

Akustik von Entladungen

Peter Holstein¹, Karsten Fuchs², Steffen Seitz³, Frank Berger², Steffen Moeck¹, Sebastian Uziel⁴

¹ SONOTEC GmbH, 06112 Halle, E-Mail: p.holstein@sonotec.de

² TU Ilmenau, FG Elektrische Geräte und Anlagen

³ TU Dresden, Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik

⁴ IMMS gGmbH, Ilmenau

1. Abstract

Eine Methode, Teilentladungen in elektrischen Anlagen und Komponenten zu lokalisieren und zu bewerten, beruht auf der Detektion der akustischen Emissionen. Die dafür auf dem Markt verfügbare Prüftechnik (z.B. Ultraschallgeräte) arbeitet auf der Basis eines relativ einfachen Prinzips, das neben der reinen Detektionsfunktion die Ultraschallsignale auch hörbar macht. Erfahrene Prüfer können mittels der in den Hörbereich transformierten Signale die Intensität der elektrischen Teilentladungen unterscheiden und klassifizieren. Der direkt hörbare Bereich wird dabei ausgeblendet, um im industriellen Umfeld von Störgeräuschen unabhängig zu sein. Im Beitrag wird der Versuch unternommen, die akustischen Auswirkungen der Teilentladungen an unterschiedlichen grundlegenden Elektrodenanordnungen mittels geeigneten Signalverarbeitungsverfahren zu klassifizieren. Durch diese Anordnungen können alle praxisrelevanten Fälle im Labor nachgebildet werden. Die Experimente beruhen auf der systematischen Variation der elektrischen Feldstärke, Elektrodenanordnungen und der Schlagweite zwischen den beiden Elektroden. Durch die dadurch unterschiedliche resultierende Feldinhomogenität kann die akustische Abstrahlung der entstehenden Teilentladungen gezielt beeinflusst und messtechnisch erfasst werden. Das Ziel der Untersuchungen liegt auf der Erhöhung der Aussagefähigkeit der Ultraschallprüfungen und einer darauf beruhenden Unterstützung von Prüfvorgängen durch untrainierte Prüfer.

2. Motivation

2.1 Instandhaltung und Prüftechnik

Die Zuverlässigkeit elektrischer Systeme ist Grundlage für die Versorgung aller Bereiche der Gesellschaft mit Energie. Ein wichtiger Teil der industriellen Instandhaltung ist deshalb auf die Sicherheit der Versorgung mit elektrischer Energie und des technischen Betriebs ausgerichtet. Zu den Zielen der vorbeugenden Instandhaltung elektrischer Anlagen gehört das Auffinden und das Bewerten sich entwickelnder Isolationsfehler, um geeignete Maßnahmen einleiten zu können. Typische Probleme treten an vielen Betriebsmitteln der Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung auf, z. B. in (Hochspannungs-) Kabeln, Schaltanlagen, E-Motoren, Generatoren und Transformatoren. Isolationsfehler können zu ernsthaften

Folgeschäden und Ausfällen – bis hin zu katastrophalen Situationen – führen.

In der Instandhaltung spielt deshalb die Überwachung der elektrischen Systeme eine besondere Rolle. Isolationsfehler, aber auch ungünstige Betriebszustände und mangelhafte konstruktive Ausführungen als Ursache deuten sich oft über Teilentladungen an. Verschiedene Prüftechnologien zur Detektion und Bewertung wurden entwickelt, die jeweils ihre Einsatzbereiche sowie Vor- und Nachteile haben. Es seien nur einige Methoden und Prüftechnologien erwähnt: Elektrische Methoden (UHF, TEV) [1], optische Methoden (IR-Thermografie), chemische Methoden (DGA) und akustische Methoden (Ultraschall) [2]. Beispielsweise sind nicht alle Entladungen von Wärmeabstrahlung begleitet. In diesem Fall würde der akustische Nachweis als komplementäre Methode wirksam.

