

Laboruntersuchungen zur Bewertung der Geräuschkinderung durch verschiedene Leiterseiltechnologien für Höchstspannungsfreileitungen

Benjamin Schröder¹, Saskia Möllenbeck¹, André Gravelmann¹, Stefan Steevens¹, Pascal Sames²,
Andreas Lingenau², Oliver Pischler³, Uwe Schichler³

¹ Amprion GmbH, 44139 Dortmund, E-Mail: benjamin.schroeder@amprion.net

² TÜV Technische Überwachung Hessen GmbH, 60486 Frankfurt am Main, E-Mail: pascal.sames@tuevhessen.de

³ IHS (TU Graz), 8010 Graz, E-Mail: uwe.schichler@tugraz.at

Einleitung

In diesem Beitrag werden verschiedene Möglichkeiten dargestellt, um mitunter auftretende Koronageräusche an Leiterseilen von Höchstspannungsfreileitungen zu mindern.

Wahrnehmbare Geräusche an Freileitungen können bei entsprechenden Witterungsbedingungen durch sogenannte Koronaentladungen auftreten. Grund hierfür sind die an Höchstspannungsfreileitungen vorhandenen elektrischen Felder. Während die elektrische Feldstärke am Boden nur einige Kilovolt pro Meter beträgt, nimmt sie in Richtung der Leiterseile bis auf einige Kilovolt pro Zentimeter an deren Oberfläche zu. Bestehen zusätzlich Unebenheiten an der Oberfläche der Leiter (Wassertropfen, Beschädigungen, Schmutzteilchen etc.), so kann sich dadurch die elektrische Feldstärke zusätzlich erhöhen. Erreicht die Feldstärke einen bestimmten Schwellenwert, kommt es im Bereich bis zu einigen cm Abstand zur Leiterseiloberfläche zu Entladungen, die sich durch ein leises Knistern und bedingt durch Ionenbewegungen gelegentlich auch als leises Brummen bemerkbar machen.

Im Laborversuch werden verschiedene technische Lösungen zur Minderung der Geräuschentwicklung anhand akustischer Messungen bewertet. In diesem Beitrag werden der Effekt einer Oberflächenbehandlung zur Veränderung des Benetzungsverhaltens, eine Vergrößerung des Leiterseildurchmessers zur Verringerung der elektrischen Randfeldstärke und der Einsatz eines verkleinerten Teilleiterabstandes betrachtet.

Um die gewonnen Erkenntnisse für die Geräuschprognose zu verwenden, wird ein Verfahren vorgeschlagen, das sich auf die Ermittlung von Differenzpegeln bezogen auf einen Referenzleiter abstützt.

Bestimmende Parameter für Koronageräusche

Für die Entstehung von Koronageräuschen sind im Wesentlichen zwei Einflussfaktoren ausschlaggebend. Der erste Parameter ist die sogenannte Randfeldstärke. Diese ist definiert als die arithmetisch gemittelte maximale elektrische Feldstärke an der Oberfläche aller Teilleiter eines Leiterbündels (Abbildung 1). Zur Berechnung der Randfeldstärke werden die Leiterseile als glatte Zylinder mit dem Durchmesser des zu betrachtenden Leiterseils angenommen. Zur Bestimmung des elektrischen Feldes auf der Oberfläche dient gewöhnlich eine Kombination aus Ersatz- und Spiegelladungsverfahren [1, 2]. Die so ermittelte Randfeldstärke wird auch als Parameter für die semi-

empirische Ermittlung der Schallleistung nach EPRI [3] genutzt.

Die Randfeldstärke wird durch folgende technische Randbedingungen beeinflusst:

- Betriebsspannung (Spannungsebenen in der Höchstspannung: 220 kV, 380 kV)
- Leiterseildurchmesser (typisch bei 380 kV: 22,4 mm und 32,5 mm)
- Anzahl der Leiter im Bündel (Typisch für 380 kV: 4 Teilleiter)
- Teilleiterabstand (Standard bei 380 kV: 400 mm)

