

Das Verhalten von Leistungstransformatoren bei Beanspruchung mit Gleichströmen

Ulrich Sundermann

Amprion GmbH
ulrich.sundermann@amprion.net
Germany

Michael Beltle

Universität Stuttgart
michael.beltle@ieh.uni-stuttgart.de
Germany

Michael Schühle

Universität Stuttgart
michael.schuehle@ieh.uni-stuttgart.de
Germany

Stefan Tenbohlen

Universität Stuttgart
stefan.tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de
Germany

KURZFASSUNG

Der Leistungstransformator im Übertragungsnetz ist im Betrieb verschiedenen Belastungen ausgesetzt, die dessen Verhalten beeinflussen. In besonderer Weise sind Wechselwirkungen mit Gleichanteilen in den Phasenströmen zu beachten, da diese in normalen Betriebsfällen nicht berücksichtigt werden. Aktuelle Feldmessungen im deutschen Übertragungsnetz zeigen, dass es durch geerdete Sternpunkte zu einer Einkopplung von Gleichströmen in Netzkoppeltransformatoren kommen kann. Daraus ergeben sich Fragestellungen, welche Auswirkungen Gleichströme auf den Transformator haben und ob Netzrückwirkungen auftreten können. Ebenso ist von Interesse, mit welchen Messverfahren ein überlagerter Gleichstrom direkt oder die daraus resultierenden Wechselwirkungen erfasst werden können.

Im Rahmen dieser Untersuchung werden stichprobenartig die Wechsel- und Gleichanteile der Sternpunktströme an einem 350 MVA-Netzkoppeltransformator im 380 kV-Netz gemessen. Parallel werden mittels Beschleunigungssensoren die mechanischen Schwingungen an einer Kesselwand aufgezeichnet und mit den Gleichstrombeaufschlagungen korreliert. Anhand des veränderten Schwingungsverhaltens werden die gleichstrombedingten Wechselwirkungen betrachtet.

Ein großtechnischer Versuchsaufbau mit zwei 350 MVA / 380 kV-Netzkoppeltransformatoren (380/110 kV) wird betrachtet um die im Feld gemessenen Effekte anhand verschiedener Szenarien nachzubilden. Die Auswirkungen auf den Betriebszustand der Transformatoren werden bei verschiedenen Stromstärken betrachtet.

1 EINLEITUNG

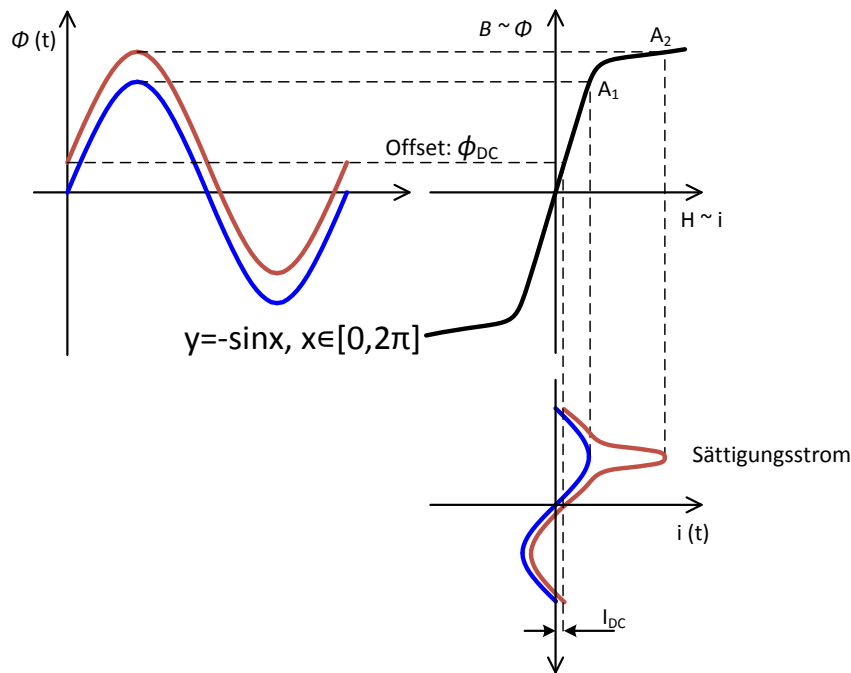
Die Beeinflussung von Transformatoren durch Gleichströme ist seit geraumer Zeit Gegenstand verschiedener Untersuchungen. In den 1940er Jahren gab es erste Untersuchungen, die sich mit den Auswirkungen auf die Betriebsmittel selbst und als mittelbare Folge auf die Energienetze beschäftigten [1], [2]. Die Ursachen für die Gleichströme sind hierbei meist geomagnetisch induzierter Ströme [3], die jedoch im deutschen oder zentraleuropäischen Übertragungsnetz bisher nicht in größerem Umfang in Erscheinung getreten sind. Gleichwohl können in der betrieblichen Praxis Gleichströme auftreten, die auf den Betriebszustand von Leistungstransformatoren einwirken.

Im konkreten Beispielfall ist ein 350 MVA-Netzkuppeltransformator (380/110 kV) neueren Baujahres im Betrieb durch eine ungewöhnliche Geräuscentwicklung auffällig geworden. Die im Rahmen der Abnahmeprüfung durchgeführte Leerlaufmessung der Geräusche war um mehrere dB niedriger als die akustischen Emissionen, die onsite ermittelt wurden. Die Differenz konnte auch nicht aufgrund der lastabhängigen Geräusche plausibilisiert werden, da die Auslastung des Transformators gering war. Aufgrund dieser Sachlage wurde zunächst der Sternpunktstrom des Transformators gemessen und ein überlagerter Gleichstrom in der Größenordnung von einem Ampere festgestellt, welcher mit dem Geräuschverhalten korreliert [4]. Als sofortige Gegenmaßnahme wurde die Erdungsstrategie der Sternpunkte in der Netzregion so geändert, dass der betroffene Transformator fortan ohne geerdeten Sternpunkt betrieben werden konnte. Um eine genauere Betrachtung der Gleichströme und der resultierenden Effekte zu ermöglichen, werden im Folgenden zunächst die Messverfahren und die Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen vorgestellt.

