

Niederfrequente Sternpunktströme 2 Dossier



Oktober 2021



TU Graz Institut für Elektrische Anlagen und Netze Inffeldgasse 18/I 8010 Graz Austria

Institutsvorstand

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr. Robert Schürhuber | robert.schuerhuber@tugraz.at | +43 (0) 315 873 7550

Projektleitei

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Herwig Renner | herwig.renner@tugraz.at | +43 (0) 316 873 7557

Ausarbeitung

Dennis Albert, M. Sc. | <u>dennis.albert@tugraz.at</u> | +43 (0) 316 873 7568 Dipl.-Ing. Philipp Schachinger | <u>philipp.schachinger@tugraz.at</u> | +43 (0) 316 873 8054

Oktober 2021

1 Motivation

Das gemeinsame Projekt "Niederfrequente Sternpunktströme" von Siemens Energy, Austrian Power Grid (APG) und dem Institut für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN) der TU Graz wurde erstmals 2015 initiiert. Aufgrund erhöhter Betriebsgeräusche von Transformatoren in einem Umspannwerk der APG wurden Messungen im Transformatorsternpunkt durchgeführt. Die Vermutung: geomagnetisch induzierte Ströme (engl. GIC) könnten die Ursache für die Geräuschzunahme sein.

Geomagnetisch induzierte Ströme werden durch zeitliche Änderungen im Erdmagnetfeld hervorgerufen. Das Magnetfeld der Erde durchdringt die Erdoberfläche und den Erdboden bis in mehrere 100 km Tiefe. Im elektrisch leitfähigen Erdboden induziert das Magnetfeld ein elektrisches Feld, gemäß dem Induktionsgesetz.

Die absolute Größe des Erdmagnetfeld bewegt sich im Bereich von 1.000-3.000 nT, also $1~\mu$ T bis $3~\mu$ T. Durch Sonnenstürme kommt es zu Erdmagnetfeldänderungen in der Größenordnung von 10~nT/min bis mehrere 100~nT/min. Diese Magnetfeldänderungen führen zur Induktion eines elektrischen Feldes in der Erdoberfläche von mehreren 10~mV/km bis mehrere 100~mV/km. Über eine Entfernung von mehreren 100~km kommt so eine Spannung von 1~V bis mehrere 10~V zusammen. Abbildung 1~V zeigt den beispielhaften Verlauf des Erdmagnetfeldes über eine Woche im Oktober 2021~kmit deutlichen Störungen des Erdmagnetfeldes am 12.10.2021.

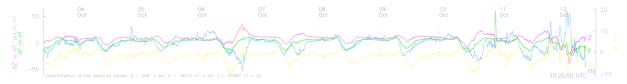


Abbildung 1: Erdmagnetfeldänderungen in Süd-Nord (D), West-Ost (H) und Richtung Erdmittelpunkt (Z), sowie der Betrag des Erdmagnetfeldes (F) über 1 Woche, gemessen am Geoforschungszentrum Potsdam/Deutschland

Sonnenstürme (Abbildung 2) entstehen auf der Sonne, durch das Aufreißen von Magnetfeldern, wodurch große Mengen geladener Teilchen ins Weltall geschleudert werden. Fliegen die geladenen Teilchen Richtung Erde treffen sie mit mehreren 100 km/s auf das Erdmagnetfeld. Das Erdmagnetfeld kann man sich dabei wie einen Ballon vorstellen, der durch die auftreffenden Teilchen zusammengedrückt wird. Durch diese zeitliche Stauchung oder Änderung des Erdmagnetfeld entstehen geomagnetisch induzierte Ströme. Dieser Vorgang ist vor allem im Hohen Norden in Form der Polarlichter sichtbar.

