

Beeinflussung von induktiven Stromwandlern in Hoch- und Höchstspannungsnetzen durch parasitäre Gleichströme

Impact of parasitic direct currents on inductive current transformers in high voltage transmission grids

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

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

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, Deutschland, stefan.tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Das Auftreten von parasitären Gleichströmen in Hoch- und Höchstspannungsnetzen ist bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt. In den vergangenen Jahren haben sich jedoch neue Ursachen für Gleichströme in Übertragungsnetzen gezeigt. Während früher geomagnetisch induzierte Ströme (engl. geomagnetic induced currents, GIC) als Ursache galten, kommt es heutzutage durch den steigenden Einsatz von Hochspannungs-Gleichstromübertragungssystemen (HGÜ-Systemen) immer öfter zu Gleichstrombeeinflussungen. Die Auswirkungen dieser parasitären Gleichströme zeigen sich in induktiven Betriebsmitteln, welche vom Gleichstrom durchflossen werden. Neben Transformatoren zählen hierzu auch induktive Stromwandler, welche einen wesentlichen Anteil der installierten Wandler im deutschen Übertragungsnetz repräsentieren. In dieser Veröffentlichung wird ein simulativer Ansatz gezeigt, mit welchem die Auswirkungen von Gleichströmen unterschiedlicher Intensität auf induktive Stromwandler abgeschätzt werden können.

Abstract

The presence of parasitic direct currents (DC) in high voltage transmission grids is a well-known phenomenon. Besides the influences of geomagnetic induced currents (GIC), which are known for near 170 years, new sources of DC were identified during the last years. The technology of high voltage DC (HVDC) transmission lines could be in some circumstances also a source of DC in conventional AC systems. Driven by the increased probability of occurrence of DC in AC systems, this paper estimates the influences of a parasitic DC on inductive current transformers. Therefore, a simulation model of a current transformer with three cores types is developed. The simulations are done with different amount of DC impacts to estimate the different behaviours of each core type.

1 Ursachen für Gleichströme in Übertragungsnetzen

Im Jahr 1849 wurden von W. H. Barlow unerklärliche Ströme in Telegrafleitungen gemessen, welche über mehrere Stunden auftraten. Er erkannte bereits damals einen Zusammenhang zwischen den auftretenden Strömen und einem auftretenden starken Magnetfeld. Diese Effekte sind heutzutage als sog. GICs (geomagnetic induced currents) bekannt. Neben dem nun seit fast 170 Jahren bekannten Phänomen des GIC gibt es jedoch mit zunehmender Anzahl auch künstliche Ursachen für das Auftreten von Gleichspannungen in Übertragungsnetzen. Dazu gehören Hybridleitungen [1] im Zusammenhang mit Hochspannungsgleichstromübertragungen und DC-Systeme, welche die Erde als dedizierten Leiter verwenden [2]. Da jede Ursache anders auf die Übertragungsstrecke einwirkt, zeigen sich auch in den resultierenden Gleichströmen unterschiedliche Szenarien, welche auf unterschiedliche Hochspannungsbetriebsmittel unterschiedlich reagieren.

1.1 Geomagnetisch induzierte Ströme

GIC beschreibt ein Phänomen bei dem es bedingt durch atmosphärische Einflüsse der Sonne zu einer Spannungsinduktion in Hochspannungsfreileitungen kommt. [3] [4]

Als wiederkehrendes Ereignis kommt es auf der Sonneneroberfläche zu Sonnenstürmen oder Sonneneruptionen. Dabei werden von der Sonne große Mengen geladene Teilchen in das Weltall geschleudert. Diese ins Weltall geschleuderten geladenen Teilchen treffen irgendwann auf die Erde. Dadurch kommt es zu einer Verformung des magnetischen Feldes, welches die Erde umgibt und die von der Sonne kommenden Teilchen ablenkt.

Auf der Erdoberfläche äußert sich diese Verformung des magnetischen Feldes in einer lokalen zeitlichen Änderung des Erdmagnetfeldes. Durch eine aufgespannte Leerschleife, welche sich durch eine Freileitung, zwei geerdete Transformatoren und elektrisch leitfähige Erdschichten ergibt, wird bei einer Änderung des magnetischen Feldes eine Spannung nach dem Induktionsgesetz induziert.

$$U_{ind} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \iint_A \mu \cdot \frac{\delta \vec{H}}{\delta t} \cdot d\vec{A}$$

Bedingt durch die langsame Frequenz, von $f_{GIC} = 0,125 \dots 8$ mHz im Vergleich zu den 50 Hz Netzfrequenz, können GICs als langsam zu- und abnehmende Gleichströme interpretiert werden. GICs werden daher auch als Quasi-Gleichströme bezeichnet.

