

Kalibrierungsfreier Stromsensor für Hochspannungsfreileitungen

P. Arnold¹, C. Brockmann¹, H. Pötter¹, Prof. Dr.-Ing. U. Ganesh¹

¹Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin (Deutschland)

Zusammenfassung

Bestehende nicht-invasive und indirekte Messsysteme zur Erfassung der Stromstärke von Hochspannungsfreileitungen, wie Hallsensoren oder Spulen mit magnetisch bündelndem Kern müssen für jeden Leiterseildurchmesser kalibriert werden. Das in dieser Arbeit beschriebene Messprinzip erübrigt diese Kalibrierung durch den Einsatz einer leiterplattenintegrierten Rogowskispule. Damit kann der Stromsensor unter bestimmten Randbedingungen auf beliebigen Leiterseildurchmessern eingesetzt werden. Die Messsignale werden durch ein analoges Frontend vorverarbeitet und im Anschluss digitalisiert, um die Messwerte weiterverarbeiten zu können. Für den Einsatz des Messverfahrens in energieautarken drahtlosen Sensorsystemen ist die gesamte Schaltung hinsichtlich des Energiebedarfs optimiert. Das angestrebte Anwendungsszenario für den Stromsensor umfasst Hochspannungsfreileitungen, welche mit einer Netzfrequenz von 50Hz arbeiten. Außerdem wird die Spannungsebene bis 420kV mit einer Leiterseilstromstärke bis 1500A betrachtet.

Keywords: Stromsensorik, kalibrierungsfrei, nicht-invasiv, indirekt, Hochspannungstechnik

Einleitung

Die Grundlage für die Messung der Stromstärke durch einen Leiter wurde 1912 in einem Artikel von W. Rogowski und W. Steinhaus gelegt [1]. Hier wurden mit einer handgewickelten Spule ohne permeablen Kern erste Versuche gemacht, die magnetische Flussdichte einer stromdurchflossenen Spule zu messen und auf die erregende Stromstärke Rückschlüsse zu ziehen.

Um die Präzision und Genauigkeit zu steigern wurde in [2] die Rogowskispule in eine Leiterplatte integriert. Ziel hier war neben der hohen Genauigkeit auch der Einsatz in der Hochspannungstechnik als Messgerät und Schutz Einrichtung.

Eine weitere Arbeit zu leiterplattenintegrierten Rogowskispulen beschäftigte sich mit der Behandlung von kapazitiv einkoppelnden elektrischen Feldern [3]. Hier wurden zwei Luftspulen mit entgegengesetztem Wicklungssinn ineinander gewickelt, um die kapazitiven Einkopplungen durch Addition der Ausgangssignale der Luftspulen auszulöschen. In [4] wird eine Möglichkeit beschrieben, die Rogowskispule zu öffnen und zu schließen, um sie an einem Leiter zu befestigen, ohne diesen auftrennen zu müssen.

Neben diesen Arbeiten existieren viele weitere, welche sich in den Grundzügen ähneln. Allen gemein ist, dass sie nicht alle erarbeiteten

Konzepte vereinen, sondern sich meist auf einen Aspekt der Optimierung konzentrieren.

In der vorliegenden Arbeit werden die Konzepte der genannten Referenzen wie die Leiterplattenintegration und die Immunität gegenüber kapazitiv einkoppelnder elektrischer Felder übernommen. Die Erweiterung gegenüber den Arbeiten liegt in der dauerhaften Öffnung der Spule. In der Vergangenheit wurden Rogowskispulen immer wieder geschlossen, um die Vorteile des Messprinzips beizubehalten. In der vorliegenden Arbeit wird diese Öffnung untersucht und mittels definierten Randbedingungen validiert, um einen kalibrierungsfreien Stromsensor zu erhalten.