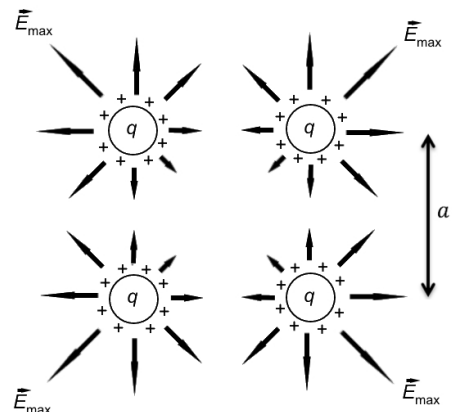


Abbildung 1: Schematische Darstellung der elektrischen Feldstärke an der Oberfläche eines Leiterbündels (4-fach Bündel) mit Teilleiterabstand a . In der positiven Halbwelle der Spannung liegt eine positive Ladung q auf der Oberfläche eines jeden Leiters vor. Durch Einsatz von Mehrfachbündeln verringert sich die Ladung pro Leiter und das elektrische Feld wird reduziert.

Der zweite Einflussfaktor ist durch die Leiterseiloberfläche gegeben. Da Koronageräusche bei Wechselfeldern im Wesentlichen bei Niederschlag auftreten, sind die Benetzungseigenschaften der Oberfläche von Bedeutung. Während fabrikneue Leiterseile ohne Oberflächenbehandlung keine ausgeprägte Hydrophilie aufweisen und somit die Bildung von ausgeprägten Wassertropfen an der Oberfläche begünstigen, haben im Betrieb gealterte Leiterseile hydrophile Eigenschaften. Der Effekt kann auch durch eine Oberflächenbehandlung wie etwa durch eine Glasperlenbestrahlung oder Sandstrahlung erreicht werden [4].

Versuchsdurchführung

Durch technische Änderungen im Vergleich zu Standardkonfigurationen bei Leiterseilbündeln ergeben sich Unterschiede in der Summenschallleistung aber auch spektral (Einzelton bei 100 Hz), die sowohl für die Bewertung der Effizienz der schallmindernden Maßnahme als auch für Immissionsprognosen von Bedeutung sind. Im Folgenden wird dargestellt wie diese Unterschiede über schalltechnische Messungen im Laborversuch untersucht werden können.

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 und Abbildung 3 zu sehen. Untersucht wird ein 4-fach Leiterseilbündel von 10 m Länge, das in einer Höhe von 3 m (Abstand Boden-Leiterseilbündelzentrum) gespannt ist.

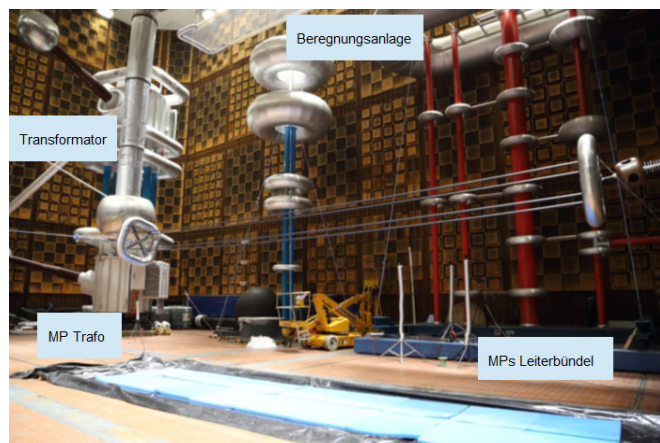


Abbildung 2: Aufbau des Laborversuchs im Nikola-Tesla-Labor an der TU Graz.

Darüber befindet sich eine Beregnungsanlage über deren Zuflussregelung verschiedene Regenintensitäten eingestellt werden können. Die berechnete Länge des Leiterseilbündels beträgt 6 m. Um Regengeräusche zu dämpfen, befinden sich unterhalb des Leiterseilbündels Schaumstoffmatten. Die Schallpegelmesser (Klasse 1) sind in der Höhe des Bündelzentrums über Boden aufgestellt. Um Interferenzen im Bereich um 100 Hz zu berücksichtigen, werden mehrere Schallpegelmesser räumlich versetzt zueinander aufgebaut (MP3, MP4, MP5 in Abbildung 3). Um die Abstrahlung des Hochspannungstransformators zu kontrollieren (Erfassen von Driften im Verlauf des Versuchstages), wird dort ebenfalls ein Schallpegelmesser aufgebaut (MP Trafo in Abbildung 3). Da der Transformator mit steigender Prüfspannung erhöhte Schallemissionen aussendet, ist der Bodenabstand mit 3 m Höhe so gewählt, dass bei vergleichsweise niedriger Prüfspannung aufgrund der starken kapazitiven Ankopplung an die Bodenebene praxisrelevante Randfeldstärken erreicht werden können.

