

LICHTWELLENLEITER ZUR STROMMESSUNG IN HOCHSPANNUNGSSYSTEMEN - SCHNELL, SÄTTIGUNGSFREI UND ISOLIERT

Reinhard KLAMBAUER¹, Werner Schöffner², Philipp TRAMPITSCH¹, Johannes MANDL¹, Jürgen PLESCH²

Einleitung

Der immer komplexer werdende Verbund aus Stromerzeugern und -abnehmern stellt die aktuelle Energieübertragungsinfrastruktur vor große Herausforderungen. Dies gilt aber nicht nur für die Übertragungsinfrastruktur an sich, sondern auch die im Feld eingesetzten Messwandler zur Strommessung in Hochspannungssystemen. Beispielsweise treten durch den Einsatz von immer leistungsstärkeren Wechsel- und Gleichrichtern im Übertragungsnetz Quasi DC Ströme, Ströme mit einer sehr geringen Frequenz, auf. [1] Solche Quasi DC Ströme werden messtechnisch derzeit meist im Sternpunkt als Verschiebestrom erfasst, um die Messung mit konventionellen Wandlern abseits des Hochspannungspotential und ohne überlagertem AC Anteil durchzuführen. Jedoch geht damit die Information über die Aufteilung des Stromes in den Phasen verloren. Eine weitere Herausforderung ist die Detektion von immer hochfrequenten Stromkomponenten im Bereich von hunderten Kilo- bis hin zu Megahertz, welche als Störungen in der Netzinfrastruktur auch bei Spannungen von 110 kV und höher auftreten. Beispiel hierfür können Rückzündungen beim Öffnen von Leistungsschaltern sein. Neue Leistungsschalbertechnologien werden aufgrund der „European F-gas Regulation (EU) 2024/573“ einen signifikanten Teil der SF₆ Schaltanlagen ersetzen. Die Kombination von solchen Messaufgaben stellt hohe Anforderungen im Bereich Bandbreite, Störfestigkeit und Isolationsfestigkeit. Diese Anforderungen können mit herkömmlichen Strommessmethoden nur teilweise und nicht gesamt abgedeckt werden. Die bemerkenswerten Vorteile einer Lichtwellenleiter basierten Strommessung (fiber optical current sensor, FOCS) gegenüber herkömmlichen Induktiven- oder Halleffektwandlern sind eine Bandbreite die theoretisch nur durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht beschränkt ist („SCHNELL“), das Fehlen von Sättigungseffekten aufgrund der Frequenz und Amplitude des Magnetfelds („SÄTTIGUNGSFREI“), die intrinsische, galvanische Trennung und ihre Anpassungsfähigkeit für Anwendungen wie Gleichstrommessungen auf hohen Potenzialen („ISOLIERT“).

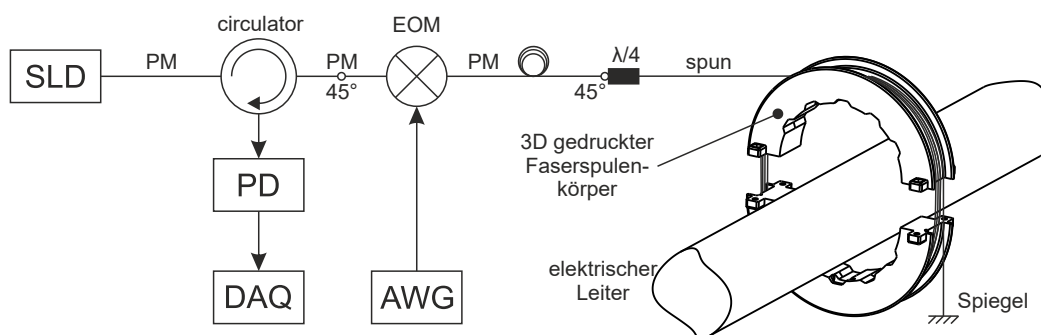


Abbildung 1: Schematische Darstellung des faseroptischen Sagnac-Interferometers mit einer Messspule aus spun Faser, einschließlich des 3D-gedruckten Spulenkörpers.