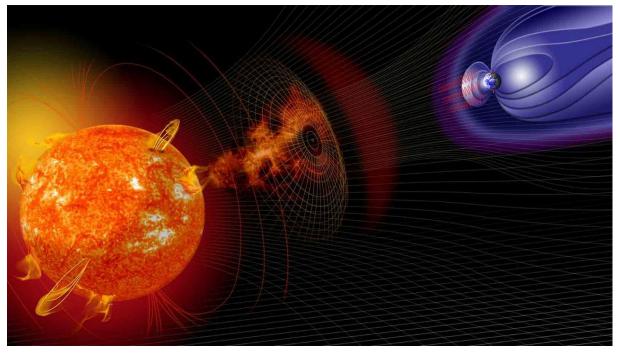


Abbildung 2: Sonnensturm und das Erdmagnetfeld | Quelle: NASA

In unserem starr geerdeten Hoch- und Höchstspannungsnetz (220 kV und 380 kV) in Österreich sind die Sternpunkte der Netzkuppeltransformatoren direkt mit der Erde des Umspannwerks verbunden. Die beiden

entfernten geerdeten Transformatorsternpunkte sind mit einem unterschiedlichen Erdpotential verbunden. Die Potentialdifferenz zwischen den beiden geerdeten Sternpunkten verhält sich wie der Plus- und Minus-Pol einer Spannungsquelle die mit einem kleinen ohmschen Widerstand verbunden sind. Der ohmsche Widerstand besteht in diesem Fall aus den Wicklungswiderständen der Transformatoren, der Leitungswiderstand und dem Widerstand des Umspannwerkes zur Erde. Bei einem elektrischen Feld von mehreren 10 mV/km bis mehreren 100 mV/km und einer Entfernung von mehreren 100 km kommen so mehrere Volt bis mehrere 10 V Spannung zusammen. Bei Wicklungswiderständen von 100 m Ω und Leitungswiderständen von wenigen Ohm kann somit schnell ein Strom von mehreren 10 A und mehr zu Stande kommen. In Abbildung 3 ist beispielhaft eine solche Konstellation aus zwei Transformatoren mit starr geerdetem Sternpunkt und einer Freileitung dargestellt. Durch eine Erdmagnetfeldänderung in Nord-Süd-Richtung ($\partial H_x/\partial t$) kommt es zur Induktion eines elektrischen Feldes in Ost-West-Richtung (E_y).

Da Magnetfeldänderungen (nT/min) im Vergleich zu unserer 50 Hz-Netzfrequenz sehr langsam sind, können die geomagnetisch induzierten Ströme auch als quasi-Gleichstrom verstanden werden.

Die geomagnetisch induzierten Ströme oder der quasi-Gleichstrom führt zur Sättigung vom Transformatorkern. Durch die Halbzyklussättigung der Transformatoren kommt es zur Strom- und Spannungsverzerrung, zur Zunahme der Betriebsgeräusche der Transformatoren, zur Erwärmung der Transformatoren, zur gesteigerten Blindleistungsaufnahme der Transformatoren und ggf. zur Schutzauslösung. Damit wird die Stabilität und Versorgungssicherheit des Stromnetzes negativ beeinträchtigt. Im schlimmsten Fall kann es zu einem Totalausfall – dem Blackout – führen, wie z. B: 1989 in Quebec/Kanada.

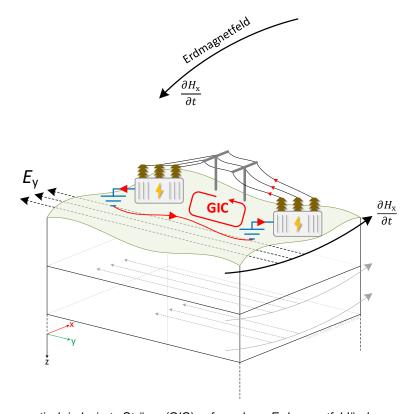


Abbildung 3: Geomagnetisch induzierte Ströme (GIC) aufgrund von Erdmagnetfeldänderungen $(\partial H_x/\partial t)$, die ein elektrisches Feld in Y-Richtung (E_y) induzieren

2 Messung von geomagnetisch induzierten Strömen (GIC)

Zur Messung von geomagnetisch induzierten Strömen in Österreich wird ein selbst entwickeltes Messsystem des IEAN eingesetzt. Dabei wird der Transformatorsternpunktstrom im jeweiligen Umspannwerk gemessen. In Abbildung 4 sind die aktuellen Umspannwerke im Netz der APG markiert, die mit Sternpunktmesssystem des IEAN ausgestattet sind.

