

# Betrachtung galvanisch eingekoppelter Gleichströme im Übertragungsnetz und deren Auswirkungen auf Leistungstransformatoren

## Galvanic DC coupling in transmission grids and its effects on power transformers

Michael Beltle, Universität Stuttgart, Deutschland, michael.beltle@ieh.uni-stuttgart.de

Michael Schühle, Universität Stuttgart, Deutschland, michael.schuehle@ieh.uni-stuttgart.de

Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Deutschland, stefan.tebohlen@ieh.uni-stuttgart.de

Ulrich Sundermann, Amprion GmbH, Dortmund, Deutschland, ulrich.sundermann@amprion.net

### Kurzfassung

Leistungstransformatoren im Übertragungsnetz sind im Betrieb verschiedenen Belastungen ausgesetzt, die deren Verhalten beeinflussen. In besonderer Weise sind Wechselwirkungen mit Gleichanteilen in den Phasenströmen zu beachten, da diese im normalen Betrieb und in der Projektierung von Umspannstationen nicht berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung werden aktuelle Feldmessungen im deutschen Übertragungsnetz vorgestellt, welche zeigen, dass Gleichanteile in Sternpunkten dauerhaft in der Größenordnung einiger Ampere liegen können. Dazu werden in einem Langzeitfeldversuch die Wechsel- und Gleichanteile der Sternpunktströme an mehreren Netzkuppeltransformatoren im 380 kV-Netz aufgezeichnet. Anhand der Datenanalyse und Korrelation mit Netz- und Umweltdaten werden die verschiedenen Ursachen für die Gleichströme identifiziert. Zusätzlich zur Strommessung werden mittels Beschleunigungssensoren die mechanischen Schwingungen an einer Transformator-kesselwand aufgezeichnet und mit den Gleichströmen korreliert. Anhand des veränderten Schwingungsverhaltens werden die gleichstrombedingten Wechselwirkungen betrachtet. Für eine nähere Untersuchung dieser Auswirkungen ein einem großtechnischer Versuchsaufbau mit je zwei 380 kV / 110 kV-Netzkuppeltransformatoren in 5-Schenkelkernbauweise betrachtet, um die im Feld gemessenen Effekte zu verifizieren.

### Abstract

Power transformers are facing different stress factors during service. Usually, the effects of DC components superimposing AC phase currents are not taken into consideration. Nevertheless, DC can occur in transmission grids due to different sources. This contribution presents ongoing field measurements which show DC in the range of several Amperes. Different superimposing DC sources are identified using the obtained data, the known grid layout and additional ambient information. Additionally, mechanical oscillations of the considered transformers are recorded using accelerometers on tank walls. By correlation of the mechanic oscillations and superimposed DC components its impact on transformer noises are determined and the suitability of vibration measurements as DC detector is evaluated. A large-scaled laboratory setup using two connected 380 kV / 110 kV, 350 MVA 5-limb power transformers is used to verify the findings from the field measurements.

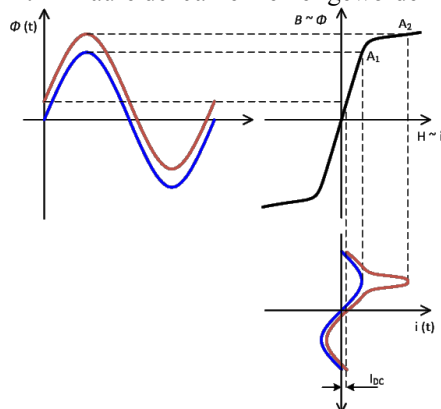
## 1 Einführung

Die Beeinflussung von Transformatoren durch Gleichströme ist seit geraumer Zeit Gegenstand verschiedener Untersuchungen. Bereits in den 1940er Jahren wurden die Auswirkungen von Gleichströmen auf Betriebsmittel selbst und als mittelbare Folge auf die Energienetze betrachtet [1], [2], [3]. Die Ursachen für Gleichströme sind hierbei meist geomagnetisch induzierter Ströme [4], die jedoch im deutschen oder zentraleuropäischen Übertragungsnetz bisher nicht in größerem Umfang in Erscheinung getreten sind, jedoch durchaus nachweisbar sind [5]. Gleichwohl können in der betrieblichen Praxis dauerhaft Gleichströme auftreten, die auf den Betriebszustand von Leistungstransformatoren einwirken. Im konkreten Beispielfall ist ein 350 MVA-Netzkuppeltransformator

(380 kV/ 110 kV, 5-Schenkelkern) neueren Baujahres im Betrieb aufgrund verschiedener Faktoren auffällig geworden. Aufgrund dieser Sachlage wurde zunächst der Sternpunktstrom des Transformators gemessen und ein überlagerter Gleichstrom in der Größenordnung von ca. einem Ampere festgestellt. Als unmittelbare 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, dessen Quellen und der resultierenden Effekte zu ermöglichen, werden im Folgenden zunächst die Messverfahren und die Ergebnisse der Feld- und Laboruntersuchungen vorgestellt.