Das in dieser Arbeit verwendete Prinzip der faseroptischen Stromsensoren (FOCS) basiert auf dem Faraday-Effekt, einer inhärenten Eigenschaft dielektrischer Materialien. Die phänomenologische Beschreibung dieses Effekts ist, dass in Gegenwart eines Magnetfelds entlang der

¹ Technische Universität Graz – Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik, Inffeldgasse 33 8010 Graz, +43 (0)316 873 30571, ems@tugraz.at, <https://ems.tugraz.at>

² ARTEMES GmbH,

Eibiswald 105 Eibiswald 8552, +43 3466 42071, sales@artemes.org, <https://www.artemes.org>

Ausbreitungsrichtung einer polarisierten elektromagnetischen Welle die Polarisationssebene dieser Welle eine Drehung erfährt. Diese Drehung kann direkt durch Messung der Intensität der orthogonalen Komponenten gemessen werden. Obwohl dies insbesondere bei faserbasierten Lösungen eine sinnvolle Option ist, ist die Verwendung von zirkular polarisiertem Licht in Kombination mit einem Sagnac-Interferometer als Auswertung vorteilhaft. In solchen Lösungen kann die Nicht-Reziprozität des Faraday-Effekts genutzt werden, um zwischen Änderungen der Polarisation, die durch mechanisch induzierte Doppelbrechung verursacht werden, zu unterscheiden. Durch Hinzufügen eines Modulators kann auf die Auswertung einer absoluten Intensität an der Fotodiode verzichtet werden. [4,7] Das verwendete optische System ist in Abbildung 1 dargestellt, eine detaillierte Beschreibung dieses Aufbaus findet sich in einer früheren Arbeit. Die Empfindlichkeit des Aufbaus wird durch die induzierte Faraday-Rotation $\Delta\varphi_F$ bestimmt, die durch die folgende Gleichung gegeben ist, wobei die Verdet-Konstante V der elektrische Strom I und die Anzahl der Faserschleifen N um den Stromleiter ist.

$$\Delta\varphi_F = 4 \cdot V \cdot N \cdot I$$

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Einsatz von Lichtwellenleitern zur Strommessung in Hochspannungssystemen zur Lösung messtechnischer Aufgaben welche konventionell so nicht durchführbar sind.

„SCHNELL“

Im Gegensatz zu herkömmlichen induktiven Wandlern gibt es bei FOCS keine induktive Kopplung zwischen der zu messenden Leitung und der Messeinrichtung. Damit wird die Bandbreite der Messung nicht durch das Frequenzverhalten der Induktivität der Messeinrichtung selbst beschränkt. Je nach Auswertemethode können FOCS Bandbreiten im Megahertzbereich realisieren. Als Beispiel wird eine Messung während Tests an Leistungsschaltern in einem österreichischen Umspannwerk gezeigt. Im Zuge dieser konnten Rückzündungen der Schaltkontakte mit Hilfe von einem FOCS System aufgezeichnet werden. Dabei handelt es sich um Events mit einer Bandbreite größer 100 kHz. [2] Solche Tests dienen dazu, die Leitungsunterbrechungsfähigkeit der installierten Leistungsschalter bei Erdschlussereignissen zu überprüfen. Die Ergebnisse dieser Messung konnten zur Beschreibung des Schalterverhaltens herangezogen werden. [3]

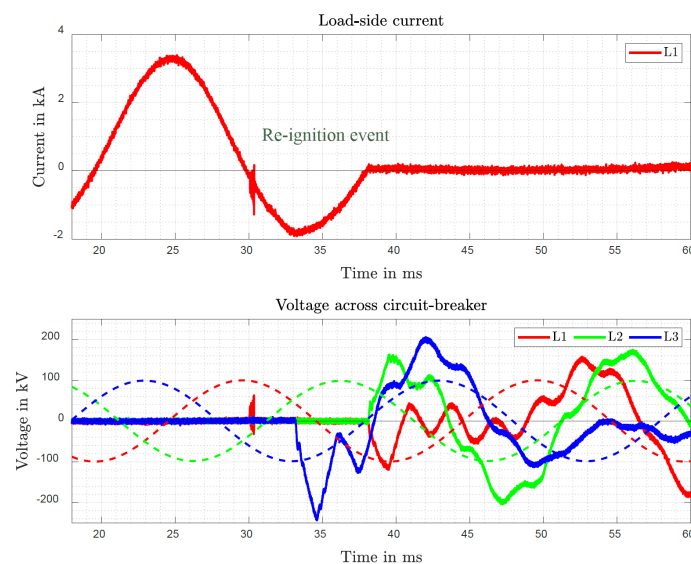


Abbildung 2: Strom durch den Leistungsschalter (oben) und Spannung über dem Leistungsschalter (unten) bei einem dreiphasigen Klemmenkurzschluss [3]

Abbildung 2 zeigt die faseroptische Strommessung der Phase L1 und die Spannung über dem Leistungsschalter während des Löschvorgangs bei einem dreiphasigen Kurzschluss. Der Kurzschlussstrom beträgt etwa 2,5 kA. Bei 0 ms sendet das zuständige Schutzrelais ein Auslösesignal an den Vakuum-Leistungsschalter. Bei etwa 30 ms ist ein deutlicher Spitzenwert im Strom und in der Spannung der Phase L1 zu erkennen, der als Wiederzündung identifiziert wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der erste Stromnullpunkt etwa 1 ms nach der Öffnungszeit von etwa 29 ms auftritt.

