

Zur neuen DIN SPEC 8987 Koronageräusche von Hochspannungsfreileitungen

I – theoretischer Teil

Benjamin Schröder¹, Saskia Möllenbeck¹

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

Einleitung

Der Beitrag behandelt die theoretischen Grundlagen der Berechnung von Koronageräuschen von Hochspannungsfreileitungen, wie sie in der künftigen DIN SPEC 8987 dargestellt werden. Es handelt sich bei den folgenden inhaltlichen Darstellungen um den aktuellen Stand der internen Beratungen des damit befassten DIN-Arbeitskreises.

Koronageräusche entstehen durch Unregelmäßigkeiten an Leiterseiloberflächen, wie sie insbesondere durch Regentropfen hervorgerufen werden. Diese führen zu einer lokalen Überhöhung des elektrischen Feldes und damit zu Entladungen in der Umgebungsluft. Diese Entladungen treten in rascher Abfolge auf und werden als breitbandiges Knistern oder Prasseln und Brummen wahrgenommen. Gegenstand der DIN SPEC 8987 ist die Berechnung des längenbezogenen Schalleistungspegels dieser Geräuschemission der Phasenleiter von Freileitungen. Dazu wird zunächst auf die Berechnung der Randfeldstärken der Phasenleiter eingegangen. Als Verfahren zur Berechnung des elektrischen Feldes wird dabei eine Kombination aus Ersatz- und Spiegelladungsverfahren angewandt. Die Randfeldstärke ergibt sich daraus durch Überlagerung der Feldbeiträge der einzelnen Phasen- bzw. Teilleiter. Basierend auf den Randfeldstärken werden die längenbezogenen Schalleistungspegel mit Hilfe der Gleichungen nach EPRI (Electric Power Research Institute) ermittelt. Zusätzliche Parameter der Schalleistungsberechnung stammen dabei aus den geometrischen Daten der Freileitung und der Leiterseile sowie aus der Niederschlagsstatistik. Für ausgewählte Beispiele werden die so gewonnenen Berechnungsergebnisse mit Messungen an Freileitungen verglichen.

Entstehung von Koronageräuschen

Der Grund für die Entstehung von Koronageräuschen an den Leiterseilen einer Freileitung liegt im elektrischen Feld, welches durch die anliegende Wechselspannung erzeugt wird. Abbildung 1 zeigt schematisch eine Isoliniendarstellung des RMS-Wertes des elektrischen Feldes einer 380 kV-Freileitung. Es ist zu erkennen, dass die elektrische Feldstärke in der Nähe der Leiter ansteigt und zunehmend zylindersymmetrisch verläuft. Bei vorliegenden Störstellen auf dem Leiterseil, wie insbesondere beim Vorliegen von Wassertropfen, erhöht sich an diesen Stellen das elektrische Feld (siehe Abbildung 2) und es kommt zu impulsartigen Entladungen (Koronaentladungen). Durch die sinusförmige Änderung der Spannung bei einer Frequenz

von 50 Hz ändern sich entsprechend Betrag und Richtung des elektrischen Feldes.

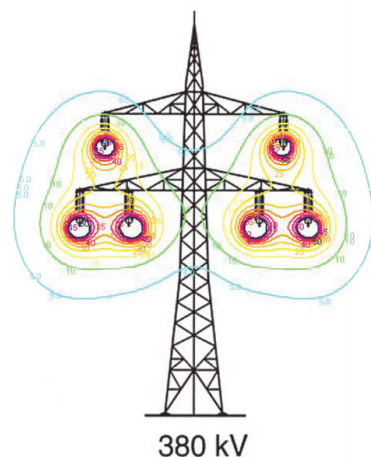


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Hochspannungsmastes mit Isolinien für den RMS-Wert des elektrischen Feldes, welches durch die an den Leiterseilen anliegende Spannung erzeugt wird. Dargestellt sind 2 Systeme (Stromkreise) auf der linken und rechten Seite. Jeder Stromkreis besteht aus 3 Phasenleitern.

