

Laboruntersuchungen zur Entwicklung prognostischer Geräuschemissionsansätze an einer hybriden Freileitung

Saskia Möllenbeck¹, Benjamin Schröder¹, Jonathan Wulff¹, Stefan Steevens¹,
Pascal Sames², Andreas Lingenau²

¹ Amprion GmbH, 44139 Dortmund, saskia.moellenbeck@amprion.net

² TÜV Technische Überwachung Hessen GmbH, 60486 Frankfurt am Main, Pascal.Sames@tuevhessen.de

Einleitung

Im Zuge der Energiewende muss das bestehende Höchstspannungs-Übertragungsnetz neue Aufgaben übernehmen. Dazu gehört auch der Energietransport über lange Distanzen. Dabei bietet die Übertragung mit Gleichstrom Vorteile. Um Neu- oder Umbaumaßnahmen so effizient wie möglich zu gestalten, kann ein Gleichstromkreis parallel zur bestehenden Drehstromübertragung auf einem Mast geführt werden. Dies wird in diesem Beitrag als hybride Anordnung bezeichnet.

Bei solchen hybriden Anordnungen existieren elektrische Kopplungseffekte zwischen den Systemen, die auch einen Einfluss auf die elektrische Randfeldstärke an den Leitern haben können. Inwieweit dieser Effekt sich auch auf die Geräuschemissionen durch Koronaentladungen auswirken, wird im Folgenden auf der Basis von Labormessungen dargestellt.

In diesem Beitrag wird betrachtet, wie sowohl die gegenseitige Beeinflussung durch eine Beaufschlagung eines Wechselspannungssystems mit einer Gleichspannung („Offset“) (Abbildung 1a) als auch die eines Gleichspannungssystems mit einer Wechselspannung („Rippel“) (Abbildung 1b) in einer Geräuschprognose berücksichtigt werden kann. Die Höhe dieser elektrischen Beeinflussung wird aus Berechnungen zu einer geplanten hybriden Freileitung hergeleitet.

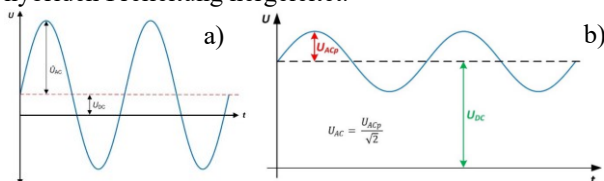


Abbildung 1: a) Wechselspannung mit einem positiven DC-Offset, b) positiven Gleichspannung mit einem AC-Rippel.

Die sich daraus ergebenden berechneten Randfeldstärken mit den entsprechenden Einkopplungen bilden die Basis für die Nachbildung einer einpoligen Versuchsanordnung im Labor, um das daraus im Laborversuch resultierende akustische Verhalten der Leiter zu untersuchen. Die sich hieraus ergebenden Unterschiede der Geräuschemissionen im Vergleich zum reinen Gleich- bzw. Wechselspannungsbetrieb einer Leitungsanordnung werden dargestellt und auf Basis der Erkenntnisse Empfehlungen für ein Berechnungsmodell zur Bestimmung der längenbezogenen Schallleistungen im Rahmen von Geräuschprognosen gegeben.

Koronageräusche bei Wechsel-/Gleichspannung

Koronageräusche entstehen durch Störstellen an Leiteroberflächen, die zu lokalen Überhöhungen des

elektrischen Feldes führen und damit Teilentladungen in der Umgebungsluft hervorrufen können. Diese Teilentladungen können bei Wechselspannungs- (AC) und Gleichspannungs- (DC) Systemen als breitbandiges Knistern und Prasseln wahrgenommen werden. Bei AC-Systemen kann zusätzlich durch sich periodisch bewegende Ionen um den Leiter ein Brummtönen (Tonalität) erzeugt werden.

