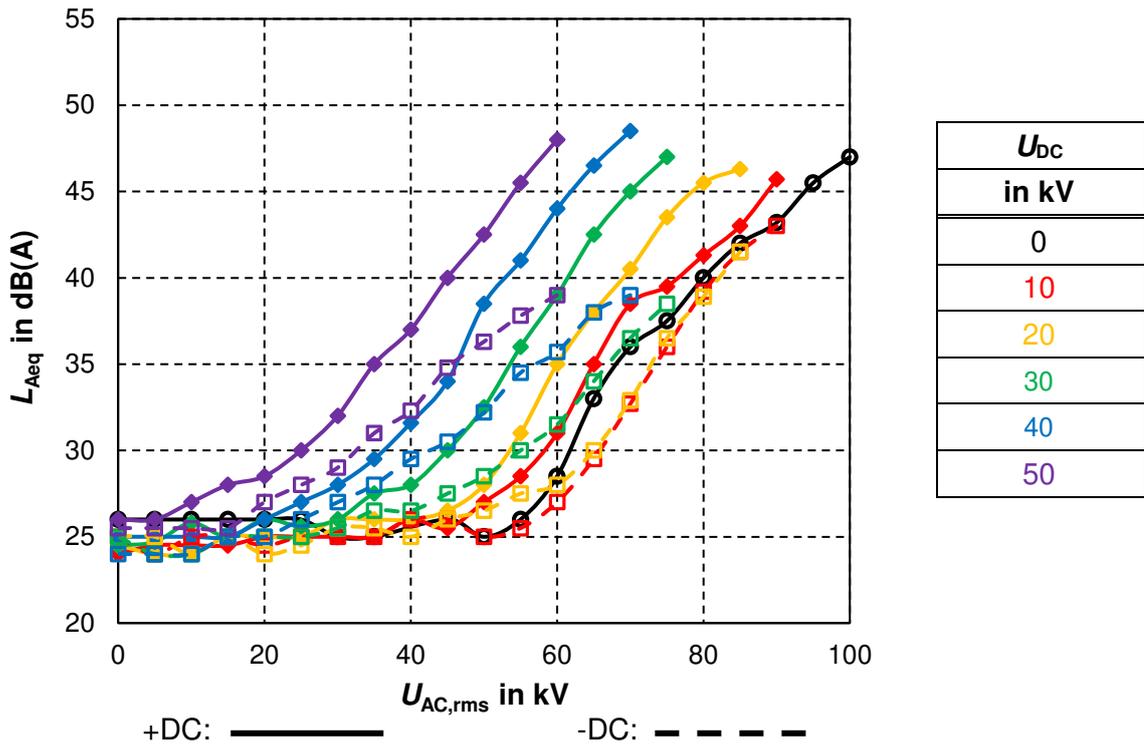


Bild C.5: A-gewichteter, energieäquivalenter Schalldruckpegel in Abhängigkeit der AC-Spannung – glasperlengestrahlt

Anhang D

Messergebnisse: Nikola-Tesla-Labor – AC-System

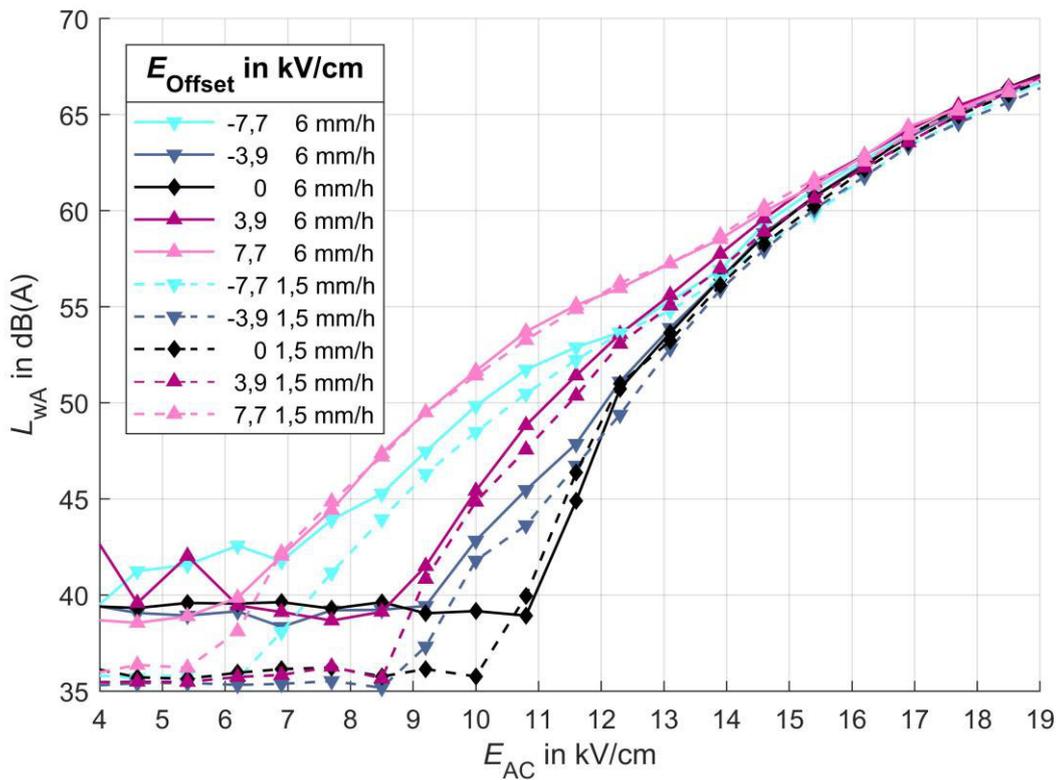


Bild D.1: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Standardseil - Vergleich Regenraten

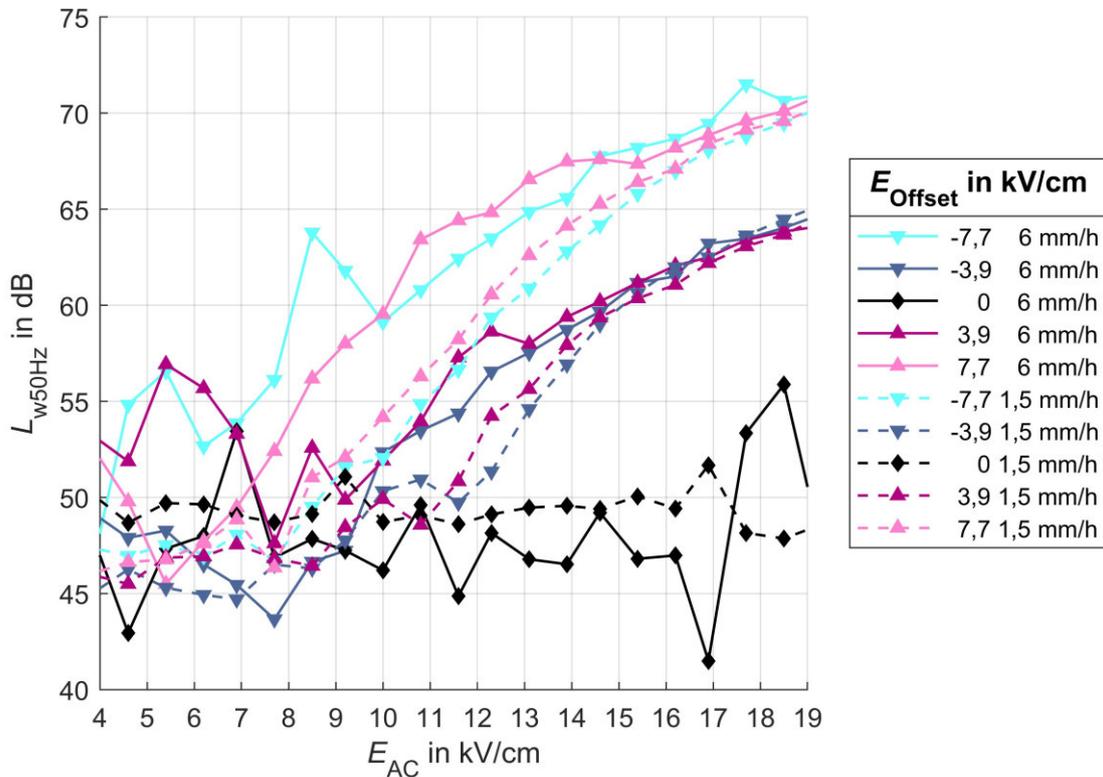


Bild D.2: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Standardseil - Vergleich Regenraten

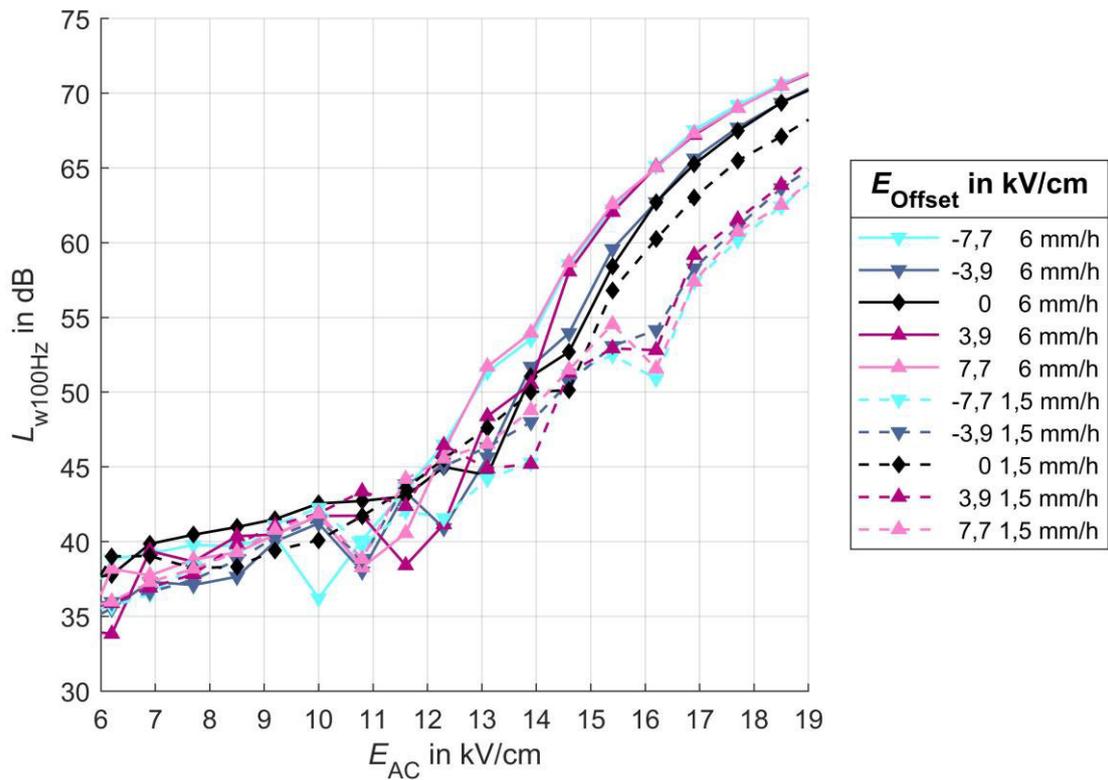


Bild D.3: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Standardseil - Vergleich Regenraten

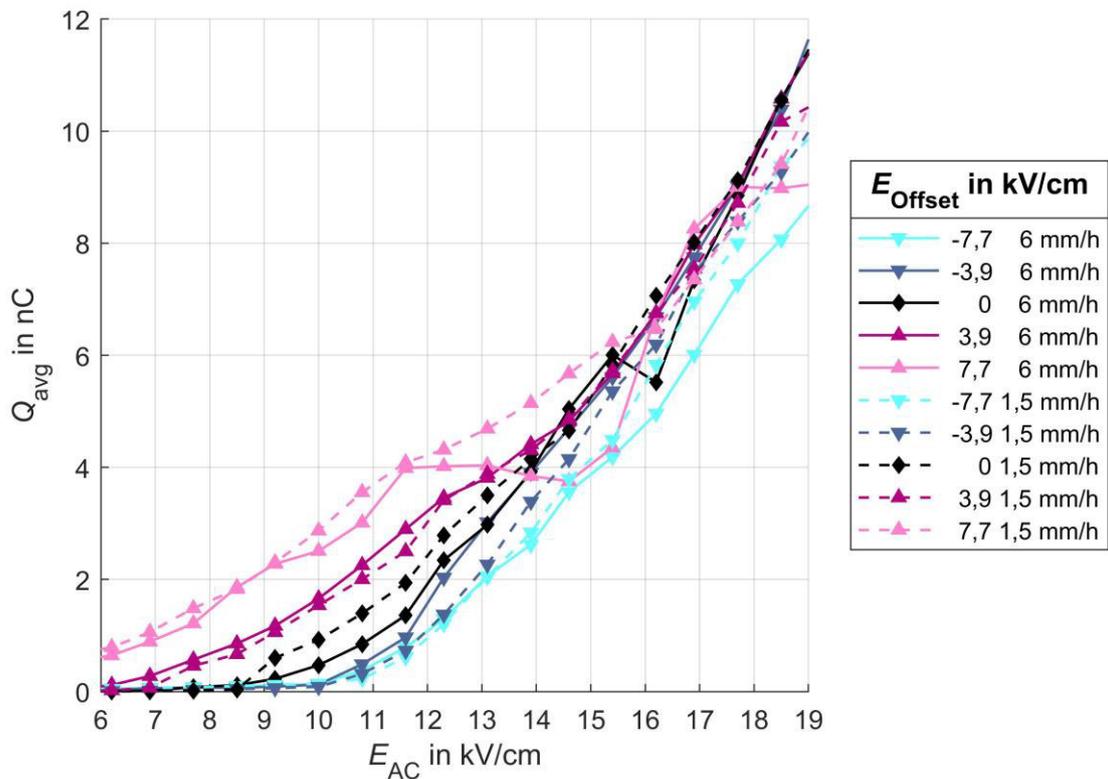


Bild D.4: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Standardseil - Vergleich Regenraten

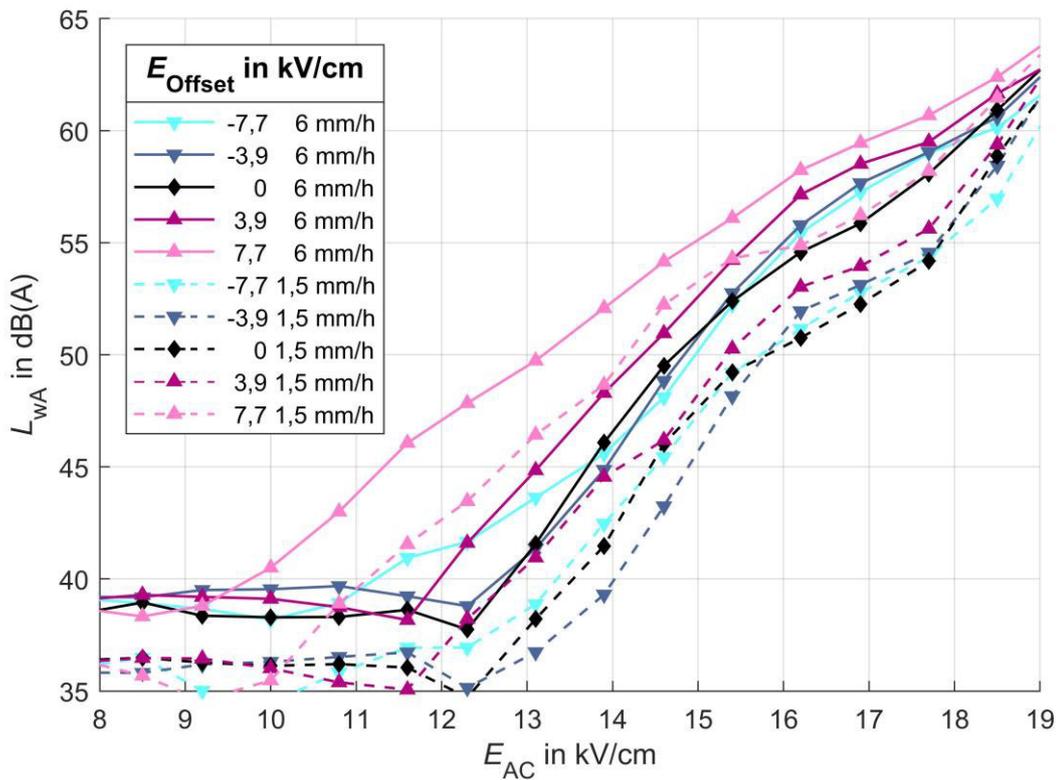


Bild D.5: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Altseil (hydrophil) - Vergleich Regenraten