Die Stromstärke des GIC hängt hauptsächlich von der Intensität des auftretenden Sonnensturms ab, jedoch sind auch die Position und Ausrichtung der Freileitung sowie die Erdimpedanzen zwischen den Leitungsenden wichtige Parameter [5]. Im Vergleich zu anderen Gleichstromursachen stellen GICs eine zeitlich begrenzte Beeinflussung dar. Die Amplituden der Gleichströme können jedoch bis zu 100 A oder mehr betragen [6].

1.2 Hybridleitungen

Das Prinzip der Hybridleitung ist im Vergleich zu GIC eine moderne Ursache für Gleichströme. Bei einer Hybridleitung wird ein konventionelles Wechselstromsystem (AC) zusammen mit einem Hochspannungsgleichstromsystem (HVDC) auf einer gemeinsamen Freileitungstrasse geführt. Hierfür werden bereits bestehende Trassen genutzt und um die HVDC Systeme ergänzt. Dies ermöglicht im Vergleich zu einem Neubau der Trasse eine deutlich einfachere Installation von Hochspannungsgleichstromübertragungen (HGÜ) [1]. Durch die unmittelbare Nähe und den dauerhaften Potentialunterschied zwischen den AC und DC Systemen kommt es zu einem Ionenstrom zwischen beiden Systemen. Abhängig von der genauen Leiterseilanordnung und der Leitfähigkeit der Luft ergibt sich ein Ionenstrom bis zu 10 mA/km auf parallel laufenden Leitungen [1].

1.3 DC-Systeme mit Erdleiter

Neben den bereits beschriebenen Ursachen stellt jedes DC-System, welches die Erde als (Rück-)Leiter verwendet, eine potenzielle Ursache für DC Beeinflussungen in Hochspannungsfreileitungen dar. Bedingt durch den undefinierten Stromflusspfad in der Erde können im Sternpunkt geerdete Hochspannungsfreileitungen einen Bypass zu dem eigentlichen Stromflusspfad in der Erde darstellen. Bild 1 zeigt eine exemplarische Anordnung einer Freileitung und eines in der Erde fließenden Gleichstromes. Mithilfe geeigneter DC-Messsysteme wurde bereits ein kathodisches Korrosionsschutzsystem als Ursache für einen solchen parasitären Gleichstrom identifiziert [2].

Typische Beispiele für Gleichströme im Erdreich stellen auch Hochspannungsgleichstromübertragungen ohne dedizierten metallischen Rückleiter dar. Dabei wird dauerhaft oder im Fehlerfall der gesamte Strom über die Erde geleitet, siehe Bild 2 [7]. Die dabei im Erdreich fließenden Ströme können sehr groß und sein und bedingt durch die zumeist große räumliche Ausdehnung der HVDC Systeme einen großen Bereich beeinflussen.

Eine bisher messtechnisch noch nicht nachgewiesene Ursache könnten auch Inverter oder aktive Gleichrichter sein,

welche eine leicht unsymmetrische Wechselspannung ausgeben oder eine unsymmetrische Belastung des Stromnetzes darstellen.

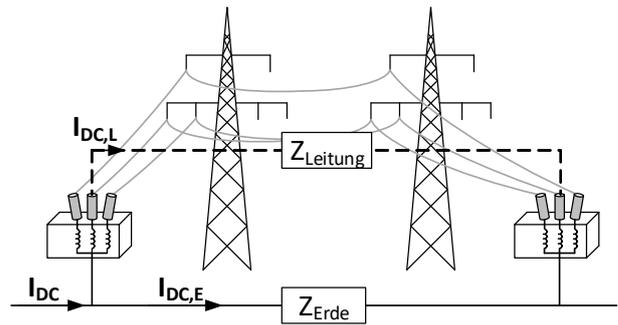


Bild 1 Freileitung mit geerdeten Transformatorsternpunkten als Bypass für im Erdreich fließende Gleichströme (ohmscher Teiler)