Im Rahmen von Genehmigungsverfahren von Freileitungen sind solche Geräusche im Vorfeld zu prognostizieren. Diese Prognosen stützen sich bei der Ermittlung der Schallleistung nach heutigem Stand auf zwei wesentliche Berechnungsverfahren, die semi-empirisch ermittelt wurden. Bei den Berechnungsmethoden handelt es sich um Verfahren nach EPRI und BPA [1]. Beide Methoden wurden anhand von Freifeldmessungen entwickelt. Bei EPRI fließen zusätzlich Laborversuche mit ein. In beide Formeln fließen als Parameter im Wesentlichen die Randfeldstärke und Leiterseilparameter (Durchmesser der Teilleiter, Anzahl der Teilleiter im Bündel) ein. Die Formeln unterscheiden sich nur durch eine unterschiedliche Gewichtung der Parameter (s.u. Tabelle 1).

Bei AC-Systemen stellen Regentropfen die maßgeblichen Störstellen als Ursache für das Koronageräusch dar. Bei DC-Systemen stellen Partikel die maßgeblichen Störstellen dar. Dadurch neigen DC-Systeme eher bei niederschlagsfreiem Wetter dazu Geräusche zu emittieren. Grundsätzlich stellen Regentropfen zwar auch bei DC-Systemen Störstellen dar. Der Geräuschpegelunterschied ohne und mit Niederschlag ist bei DC-Systemen daher nicht so groß (DC-EPRI/BPA Berechnungsformeln: 6 dB(A) Unterschied [1]), wie das bei AC-Systemen der Fall ist (AC-EPRI/BPA Berechnungsformeln: 25 dB(A) Unterschied).

Die Entstehung des breitbandigen Geräusches bei AC und DC kann grundsätzlich auf das gleiche Phänomen zurückgeführt werden. DC-Systeme emittieren einen vergleichsweise niedrigen Schalldruckpegel bei kontinuierlichem, relativ starkem Regen, da sich durch regelmäßige Teilentladungen eine Raumladungswolke bildet. Diese führt zu Teilentladungen mit kleinerer Amplitude („schirmenden“ Wirkung der Raumladungswolke).

Partikel treffen weniger kontinuierlich auf den Leiter als Regen, wodurch der beschriebene Effekt im Zustand ohne Niederschlag geringer ausfällt. Bei AC-Systemen ändert sich die Polarität der Ionen periodisch, wodurch der Effekt nicht in derselben Größenordnung auftritt wie bei einem DC-Leiter.

Grundsätzlich ist für die Entstehung des Koronageräusches die Amplitudenhöhe der Teilentladungen ausschlaggebend. Teilentladungen mit kleiner Amplitude erzeugen oft Schalldruckpegel unterhalb der Hörschwelle. Bei positiver Spannung werden überwiegend Teilentladungen mit großen

Amplituden in niedriger Frequenz erzeugt. Bei negativer Spannung werden dagegen überwiegend Teilentladungen mit geringeren Amplituden, aber in einer höheren Frequenz erzeugt [5]. In der Literatur [1] wird daher beschrieben, dass die positive Halbwelle bei der AC-Spannung maßgeblich das Koronageräusch erzeugt. Aus diesem Grund wird der negative DC-Pol im Vergleich zum positiven Pol mit einem niedrigeren Schallpegel angenommen. Unterstützt wird diese Annahme dadurch, dass Partikel oft negativ geladen sind und daher vom positiven Pol angezogen werden und daher dort eine größere Anzahl an Teilentladungen auftreten [1].

Konfiguration der Hybridleitung

Nach Untersuchung der verschiedenen Mastkonfigurationen, die im geplanten Hybridprojekt eingesetzt werden sollen, ergeben sich für ein typisches Mastbild durch die Nähe der AC- und DC-Phasen auf der gleichen Mastseite (Abbildung 2) die höchsten Randfeldstärkeneinkopplungen hinsichtlich des DC-Offsets und des AC-Rippels.

Auf dem in Abbildung 2 dargestellten Masten befinden sich vier Stromkreise. Drei werden als 380-kV-Wechselspannungssysteme (AC) mit drei Phasen (u, v, w) und einer als ± 380 -kV-Gleichstromsystem (DC) im Bipol (negativer (-) und positiver (+) Pol) mit einem Neutralleiter (0) ausgeführt. Als Beseilung wird ein 4er-Bündel (Teilleiter-Durchmesser 22,4 mm) angenommen.