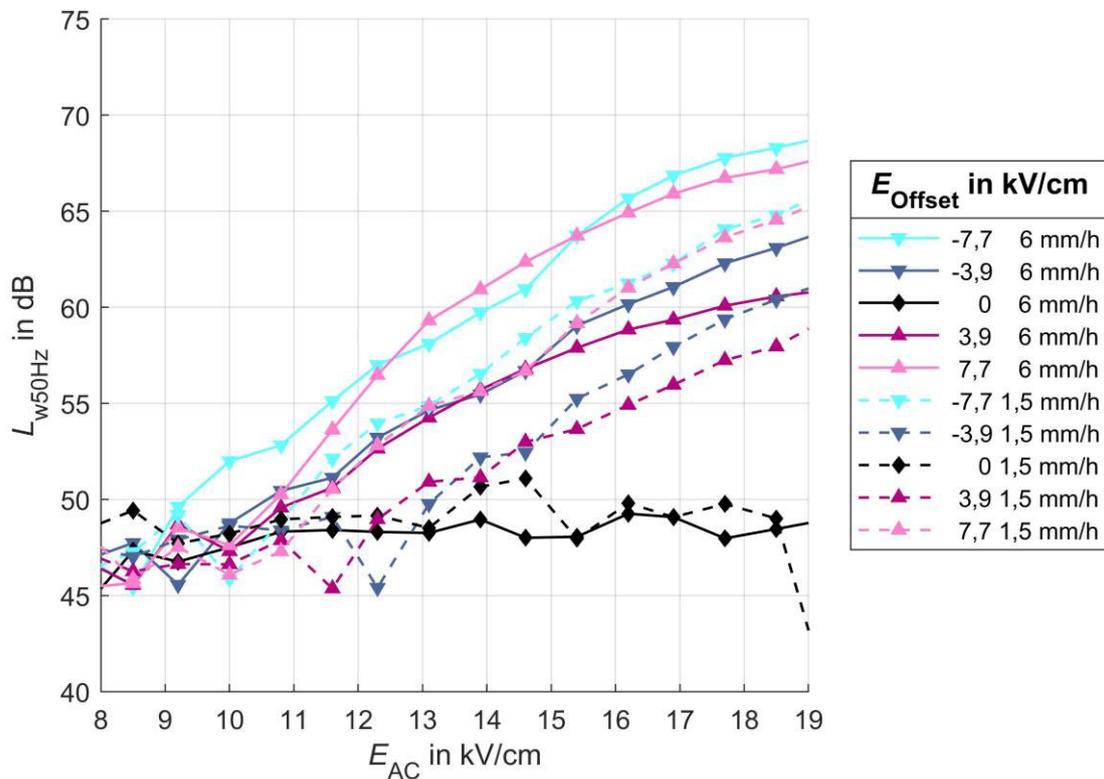


Bild D.6: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Altseil (hydrophil) - Vergleich Regenraten

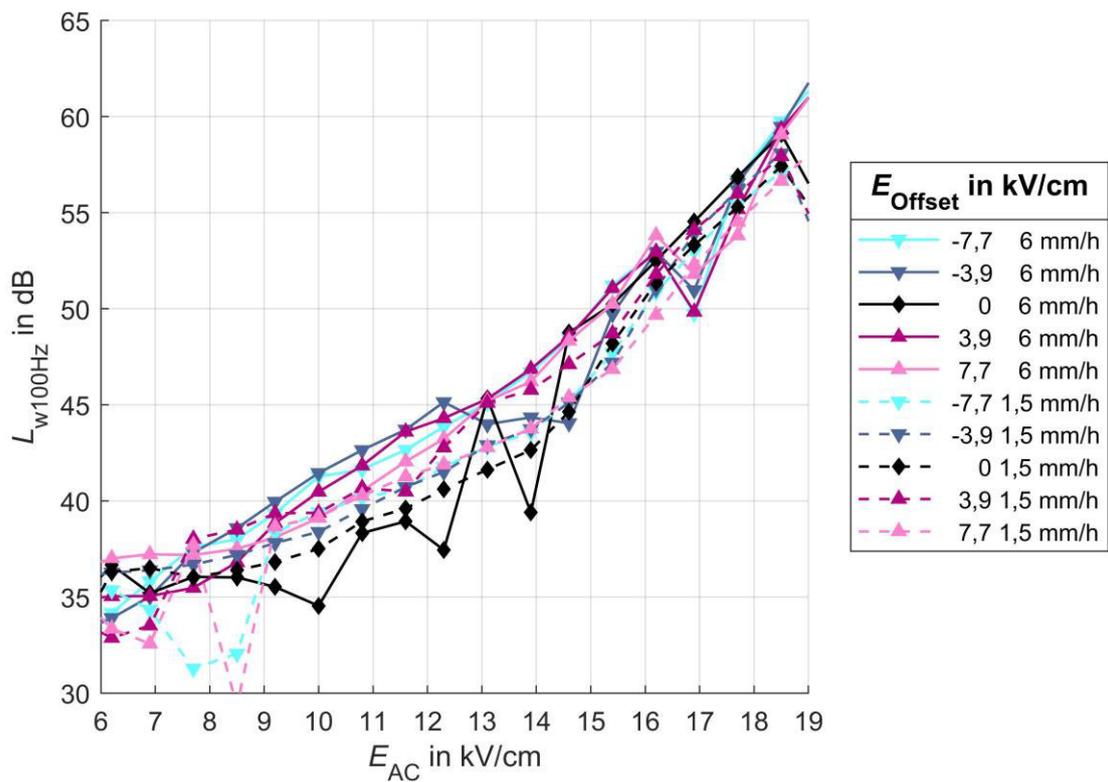


Bild D.7: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Altseil (hydrophil) - Vergleich Regenraten

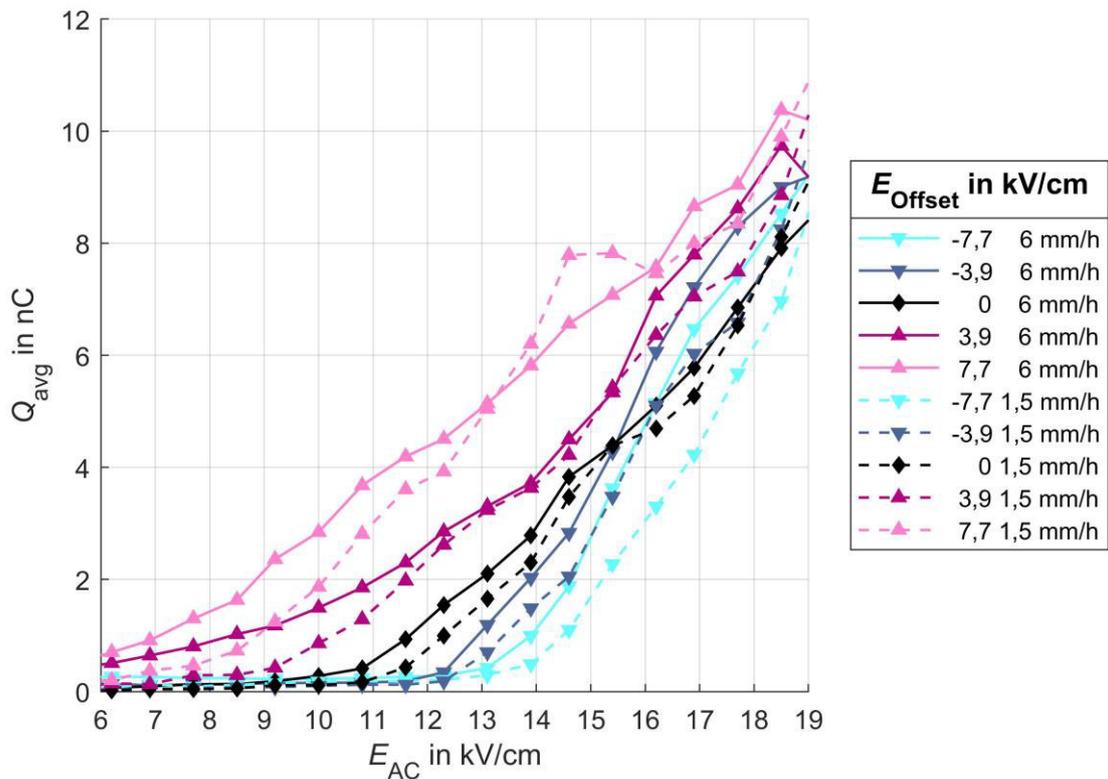


Bild D.8: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Altseil (hydrophil) - Vergleich Regenraten

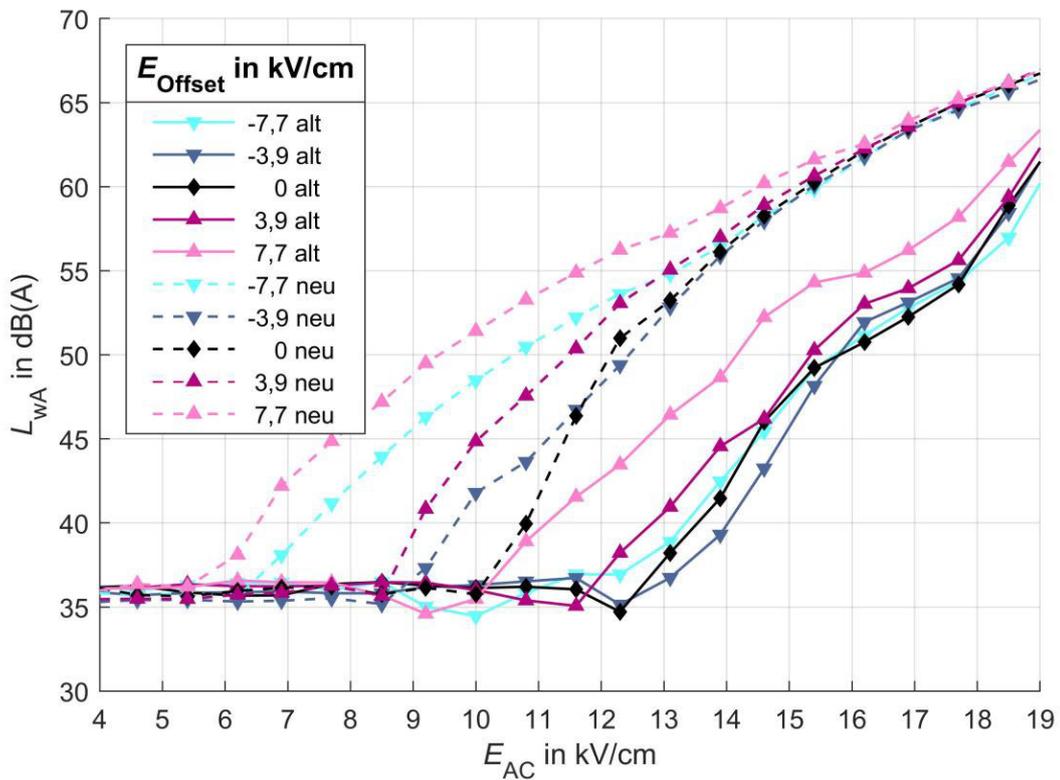


Bild D.9: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h - Vergleich Leiterseiloberflächen

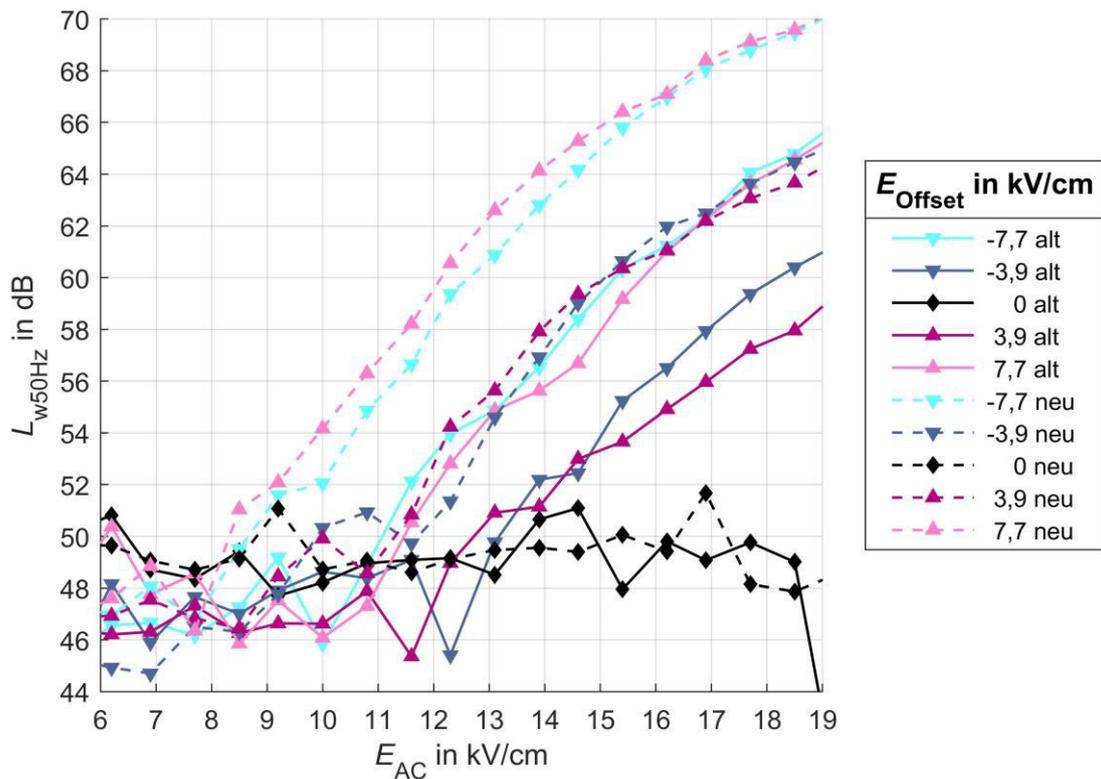


Bild D.10: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h - Vergleich Leiterseiloberflächen

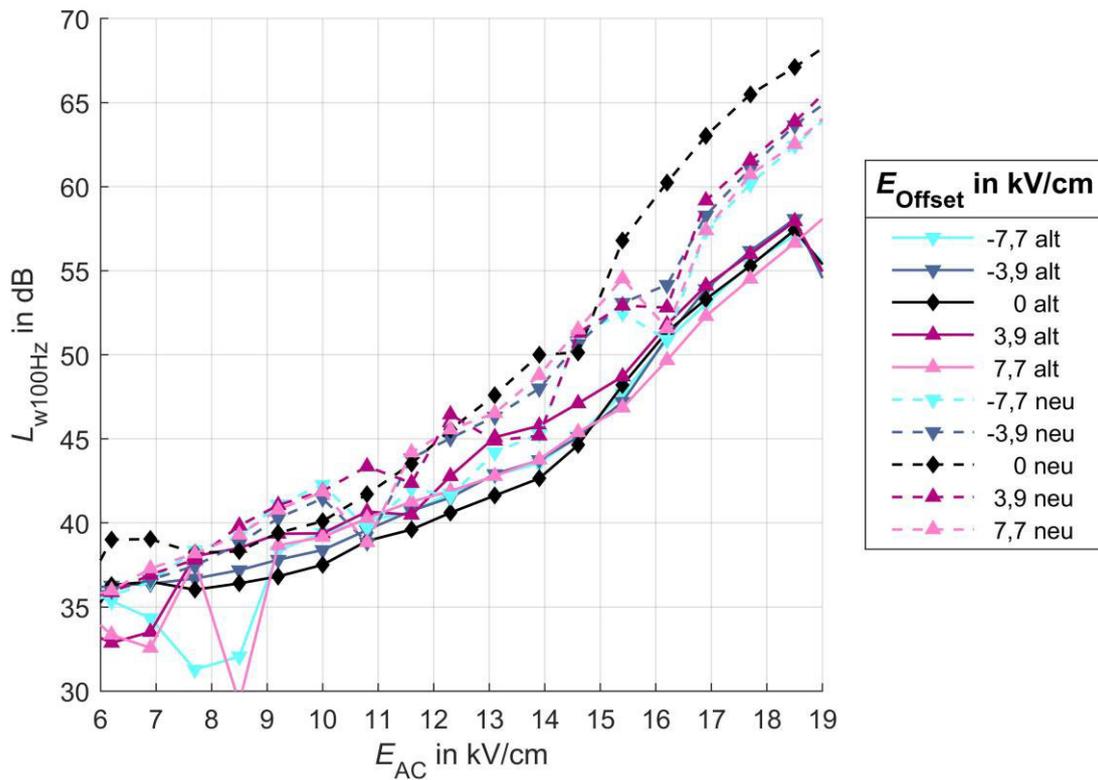


Bild D.11: 100-Hz Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h - Vergleich Leiterseiloberflächen