1.1 Grundlagen magnetische Effekte im Kern

Tritt in einer Wicklung eine Gleichstromkomponente I_{DC} auf, so führt dies aufgrund des Ampere'schen Gesetzes zu einer Durchflutung mit einem Gleichanteil Θ_{DC} . Die magnetische Feldstärke H ist mit der Windungszahl k und der Höhe der Wicklung linear abhängig von der Durchflutung Θ . Deshalb wird durch den Gleichanteil der Arbeitspunkt der magnetischen Kennlinie (B - H -Kennlinie) verschoben und es prägt sich ein magnetischer Gleichfluss ϕ_{DC} aus. Liegt zusätzlich an der Wicklung eine Wechselspannung an, so wird dem Gleichfluss durch das Induktionsgesetz eine Wechselkomponente ϕ_{AC} überlagert, siehe Bild 1 links. Ist die Wicklung um ein ferromagnetisches Kernmaterial gewickelt, tritt ab einer gewissen Feldstärke Sättigung auf, da nahezu alle Weiß'schen Bezirke im Material ausgerichtet sind. In der magnetischen Kennlinie (Bild 1 rechts), ist dieser Effekt durch den Knickpunkt der Magnetisierung gekennzeichnet. Der Gradient entspricht der magnetischen Permeabilität $\mu = \mu_0 \mu_r$. Ab dem Knickpunkt trägt das Material nicht mehr zur Feldführung bei. Es gilt $\mu = \mu_0$ und es tritt Sättigung auf. Solange der magnetische Gesamtfluss über dem Knickpunkt liegt, verhält sich die Wicklung wie eine Luftpule mit entsprechend geringer Induktivität, was zu einem sprunghaften Anstieg des Stromes (Sättigungsstrom) führt, siehe Bild 1, unten). Da dieser Effekt in nur einer Halbwelle einer elektrischen Periode auftritt, wird die durch Gleichstrom bedingte Sättigung auch häufig als Halbwellensättigung (engl. half-wave-saturation) bezeichnet.

Beim Bau moderner Leistungstransformatoren wird heute meist kaltgewalztes, kornorientiertes Elektroblech verwendet, das in seiner Vorzugsrichtung eine hohe Permeabilität (gute magnetische Leitfähigkeit) aufweist. Quer zur Vorzugsrichtung ist die Permeabilität und damit die magnetische Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen kleiner. Aufgrund der modernen Bleche und geeigneter Kernschichtungen konnten die mechanischen Schwingungen und die Geräuschemissionen in den letzten Jahrzehnten verringert werden. Da der magnetische Kern ein wesentlicher Kostenfaktor eines Transformators darstellt, wird die Kerngeometrie so gewählt, dass eine möglichst hohe Materialausnutzung möglich ist. Das bedeutet, dass der Abstand zwischen der magnetischen Nennerregung und dem Knickpunkt im Laufe der Jahre kleiner geworden ist. Daher reichen schon relativ geringe Gleichströme, um Sättigungseffekte in Leistungstransformatoren hervorzurufen. Wie die durchgeführten Messungen zeigen genügen schon wenige hundert Milliampere, um deutliche Sättigungseffekte zu erhalten und das Verhalten des Transformators maßgeblich zu beeinflussen.



*Bild 1: Verhalten des magnetischen Kerns:
links: magnetischer Fluss ϕ mit (rot) und ohne (blau) durch Gleichstrom I_{DC} verursachten Offset.
rechts: vereinfachte Magnetisierungskennlinie des Kernmaterials
unten: resultierender Magnetisierungsstrom mit und ohne Sättigungseffekt in der ersten Halbwelle*

2 FELDMESSUNGEN

2.1 Messung der Sternpunktströme

Zur Messung der Sternpunktströme wird ein eigens dafür entwickeltes automatisches Messsystem verwendet. Das Messsystem kann sowohl den Zeitverlauf des Stromes für eine detaillierte Analyse als auch die berechneten Effektivwerte für eine Langzeitmessung (Monitoring) automatisiert erfassen und speichern. Das System wird mittels eines Handraders zwischen den Sternpunkt und der Erde geschaltet. Durch die Installation des Messsystems bei geschlossenem Erdungsschalter ist es möglich das System im laufenden Betrieb anzubringen, siehe Bild 2. Nach der Installation wird der Erdungsschalter geöffnet und alle Ströme (Gleich- und Wechselanteile) kommutieren auf den Messpfad. Um die Kurzschlussfestigkeit sicher zu stellen sind alle verwendeten Querschnitte so dimensioniert, dass ein auftretender Kurzschlussstrom zuverlässig abgeleitet werden kann. Das Messsystem arbeitet mit closed-loop Halleffekt Stromsensoren und umfasst einen Wertebereich von ± 40 A (Gleichstrom plus AC-peak), die mit einer Samplerate bis zu 1MSample/s abgetastet werden. Das System kann Daten kontinuierlich aufzeichnen oder in definierten Intervallen Messungen durchführen. Für kurze Messperioden werden die Rohdaten der Zeitbereichsmessung auf SD-Karten gespeichert. Für eine effektivere Speicherausnutzung können für Langzeitmessung auch nur bestimmte Frequenzanteile (z.B. Gleichstrom, die 50 Hz-Komponente und Harmonische) als CSV-Dateien geschrieben werden. Der Zugriff auf das System ist wahlweise über eine konventionelle Netzwerkbuchse oder eine WLAN-Schnittstelle möglich, siehe Bild 2. Die Funkübertragung hat sich bei kurzfristigen Messungen im Freien als praktisch erwiesen, da die Systemparametrisierung ohne zusätzliche Verkabelung mit mobilen Geräten (Handy, Tablet oder Laptop) erfolgen kann. Zudem kann der Aufbau galvanisch getrennt betrieben werden, so dass das Messgerät auch in potentiellen Gefahrenbereichen benutzt werden kann und konfigurierbar bleibt. Das gesamte Messsystem mit allen relevanten Komponenten wurde in ein IP65-Spezifiziertes Gehäuse gebaut. Dadurch kann das Messsystem auch bei widrigen Wetterbedingungen in Freifeldern eingesetzt werden.

