

# **Mechanische Schwingungen und Geräusche von Leistungstransformatoren**

© 2020, Beltle, Michael

Universität Stuttgart  
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Band 30

D 93 (Dissertation Universität Stuttgart)

Herstellung und Verlag: BoD – Books on Demand, Norderstedt

**ISBN: 978-3-75262-761-9**

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die Anwendbarkeit der Analyse von mechanischen Schwingungen für die dauerhafte Betriebsüberwachung von Leistungstransformatoren. Zunächst werden dazu die physikalischen Abhängigkeiten zwischen dem mechanischen Zustand des Aktivteils und dem Schwingungsverhalten des Transformators betrachtet. Im zweiten Teil der Arbeit folgt eine Analyse der Praxistauglichkeit des Ansatzes durch Korrelation von Mess- und Betriebsdaten mit Hilfe verschiedener mehrjähriger Langzeitmessungen. Der dritte Teil betrachtet die Anwendung des Schwingungsmonitorings für die Überwachung unerwünschter Gleichstromüberlagerungen in Übertragungsnetzen.

Für die Betrachtung der physikalischen Zusammenhänge werden zunächst die Quellen mechanischer Schwingungen, der magnetisierte Kern und die stromdurchflossenen Wicklungen beschrieben und hergeleitet. Speziell für die Bewertung des Zusammenhangs zwischen mechanischen Schwingungen und den Kerneinspannkräften wird ein Laboraufbau vorgestellt, der die Abhängigkeiten aufzeigt.

Um die betrieblichen und messtechnischen Parameter in der praktischen Anwendung bewerten zu können, werden mit einem eigens entwickelten Monitoringsystem Langzeitmessungen an unterschiedlichen Netzkuppel- und Maschinentransformatoren durchgeführt. Die Analyse berücksichtigt die betrieblichen Beeinflussungen der Schwingungsmessung durch die Stufenschalterstellung, die (Öl-)Temperatur und den Laststrom bzw. den Lastfaktor, die jeweils einzeln bewertet werden. Anhand der Zeitreihen wird gezeigt, wie betriebliche Einflüsse kompensiert werden können, so dass eine Trendanalyse der mechanischen Schwingungen ermöglicht wird.

Der dritte Teil behandelt eine Sonderform mechanischer Schwingungen, die durch überlagerte Gleichströme hervorgerufen wird. Anhand der physikalischen Theorie sowie mit Hilfe von Labormessungen an zwei verschalteten 380 kV Leistungstransformatoren wird gezeigt, welche signifikanten Auswirkungen Gleichströme haben. Dies berücksichtigt sowohl das Schwingungsverhalten, die Geräuschemissionen als auch den Leistungsbedarf von Transformatoren abhängig von der Kerngeometrie. Natürliche und künstliche Ursachen von Gleichströmen werden anhand verschiedener Feldmessungen in Übertragungsnetzen identifiziert und bewertet. Es wird gezeigt, wie mit Hilfe des Schwingungsmonitorings eine qualitative als auch quantitative Bewertung überlagerter Gleichströme ermöglicht werden kann.

## Abstract

This work investigates the condition assessment of power transformers by means of mechanical oscillation monitoring. In the first part, the physical dependencies between the mechanical condition of the active part and mechanical oscillations are introduced. The second part of this work presents an analysis of the practical implications using correlations between mechanical oscillations and additional operational data, both obtained by long term measurements. The third part assesses the application of vibration monitoring for the detection and evaluation of undesirable direct current components in power transformers and AC grids.

First, the basic physical dependencies of the sources of mechanical oscillations are introduced: the magnetized core and the current-carrying windings. The focus lies on the influence of changing clamping forces of the active part on mechanical oscillations, which is facilitated by a laboratory setup using a distribution transformer with adjustable core fixations.

In the second part, the operational and measurement driven influencing parameters are evaluated using long term measurements on grid coupling power transformers and generator setup-up units. Therefore, a custom-built vibration monitoring test system is introduced for field measurements. The analysis presents the operational dependencies of the on-load tap changer, the (oil) temperature, and the load current or the load factor on the mechanical oscillations. The compensation of these influencing parameters is demonstrated in a use-case. Thus, a long-term trend-analysis of mechanical oscillation can be provided.