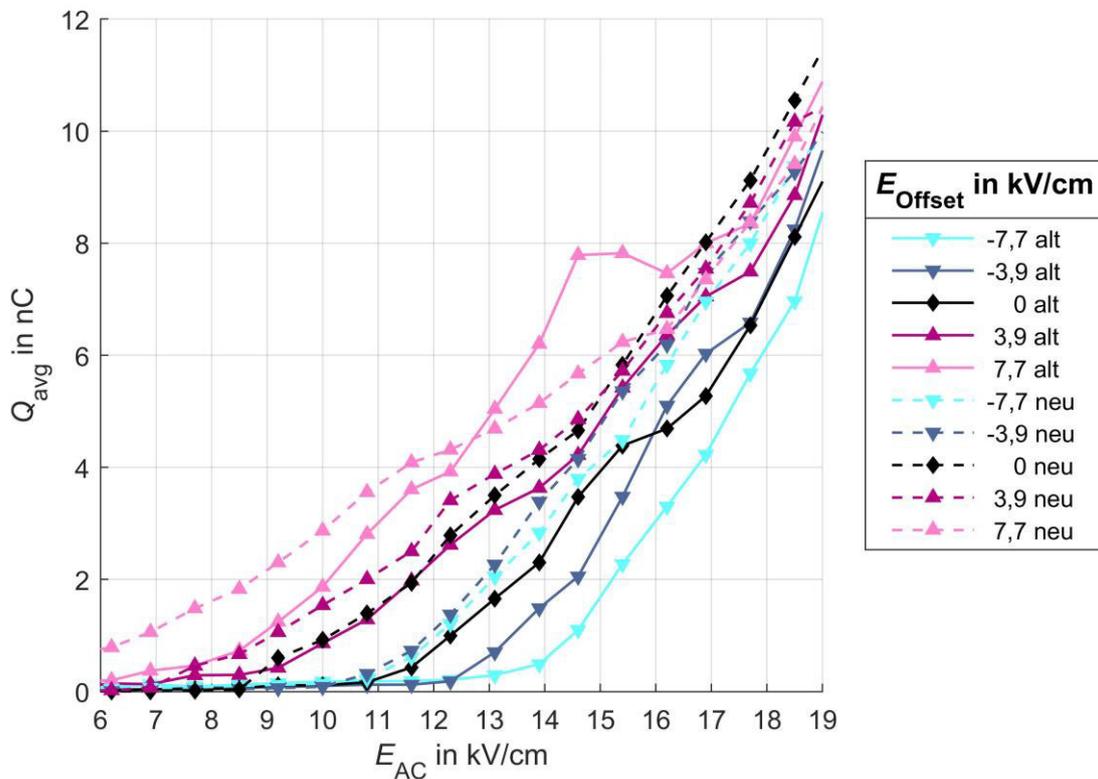


Bild D.12: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h - Vergleich Leiterseiloberflächen

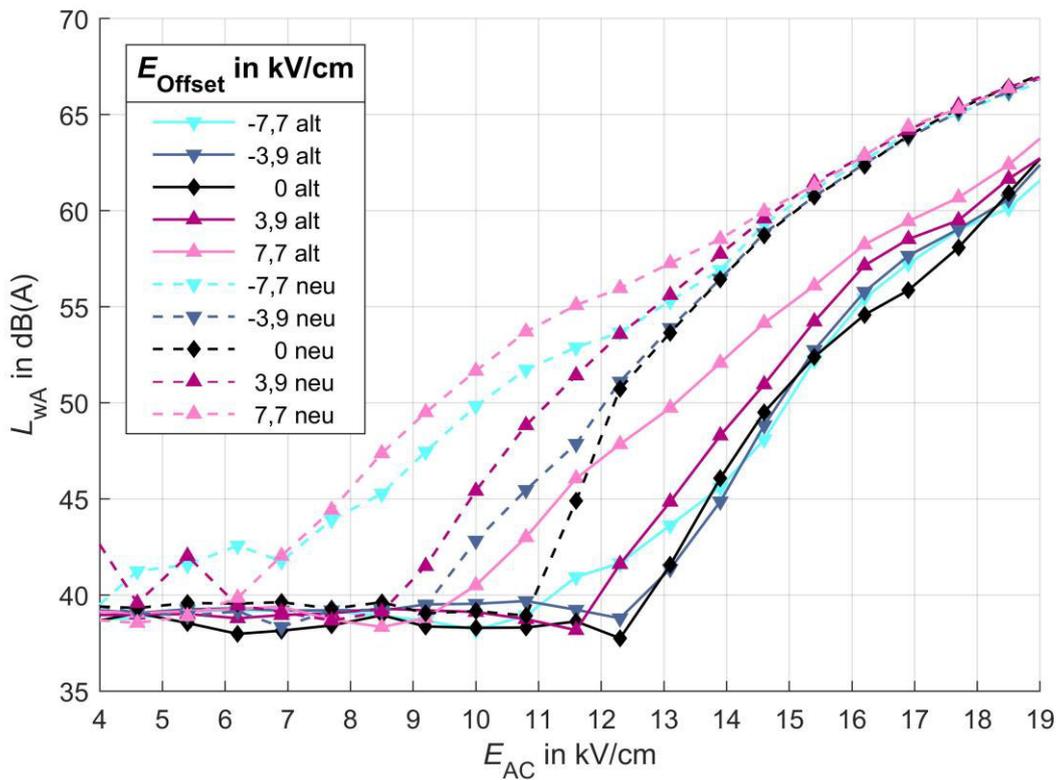


Bild D.13: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h - Vergleich Leiterseiloberflächen

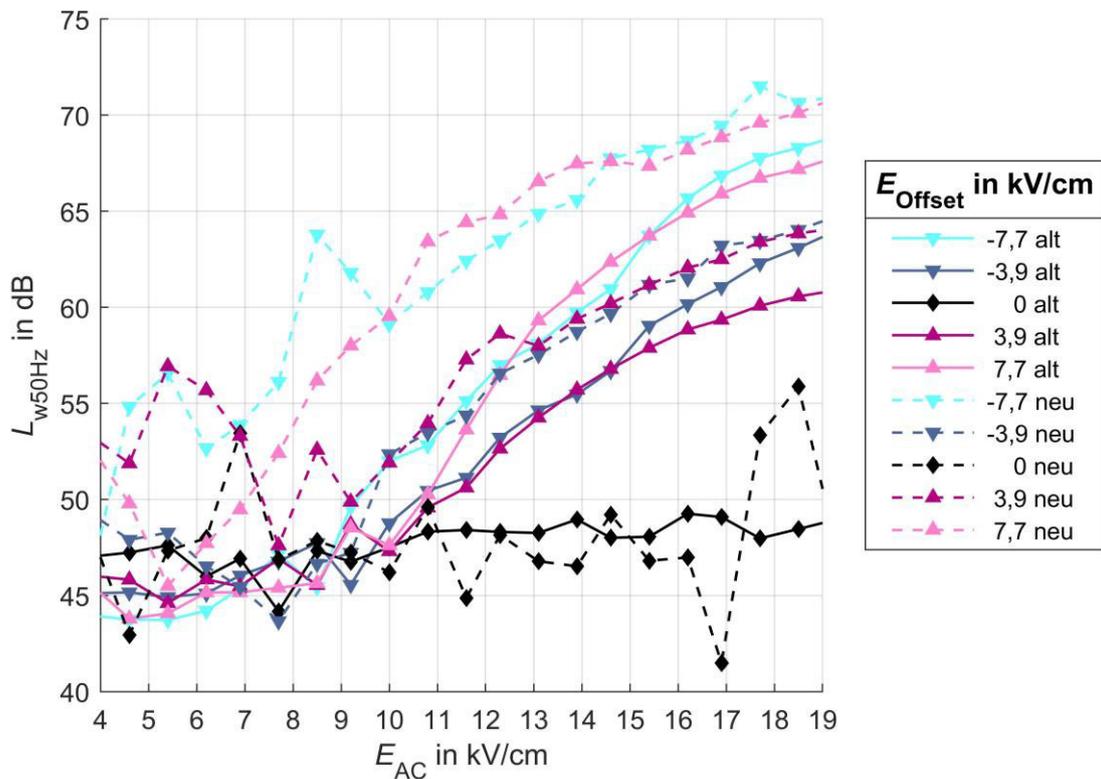


Bild D.14: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h - Vergleich Leiterseiloberflächen

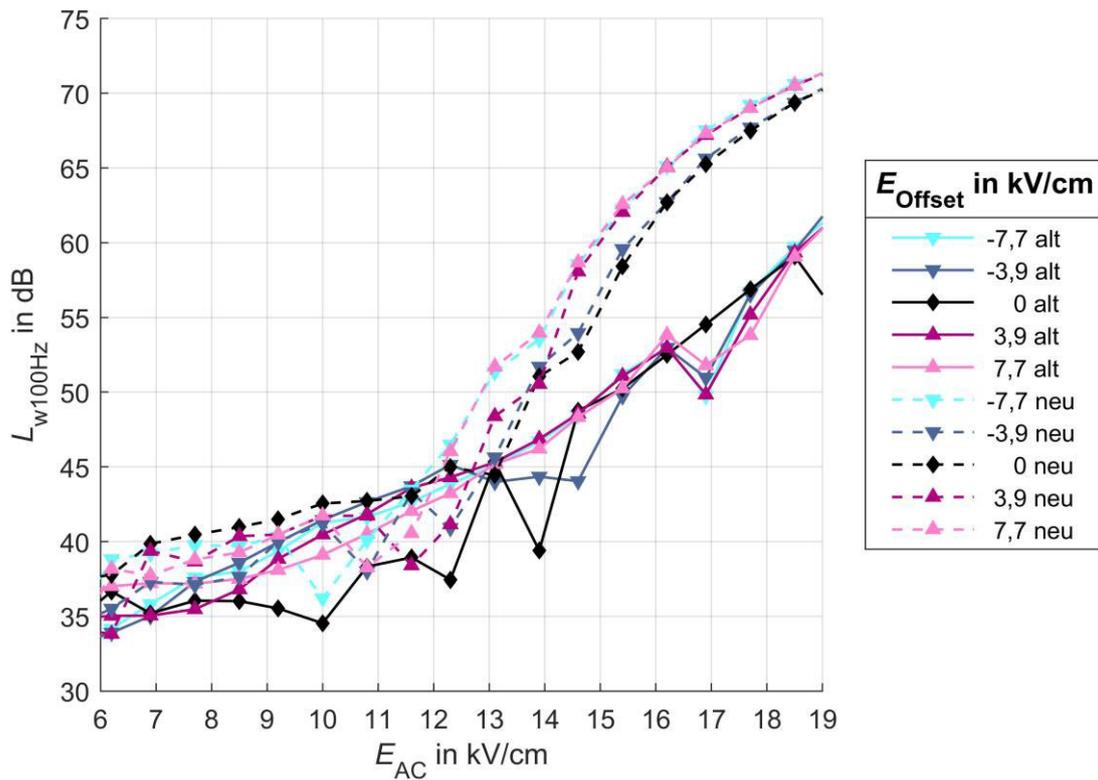


Bild D.15: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h - Vergleich Leiterseiloberflächen

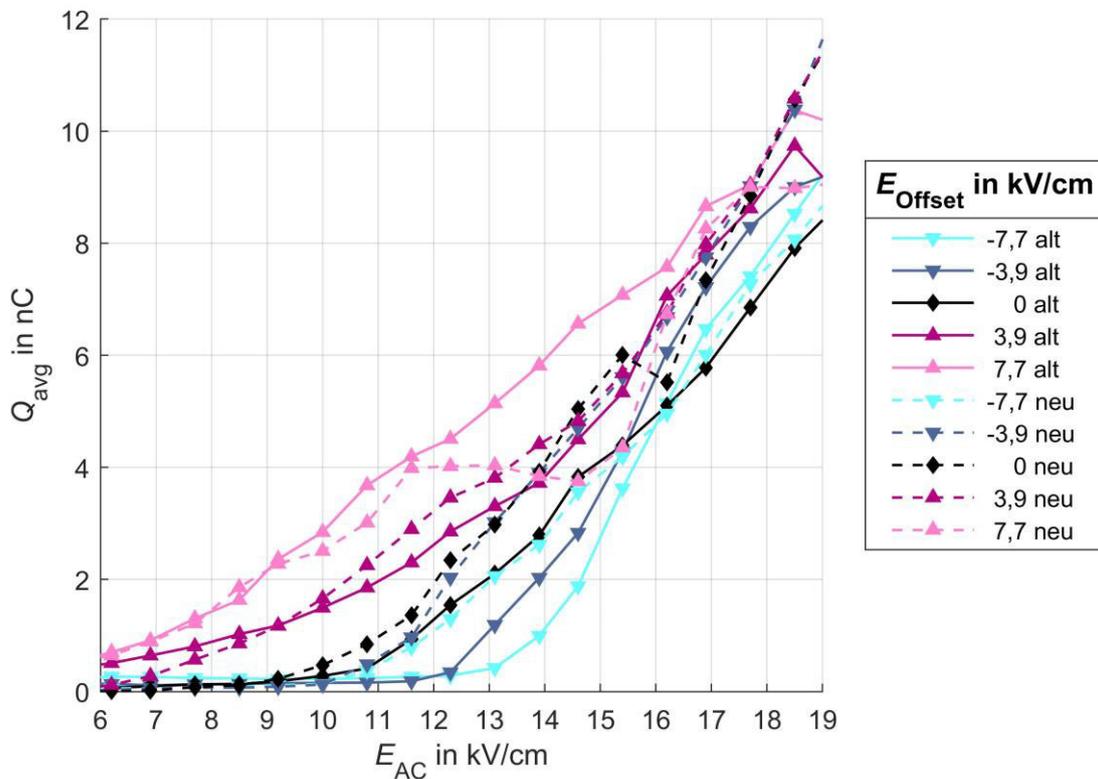


Bild D.16: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der AC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h - Vergleich Leiterseiloberflächen

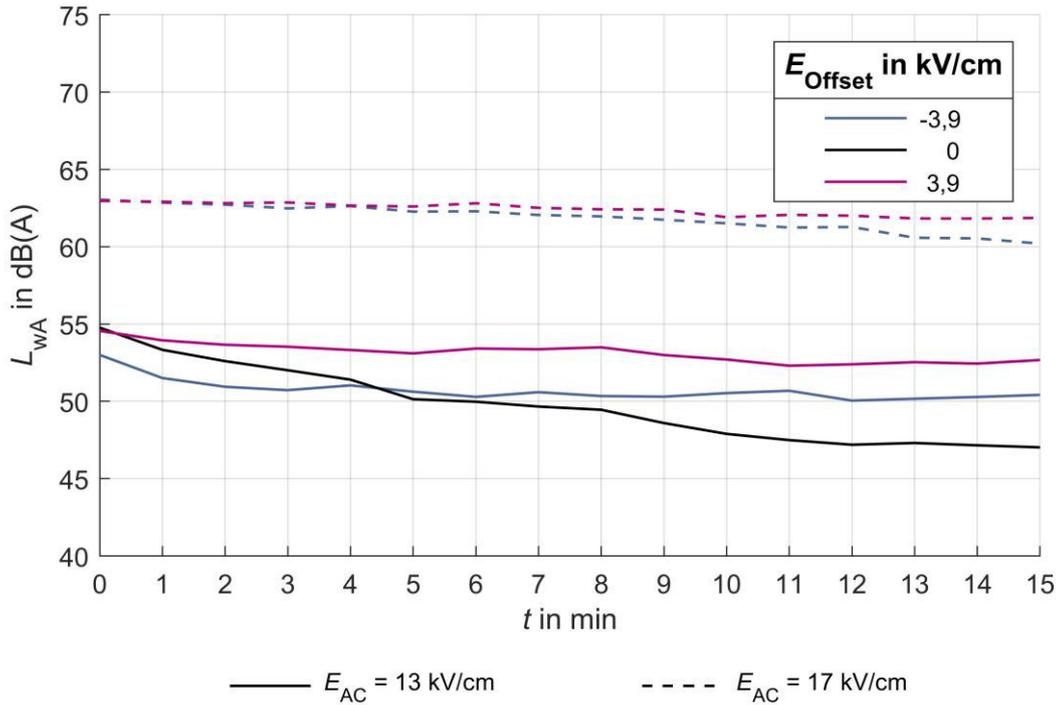


Bild D.17: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit Abtrocknung – Standardseil