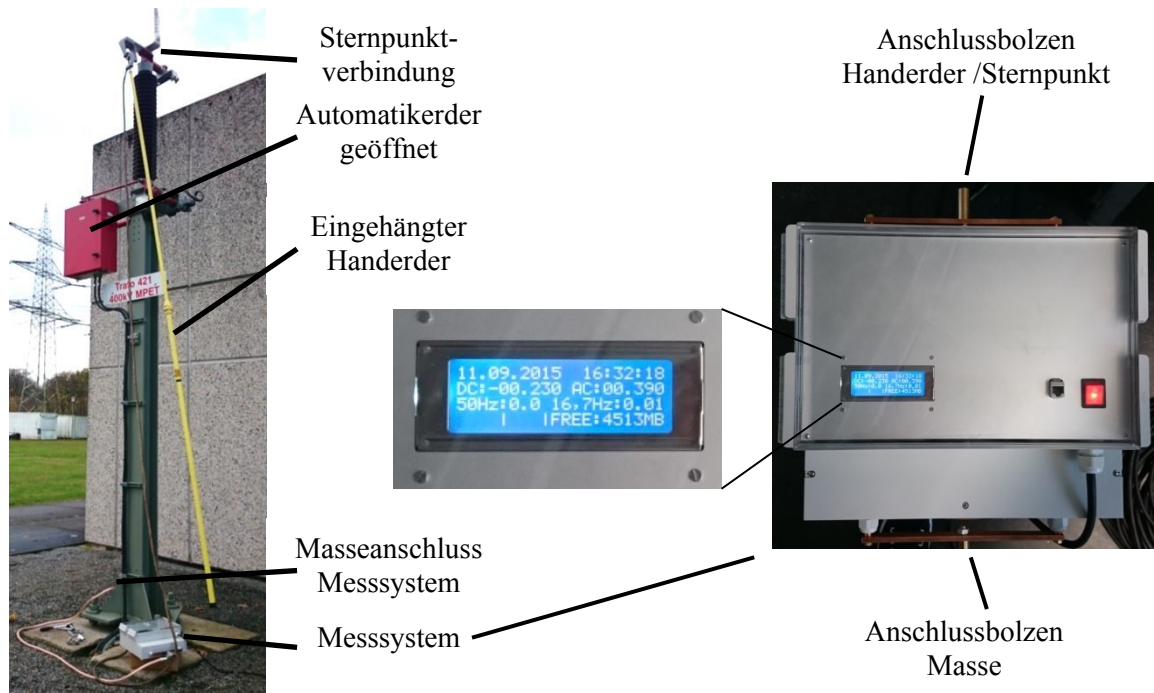


Bild 2: links: Messinstallation an einem Sternpunktterder eines Netzkupplertransformators
rechts: Detailansicht Messgerät in IP 65 Gehäuse mit Infodisplay; Zugriff via
Netzwerkkabel oder im Feld über WLAN

2.2 Messung der mechanischen Schwingungen

Um die mechanischen Schwingungen messen zu können, werden Beschleunigungssensoren eingesetzt, die direkt auf den Kessel geklebt werden. Das Verfahren eignet sich sowohl für Messungen an Transformatoren im Feld, als auch für die in Kapitel 3 beschriebenen Großversuche (Prüffeld). Bild 3 zeigt schematisch den Aufbau der verwendeten Sensoren und die nachgeschaltete Signalverarbeitung.

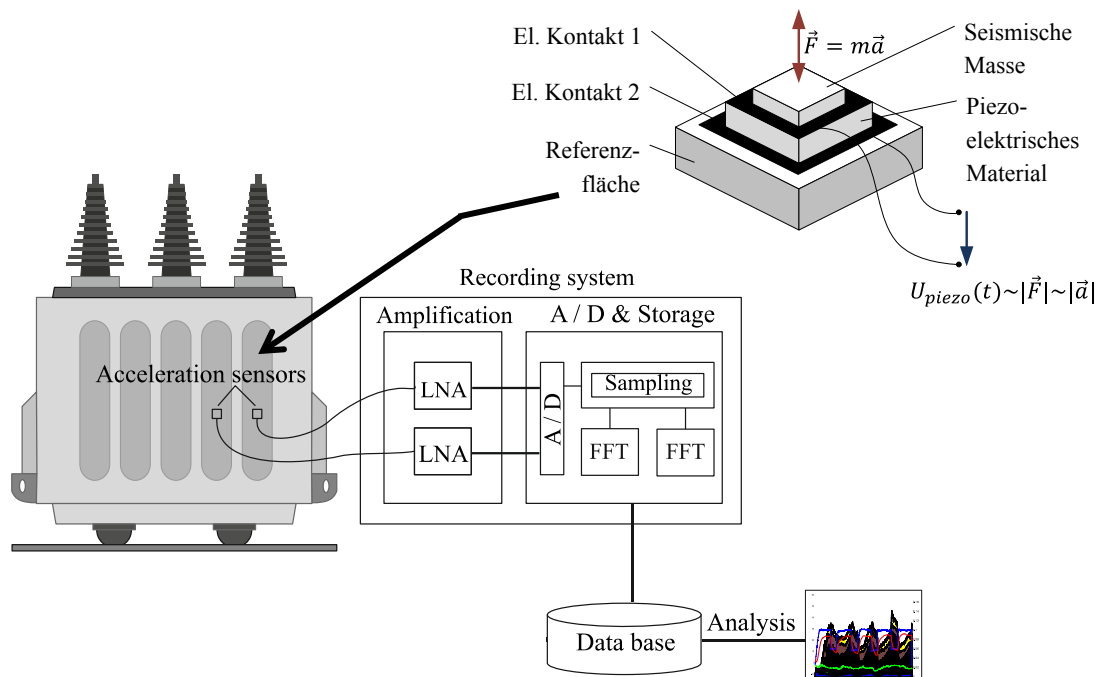


Bild 3: oben: Aufbau eines ein-dimensionalen Beschleunigungssensors
unten: Schematische Darstellung des Messverfahrens für mechanische Schwingungen am Kessel

Die ein-dimensionalen Beschleunigungssensoren werden mit ihrer Referenzfläche auf die Kesselwand geklebt. Innerhalb des Sensors befinden sich parallel zur Referenzfläche ein piezoelektrisches Material und eine seismische Masse. Wird die Referenzfläche durch die Kesselwand in mechanische Schwingungen versetzt, wird ein Druck auf das Piezomaterial ausgewirkt, da die seismische Masse aufgrund ihrer Trägheit nicht unmittelbar mitschwingt. Dadurch entsteht zwischen den beiden elektrischen Kontaktflächen des Piezomaterials eine Ladungstrennung, die als Spannung gemessen werden kann.

Diese üblicher Weise geringe Spannung muss mit rauscharmen Verstärkern (LNA – Low Noise Amplifier) verstärkt werden. Um auch bei Messleitungen größerer Länge mit $l_{\text{mess}} > 20 \text{ m}$ ausreichende Signalleistungen am Leitungsende bereitstellen zu können, werden die LNA möglichst nahe am Sensor installiert. Die digitalisierten Signale werden mittels der Fast Fourier Transformation (FFT) anschließend vom Zeit- in den Frequenzbereich überführt und gespeichert. Beispielhaft sind in Bild 6 zwei gemessene Frequenzgänge einmal mit und ohne überlagertem Gleichstrom abgebildet, die in Kapitel 4.1 genauer erläutert werden.