### 1.1 Magnetische Effekte im Kernmaterial

Tritt in einer Wicklung eine Gleichstromkomponente  $I_{DC}$  auf, so führt dies aufgrund des Ampere'schen Gesetzes zu einer Durchflutung mit einem Gleichanteil  $\Theta_{DC}$ . Die magnetische Feldstärke  $H$  ist mit der Windungszahl  $k$  und der Höhe der Wicklung linear abhängig von der Durchflutung  $\Theta$ . Deshalb wird durch den Gleichanteil der Arbeitspunkt der magnetischen Kennlinie (B-H-Kennlinie) verschoben und es prägt sich ein magnetischer Gleichfluss  $\phi_{DC}$  aus. Liegt zusätzlich an der Wicklung eine Wechselspannung an, so wird dem Gleichfluss durch das Induktionsgesetz eine Wechselkomponente  $\phi_{AC}$  überlagert, siehe **Abbildung 1**, links. Ist die Wicklung um ein ferromagnetisches Kernmaterial gewickelt, tritt ab einer gewissen Feldstärke im Material Sättigung auf, da nahezu alle Weiß'schen Bezirke im Material ausgerichtet sind. In der magnetischen Kennlinie (**Abbildung 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 Luftspule mit entsprechend geringer Induktivität, was zu einem sprunghaften Anstieg des Stromes (Sättigungsstrom) führt, siehe **Abbildung 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 in den letzten Jahrzehnten verringert werden. Da der magnetische Kern einen wesentlichen 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.



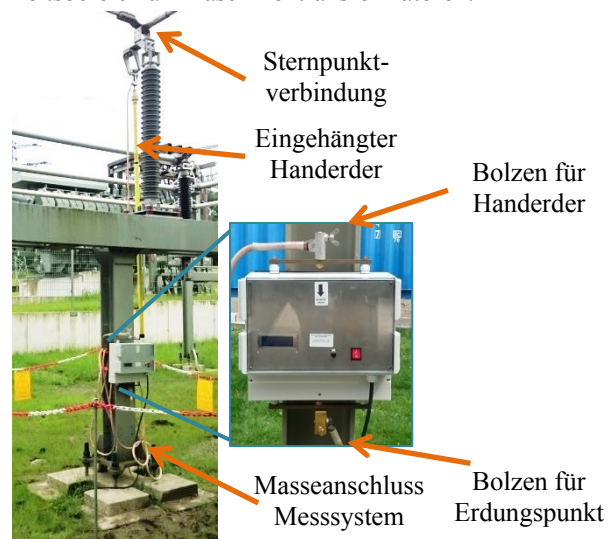
**Abbildung 1** Verhalten des magnetischen Kerns bei Gleichstrom Überlagerung

Daher reichen schon relativ geringe Gleichströme, um Sättigungseffekte in Leistungstransformatoren hervorgerufen. Wie die im Folgenden durchgeführten Messungen zeigen genügen schon Gleichströme im Bereich  $I_{DC} \geq 100$  mA um deutliche Sättigungseffekte zu erhalten und das Verhalten des Transformators maßgeblich zu beeinflussen. Hierzu muss erwähnt werden, dass die Kerngeometrie den magnetischen Gleichflussanteil im Kernmaterial und somit auch Gleichstromempfindlichkeit eines Transformators wesentlich beeinflusst [7].