Die Koronaemissionen nehmen mit zunehmender Niederschlagsintensität ebenfalls zu. Daher werden zur Bestimmung der randfeldstärkenabhängigen Schallemission in Anlehnung an die Intervallgrenzen der Niederschlagskategorien aus [5] drei verschiedene Regenraten (Zielwerte) untersucht: 1,2 mm/h, 4,8 mm/h und 8,4 mm/h. Dabei kann die Niederschlagsintensität von 4,8 mm/h als konservativer Wert für den standardmäßig beurteilungsrelevanten Fall bei Prognosen nach TA Lärm angesehen werden, da die Verdeckung durch das

Regengeräusch bei höheren Regenraten wahrscheinlicher wird und solche Ereignisse selten im Sinne der TA Lärm stattfinden [5, 6]. Daher beschränken sich die folgenden Betrachtungen auf diese „mittlere Regenrate“. Für jede Messung wird die Niederschlagsintensität mit einem Niederschlagsmesser und einer Kunststoffwanne bestimmt und die jeweils gemessenen Werte werden gemittelt. Bei der Nachmessung der Regenintensität kann es zu geringen Abweichungen vom Zielwert kommen (vgl. Abb. 4 und 5). Diese Abweichungen unterscheiden sich ebenfalls von Messreihe zu Messreihe. Daher werden beim Vergleich unterschiedlicher Messreihen die jeweils gemessenen Regenraten ebenfalls gemittelt (vgl. Abb. 6 bis 8). Die Variation der Schallemissionen in Bezug auf die geringfügigen Schwankungen der gemessenen Regenraten ist jedoch vernachlässigbar klein.

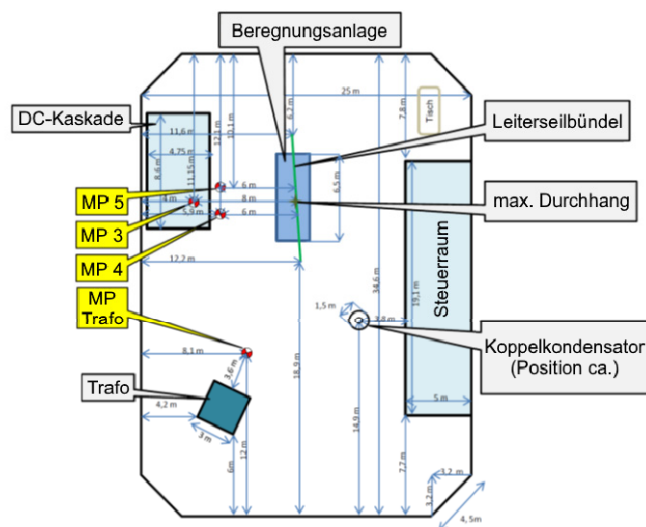


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Laborversuchs in Draufsicht.

Die effektive Prüfspannung wird von 140 kV – 270 kV durchfahren. Dies entspricht einer Randfeldstärke von ca. 10 kV/cm – 20 kV/cm an einem Leiterseil mit Querschnitt 265/35 (22,4 mm Durchmesser). Der zumeist in der Praxis relevante Bereich liegt für ein Leiterseil dieses Durchmessers (4-fach-Bündel, 380-kV-Spannungsebene) bei ca. 15 kV/cm – 17 kV/cm (ca. 200 kV – 230 kV Prüfspannung).

Schalleistungsbestimmung

Alle Pegel sind im Weiteren ohne explizite Kennzeichnung zeitlich gemittelt und bewertet. Zur Bestimmung des längenbezogenen Schalleistungspegels wird die DIN EN ISO 3746:2011 herangezogen. Hierbei wird zunächst für die Messpunkte MP3 bis MP5 jeweils in allen Terzbändern eine Fremdgeräuschkorrektur K_1 abgezogen (ΔL_p entspricht im Wesentlichen der Differenz zwischen gemessenem Gesamtgeräusch und dem Fremdgeräusch durch das Regengeräusch und die Trafogeräusche):