Grundlagen

Analog zu anderen nicht-invasiven und indirekten Messverfahren, welche auf dem Prinzip der Induktion beruhen, stützt sich die Erfassung der Stromstärke durch einen Leiter mittels Rogowskispule auch auf das vom Stromfluss durch den Leiter hervorgerufene Magnetfeld. Dieses Feld koppelt in die Spule ein und induziert eine Spannung in den Wicklungen. Diese Spannung ist proportional zur Stromstärke, welche durch den Leiter fließt. Abb. 1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

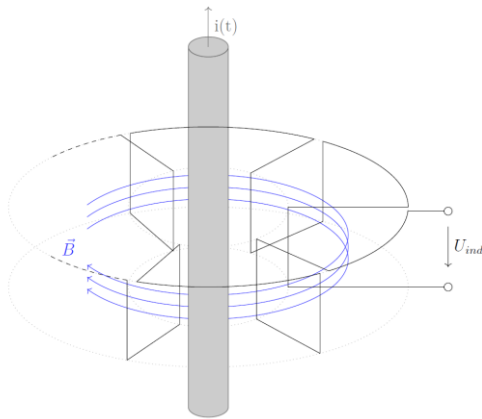


Abb. 1: Anordnung der Wicklungen der Rogowskispule um einen stromdurchflossenen Leiter. Der Stromfluss erzeugt das Magnetfeld und die resultierende magnetische Flussdichte, welche eine Spannung über der Spule induziert.

Die Wicklungen der Rogowskispule müssen so angeordnet sein, dass die durch die Windungen aufgespannten Flächen vom Magnetfeld (respektive der magnetischen Flussdichte) senkrecht durchdrungen werden. Die Flächennormale muss demnach tangential zum Verlauf des Magnetfeldes liegen. Nach dem Durchflutungsgesetz nach Ampère ergibt sich für ein geschlossenes Linienintegral um einen stromführenden Leiter folgender Zusammenhang Gl. (1).

$$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = I_{\text{eing.}}$$

Das Ergebnis dieser Integration entspricht der Stromdichte (respektive der eingeschlossenen Stromstärke) durch jene Fläche, über deren Rand integriert wird. Somit ergibt sich eine Unabhängigkeit der Verteilung der Stromdichte über der Fläche. Solange der Weg, über den integriert wird, geschlossen ist, kann die Verteilung der Stromdichte willkürlich sein. Diese Verteilung kann aus mehreren stromführenden Leitern bestehen, wobei Form und Dimension der Leiter beliebig sein können. Hierin liegt der wesentliche Vorteil des kalibrierungsfreien Stromsensors.

Bei der Rogowskispule handelt es sich um eine Luftspule, denn sie besitzt keinen permeablen Kern. Dies hat den Vorteil, dass es zu keiner Sättigung des Kerns kommen kann. Somit gibt es auch keine Hystereseeffekte und keine Remanenzflussdichte. Die Spule kann dadurch auch als kurzschlussfest bezeichnet werden. Es können beliebig große Überströme fließen, welche deutlich außerhalb des Messbereichs liegen, da beliebig hohe Magnetfelder durch die Luftspule fließen können. Somit ist die

messbare Stromstärke nicht begrenzt, insofern es die auswertende Elektronik verarbeiten kann. Der fehlende magnetisch bündelnde Kern bedingt aber auch einen großen Nachteil von Rogowskispulen. Da die Permeabilitätszahl von Luft nur geringfügig größer als die magnetische Feldkonstante μ_0 ist, hat die magnetische Kennlinie eine Steigung von eins. Demnach wird das Magnetfeld in der Spule nicht gebündelt und die induzierte Spannung in der Rogowskispule fällt deutlich geringer aus als bei Spulen mit permeablem Kern. Dies kann durch ein geeignetes analoges Frontend und eine hochauflösende Digitalwandlung kompensiert werden.

Aufgrund der geringen Empfindlichkeit der Luftspule ist eine Hohe Wicklungsanzahl anzustreben, um die induzierte Spannung so groß wie möglich zu gestalten. Für eine Wicklung einer Spule gilt nach dem Induktionsgesetz nach Faraday Gl. (2).

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\frac{d\phi}{dt}$$

Die Grundlage für die Induktion ist der sich über die Zeit verändernde Strom di/dt . Dieser ruft ein Magnetfeld H hervor, woraus unter Berücksichtigung von μ_r die magnetische Flussdichte B entsteht. Wenn diese die Wicklungen der Rogowskispule durchdringt, entspricht die Ausgangsspannung der Luftspule der Summe der Induktionsspannungen der einzelnen Wicklungen der Spule. Die Induktionsspannung kann mit folgender Formel berechnet werden Gl. (3).

$$u_{\text{ind}}(t) = -M \frac{di(t)}{dt}$$

Dabei entspricht M der Selbstinduktion respektive der magnetischen Kopplung. Die Kopplung ist ein Maß für die Empfindlichkeit der Rogowskispule.