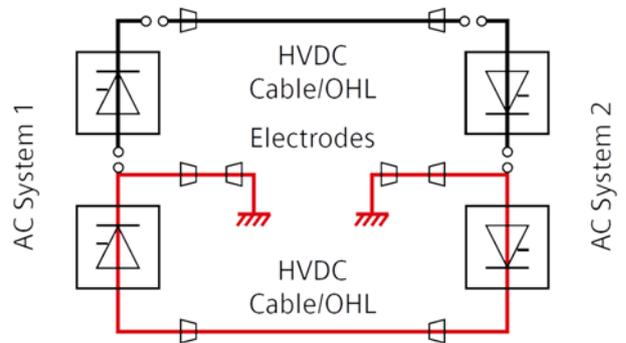


Bild 2 Bipolare HGÜ im Einpoligen Betrieb z.B. durch Fehler oder Wartung [7]

2 Sättigung induktiver Betriebsmittel durch Gleichstrom

Die Beeinflussung von induktiven Betriebsmitteln durch Gleichstrom ergibt sich aus der endlichen Magnetisierbarkeit (Sättigung) ferromagnetischer Stoffe aus welchen die Eisenkerne für induktive Hochspannungsbetriebsmittel sind. Für die Betrachtung der Magnetisierung kann der Stoff in mikroskopisch kleine Elementarmagnete unterteilt werden, welche sich entsprechend einem von außen angelegten Feld ausrichten und zur Magnetisierung des Stoffes führen. Eine Anhäufung von gleich ausgerichteten Elementarmagneten werden Weissche Bezirke genannt. Die Sättigung beschreibt dabei den Moment ab dem nahezu alle Elementarmagnete sich entsprechend einem externen Feld ausgerichtet haben und die Magnetisierung des Materials nicht weiter zunehmen kann.

Das oben bereits genannte Induktionsgesetz muss für die Gültigkeit bei der Benutzung ferromagnetischer Kerne um die Magnetisierung des Eisenkerns erweitert werden.

$$U_{ind} = - \iint_A \frac{\delta \vec{B}}{\delta t} \cdot d\vec{A}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

Damit ergibt sich die magnetische Flussdichte aus der magnetischen Feldstärke, welche direkt proportional zum Strom durch eine Wicklung ist und der endlichen Magnetisierung eines ferromagnetischen Stoffes.

Durch die Einwirkungen eines Gleichstroms auf eine induktives Betriebsmittel kommt es auch zu einem Gleichanteil in der magnetischen Feldstärke \vec{H} . Dieses Gleichfeld sorgt dafür, dass immer mehr Elementarmagnete sich entsprechend dem Gleichfeld ausrichten. Bei der Überlagerung mit dem primären Wechselfeld kann es nun zu der beschriebenen Sättigung kommen, da keine Elementarmagnete mehr vorhanden sind welche nicht schon in Feldrichtung ausgerichtet sind.

Bei den Auswirkungen der Sättigung auf das Betriebsverhalten muss je nach Betriebsmittel unterschieden werden, ob die angelegte Spannung oder der Strom als eingepägt gilt. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Auswirkungen auf Transformatoren und induktive Stromwandler erklärt.

2.1 Auswirkungen der Sättigung auf Transformatoren

Transformatoren werden in Energienetzen mit einer vorgegebenen Wechselspannung betrieben. Der Strom durch einen Transformator wird durch die angeschlossenen Lasten definiert. Bei Sättigung des Eisenkerns in einem Transformator ist bedingt durch die eingepägte Spannung auch die magnetische Flussdichte B eingepägt. Wenn nun die Magnetisierung des Eisenkerns durch die Sättigung nicht mehr zum magnetischen Fluss beitragen kann muss der zusätzliche Fluss durch die magnetische Feldstärke H erzeugt werden. Da die magnetische Feldstärke direkt proportional zum Strom ist resultiert die Sättigung des Eisenkerns in einer sprunghaften Zunahme des Stroms.

2.2 Auswirkungen der Sättigung auf induktive Stromwandler

Im Gegensatz zu Transformatoren ist bei Stromwandlern der Strom eingepägt. Damit ist die magnetische Feldstärke, die auf den Eisenkern wirkt definiert. Kommt es nun durch den Gleichanteil zu einer unsymmetrischen Magnetisierung und zur Sättigung ergibt sich eine einseitige Dämpfung der magnetischen Flussdichte. Die Dämpfung der magnetischen Flussdichte wiederum führt, über die am Wandler angeschlossene Bürde, zu einem verfälschten Sekundärstrom im Vergleich zum eingepägten Primärstrom.