$$K_1 = -10 \lg(1 - 10^{-0,1\Delta L_p}). \quad (1)$$

Anschließend wird der an MP3 gemessenen Schalldruckpegel $L_p^{(3)}$ über das Messflächenmaß auf den Abstand von MP4/MP5 $L_p^{(3)*}$ umgerechnet:

$$L_p^{(3)*} = L_p^{(3)} + 10 \lg(S(r_A)/S(r_B)). \quad (2)$$

Hierbei wird die isotrope Abstrahlung einer Linienquelle über einen Zylindermantel der Fläche $S(r) = 2\pi rz$ zugrunde gelegt mit $z = 6$ m abstrahlender (beregneter) Länge und Abstände zum Zentrum des Leiterbündels von $r_A = 8$ m, $r_B = 6$ m. Das Ergebnis wird mit den im Abstand r_B gemessenen Pegeln energetisch zu $\overline{L_p}$ gemittelt. Die Rückwirkung des Raumes wird durch den Abzug der Messumgebungskorrektur K_2 berücksichtigt:

$$K_2 = 10 \lg(1 + 4 S(r_B)/A), \quad (3)$$

wobei die äquivalente Absorptionsfläche A aus einer Messung der Nachhallzeit T und dem Raumvolumen V gewonnen wird:

$$A = 0,16 V/T. \quad (4)$$

Der längenbezogene Schallleistungspegel der abstrahlenden Länge von $l = 6$ m ergibt sich damit zu:

$$L'_W = \overline{L_p} + 10 \lg(S(r_B)/1m^2) - 10 \lg(l/1 m). \quad (5)$$

Ergebnisse

Für die Beurteilung sind der Summenpegel sowie die Einzeltöne bei 100 Hz und 200 Hz relevant. Die für verschiedene Leiterseilkonfigurationen ermittelten Schallleistungspegel werden mit denjenigen eines oberflächenbehandelten Referenzleiters („Standardleiter“) bei 400 mm Teilleiterabstand verglichen. Messpunkte mit Fremdgeräuschabstand von weniger als 3 dB sind schwarz umrandet. Abbildung 4 zeigt das Emissionsspektrum des Referenzleiters.

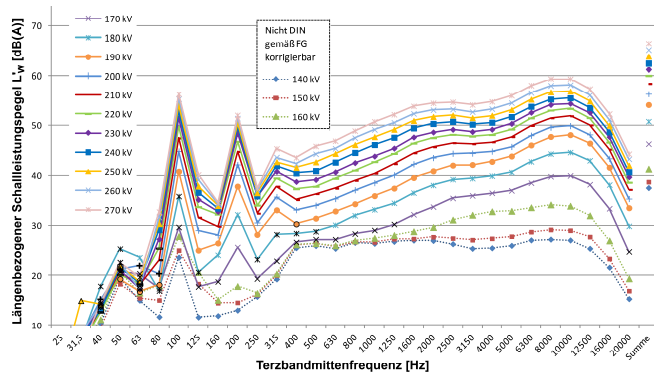


Abbildung 4: Prüfspannungsabhängige Terzspektren des Referenzleiters (22,4 mm Durchmesser, glasperlenbestrahlt, 4-fach Bündel bei 400 mm Teilleiterabstand) bei einer Regenrate von 4,4 mm/h.

Es ist zu erkennen, dass der Summenpegel durch den höherfrequenten Anteil dominiert wird und dass zwei Einzeltöne bei 100 Hz und 200 Hz mit zunehmender Prüfspannung hervortreten. Der Summenschallleistungspegel sowie die Schallleistungspegel des 100-Hz- und 200-Hz-Terzbandes sind in Abbildung 5 über der mit der Prüfspannung korrespondierenden Randfeldstärke aufgetragen.

Abbildung 5 zeigt, dass die 100-Hz und 200-Hz-Anteile mit steigendem Summenpegel zunehmen. Während der

Summenpegel durch den hochfrequenten Anteil der Entladung dominiert wird, entsteht der 100-Hz-Anteil (und die Harmonische bei 200 Hz) durch die Bewegung der bei der Entladung erzeugten Ionen im elektrischen Feld in der direkten Umgebung des Leiterbündels [7].