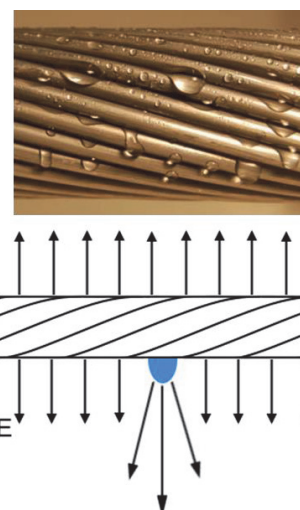


Abbildung 2: Oben: Hochspannungseile mit Wassertropfen [1]. Unten: Schematische Darstellung des Leiterseils und des elektrischen Feldes zu einem bestimmten Zeitpunkt (positive Halbwelle). Der Wassertropfen erzeugt eine Feldüberhöhung, die Koronaentladungen begünstigt.

Durch thermische Absorption der Bewegungsenergie der sich im Feld bewegenden Ladungsträger werden relativ breitbandige, hochfrequente Geräusche – am stärksten im Bereich von einigen Kilohertz – erzeugt. Bei den Entladungen entstehen außerdem Ionen, welche sich im Bereich von einigen 10 cm um das Leiterseil aufhalten. Es herrscht im zeitlichen Mittel ein Gleichgewicht zwischen der Entstehung von Ionen und deren Rekombination (Neutralisierung). Die Ionen werden durch das elektrische Feld in Schwingung versetzt und erzeugen dadurch zusätzlich ein niederfrequentes Geräusch bei der doppelten Netzfrequenz (100 Hz), sowie – in geringerem Maße – ebenfalls höhere Harmonische.

Berechnung der elektrischen Randfeldstärke

Neben dem Oberflächenzustand ist die elektrische Feldstärke an der Oberfläche des Leiterseils (Randfeldstärke) die ausschlaggebende Kenngröße, die zunächst zur Berechnung der Schallemission bestimmt werden muss. Die DIN SPEC 8987 schlägt dazu ein Verfahren vor, das mit dem entsprechenden Modell zur Berechnung der längenbezogenen Schalleistungspegel [2] kompatibel ist. Für dieses Verfahren werden im einfachsten Fall die Leiterseile als unendlich lange, glatte Zylinder modelliert. Für einen Einzelleiter (siehe Abbildung 3) gilt für das elektrische Potential im Raum:

$$\varphi = -\frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln r + K \tag{1}$$

wobei q die elektrische Ladung pro Längeneinheit, ϵ_0 die Permittivität des Vakuums und r der Abstand zum Zentrum des Leiters ist. K ist eine additive Konstante. Durch Gradientenbildung folgt die Randfeldstärke im Abstand des Teilleiterradius r_T :

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \tag{2}$$

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_T} \tag{3}$$

In ähnlicher Weise lässt sich die Randfeldstärke eines Bündelleiters angeben. Dieser besteht aus mehreren Einzelleitern und bildet einen Phasenleiter eines Systems.

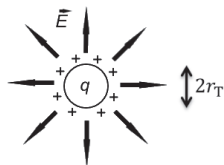


Abbildung 3: Schematische Darstellung der elektrischen Feldstärke an einem Leiter.

Bündelleiter werden in der Hochspannungsübertragung verwendet, um Koronaentladungen zu verringern und die damit einhergehenden elektrischen Verluste und Schallemissionen zu minimieren. Das elektrische Feld eines

4-fach Leiterbündels ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Die längenbezogene Ladung q teilt sich in diesem Fall auf die einzelnen Leiterseile auf. Aus der vektoriellen Überlagerung der einzelnen Feldstärkekomponenten resultiert eine Abschwächung im inneren Bereich und eine Verstärkung im äußeren Bereich. Die Randfeldstärke bei einem symmetrischen Leiterbündel mit n Teilleitern und Teilleiterabstand a ist in diesem Fall durch die maximale elektrische Feldstärke an der Außenseite eines Teilleiters definiert [2]:

$$E_{\max} = \frac{q}{n2\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{r_T} + \frac{2(n-1) \sin(\pi/n)}{a} \right] \tag{4}$$

Im Beispiel in Abbildung 4 ist $n = 4$.

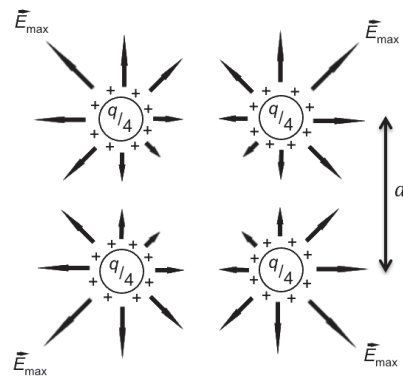


Abbildung 4: Schematische Darstellung der elektrischen Feldstärke an einem Leiterbündel (4-fach Bündel).