The third part of this work addresses the special case of mechanical oscillations of power transformers driven by superimposed direct currents (DC). Using both, physical theory and extensive laboratory tests performed on two connected 380 kV power transformers, the significant impacts of DC on mechanical oscillations, transformer noises and the transformer power consumption are determined. The influence of the core geometry is included into the consideration. Natural and man-made DC sources are identified and localized using combined online, onsite current and vibration measurements at different substations of the transmission grid. Correlations between onsite and laboratory measurements demonstrate how vibration monitoring can be used as both, a qualitative and quantitative method to identify and assess superimposed DC.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Verfahren zur Diagnose und Monitoring von Transformatoren .....	1
1.1.1	Relevanz von mechanischen Schwingungsmessungen .....	6
1.2	Ziele der Arbeit .....	7
1.3	Gliederung der Arbeit .....	8
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>11</b>
2.1	Transformatoren .....	11
2.1.1	Schwingungen des geblechten Kerns .....	15
2.1.2	Beeinflussung durch Gleichstromkomponenten .....	20
2.1.3	Schwingungen der Wicklungspakete und elektrodynamische Kräfte ...	22
2.2	Messverfahren .....	23
2.2.1	Beschleunigungsmessung .....	23
2.2.2	Alternative Messverfahren .....	25
2.2.3	Messung der Transformatorengeräusche .....	27
<b>3</b>	<b>Mechanische Schwingungen des Kerns</b> .....	<b>29</b>
3.1	Labora Aufbau .....	29
3.2	Schwingungsverhalten bei verschiedenen Einspannkräften .....	30
3.3	Zusammenfassung und Bewertung .....	32
<b>4</b>	<b>Monitoring von mechanischen Schwingungen</b> .....	<b>33</b>
4.1	Messsystem zur kontinuierlichen Schwingungsmessung .....	33
4.2	Langzeitmessungen an Leistungstransformatoren .....	34
4.2.1	3-Schenkel 125 MVA Maschinentransformator .....	34
4.2.2	5-Schenkel 525 MVA Maschinentransformator .....	39
4.2.3	5-Schenkel 180 MVA Netzkuppeltransformator .....	41
4.3	Einfluss der Sensorposition .....	43
4.4	Einfluss der Stufenschalterstellung .....	47
4.5	Einfluss der Betriebstemperatur .....	50

4.5.1	Kompensation des Temperatureinflusses .....	53
4.6	Einfluss der Transformatorlast .....	54
4.7	Fallanalyse 125 MVA Maschinentransformator .....	57
4.8	Zusammenfassung der unterschiedlichen Einflussfaktoren.....	65
<b>5</b>	<b>Schwingungen von Transformatoren unter Gleichstrombeeinflussung ..</b>	<b>69</b>
5.1	Ursachen von Gleichströmen in Transformatoren .....	69
5.1.1	Galvanische Einkopplung in geerdete Sternpunkte .....	70
5.1.2	Geomagnetisch induzierte Ströme .....	70
5.1.3	Kopplung zwischen AC- und HGÜ-Freileitungen .....	73
5.1.4	Vergleich der verschiedenen Gleichstromeinkopplungen.....	77
5.2	Auswirkungen von Gleichstromkomponenten auf Transformatoren .....	79
5.2.1	Unterschiede zwischen 3-Schenkel- und 5-Schenkeldesign .....	80
5.2.2	Back-to-back Versuchsaufbau .....	82
5.2.3	Leistungsbetrachtung in Anlehnung an IEEE 1459-2010 .....	85
5.2.4	Beeinflussung von 5-Schenkeltransformatoren durch Gleichströme ....	90
5.2.5	Beeinflussung von 3-Schenkeltransformatoren durch Gleichströme ....	99
5.2.6	Gegenüberstellung von 3- und 5-Schenkeltransformatoren .....	103
5.3	Feldmessungen an Transformatoren mit überlagerten Gleichströmen.....	104
5.3.1	Messung der Sternpunktströme .....	104
5.3.2	Verteilte Messungen im Übertragungsnetz .....	106
5.3.3	Vergleich von Freifeld- und Prüffeldmessungen .....	110
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>119</b>
7.1	Kopplungsmechanismus auf hybriden Freileitungen .....	119
7.2	Leistungsbezüge von 5-Schenkeltransformatoren bei DC-Überlagerung.	125
<b>8</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>127</b>