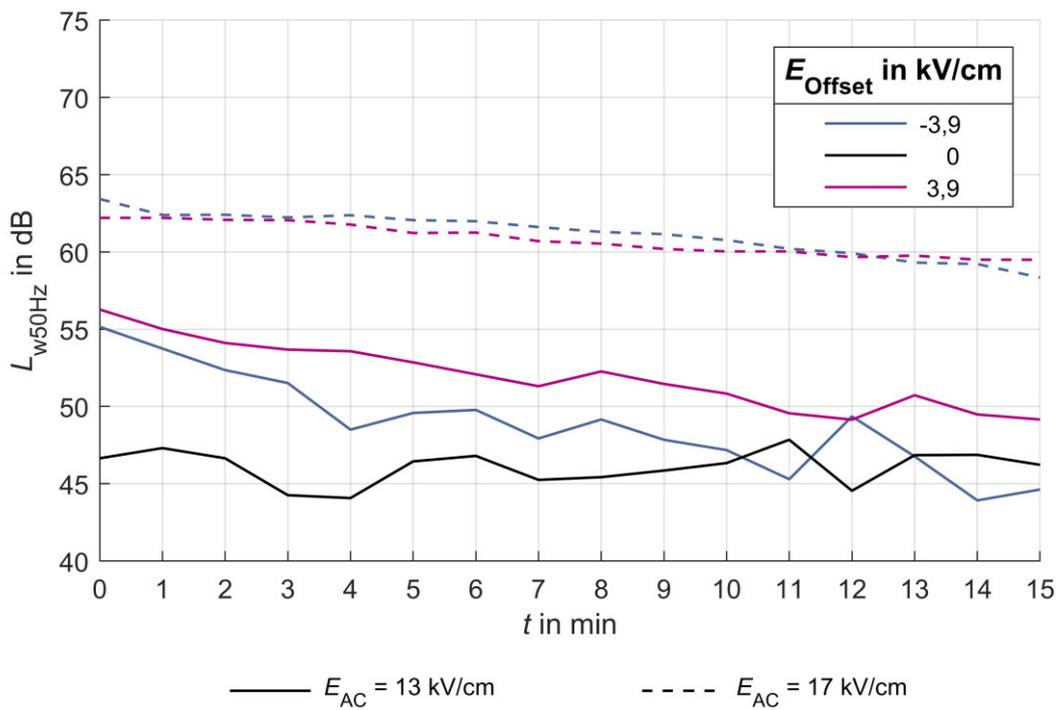


Bild D.18: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit Abtrocknung – Standardseil

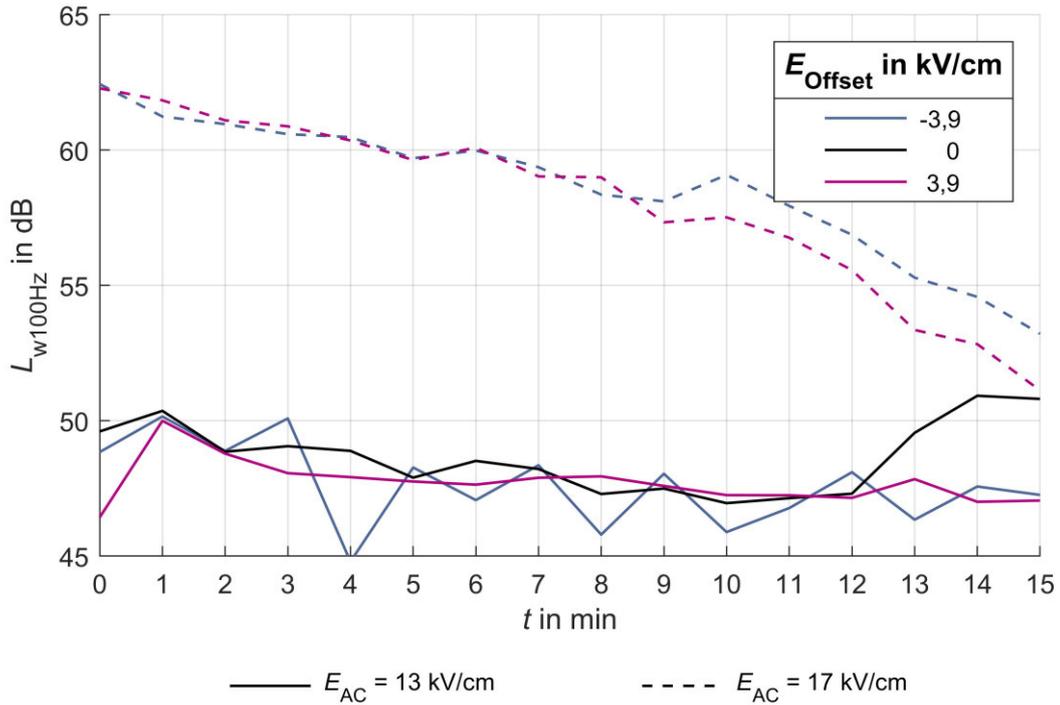


Bild D.19: 100-Hz-Schallleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit Abtrocknung – Standardseil

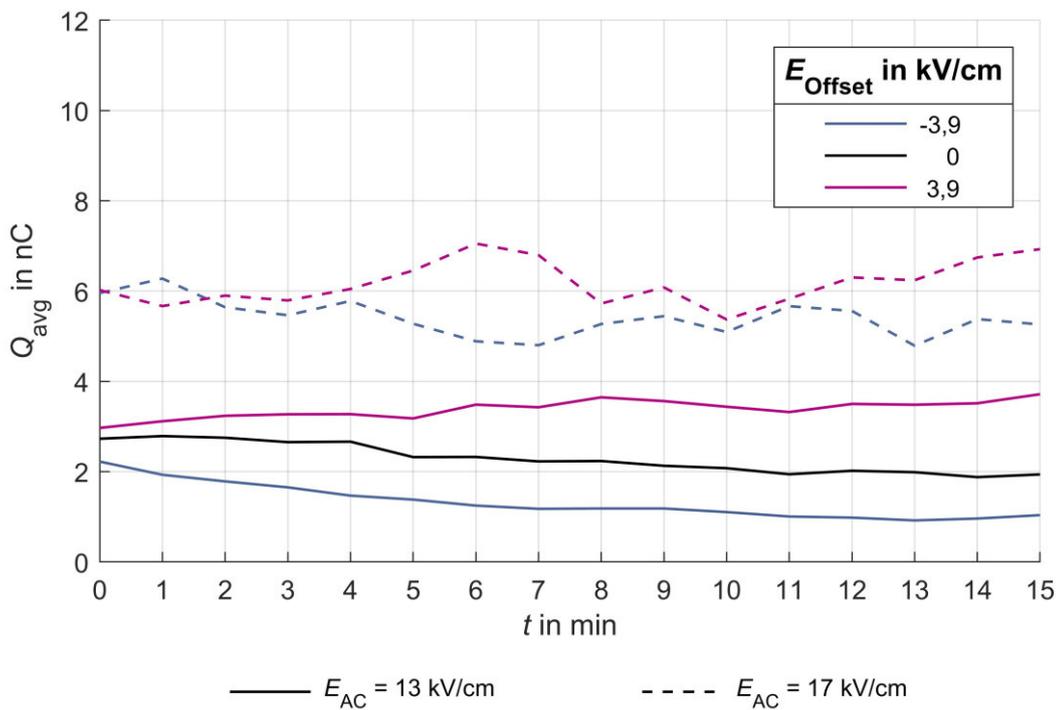


Bild D.20: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der Zeit Abtrocknung – Standardseil

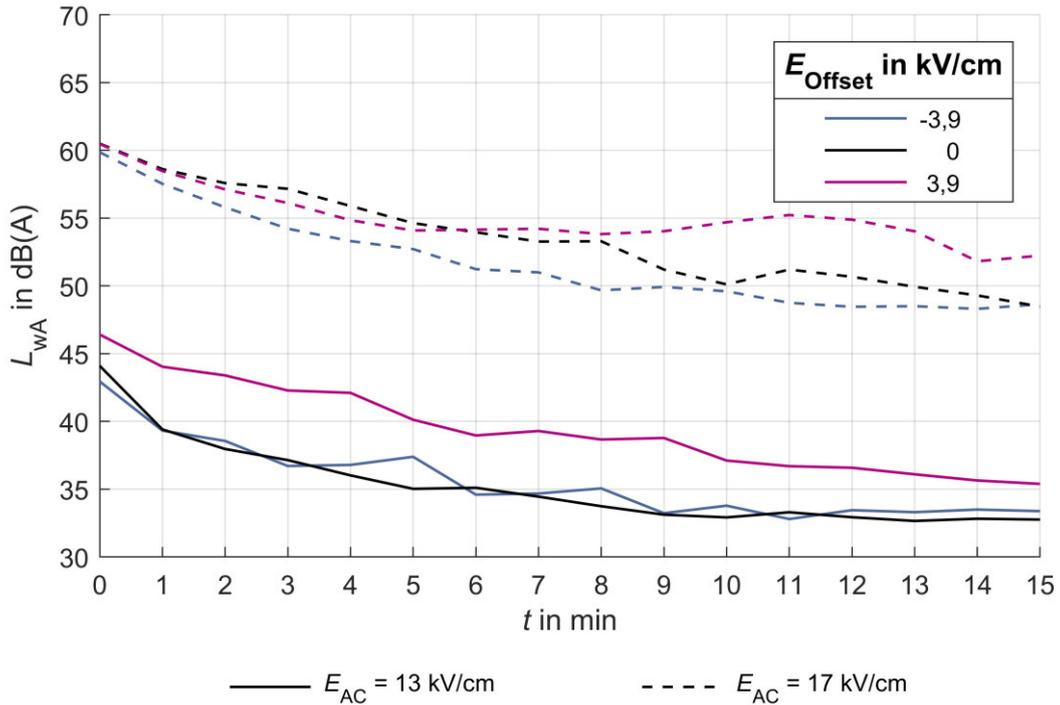


Bild D.21: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit Abtrocknung – Altseil (hydrophil)

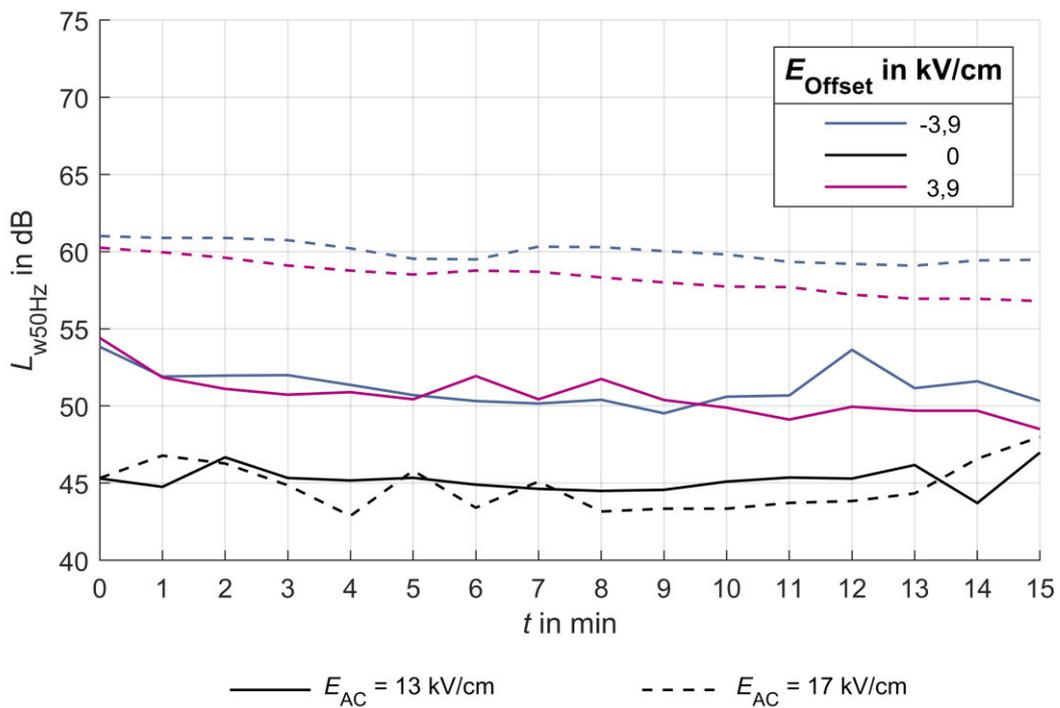


Bild D.22: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit Abtrocknung – Altseil (hydrophil)

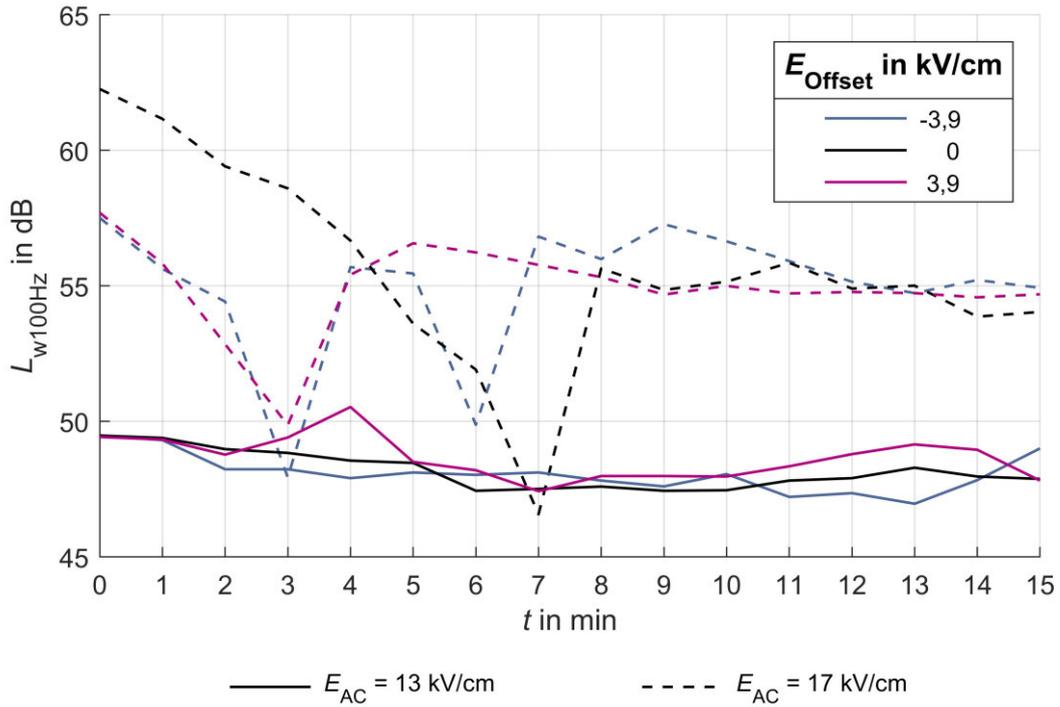


Bild D.23: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung – Altseil (hydrophil)

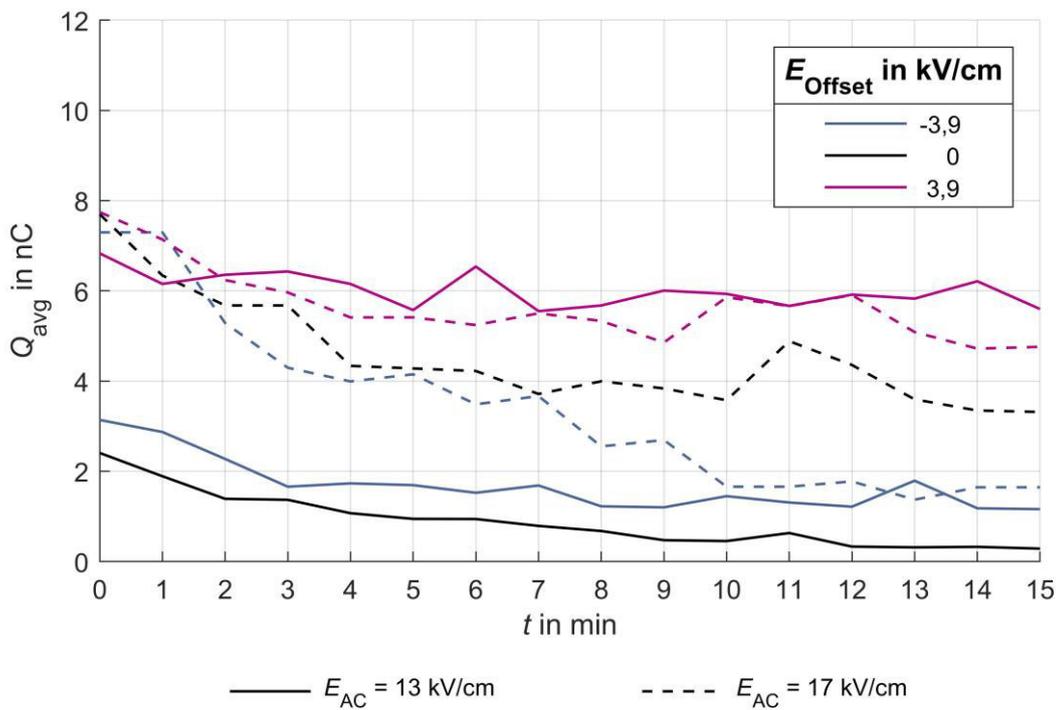


Bild D.24: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung – Altseil (hydrophil)