Eine steigende Wicklungszahl erhöht gleichermaßen die Trägheit der Luftspule und führt dazu, dass sich schnell ändernde Ströme schlecht oder gar nicht erfasst werden können. Im hier angestrebten Anwendungsfall einer Hochspannungsfreileitung mit niedriger und konstanter Netzfrequenz von 50Hz kommt dieser Effekt nicht zum Tragen.

Eine grundlegende Anforderung an die Wicklungen der Rogowskispule ist deren möglichst identische Geometrie. Nur damit ist die homogene Integration über das Magnetfeld gegeben. Dies lässt sich nur unter sehr hohem Aufwand mit drahtgewickelten Spulen realisieren, selbst wenn ein nicht permeabler Kern verwendet wird. Den höchstmöglichen Grad an identischen Wicklungen kann erreicht

werden, indem die Rogowskispule in eine Leiterplatte integriert wird. Aktuelle Leiterplattenfertigungstechnologien unterliegen sehr geringen Toleranzen und bieten die Möglichkeit mit vergleichsweise geringem Bauvolumen eine hohe Anzahl an Wicklungen zu realisieren.

Bis hierhin wurde eine um den stromführenden Leiter geschlossenen Spule betrachtet. Dieser Ansatz ist im Einsatz des Stromsensors an bestehenden Freileitungen unzureichend, da die Leiterseile nicht geöffnet werden können, um den Sensor zu montieren. Selbst bei Neubauten ist eine geschlossene Spule nachteilig, da sie über die gesamte Seillänge verschoben werden müsste. Demnach ist eine Öffnung der Rogowskispule notwendig, um den praktischen Einsatz zu ermöglichen. Die Öffnung zieht nach sich, dass das Linienintegral nicht mehr geschlossen ist und nicht die gesamte Stromdichte durch die Querschnittsfläche der Integration erfasst wird. Um dies zu kompensieren, muss der stromführende Leiter im Zentrum der Luftspule liegen. Außerdem muss die Spule kreisförmig ausgeführt sein, damit die Wicklungen homogen vom Magnetfeld durchdrungen werden. Für die Validierung des Messverfahrens ist eine einmalige Parameteridentifikation des Stromsensors notwendig. Im Nachgang gefertigte identische Rogowskispulen benötigen keine Kalibrierung, da die Geometrien identisch sind.

Auslegung

Im Fall einer einfach gewickelten Rogowskispule können elektrische Felder kapazitiv in die Luftspule einkoppeln. Diese Einkopplung kann eliminiert werden, indem zwei Spulen mit entgegengesetztem Wicklungssinn ineinander integriert werden [1]. Da die Spulen unterschiedlichen Windungssinn aufweisen, erhalten die Induktionsspannungen unterschiedliche Vorzeichen, während die kapazitiven Einkopplungen das gleiche Vorzeichen besitzen. Werden die Induktionsspannungen, welche jeweils durch die Einkopplung beaufschlagt sind voneinander abgezogen, löschen sich die Einkopplungen aus und die Induktionsspannungen addieren sich. Abb. 2 zeigt den Aufbau der Wicklungen zweier geschlossener Rogowskispulen mit entgegengesetztem Windungssinn.

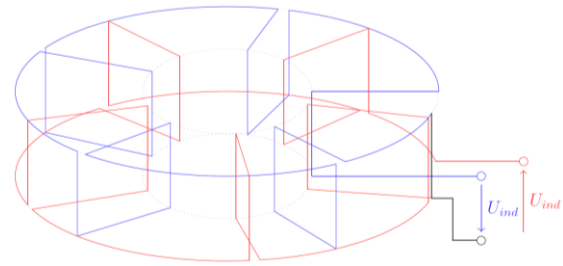


Abb. 2: Zwei ineinander gewickelte geschlossene Rogowskispulen mit entgegengesetztem Wicklungssinn zur Eliminierung von kapazitiven Einkopplungen.

Die beiden Spulen sind an ihren Enden mit der Schaltungsmasse verbunden. An den beiden Anfängen kann die Induktionsspannung gegenüber Masse abgegriffen werden. Da der Gesamtaufbau geöffnet werden muss, ergibt sich der in Abb. 3 dargestellte Aufbau.

