Tonale Schallemissionen von Hochspannungsfreileitungen

Autor(en): **Semmler, Micha / Straumann, Ueli / Roeri, Claudia**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **96 (2005)**

Heft 15

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-857823

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Tonale Schallemissionen von Hochspannungsfreileitungen

Mechanismus und Reduktionsmassnahmen

Unter bestimmten atmosphärischen Bedingungen erreichen die Schallemissionen mancher Hochspannungsfreileitungen störend hohe Werte. Ursache sind elektrische Ladungen im Umfeld des Leiters, die auf Grund von Ionisationsprozessen vor allem an im Feld verformten Wassertropfen entstehen. Im vorliegenden Beitrag werden die die Emissionen beeinflussenden Parameter beschrieben und Massnahmen zur Reduktion der Schallemissionen vorgestellt. Eine Reduzierung der elektrischen Randfeldstärke wirkt sich mindernd auf die Schallemissionen aus, und hydrophile Beschichtungen lassen die Emission nach dem Regen schneller abklingen. Eine für den Leitungsbetreiber brauchbare Beschichtung wird allerdings noch gesucht.

Micha Semmler, Ueli Straumann, Claudia Roero, Timm H.Teich

In Europa erfolgt der elektrische Energietransport im Wesentlichen über ein ausgedehntes Netzwerk von 380/400-kV- und 220/230-kV-Leitungen. Die Hochspannung hat je nach Ausführung und Zustand der Leitung hohe Feldstärken auf den Leiterseilen selbst und in deren unmittelbarer Umgebung zur Folge. An Stellen erhöhter Feldstärke kann es zu spontanen, pulsartigen Koronaentladungen kommen, die sich durch Knistergeräusche bemerkbar machen. Aus akustischer Sicht ist die Hochspannungsleitung bei trockenem Wetter allenfalls eine breitbandige Schallquelle mit Emissionen im mittleren und hohen Bereich hörbarer Frequenzen, die sich durch den A-gewichteten Schalldruckpegel[1)] charakterisieren lassen.

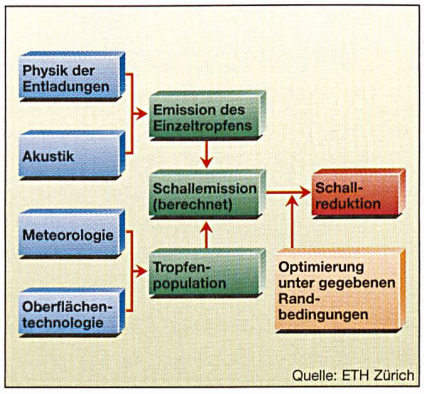

Bild 1 Übersicht der Sachgebiete, die im Projekt Conor miteinander verknüpft werden

Als in den 1960- bis 80er-Jahren die Auswirkungen der Erhöhung der Hochspannung von Freileitungen diskutiert wurden, war der A-Pegel Gegenstand intensiver Forschung [1, 2]. Experimente an Testleitungen im Freien zeigten eine Zunahme des A-Pegels mit steigender Spannung. Modelle zur Beschreibung der Resultate blieben auf der semi-empirischen Stufe stehen und können nur bedingt Vorhersagen machen [3–5]. Ein physikalisches Modell mit prädiktivem Charakter, welches aus Mastengeometrie, Betriebsparametern und Umweltbedingungen ohne empirische Parameter den A-Pegel vorhersagen kann, ist bis heute nicht bekannt.

Ein Schlechtwetter-Phänomen

Tonale Schallemissionen – Brummtöne bei doppelter Netzfrequenz, $2 \cdot f$ = 100 Hz – können bei nassen Wetterbedingungen (Regen, Schnee, Nebel und Reif) auf Grund benetzter Leiterseile entstehen. Mit zunehmender Regenintensität steigen die Schallpegel an, doch wirkt die Natur den Belästigungen entgegen: Je höher eine Regenrate ist, desto seltener kommt sie vor und desto kleiner ist der Abstand zum Hintergrundpegel. Im Schweizer Mittelland fällt in etwa 90% der Zeit kein Niederschlag und in etwa 8% der Zeit beträgt die Niederschlagsrate höchstens 1 mm/h. Anhaltende Lärmemissionen nach dem Regen können jedoch je nach Abtrocknungszeit des Leiters zu längeren Belästigungsdauern führen, die für die Beurteilung des tonalen Lärms massgebend sind. In Frequenzspektren von Untersuchungen zum A-Pegel treten bei Niederschlägen tonale Schallemissionen immer wieder deutlich hervor [1, 2]. Diese tieffrequenten Emissionen blieben jedoch bis vor kurzem weit gehend unbeachtet bzw. unkommentiert, da sie nur einen geringen Beitrag zum A-Pegel liefern. Erst in jüngerer Zeit wurden die ersten Ideen zur Entstehung der $2f$-Emissionen publiziert [6, 7].

Das Projekt Conor (Corona Noise Reduction) der Fachgruppe Hochspannungstechnologie der ETH Zürich (Leitung: Prof. Dr. Klaus Fröhlich) läuft seit Mitte 2002 und wird 2006 abgeschlossen sein.