Anhang E

Messergebnisse: Nikola-Tesla-Labor – DC-System

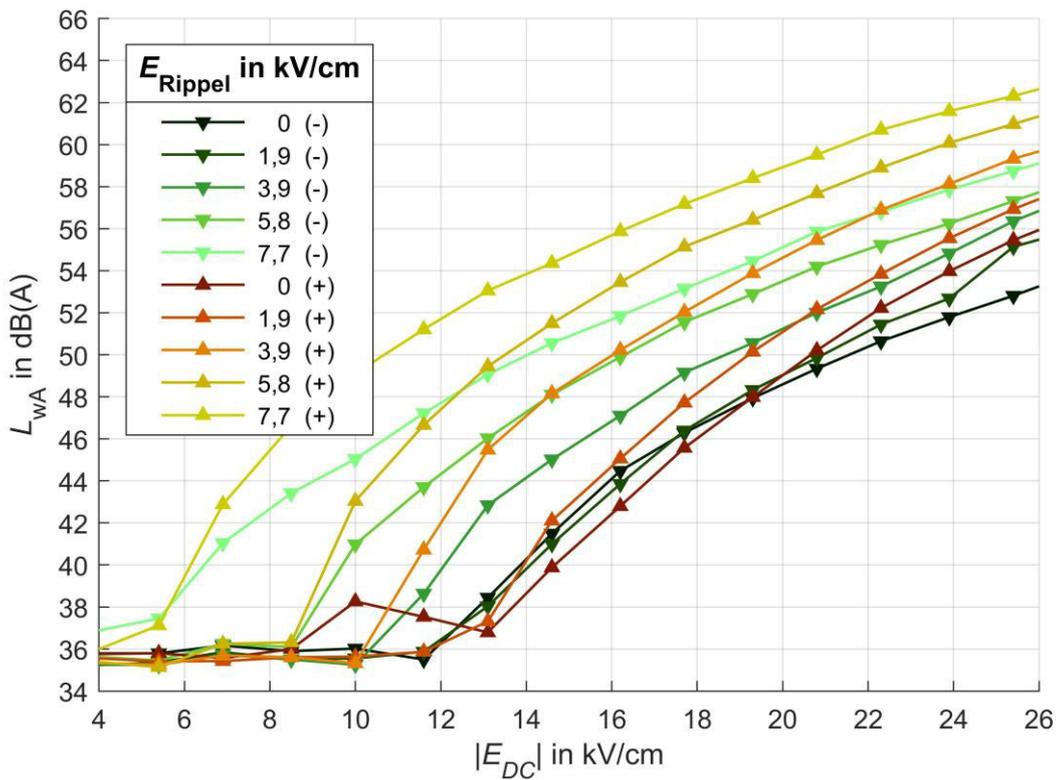


Bild E.1: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h – Standardseil

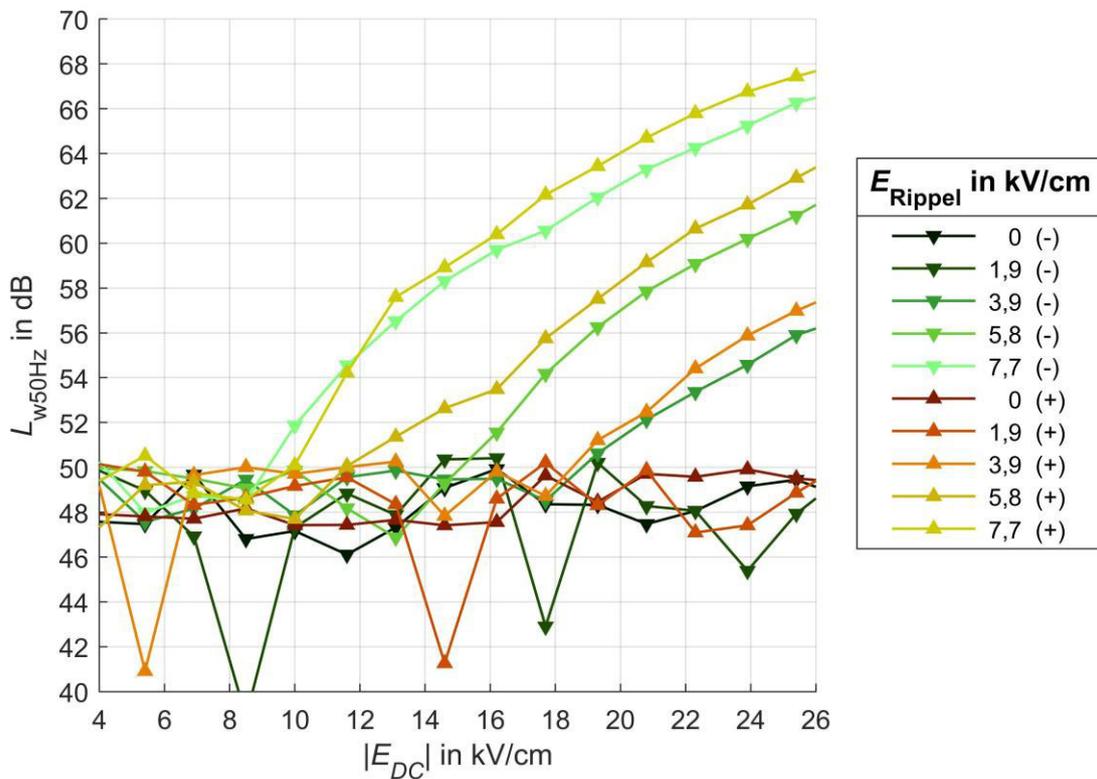


Bild E.2: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h – Standardseil

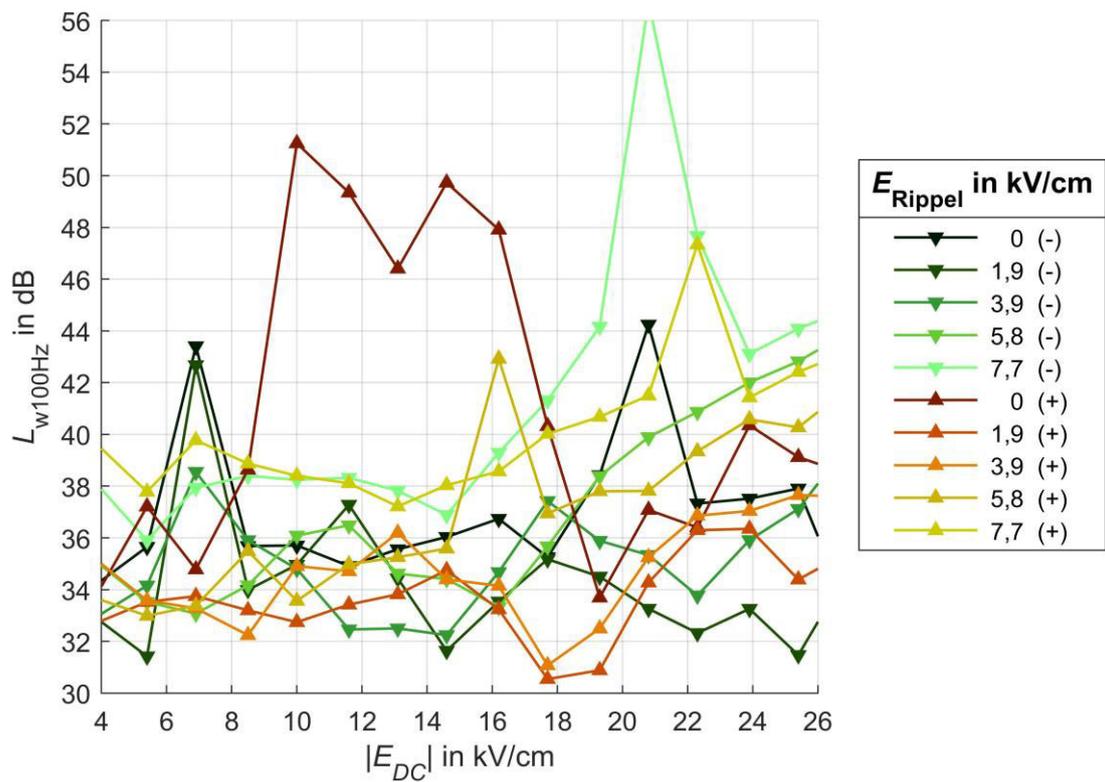


Bild E.3: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h – Standardseil

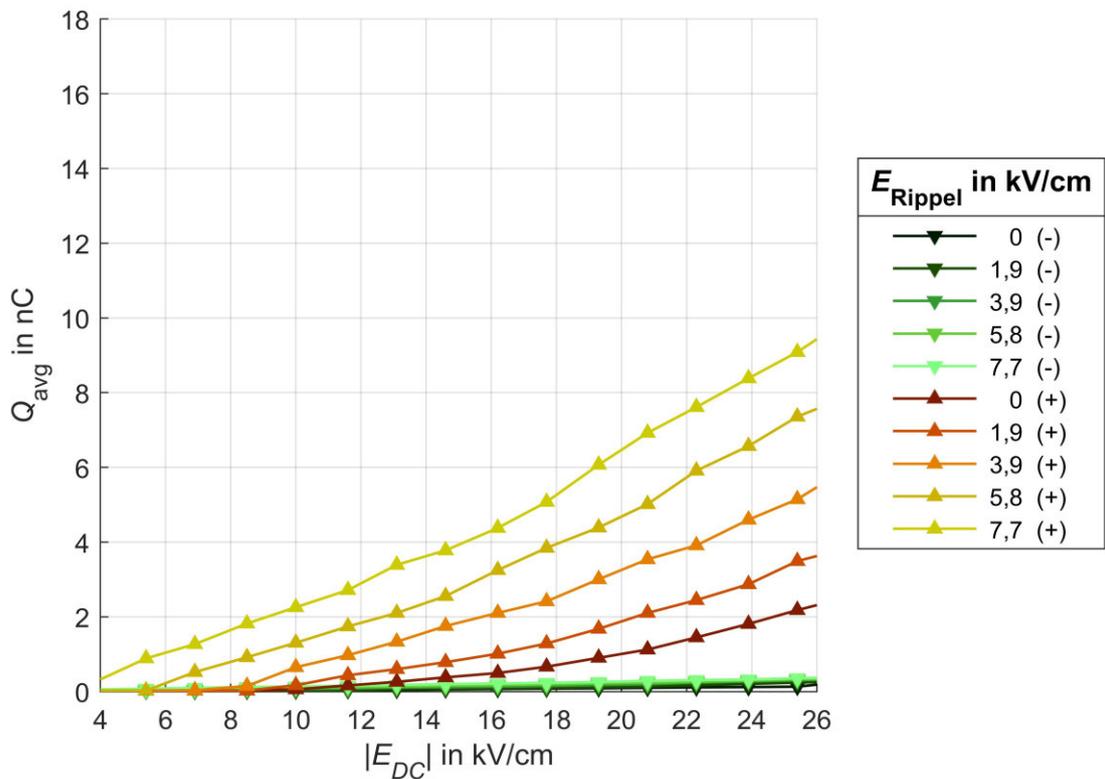


Bild E.4: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h – Standardseil

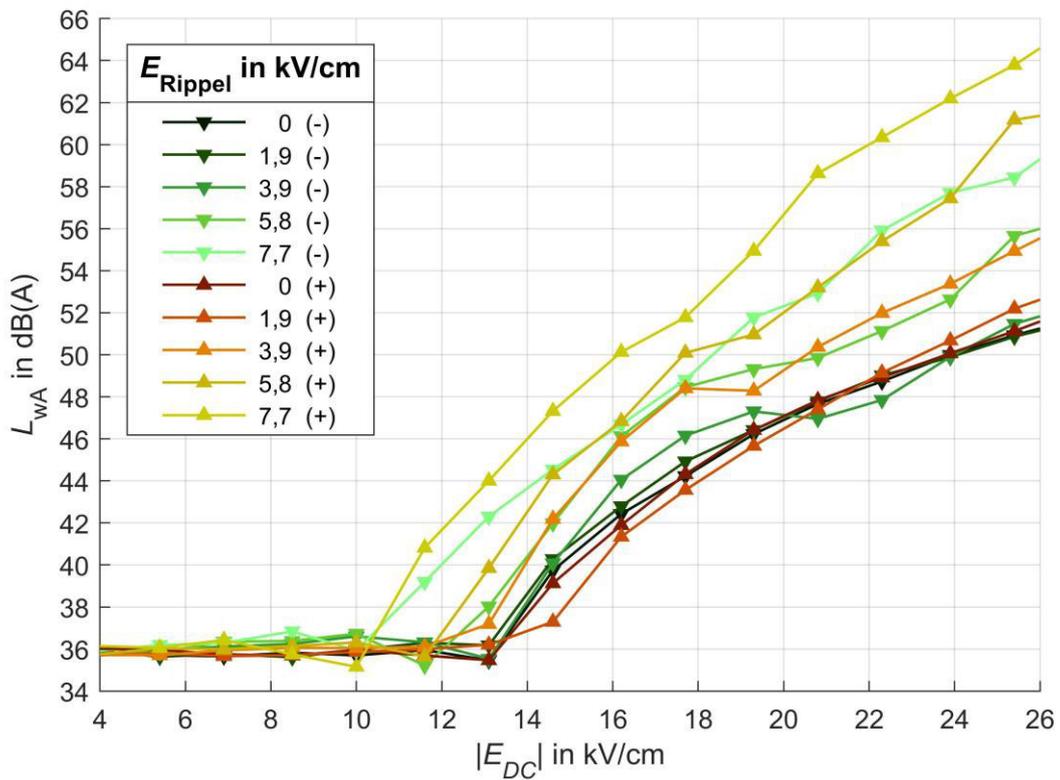


Bild E.5: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h – Altseil (hydrophil)

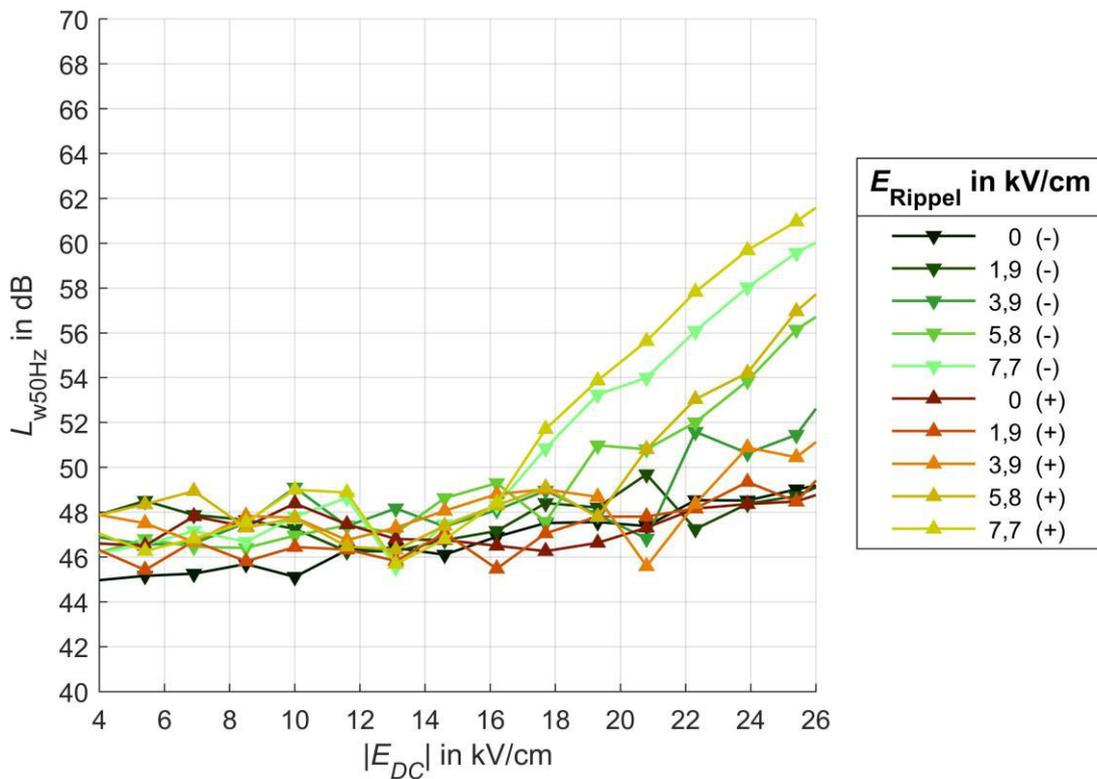


Bild E.6: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h – Altseil (hydrophil)