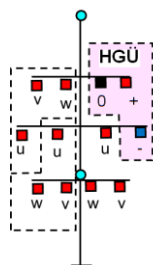


Abbildung 2: Prinzip Skizze des untersuchten Doppeltonnen-Masttyps bei dem die Positionen der AC-Stromkreise und des DC-Stromkreises (HGÜ) gekennzeichnet sind mit den entsprechenden Phasenlagen.

Die größten Einkopplungen vom AC- ins DC-System und umgekehrt sind auf der Mastseite zu erwarten, auf der sich beide Systeme befinden.

Die berechneten Werte des DC-Offsets beziehen sich dabei auf den Betriebsmodus „negativer Monopol“ (positiver Pol ist ausgeschaltet). Dies stellt den Fall einer stärkeren Einkopplung dar, zum einen da der negative Pol durch seine Nähe (gleiche Traverse) einen größeren Einfluss auf das AC-System hat. Zum anderen wird durch den negativen Pol ein positiver Offset erzeugt, der im AC-Leiter die für die Koronageräusche maßgebliche positive Halbwelle verstärkt. In der Phase „u“ auf der Mastseite des DC-Systems (Abbildung 2) wurde eine AC-Randfeldstärke von 15,1 kV/cm (Effektivwert) berechnet. Zusätzlich wird dort ein DC-Offset von +5,2 kV/cm eingekoppelt. Hieraus ergibt sich ein Peak-Wert in der Randfeldstärke von 26,6 kV/cm. Auch die Randfeldstärken und die Einkopplungen von den weiteren Phasen wurden berechnet. Dabei hat sich gezeigt, dass sowohl der prozentuale Anteil der eingekoppelten DC-Randfeldstärke als auch der Peakwert der resultierenden Randfeldstärke für die Phase „u“ am größten ist. Für die

Laboruntersuchung wurden daher die elektrischen Parameter verwendet, die diesen Leiter repräsentieren.

Die Berechnungen der Einkopplung der AC-Stromkreise in die jeweiligen DC-Pole ergeben eine maximale Randfeldstärkeneinkopplung vom AC-System in den positiven Pol von 2,1 kV/cm und in den negativen Pol von 4,1 kV/cm. Durch den geringeren Abstand zu den AC-Systemen ist die Einkopplung in den negativen Pol größer. Da aber der positive Pol laut Literatur [1] akustisch relevanter ist, werden in der Labormessung beide DC-Pole mit der entsprechenden Einkopplung untersucht.

Labormessung

Für die Labormessung wurde ein Prüfaufbau mit 10 m langen 4er-Leiterbündeln als einpolige Versuchsanordnung in 3 m Höhe realisiert. Es wurde ein „neuer“, vorbehandelte Leiter und ein „gealterter“ Leiter (35 Jahre im Netz in Betrieb) mit gleichem Durchmesser (22,4 mm) untersucht. Die Geräuschmessungen wurden mit und ohne Beregnung durchgeführt (konstante Beregnung der Leiterbündel unter Hochspannung mit verschiedenen Regenraten möglich).

Zur Nachbildung der zu realisierenden Randfeldstärken mussten die anzulegenden Prüfspannungen für die Übertragung auf den Labormaßstab ermittelt werden. Die Versuche wurden mit Mischspannungen durchgeführt (Abbildung 1). Im Falle der AC-Spannung mit DC-Offset wurde eine zweistufige Wechselspannungskaskade und eine dreistufige Greinacherkaskade bereitgestellt. Im Falle der DC-Spannungen (+ und -) mit den entsprechenden AC-Rippeln wurde eine Greinacherkaskade und ein zusätzlicher AC-Transformator verwendet.