Im Folgenden wird die Minderung des Schallleistungspegels für einen speziellen Leiter mit vergrößertem Durchmesser bei ähnlichem Gewicht, sowie für den Referenzleiter bei einer Verkleinerung des Teilleiterabstandes auf 300 mm dargestellt. Des Weiteren wird der Vergleich zu einem Leiter ohne Oberflächenbehandlung gezogen. Dabei erfolgt die Darstellung in den Abbildungen 6 bis 8 über die Pegeldifferenz der Summenschallleistung sowie der Schallleistung des 100-Hz- und 200-Hz-Terzbandes zwischen dem untersuchten Leiterseil und dem Referenzleiter (positive Werte entsprechen einem niedrigeren Schallleistungspegel als beim Referenzleiter). Für den Referenzleiter wurden dabei die Werte von Messungen aus zwei zeitlich getrennten Messreihen gemittelt. Ebenso wurden die leicht variierenden Regenraten der unterschiedlichen Messungen gemittelt.

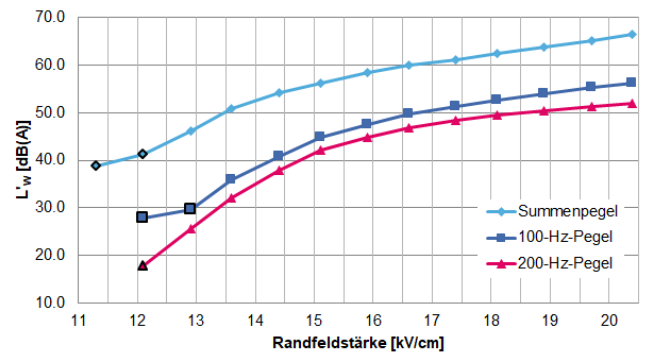


Abbildung 5: Prüfspannungsabhängiger, längenbezogener Summenschallleistungspegel sowie längenbezogener Schallleistungspegel des 100-Hz- und 200-Hz-Terzbandes des Referenzleiters bei einer Regenrate von 4,4 mm/h.

Der in Abbildung 6 dargestellte Differenzpegel für den Leiter mit vergrößertem Durchmesser hat aufgrund seiner größeren Oberfläche eine geringere elektrische Ladung pro Fläche, wodurch die Randfeldstärke abgesenkt wird. Bei in der Praxis oftmals dominierenden Randfeldstärken von 16 kV/cm – 17 kV/cm an üblichen Standardseilen des Querschnitts 265/35 sind im Summenpegel relativ große Minderungen von ca. 5 dB zu erreichen.

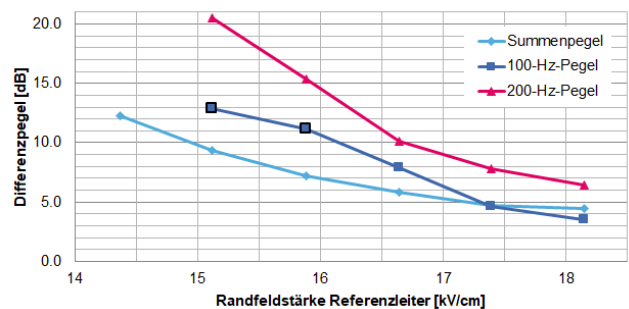


Abbildung 6: Differenzpegel für einen Leiter mit vergrößertem Durchmesser (25,9 mm) bezogen auf den Referenzleiter bei einer Regenrate von 4,0 mm/h (Mittelwert).

Abbildung 7 zeigt die Differenzpegel bei einer Verkleinerung des Teilleiterabstandes (vgl. Abbildung 1) von 400 mm auf

300 mm. Hierdurch kann eine bessere gegenseitige Abschirmung der Leiter erreicht werden. Die entsprechende Reduktion der Randfeldstärke lässt sich jedoch nicht mit den zuvor angesprochenen Berechnungsmethoden erfassen. Hierzu sind zum Beispiel Finite-Elemente-Methoden notwendig. Durch die Verkleinerung des Bündels sind für den Referenzleiter im oberen Bereich der Randfeldstärken Minderungen der Schallleistungen von gut 2 dB zu erreichen.