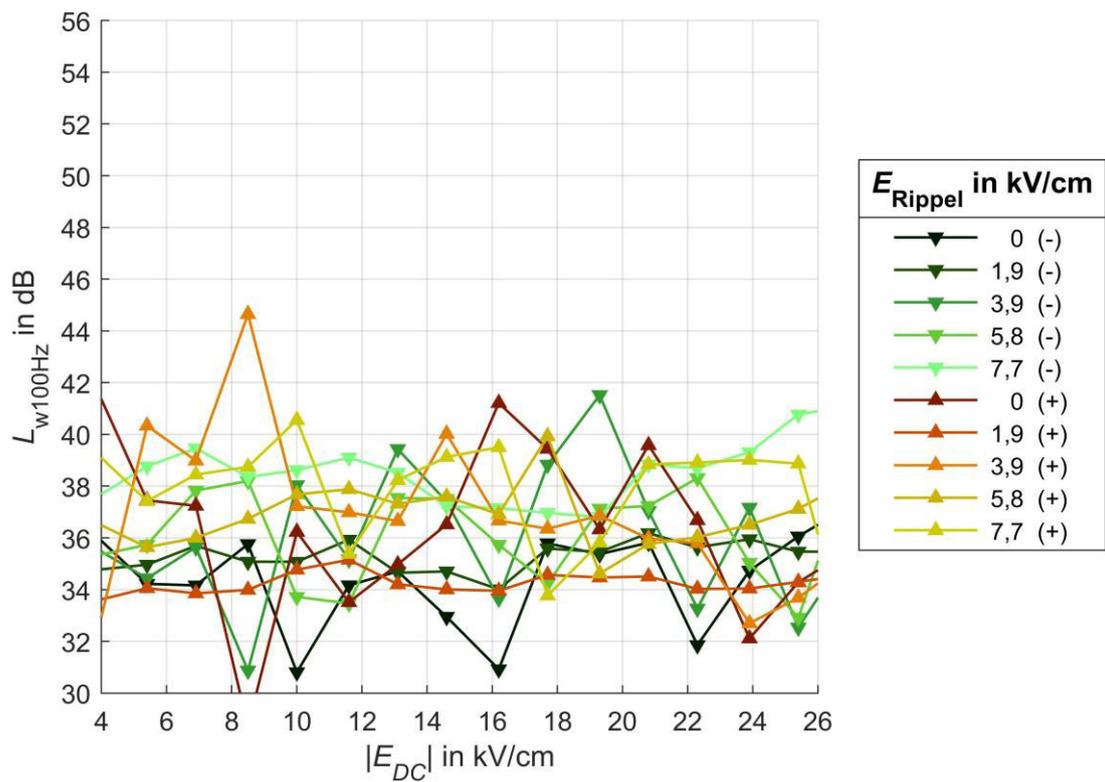


Bild E.7: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h – Altseil (hydrophil)

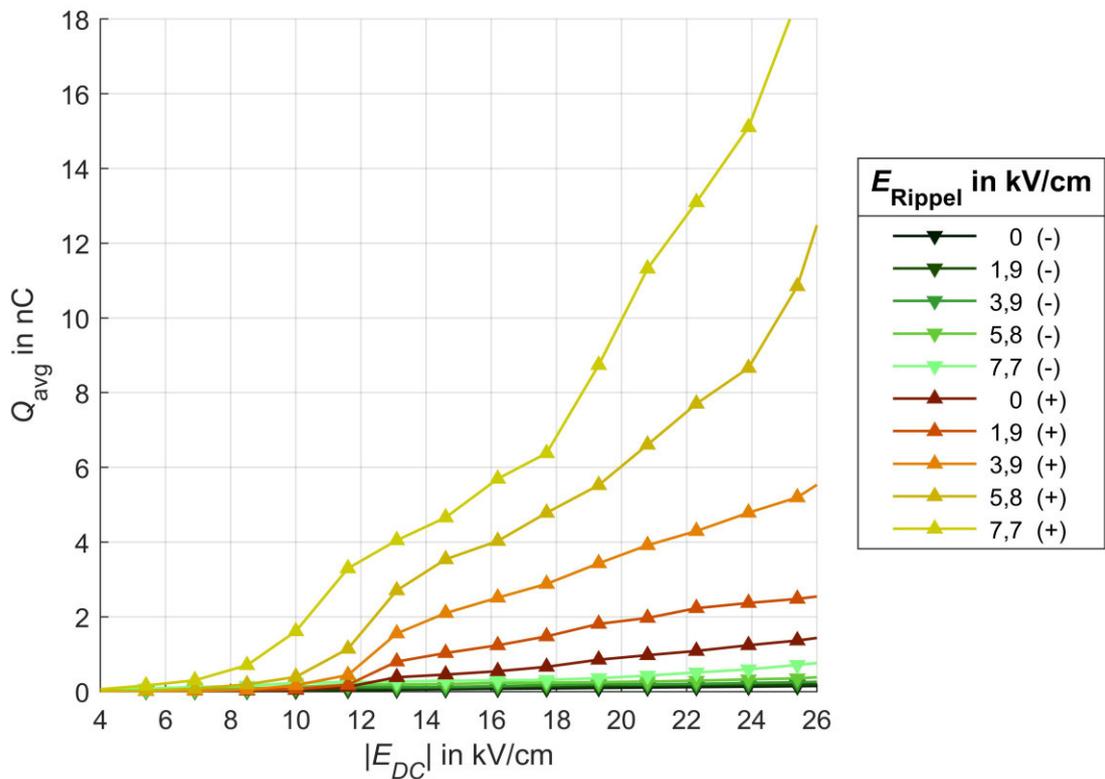


Bild E.8: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 1,5 mm/h – Altseil (hydrophil)

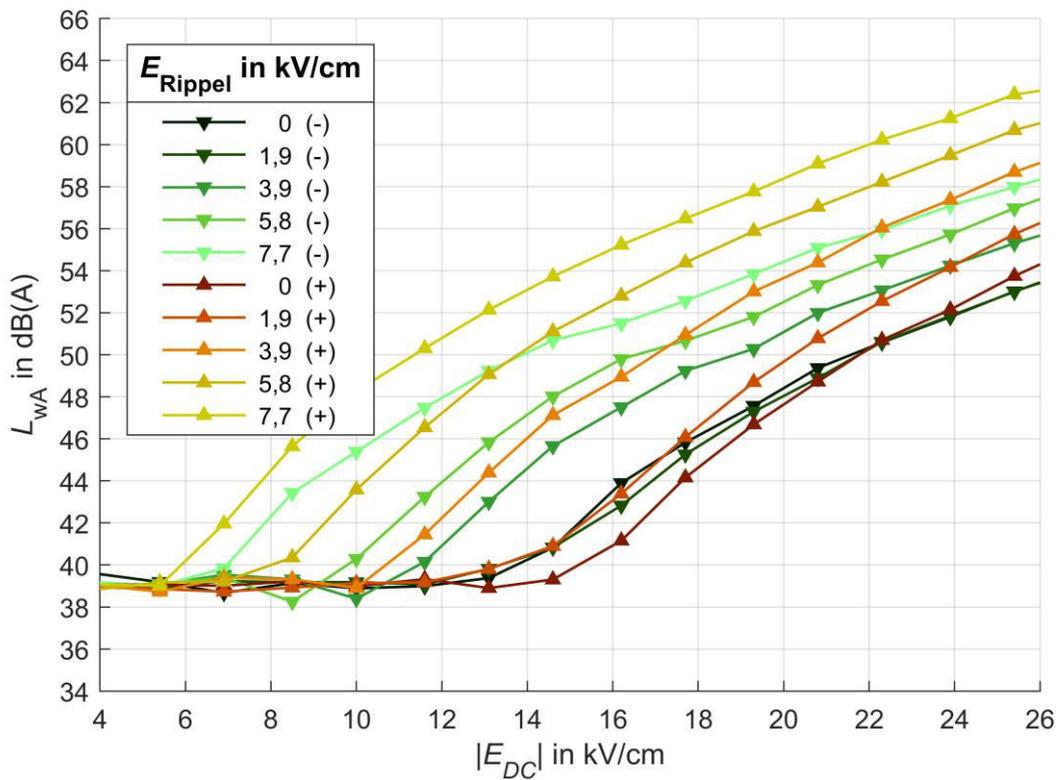


Bild E.9: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h – Standardseil

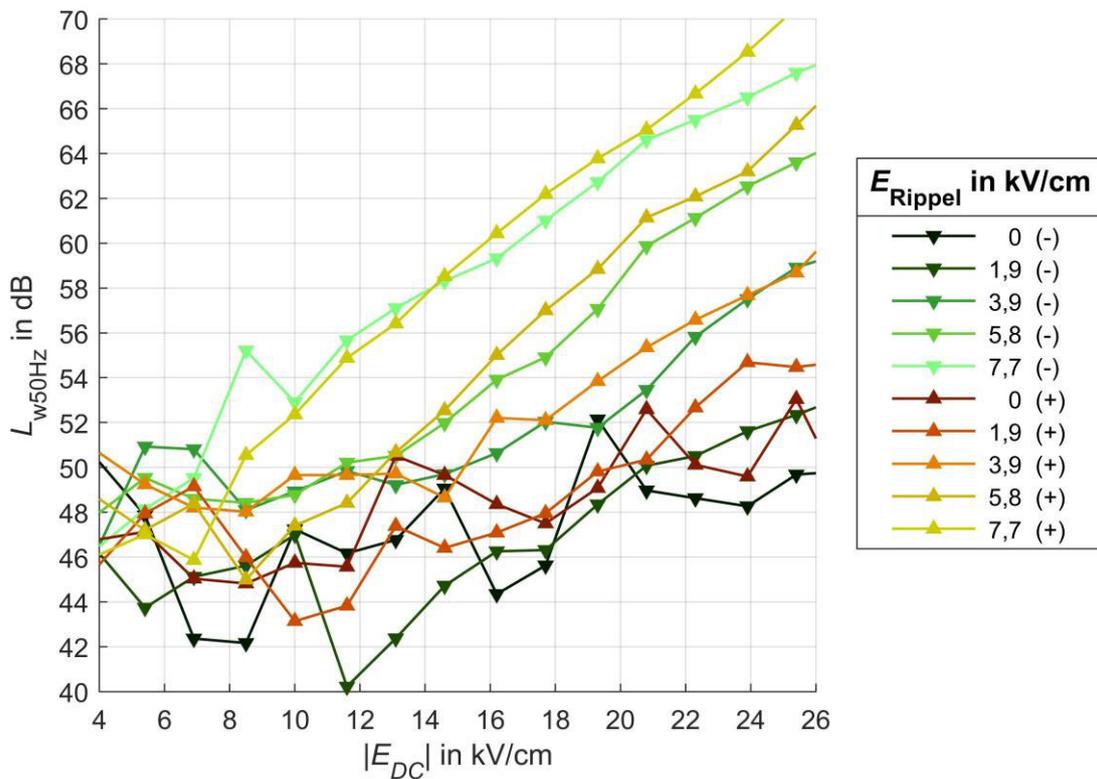


Bild E.10: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h – Standardseil

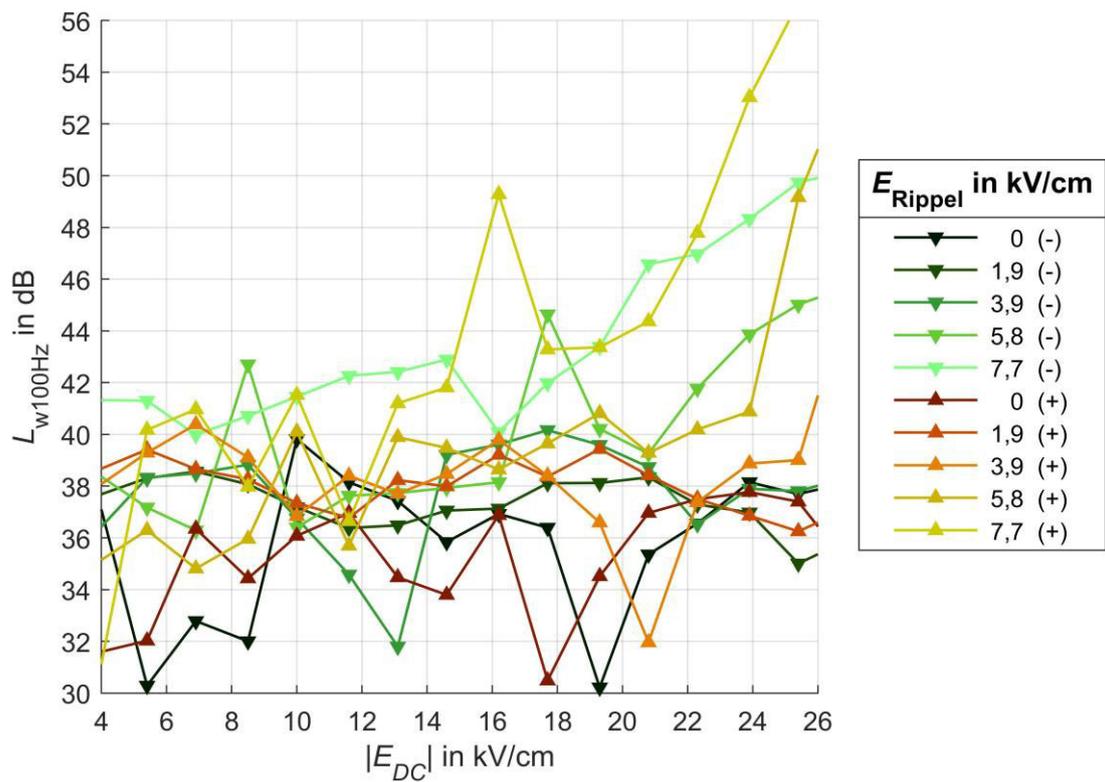


Bild E.11: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h – Standardseil

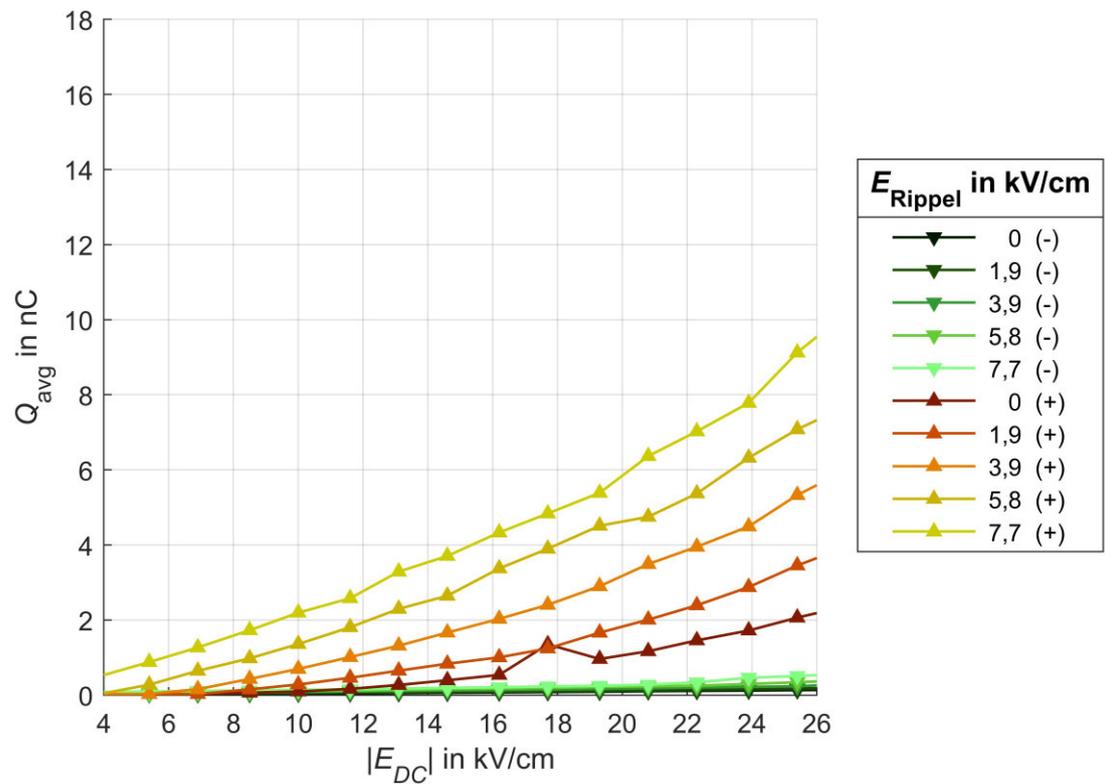


Bild E.12: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h – Standardseil

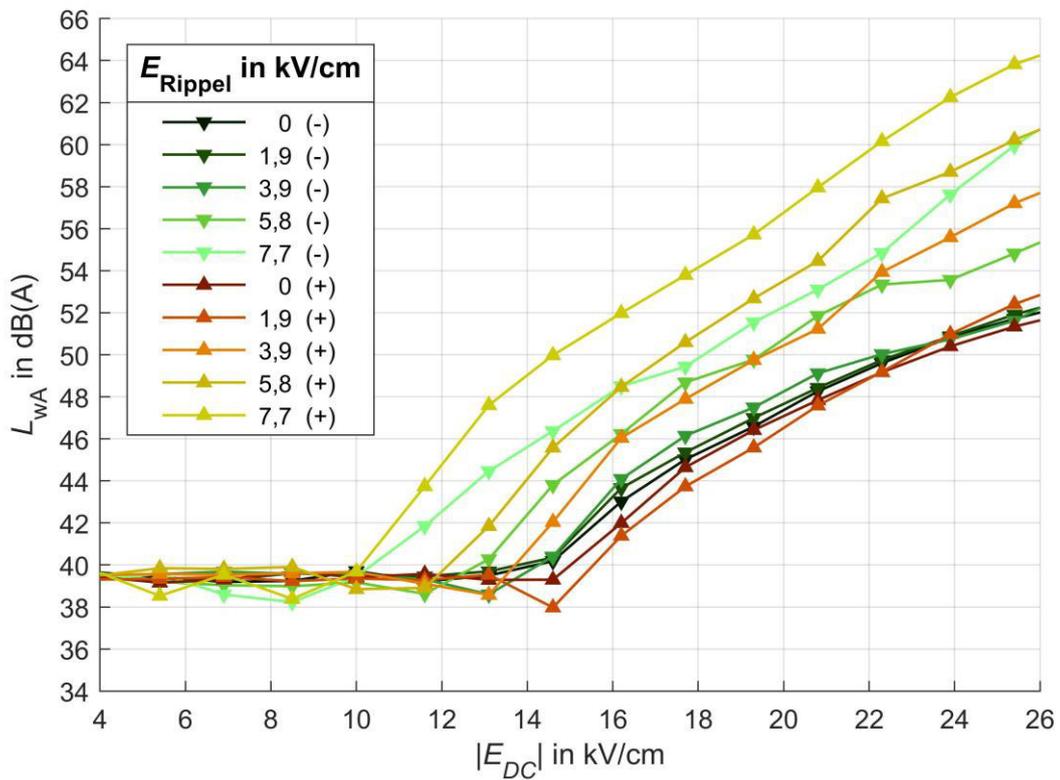


Bild E.13: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h – Altseil (hydrophil)