Mit drei Schallpegelanalysatoren wurden die Leiteremissionen an verschiedenen geometrisch definierten Punkten im Raum erfasst. Da unter anderem Emissionen erwartet wurden, welche räumlich stark variieren können (Interferenzen), bildet die Mittelung der Messwerte über drei Messgeräte eine bessere Beurteilungsgrundlage als eine Einzelpunktmessung. Zudem wurde parallel zu den Leitern eine akustische Kamera installiert, um das Abstrahlungsverhalten der Leiter näher zu untersuchen.

Im Falle der AC-Anordnung mit DC-Offset wurde eine Messung vor dem Transformator der Versuchsanlage positioniert, um einen möglichen Fremdgeräuscheinfluss des AC-Transformators kontrollieren zu können. Im Falle der DC-Messung mit AC-Rippel wird ein kleinerer AC-Trafo oberhalb der Gleichstromanlage verwendet. Hier wurde daher die Fremdgeräuschmessstation in der Nähe des Trafos und der Greinacherkaskade positioniert.

Ergebnisse

AC-Stromkreis mit positivem DC-Offset

Ein positiver Offset verschiebt den sinusförmigen Verlauf der AC-Spannung in den akustisch relevanteren positiven Bereich. Dies könnte laut Literatur [2] in einer Verstärkung des Geräuschs münden. Dieser Effekt wird jedoch in den jeweiligen Veröffentlichungen als vernachlässigbar eingestuft. Da bisher nur wenige Studien [2] existieren, die darüber hinaus auch nicht die geplante spezielle Konfiguration mit verschiedenen Systemen auf einem Masten verwenden, sind diese Laborergebnisse von großem Interesse.

In der Literatur wurde auch eine weitere mögliche gegenseitige Beeinflussung durch die Raumladungen zwischen den AC- und DC- Polen diskutiert. Bei nahe beieinanderliegenden Polen könnte die Abschirmwirkung der Ionen um den AC-Leiter durch DC-Ionen beeinflusst werden. Die konkrete Auswirkung auf die Geräuschentwicklung durch eine mögliche Verringerung der Abschirmwirkung werden als gering eingestuft und wurden in diesem Versuch daher nicht weiter untersucht [1].

In Abbildung 3 sind die gemessenen Schallleistungen (AC mit und ohne positiven DC-Offset) mit und ohne Beregnung dargestellt. Es wurde bei einer Regenstärke von 4,9 mm/h gemessen (mittlerer Regen). Mittlerer Regen stellt den bei der Planung von Hochspannungsfreileitungen den in der Prognose zu berücksichtigenden Witterungszustand dar. Die bei starkem Regen entstehenden Koronageräusche haben zwar die höchsten Schalldruckpegel.

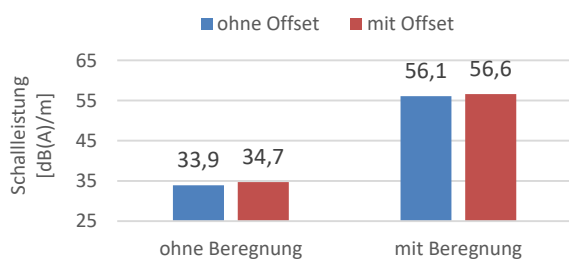


Abbildung 3: Längenbezogene Schallleistungen des neuen 4er Bündels Al/St 265/35 des AC-Leiters mit dem und ohne den größten zu erwartenden Kopplungseffekt (DC-Offset) der geplanten Hybridleitung.

Diese werden aber durch das Regengeräusch mit dessen ähnlicher spektraler Zusammensetzung überdeckt und treten im beurteilungsrelevanten Nachtzeitraum selten im Sinne der TA Lärm auf [3][4]. Durch die dominierenden AC-Randfeldstärken sind die Schallleistungen mit Niederschlag deutlich höher als ohne. Werden die Unterschiede mit und ohne Offset betrachtet, ist bei beiden Wetterlagen nur eine geringe Erhöhung der Schallleistung zu erkennen (ohne Niederschlag: 0,8 dB(A), mit Niederschlag: 0,4 dB(A)). Dieses Ergebnis zeigt, dass der Offset hinsichtlich der Schallleistung bei der geplanten Hybridleitung nur einen vernachlässigbaren Einfluss für den zu prognostizierenden Zustand Regen hat.