## 2 Messequipment

### 2.1 Messung der Sternpunktströme

Zur Messung der Sternpunktströme vor Ort wird ein eigens entwickeltes Messsystem verwendet. Das System wird mittels eines Handraders zwischen den Sternpunkt und der Erde geschaltet, siehe **Abbildung 2**. Durch die Installation des Messsystems bei geschlossenem Erdungsschalter ist es möglich das System im laufenden Betrieb anzubringen. Nach der Installation wird der Erdungsschalter geöffnet und alle Sternpunktströme (Gleich- und Wechselanteile) kommutieren auf den Messpfad. Alle verwendeten Leiterquerschnitte sind so dimensioniert, dass ein auftretender Kurzschlussstrom zuverlässig abgeleitet werden kann. Das Messsystem arbeitet mit closed-loop Halleffekt Stromsensoren und umfasst einen Wertebereich von  $I_{ges} = \pm 40$  A (kombiniert Gleichstrom und AC-peak), die mit einer Samplerate bis zu 1 MSample/s abgetastet werden können. Die Ströme können kontinuierlich aufgezeichnet werden oder werden in definierten Intervallen gemessen, beispielsweise mit je einer Messung pro Minute. Der Zugriff auf das System ist galvanisch getrennt über einen WLAN Zugang möglich, so dass Messungen auch in nicht dauerhaft erreichbaren Bereichen durchgeführt werden können, beispielsweise im Sicherheitsbereich an Maschinentransformatoren.

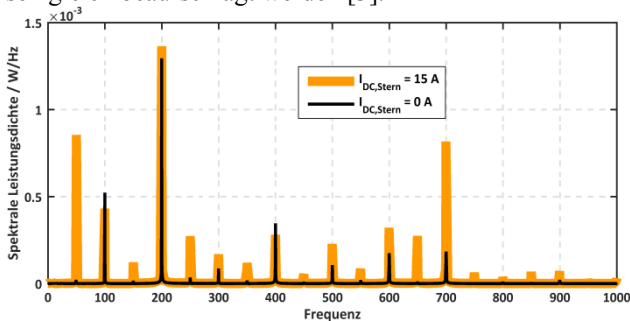


**Abbildung 2** Messung an einem Sternpunkterder eines Netzkuppeltransformators

## 2.2 Messung der mechanischen Schwingungen und Gleichstromeinfluss

Um die mechanischen Schwingungen messen zu können werden Beschleunigungssensoren eingesetzt, die direkt auf den Kessel fixiert werden. Das Verfahren eignet sich sowohl für Messungen an Transformatoren im Feld, als auch für den in Kapitel 4 beschriebenen Großversuch.

Die piezoelektrischen Beschleunigungssensoren werden mit ihrer Referenzfläche auf die Kesselwand kontaktiert und messen deren Beschleunigung in Normalenrichtung zur Oberfläche. Beispielhaft sind in **Abbildung 3** die gemessenen Frequenzgänge der Kesselschwingung abgebildet. Die Messungen werden an einem 3-phasigen Leistungstransformator durchgeführt. Dabei findet die Referenzmessung (schwarz) im Leerlauf ohne überlagerten Gleichstrom statt; bei der Testmessung werden insgesamt  $I_{DC} = 15 \text{ A}$  über den Transformatorsternpunkt eingespeist. Bei der Referenzmessung ohne Gleichstrom sind die typischen Signalspitzen aufgrund der Magnetostraktion beim doppelten der elektrischen Frequenz und bei deren harmonischen Anteilen erkennbar (100 Hz, 200 Hz, etc.) [3]. Deutlich ist die Zunahme ungerader Harmonische (150 Hz, 250 Hz, etc) bei Gleichstrom erkennbar, was durch die in Kapitel 1.1. beschriebene Halbwellensättigung verursacht wird. Ebenso ist eine Pegelzunahme gerader Harmonischer höherer Ordnung zu sehen (z.B. bei  $f = 700 \text{ Hz}$ ). Das Frequenzverhalten lässt sich sowohl bei drei- und 5-Schenkelkern Transformatoren in den mechanischen Schwingungen finden, allerdings sind drei-Schenkelkerntransformatoren wenig empfindlich gegenüber symmetrischen Gleichströmen, also wenn alle Phasen gleich beaufschlagt werden [3].



**Abbildung 3** Vergleich der mechanischen Schwingungen im Leerlauf ohne Gleichstrom und mit symmetrischer Gleichstrombelastung [7]

## 3 Feldmessungen

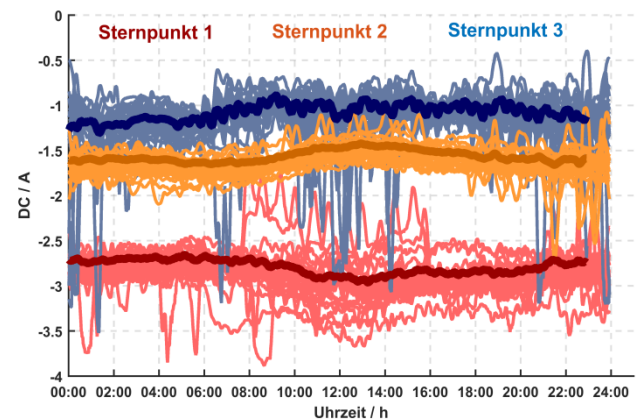
### 3.1 Langzeitmessung Gleichstrom

Mit mehreren der in Kapitel 2.1 vorgestellten Systemen werden an verteilten, geerdeten Sternpunkten die Ströme im Rahmen einer Langzeitmessung aufgezeichnet. **Abbildung 4** zeigt beispielhaft die Tagesgänge eines Monats sowie den mittleren Tagesgang von drei Sternpunkten in verschiedenen Umspannanlagen.