## Literatur

- [1] Cigré, Technical Brochure 642, WG A2.37 Transformer Reliability Survey, Paris, 2015.
- [2] F. Vahidi und S. Tenbohlen, „Statistical Failure Analysis of European Substation Transformers,“ in *ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel*, 2014.
- [3] E. Dörnenburg und O. Gerber, „Die Analyse gelöster und abgeschiedener Gase als Hilfsmittel für die Betriebsüberwachung von Öltransformatoren,“ *Brown Boveri Mitteilungen*, Bd. 54, Nr. 2/3, pp. 104-111, 1967.
- [4] E. Dörnenburg und W. Strittmatter, „Überwachung von Öltransformatoren durch Gasanalyse,“ *Brown Boveri Mitteilungen*, Bd. 74, Nr. 5, pp. 238-247, 1974.
- [5] Cigre 296, „Recent Developments in DGA Interpretation,“ *Cigre Brochure 296*, 2006.
- [6] ASTM D3612, „Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography,“ *ASTM International Standard D 3612-02(2009)*, 2009.
- [7] M. Cunningham, R. Cox und C. McIlroy, „Photo-acoustics for DGA - Developments and a Utilities Perspective,“ in *EPRI Substation Equipment Diagnostics Conference*, New Orleans, 2005.
- [8] C. Hummel, Charakterisierung einer Membran-Gassensor-Kombination zum Nachweis von gelösten Gasen, Gießen: Dissertation, Justus-Liebig Universität, 2001.
- [9] Cigré, Technical Brochure 771, JWG D1/A2.47 Advances in DGA interpretation, Paris, 2019.
- [10] IEEE C57.104, „IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers,“ *IEEE Std C57.104-2008*, 2009.

- [11] R. Rogers, „IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, using Gas in Oil Analysis,“ *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Bd. 13, Nr. 5, pp. 349-354, October 1978.
- [12] R. Müller, „Gasanalyse - Vorsorgeuntersuchung für Transformatoren,“ *Elektrizitätswirtschaft*, Bd. 79, Nr. 10, pp. 356-360, 1980.
- [13] A. Müller, Dissertation: Fehlergasverluste frei-atmender Leistungstransformatoren, Stuttgart: Sierke, 2016.
- [14] A. Müller und S. Tenbohlen, „Analysis of Fault Gas Losses through the Conservator Tank of free-breathing Power Transformers,“ in *ISH 2013*, Südkorea, Seoul, 2013.
- [15] IEC-60270, „IEC 60270 High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements,“ Geneva, Switzerland, 2000.
- [16] M. Siegel und S. Tenbohlen, „Comparison between Electrical and UHF PD Measurement concerning Calibration and Sensitivity for Power Transformers,“ in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Jeju, Südkorea, 2014.
- [17] Cigré, Technical Brochure 662, D1.37 Guidelines for partial discharge detection using conventional and unconventional methods, Paris, 2016.
- [18] S. Coenen, Measurement of Partial Discharges in Power Transformers using Electromagnetic Signals, Stuttgart: Sierke, 2012.
- [19] M. Siegel, M. Beltle und S. Tenbohlen, „Characterization of UHF PD sensors for power transformers using an oil-filled GTEM cell,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 23, Issue 3, pp. 1580-1588, 2016.
- [20] M. Beltle, S. Siegel, S. Tenbohlen und S. Coenen, „Combined In-Oil Sensor for Vibration Measurement and Partial Discharge Detection using Acoustic and Electromagnetic Emissions,“ in *Cigré A2/C4 Colloquium*, Zürich, Schweiz, 2013.
- [21] S. Makalous, S. Tenbohlen und K. Feser, „Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 15, Issue 6, 2008.