Prüfsysteme kommen dabei sowohl permanent installiert als auch mobil zum Einsatz. Die hier vorgestellten Arbeiten dienen dazu, die akustischen Methoden zu hinterfragen und ggf. zu verbessern, die für mobile Prüfungen genutzt werden. Das bedeutet, dass diese Verfahren einsatzrobust und (relativ) preiswert technisch umgesetzt werden müssen. Die auf dem Markt verfügbaren Ultraschall-Prüfgeräte beruhen meist auf einfachen Prinzipien unter Nutzung analoger Elektronik (vgl. auch ISO 29821 [3]). Der elektrische Entladungsphänomene begleitende Schall ist sehr breitbandig und kann deshalb mit schmalbandigen Empfängern, die auf eine geeignete Frequenz eingestellt sind zumindest qualitativ nachgewiesen werden. Der Ultraschallbereich wird vor allem deshalb genutzt, weil dann „Störgeräusche“ oft ausgeblendet werden können. Signalverarbeitung findet dabei allerdings kaum statt.

Die Einführung digitaler Prüftechnologie für die Nutzung von Ultraschall in der Instandhaltung [4] hat zu einer Revision der Nutzung von Ultraschallverfahren geführt. Ein wesentlicher Punkt betrifft die Nutzung breitbandiger Sensoren und damit die Nutzung des gesamten verfügbaren Frequenzbereichs für die Ultraschalldiagnose (Luft- und Körperschall). Die Integration geeigneter Rechenperformance in die mobile Prüftechnik erlaubt auch die Integration verschiedener Algorithmen, die auf spezifische Probleme zugeschnitten sind.

2.2 Teilentladungen

Teilentladungen sind gemäß DIN EN 60270 [5] festgelegt als „örtlich beschränkte elektrische Entladung, welche die

Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrückt und welche angrenzend an einen Leiter auftreten kann, aber nicht muss“. Die für die Instandhaltung relevanten Teilentladungsphänomene lassen sich in bestimmte Typen eingruppiert:

Innere TE:

- Einschlüsse (Mikanit-Isolierung)
- Treeing (Hochspannungskabel)

Äußere TE:

- Korona (Befestigungselemente, Freileitungen)
- Gleitentladung (Isolatoren)

Darauf aufbauend lässt sich auch die Aufgabenstellung der beschriebenen methodischen Entwicklungen für die Ultraschall-Prüftechnik formulieren.

Durch die nachfolgende Fokussierung auf den Luftschall als akustische Übertragungsmethode werden ausschließlich luftisolierte elektrische Betriebsmittel und daran auftretende äußere Teilentladungsphänomene betrachtet. Zudem erfolgt die Erweiterung der Betrachtung auf das Entladungsphänomen „Lichtbogen“ (volle Entladung), da dieses über akustische Methoden (über den Hörschall hinaus) sehr gut detektiert werden kann.

Da die akustische Bewertung von Isolationsfehlern und damit die Entscheidung über Instandhaltungsarbeiten bisher vor allem über subjektive Prüfungen (über den Höreindruck des Prüfers) erfolgt, soll mittels geeigneter Algorithmen eine automatisierte Unterstützung bei der Einordnung in Fehlerklassen bereitgestellt werden. Die Grenzen zwischen den Typen lassen sich aber nicht exakt festlegen. Die Signale hören sich (nach der Konvertierung in den hörbaren Frequenzbereich) rauschartig an, deren Amplitude stochastisch „moduliert“ ist. Hier ist eine Einordnung selbst für trainierte Prüfer z.T. sehr schwierig.