Die Anlagen sind über das Übertragungsnetz direkt miteinander verbunden, es existieren 380 kV-Stromkreise zwischen den Standorten von Sternpunkt 1 zu 2 (Länge 60 km) und von Sternpunkt 1 zu 3 (Länge 46 km).

#### 3.1.1 Betrachtung des mittleren Tagesgangs

Wie an den mittleren Tagesgängen in **Abbildung 4** erkennbar ist, zeigen alle Sternpunkte einen deutlichen, konstanten negativen Gleichstromanteil, dem zusätzlich eine von der Uhrzeit abhängige Schwankung überlagert ist. Das negative Vorzeichen definiert, dass der Gleichstrom aus dem Erdreich über den Sternpunkt in den Transformator fließt. Bei allen durchgeführten Feldmessungen werden nur Flussrichtungen des Gleichstroms in den Transformator gemessen. Der Austrittspunkt des Gleichstroms ist damit messtechnisch noch nicht erfasst.



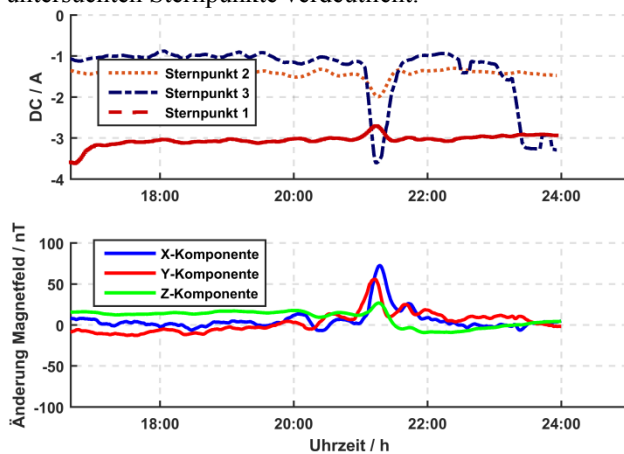
**Abbildung 4** 30 Tagesgänge der Gleichströme an drei 380 kV Transformatorsternpunkten

Der mittlere Tagesgang zwischen Sternpunkt 1 und 2 verläuft entgegen gesetzt. Über den Tag kommutieren also Anteile des Gleichstroms zwischen beiden Sternpunkten hin und her. Eine ähnliche Korrelation zu Sternpunkt 3 ist nicht erkennbar, obwohl dieser geographisch näher liegt. Ebenso ist im mittleren Tagesgang von Sternpunkt 3 eine leichte Schwankung mit einer Periodendauer von ca. einer halben Stunde erkennbar, welche bei den anderen Sternpunkten nicht auftritt. Diese Entkopplung kann darauf hinweisen, dass hier verschiedene Quellen den mittleren Tagesgang der Sternpunkte beeinflussen. Die hohen Beträge der durchschnittlichen Gleichströme aus dem Erdreich lassen vermuten, dass die Hauptquelle(n) großindustrielle Anlagen sind, wie beispielsweise kathodische Korrosionsschutzeinrichtungen. Durch die Potentialdifferenz zwischen Opferanode und zu schützender Einrichtung bilden sich entsprechende Gleichströme aus. Ggf. können Teilströme über verschiedene, parallele Maschen fließen, die durch das Erdreich und das Übertragungsnetz aufgespannt werden. Unter der Annahme, der kürzeste Pfad auch den kleinsten Widerstand darstellt fließt durch diesen auch bedingt durch den aufgespannten Stromteiler der größte Gleichstrom. In diesem Fall also durch Sternpunkt 1, welcher der Quelle am nächsten liegen würde. Die einzelnen Tageskurven zeigen eine hohe Volatilität, die vermutlich auf zusätzliche, temporär aktive Quellen, welche die statischen Quellen überlagern, zurückzuführen ist.