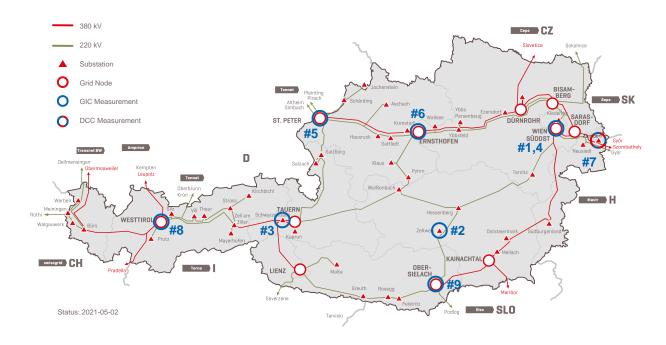


Abbildung 4: Aktueller Stand der installierten Transformatorsternpunktmesssysteme

Die Elektronik (Abbildung 7) des Messsystems (Abbildung 6) besteht aus einem Stromwandler, einem aktiven Tiefpassfilter und einem Einplatinencomputer.

Der aktive Tiefpass, mit einer Grenzfrequenz von 0,7 Hz, filtert z. B. die 50 Hz-Netzfrequenz oder die Frequenz der ÖBB (16,7 Hz) aus dem Messsignal heraus. Dadurch werden nur langsam veränderliche Ströme, also quasi-DC aufgezeichnet. Durch den aktiven Tiefpassfilter kann das Volumen der Messelektronik gegenüber eines passiven Tiefpassfilters deutlich reduziert werden.

Als Einplatinencomputer kommt ein Rasberry Pi zum Einsatz. Der Einplatinencomputer tastet das Messsignal mit einer Frequenz von 1 Hz ab, speichert die Uhrzeit, die Temperatur und den Messwert in einer Datei und macht die Daten via UMTS von außen zugänglich. Damit ist das Messsystem unabhängig von der Netzwerkinfrastruktur des Stromnetzbetreibers.

Zur Messung des Transformatorsternpunktstroms wird aktuell eine mobile Erdungsgarnitur verwendet, dessen Kabel durch den Stromwandler des Messsystems geführt wird. Mit der mobilen Erdungsgarnitur wird der Erdungsschalter überbrückt. Für die Messung ist der Erdungsschalter geöffnet, damit kein Stromteiler mit der Erdungsgarnitur entsteht. Abbildung 5 zeigt das installierte Messsystem im 220 kV Sternpunkt.



Abbildung 5: Installiertes Messsystem im 220 kV Sternpunkt eines Netzkuppeltransformators



Abbildung 6: Schaltschrank des Messsystems mit Messelektronik, Stromwandler und Schaltschrankheizung



Abbildung 7: Messelektronik mit UMTS-Stick auf Universalhalterung

Die Langzeitmessungen werden verwendet um die Netzberechnung zu validieren und zu verbessern. Zudem konnten mit den Messungen auch andere Quellen von quasi-DC identifiziert werden. Hier ist z. B. die Wiener U-Bahn zu nennen, die mit DC betrieben wird. Durch Streuströme zwischen dem isolierten U-Bahn System und der Erde sind Teile des Streustroms im Hochspannungsnetz bis zu mehreren 100 km von Wien entfernt zu messen. Andere Q uellen wie z. B. leistungselektronische Systeme, die im Verdacht stehen auch einen geringen Gleichstrom zu verursachen, sind Gegenstand aktueller Untersuchungen.