Hinsichtlich der Prognose der AC-Stromkreise im Hybridsystem kann daher bei der Festlegung der zu verwendenden Schallleistung zur Geräuschprognose [3][4] analog zur gängigen Praxis bei reinen AC-Systemen verfahren werden.

Positiver und negativer DC-Pol mit AC-Rippel

In der zu diesem Thema verfügbaren Literatur [2] wird der AC-Rippel auf ein DC-System als vernachlässigbar angenommen. Da dort nicht speziell die Konfiguration der geplanten Hybridleitung behandelt wurde, ist auch hier eine Bewertung im Laborversuch sinnvoll.

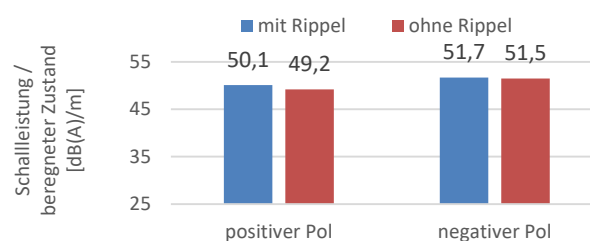


Abbildung 4: Längenbezogene Schallleistungen im berechneten Zustand (5,5 mm/h) für das neue 4er Bündel Al/St 265/35 der DC-Pole mit und ohne dem größten zu erwartenden Kopplungseffekt (AC-Rippel) der geplanten Hybridleitung.

Im für AC-Systeme relevanten Witterungszustand Regen zeigt sich, dass die Schallleistungen mit Rippel bei beiden Polen nur geringfügig höher sind als ohne Rippel (positiv: 0,9 dB(A) (Rippel: 2,1 kV/cm.); negativ: 0,2 dB(A) (Rippel: 4,1 kV/cm.); Abbildung 4). Vor dem Hintergrund der Messunsicherheiten, die bedingt durch den Versuchsaufbau größer sind als der ermittelte Einfluss des Rippels, kann dieser vernachlässigt werden.

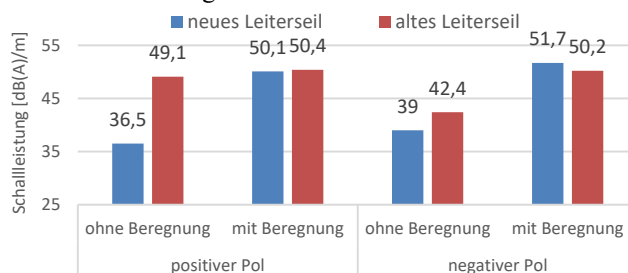


Abbildung 5: Längenbezogene Schallleistung der untersuchten Zustände für den neuen / alten Leiter (4er Bündel Al/St 265/35), der DC-Pole mit dem größten zu erwartenden Kopplungseffekt (AC-Rippel) der geplanten Hybridleitung (Regenrate: 4,8-5,5 mm/h).

Da im Labor die maßgeblichen DC-Störstellen wie Partikel nicht nachgebildet werden konnten, wurde zusätzlich zum neuen Leiter ein „natürlich gealterter“ Leiter untersucht. Dieses hat mutmaßlich mehr Störstellen auf der Oberfläche, die zum Beispiel durch Partikelanhaftungen über die Jahre entstanden sind. Im Ergebnis (Abbildung 5) ist für die verschiedenen Betriebszustände zu sehen, dass der Zustand ohne Beregnung eine geringere Schallemission aufweist als der Fall mit Beregnung (alter Leiter: positiv: 1,3 dB(A); negativ: 7,8 dB(A)).