Bild 3 veranschaulicht dieses Phänomen und zeigt unten rechts den eingepägten Strom (blau → ohne Gleichanteil, orange → mit überlagertem Gleichanteil). Die Magnetisierungskennlinie $B(H)$, oben rechts, spiegelt das Sättigungsverhalten eines ferromagnetischen Stoffes wieder. Der Arbeitspunkt A_1 kennzeichnet die maximale Aussteuerung der Kennlinie, wenn kein Gleichanteil vorhanden ist. Dieser Arbeitspunkt liegt deutlich unter der Sättigung. Durch die Verschiebung aufgrund des Gleichanteils verlagert sich

der Arbeitspunkt A_2 über den Sättigungsknick und der magnetische Fluss kann nicht mehr formgetreu abgebildet werden. Die orange gestrichelte Linie in Bild 3 zeigt den eigentlich formgetreuen magnetischen Fluss ohne Dämpfung. Die Differenz $\Delta\varphi_{Err}$ beschreibt die Verzerrung bzw. Dämpfung des magnetischen Flusses, welche zu der später beschriebenen Messwertabweichung führt.

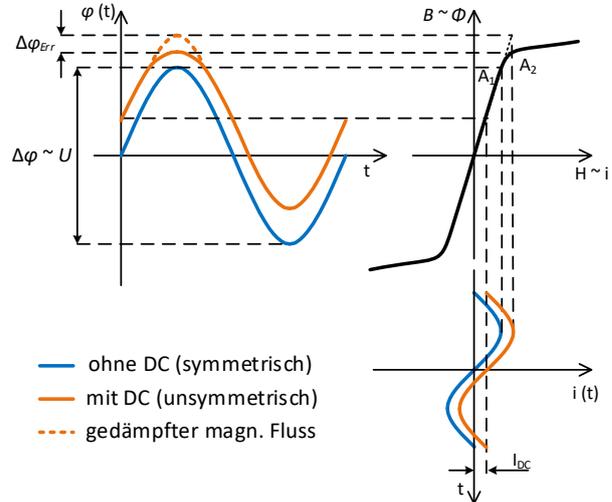


Bild 3 Verzerrung des magn. Flusses durch DC-Einfluss und Sättigung des Eisenkerns eines induktiven Stromwandlers

3 Simulationsmodell

Für die Nachbildung der Sättigungseffekte ist es notwendig ein Simulationsmodell zu entwickeln, welches die Materialeigenschaften eines Eisenkerns möglichst genau wiedergeben kann. Für die nachfolgende Untersuchung wird das Jiles-Atherton Modell verwendet, welches bereits 1983 entwickelt wurde und bis heute eine sehr gute Möglichkeit darstellt, um die Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe nachzubilden [8] [9].

Die Implementierung des Jiles-Atherton Modells erfolgt in MATLAB Simulink unter der Verwendung der Simscape Erweiterung [10].

Die für die Modellierung benötigten Parameter ergeben sich direkt aus den geometrischen Abmessungen und Anordnungen des Leiters bzw. des Kerns. Zudem müssen, basierend auf Hysteresekurven, fünf Jiles-Atherton Parameter bestimmt werden. Die Ermittlung der Parameter kann sehr aufwendig sein, da es aufgrund der Definition des Jiles-Atherton Modells oft keine eindeutige Lösung gibt und unterschiedliche Parameterkonstellationen, welche ähnlich gute Übereinstimmungen zeigen, sich bei der späteren Simulation jedoch hinsichtlich der Stabilität der Simulation deutlich unterscheiden.

Bild 4 zeigt den Simulationsaufbau eines Stromwandlers mit den Reluktanzen des Eisenkerns (orange) und des Streuflusspfads (grün) parallel zum Eisenkern. Der Streuflusspfad wird hierbei als lineare Reluktanz mit $\mu_r = 1$, für Luft, definiert. Die Wicklungen „Winding_1“ und

„Winding_2“ stellen den Übergang vom elektrischen zum magnetischen Netzwerk dar und sind ausschließlich über die Anzahl der Windungen definiert.

Der in dieser Untersuchung modellierte Hochspannungs-Stromwandler verfügt über drei separate Eisenkerne mit den Genauigkeitsklassen 0,2S 5PR und TPZ.