3 GROSSTECHNISCHE VERSUCHE

Um die Effekte von Gleichströmen unter kontrollierten Laborbedingungen nachzustellen, wird ein großtechnischer Versuchsaufbau verwendet. Eine einfache Möglichkeit einen Gleichstrom in einen Transformator bei Nennspannung zu injizieren ist die sogenannte „Back-to-back“ Anordnung. Dabei werden zwei Transformatoren über ihre Oberspannungsseite gemäß Bild 4 verbunden. Die beiden Sternpunkte werden anschließend über einer Stromquelle miteinander verbunden und an einer Stelle geerdet. Dadurch ist keine Isolation der Gleichstromquelle notwendig. Transformator 1 wird über einen Generator auf seiner Unterspannungsseite aufmagnetisiert. Transformator 2 ist unterspannungsseitig im Leerlauf und bezieht den Magnetisierungsstrom über die 380 kV Verbindung zu Transformator 1. Um die zwischen Transformator 1 und 2 ausgetauschte Leistung zu messen, werden in jeder 380 kV Phase der Strom sowie die Leiter-Erd-Spannung gemessen. Um auch die Gleichströme mit aufzunehmen, wird je Phase ein Messwiderstand verwendet und die Shuntspannung über einen Lichtwellenleiter potentialfrei übertragen. Die Leiter-Erd-Spannungen werden mithilfe kapazitiver Teiler ermittelt. Die mechanischen Schwingungen werden mit dem in Kapitel 2.2 vorgestellten Equipment gemessen. Zusätzlich werden die Geräusche in einer an die Norm angelehnten Umlaufmessung gemäß [5] gemittelt. Die Umlaufmessung umfasst hierbei den gesamten Laboraufbau, also beide Transformatoren in einer Messung.

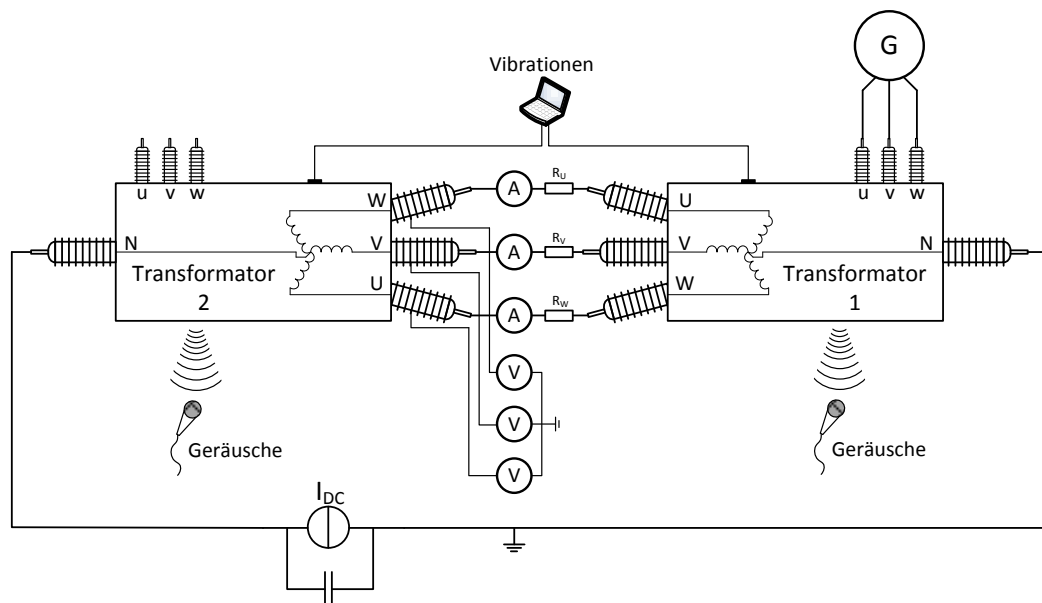


Bild 4: Prinzipschaltbild des Versuchsaufbaus mit zwei Netzkuppeltransformatoren in „Back-to-back“ Verschaltung. Der Gleichstrom wird über die Sternpunkte der Oberspannungswicklungen mit einem Stromkonstanter (mit kapazitiven AC Bypass) eingepreßt. Gezielte Verteilung des Gleichstroms auf die OS-Phasen mit $R_{U,V,W}$

Tabelle 1 zeigt die in diesem Versuch durchgeführten Gleichstrombelastungen. Es wird davon ausgegangen, dass die ohmschen Widerstände der einzelnen Phasen, die sich aus den Widerständen der Freileitung und der Transformatorwicklung ergeben, sehr ähnlich sind. Daher wird sich der Gleichstrom auf alle Phasen etwa gleich verteilen. Als Nebenbemerkung sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass sich die Verteilung des Gleichstroms auf die Phasen abhängig von der Kerngeometrie durchaus auswirken kann. Bei Fünfschenkelkernen führt praktisch jede Gleichstromverteilung zu Wechselwirkungen, daher sind praktisch alle größeren Dreiphasentransformatoren in Europa gegenüber Gleichströmen anfällig. Dreischenkelkerne zeigen bei symmetrischer Gleichstrombelastung fast keine Wechselwirkungen [6], [7].

Tabelle 1: Untersuchte Messszenarien mit unterschiedlicher Gleichstromverteilung auf die einzelnen OS-Phasen

DC-Verteilung	Sternpunktgleichstrom $I_{DC,Stern} / A$
Phase U V W 33% 33% 33%	0 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 1.8 2.1 2.4 2.7 3.0 4.5 6.0 9.0 15.0

4 BETRACHTUNG DER AUSWIRKUNGEN AUF DAS BETRIEBSMITTEL

4.1 Labormessungen

Bild 5 zeigt die gemessenen Phasenströme aus dem Testaufbau mit einem eingepprägten Gleichstrom $I_{DC,Stern} = 3 A$. Der gemessene Gleichstromwert pro Phase ist als gestrichelte Linie eingezeichnet und mit ca. $I_{DC,Phase} = 1 A$ nahezu identisch auf allen drei Phasen. Bereits jetzt sind die Stromspitzen, welche durch die Sättigung einzelner Kernelemente hervorgerufen werden, deutlich zu sehen. Der Magnetisierungsstrom ($I_{mag,pp} \approx 0.5 A$) ist kaum noch zu erkennen. Trotz der symmetrischen Gleichstromverteilung zeigt der Strom der mittleren Phase V ein anderes Verhalten als die Phasen U und W. Aufgrund der magnetischen Kopplung der elektrischen Phasen über den Kern treten in jeder Phase zwei Peaks auf – die äußeren Phasen zeigen jeweils Sättigungseffekte mit der mittleren Phase.