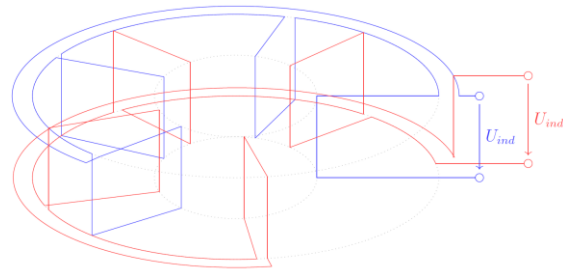


Abb. 3: Zwei ineinander gewickelte Rogowskispulen mit entgegengesetztem Wicklungssinn, Öffnung und Rückführung.

Hier dargestellt sind beide Wicklungen mit Rückführung. Die Rückführung der Spulenenden ist notwendig, um die Induktionsspannung in den Spulen abgreifen zu können. Dabei muss es nur eine Rückführung geben, da beide Spulenenden mit einem Bezugspotential, der Schaltungsmasse, verbunden werden.

Dimensionierung

Der Stromsensor wurde für eine bestehendes energieautarkes und drahtloses Sensorsystem für das Monitoring von Hochspannungsfreileitungen entwickelt. Alle folgenden Einschränkungen geometrischer Natur rühren aus den Restriktionen, welche durch das Gehäuse dieses Sensorsystems gegeben sind. Zur Validierung des Messprinzips wurde eine geöffnete Rogowskispule nach beschriebenem Aufbau hergestellt, welche den Bauraum im Gehäuse maximal nutzt. Dabei wurde eine zweilagige Leiterplatte verwendet. Die Wicklungen bestehen aus je einer Leiterbahn auf der Ober-

und Unterseite und zwei Durchkontaktierungen, welche die Leiterbahn zu einer Wicklung verbinden. Dabei endet eine Leiterbahn kurz vor der Durchkontaktierung und verläuft zur nächsten Windung. Damit der Stromsensor auf einem Leiterseil montiert werden kann, weist die Rogowskispule eine relativ große Öffnung auf. In Abb. 4 ist die gefertigte Leiterplatte dargestellt.



Abb. 4: Leiterplattenintegrierte Rogowskispule mit Öffnungswinkel ca. 117°, 2x174 Wicklungen und $M \approx 68 \text{ nH}$.

Diese enthält zwei Rogowskispulen mit je 174 Wicklungen. Die Gesamtwicklungszahl ergibt sich zu 348. Der Öffnungswinkel beträgt ca. 117°. Die Leiterplattendicke beträgt 2,4mm. Die magnetische Kopplung dieser Anordnung kann mit folgender Gleichung bestimmt werden Gl. (4) (vgl. [1]).

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot N \cdot h \cdot \ln\left(\frac{a}{d}\right)$$

Hierbei beschreibt N die Wicklungsanzahl, h die Höhe einer Wicklung beziehungsweise der Dicke der Leiterplatte, a den Außendurchmesser der Rogowskispulen und d den Innendurchmesser. Aus diesen Parametern ergibt sich für die magnetische Kopplung dieses Aufbaus $M \approx 68 \text{ nH}$. Zur Berechnung der zu erwartenden Induktionsspannung in den Rogowskispulen wird eine maximale Stromsteilheit beziehungsweise -änderung von $0,5 \text{ A}/\mu\text{s}$ angenommen. Daraus resultiert unter Anwendung von Gl. (3) die maximale Ausgangsspannung der Luftspulen nach Addition der Einzelspannungen von $U_a \approx 34 \text{ mV}$.

Schaltung

Die Ausgangssignale der Rogowskispulen umfassen den Wertebereich von wenigen Mikrovolt bis zu geringen zweistelligen Millivolt. Im hier angestrebten Einsatzszenario handelt es sich um zwei um 180° phasenverschobene sinusförmige Wechsignale mit einer Grundfrequenz von 50 Hz beziehungsweise der momentanen Netzfrequenz, welche nicht exakt bei 50 Hz liegen muss. Weiterhin sind

die Ausgangssignale der Luftspulen nicht belastbar, die Spulen weisen ein sehr hochimpedantes Verhalten auf.

Die Ausgangssignale müssen zunächst addiert, danach verstärkt, optional integriert und zum Schluss abgetastet werden. Abb. 5 zeigt das zugehörige Blockschaltbild, welches die Anordnung der Funktionsblöcke und den Signalpfad der Schaltung darstellt.