„SÄTTIGUNGSFREI“

Das rein optische Messprinzip von FOCS besitzt keine Hysterese Effekte auf Grund von Übersteuerung. Selbst nach einer Aussteuerung weit über den dimensionierten Messbereich hinaus kehren diese Systeme sofort zu ihrem Nullpunkt zurück. Bei Kurzschluss tests in einem 110-kV-Stromnetzsegment wurde ein FOCS-System an einer Phase installiert. Abbildung 1 (li.) zeigt ein Ergebnis und den Vergleich mit einem induktiven Wandler, der schattierte Bereich zeigt die Zeit des aktiven Kurzschlusses an. [5] Wie in Abbildung 1 dargestellt, kann das Kurzschlussmodell problemlos an die gemessenen FOCS-Daten angepasst werden. Im Vergleich zum Ergebnis des induktiven Wandlers würde eine Schätzung mit dem gleichen Modell zu unrealistischen Ergebnissen führen, einschließlich einer Überschneidung der Gleichstromkomponente mit der Nulllinie. Dies ist auf die Kernsättigung des induktiven Wandlers zurückzuführen und führt zu einer Verschiebung des Nullpunkts während sowie nach dem Ereignis.

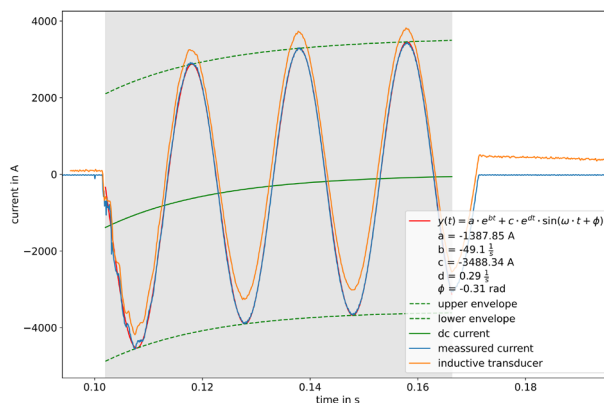


Abbildung 3: Vergleich Kurzschlussstrommessung FOCS,

Diese Messung demonstrierte den Einsatz von FOCS zur Überwachung von Fehlerströmen bei Kurzschlussereignissen und deren unkomplizierte Installation an bestehenden Stromleitungen. Mit den gemessenen Daten war es möglich, die Quasi-Gleichstromkomponente gemäß der Norm zu extrahieren. [6] Durch den Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen der installierten induktiven Wandler konnten eine Reihe von Vorteilen aufgezeigt werden. Dazu gehören ein niedrigerer Rauschpegel bei gleicher Abtastrate, ein stabiler Nullpunkt mit sofortiger Rückkehr zur Basislinie nach dem Hochstromereignis, was genaue Messungen in schneller Folge ermöglicht. Darüber hinaus wird die höhere Bandbreite des FOCS deutlich, wenn man den zeitlichen Verlauf des Stroms während der ersten Halbwelle beobachtet.

„ISOLIERT“

Zur Messung der beschriebenen Beispiele konnten die Lichtwellenleiter basierten Messköpfe direkt auf Hochspannungspotential ohne die Verwendung von Isolatoren installiert werden. Die zum Einsatz kommenden Fasern wurden bereits auf eine Spannungsfestigkeit von 150 kV getestet. Dies erlaubt es Messungen Ziel gerichtet und ohne großen baulichen Aufwand auf Leitern in verschiedenen Spannungsebenen durchzuführen. Abbildung 4 zeigt als weiteres Beispiel einer Messung aus dem Projekt FORESEEN. Damit konnte in Österreich erstmals ein geomagnetisch induzierter quasi DC Strom während des Betriebs auf einer Phase bei 220 kV gemessen werden. [4]



Abbildung 4: Geomagnetisch induzierter quasi DC Strom auf einer Phase bei 220 kV [4]

Laut der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) werden Sonnenstürme anhand der Weltraumwetterskala G1 bis G5 kategorisiert, die die zunehmende Intensität und potenziellen Auswirkungen widerspiegelt (NOAA Space Weather Prediction Center, 2023). Am 1. Januar 2025 wurde ein geomagnetischer Sturm der Klasse G3 registriert. Der Nullfluss-CT im geerdeten Transformator-Neutralleiter zeichnete eine maximale Gleichstromamplitude von 12,2 A auf. Das FOCS System zeichnete eine Gleichstromkomponente mit einer maximalen Amplitude von 8,4 A aus. Dies zeigte zum ersten Mal, dass GICs auch auf der nicht geerdeten Transformatorseite auftreten. [4] Allerdings lassen sich die Stromamplituden und -dynamiken aufgrund der unterschiedlichen Positionen der beiden Messungen nicht direkt vergleichen.