Diese Definition der Randfeldstärke zur Berechnung von Koronageräuschen entspricht der arithmetisch gemittelten maximalen Randfeldstärke aller Teilleiter (average-maximum bundle gradient). Sie wird in [2] für die Berechnung der Geräuschentwicklung verwendet und entspricht gängiger IEEE-Praxis zur Beschreibung von Koronaphänomenen.

Als Eingangsgröße für die Gleichungen (3) bzw. (4) ist nun ebenfalls q zu bestimmen. Dies soll im Folgenden an einem Beispiel für 3 Phasenleiter demonstriert werden. Um das Potential im Raum zu bestimmen, werden die Potentialbeiträge aller Leiter bzw. Leiterbündel summiert. Um die Randbedingung eines geerdeten Bodens mit $\varphi = 0$ einzuhalten, werden im gleichen Abstand zum Erdboden (rein virtuelle) Spiegelleiter mit entgegengesetzter Ladung platziert (siehe Abbildung 5). Das sich so ergebende Potential im Raum lautet:

$$\varphi = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_1 \ln \frac{r'_1}{r_1} + q_2 \ln \frac{r'_2}{r_2} + q_3 \ln \frac{r'_3}{r_3} \right) \tag{5}$$

Dabei sind r_1, r_2 und r_3 die Abstände zu den Leitern bzw. im gestrichelten Fall diejenigen zu den Spiegelleitern. Die längenbezogenen Ladungen q_1, q_2 und q_3 lassen sich über 3 Randbedingungen bestimmen, die durch die Vorgabe der an den Phasen anliegenden Spannungen V_1, V_2, V_3 gegeben

sind. Das zu lösende Gleichungssystem mit Koeffizienten α_{ij} hat folgende Form:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Für mehr als ein System (3 Phasen) ergibt sich ein erhöhter Aufwand zur Lösung von Gl. (6), so dass eine numerische Berechnung vorzuziehen ist.

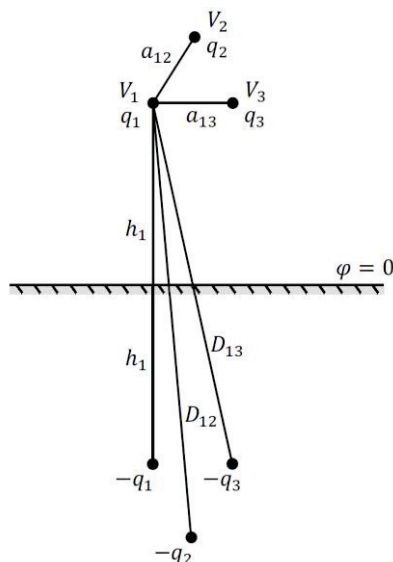


Abbildung 5: Beispiel für die Bestimmung der längenbezogenen Ladungen q_1, q_2, q_3 für 3 Phasen in Höhe h_1, h_2, h_3 mit Spannungen V_1, V_2, V_3 .

EPRI-Modell

Die im vorigen Abschnitt dargestellte Methode zur Berechnung der Randfeldstärke wird in [2] im Zusammenhang mit der dort dargestellten empirischen Formel zur Berechnung des längenbezogenen Schallleistungspegels L'_w empfohlen. Dieser beschreibt die abgestrahlte akustische Leistung pro Meter für einen Phasenleiter als Pegel über 1 Picowatt pro Meter. Die entsprechende Formel wurde durch Untersuchungen an Hochspannungsleitungen im Freifeld und durch Laboruntersuchungen gewonnen und besitzt folgende Abhängigkeiten:

$$L'_w = f(E, n, a, r_T, h) \quad (7)$$

Dabei ist E die Randfeldstärke, n die Anzahl der Teilleiter eines Leiterbündels, a der Teilleiterabstand, r_T der Leiterseilradius und h die Regenrate in Form eines aus Langzeitmessungen gewonnenen 50%-Perzentsils. Es sei daran erinnert, dass n, a und r_T die Randfeldstärke beeinflussen und die Parameter somit nicht alle voneinander unabhängig sind.