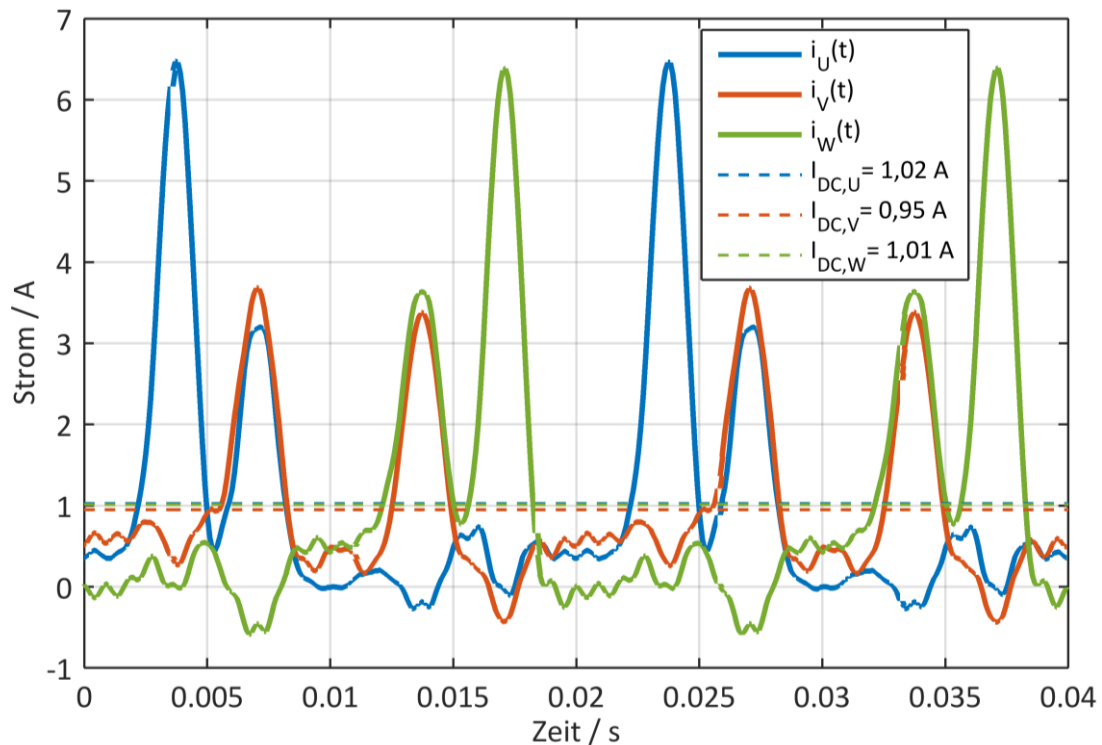


Bild 5: Verlauf der Phasenströme bei symmetrischer Belastung mit Gleichstrom $I_{DC,Stern} = 3 A$

Bild 6 a) zeigt zwei Frequenzspektren der mechanischen Schwingungen ohne und mit Gleichstromüberlagerung. Bild 6 b) zeigt von derselben Messung die entsprechenden Geräuschemissionen. Bei der Referenzmessung ohne Gleichstrom sind die typischen Signalspitzen aufgrund der Magnetostriktion beim doppelten der elektrischen Frequenz und bei deren harmonischen Anteilen erkennbar (100 Hz, 200 Hz, etc.) [8]. Die Messung mit einem überlagertem Gleichstrom $I_{DC,Stern} = 15\text{ A}$ zeigt einen insgesamt merklich höheren Pegel bei allen Frequenzanteilen. Insbesondere steigen die ungeraden harmonischen Anteile an (50 Hz, 150 Hz, 250 Hz, etc.), was durch die in Kapitel 1.1. beschriebene Halbwellensättigung verursacht wird [9]. Das veränderte Frequenzverhalten lässt sich sowohl bei den mechanischen Schwingungen als auch bei den emittierten Geräuschen wiederfinden. Aufgrund der A-Bewertung ist die Zunahme der 50 Hz-Komponente der Geräusche im Vergleich zu den mechanischen Schwingungen nicht ausgeprägt.

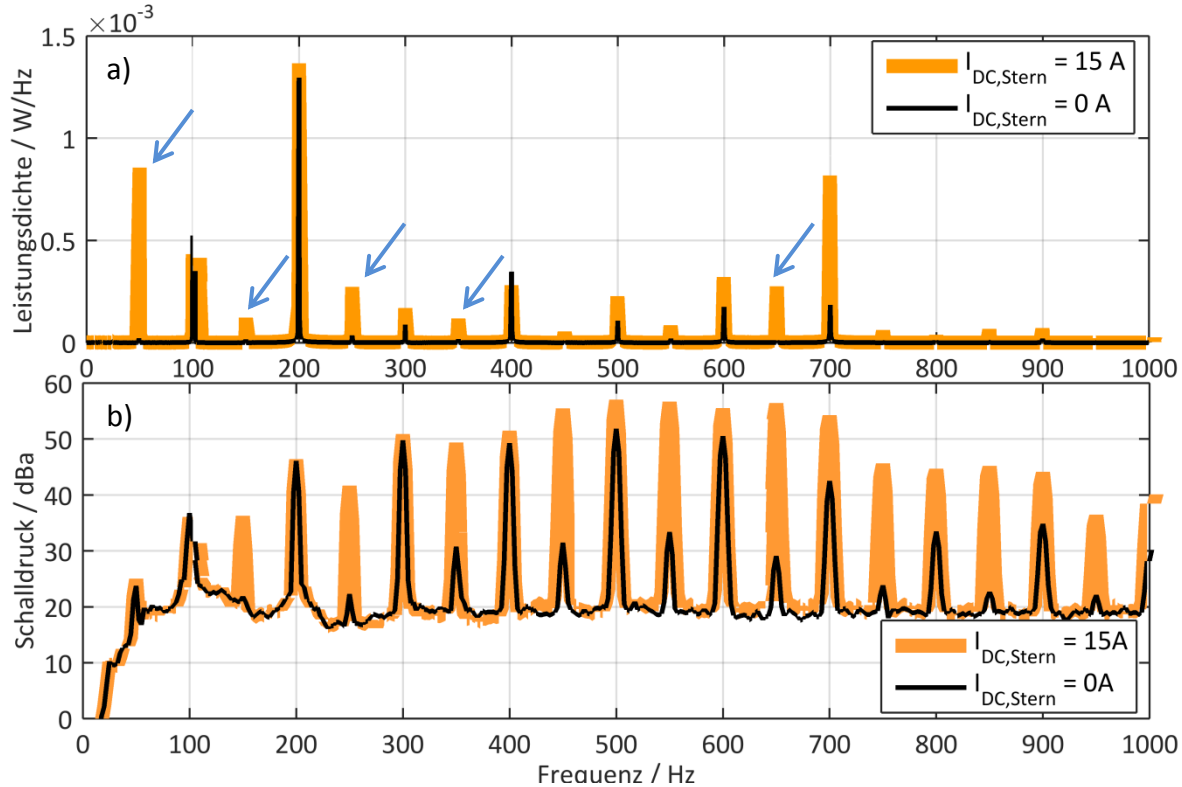


Bild 6: Vergleich der mechanischen Schwingungen (Kesselmessung) und der resultierenden A-bewerteten Geräuschemissionen im Leerlauf ohne Gleichstrom und mit symmetrischer Gleichstrombelastung

Wie der Vergleich zeigt, führt die Zunahme bestimmter mechanischer Frequenzen auch zu einem Anstieg der Geräusche. Bild 7 a) zeigt den Anstieg der gemittelten, A-bewerteten Geräuschemissionen (linke Y-Achse) und den Anstieg der mechanischen Schwingungen (rechte Y-Achse) abhängig vom eingepprägten Gleichstrom, der in diesem Diagramm als Vielfaches des Magnetisierungsstromes $I_{mag,eff}$ der 380 kV-Wicklung angegeben ist. Beide Kurven weisen einen ähnlichen Verlauf mit vergleichbaren Steigungen auf. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Schwingungsverhalten und Geräuschentwicklung. Bild 7 b) zeigt die Zunahme der geraden und ungeraden harmonischen Frequenzanteile der mechanischen Schwingungen. Beide Komponenten nehmen mit den Geräuschen gleichförmig bis zum Knickpunkt zu. Darüber hinaus steigen die geraden Harmonischen überproportional an, die ungeraden mit geringerer Steigung. Da die ungeraden Harmonischen im reinen AC Fall mit geringeren Leistungsanteilen vorkommen, werden in Folgenden deren akkumulierten Leistungsanteile als Indiz für eine Einwirkung von Gleichströmen herangezogen, siehe Kapitel 4.2.