2.3 Akustik - Grundlagen

Die Elementarprozesse von elektrischen Entladungen laufen sehr schnell ab. Die Physik einzelner Entladungen ist gut verstanden. Die dabei erzeugten Schallwellen können sehr laut sein (das Beispiel im Bild lag bei etwa 140 dB(Z)). Die dabei auftretenden Prozesse sind nicht-linear [6] und erzeugen breitbandige Spektren mit einer relativ unspezifischen Oberwellenstruktur. Diese „Breitbandigkeit“ ist auch die Ursache dafür, dass ein willkürlich ausgewählter (Ultraschall)-Frequenzbereich zum qualitativen Nachweis der Entladung geeignet sein kann. Es ist allerdings offensichtlich, dass durchaus nicht-optimale Sensor- und Filterkonstellationen auftreten können. Das Beispiel in Abbildung 1 zeigt, dass die industriübliche Wahl von 40 kHz (begründet durch die Verfügbarkeit preiswerter Resonanzsensoren) in einem Intensitätsminimum liegt. Allerdings sind die Spektren nicht spezifisch. Sowohl die Intensität als auch die spektrale Zusammensetzung hängen stark von den Prüfbedingungen ab. Faktoren wie Entfernung, Ausbreitungsbedingungen, Feuchtigkeit beeinflussen die Amplituden des Signals. Die Dämpfung akustischer Wellen

ist bei Ultraschallfrequenzen bei den üblichen Prüfbedingungen (ca. 1 m bis einige 10 m) wirksam

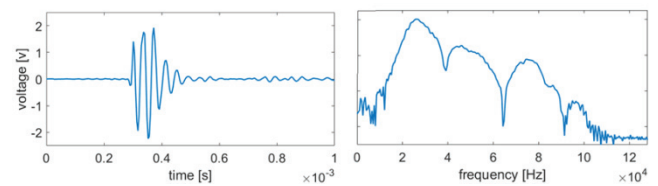


Abbildung 1: Zeitverlauf und Amplitudenspektrum eines einzelnen elektrischen Überschlages (van der Graf-Generator).

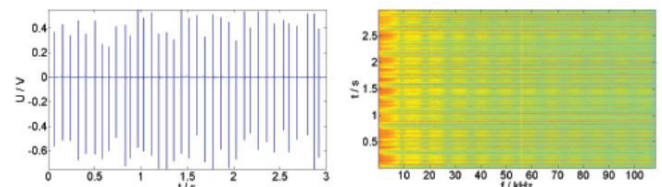


Abbildung 2:

Abbildung 2: Akustisches Signal einer Impulsfolge (Labornutzung eines Tasers)

. Damit ergibt sich eine mehr oder weniger zufällige Amplitude in Abhängigkeit von der Testumgebung. Die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung kann jedoch auch vorteilhaft für den Einsatz der digitalen Prüftechnik genutzt werden, da mit der Variation des Frequenzbandes auch die Entfernung bei der Prüfung berücksichtigt werden kann.

Bei der Betrachtung von Abb. 2 wird offensichtlich, dass in der zeitlichen Struktur (oder komplexer auch im Zeit-Frequenz-Muster) die eigentliche Information über die Art der Entladungsvorgänge liegt. Anders als im akademischen Laborexperiment, das der Methodenentwicklung dient, ist die Variationsbreite und insbesondere die „Unregelmäßigkeit“ der Entladungsvorgänge in das zeitliche Verhalten ein. In der Bewertung des zeitlichen Verhaltens liegt der Schlüssel für die Automatisierbarkeit des Verfahrens. Natürlich spielt auch die Signalintensität eine wichtige Rolle. Diese ist aber messtechnisch leicht zu erfassen und empirisch in die Algorithmen zu integrieren.

3. Experimente

Die experimentellen Arbeiten wurden auf drei Ebenen durchgeführt. Für das physikalische Verständnis und Fragen der elektronischen und Sensorentwicklung wurden zunächst Experimente mit einzelnen Entladungsimpulsen und definierten Impulszyklen durchgeführt. Für die Entwicklung der Algorithmen und zur Sammlung von Trainingsdaten für die Neuronalen Netze wurden Experimente im Hochspannungslabor der TU Ilmenau geplant und realisiert. Für Feldtests wurden bei Praxispartnern verschiedene Messkampagnen organisiert. Methodisch orientierte Experimente wurden mit einem akustischen Mehrkanal-Messgerät (Apollo (SINUS), Abtastrate 200 kHz) durchgeführt. Als Empfänger kamen ¼“ Mikrophone (MK301, Microtech Gefell) zum Einsatz. Parallel wurde das

SONAPHONE III –Equipment, das bei den Feldmessungen zum Einsatz kam, verwendet (siehe Abb. 3 und Abb. 4).