Im Zustand ohne Beregnung hat der gealterte Leiter wie erwartet eine höhere Schallemission als der neue Leiter. Es ist keine Tendenz zu erkennen, welcher der beiden Pole ohne Niederschlag eine größere Schallemission abgibt (Abbildung 5). Bei der Auswertung der akustischen Kamera wurde festgestellt, dass beim Zustand ohne Beregnung entlang des Leiterabschnittes (10 m) überwiegend nur an vereinzelt Stellen Teilentladungen aufgetreten sind. Daher kann dieser Laboraufbau nur bedingt als Linienschallquelle betrachtet werden, wobei dieser Sachverhalt hauptsächlich für den Zustand ohne Beregnung und am positiven Pol (stärkere Teilentladungen mit niedriger Frequenz) beobachtet wurde.

Der Zustand mit Beregnung ist der Fall, der die Bedingungen im Freien am besten abbildet, da davon ausgegangen wird, dass die relevanten Störstellen für diesen Wetterzustand nicht durch Partikel, sondern durch Regen erzeugt werden. Bei leichter bis mittlerer Beregnung entsteht

durch den Regen eine Raumladungswolke, die einen schirmenden Effekt hat.

Beim berechneten Zustand ist auffällig, dass die Schalleistungen für den positiven und den negativen Pol im Gegensatz zur Literatur nahezu gleich sind. Eine Erklärung dafür ist, dass die erzeugten Störstellen (Wassertropfen) nicht negativ geladene Partikel sind, die den positiven Pol in seiner Lautstärke verstärken.

Für den Vergleich des Laborversuchs mit den semi-empirischen Berechnungsformeln bildet das Ergebnis zum positiven Pol im berechneten Zustand am besten die Bedingungen im Freien ab.

Vergleich der Laborergebnisse mit DC-Formeln

In der Literatur [1][2] werden für die Geräuschprognosen von Hybridleitungen hauptsächlich die o.a. semi-empirischen Formeln nach EPRI und BPA verwendet.

Tabelle 1: Semi-empirische Berechnungsformeln nach EPRI und BPA für den positiven DC-Pol ohne Niederschlag.

EPRI	$L'_{WA} = 124 \lg\left(\frac{E}{25}\right) + 25 \lg\left(\frac{d}{4,45}\right) + 18 \lg\left(\frac{n}{2}\right) + 62,6 + \frac{h}{300}$ [6] Gültigkeitsbereich: $E = 15 \frac{kV}{cm} - 30 \frac{kV}{cm}$
BPA	$L'_{WA} = 86 \lg(E) + 40 \lg(d) + 25,6 \lg(n) - 94,8 + \frac{h}{300}$ [7] Gültigkeitsbereich: $E = 17 \frac{kV}{cm} - 29 \frac{kV}{cm}$
L'_{WA} = längenbezogene Schalleistung (A-bewertet) [dB(A)] E = elektrische Feldstärke (Mittelwert der maximalen Randfeldstärke der Leiterbündel) $\left[\frac{kV}{cm}\right]$ d = Durchmesser des Teilleiters [cm] n = Anzahl der Teilleiter des Bündels, hier $n \geq 3$ h = Höhe über Meeresspiegel [m]	

Die für die DC-Systeme herangezogenen Formeln (Tabelle 1) beziehen sich auf den positiven DC-Pol beim Witterungszustand ohne Niederschlag (im Sommer). Für den negativen Pol und für den Regenfall werden Abschläge der Schalleistung angenommen (negativer Pol: -8 dB(A); Regen: -6 dB(A)) [1][2]. Die Formeln nach EPRI und BPA sind in einem ähnlichen Randfeldstärkenbereich anwendbar (Gültigkeitsbereich, s. Tabelle 1). Im unteren Gültigkeitsbereich liefern die Formeln ähnliche Ergebnisse, aber je höher die Randfeldstärken werden, desto größer sind die Unterschiede in den Ergebnissen. Unterschiedliche Ergebnisse der beiden Formeln zeigen sich daher auch für die geplante Hybridleitungskonfiguration (Abbildung 6). Die Werte von EPRI liegen deutlich über denen der BPA Berechnung (6 dB(A)).