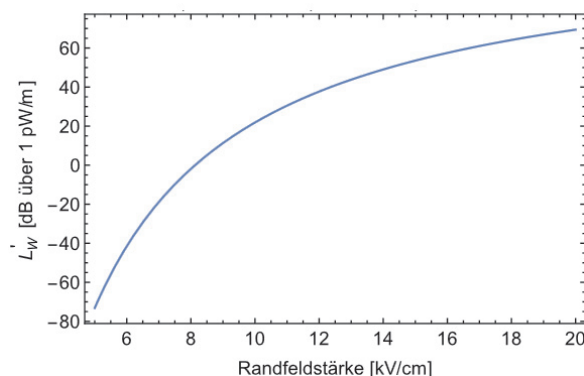


Abbildung 6: Abhängigkeit des längenbezogenen Schallleistungspegels von der Randfeldstärke im EPRI-Modell bei sonst gleichen Parametern für eine typische 4-fach Bündelleiterkonfiguration.

So würde zum Beispiel ein vergrößerter Leiterseildurchmesser zwar die den Schall abstrahlende Fläche vergrößern und damit die Emissionen erhöhen, jedoch nimmt die Randfeldstärke in dem Fall in einem solchen Maß ab, dass sich die Emission verringert. Der Einfluss der Randfeldstärke ist dadurch letztlich der dominante Faktor. Der Einfluss der Randfeldstärke bei sonst gleichen Bedingungen ist in Abbildung 6 dargestellt. Eine Änderung der Randfeldstärke bei sonst gleichen Bedingungen könnte in der Praxis nur durch eine Änderung der anliegenden Spannung(-en) erfolgen, diese ist jedoch für jeden Stromkreis ausschließlich betrieblich bestimmt.

Der einzige unabhängige Einflussparameter ist die Niederschlagsrate. Dieser wird durch einen additiven Aufschlag (Regenkorrektur) berücksichtigt. Dabei besteht der monotone Zusammenhang, dass zunehmender Niederschlag die Schallemission erhöht (siehe Abbildung 7).

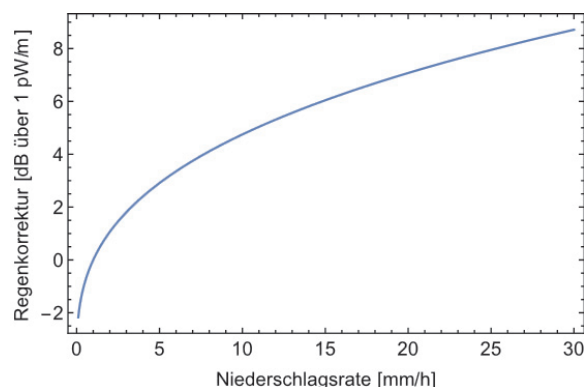


Abbildung 7: Abhängigkeit des additiven Zuschlags auf den längenbezogenen Schallleistungspegel von der Niederschlagsrate (Fit-Formel [3] für EPRI-Daten [2]).

Die explizite Korrelation zwischen dem längenbezogenen Schallleistungspegel und der Niederschlagsrate besteht allerdings in Form von Langzeitwerten. So korreliert das 50%-Perzentil der Regenrate mit einem Zuschlag auf den längenbezogenen Schallleistungspegel, welcher seinerseits ebenfalls das 50%-Perzentil eines statistisch verteilten

Langzeitpegels bei vorliegendem Niederschlag darstellt. Beide Größen entsprechen also statistischen Größen basierend auf Langzeitmessungen. Es wird für die DIN SPEC 8987 jedoch davon ausgegangen, dass diese Korrelation auch bei kürzeren Messzeiten mit ausreichender Genauigkeit gegeben ist.

Die Genauigkeit des EPRI-Modells für die Berechnung der längenbezogenen Schallleistungspegel wurde an verschiedenen Konfigurationen durch Messungen überprüft [4]. Dabei ist klar, dass es sich lediglich um eine immissionsseitige Überprüfung handelt, welche nicht direkt die Genauigkeit der Bestimmung einzelner Schallleistungspegel widerspiegelt und darüber hinaus ein Ausbreitungsmodell voraussetzt. Die Ergebnisse einer solchen Überprüfung sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Abweichungen bewegen sich meist in einem Bereich von 3 dB.