Der 0,2S Kern stellt hierbei einen Kern für Messzwecke dar, während die Kerne 5PR und TPZ für Schutzzwecke optimiert sind.

In der Simulation werden alle drei Kerne zeitgleich und mit demselben Primärstrom untersucht, hierfür wird die in Bild 4 dargestellte Anordnung über die Primäranschlüsse „I1_in“ und „I1_out“ kaskadiert. Die Schutzkerne 5PR und TPZ werden mit einem Luftspalt im Eisenkern gefertigt. Dieser Luftspalt kann durch die Kaskadierung der Wandlermodelle einfach in die jeweiligen Wandlermodelle integriert und individuell parametrisiert werden.

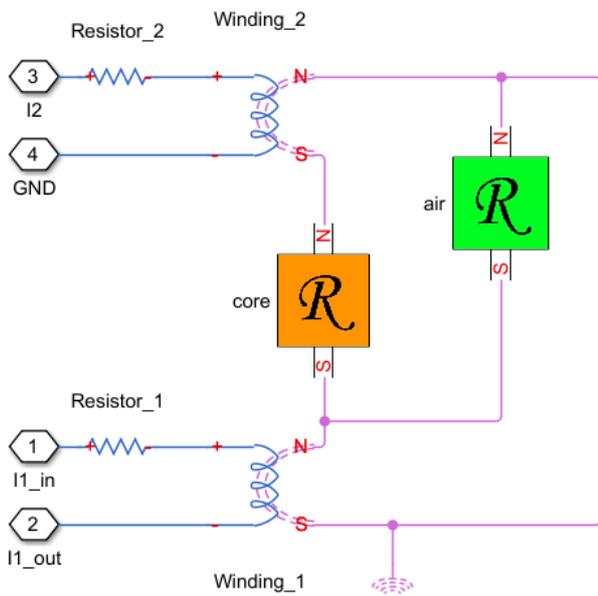


Bild 4 Simulationsmodell eines Stromwandlers mit Primär-, Sekundärwicklung, Eisenkern und Streuflusspfad

3.1 Validierung des Modells

Da es nicht möglich war den untersuchten Wandler messtechnisch mit der Simulation zu vergleichen, wird der Wandler hinsichtlich der Einhaltung der für ihn gültigen Normen überprüft. Es wird davon ausgegangen, dass der Wandler die in der Norm festgelegten Grenzwerte einhält. Die hier anzuwendende Norm DIN EN 61869-2 legt Grenzwerte für Messkerne für die Übersetzungsmessabweichung sowie den Fehlwinkel fest. Zudem wird festgelegt, dass die Grenzwerte bei allen Bürden zwischen 25%-100% der Bemessungsbürde eingehalten werden müssen. Die Bilder 5-7 zeigen die simulierten Ergebnisse für den 0,2S Messkern. Dabei ist zu sehen, dass für alle geforderten Bürden die Übersetzungsmessabweichung bis zu einem auf den Bemessungsstrom bezogenen Primärstrom von

200% eingehalten werden. Eine Abweichung ist hingegen beim Fehlwinkel zu beobachten. Dieser überschreitet die zulässigen Grenzwerte und kann daher mit der erstellten Simulation nicht befriedigend abgebildet werden. Die maximale Abweichung beträgt bei 20% des Bemessungsstromes +20 Winkelminuten.

Der 0,2S Messkern zeigt außerdem eine Übereinstimmung mit dem Überstrombegrenzungsfaktor $FS = 5$ und einer Gesamtmessabweichung von 10%.

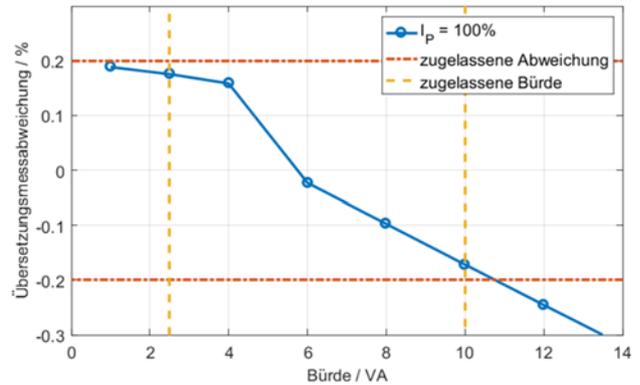


Bild 5 Übersetzungsmessabweichung des 0,2S Messkerns bei Bemessungsstrom und unterschiedlicher Bürdenleistungen