3 Transformatoren und der Einfluss von Sonnenstürmen

Zur Untersuchung des Einflusses von quasi-DC wurde am IEAN zusammen mit der APG und Siemens Energy eine Hochspannungszelle eingerichtet. Abbildung 8 zeigt das Projektteam des IEAN und die Kollegen von Siemens Energy.



Abbildung 8: Übergabe der Hochspannungsprüfzelle am IEAN v.r.n.l.: Siemens Energy - Martin A. Stössl, Gerald Leber IEAN – Herwig Renner, Philipp Schachinger, Dennis Albert

Für die Untersuchungen stehen zwei umgebaute 3-Schenkel 50 kVA Transformatoren und ein 5-Schenkel 60 kVA Transformator zur Verfügung.

Die beiden ehemaligen 50 kVA Verteilnetztransformatoren waren als Yzn5 Transformatoren gebaut. Für die Laboruntersuchungen wurden alle 12 Anschlüsse der z-Wicklung nach außen geführt und der Hochspannungssternpunkt mit einer Durchführung nach außen geführt. Die Umbauarbeiten erfolgten im Rahmen einer Bachelorarbeit am IEAN. Ein Zeitraffervideo des Umbaus ist auf der Homepage des Instituts unter folgendem Link zu sehen: https://tinyurl.com/Zeitraffervideo

Da im Übertragungsnetz vor allem 5-Schenkeltransformatoren als Netzkuppeltransformatoren zum Einsatz kommen, wurde von Siemens Energy ein 5-Schenkel 60 kVA Transformator am Standort Linz und Weiz gefertigt.

Bei der Überlagerung von GICs ist ein Gleichstrom in allen drei Phasen überlagert. Im Kern wird so ein Gleichfluss induziert der die gleiche Phasenlage in allen drei Schenkeln hat. Im Falle des 3-0 Kerns des 3-Schenkeltransformators kann der Gleichfluss sich nur über das Öl und das Gehäuse wieder schließen. Eine wichtige Kenngröße dabei ist die Nullimpedanz des Transformators. Beim 3-2 Kern des 5-Schenkeltransformators kann sich der Gleichfluss über die beiden äußeren unbewickelten Schenkel schließen. Die Nullimpedanz ist im Falle des 5-Schenkeltransformators deutlich geringer als die des 3-Schenkeltransformators. Dies erklärt warum vor allem 5-Schenkeltransformatoren bei geringeren Gleichströmen in die Halbzyklussättigung gelangen als 3-Schenkeltransformatoren.

Negative Folgen des überlagerten Gleichstroms im Transformator sind Geräuschzunahme, gesteigerte Blindleistungsaufnahme, Erwärmung sowie Strom- und Spannungsverzerrung. Zusätzlich können durch die genannten Primärfolgen sekundäre Probleme, wie z. B. Schutzrelaisauslösungen oder Gasbildungen im Transformator hervorgerufen werden. Beispielsweise führen 75 mA DC pro Phase bei den 50 kVA Transformatoren

zu einer deutlichen Zunahme der Betriebsgeräusche. Eine Hörprobe ist unter folgendem Link zu finden: https://tinyurl.com/Transformatorgeraeusche

Im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojekts werden elektromagnetische Computermodelle von Transformatoren erstellt, die die gleiche Topologie wie die Transformatoren aufweisen. Mit Hilfe von Werksabnahmeprüfungen und einer zusätzlichen Hysteresemessung am fertigen Transformator werden die Computermodelle parametriert. Dieses Verfahren zeigt sich bisher als vielversprechend um ein Modell der Transformatoren zu erstellen, dass das gleiche Klemmenverhalten hinsichtlich Strom und Spannung aufweist wie in den Labormessungen. In Abbildung 9 ist ein Vergleich zwischen Simulation (rot) und Messung (schwarz strichliert) dargestellt. Dabei wurde zwei Modellansätze verglichen. Im ReCap-Model ist der Transformatorkern und die Wicklungen vollständig in der magnetischen Domaine, als Widerstand und Kapazität, modelliert. Beim Dualitätsmodel ist der Kern und die Wicklungen in der elektrischen Domaine, als Widerstand und Induktivtität, modelliert. Verglichen wird die Hysteresecharaktersitik, der magnetische Fluss, sowie der Stromverlauf. Alle drei Verläufe zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen Model und Simulation.