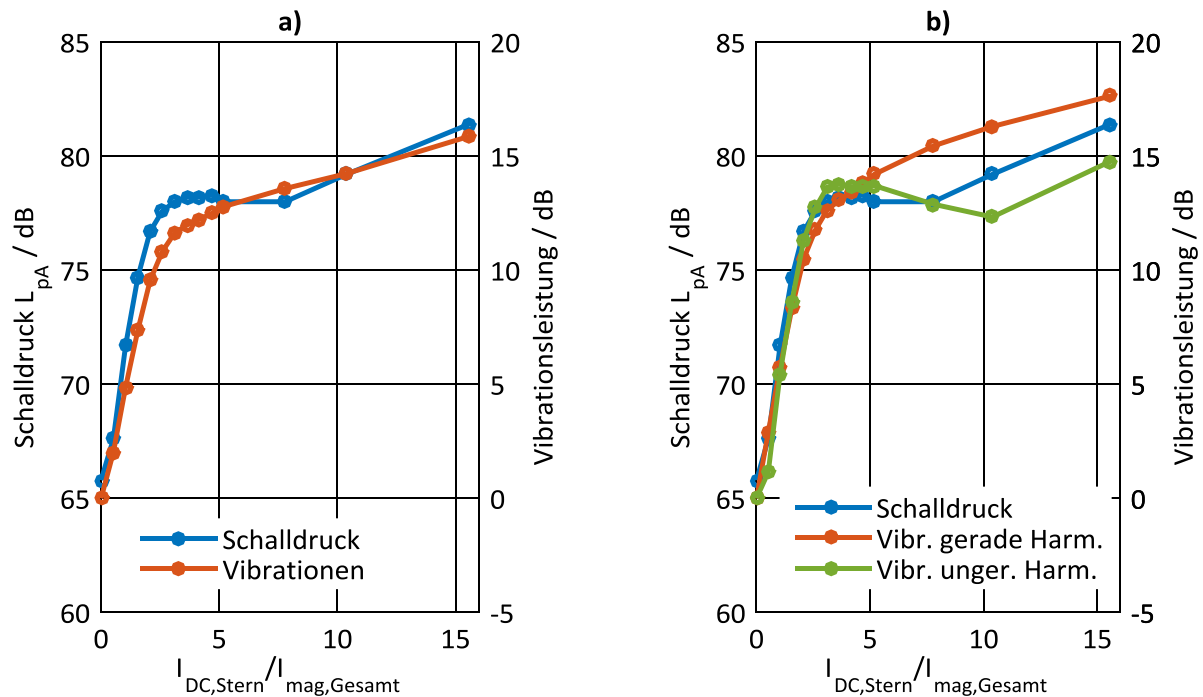


Bild 7: Zunahme von Geräuschen und mechanischen Schwingungen bei ansteigendem Gleichstrom

- a) $I_{DC, Stern}$ Schalldruckpegel (blau, linke Y-Achse) und auf $I_{DC} = 0$ A normierte Schwingungsleistung (rot, rechte Y-Achse) gemessen am Kessel
b) detaillierte Betrachtung gerader und ungerader Schwingungskomponenten

4.2 Feldmessungen

Die Strom- und Schwingungsmessungen von dem in Kapitel 1 vorgestellten Transformator sind in Bild 8 dargestellt. Das untere Diagramm zeigt die Gleichstromkomponente im Sternpunkt über einen Zeitraum von ca. 3 Stunden. Ein positiver Gleichstrom bedeutet, dass der Strom von der Erdmasse über den Sternpunkt in den Transformator fließt. Es werden die zwei sprunghaften Anstiege um 12:22 Uhr und um 13:30 Uhr betrachtet. Um 12:22 Uhr wird in einer benachbarten Umspannstation (Entfernung ca. 10 km) der Sternpunkt eines 380 kV-Netzkupplers für Versuchszwecke enterdet. Daraufhin kommutiert ein Gleichstromanteil zum betrachteten Netzkuppler, was zu einem Anstieg des Gleichstromes um ca. $\Delta I_{DC} = 250$ mA führt. Zum zweiten Zeitpunkt (13:30 Uhr) wird in einem zweiten Versuch der Sternpunkt eines 380 kV-Maschinentransformators in einem benachbarten Kraftwerk (Entfernung ca. 1,2 km) enterdet. Dadurch kommutiert wieder ein Gleichstromanteil zum betrachteten Transformator. Wie das obere Diagramm in Bild 8 zeigt, steigen die Pegel der gesamten mechanischen Schwingung simultan mit dem Gleichstrom an, aus deren Folge auch die Geräusche zunehmen. Nach ca. 20 Minuten wird der Sternpunkt des 380 kV-Maschinentransformators um 13:50 Uhr wieder geerdet. Der Gleichstrom kommutiert wieder zurück, so dass nach Abschluss des Ausgleichvorgangs der gleiche Zustand erreicht ist wie vor dem Versuch. Mit den bisher durchgeführten Messungen konnte noch nicht die Ursache der Gleichstrombeeinflussung identifiziert bzw. lokalisiert werden. Das Verhalten der ungeraden Harmonischen kann über den gesamten Betrachtungszeitraum mit dem Gleichstromverlauf korreliert werden. Zu Beginn des betrachteten Intervalls ist der Gleichstrom nahezu Null; ebenso sind die ungeraden Harmonischen sehr gering und tragen nur etwa 3% zur Gesamtsignalleistung bei. Mit dem stetigen Anstieg des Gleichstroms nehmen die geraden und ungeraden harmonischen Komponenten ebenso stetig zu. Im Maximum des Gleichstroms beträgt der Anteil der ungeraden Harmonischen ca. 25% der gesamten Signalleistung der mechanischen Schwingungen. Das im Laborversuch festgestellte Verhalten aus Kapitel 4.1 kann durch die Feldmessung bestätigt werden: Im Vergleich zu den immer vorkommenden geraden Harmonischen treten die ungeraden Harmonischen selektiv bei ungewollten Betriebszuständen mit Gleichstromüberlagerungen auf und können daher als Indikator herangezogen werden.