Die gemessenen Schallpegel tonaler Emissionen sind meist so gering, dass sie im täglichen Leben durch andere Geräusche übertönt werden. Es gibt jedoch auch Situationen, vornehmlich zu Ruhezeiten, in denen $2f$-Emissionen zu störendem Lärm werden können. Im PSEL-Projekt No. 194[2)] sind unter der Leitung der FKH Bündelgeometrien auf ihr Reduktionspotenzial hin experimentell untersucht worden [8]. In Koordination mit dieser Arbeit sollen mit dem Projekt Conor[3)] quantitativ die Ursachen der tonalen Emission von Hochspannungsfreileitungen unter verschiedenen Umweltbedingungen grundlegend verstanden und so Vorhersagen der Schallemission unter Berücksichtigung der zeitlichen Verteilung der Bedingungen ermöglicht werden. Methoden zur emissionsseitigen Schallreduktion durch Wahl einer optimierten Geometrie und/oder Leiteroberfläche sollen dabei entwickelt und erprobt werden. Im Folgenden wird der gegenwärtige Wissensstand zur Reduk-

tion der tonalen Schallemission von Hochspannungsfreileitungen aufgezeigt.

Vorgehensweise beim Projekt Conor

Das Problem tonaler Schallemissionen ist vielschichtig. Es sind mehrere Phänomene miteinander verknüpft, die zunächst einzeln untersucht und schliesslich zu einem einheitlichen Gesamtbild zusammengefügt werden müssen. In Bild 1 ist das Zusammenspiel der verschiedenen Sachgebiete dargestellt. Aus Entladungsphysik und Akustik erhält man die Emission des Einzeltropfens. Die meteorologischen Bedingungen sowie die Beschaffenheit der Leiteroberfläche bestimmen Anzahl und Form der Tropfen auf einem Leiterseil. Daraus ergibt sich die berechnete Schallemission des Leiterseils. Sind die Mechanismen verstanden, die zur Schallproduktion führen, stehen verschiedene Strategien zur Schallreduktion offen.

Laboraufbau

Die theoretischen Arbeiten, die letztlich zu einem Prognosewerkzeug führen sollen, werden durch Laborexperimente unterstützt. Ein typischer Laboraufbau und die wichtigsten Detektoren sind in Bild 2 skizziert: Der Hochspannungsaufbau ist mit Elementen eines modularen Hochspannungs-Baukastensystems realisiert, wobei das Probestück jeweils zwischen zwei Doppeltoroiden aufgehängt ist. Es wird künstlicher Regen erzeugt, der natürlichem Regen in Menge und Tropfengrösseverteilung möglichst nahe kommt. Experimentell einfach zu realisieren sind grosse Regenraten von etwa 1 bis 100 mm/h. Schwächerer Regen oder Nebel sind bisher bei Hochspannung noch nicht verfügbar.

Der von beregneten Leitern emittierte Schall wird frequenzabhängig in Terzbändern mit einem Sondenmikrofon gemessen. Die Sonde erlaubt es, den Schallpegel trotz Hochspannung direkt unter dem Leiter zu ermitteln. Eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Aufnahmefrequenz von bis zu 10000 Bildern pro Sekunde ermöglicht die Aufnahme der Wassertropfen in jeder Phase ihrer 100-Hz-Schwingung. Tropfenverformung und Instabilitäten können so optisch detektiert werden [9]. Die Auszählung einzelner Bilder ergibt die jeweilige Tropfenpopulation auf dem Modellleiter bzw. dem Leiterseil. UV-Emissionen der Koronaentladungen werden mit einem UV-Bildwandler sichtbar gemacht. Scheinbare Ladung und Phasenlage dieser einzelnen Entladungen werden mit einem Teilentladungsmessgerät kapazitiv erdseitig detektiert. Schliesslich wird der Gesamtstrom (Wirk- sowie Blindstrom) auf der Hochspannungsseite über einen Shunt gemessen. Durch Fourier-Analyse kann die effektive Wirkleistung berechnet werden, die der Schallemission letztlich zur Verfügung steht und die nach heutigem Wissensstand eine wesentliche Grösse im Vorhersagemodell sein wird.

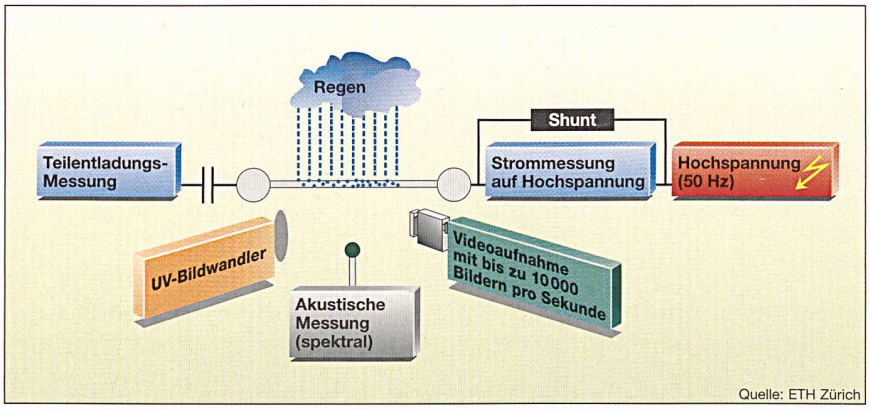

Bild 2 Aufbau des zentralen Laborexperiments mit beregneten Leiterseilen oder Modellleitern

Leiterlänge «kurz»: 1,5 m, davon 1 m beregnet; Leiterlänge «lang»: 8 m, davon 7,5 m beregnet; Seil je nach Krümmung 62–72 cm über dem Boden, ergibt Feldstärken im Bereich von 10 bis >22 kV_{peak}/cm (ungestört, d.h. ohne Feldüberhöhung durch Tropfen) bei 100 kV Hochspannung; Erklärungen zu den Messgeräten im Text.