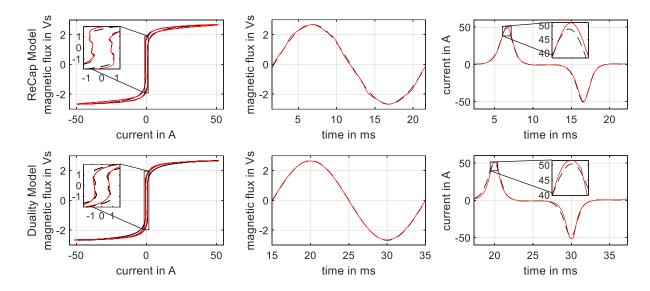


Abbildung 9: Erste Vergleiche der Labormessungen (schwarz strichliert) mit den Simulationen (rot) zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen Model und Messung

4 Der Einfluss von Sonnenstürmen auf das österreichische Stromnetz

Zur Berechnung von GICs im österreichischen Übertragungsnetz wurde ein eigenes Programm am IEAN programmiert, das über eine Benutzeroberfläche bedient werden kann. Abbildung 10 zeigt die graphische Benutzeroberfläche "Low Frequency Current Simulator" des IEAN. Das Programm ist kostenlos herunterladbar und beinhaltet Beispieldaten, mit denen das Programm sofort ausgeführt und ausprobiert werden kann. Prinzipiell kann das Programm aber mit jedem beliebigen Stromnetz und Magnetfelddaten verwendet werden. Aus den Magnetfelddaten wird das induzierte elektrische Feld im Erdboden berechnet. Unter Verwendung der Netzdaten mit geographischer Ortsangabe der Transformatoren und Leitungen wird die Stromaufteilung im Netz berechnet. Die Ergebnisse werden in Abschnitt C graphisch dargestellt und können abgespeichert werden. Weitere Funktionen des Programms beinhalten eine Sensitivitätsanalyse, womit die Empfindlichkeit von Transformatoren für Magnetfelder aus verschiedenen Richtungen bestimmt werden kann. Weitere Funktionen wie z. B. die Blindleistungsaufnahme von Transformatoren sind aktuell in Arbeit. Für die Verwendung ist ein Handbuch herunterladbar, das die Funktionen genauer erklärt.

Unter folgendem Link kann das Programm als .exe kostenlos heruntergeladen werden:

https://github.com/P-Schachinger/LFC_simulator

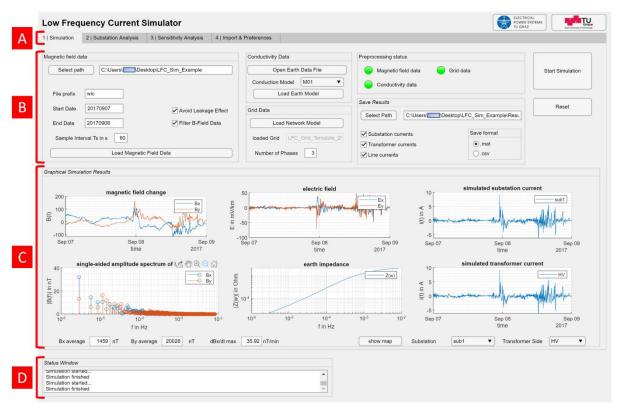


Abbildung 10: Low Frequency Current (LFC) Simulator des IEAN

Im Rahmen des Projekts wurden auch weitere Quellen von niederfrequenten Sternpunktströmen, neben den GICs, indentifiziert. Zum Beispiel trägt die Wiener U-Bahn, die mit DC betrieben wird, mit wenigen 100 mA zum Sternpunktstrom im UW Wien-Südost bei. Mit Hilfe einer Frequenzanalyse der gemessenen Sternpunktströmen und der Korrelation mit den Betriebszeiten der Wiener U-Bahn konnte diese als weitere Quelle niederfrequenter Sternpunktströme identifiziert werden. In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die gemessenen Sternpunktströme des 220 kV und 380 kV-Sternpunkts im Umspannwerk Wien-Südost über eine Woche dargestellt. Abbildung 11 zeigt die Verläufe vor der Corona-Pandemie 2020, wo am Wochenende die U-Bahn 24 h in Betrieb war. Abbildung 12 zeigt die Verläufe während der Anfangszeit der Corona-Pandemie 2020, wo der Betrieb der U-Bahn in den Nachstunden des Wochenendes eingestellt wurde. In den orange markierten Bereichen ist zu sehen, dass vor der

Corona-Pandemie die Sternpunktströme in den Nachtstunden am Wochenende nicht vollständig auf 0 A absinken. Während der Corona-Pandemie, sinken die Ströme jedoch auch am Wochenende auf 0 A ab. Zudem ist ein Tag/Nach-Rhythmus im Stromverlauf zu erkennen. Die U-Bahn beendet i.d.R. ihren Betrieb gegen 2 Uhr morgends und nimmt den Betrieb um ca. 5 Uhr wieder auf. Während den Betriebszeiten der Wiener U-Bahn sind daher höherere Sternpunktstrom gemessen worden, als zu den Ruhezeiten.

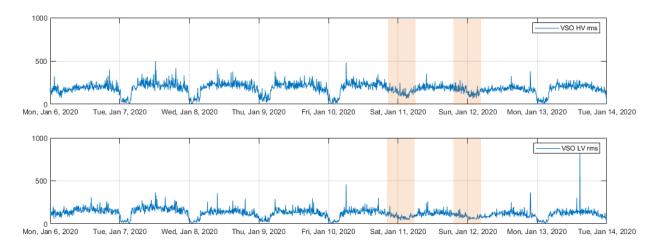


Abbildung 11: Sternpunktstrom im 220 kV und 380 kV Sternpunkt im UW Wien Südost vor der Corona-Pandemie 2020

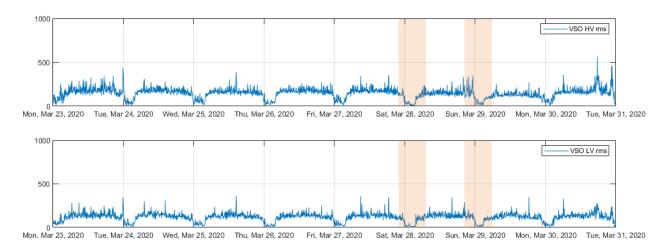


Abbildung 12: Sternpunktstrom im 220 kV und 380 kV Sternpunkt im UW Wien Südost während der Corona-Pandemie 2020