Da das FOCS System den Wechselstrom permanent mit ein Abtastrate von 5 kHz aufzeichnet konnte eine Oberschwingungsanalyse durchgeführt werden. In Leistungstransformatoren verschiebt das Vorhandensein einer Gleichstromkomponente den Arbeitspunkt des Kerns in den nichtlinearen Bereich der B-H-Kurve, was zu einer Halbzyklus-Sättigung des Transformator Kerns führt. Diese Sättigung äußert sich in einer Zunahme der geraden Oberschwingungen des 50-Hz-Wechselstromsignals, während man in der Nähe des Transformators ein Brummen wahrnehmen würde. [8] Im FFT Spektrum des gemessenen Wechselstromverlaufs konnte ein Anstieg der geraden Oberschwingungen beobachtet werden.

Fazit

Diese vorgestellten Anwendungen zeigen das Potential faseroptischer Stromsensoren als Antwort auf die wachsenden messtechnischen Anforderungen moderner Hochspannungsnetze. FOCS bieten zugleich hohe Bandbreiten, Sättigungsfreiheit, galvanische Trennung und lassen sich direkt auf Hochspannungspotential installieren, was zielgerichtete Messungen mit geringem baulichem Aufwand ermöglicht.

FOCS konnten bei Kurzschlussversuchen stabile Nullpunkte ohne Hysterese und geringeren Rauschpegel als induktive Wandler zeigen. Zudem erfassen FOCS hochfrequente Ereignisse wie Rückzündungen von Leistungsschaltern mit Bandbreiten in der 100 kHz Region, was die Eignung für die Messung schneller transienter Vorgänge hervorhebt. Die direkte Installation auf Hochspannungspotential ermöglichte erstmals die Erfassung geomagnetisch induzierter quasi-DC-Ströme auf einer einzelnen Phase bei 220 kV. Dabei wurde gezeigt, dass GICs auch auf der nicht geerdeten Transformatorseite auftreten können.

Dem Einsatz in Langzeitanwendungen stehen noch Probleme bei der Stabilität sowie der Immunität gegen äußere mechanische Einflüsse im Weg. Die enormen Vorteile der Technologie gegenüber konventionellen Wandlern zeigen die Sinnhaftigkeit und die Wichtigkeit der Forschung in diesem Gebiet um den breiten Einsatz solcher FOCS Systeme im Feld in absehbarer Zeit zu ermöglichen.

Referenzen

- [1] Drees, T., Medert, H., Meinecke, M., & Halici, C. (2021). Netzentwicklungsplan Strom 2035.
- [2] Trampitsch, P. P., Klambauer, R., Mandl, J. M., Plesch, J., Schöffner, W., & Bergmann, A. (2025). Improvements for high bandwidth non-modulated FOCS measurement setups. *Journal of Lightwave Technology*, 2025(1558-2213). Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/JLT.2025.3636740>
- [3] Hackl, P., Schwalt, L., Brestan, M. H., Schuerhuber, R., Belavic, F., Schöffner, W., & Klambauer, R. (2025). First Operational Experience with Vacuum Circuit-Breakers in Austria - Measurements and Tests on the 110 kV Voltage Level. Paper presented at CIGRE Symposium 2025, Trondheim, Norway.
- [4] Mandl, J. M., Trampitsch, P. P., Fröhlich, A., Klambauer, R., & Bergmann, A. (2026). Detection of geomagnetically induced currents on single phases in power grids using a fiber optic current sensor system. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 15(1). <https://doi.org/10.5194/jsss-15-1-2026>
- [5] Klambauer, R., Trampitsch, P. P., Mandl, J. M., Bergmann, A., Schöffner, W., & Plesch, J. (2025). Fiber optical current sensor for quasi-DC currents during high-voltage short-circuit tests. In J. L. Santos, M. L.-A. Sainz, & T. Sun (Eds.), 29th International Conference on Optical Fiber Sensors Article 13639AS (Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering; Vol. 13639). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3062967>
- [6] "Iec 60909-0:2016 short-circuit currents in three-phase a.c. systems - part 0: Calculation of currents," standard.
- [7] Bohnert, K., *Optical fiber current and voltage sensors*, CRC Press (2024).
- [8] Baier, P.: *Dreiphasen-Leistungstransformatoren: Magnetisierungserscheinungen, Harmonische, Betriebsvorgänge, Stell- und Stromrichtertransformatoren*, VDE-Verl., Berlin and Offenbach, ISBN 9783800731176, 2010.