Die Schallentstehung

Elektrisch-thermisch-mechanische Kopplung

In der wenigen Literatur zur tonalen Schallemission finden sich zwei mögliche Erklärungen zum Ursprung der Emission. Eine Hypothese vermutet einen mechanischen Vorgang, bei dem die Tropfen als schwingende Membran die Schallwellen erzeugen [7]. Berechnungen im Rahmen des Projekts Conor zeigen, dass diese mechanische $2f$-Emission zwar an und für sich existiert, aber die resultierenden Quellenstärken um etliche Grössenordnungen zu klein sind, als dass die gemessenen Pegel erklärt werden könnten [10]. In der zweiten Erklärung wird – ziemlich vage – Impulsübertragung durch Ionen um den Leiter herum als Quelle der $2f$-Emission genannt [6]. Die auf *Ionenwolken* basierende Idee, zu der bisher keine Theorie vorlag, ist nun weiter verfolgt worden [10]. Die Rolle der Wassertropfen in der nun entwickelten Theorie verbleibt insofern als Ursache der $2f$-Emission, indem es die Tropfen sind, die periodisch durch Entladungen Ionen in den Raum um die Leiter injizieren.

Wassertropfen werden im elektrischen Feld auf Grund ihrer dielektrischen Eigenschaften spitz verformt. Weil dadurch die Feldstärke an der Spitze zusätzlich erhöht wird, kann die Verformung bis zum Entladungseinsatz von Trichelpuls-Entladungen[4)] in der negativen und Onset Streamern[5)] oder einem impulslosen Glimmen in der positiven Halbwelle weiter gehen. Dabei ist die *Ionisationszone* um die jeweilige Spitze vergleichsweise klein (mm-Bereich). Es schliesst sich die viel grössere *Driftzone* an (etwa 300 mm), in der so gut wie keine freien Elektronen existieren und in der auch keine weiteren Ionen gebildet werden (Bild 3).

Die vorhandenen Ionen geben ihre Energie, die sie über das elektrische Feld in der Driftzone aufnehmen, durch elastische Stösse an neutrale Luftmoleküle ab. Der grösste Teil der übertragenen Energie führt zu einer periodischen Erwärmung der Luft, die sich dadurch periodisch ausdehnt und wieder zusammenzieht. Die Amplitude der Temperaturoszillation ist zwar klein – so schwankt die Temperatur in einem Bereich von nur einigen mK – aber dennoch gross genug, um tonale Schallemissionen zu produzieren. Bei Kenntnis der momentanen Leistung, mit

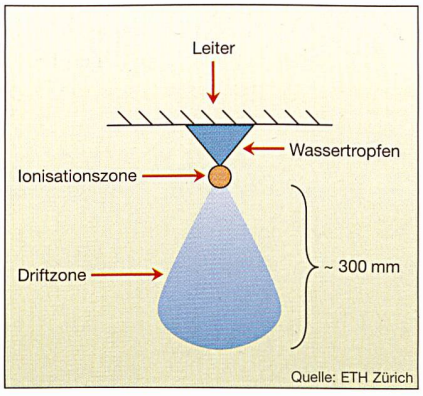

Bild 3 Schematische Darstellung einer Störstelle (hier: Wassertropfen) im elektrischen Feld

Unterscheidung der Ionisationszone und der Driftzone

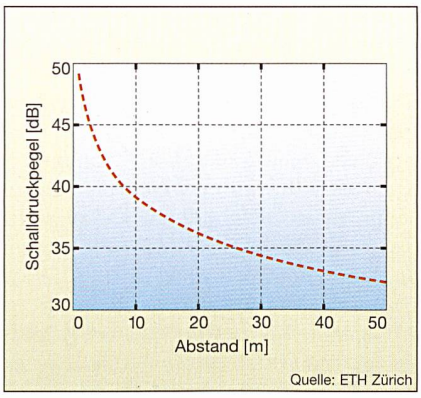

Bild 4 Emissionspegel im 100-Hz-Terzband in Abhängigkeit vom Abstand bei einem Koronaverlust von 20 W/m

Bei Abstandsverdoppelung zum Leiter nimmt der Pegel um –3 dB ab; eine Verdoppelung der Koronaverluste verschiebt den Pegel um +6 dB.

der die Ionen der Luft Wärmeenergie zuführen, lässt sich der Schalldruckpegel der daraus resultierenden Emission berechnen. Diese momentane Leistung ist genau durch den zeitabhängigen *Koronastrom* gegeben.