### 3.1.2 Betrachtung transienter Änderungen

Die in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ersichtlichen transienten Änderungen in einzelnen Tagesgängen werden im Folgenden genauer betrachtet. Signifikante Quellen, die zu einer kurzzeitigen Änderung der Gleichströme von  $\Delta I_{DC} \geq 1 \text{ A}$  führen, lassen sich in vielen Fällen auf geomagnetische Einflüsse zurückführen [4]. Für den Betrachtungszeitraum werden daher schnelle Änderungen (Zeitraum  $< 1 \text{ Stunde}$ ) mit den Änderungen des Erdmagnetfeld korreliert. Als Datenquelle dienen Messungen des Erdmagnetfeld-Observatorium Wingst, welches vom Helmholtz-Zentrum Potsdam betrieben wird. Die Messdaten sind über die Intermagnet-Plattform zugänglich [9].

Im Rahmen der Auswertung werden alle Vorkommnisse, bei denen mindestens eine Raumkomponente der magnetischen Flussdichte eine Änderung von  $\Delta B_{\min} > 50 \text{ nT}$  erfährt, betrachtet. Im Betrachtungszeitraum April 2016 finden sich insgesamt 11 dieser Änderungen. **Abbildung 5** zeigt beispielhaft einen Vorgang, der qualitativ die typischen Auswirkungen der Erdmagnetfeldänderung auf die untersuchten Sternpunkte verdeutlicht.



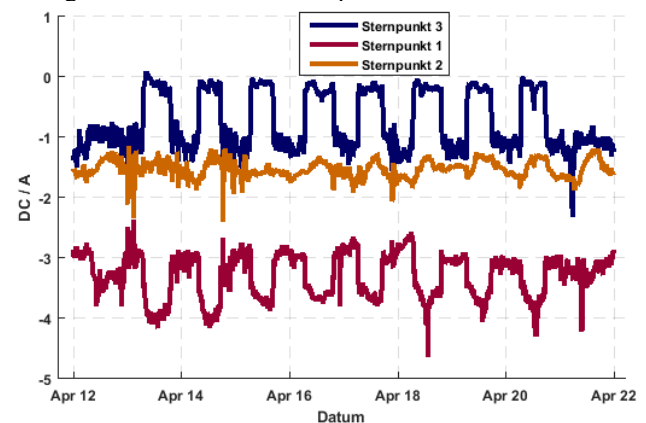
**Abbildung 5** Transiente Beeinflussung der Sternpunktströme durch Änderung des Erdmagnetfeldes  
oben: Sternpunktströme (nur DC Anteile)  
unten: Änderung des Erdmagnetfeldes

In Sternpunkt 3 tritt eine kurzzeitige, signifikante Erhöhung des Gleichstroms um  $\Delta I_{DC} = 2.5 \text{ A}$  auf, die Auswirkungen auf die anderen Messstellen fallen geringer aus und liegen im Bereich  $\Delta I_{DC} \approx 0.5 \text{ A}$ . Im Einzelfall hängen die resultierenden transienten Gleichströme stark vom Verlauf der Änderungen der einzelnen Komponenten ab, da die Induktion in die Freileitungen von den Geometrien der aufgespannten Flächen zwischen Leitung und Erdboden, deren Ausrichtung und der Leitfähigkeit des Erdbodens abhängen [5].

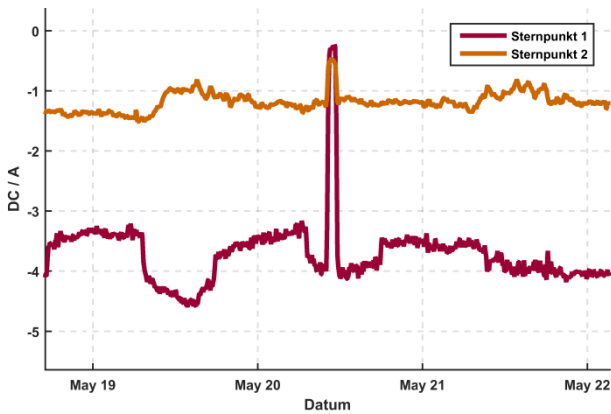
Zusammenfassend können die meisten transienten Gleichstromänderungen geomagnetischen Effekten zugewiesen werden. Anhand der vorliegenden Messdaten des Feldversuchs ist jedoch ebenso ersichtlich, dass die beobachteten transienten Änderungen hinsichtlich Dauer und Amplituden nicht als wesentliche Quellen der gesamten Gleichstrombelastung anzusehen sind.