Abb. 5: Blockschaltbild der analogen Vorverarbeitung der Ausgangssignale der Rogowskispulen mit Addition, Verstärkung, Integration (optional) und Abtastung.

Da die Rogowskispulen Wechsignale erzeugen und der Wertebereich der digitalen Abtastung voll ausgeschöpft werden soll, muss das Potential, um das die Signale schwingen, angehoben werden. Hierfür werden in der Messschaltung zwei Massepotentiale verwendet. Einerseits eine allgemeine Schaltungsmasse, welchen den Bezug für die Versorgungsspannung darstellt. Andererseits eine virtuelle Masse, welche sich auf dem halben Potential zwischen Versorgungsspannung und Masse befindet. Die virtuelle Masse wird über einen hochohmigen Spannungsteiler generiert. Außerdem wird das Potential der virtuellen Masse vom Spannungsteiler mit einem Operationsverstärker (OPV) entkoppelt, damit durch folgende Komponenten kein belasteter Spannungsteiler entsteht. Diese Belastung würde die virtuelle Masse im Potential verändern. Mit Einführung der virtuellen Masse entstehen ihr gegenüber eine positive und eine negative Versorgungsspannung. Die Positive entspricht der eigentlichen Versorgungsspannung und die Negative der Schaltungsmasse. Die Funktionsblöcke, welche Wechsignale verarbeiten sollen, ohne die negativen Halbwellen abzuschneiden, werden mit diesen neuen Versorgungsspannungen und der virtuellen Masse betrieben. Außerdem wird ein Anschluss der Rogowskispulen mit der virtuellen Masse verbunden. Damit werden die Ausgangssignale der Luftspulen angehoben und schwingen genau um die Mitte der Arbeitsbereiche der verarbeitenden Komponenten. Dies gilt auch für die digitale Abtastung, welche mit der Schaltungsmasse als Versorgung und der normalen Versorgungsspannung betrieben wird.

Der erste Funktionsblock stellt die Addition dar. Hier werden die Signale der Rogowskispulen addiert. Die Addition wird als Subtraktion ausgeführt. Somit addieren sich die zueinander inversen Signale der Rogowskispulen. Dieser Schaltungsteil wird mit OPVs realisiert. Ein einfacher OPV genügt den Anforderungen nicht, da seine Eingänge nicht hochohmig genug sind. Am besten geeignet ist ein Instrumentationsverstärker, welcher schlussendlich aus drei OPVs besteht. Dieser stellt im Bereich der analogen Addition eine der höchsten Eingangsimpedanzen dar. Gleichzeitig bietet er eine hohe Gleichtaktunterdrückung. Diese dient zusätzlich der Subtraktion der kapazitiven Einkopplungen, welche vornehmlich durch die Verschaltung beider Rogowskispulen ausgelöscht werden. Weiterhin sind viele integrierte Schaltkreise (IC) dieser Art verfügbar, die nur geringen Bauraum benötigen und eine einstellbare Verstärkung aufweisen. Die Verstärkung ist notwendig, um die Amplitude des Ausgangssignals des Instrumentationsverstärkers anzuheben, damit die folgenden Komponenten besser in ihrem Arbeitsbereich betrieben werden können. In den meisten Fällen genügt ein einzelner Widerstand als externe Komponente, um den Verstärkungsfaktor einzustellen. Mit der integrierten Verstärkung kann auf einen nachfolgenden Verstärker verzichtet werden, was Energiebedarf, Rauschanfälligkeit und Kosten reduziert. Die Verstärkung darf nicht zu hoch gewählt werden, um das Eingangsrauschen des Verstärkers nicht unnötig mit zu verstärken. Es ist ein Trade-Off zwischen Wertebereichsausnutzung bei der digitalen Abtastung und der Verstärkung des Rauschens. In der hier angestrebten Anwendung wird das Signal nur soweit angehoben, dass die kleinste messbare Signaländerung den Anforderungen entspricht. Das Rauschen in den Ausgangssignalen der Luftspulen kann durch Filterkomponenten reduziert respektive gedämpft werden. Im einfachsten Fall erfolgt dies mit passiven Tiefpass- oder Bandpassfiltern. Die Reduktion des Messrauschens an dieser Stelle im Signalpfad ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Im Ergebnis der Addition und Verstärkung liegt die Summe beider Ausgangssignale der Rogowskispulen vor. Das Signal ist nahezu gleichaktfrei und enthält keinen Gleichspannungsoffset. Der verbleibende Offset ist bedingt durch die verwendeten OPVs. Dieser Offset lässt sich durch eine Entkopplung mit einem Kondensator in Reihe im Signalpfad beheben.