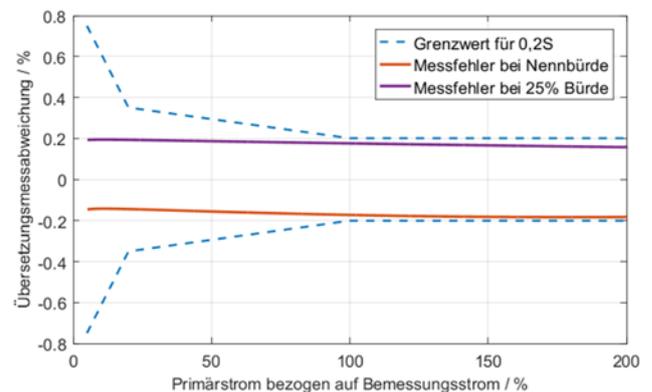


Bild 6 Übersetzungsmessabweichung des 0,2S Messkerns über den gesamten Primärstrombereich

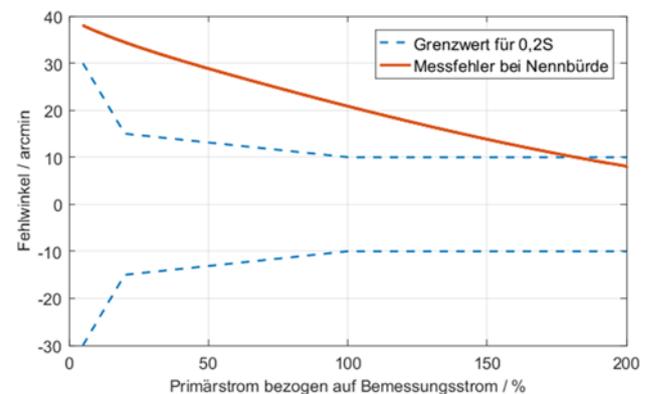


Bild 7 Winkelfehler des 0,2S Messkerns über den gesamten Primärstrombereich

Die Überprüfung des 5PR Schutzkerns zeigt keine Verletzung der in der Norm festgelegten Grenzwerte. Die Übersetzungsmessabweichung bei primärem Bemessungsstrom ergibt sich zu +0,002%, der Winkelfehler bei primärem Bemessungsstrom zu +11,72 Winkelminuten und die Gesamtmessabweichung bei Bemessungsgenauigkeitsgrenzstrom zu 0,3% wobei der Genauigkeitsgrenzfaktor $ALF = 60$ beträgt.

Der TPZ Schutzkern erfüllt mit einer Übersetzungsmessabweichung bei primärem Bemessungsstrom von -0,002% und dem Scheitelwert des Fehlers der Wechselstromkomponente von 0,4% die Anforderungen der Norm. Lediglich der Winkelfehler überschreitet bei primärem Bemessungsstrom mit 208,3 Winkelminuten den zulässige Grenzwert im 10,3 Winkelminuten.

Mit Ausnahme des Winkelfehlers beim 0,2S Mess- und TPZ Schutzkern hält das Simulationsmodell die Grenzwerte für die jeweiligen Genauigkeitsklassen ein und wird als hinreichend genau für die Abschätzung des Gleichstromeinflusses erachtet.

4 Verhalten von Stromwandlern bei Gleichstromeinfluss

Um das Verhalten der jeweiligen Kerne bei unterschiedlichen Gleichströmen zu untersuchen werden vier DC-Szenarien mit einem dem primären Bemessungsstrom überlagerten Gleichstrom von $I_{DC} = 0,1, 1, 10, 100$ A durchgeführt. Die jeweilige Simulation wird nach Erreichen eines stabilen eingeschwungenen Zustandes beendet. Je größer der überlagerte Gleichstrom desto schneller stellte sich ein stabiler Zustand ein auf dessen Grundlage eine Bewertung, wie schon bei der Validierung des Modells, vorgenommen wird.

Da bedingt durch die Sättigung eine Verzerrung des sekundären Ausgangsstromes entsteht, lässt sich der Fehlwinkel nicht mehr als konstanter Wert angeben. Der Fehlwinkel wird für die Auswertung jeweils zum Nulldurchgang des Stromes ermittelt. Je nach DC-Szenario kommt es hierbei zu sehr großen Variationen der beiden Werte.