- [22] S. M. A. Coenen, M. Beltle und S. Kornhuber, „UHF and acoustic Partial Discharge Localisation in Power Transformers,“ in *International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Paper No. D-015, Hannover, Germany, 2011.
- [23] Cigré, Technical Brochure 342, WG A2.26 Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA), WG-A2.26, Hrsg., 2008.
- [24] M. Heindl, M. Beltle, S. Tenbohlen und S. Coenen, „Untersuchung der Vergleichbarkeit von Übertragungsfunktionsmessungen (FRA) an,“ in *VDE-ETG-Fachtagung: Diagnostik elektrischer Betriebsmittel*, Fulda, 2012.
- [25] R. Wimmer, S. Tenbohlen, K. Feser, A. Kraetge, M. Krüger und J. Christian , „The Influence of Connection and Grounding Technique on the Repeatability of FRA-Results,“ in *15th International Symposium on High Voltage Engineering*, Ljubljana, Slovenia, 2007.
- [26] M. Heindl, S. Tenbohlen, J. Velásquez, A. Kraetge und R. Wimmer, „Transformer Modelling Based On Frequency Response Measurements For Winding Failure Detection,“ in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Tokio, Japan, 2010.
- [27] C. Bartoletti, M. Desiderio und D. Di Carlo, „Vibro-Acoustic Techniques to Diagnose Power Transformers,“ in *IEEE Transactions on Power Delivery Volume 19, Issue1*, 2004.
- [28] A. Secic, M. Krpan und I. Kuzle, „Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers: A Survey,“ *IEEE Access*, Bd. 7, pp. 83915 - 83931, 2019.
- [29] S. Chen, B. Daoudi, S. Louise, G. Luna und F. Devaux, „Resonance Effect on Noise due to Magnetostriction on Magnetic Circuit,“ in *Proceedings of the 18th International Symposium on High Voltage Engineering* , Seoul, Korea, 2012.
- [30] E. Kornatowski und S. Banaszak, „Diagnostics of a Transformer's Active Part With Complementary FRA and VM Measurements,“ in *IEEE Transactions on Power Delivery Volume 29, Issue 3*, 2014.
- [31] B. García, J. Burgo und A. Alonso, „Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations Part I: Theoretical Foundation,“

*IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 1, pp. 157-163, January 2006.

- [32] B. García, J. Burgo und A. Alonso, „Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations Part II: Experimental Verification,“ in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21 Issue 1, IEEE, 2006, pp. 164 - 169.
- [33] Z. Berler, A. Golubev und V. Rusov, „Vibro-acoustic method of transformer clamping pressure monitoring,“ in *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2000.
- [34] B. Munir, J. Smit und I. Rinaldi, „Diagnosing winding and core condition of power transformer by vibration signal analysis,“ in *IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Bali, Indonesien, 2012.
- [35] E. Rivas, J. C. Burgos und J. C. Garcia-Prada, „Condition Assessment of Power OLTC by Vibration Analysis Using Wavelet Transform,“ in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009.
- [36] H. Majchrzak, A. Cichon und S. Borucki, „Application of the Acoustic Emission Method for Diagnosis of On-Load Tap Changer,“ *Archives of Acoustics*, Bd. 42, Nr. 1, pp. 29-35, 2017.
- [37] P. Kang und D. Birtswistle, „Condition assessment of power transformer on-load tap changers using wavelet analysis and self-organizing map: field evaluation,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Bd. 18, Nr. 1, pp. 78-84, 2003.
- [38] K. Viereck, A. Saveliev und H. Hochmuth, „Acoustic Tap-Changer Monitoring Using Wavelet Analyses,“ in *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Pilsen, 2015.
- [39] P. Kang und D. Birtwhistle, „Condition monitoring of power transformer on-load tap-changers. I. Automatic condition diagnostics,“ *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Bd. 148, Nr. 4, pp. 301 - 306, 2001.
- [40] M. Foata, R. Beauchemin und C. Rajotte, „On-line testing of on-load tap changers with a portable acoustic system,“ in *IEEE 9th International*

*Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance*, Quebec. Kanada, 2000.