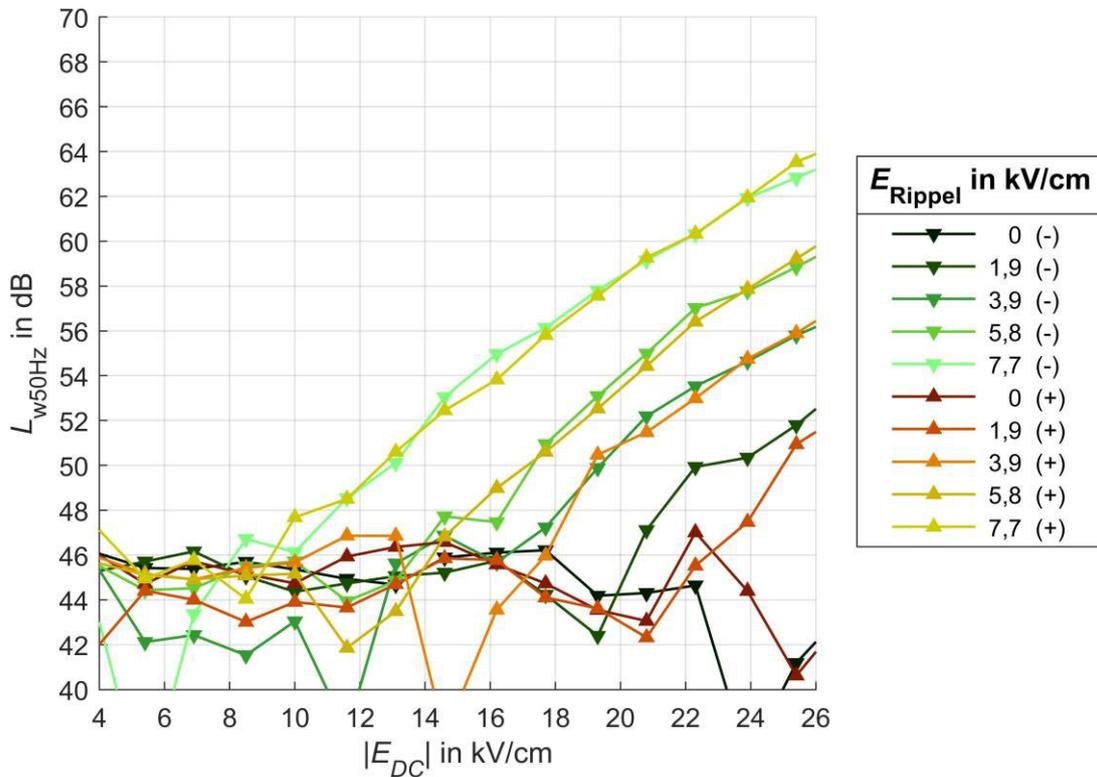


Bild E.14: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h – Altseil (hydrophil)

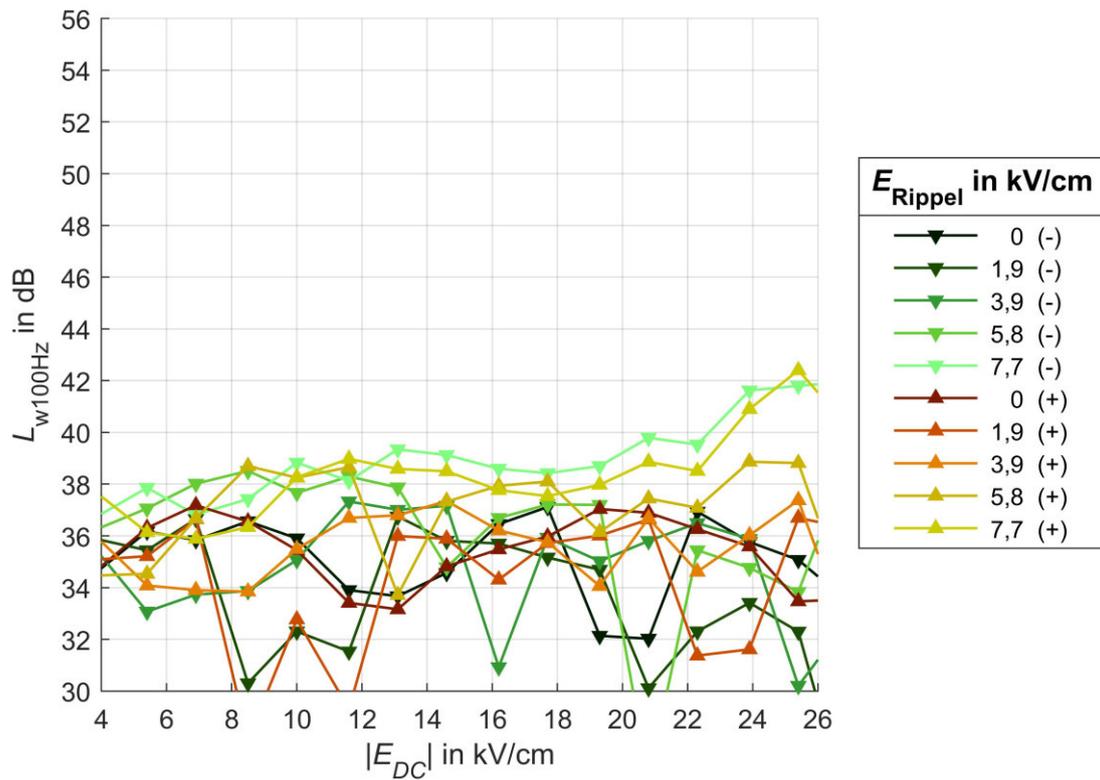


Bild E.15: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h – Altseil (hydrophil)

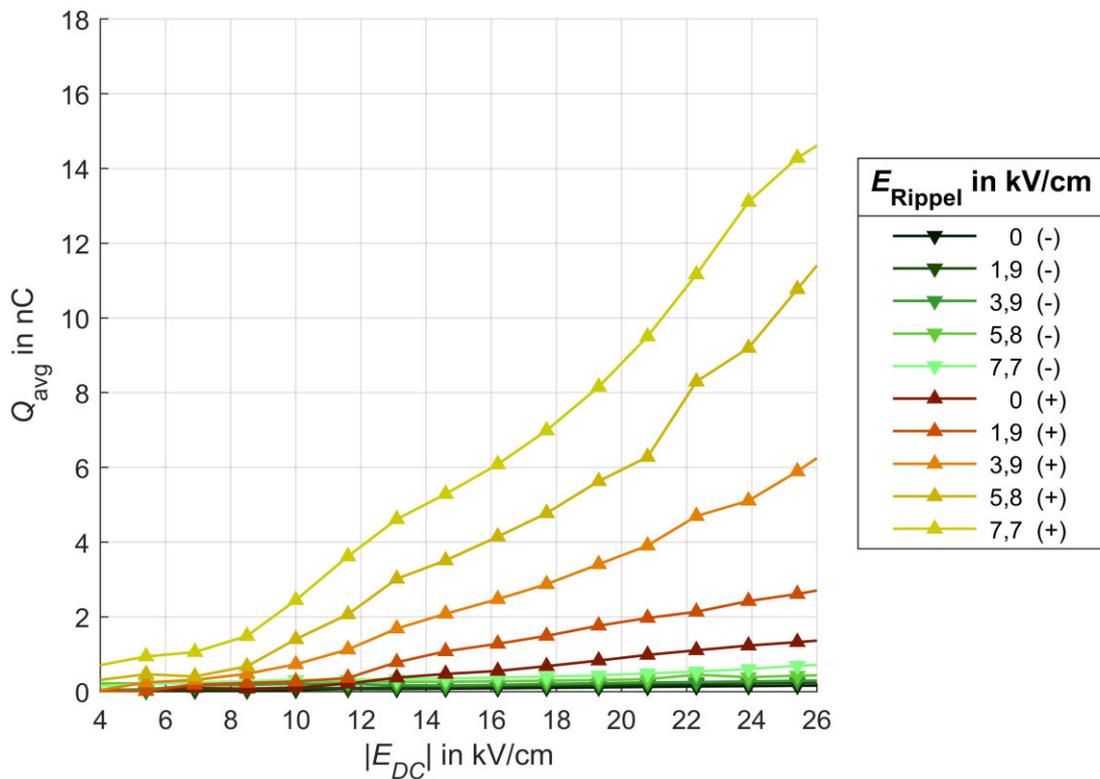


Bild E.16: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der DC-Feldstärke
Regenrate 6 mm/h – Altseil (hydrophil)

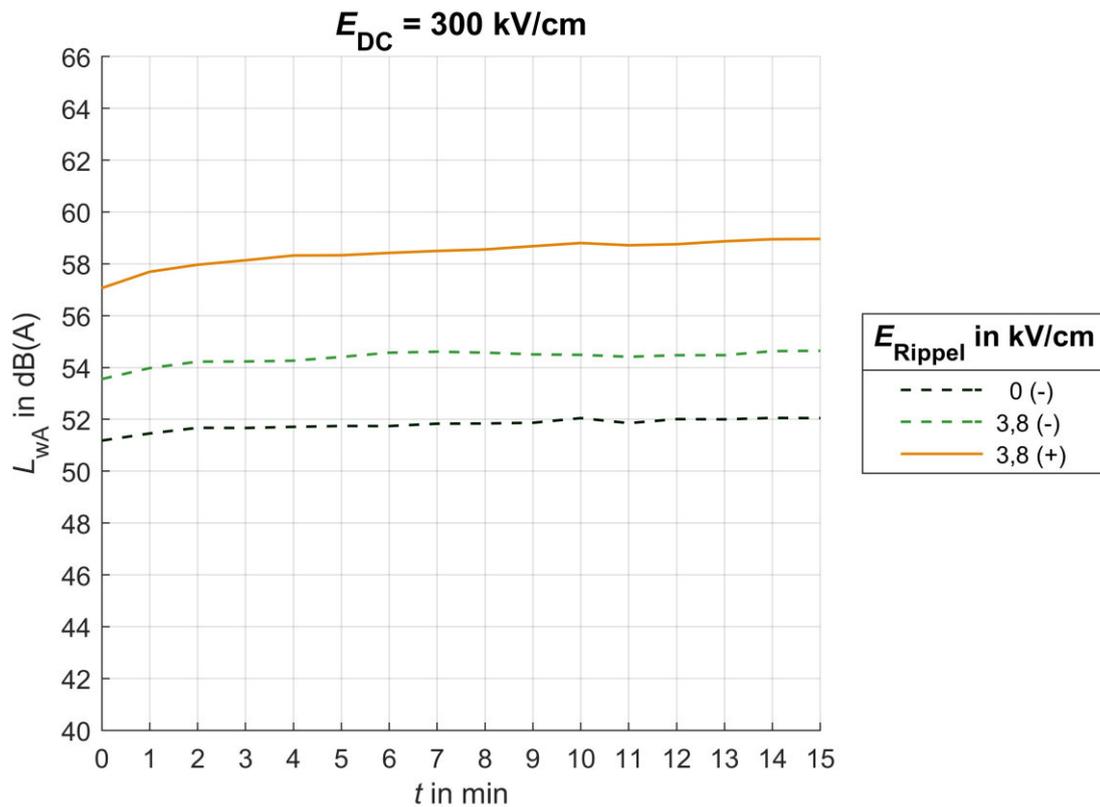


Bild E.17: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung - Standardseil

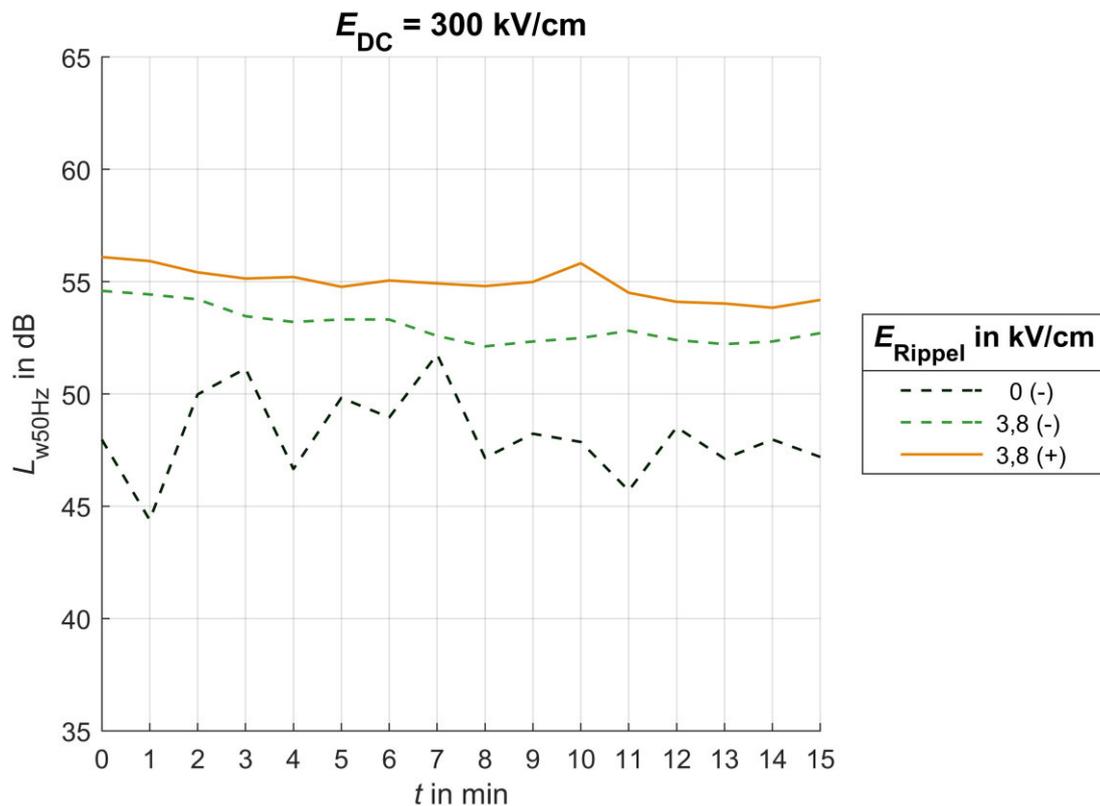


Bild E.18: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung - Standardseil