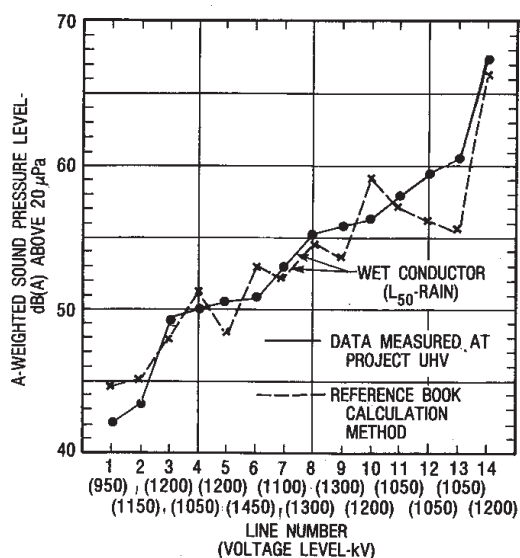


Abbildung 8: Vergleich zwischen Messungen an Höchstspannungsleitungen und theoretischen Berechnungen der Schalldruckpegel [4].

Ausblick und Diskussion

Im aktuellen Bearbeitungsstand der DIN SPEC 8987 gelten die Methoden zur Randfeldstärkeberechnung (Kombination aus Ersatz- und Spiegelladungsmethode) und Berechnung der längenbezogenen Schallleistungspegel (EPRI-Modell) als gemeinsame Basis. Für die gewählte Methode der Randfeldstärkeberechnung spricht, dass die Methode im Zusammenhang mit der Entwicklung des empirischen Schallleistungsmodells nach EPRI bereits benutzt wurde und somit eine Kompatibilität besteht. Zwar existieren genauere Methoden zur Bestimmung der Randfeldstärke, diese würden aber in der Regel nicht zu einer genaueren Prognose der längenbezogenen Schallleistungen führen. Für die EPRI-Methode spricht eine ihr zugrundeliegende breite empirische Datenbasis und die Möglichkeit einer flexiblen Regenkorrektur.

Aktuell werden noch weitere vorgesehene Inhalte diskutiert. Dazu gehört insbesondere die Ableitung einer Regenrate, welche zur Prognose einer „ungünstigsten Nachtstunde“ in Anlehnung an die Vorgaben der TA-Lärm Anwendung finden kann. Ein Ansatz wäre es, aus allen 365 lautesten Nachtstunden des Jahres (sowohl bei Trockenheit als auch Niederschlag) den 11. Wert nach den 10 lautesten Ereignissen („seltene Ereignisse“) als maßgeblich auszuzeichnen. Dies entspräche dann dem 97%-Perzentil der Stundenwerte der korrelierenden Regenraten. Grundsätzlich ist die Anwendung der TA-Lärm auf Freileitungen insofern diskussionswürdig, da es sich zum einen bei Freileitungen nicht um Industrieanlagen handelt, die bezüglich der Schallemission vom Betreiber geregelt werden können und zum anderen der vorherrschende Betriebszustand keinen Niederschlag und damit weitgehend vernachlässigbare Schallemissionen aufweist. Zur Differenzierung dieser sehr unterschiedlich starken Emissionen sollen Situationen „ohne Niederschlag“ (Trockenheit) und „mit Niederschlag“ (Regen, Schnee, Raureif) als Betriebszustände eingeführt werden. In diesem Zusammenhang soll ebenfalls der Begriff der Verdeckung definiert werden. Der Hintergrund ist, dass nicht alle Regenergebnisse ein tatsächlich hörbares Koronageräusch erzeugen, da dieses insbesondere mit zunehmender Regenrate durch das Fremdgeräusch des Niederschlags verdeckt wird. Des Weiteren soll ein Modell zur Berechnung des längenbezogenen Schallleistungspegels für mit Gleichstrom betriebene Freileitungen festgelegt werden. Da die Schallemission im Fall von Gleichstromleitungen bei trockener Witterung stärker ist als bei Regen, ist die Definition des angesprochenen Betriebszustands „ohne Niederschlag“ umso wichtiger.

Diese Ansätze sollten daher in gutachterlichen Bewertungen im Sinne der TA Lärm Berücksichtigung finden.

Literatur

- [1] Straumann, U.: Die Flüsterseile – Geräuschreduktion bei neuen Hochspannungsfreileitungsseilen, Bulletin SEV/VSE 10/2012
- [2] Electric Power Research Institute: AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above (3rd Edition), Palo Alto 2006
- [3] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Aufarbeitung der CONOR Forschungsergebnisse für den Vollzug (Untersuchungsbericht Nr. 452‘574, int. 561.2436), Bern 2010
- [4] Electric Power Research Institute: Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above (2nd Edition), Palo Alto 1982