### 3.1.3 Quellenidentifizierung

Als Ergebnis kann aus der Auswertung der Langzeitmessung aus den vorherigen beiden Kapiteln geschlossen werden, dass die signifikante Quelle statischer Natur sein muss und der Modellvorstellung folgend dem Sternpunkt am nächsten ist, der den betragsmäßig größten Gleichstrom aufweist (Sternpunkt 1), siehe Kapitel 3.1.1. Um die Theorie messtechnisch zu stützen, wird durch verschiedene Schalthandlungen der betrachtete Übertragungsnetzabschnitt aufgetrennt und der Einfluss auf die Sternpunktströme ausgewertet. Im Zeitraum zwischen dem 13. April und dem 21. April finden insgesamt acht Freischaltungen des Stromkreises zwischen Sternpunkt 1 und Sternpunkt 3 statt. In **Abbildung 6** ist der temporäre Rückgang des Gleichstrombetrags an Sternpunkt 3 hinter dem zeitweise aufgetrennten Stromkreis erkennbar. Ebenso zeigt der Stromverlauf, dass der Gleichstrom zum größten Teil auf den Sternpunkt 1 kommutiert. Auch diese Beobachtungen stützt die These, dass die Hauptquelle im Umfeld von Sternpunkt 1 zu suchen ist. Eine Recherche der umliegenden Großindustriellen Anlagen führt zu einem lokalem kathodischen Korrosionsschutzsystem (LKS) ausgerüstet mit Horizontal- und vertikal angeordneten Tiefenelektroden (Tiefe  $< 100 \text{ m}$ ) in direkter Nachbarschaft zur Umspannanlage von Sternpunkt 1. Aufgrund der Größe der zu schützenden Gewerke ist für den Betrieb der LKS-Anlagen ein Summengleichstrom in der Größenordnung von ca.  $300 \text{ A}$  erforderlich. Eine weiträumige Verteilung dieser Gleichströme durch verschiedene geologische Schichten ist damit möglich und passt zur formulierten These aus Kapitel 3.1. Zu Testzwecken ist es möglich, den Korrosionsschutz kurzzeitig auszuschalten. Wie in **Abbildung 7** erkennbar ist, sinkt der Gleichstrom in beiden Sternpunkten bei ausgeschaltetem Korrosionsschutz (20. Mai, 10:30 h bis 20. Mai 11:15 h) nahezu auf betragsmäßig kleine Werte zwischen ca.  $I_{DC} = 300 \text{ mA}$  (Sternpunkt 1) und  $I_{DC} = 450 \text{ mA}$  (Sternpunkt 2). Die im Messzeitraum relevante Hauptquelle kann damit als identifiziert angesehen werden. Da die Ströme jedoch nicht vollständig auf null absinken, ist es offensichtlich, dass das Übertragungsnetz noch von weiteren Gleichstromquellen beeinflusst wird. Diese Vermutung konnte im Rahmen eines weiteren Versuchs erhärtet werden. Zusätzliche Recherchen haben weitere LKS-Anlagen in der Nähe der Sternpunkte 1 und 3 identifiziert.



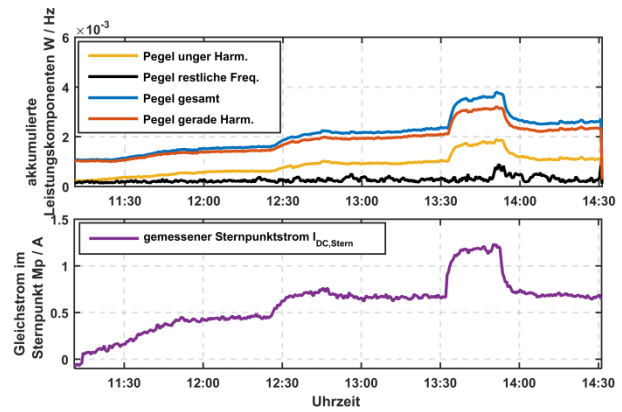
**Abbildung 6** Verlauf der Sternpunktströme bei Öffnung des Stromkreises zwischen Sternpunkt 1 und 3



**Abbildung 7** Verlauf der Gleichströme bei kurzzeitiger Abschaltung eines lokalen kathodischen Korrosionsschutzsystems (LKS)