- [41] M. Beltle und S. Tenbohlen, „Power Transformer Diagnosis based on Mechanical Oscillations Including DC Influences,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 23, Issue 3, pp. 1515-1522, 2016.
- [42] H. Ma, J. He, B. Zhang, R. Zeng, S. Chen und L. Cao, „Experimental study on DC biasing impact on transformer’s vibration and sound,“ in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Detroit, USA, 2008.
- [43] J. He, Z. Yu, R. Zeng und B. Zhang, „Vibration and audible noise characteristics of AC transformer caused by HVDC system under monopole operation,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Bd. 27, Nr. 4, pp. 1835 - 1842, 2012.
- [44] E. Reiplinger, „Geräuscherhöhungen bei Großtransformatoren bei gleichstromüberlagerten Netzen,“ *EW*, Nr. 6, p. 278, 1992.
- [45] B. Rusek, J. Wulff und K.-H. e. a. Weck, „Ohmic coupling between AC and DC circuits on hybrid overhead lines,“ in *Cigré 2013*, Auckland, NZ, 2013.
- [46] M. Berroth, *Theorie der Schaltungen*, Stuttgart: Institut für elektrische und optische Nachrichtentechnik, 2003.
- [47] DIN–60404-2, DIN EN 60404-2:2009-01 Magnetische Werkstoffe - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroband und -blech mit Hilfe eines Epsteinrahmens, 2009.
- [48] F. Fiorillo, *Measurement and Characterization of Magnetic Materials*, 1. Hrsg., A. Press, Hrsg., San Diego, CA, 2004.
- [49] R. Küchler, *Die Transformatoren*, 2. Auflage, Heidelberg: Springer Verlag, 1966.
- [50] G. Bertotti, „General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials,“ in *IEEE Transactions on Magnetics Volume 24, Issue 1*, 1988.
- [51] H. Fischer, *Werkstoffe in der Elektrotechnik*, München: Carl Hanser Verlag, 1982.

- [52] H. Stöcker, Taschenbuch der Physik, Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2000.
- [53] IEC 60076, IEC 60076-10 Power Transformers- Part10: Determination of sound levels, 2001.
- [54] G. Fasching, Werkstoffe der Elektrotechnik, 4 Hrsg., Wien: Springer-Verlag, 2005.
- [55] P. Horowitz und W. Hill, The Art of Electronics, 3. Hrsg., Cambridge: Cambridge University Press, 2015.
- [56] W. Baxmann, Zur Theorie des Transformatorlärms magnetischen Ursprungs, D. Reprografie, Hrsg., Hannover: Universität Hannover, 1961.
- [57] M. Beltle, M. Siegel, S. Tenbohlen und S. Coenen, „Untersuchung verschiedener Verfahren zur TE-Detektion und zur Vibrationsmessung,“ in *VDE-ETG Diagnostik elektrischer Betriebsmittel*, Fulda, 2012.
- [58] P. Kung, R. Idsinge und J. Bin Fu, „Online detection of windings distortion in power transformers by direct vibration measurement using a thin fiber optics sensor,“ in *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2016.
- [59] DIN-61672, DIN EN 61672-1:2014-07: Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen, Deutsche Industrie Norm, 2014.
- [60] C. Ploetner, „Cigré WG A2.54 - Power transformer audible sound requirements, Interim Report,“ *Electra*, pp. 50-53, Februar 2019.
- [61] T. Hilgert, L. Vandeveldel und J. Melkebeek, „Comparison of Magnetostriction Models for Use in Calculations of Vibrations in Magnetic Cores,“ *IEEE Transactions on Magnetics, Volume 44, Issue 6*, pp. 874-877, 2008.
- [62] H. Pfützner, G. Shilyashki und F. Hofbauer, „Magnetostrictive deformation of a transformer: A comparison between calculation and measurement,“ *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Bd. 44, Nr. 3, pp. 295-299, 2012.
- [63] Q. Li, X. Wang, L. Zhang, J. Lou und L. Zou, „Modelling methodology for transformer core vibrations based on the magnetostrictive properties,“ *IET Electric Power Applications*, Bd. 6, Nr. 9, pp. 604-610, 2012.