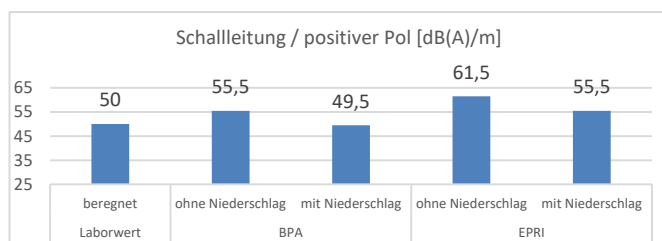


Abbildung 6: DC-Schalleistungen mit AC-Rippel aus dem Labor im Vergleich zu den semi-empirischen Berechnungsformeln BPA / EPRI.

Beim Vergleich der Ergebnisse (positiver Pol, mit Beregnung) aus den Laborversuchen mit den Berechnungen nach EPRI und BPA für die Zustände ohne und mit Niederschlag (Abbildung 6) liegen die Berechnungen nach

BPA näher an den Labormesswerten. Beim Zustand Beregnung liegen die Werte im gleichen Bereich. Im Fall ohne Niederschlag überschätzt die BPA-Formel den Labormesswert um 5,5 dB(A). Bei EPRI sind die Berechnungen mit Niederschlag 5,5 dB(A) und ohne Niederschlag 11,5 dB(A) höher als der Labormesswert, so dass EPRI im Gegensatz zu BPA nicht mehr das Laborergebnis abbilden kann.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Messungen im Labor konnte festgestellt werden, dass die Beeinflussung des AC-Systems durch einen positiven Offset vom negativen DC-Pol die Pegelhöhe der AC-Geräusche nur unwesentlich verändert. Dadurch können bei Geräuschprognosen von hybriden Anordnungen die Schalleistungspegel der AC-Stromkreise analog zu reinen AC-Anordnungen (ohne Offset) angenommen werden.

Umgekehrt hat auch die Beeinflussung des DC-Stromkreises durch einen AC-Rippel nur einen geringen Einfluss auf die Pegelhöhe der DC-Geräusche, der vernachlässigt werden kann.

Beim Vergleich der DC-Versuchsergebnisse mit AC-Rippel zu den semi-empirischen Berechnungen nach EPRI und BPA hat sich eine deutliche Überschätzung des Laborergebnisses bei der Verwendung der EPRI-Formel herausgestellt. Bei Anwendung der BPA-Formel stimmen die Werte im Zustand mit Beregnung mit dem Laborergebnis besser überein. Beim Witterungszustand ohne Niederschlag hingegen überschätzen auch die BPA-Berechnungen die Labormesswerte (5,5 dB(A)). Insgesamt liefert die Anwendung der BPA-Formel hinsichtlich einer Prognose für die hier untersuchte Hybridkonfiguration im Vergleich zu den Labormessungen realistischere Werte als die Berechnung nach EPRI. Für die hier gezeigten Anwendungsfälle sollte daher bei Geräuschprognosen die BPA-Berechnung verwendet werden.

Literatur

- [1] Hedtko, S. et al.: Audible noise of hybrid AC/DC overhead lines: Comparison of different prediction methods and conductor arrangements, EPRI HVDC & FACTS Conference 2015, Palo Alto, CA, USA, 2015
- [2] Straumann, U. et al.: Discussion of Converting a Double Circuit AC Overhead Line to an AC/DC Hybrid Line with Regard to Audible Noise, Cigre, 2011
- [3] Sames, P. et al.: Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen, HLNUG, Wiesbaden 2015
- [4] Gooßens, M. et al.: Koronageräusche von Höchstspannungsfreileitungen Teil II Praktischer Teil zur neuen DIN SPEC 8987, DAGA 2016
- [5] U. Straumann, U. et al.: Audible Noise from AC-UHV Transmission Lines –Theoretical Comparison of Broadband and Tonal Components, International Conference on UHV Transmission, Beijing, 2009
- [6] Gela, G. et al.: HVDC transmission line reference book, 1993.
- [7] Chartier, V.L. et al.: Formulas for predicting audible noise from overhead high voltage AC and DC lines, BPA, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100 No. 1, pp. 121-130, 1981