### 3.2 Schwingungsmessung

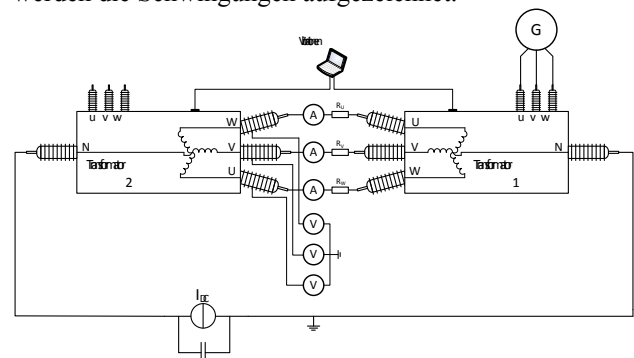
An einem der betroffenen Netzkupplertansformatoren (3-phasig, 350 MW, 5-Schenkelkern) werden die Kesselschwingungen und der Sternpunktgleichstrom gleichzeitig vermessen. Für den Versuch ist der Sternpunkt zunächst geöffnet und wird für den Versuch geschlossen, so dass zu Versuchsbeginn kein Gleichstrom über den Transformator fließen kann und eine Referenzmessung der Kesselschwingungen möglich ist. **Abbildung 7** zeigt den Verlauf des Stromes und die Signalleistung der Kesselschwingungen. Es werden die zwei sprunghaften Anstiege um 12:22 Uhr und um 13:30 Uhr im Folgenden genauer 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 untersuchten Netzkuppler, was zu einem Anstieg des Gleichstromes um ca.  $\Delta I_{DC} = 250 \text{ mA}$  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 ein weiterer Gleichstromanteil zum betrachteten Transformator. Wie das obere Diagramm in **Abbildung 7** zeigt, steigen die Pegel der gesamten mechanischen Schwingung simultan mit dem Gleichstrom an. 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. Das Verhalten der ungeraden Harmonischen (50 Hz, 150 Hz, etc.) 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 sowohl die aufsummierten geraden als auch ungeraden harmonischen Komponenten zu, vgl. Abschnitt 2.2. Im Maximum des Gleichstroms beträgt der Anteil der ungeraden Harmonischen ca. 25% der gesamten Signalleistung der mechanischen Schwingungen.



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

## 4 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 **Abbildung 9** [7] gekoppelt. Der Gleichstrom wird über die Masche der verbundenen Sternpunkte eingepreßt und fließt über die Hochspannungswicklungen beider Phasen. Gleichzeitig kann einer der beiden Transformatoren über die Unterspannungsseite bzw. die Tertiärwicklung durch eine 3-phasige AC Quelle erregt werden. Beide Transformatoren sind damit unter Leerlaufbedingungen aufmagnetisiert. Die eingesetzten Transformatoren sind baugleich zum im Feld untersuchten Transformator aus Abschnitt 3.2 (5-Schenkelkern, 380 kV, 350 MVA). An beiden Kesseln werden die Schwingungen aufgezeichnet.

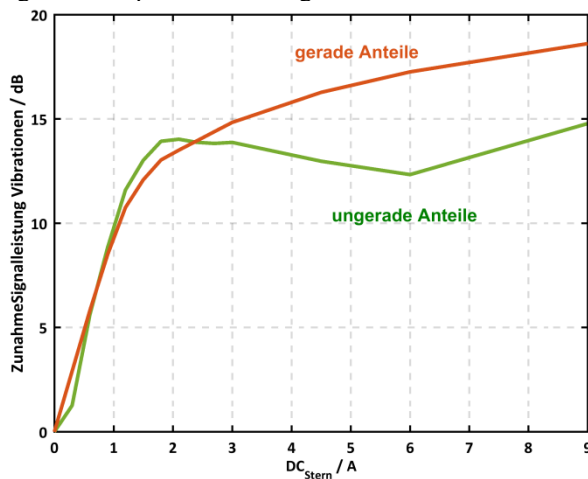


**Abbildung 9** Versuchsaufbaus mit zwei Netzkupplertansformatoren in „back-to-back“ Verschaltung

### 4.1 Beeinflussung der mechanischen Schwingungen durch Gleichströme

Wie der Vergleich zeigt, kann die im Feldversuch beobachtete Zunahme bestimmter mechanischer Frequenzen auch im großtechnischen Aufbau nachvollzogen werden: Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden wer-

den. zeigt den Anstieg der mechanischen Schwingungen in Abhängigkeit vom eingepprägten Gleichstrom, der in diesem Diagramm als Vielfaches des Magnetisierungsstromes  $I_{\text{mag,eff}}$  der 380 kV-Wicklung angegeben ist, wobei die Bezugsgröße der summierte Strom aller Phasen  $I_{\text{mag,eff}} = I_{\text{mag,U}} + I_{\text{mag,V}} + I_{\text{mag,W}} \approx 500 \text{ mA}$  ist. Sowohl gerade als auch ungerade Frequenzanteile weisen einen ähnlichen Verlauf mit vergleichbaren Steigungen auf, wobei in **Abbildung 10** die summierten geraden (100 Hz, 200 Hz, etc.) bzw. ungeraden (50 Hz, 150 Hz, etc.) harmonischen Frequenzanteile der mechanischen Schwingungen dargestellt sind. Beide Anteile nehmen 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 vernachlässigbaren Leistungsanteilen vorkommen, können diese summierten Leistungsanteile als Indiz für eine Einwirkung von Gleichströmen herangezogen werden, was die Beobachtungen der Feldmessungen aus Kapitel 3.2 bestätigt.