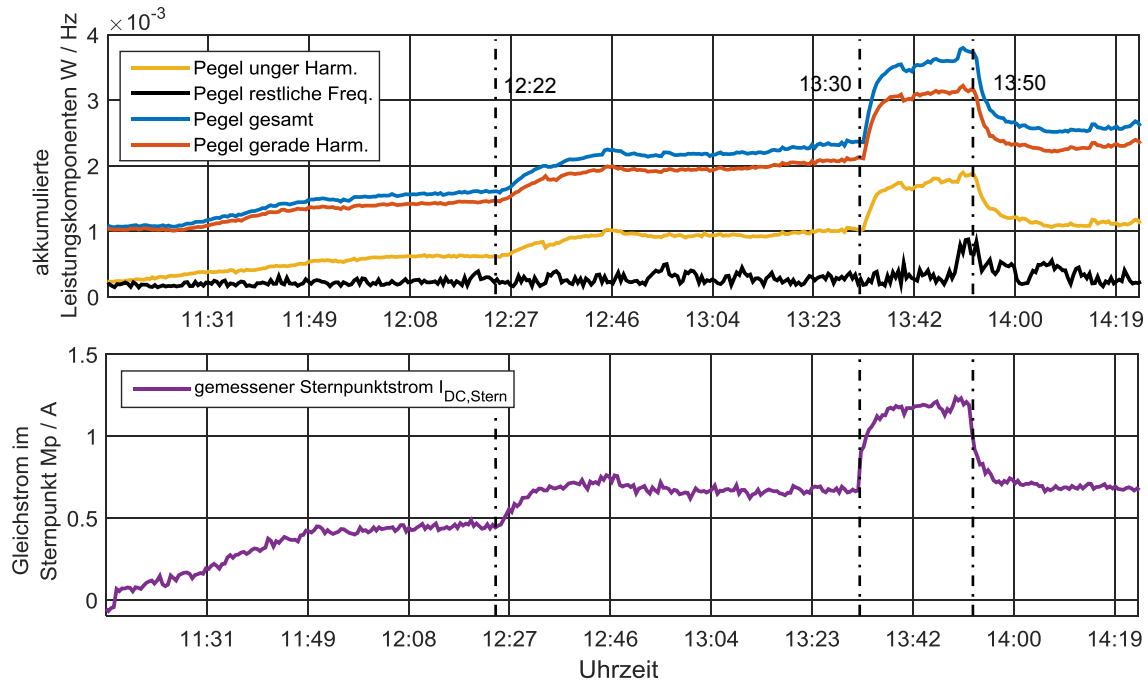


Bild 8: oben: Leistungskomponenten der mechanischen Schwingungen (Kesselmessungen)
unten: gemessener Gleichstrom $I_{DC,Stern}$ im Sternpunkt des Transformators

5 BETRACHTUNG MÖGLICHER NETZRÜCKWIRKUNGEN

Aus den Leerlaufmessungen des Laboraufbaus wird in diesem Kapitel noch ein kurzer Ausblick auf die möglichen Netzurückwirkungen der durch Gleichstrombeanspruchung bedingten Sättigungseffekte gegeben. Hierzu werden aus den gemessenen Zeitsignalen der Phasenströme und –spannungen der 380 kV-Ebene die Wirk- und Blindanteile abgeleitet. Grundlage hierfür bildet die IEC 1459-2010 für die Leistungsberechnung nicht sinusförmiger Ströme und Spannungen [10]. Da in der Norm Gleichanteile nicht speziell berücksichtigt werden, werden die Gleichanteile der Phasenströme vor der Leistungsberechnung herausgerechnet, so dass die Zeitbereichsmessungen der Phasenströme ohne Gleichstrom-Offset vorliegen.

Wie Bild 5 zeigt, treten in den Phasenströmen aufgrund der Sättigung viele Oberschwingungsanteile auf. Daher ist eine einfache Betrachtung von Blind- und Wirkleistungskomponente bei Nennfrequenz $f_N = 50$ Hz nicht möglich. IEC 1459-2010 definiert daher neben der Wirkleistung aller Frequenzanteile P noch die non-active Power N , die neben der Blindleistung bei Nennfrequenz auch alle harmonischen Komponenten abdeckt. Die Wirkleistung P und die non-active Power N addieren sich nach Gleichung (5-1) quadratisch zur Scheinleistung S . Bild 9 zeigt die Entwicklung von P und N bei steigendem Gleichstrom. Erkennbar ist eine starke lineare Zunahme der non-active Power N mit ca. 300 kVar / A_{DC}. Verschiedene Einschätzungen von Netzbetreibern betrachten diesen Anstieg des Leistungsbedarfs als kritisch [11]. Auch ist in Bild 9 eine näherungsweise lineare Zunahme der Wirkleistung, also der Verluste im Transformator selbst, um etwa 45% bei $I_{DC,Stern} = 9$ A erkennbar. Da diese im Vergleich zu den Kupferverlusten unter Last jedoch eher gering ausfallen, werden diese eher als unkritisch betrachtet. Relevant könnte jedoch die veränderte Flussführung während der Sättigung sein, da die magnetischen Feldlinien den Kern verlassen und durch benachbarte Strukturmaterialien fließen können und dort beispielsweise Wirbelströme induzieren.