Verlustleistung des Koronastroms

Bei einer Verlustleistung von 20 W/m entlang eines Leiterseils – einem typischen Wert für eine Übertragungsleitung bei leichtem Regen – ergibt die Modellrechnung die in Bild 4 gezeigte Abstandsabhängigkeit des Schalldruckpegels für das 100-Hz-Terzband. Gezeigt ist nur der emittierte Pegel; Reflexionen und Absorption an Boden und Gebäudestrukturen sind in der Rechnung nicht berücksichtigt. Bei einer dreiphasigen Leitung haben die einzelnen Phasen durch die unterschiedlichen Weglängen und elektrischen Phasen auch als akustische Emitter eine unterschiedliche Phase, so dass an Immissionsorten Interferenzeffekte zu berücksichtigen sind. Bild 4 kann auch als Beschreibung für den ungünstigsten Fall der vollständig positiven Interferenz interpretiert werden: Die dargestellten Pegel sind die maximal möglichen Pegel einer Leitung mit insgesamt 20 W/m Koronaverlustleistung.

Über Koronaverluste ist bekannt, dass sie mit zunehmender Feldstärke, zunehmender Leiteroberfläche und zunehmender Anzahl und Grösse der Störstellen bzw. Stärke des Regens zunehmen. Eine Erhöhung der Anzahl Teilleiter im Bündel oder eine Vergrösserung des Seildurchmessers resultieren also in einem Wettlauf zweier gegenläufiger Effekte. Wie weiter unten gezeigt wird, deuten erste Messungen auf eine Reduktion der tonalen Emission bei einer Verringerung des Feldes auf Kosten einer grösseren Oberfläche hin. Da die tonale Emission bei Feldstärkereduktion abnimmt, müssten nach der Theorie folglich auch die Koronaverluste abnehmen. In der Literatur über Untersuchungen zu den Auswirkungen von Spannungserhöhungen findet man tatsächlich die erwartete Abnahme der Koronaverluste bei Erhöhung der Anzahl Teilleiter im Bündel [11].

Tropfenpopulationen

Koronaverluste benetzter Leiter hängen von Anzahl und Form der Wassertropfen auf dem Leiter ab, die wiederum von den atmosphärischen Bedingungen und den Eigenschaften der Leiteroberfläche beeinflusst werden. Je mehr Ladung von den Tropfen in die Umgebung, d.h. in die Driftzone injiziert wird, desto grösser wird die Verlustleistung. Diese Abhängigkeit ist komplex: Es reicht zum Beispiel nicht aus, nur die gesamte Wassermasse auf den Leitern zu bestimmen, da die Wassermasse nicht mit dem Lärm korreliert. Im Gegenteil: Hydrophil beschichtete, leisere Leiter haben tendenziell eine grössere Wasserbefrachtung als unbeschichtete, lautere Leiter. Da gleich grosse Tropfen je nach Ort bzw. Form auf dem Leiter (z.B. hängend oder sitzend) ein unterschiedliches Entladungsverhalten zeigen, reicht auch eine globale Grössenverteilung aller Tropfen nicht aus. Die Ladungsmenge und damit die Koronaverluste werden bei gegebener Feldstärke also durch die Grösse einerseits und andererseits durch die Form der Tropfen bzw. dem Ort auf dem Leiter gegeben.

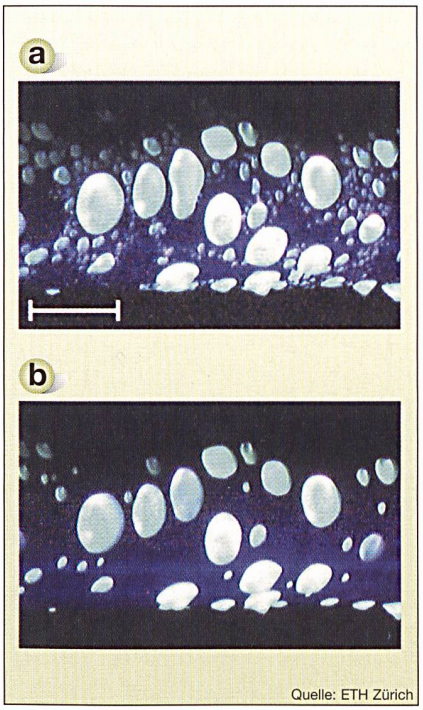

Bild 5 Aufsicht auf einen nassen, unbeschichteten Modellleiter unmittelbar nach Regenende (a) und 10 Minuten später (b)

Kontrastverstärkung der Aufnahme durch Beigabe von Fluoreszein und Bestrahlung aus einer UV-Quelle; Balkenlänge: 10 mm.

Während konstantem Regen ändert sich die Tropfenpopulation nicht. Sie ist in einem dynamischen Gleichgewichtszustand, bei dem sich Zufluss und Abfluss von Wasser die Waage halten. Hört der Regen auf, ist der Zufluss gestoppt, und in der Abtrocknungsphase ist die Verteilung der Tropfen einem ständigen Wandel unterworfen. Ein Beispiel gibt Bild 5, welches einen unbeschichteten Modellleiter unmittelbar nach dem Regen und zehn Minuten später zeigt. Anzahl und Grösse der grossen Tropfen sind nach zehn Minuten kaum verändert, die kleinen Tropfen hingegen sind weitest gehend verschwunden.