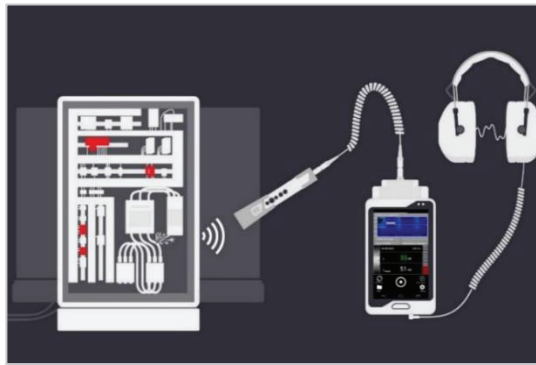


Abbildung 3:

Abbildung 3: Anwendungsprinzip und Ultraschallprüftechnik SONAPHONE III von SONOTEC (Breitbandmikro – 256 kHz)

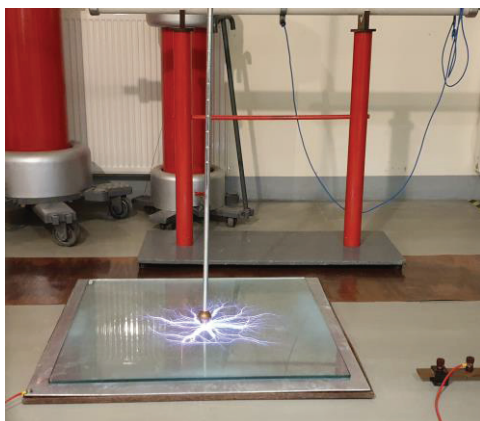


Abbildung 4: Experimentelle Anordnung im Prüflabor

Die Messdaten belegen den stochastischen Charakter der Entladungsprozesse. Erst die Bewertung über geeignet lange Messzeiten (einige Sekunden) erlaubt es, die Fluktuationen als den eigentlichen bewertenden Parameter zu verstehen. Letztlich ist das auch die Bewertung, die ein Prüfer macht. Ein gewisser Zeitabschnitt des (geeignet aufbereiteten und hörbar gemachten) Signals wird mit der „Erfahrungsakustik“ abgeglichen. Dies ist natürlich, wie bereits betont, sehr stark

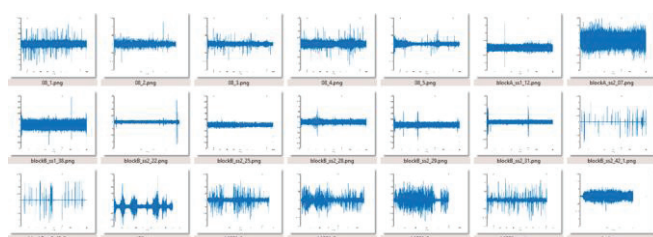


Abbildung 5: Beispiele (Zeitsignale) für die Bandbreite von Entladungsphänomenen (US-HF-Signale)

subjektiv beeinflusst. Selbst derselbe Prüfer bewertet das gleiche Signal u. U. im Verlauf eines Tages völlig anders.

4. Hörbarmachung

Die Hörbarmachung des hochfrequenten akustischen Signals spielt in der Anwendung des Ultraschalls in der Instandhaltung eine besondere Rolle. Zum einen dient dies der direkten audiblen Kontrolle des Such- und Prüfvorgangs und der (oft gewollten und ausreichenden) subjektiven Bewertung. Zum anderen stellt der Audiokanal ebenfalls eine leistungsstarke Möglichkeit zur digitalen Signalverarbeitung dar [7,8].