Nach der Addition und Verstärkung folgt eine optionale Integration. Diese ist nur im angestrebten Anwendungsszenario optional, da die zu erfassenden Signale eine nahezu konstante Frequenz aufweisen. Ist die Frequenz variabel oder sind die Signale mit weiteren Frequenzanteilen beaufschlagt, ist die Integration notwendig, damit kein Informationsverlust in der analogen Vorverarbeitung geschieht. Im hier betrachteten Fall diene die Integration lediglich einer weiteren Verstärkung und der Korrektur der Phasendrehung. Die Phasendrehung passiert in den Rogowskispulen. Sie verschieben die Phasenlage zwischen Messsignal und erregender Stromstärke im ideellen Fall um 90° . Da dieser Phasenversatz hier konstant und empirisch bestimmbar ist, wird auf den Funktionsblock Integrierer verzichtet. Dies reduziert Bauraum, Rauschanfälligkeit und Kosten. Der nicht kompensierte Phasenversatz kann nachträglich in Software korrigiert werden, insofern die Phasenlage und nicht nur die Amplitude respektive der Effektivwert von Interesse sind.

Nach der analogen Vorverarbeitung ist das Messsignal offsetfrei und verstärkt. Um die Messwerte weiterverarbeiten zu können, wird das Ausgangssignal des Analogpfades mit einem Analog-Digital-Umsetzer (ADC) abgetastet. Der hier eingesetzte ADC arbeitet mit sukzessiver Approximation und weist eine Auflösung von 16 Bit auf. Die im angestrebten Szenario gewünschte Auflösung liegt bei einem Ampere. Um etwaiges Messrauschen zu kompensieren darf das Bit mit dem niedrigsten Stellenwert (LSB) maximal einem $1/4$ Ampere entsprechen. Die Amplitude des addierten Ausgangssignals der Spulen liegt bei 1A bei ca. $21\mu\text{V}$. Da der 16-Bit ADC hier mit einer Referenzspannung von 3,3V arbeitet, liegt seine minimale Auflösung bei ca. $50\mu\text{V}$. Somit müssen die $5\mu\text{V}$, welche $1/4$ Ampere entsprechen mit dem Faktor 10 verstärkt werden. Damit ist sichergestellt, dass mindestens zwei LSB verwendet werden, um das kleinste Signal zu erfassen. Durch Änderung der Verstärkung kann eine höhere Auflösung generiert werden oder aber der Messbereich der messbaren Stromstärke kann ohne jegliche Änderung gesteigert werden, wenn es das Anwendungsszenario erfordert. Wird die Verstärkung erhöht, ist zu bedenken, dass damit auch das Rauschen der Ausgangssignale der Rogowskispulen verstärkt wird. Für die Versuche wurde dennoch eine Verstärkung von ca. 100 eingestellt. Dies dient der vollen Ausnutzung des Wertebereichs des ADCs. Außerdem ist

der Rauscheintrag in den Versuchsaufbau minimal, da die Untersuchungen unter Laborbedingungen stattfanden. Der verwendete ADC kann mit bis zu 100kHz abtasten. Nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem muss ein Signal mit mehr als der doppelten Frequenz bezüglich der Grundfrequenz des Signals abgetastet werden. Unter der Annahme von 150Hz Abtastfrequenz würde eine Vollwelle der Stromstärke mit drei Messpunkten quantisiert. Da dies sehr gering und schnell zu Fehlabtastungen führen kann, sollte eine höhere Abtastfrequenz gewählt werden. Zu beachten ist hierbei, dass je schneller die Abtastung erfolgt, desto geringer ist die Zeit, in der sich die zu messende Kapazität im ADC aufladen kann. Ein weiterer Aspekt ist der gesamte Energiebedarf von ADC und Ansteuerung, welche bei höheren Taktfrequenzen steigt. Für diese Arbeit wird eine Abtastrate von 5kHz verwendet. Damit wird eine 50Hz Vollwelle mit 100 Messpunkten quantisiert und die Extrema können zuverlässig detektiert werden. Der ADC wird von einem Mikrocontroller gesteuert. Die Schnittstelle ist ein Serial Peripheral Interface (SPI). Da der ADC keine Einstellmöglichkeiten vorsieht, entfällt das Master-Output-Slave-Input Signal. Das Taktsignal der SPI dient gleichzeitig als Taktgeber für die Abtastfrequenz, mit der der ADC arbeiten soll. Die in den Versuchen verwendete Firmware und die eingesetzten Algorithmen werden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Energieversorgung