Prinzipiell gibt es drei Arten von Mechanismen, wie die Tropfen wieder verschwinden: (thermische) Verdunstung, (mechanisches, durch die Schwerkraft bedingtes) Abtropfen und (mechanisches, durch das elektrische Feld bedingtes) Abreissen. Die den einzelnen Mechanismen zugeordneten Tropfenlebensdauern sind von ähnlicher Grössenordnung (typisch während des Regens sind einige zehn Minuten für unbehandelte Leiter), so dass die jeweiligen Bedingungen genau untersucht werden müssen, um zu bestimmen, welcher Effekt dominiert.

Das Verschwinden der kleinen Tropfen in Bild 5 ist auf Verdunstung zurückzuführen.

Brummen und Knistern sind unterschiedlicher Natur

Zwischen $2f$-Emission und A-Pegel besteht ein grundsätzlicher Unterschied im Mechanismus ihrer Entstehung. Zur $2f$-Emission tragen alle Typen von Entladungen bei, während der A-Pegel hauptsächlich durch einzelne, pulsförmige Entladungen mit grossen Ladungsinhalten erzeugt wird. Bei diesen Entladungen wird die Luft innerhalb sehr kurzer Zeit ein klein wenig erwärmt und eine Schallwelle ausgesendet. Bei den ladungsstärkeren Pulsen (~1 nC bei Onset Streamern) ist diese Schallwelle im kHz-Bereich hörbar und führt zum bekannten Knistern und Prasseln. Die akustische Emission aus ladungsschwachen Entladungen (~60 pC bei Trichelpuls-Entladungen) ist überwiegend im Ultraschallbereich anzusiedeln. Langlebige, ungepulste Entladungen tragen kaum zum A-Pegel bei. Für 100-Hz- und A-Pegel sind folglich nicht gleiche Parametereinflüsse zu erwarten. Als ein Beispiel dafür wird in Bild 6 die Abhängigkeit der

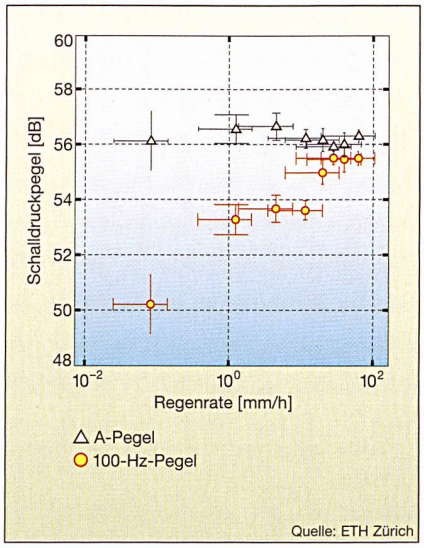

Bild 6 Schallemission im 100-Hz-Terzband und A-Pegel für einen «langen» Aluminium-Modellleiter

Durchmesser: 20 mm; Emission bei 100 kV (>22 kV_{peak}/cm, ungestört) als Funktion der Regenrate; Mikrophonabstand zur Schallquelle: 1 m.

Schallpegel von der Regenrate gezeigt. Innerhalb des Messbereichs bis zu maximal 100 mm/h Niederschlag steigen die gemessenen Pegel der tonalen Emission monoton mit zunehmender Regenrate an, während der A-Pegel oberhalb einer Regenrate in der Grössenordnung von 1 mm/h gesättigt ist [5].

Um in Zukunft den Schalldruckpegel der $2f$-Emission in Abhängigkeit von Netzspannung, Bündelgeometrie und Tropfenpopulation (bzw. Regenrate und Oberflächenbeschaffenheit) rechnerisch vorhersagen zu können, wird ein Modell gebraucht, welches die Koronaverluste mit all seinen Abhängigkeiten beschreibt. Ein solches Modell der Verlustleistung ist Gegenstand der Forschung und soll in Zukunft die Berechnung der Emissionspegel ermöglichen.

Massnahmen

Da der Schalldruck proportional zur Koronaverlustleistung ist [10], ist die grundsätzliche Strategie zur Reduktion der $2f$-Emissionen vorgegeben: Es müssen die Koronaverluste bzw. die Anzahl der Tropfen, die Ionisation bewirkende Elektronen emittieren, reduziert werden. Bisherige Erkenntnisse zu Abhilfemassnahmen basieren im Wesentlichen auf Laborexperimenten mit kurzen Einzelleitern. Dabei wurden und werden folgende Ansätze auf ihr Reduktionspotenzial hin untersucht: die Randfeldstärke und die Bündelgeometrie, der Typ und der Zustand von Leiterseilen sowie die Beschichtung von Leiterseilen.

Randfeldstärke und Bündelgeometrie

Ein bekanntes Mittel zur Reduktion von Koronaverlusten [11] und damit auch der tonalen Schallemission während und nach dem Regen ist eine Verringerung der Randfeldstärke. Dies kann durch eine Erhöhung der Anzahl Leiter im Bündel oder durch eine Vergrösserung der Radien der Leiter erreicht werden. Wird die Feldstärkereduktion durch dickere Leiterseile realisiert, gewinnt der Lärm reduzierende Effekt gegenüber der möglichen Erhöhung des Pegels, die eine vergrösserte Oberfläche bewirken könnte (Bild 7). Ob die Schallpegelreduktion dadurch bereits genügend ist, muss im Einzelfall bestimmt werden, wenn die Berechenbarkeit der $2f$-Emissionen der einzelnen Konfigurationen gegeben ist. Zusätzliche Massnahmen sind sicher sinnvoll.