Tabelle 1 zeigt die ermittelte Übersetzungsmessabweichung und den Fehlwinkel bei den jeweiligen Gleichstrombeeinflussungen für den 0,2S Messkern. Es ist deutlich zu sehen, dass bereits kleine Gleichströme von $I_{DC} = 0,1$ A zu einer Überschreitung des 0,2% Grenzwerts für die Übersetzungsmessabweichung führen.

Da die Simulation des 0,2S Messkerns ohne Gleichstrom bereits eine Abweichung des Fehlwinkels vom Grenzwerts gezeigt hat, kann die Auswirkung von Gleichströmen bis $I_{DC} = 10$ A nicht beurteilt werden. Bei $I_{DC} = 100$ A ist der Fehlwinkel jedoch so groß, dass trotzdem von einer Überschreitung der Grenzwerte ausgegangen werden kann.

Bild 8 zeigt deutlich den Einfluss der jeweiligen Gleichströme auf die magnetische Flussdichte innerhalb des Eisenkerns. Die durch den Gleichstrom hervorgerufene Verschiebung des magnetischen Flusses hängt nicht linear mit

der Intensität des Gleichstroms zusammen, sodass bereits kleine Gleichströme eine deutliche Verschiebung hervorrufen. Aufgrund der langen Simulationszeit ist in Bild 8 die 50 Hz Schwingung des anregenden Wechselstromes nicht mehr detailliert zu sehen. Der Wechselstrom erzeugt jedoch die konstante magnetische Wechselflussdichte $\Delta B_{50\text{ Hz}}$ die unabhängig vom Gleichstrom ist..

Tabelle 1 Einfluss von Gleichstrom auf den 0,2S Messkern

DC-Strom / A	Übersetzungsmessabweichung	Fehlwinkel
0,1	-0,511 %	22,31' – 22,88'
1	-0,55 %	22,9' – 24,15'
10	-0,88 %	21,4' – 39,9'
100	-3,36 %	-4,4' – 218'

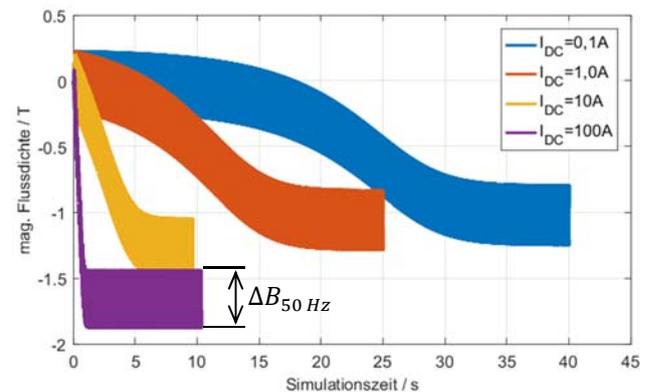


Bild 8 Verschiebung der magnetischen Flussdichte im 0,2S Messkern durch unterschiedliche Gleichströme

Die Beeinflussung des 5PR Schutzkerns ist in Tabelle 2 dargestellt. Aufgrund des zusätzlichen Luftspalts im Eisenkern des 5PR Schutzkerns kommt es durch den Gleichstrom zu fast keiner Beeinflussung der Übersetzungsabweichung. Auch der Fehlwinkel zeigt erst ab $I_{DC} = 100$ A eine potentielle Abweichung vom vorgegebenen Grenzwert von ± 60 Winkelminuten.

Ähnlich wie beim 5PR Schutzkern zeigt sich auch beim TPZ Schutzkern keine Beeinflussung der Übersetzungsmessabweichung bis zu einem Gleichstromanteil von $I_{DC} = 100$ A. Lediglich eine zunehmende Verzerrung des Fehlwinkels bei sehr großen Gleichströmen ist zu beobachten. Da die Simulation ohne Gleichstrom hier jedoch ebenfalls keine volle Übereinstimmung zeigt, muss auf eine Interpretation der Gleichströme auf den Fehlwinkel des TPZ-Kerns verzichtet werden.