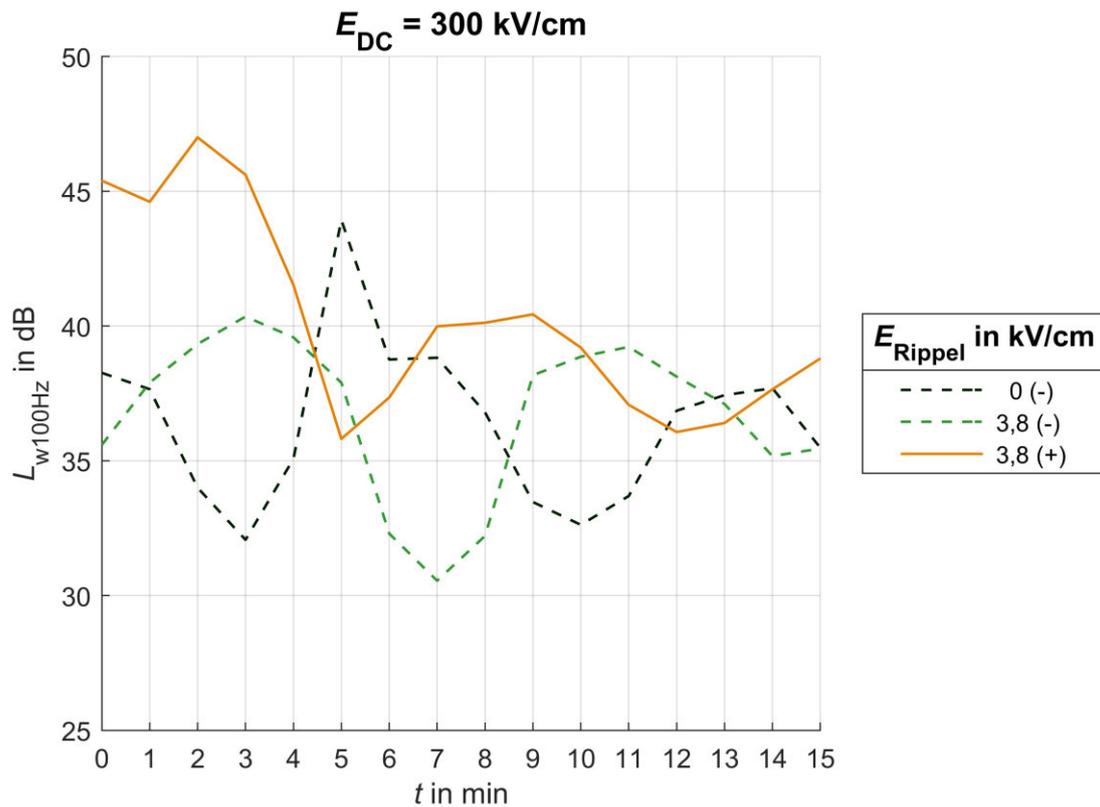


Bild E.19: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung - Standardseil

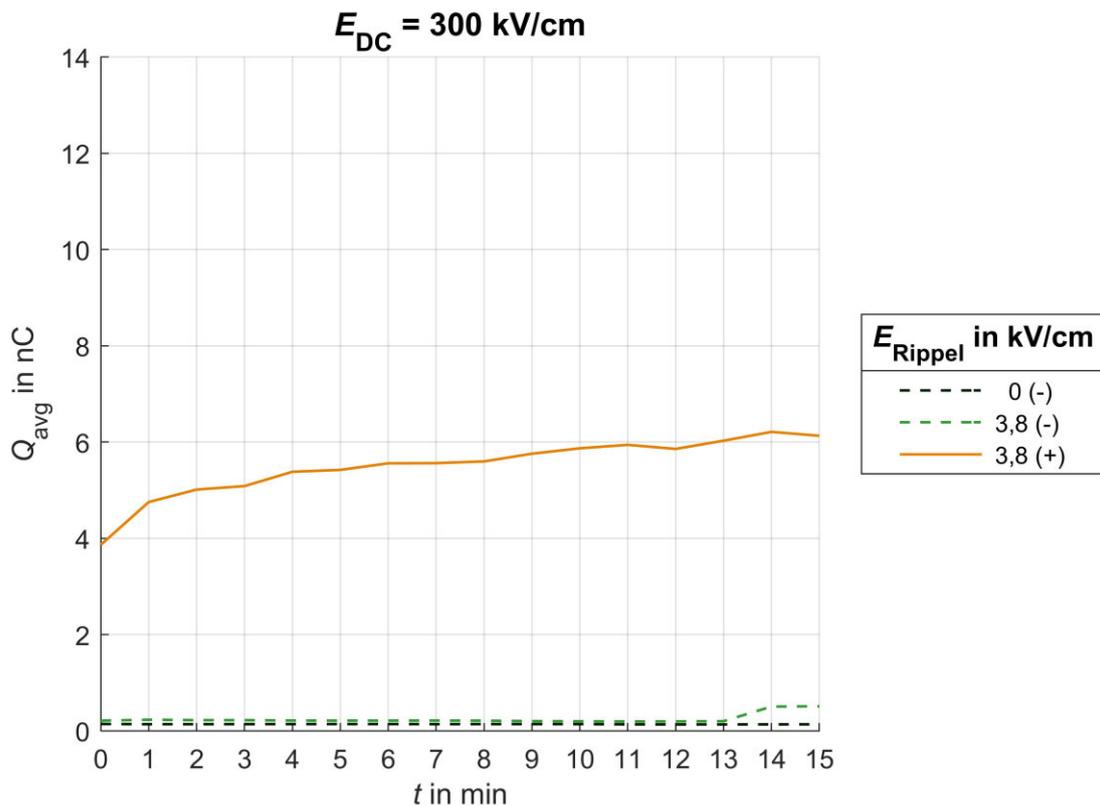


Bild E.20: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung - Standardseil

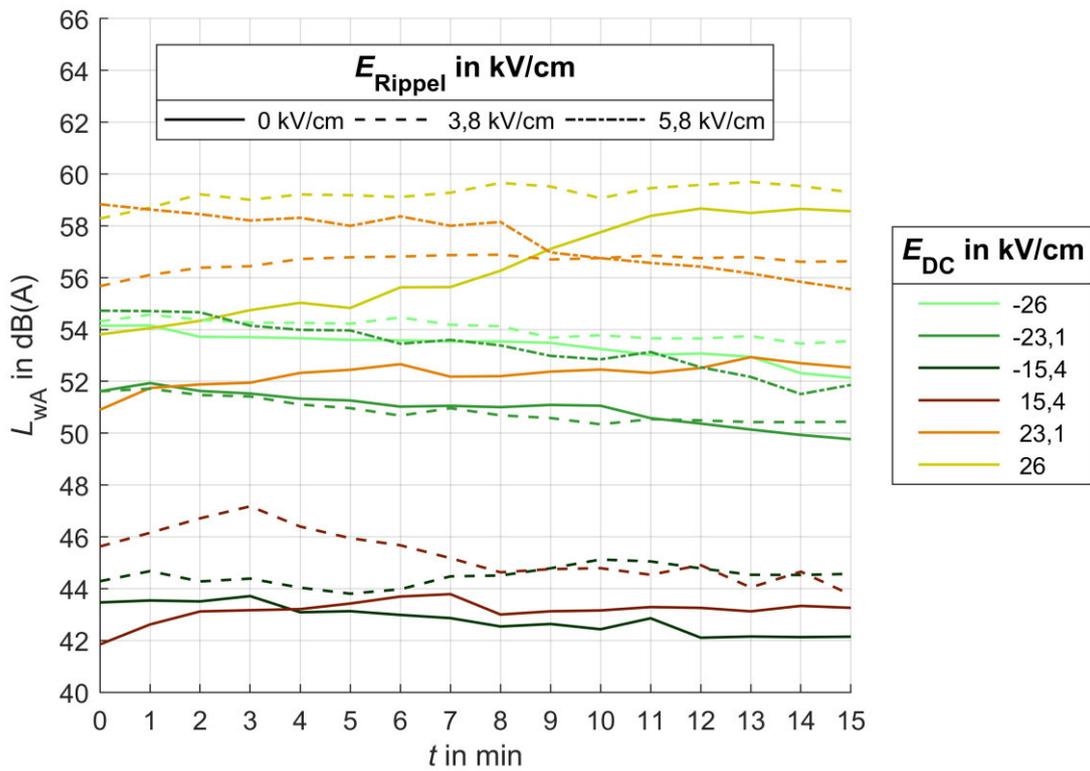


Bild E.21: A-gewichteter Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung – Altseil (hydrophil)

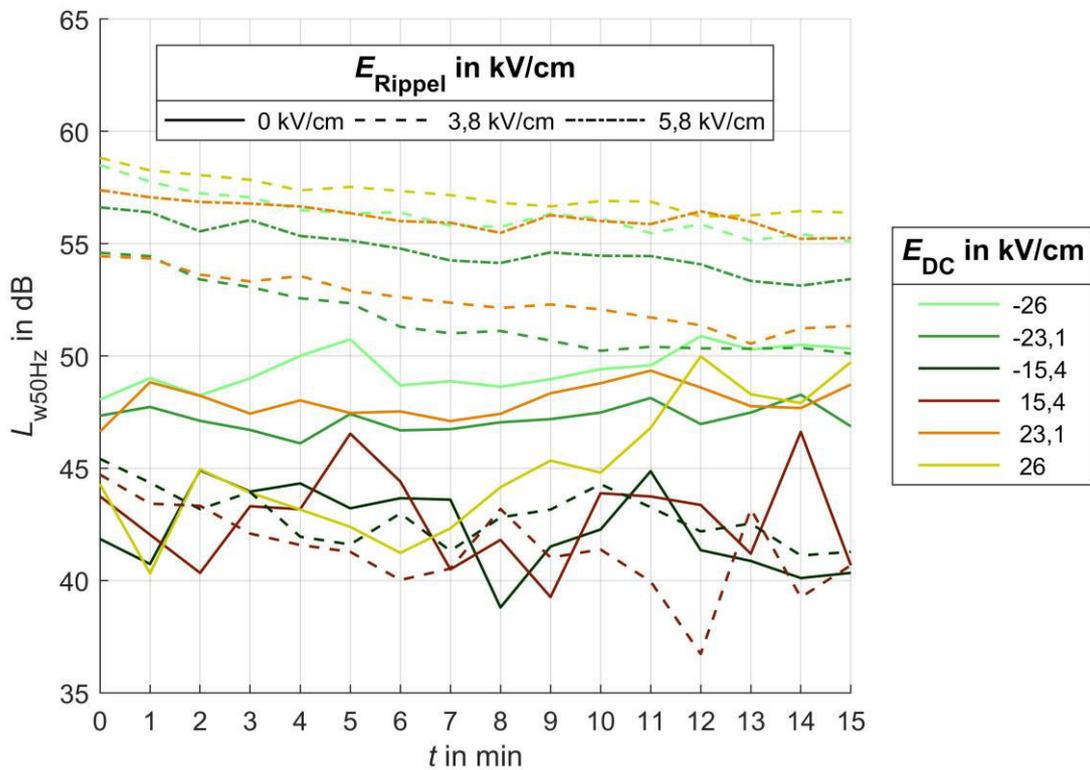


Bild E.22: 50-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung – Altseil (hydrophil)

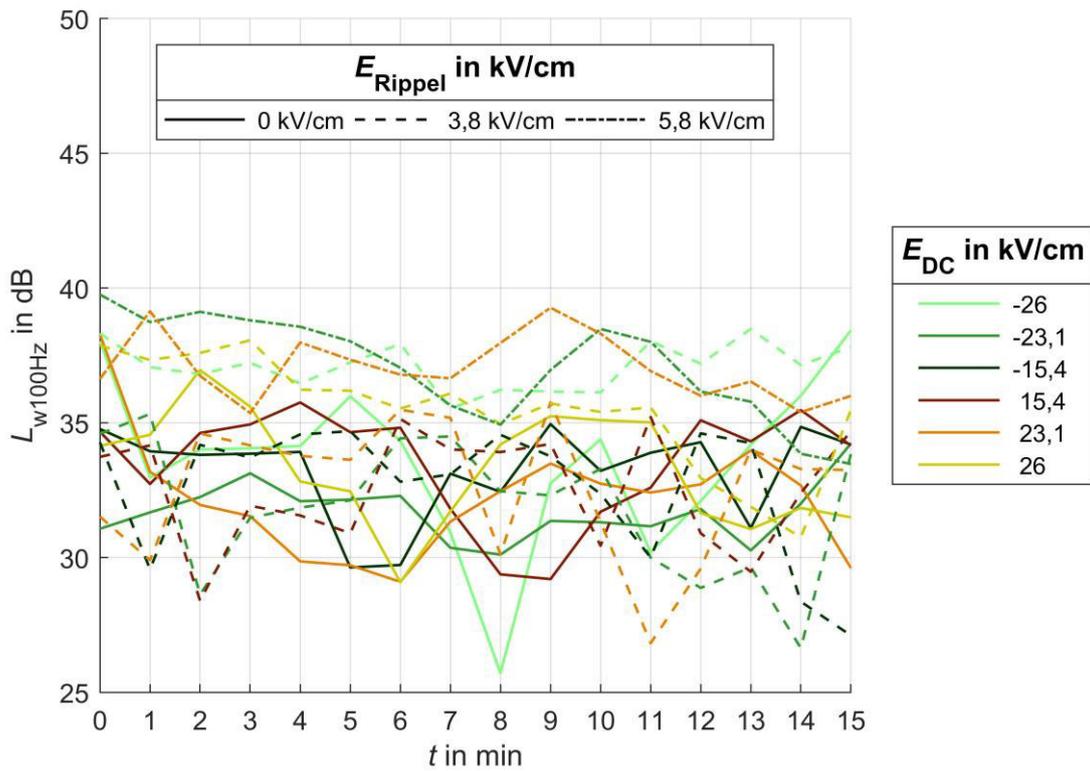


Bild E.23: 100-Hz-Schalleistungspegel in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung – Altseil (hydrophil)

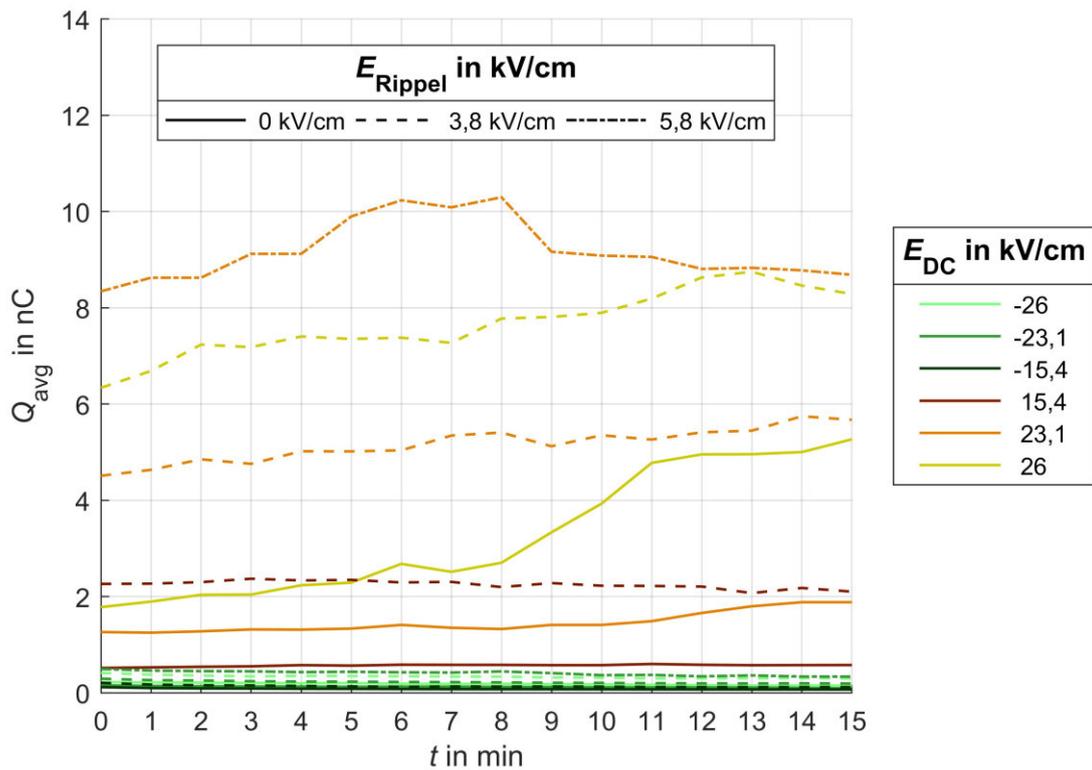


Bild E.24: Gemittelte Teilentladungsamplitude in Abhängigkeit der Zeit
Abtrocknung – Altseil (hydrophil)