Man erkennt in Bild 7, dass die Streuung der gemessenen Schallpegel bei der tonalen Schallemission gleichartiger Seile sehr gross ist und in unseren Experimenten bis zu 10 dB ausmachen kann. Bei längeren Seilproben sind jedoch wegen statistischer Ausmittelung geringere Unterschiede bei gleichartigen Seilen zu erwarten.

Typ und Zustand von Leiterseilen

Die tonalen Schallemissionen für *unbehandelte* Z- und Standardseile und für variierte Spannung zeigen keinen Unterschied (Bild 8) trotz ihrer verschiedenen Oberflächenstruktur, die von glatten Z-Elementen bzw. runden Drähten herrührt. Die Verwendung von Hohlseilen wirkt sich wie jede Vergrösserung des Seildurchmessers verringernd auf die Randfeldstärke und entsprechend auf die $2f$-Emissionen aus. Ein *unbehandelter* Seiltyp, der sich durch besonders geringe tonale Schallemission während des Regens und eine kurze Abtrocknungszeit nach dem Regen auszeichnet, konnte somit bisher nicht gefunden werden. In Kombination mit Beschichtungen könnte der Seiltyp jedoch eine Rolle spielen. Erste Resultate deuten darauf hin.

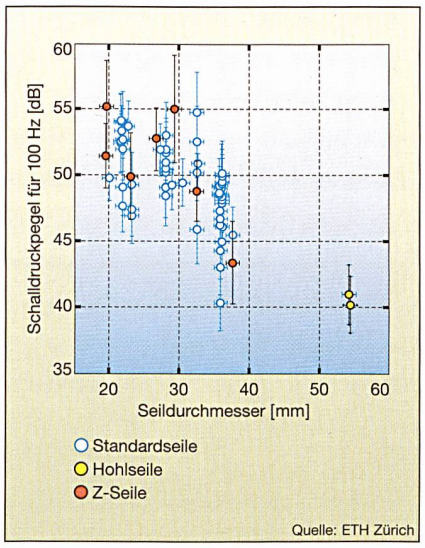

Bild 7 Lärmemission im 100-Hz-Terzband für über 60 verschiedene «kurze» Leiterseilproben

Z-Seil, Hohlseil, Standardseil; Unterschiede im Radius, Alter und Zustand; Emission bei starkem Regen (100 mm/h) und konstanter Spannung (100 kV); Mikrophonabstand zur Schallquelle: je nach Seilkrümmung 62–72 cm.

Gemäss Betreibern gibt es widersprüchliche Erfahrungen bezüglich des Zustands unbehandelter Leiterseile und der damit verbundenen Schallemissionen. In den Laborexperimenten erwiesen sich grob verschmutzte Seile *während* des Regens als tendenziell lauter, und mit einer intakten Farbschicht versehene Seile waren eher leiser. Die Unterschiede betragen jedoch wenige Dezibel und sind daher vom Ohr praktisch nicht wahrnehmbar. Keinem weiteren untersuchten Merkmal (Alter, Verseilung, Krümmung) konnte bei den vorliegenden Proben bisher ein signifikanter und reproduzierbarer Einfluss nachgewiesen werden.

Beschichtung von Leiterseilen

Die Anzahl der Wassertropfen auf einem Leiter kann durch eine Modifikation der Leiteroberfläche beeinflusst werden [12]. Hydrophile Beschichtungen unterstützen den Wasserablauf zur Unterseite des Seiles und verkürzen nach starkem Regen die Abklingzeit der tonalen Schallemission markant, was zu einer verkürzten Belästigungszeit führt. Das Lärmreduktionspotenzial hydrophiler Beschichtungen wird in Bild 9 verdeutlicht. *Während* starkem Regen sind die gemessenen Unterschiede in der tonalen Schallemission für drei verschiedene Zustände des Leiterseils (verwittert, gereinigt, beschichtet) so gering, dass sie für das menschliche Ohr nicht oder bestenfalls gerade noch wahrnehmbar sind. Wie aus Bild 9 ersichtlich ist, kommt der Lärm reduzierende Effekt der Beschichtung erst *nach* dem Regen durch eine stark verkürzte Abtrocknungszeit richtig zum Tragen. Die grosse Differenz zwischen dem verwitterten und dem gereinigten Z-Seil zeigt, dass Alterung und Verschmutzung die akustischen Eigenschaften eines Leiterseils massiv beeinflussen können, wobei der Effekt uneinheitlich ist: Im aktuellen Beispiel ist das gereinigte Seil lauter als das verwitterte Seil, in anderen Fällen wird hingegen auch der gegenteilige Effekt beobachtet.