Tabelle 2 Einfluss von Gleichstrom auf den 5PR Schutz-
kern

DC-Strom / A	Übersetzungsmess- abweichung	Fehlwinkel
0,1	0,0032 %	11,6° – 11,8°
1	0,0032 %	10,5° – 12,93°
10	0,00322 %	-0,43° – 23,87°
100	0,00136 %	-109,7° – 133,4°

Tabelle 3 Einfluss von Gleichstrom auf den TPZ Schutz-
kern

DC-Strom / A	Übersetzungsmess- abweichung	Fehlwinkel
0,1	0,0126 %	208,2° – 208,4°
1	0,0126 %	207,1° – 209,5°
10	0,0126 %	196,1° – 220,5°
100	0,0126 %	86,73° – 329,9°

5 Zusammenfassung

Durch die erstellte Simulation zeigt sich deutlich, welchen Einfluss unterschiedlich starke Gleichströme auf induktive Stromwandler in Hochspannungsnetzen haben. Durch den kommenden Einsatz von Gleichstromübertragungen steigen auch die Ursachen für Gleichströme in Übertragungsnetzen. Dadurch muss mit einer steigenden Beeinflussung von Stromwandlern gerechnet werden.

Beim Vergleich zwischen Mess- und Schutzwandlern zeigt sich, dass die Einbringung eines zusätzlichen Luftspalts in den Eisenkern ein wirksames Mittel ist, um den Einfluss von Gleichströmen drastisch zu reduzieren. Inwiefern es bei gleichstrombeeinflussten Schutzwandlern in Verbindung mit den angeschlossenen Schutzgeräten zu einer oder keiner Auslösung des Schutzes kommt muss weiterführend untersucht werden.

Eine deutliche Beeinflussung hinsichtlich der Übersetzungsmessabweichung zeigt sich hingegen bei Messwandlern ohne Luftspalt wie im hier untersuchten Fall. Durch den geschlossenen Eisenkern kommt es bereits bei kleinen Gleichströme im Bereich einiger hundert mA zu einer großen Verschiebung des magnetischen Wechselflusses, wodurch schnell Sättigungseffekte des Eisenkerns in Erscheinung treten. Dadurch kommt es auch schnell zu einer Überschreitung von den in der Norm geforderten und vom Hersteller garantierten Grenzwerte der Übersetzungsmessabweichung und des Winkelfehlers.

Daher ergibt sich ggf. die Notwendigkeit bei Anwendungen, welche eine äußerst genaue Messung mittels induktiven Stromwandern benötigen, zu überprüfen, ob die zu messenden Ströme als reine Wechselströme ohne Gleichanteile vorliegen.

6 Literatur

- [1] B. Rusek, „Ohmic coupling between AC and DC circuits on hybrid lines,“ Cigré - Symposium Auckland, 2013.
- [2] M. Beltle, „Betrachtung galvanisch eingekoppelter Gleichströme im Übertragungsnetz und deren Auswirkungen auf Leistungstransformatoren,“ in VDE-Hochspannungstechnik 2016, Berlin, 2016.
- [3] Holte, Kirby C., „Geomagnetic Disturbances and Electric Power Systems,“ IEEE Power Engineering Review, pp. Volume 9, Issue 7, 1989.
- [4] W.F. Davidson, „Einwirkungen des magnetischen Stromes vom 24. März 1940 auf Hochspannungsanlagen,“ Elektrotechnische Zeitschrift, Bd. 5, pp. 99-100, 30. Januar 1941.
- [5] R. L. Bailey, „Modelling geomagnetically induced currents in midlatitude Central Europe using a thin-sheet approach,“ Copernicus Publications, 2017.
- [6] D. A. Vernon, „Electric and Magnetic Fields at the Earth's Surface Due to Auroral Currents,“ IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 578-584, April 1970.
- [7] Siemens AG, „High Voltage Direct Current Transmission,“ 24 11 2017. [Online]. Available: https://www.energy.siemens.com/rupool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology.pdf. [Zugriff am 24 11 2017].
- [8] Jiles D.C., Atherton D.L., „Ferromagnetic hysteresis,“ IEEE Transactions on magnetics, pp. 2183-2185, 5 September 1983.
- [9] Jiles D.C., Atherton D.L., „Theory of ferromagnetic hysteresis,“ Journal of Magnetism and Magnetic Materials 61, pp. 48-60, 1986.
- [10] M. Schühle, M. Beltle, S. Tenbohlen und D. Bonmann, „Entwicklung eines Simulationsmodells für Leistungstransformatoren zur Betrachtung magnetischer Flüsse bei Sättigung,“ in VDE Hochspannungstechnik, Berlin, 2016.