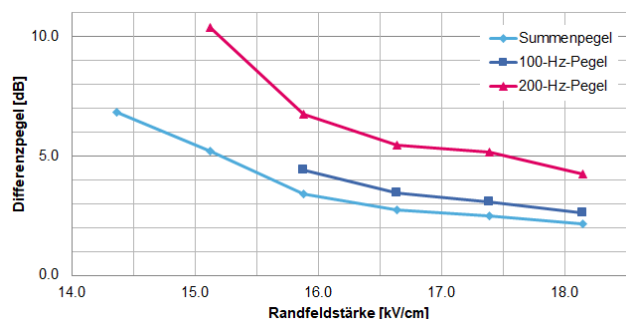


Abbildung 7: Differenzpegel des Referenzleiters mit verkleinertem Teilleiterabstand auf 300 mm bezogen auf den Referenzleiter bei 400 mm Teilleiterabstand bei einer Regenrate von 4,1 mm/h (Mittelwert).

Abbildung 8 zeigt den Einfluss einer Oberflächenbehandlung, wie sie als Schlussfolgerung aus dem CONOR-Projekt zur Schallreduktion vorgeschlagen wird [4]. Ausschlaggebend ist hierbei nicht die Randfeldstärke, sondern das unterschiedliche Benetzungsverhalten bei Niederschlag. Es ist zu erkennen, dass eine Oberflächenbehandlung im Vergleich zu einem unbehandelten Leiterseil mehr als 4 dB Minderung im Schallleistungspegel (bezogen auf das Referenzseil) für den oberen Bereich der praxisrelevanten Randfeldstärken zur Folge hat.

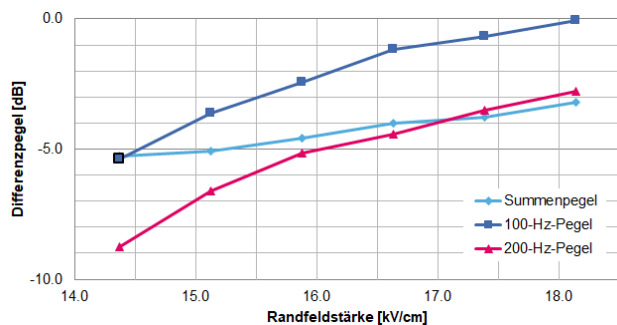


Abbildung 8: Differenzpegel für ein Leiterseil ohne Oberflächenbehandlung bezogen auf den Referenzleiter bei einer Regenrate von 4,1 mm/h (Mittelwert).

Zusammenfassung

Die größte Minderung im Summen-Schallleistungspegel unter den hier betrachteten Maßnahmen lässt sich über die Durchmesservergrößerung erreichen. Das zweitgrößte Minderungspotential ergibt sich durch die Bündelverkleinerung auf 300 mm Seilabstand. Die Oberflächenbehandlung von Leiterseilen ist Stand der Technik und wurde bei den zuvor genannten Maßnahmen vorausgesetzt. Die Effektivität in Bezug auf die Minderung des Summen-Schallleistungspegels konnte im Laborversuch validiert werden.

Für die Verwendung der Laborerkenntnisse bei Schallprognosen können Abschläge verwendet werden, die aus Differenzpegeln bezogen auf ein Referenzseil ermittelt werden, dessen längenbezogener Schallleistungspegel aus Freifeldmessungen oder semi-empirischen Formeln (z.B. EPRI) bekannt ist.

Literatur

- [1] Happoldt, H.; Oeding, D.: „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Springer, 5. Auflage, 1978
- [2] Schröder, B. Möllenbeck, S.: „Zur neuen DIN SPEC 8987 Koronageräusche von Hochspannungsfreileitungen I – theoretischer Teil“, Fortschritte der Akustik – DAGA 2016
- [3] Electric Power Research Institute: „AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above (3rd Edition)“, Palo Alto 2006
- [4] Bundesamt für Umwelt (BAFU): „Aufarbeitung der CONOR Forschungsergebnisse für den Vollzug“, Bern 2010
- [5] Gooßens, M.; Sames, P.: „Messtechnische Felduntersuchungen zu Korona-Geräuschen“, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2015)
- [6] Gooßens, M; Tausend, W.: „Zur neuen DIN SPEC 8987 - Koronageräusche von Höchstspannungsfreileitungen, Teil II – praktischer Teil“, Fortschritte der Akustik – DAGA 2016
- [7] U. Straumann: „Simulation of the space charge near coronating conductors of ac overhead transmission lines“, J. Phys. D: Appl. Phys. **44** 075502 (2011)