Es gibt Hinweise, dass bei hydrophil beschichteten Leiterseilen der Seiltyp eine Rolle spielt, da die geometrische Struktur der verschiedenen Seile das Ab-

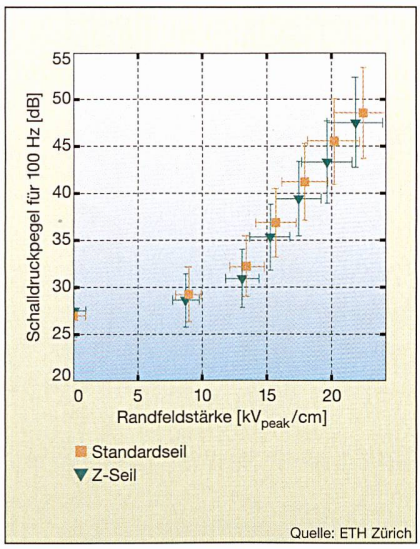

Bild 8 Lärmemission im 100-Hz-Terzband für je ein «kurzes» Z- und ein Standardseil

Durchmesser: 32,4 bzw. 32,2 mm; Emission bei starkem Regen (100 mm/h) und variierter (ungestörter) Randfeldstärke; Mikrophonabstand zur Schallquelle: 1,2 m.

laufen von Wassertropfen unterschiedlich begünstigt. Der Wegfluss des Wassers könnte durch spezielle Abtropfvorrichtungen (z.B. Ringe um das Leiterseil an verschiedenen Punkten) noch weiter begünstigt werden. Die optimale Kombination von Leitertyp, Beschichtung und Abtropfvorrichtung ist noch nicht gefunden, aber Gegenstand der aktuellen Forschung. Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch die Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen und Alterung. Schnelle Abtrocknung eines Leiters ist prinzipiell auch durch eine superhydrophobe Beschichtung möglich, bei der alle Wassertropfen sofort abperlen. Zwei kommerziell erhältliche Produkte sind bisher untersucht worden und haben kein nützliches Verhalten gezeigt.

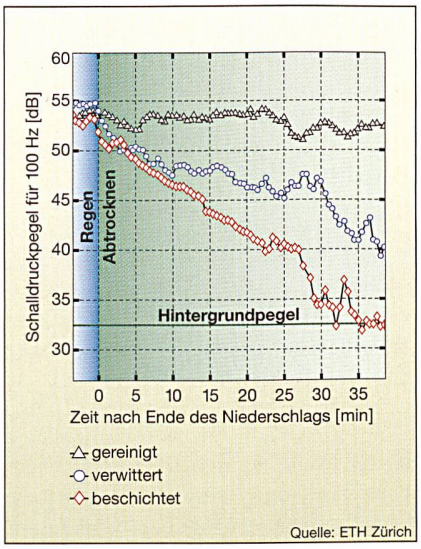

Bild 9 Zeitlicher Verlauf der tonalen Schallemission während und nach dem Regen für ein «kurzes» Z-Seil (Durchmesser 22,4 mm) mit drei verschiedenen Zuständen der Oberfläche

Verwittert: ungebraucht, aber durch Lagerung im Freien verwittert; gereinigt: mit alkoholgetränkter Bürste gereinigt; beschichtet: modifiziert mit auf Siliziumdioxid (SiO2) basierender, hydrophiler Beschichtung. Beregnung während 4 Minuten (100 mm/h); Ende des Regens ist der Zeitnullpunkt. Spannung: 100 kV (20,6 kV$_{peak}$/cm, ungestört); Mikrophonabstand zur Schallquelle: 1,2 m.

Ausblick

Ein Emissionsmodell zur tonalen Schallemission, mit dem die Schallpegel für die unterschiedlichsten Bedingungen berechnet werden können, ist ein wesentliches Ziel des Projekts.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist der Mechanismus der Schallentstehung grundsätzlich verstanden. Ist die Verlustleistung eines Leiterseils bekannt, kann die emittierte Schallleistung bereits berechnet werden. Eine strenge Theorie zum Berechnen der Verlustleistung bei vorgegebenen Randbedingungen (Wetter, Seilgeometrie, Betriebsparameter) ist Gegenstand der Forschung. Das vollständige Modell, welches für *Vorhersagen* benutzt werden kann, sollte bis Ende des Projekts per Mitte nächsten Jahres erreicht sein.

Nach bisherigem Wissensstand scheint die SiO_2-basierte hydrophile Beschichtung ein potenziell geeignetes Material zu sein, um Oberflächen von Hochspannungsseilen zu modifizieren. Im nächsten Schritt müssen geeignete Beschichtungen auf ihre langfristige Beständigkeit bei angelegter Hochspannung hin untersucht werden.

Referenzen

[1] *E. R. Taylor Jr., V. L. Chartier, D. N. Rice:* Audible noise and visual corona from HV and EHV transmission lines and substation conductors-laboratory tests. IEEE Trans. PAS, Vol. 88, No. 5, pp. 666–679, 1969.

[2] *D. E. Perry:* An analysis of transmission line audible noise levels based upon field and three-phase test line measurements. IEEE Trans. PAS, Vol. 91, No. 3, pp. 857–865, 1972.

[3] IEEE Committee Report: A comparison of methods for calculating audible noise of high voltage transmission lines. IEEE Trans. PAS, Vol. 101, No. 10, pp. 4090–4099, 1982.