Es werden zwei Verfahren für die Hörbarmachung genutzt. Beim Heterodynverfahren wird das Signal mit einer Referenzfrequenz „gemischt“. Nur Frequenzen in einem schmalen Bereich um die Mischerfrequenz tragen zum Signal bei, das faktisch keine Information enthält. Die Modulation der Amplitude widerspiegelt gut das zeitliche Verhalten bei extrem breitbandigen und unstrukturierten Signalen wie im Fall der Entladungen. Allerdings können bei ungünstiger Wahl der Mischerfrequenz erhebliche Amplitudenverluste auftreten. Beim Vocoderverfahren wird der ganze Frequenzbereich einbezogen. Das codierte Signal wird im Frequenzbereich komprimiert (z.B. 32fach). Das Amplitudenverhalten bezüglich der skalierten Frequenzen wird beibehalten, so dass auch die zeitliche Fluktuation erhalten bleibt.

Bei den breitbandigen Signalen liefern beide Verfahren verwertbare Information bezüglich der elektrischen Entladung. Durch die Unabhängigkeit von einer Mischerfrequenz kann das Vocoderverfahren gut eingesetzt werden, wenn sich Messbedingungen (z. B. größere Entfernungen) ändern. Ein Vergleich der Vor- und Nachteile beider Verfahren finden sich in [10]. Dort sind die Unterschiede bezüglich des Rekonstruktionsverhaltens beschrieben.

Die komprimierten Signalen sind ebenfalls gut (in den meisten praktischen Fällen auch ausreichend) für die weiterführenden Signalverarbeitungsblöcke geeignet (siehe Abb. 5). Es ist interessant zu erwähnen, dass die Nutzung der transienten/stochastischen Signale interessante psychoakustische Aspekte berührt, die u. U. auch für die Unterstützung der Prüfer in der praktischen Instandhaltung genutzt werden können.

5. Datenverarbeitung

Die Bewertungen werden bisher entweder über den Höreindruck vorgenommen oder (offline) durch einfache visuelle Betrachtung der Amplitudenspektren der Heterodyn-Zeitsignale. Da moderne digitale, mobile Technik mittlerweile über starke Rechenkerne verfügt, können state-of-the-art Berechnungen durchgeführt und Anzeigen integriert werden.

Ziel ist dabei eine Darstellungsart, die für den Betrachter „statisch“ ist (kein Zeitsignal wie bisher üblich). Geeignet sind beispielsweise gemittelte PSD- oder Cepstrum-Analysen. Allerdings müssen die Darstellungen an die Nutzer angepasst aufbereitet werden. Gleichzeitig sind solche „gut aufbereiteten“ Berechnungen die Eingabeparameter für nachfolgende und Ressourcen schonende (ebenfalls in die Hardware integrierte) automatische Berechnungen des maschinellen Lernens.

Datenflüsse und Berechnungen müssen auf die integrierte Hardware abgestimmt werden. Die direkte Anzeige der Prüfdaten muss auch erlauben kompatibel zu den markt- und normüblichen Verfahren zu sein. Dies kann dadurch erreicht werden, dass das Heterodynverfahren digital emuliert wird. Somit ist eine direkte Vergleichbarkeit zu den klassischen analogen Verfahren möglich.

Für die automatische Klassifizierung wird eine Struktur mit CNN (cellular neural networks) [10] eingesetzt. Für die Performance ist es entscheidend, welche Parameter aus der Echtzeit-Daten-Vorverarbeitung an das Neuronale Netz übergeben werden. Das Fluss-Diagramm (Abb. 6) zeigt einige Möglichkeiten der algorithmischen Verschaltbarkeit. Im Hochspannungslabor der TU Ilmenau wurde eine große Zahl an Experimenten (Feldstärkevariation, Elektrodenmodifikationen, Wiederholung ähnlicher Situationen usw.) durchgeführt, um genügend Trainingsdaten für die Klassifikation zur Verfügung zu haben.