5 Publikationen

- [1] R. L. Bailey *et al.*, "PREDSTORM and SOLARWIND2GIC: Forecasting of Space Weather Effects and GIC with Python," Amsterdam, Netherland, Sep. 16 2019-Sep. 20 2019. Accessed: Apr. 25 2020. [Online]. Available: https://ml-helio.github.io/
- [2] A. Fröhlich, "Sternpunktmesssystem," Bachelor Thesis, Institute of Electrical Power Systems, Graz University of Technology, Graz, 2021.
- [3] Rachel L. Bailey, R. Leonhardt, C. Möstl, P. Schachinger, and D. Albert, "Hsitorical Analysis of Geomagnetic Stor Scales in Austria," in vol. 6, *COBS Journal: Scientific Contributions 2019-2020*, Zentralanstalt für Meterologie und Geodynamik, Ed., 2020, p. 5.
- [4] P. Schachinger and D. Albert, *LFC Simulator*: Institute of Electrical Power Systems, 2021. Accessed: Aug. 17 2021. [Online]. Available: https://github.com/P-Schachinger/LFC_simulator
- [5] D. Albert, P. Schachinger, H. Renner, P. Hamberger, F. Klammer, and G. Achleitner, "Field experience of small quasi DC bias on power transformers A first classification of low-frequency current pattern and identification of sources," in *Cigre Session 48*, Paris, 2020.
- [6] D. Albert, P. Schachinger, and H. Renner, "Method for measuring magnetic flux in a magnetic component,"
- [7] P. Schachinger, D. Albert, H. Renner, R. L. Bailey, G. Achleitner, and G. Leber, "Niederfrequente Sternpunktstroeme im Ubertragungsnetz Ein Ueberlick ueber aktuelle und zukuenftige Forschung in Oesterreich," in 16. Symposium Energieinnovations, Graz, Austria, 2020.
- [8] Rachel L. Bailey *et al.*, "Predicting GICs from L1 solar wind data using geophysical methods in combination with machine learning," online, 2020. Accessed: Jan. 18 2021. [Online]. Available: https://agu.confex.com/agu/fm20/meetingapp.cgi/Paper/726940
- [9] P. Schachinger, D. Albert, and H. Renner, "Geomagnetically induced currents: A measurement based inverse determination of earth impedances," in 2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Middlesbrough, United Kingdom, Aug. 2021 - Sep. 2021, pp. 1–5.
- [10] P. Schachinger, D. Albert, H. Renner, R. L. Bailey, G. Achleitner, and G. Leber, "Niederfrequente Sternpunktströme im Übertragungsnetz: Ein überblick über aktuelle und zukünftige Forschung in Österreich," Graz, Feb. 12 2020.
- [11] P. E. Wohlfart, "Aufbau und Verifikation eines Systems zur Messung von Sternpunktströmen an Leistungstransformatoren," Bachelor Thesis, Institute of Electrical Power Systems, Graz University of Technology, Graz, 2020.
- [12] B. Taupe, "Umbau zweier Leistungstransformatoren zur flexiblen Änderung der Schaltgruppe," Bachelor Thesis, Institute of Electrical Power System, Graz University of Technology, Graz, 2020.
- [13] P. Schachinger, D. Albert, Rachel L. Bailey, G. Achleitner, and H. Renner, "Geomagnetically Induced Current Measurement in the Austrian Transmission Grid," in vol. 6, *COBS Journal: Scientific Contributions* 2019-2020, Zentralanstalt für Meterologie und Geodynamik, Ed., 2020, p. 6.
- [14] M. Rüschitz, "Einfluss und Modellierung von niederfrequenten Strömen auf Leistungstransformatoren: Influence and modelling of low-frequency currents on power transformers," Master Thesis, Institute of Electrical Power Systems, Graz University of Technology, Graz, 2020.
- [15] A. Prohammer, M. Rüschitz, D. Albert, and H. Renner, "Transformer Saturation Methods and Transformer Response to Low Frequency Currents," in *Power and Energy Student Summit (PESS)*, TU Darmstadt, Ed., 2020. Accessed: Jan. 29 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9273802
- [16] A. Prohammer, "Messung des Einflusses von niederfrequenten Strömen auf Dreiphasentransformatoren: Measurement of the influence of low-frequency currents on three-phase power transformers," Master Thesis, Institute of Electrical Power Systems, Graz University of Technology, Graz, 2020.
- [17] D. Maletic, "Eletrocmagnetic Model of a Power Transformer for Low Frequencies," Master Thesis, Institute of Electrical Power Systems, Graz University of Technology, Graz, 2021.
- [18] D. Albert, D. Maletic, and H. Renner, "Measurement based transformer modelling approach," in *ETG Congress* 2021, 2021, pp. 1–6. Accessed: Oct. 11 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9469662
- [19] D. Albert, T. Halbedl, H. Renner, R. L. Bailey, and G. Achleitner, "Geomagnetically induced currents and space weather A review of current and future research in Austria," in 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC): Proceedings: 3-6 September 2019, Bucharest, Romania, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1–6. Accessed: Jun. 6 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/8893515