- [64] S. Shen, B. Daoudi, S. Louise, G. Luna und F. Devaux, „Resonance Effect on Noise Due to Magnetostriction on Magnetic Circuit,“ in *18th International Symposium on High Voltage Engineering*, Seoul, South Korea, 2013.
- [65] M. Pirnat und P. Tarman, „How to design and control transformer noise,“ in *Stuttgarter Hochspannungssymposium*, Stuttgart, 2018.
- [66] Y. Wang, J. Pan und M. Jin, „Finite Element Modelling of the Vibration of a Power Transformer,“ in *Acoustics 2011*, Gold Coast, Australia, 2011.
- [67] M. Beltle und T. S., „Schwingungsmessung an Leistungstransformatoren,“ in *6. ETG-Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel*, Berlin, 2014.
- [68] M. Beltle und S. Tenbohlen, „Diagnostic Interpretation of Mechanic Oscillations of Power Transformers,“ in *19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Pilsen, Tschenien, 2015.
- [69] A. Suzuki und N. Fukushima, „Space current around the earth obtained with Ampère's law applied to the MAGSAT orbit and data,“ *Earth, Planets and Space*, pp. 43-56, 1998.
- [70] D. Boteler und R. Pirjola, „Modelling geomagnetically induced currents produced by realistic and uniform electric Fields,“ *IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 13 Issue 4*, pp. 1303-1308, 1998.
- [71] Howard, R., *A Historical Perspective on Coronal Mass Ejections. Solar Eruptions and Energetic Particles*, American Geophysical Union., 2013.
- [72] R. C. Carrington, „Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859,“ *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 20*, pp. 13-15, 1859.
- [73] L. Bolduc, „GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system,“ *J. Atmosph. Solar-Terrestrial Phys., Vol. 64*, pp. 1793-1802, 2002.
- [74] NASA, „SOHO-Gallery,“ 2016. [Online]. Available: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/promquad.html>. [Zugriff am 29 06 2015].
- [75] J. Kappernman und V. Albertson, „Bracing for the geomagnetic storms,“ *IEEE Spectrum*, pp. 27-33, 1990.

- [76] J. Kappernman, V. Alertson und N. Mohan, „Current transformer and relay performance in the presence of geomagnetically- induced current,“ in *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, 1981.
- [77] Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events, „Severe Space Weather Events - Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report,“ *National Academies Press*, p. 13.
- [78] V. D. Albertson, B. Bozoki, W. E. Feero, J. G. Kappermann, E. V. Larsen, D. E. Nordell, J. Ponder, F. S. Prabhakara, K. Thompson und R. Walling, „Geomagnetic Disturbance Effects on Power Systems -A Report prepared by the IEEE Transmission and Distribution Committee Working Group on Geomagnetic Disturbances and Power System Effects,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Bd. 8, Nr. 3, pp. 1206-1217, 1993.
- [79] R. Pirjola, C.-M. Liu und L.-G. Liu, „Geomagnetically Induced Currents in Electric Power Transmission Networks at Different Latitudes,“ in *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Beijing, China, 2010.
- [80] T. Halbedl, H. Renner und G. Achleitner, „Einfluss des Geomagnetismus auf das österreichische Hochspannungsnetz,“ in *VDE-ETG Schutz- und Leittechnik*, Berlin, 2016.
- [81] VDE-DKE, Normentwurf Freileitungen über 45 kV - Hybride AC/DC-Übertragung und DC-Übertragung, Frankfurt am Main: VDE, 2016.
- [82] P. Marauvada und S. Drogi, „Field and Ion Interactions of Hybrid AC/DC Transmission Lines,“ *IEEE Transactions on Power Delivery Volume 5 Issue 3*, pp. 1165 - 1172, 2002.
- [83] M. Beltle, M. Gnädig, M. Siegel, S. Tenbohlen, U. Sundermann und F. Schatzl, „Beeinflussung von Leistungstransformatoren in Hybridnetzen,“ in *Internationaler ETG-Kongress*, Berlin, 2013-1.
- [84] U. Straumann und C. Franck, „Ion-Flow Field Calculations of AC/DC Hybrid Transmission Lines,“ *IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 28, Issue 1*, pp. 294-302, 2013.