**Abbildung 10** Zunahme von mechanischen Schwingungen bei ansteigendem Gleichstrom  $I_{\text{DC,Stern}}$ ; normierte Signalleistung der Schwingung (Referenz:  $I_{\text{DC}} = 0 \text{ A}$ ) getrennt nach geraden und ungeraden Schwingungskomponenten

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der vorgestellten verteilten Langzeitmessungen ist es möglich, verschiedene Quellen für Gleichstromüberlagerungen in Übertragungsnetzen zu identifizieren. Im vorliegenden Fall treten mindestens zwei wesentliche Quellen auf. Geomagnetisch induzierte Quasi-Gleichströme, die nur kurzzeitig auftreten, jedoch die gemessenen Gleichpunktströme um bis zu zwei Ampere erhöhen. Die hier als wichtiger einzustufende Quelle führt einen dauerhaften Gleichstrom. Durch die zeitgleiche Messung an verschiedenen Sternpunkten im Netz und durch das gezielte Ab- und Zuschalten einzelner Netzabschnitte kann das Quellgebiet eingegrenzt werden. Die Recherche nach in Frage kommenden Großindustriellen Anlagen im Quellgebiet führt zu einem lokalem kathodischen Korrosionsschutzsystem (LKS) in unmittelbarer Nähe zu einem der vermessenen Sternpunkte. Messungen

mit sehr kleinen Gleichstromanteilen während der Außerbetriebsetzung des Korrosionsschutzsystems belegen, dass eine wesentliche Quelle gefunden ist. Um Gleichströme in Transformatorsternpunkten und die resultierenden Wechselwirkungen zu vermeiden, können ggf. einzelne, betroffene Sternpunkte geöffnet werden, wenn dies aus betrieblicher Sicht möglich ist und die Erdungsstrategie des Netzabschnittes dies zulässt. Zukünftig könnte auch die kapazitive Beschaltung von Sternpunkten eine weitere praktikable Lösung darstellen, zurzeit befindet sich eine Anlage als „DC-Blocker“ in Erprobung.

Sind Transformatoren im Feld von Gleichstrombeaufschlagungen betroffen, so kann dies neben der direkten Strommessung auch durch einfach realisierbare, kostengünstige Schwingungsmessungen am Kessel erfolgen, welche sich auch für Langzeitmessungen eignen. Das Messverfahren kann auch dann eingesetzt werden, wenn ein Gleichstrommesssystem aus betrieblichen Gründen nicht installiert werden kann oder der Sternpunkt nicht zugänglich ist. Die Schwingungsmessung kann als Indikator dienen, ob Gleichströme zu unerwünschten Wechselwirkungen im Kernmaterial führen oder nicht. Diese Wechselwirkungen treten bei Leistungstransformatoren mit 5-Schenkelkernen immer auf, Transformatoren mit 3-Schenkelkernen sind nicht betroffen, wenn die Gleichanteile auf den Phasen gleich in Betrag und Flussrichtung sind.

## 6 Literatur

- [1] W.F. Davidson, „Einwirkungen des magnetischen Stromes 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. Beltle, S. Tenbohlen, „Diagnostic Interpretation of Mechanical Oscillations of Power Transformers,“ in *ISH*, Pilsen Czech Republic, 2015.
- [4] 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.
- [5] T. Halbedl, H. Renner, G. Achleitner, „Einfluss des Geomagnetismus auf das österreichische Hochspannungsnetz,“ in *VDE-ETG Schutz- und Leittechnik*, Berlin, 2016.
- [6] M. Beltle, M. Schühle, S. Tenbohlen, U. Sundermann, „Das Verhalten von Leistungstransformatoren bei Beanspruchung mit Gleichströmen,“ in *Stuttgarter Hochspannungssymposium 2016*, Stuttgart, 2016.
- [7] „Intermagnet,“ [Online]. Available: [www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org).