[4] *V. L. Chartier, R. D. Sterns:* Formulas for predicting audible noise from overhead high voltage AC and DC lines. IEEE Trans. PAS, Vol. 100, No. 1, pp. 121–129, 1981.

[5] *H. Kirkham, W. J. Gajda Jr.:* A mathematical model of transmission line audible noise. Part 1: Background and model development. IEEE Trans. PAS, Vol. 102, No. 3, pp. 710–717, 1983.

[6] *P. S. Maruvada:* Corona performance of high-voltage transmission lines. Research Studies Press Ltd., Baldock, pp. 163–175, 2000.

[7] *T. H. Teich, H.-J. Weber:* Origin and abatement of tonal emission from high voltage transmission lines. Elektrotechnik und Informationstechnik e&I, Vol. 119, No. 1, pp. 103–113, 2002.

[8] *R. Bräunlich, T. H. Teich, H.-J. Weber, K. Heutschi:* Reduktionsmassnahmen für Koronaschallemissionen an Hochspannungsfreileitungen. *Bulletin SEV/VSE*, Vol. 92, No. 18, pp. 13–14; 2001.

[9] *C. Roero, T. H. Teich, H.-J. Weber:* Mechanical and associated discharge behaviour of sessile water drops. Proc. of 15th Int. Conf. on Gas Discharges and Their Appl., Toulouse, F, Vol. 1, pp. 335–338, 2004.

[10] *U. Straumann, M. Semmler:* About the mechanism of tonal emission from high voltage transmission lines. Proc. of 15th Int. Conf. on Gas Discharges and Their Appl., Toulouse, F, Vol. 1, pp. 363–366, 2004.

[11] *G. W. Juette, L. E. Zaffanella:* Radio noise, audible noise, and corona loss of EHV and UHV transmission lines under rain: predetermination based on cage tests. IEEE Trans. PAS, Vol. 89, No. 6, pp. 1168–1175, 1970.

[12] *T. H. Teich, H.-J. Weber:* Tonal emission from high voltage lines. Proc. of 14th Int. Conf. on Gas Discharges and Their Appl., Liverpool, UK, Vol. 1, pp. 259–262, 2002.

Angaben zu den Autoren

Dr. **Micha Semmler** ist seit 2003 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Hochspannungstechnologie der ETH Zürich tätig.
ETHZ, CH-8092 Zürich, msemmler@eeh.ee.ethz.ch

Ueli Straumann ist seit 2001 Doktorand in der Fachgruppe Hochspannungstechnologie der ETH Zürich.
ETHZ, CH-8092 Zürich, straumann@eeh.ee.eth.ch

Claudia Roero ist seit 2002 Doktorandin in der Fachgruppe Hochspannungstechnologie der ETH Zürich.
ETHZ, CH-8092 Zürich, croero@eeh.ee.eth.ch

Dr. **Timm H. Teich** war bis zu seiner Pensionierung wissenschaftlicher Adjunkt in der Fachgruppe Hochspannungstechnologie. Seither begleitet er einzelne Projekte in beratender Funktion.
ETHZ, CH-8092 Zürich, teich@eeh.ee.ethz.ch

[1] A-gewichtete Schalldruckpegel (dB(A), kurz: A-Pegel): Mass zur Geräuschbeschreibung. Verhältnis aus momentanem Schalldruck und einer Bezugsgrösse, die ungefähr dem Schalldruck an der Ruhehörschwelle bei der Frequenz 1 kHz entspricht. Durch die Gewichtung wird die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs berücksichtigt.

[2] PSEL: Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft. Projekt Nr. 194: Koronareduzierende Massnahmen an Freileitungen. Von: FKH, Dr. R. Bräunlich, BWK.

[3] Conor: *Co*rona *No*ise *R*eduction, http://www.eeh.ee.ethz.ch/hvl/forschung/conor.html. Projektleitung: Prof. Dr. Klaus Fröhlich, Dr. Timm H. Teich, ETH Zürich, Fachgruppe Hochspannungstechnologie, 8092 Zürich. Projektpartner: EnBW, D-Stuttgart (Heinz Röhsler), Verbund APG, A-Wien (Herbert Lugschitz), Vorarlberger Illwerke, A-Bregenz (Werner Netzer), BUWAL, Bern (Dr. Marc-Hermann Schaffner), PSEL, Olten (Heinrich Zimmermann), ATEL, Olten (Ernst Fischer), NOK, Baden (Rudolf Scherer), EWZ, Zürich (Jürg Herren), EGL, Laufenburg (Claude Hauser), BKW, Bern (Fritz Schöni). Unterstützung durch: FKH, Zürich (Dr. Reinhold Bräunlich), EMPA, Dübendorf (Dr. Kurt Heutschi).

[4] Trichelpuls-Entladungen: Kurze, impulsartige Entladung bei negativer Korona. Trichelpuls-Entladungen sind lokal auf ein kleines Volumen beschränkt und haben eine sehr gleichmässige, hohe Wiederholungsfrequenz.

[5] Onset Streamer: Starke Büschelentladung bei positiver Korona. Onset Streamer sind vergleichsweise niederfrequent und die Entladungskanäle zeigen im UV eine verästelte Bäumchenstruktur.