$$S^2 = P^2 + N^2 \quad (5-1)$$

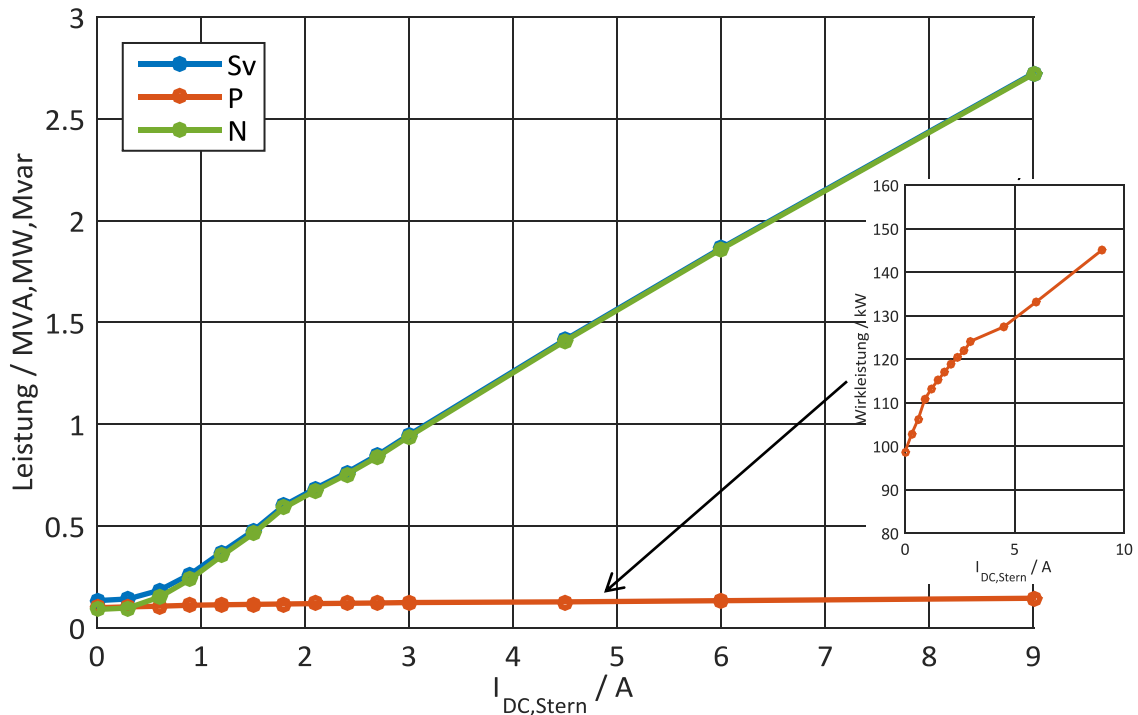


Bild 9: Zunahme der Leistungskomponenten Gesamtscheinleistung S_v , non-active Power N und Wirkleistung (Leerlaufverluste) P bei symmetrischer Belastung mit ansteigendem Gleichstrom $I_{DC,gesamt}$.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Wie Feldmessungen an Netzkuppeltransformatoren zeigen, treten im 380 kV-Netz Gleichströme auf, deren Quellen noch nicht identifiziert sind. Die Ströme koppeln galvanisch über die geerdeten Sternpunkte der Transformatoren ein und führen zu verschiedenen Wechselwirkungen, die durch magnetische Sättigungseffekte im Transformatorkern hervorgerufen werden. Zum einen nehmen die mechanischen Schwingungen und die abgestrahlten Geräuschemissionen bei Gleichstrombelastung signifikant zu.

Zum anderen zeigen Versuche an einem praktischen Großversuch, dass auch Netzrückwirkungen durch Oberschwingungen in den Phasenströmen auftreten können, was zu einem gesteigerten Bedarf an Wirkleistung und Blindleistungskomponenten führt. In welchem Ausmaß die Wechselwirkungen auftreten hängt von der Größe des überlagerten Gleichstroms, von den Kernmaterialien, der Kerngeometrie und der Verteilung der Gleichstromkomponenten auf die einzelnen Phasen ab. Bei modernen Transformatoren werden Kerne aus kaltgewalzten, kornorientierten Elektroblechen verwendet um Kernverluste und Leerlaufgeräusche unter AC-Bedingungen zu minimieren. Die Großversuche zeigen, dass bereits kleine Gleichstromkomponenten in der Größenordnung weniger hundert Milliampere zu einem Anstieg der mechanischen Schwingungen, der Geräusche und des Leistungsbezug des Transformators führen. Diese Effekte treten bei 5-Schenkelkerntransformatoren sehr viel früher und deutlicher auf als bei 3-Schenkelkerntransformatoren. In der Praxis können in Einzelfällen der Gleichstrom und dessen Folgen unterbunden werden, wenn der Sternpunkt im Rahmen der Erdungsstrategie offen betrieben werden kann. Die Erprobung eines kapazitiven DC-Blocks im Sternpunkt wird ebenso in Betracht gezogen.

Für die Messung der Gleichströme und deren Auswirkungen werden zwei Messsysteme vorgestellt: Die direkte Messung der Sternpunktströme und die Messung der mechanischen Schwingungen auf der Kesselwand. Wie der Großversuch zeigt, lassen sich mechanische Schwingungen mit dem zu erwartenden Geräuschemissionen bei DC-Belastung korrelieren, was die mittel- und langfristige Überwachung der Geräuscentwicklung mit einfacher Messtechnik bei geringen Zusatzkosten ermöglicht, die an nahezu allen Transformatoren auch im Betrieb installiert werden kann. Aufgrund

des Frequenzverhaltens mechanischer Schwingungen kann aus dem Anteil der ungeraden Harmonischen abgeleitet werden, ob Gleichströme im aktuellen Betriebszustand auftreten oder nicht. Es ist für die Bewertung mechanischer Schwingungen von Vorteil, wenn Referenzmessungen ohne Gleichstrombelastung zur Verfügung stehen, zum Beispiel von den Abnahmemessungen des Herstellers.

Beide Messverfahren werden in Zukunft verwendet, um mittelfristige, verteilte Messungen an mehreren Sternpunkten durchzuführen. Aus dem zeitlichen Verhalten und den Geoinformationen wird versucht, die Ursache der Gleichstrombeeinflussung zu identifizieren und zu lokalisieren.

7 LITERATUR

- [1] W.F. Davidson, „Einwirkungen des magnetischen Strumes vom 24. März 1940 auf Hochspannungsanlagen,“ *Elektrotechnische Zeitschrift*, Bd. 5, pp. 99-100, 30. Januar 1941.
- [2] Saifur Rahman et al, IEEE Electrification Magazine Solar Storms and Power Grids, New York: IEEE, 2015.
- [3] M. Heindl, M. Beltle, M. Reuter, D. Schneider, S. Tenbohlen, D. Oyedokun, T. Gaunt, „Investigation of GIC related Effects on Power Transformers using Modern Diagnostic Methods,“ in *International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, 2011.
- [4] Erich Reiplinger, „Geräuscherhöhungen bei Großtransformatoren bei gleichstromüberlagerten Netzen,“ *EW*, Nr. 6, p. 278, 1992.
- [5] International Electrotechnical Commission, IEC 60076-10 Power Transformers Part10: Determination of sound levels, 2001.
- [6] M. Beltle, M. Schuehle, S. Tenbohlen, „Influences of direct currents on power transformers caused by AC-HVDC interactions in hybrid grids,“ in *ISH 2015*, Pilsen, Czech Republic, 2015.
- [7] Holte, Kirby C., „Geomagnetic Disturbances and Electric Power Systems,“ *IEEE Power Engineering Review*, pp. Volume 9, Issue 7, 1989.
- [8] M. Beltle, S. Tenbohlen, „Paper Diagnostic Interpretation of Mechanical Oscillations of Power Transformers,“ in *ISH*, Pilsen Czech Republic, 2015.
- [9] International Electrotechnical Commission, IEC 60076-10-1 Determination of Sound Levels Application Guide, 2005-10.
- [10] IEEE Power & Energy Society - Power System Instrumentation and Measurements Committee, IEEE Standard 1459-2010: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, New York: IEEE, 2010.
- [11] Girgis, R.; Vedante, K. , „Effects of GIC on power transformers and power systems,“ in *Transmission and Distribution Conference and Exposition* , Orlando, FL , 2012.