- [85] DEnA, „dena-Netzstudie II Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025,“ dena, Berlin, 2010.
- [86] V. Albertson, J. Thorson, R. Clayton und S. Tripathy, „Solar-Induced-Currents in Power Systems: Cause and Effects,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Nr. 2, pp. 471-477, 1973.
- [87] M. Beltle, S. Tenbohlen und U. Sundermann, „Auswirkungen von Gleichströmen auf Leistungstransformatoren,“ in *VDE-ETG Diagnostiktagung*, Berlin, 2014.
- [88] W. Jiayin, B. Baodong und L. Hongliang, „Research on vibration and noise of transformer under DC bias based on magnetostriction,“ in *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2013.
- [89] M. Beltle, M. Schuehle und S. Tenbohlen, „Influences of direct currents on power transformers caused by AC-HVDC interactions in hybrid grids,“ in *ISH 2015*, Pilsen, 2015.
- [90] L. Bolduc, P. Kieffer, M. Dutil, M. Granger und Q. Bui-Van, „Currents and harmonics generated in power transformers,“ *Engineering and Operating Division, Canadian Electrical Assoc, Vol. 29*, 1990.
- [91] IEEE-1459, 1459-2010 - IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010.
- [92] M. Beltle, M. Schühle, S. Tenbohlen und U. Sundermann, „Das Verhalten von Leistungstransformatoren bei Beanspruchung mit Gleichströmen,“ in *Stuttgarter Hochspannungssymposium*, Stuttgart, 2016.
- [93] M. Beltle, M. Schühle, S. Tenbohlen und U. Sundermann, „Betrachtung galvanisch eingekoppelter Gleichströme im Übertragungsnetz und deren Auswirkungen auf Leistungstransformatoren,“ in *VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik*, Berlin, 2016.
- [94] Intermagnet, „International Real-time Magnetic Observatory Network,“ 2019. [Online]. Available: [www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org).

- [95] Deutsches Geoforschungszentrum / Helmholtz-Zentrum Potsdam, „GFZ,“ 2019. [Online]. Available: [www.gfz-potsdam.de/sektion/geomagnetismus/infrastruktur/geomagnetische-observatorien/wingst/](http://www.gfz-potsdam.de/sektion/geomagnetismus/infrastruktur/geomagnetische-observatorien/wingst/).
- [96] K. Hong und G. Lin, „State classification of transformers using nonlinear dynamic analysis and hidden Markov models,“ *Measurement*, Nr. 147, 2019.
- [97] M. Schühle, M. Beltle, S. Tenbohlen und D. Bonmann, „Entwicklung eines Simulationsmodells für Leistungstransformatoren zu Betrachtung magnetischer Flüsse bei Sättigung,“ in *VDE-ETG Hochspannungstechnik*, Berlin, 2016.
- [98] M. Schühle, M. Beltle und S. Tenbohlen, „Beeinflussung von induktiven Stromwandlern in Hoch- und Höchstspannungsnetzen durch parasitäre Gleichströme,“ in *VDE-Hochspannungstechnik*, Berlin, 2018.
- [99] A. Krueger und E. Reed, „Biological Impact of Small Air Ions,“ *Science, Volume 193, Issue 4259*, pp. 1209-1213, September 1976.
- [100] T. Suda und T. Sunaga, „Small Ion Mobility Characteristics under the Shiobara HVDCD Test Line,“ *IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 5 Issue 1*, pp. 247-253, 1990-1.
- [101] T. Suda und S. Y., „An Experimental Study of Large Ion Density under the Shiobara HVDC Test Line,“ *IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 5 Issue 3*, pp. 1426-1435, 1990-2.
- [102] A. Küchler, *Hochspannungstechnik*, Heidelberg: Springer, 2009.
- [103] CIGRÉ C4 WG 36.01, Interferences Produced by Corona Effect of Electric Systems. Description of Phenomena, Practical Guide for Calculation, Paris: Cigré, 1974.
- [104] P. Sattari, FEM-FCT Based Dynamic Simulation of Trichel Pulse Corona Discharge in Point-Plane Configuration, Western University, 2011.
- [105] J. Clade, C. Gary und L. C., „Calculation of Corona Losses Beyond the Critical Gradient in Alternating Voltage,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 695-703, 1969.