Die Integration der wesentlich komplexeren Vorverarbeitung (geeignete Variante der Zeit-Frequenz-Darstellung in Kombination mit Mittelungsverfahren) erlaubt Prüfern bereits eine wesentlich sicherere und leichtere Bewertung, insbesondere dann, wenn Erfahrungswissen eingeht.

Literatur

- [1] Hua Chai, B.T. Phung, Steve Mitchell, Application of UHF Sensors in Power System Equipment for Partial Discharge Detection: A Review, Sensors (Basel) 2019 Mar; 19(5): 1029. Published online 2019 Feb 28. doi: 10.3390/s19051029
- [2] Patrick, J.; Acoustic Emission Properties of Partial Discharges in the time-domain and their applications, 2012, Master Thesis, Stockholm 2012, urn:nbn:se:kth:diva-102834OAI
- [3] ISO 29821:2018; Condition monitoring and diagnostics of machines Ultrasound General guidelines, procedures and validation
- [4] Probst, C., Holstein, P., Application of Ultrasound Technology in Condition Monitoring, Condition Monitor, 372(2018)5-10
- [5] DIN EN 60270 VDE 0434:2016-11; Hochspannungs-Prüftechnik, Teilentladungsmessungen
- [6] Patrick, J.; Acoustic Emission Properties of Partial Discharges in the time-domain and their applications, 2012, Master Thesis, Stockholm 2012, urn:nbn:se:kth:diva-102834OAI
- [7] Holstein, P., Bader, N., Münch, H.-J., zur Horst-Meyer, S., Ultrasound revisited, 25th Int. Congress on Sound and Vibration, 8-12.July 2018, Hiroshima, Japan
- [8] Holstein, P., Seitz, S., Tharandt, A., Probst, C., Tetzlaff, R. Adaptive Data Compression of Ultrasound Data for Long-term Data Acquisition and Trend Evaluation, 12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018), Gothenburg 2018, June 11-15
- [9] Bader.N. Holstein, P. Münch, H.-J. Uziel, S.. Hutschenreuther, T. Seitz, S., 6th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26), 7 - 11 July 2019, Montréal, Canada, ISBN: 9781510892699.
- [10] Seitz, S., Wittig, R., Müller, J., Holstein, P., Tetzlaff, R., Neuronale Netze zur Klassifikation von Ultraschalldaten bei elektrischen Entladevorgängen, DAGA 2017, Kiel : 06.-09. 03 2017 : 43. Jahrestagung für Akustik, ISBN 978-3-939296-12-6

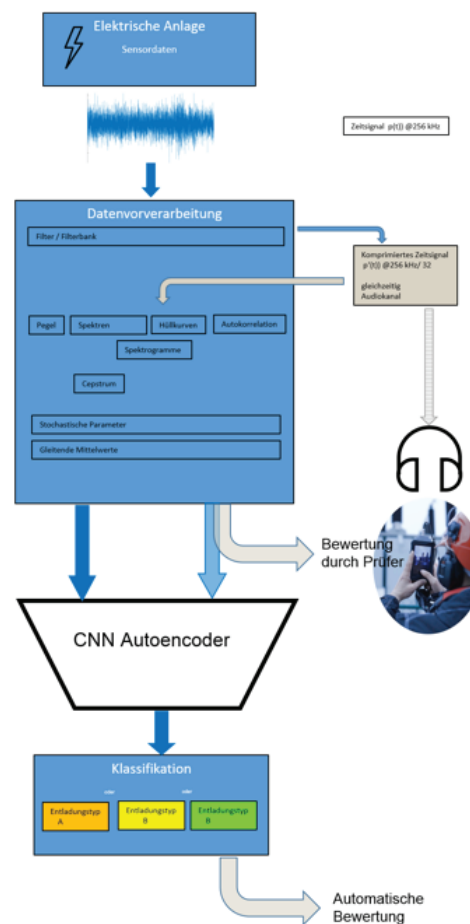


Abbildung 6:

Abbildung 6: Signalverarbeitungs- und Klassifizierungsstrategie für die Bewertung elektrischer Entladung