Die Energieversorgung nutzt eine Versorgungsspannung von 3,3V. Diese werden im Anwendungsszenario vom Sensorsystem durch einen Linearregler zur Verfügung gestellt. Die Versorgungsspannung wird mit einem Ferrit im Stromsensor gefiltert, um hochfrequente Einkopplungen zu unterdrücken. 3,3V werden in der hier verwendeten Bestückungsvariante des Stromsensors benötigt, da die OPVs mindestens $\pm 1,5V$ Versorgungsspannung benötigen, wenn sie im Dual-Supply-Betrieb verwendet werden. Durch Einsatz anderer verfügbarer OPVs kann die Versorgungsspannung auf 2V gesenkt werden. Da zum Zeitpunkt dieser Arbeit keine Komponenten mit ähnlich geringem Drift, geringem Leckstrom und geringem Offset für diese Spannungsebene gefunden werden konnten, wurden die bestmöglichen Bauteile gewählt und hiernach die Versorgung bestimmt.

Die Stromaufnahme für den Stromsensor liegt bei ca. 5mA. Dies liegt einerseits am hohen Verstärkungsfaktor des Instrumentationsverstärkers. Andererseits an der Erzeugung der virtuellen Masse. Der hier verwendete OPV gibt konstant 1,65V aus und muss einen Teil der Schaltung versorgen. Der ADC benötigt maximal 1,3mA.

Der Energiebedarf kann gesenkt werden, in dem energiesparsamere Bauteile verwendet werden. Weiterhin kann der Verstärkungsfaktor reduziert werden. Durch den Verzicht auf die negativen Halbwellen entfällt die Notwendigkeit der virtuellen Masse, was die Stromaufnahme stark senkt. Eine weitere Maßnahme ist die Reduktion der Auflösung und Abtastrate des ADCs. Dies reduziert den Energiebedarf, verringert aber die Genauigkeit.

Versuch

Der entwickelte Stromsensor wurde in einem Hochstromteststand untersucht. Dieser Teststand ist mit einem Stell- und einem Prüftransformator ausgestattet. Sekundärseitig kann die Wicklung am Prüftransformator frei konfiguriert werden. In der verwendeten Konfiguration bestand die Sekundärseite aus einer kurzgeschlossenen Wicklung und es konnten Ströme von 0A bis 750A eingestellt werden. Zur Messung der eingestellten Stromstärke diente eine kommerziell erhältliche Rogowskispule. Um das Messprinzip zu validieren, wurden drei Rundstangen aus Aluminium mit den Durchmessern 20mm, 30mm und 40mm als Leiterseilnachbildung eingesetzt. **Abb. 6** zeigt einen Ausschnitt des Versuchsaufbaus.

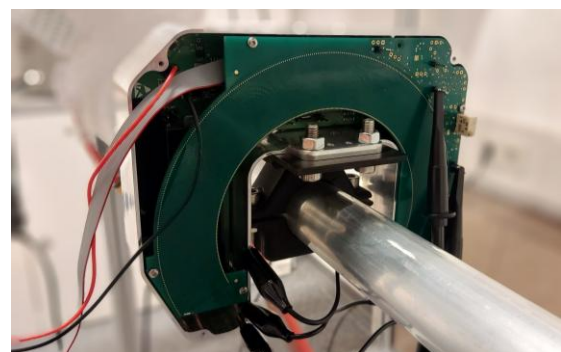


Abb. 6: Versuchsaufbau mit im Sensorgehäuse montierter Rogowskispule auf Leiterseilnachbildung mit 30mm Durchmesser.

Damit das Leiterseil im Zentrum der Rogowskispule verläuft wurden im Rapid-Prototyping-Verfahren drei Leiterseilklemmen gefertigt, welche die genaue Positionierung ermöglichen. Damit ist auch die Vergleichbarkeit mit den anderen

Leiterseilnachbildungen gegeben. Während der Versuche wurde das Sensorsystem mit einem Labornetzteil versorgt. Damit konnte auch der Energiebedarf bestimmt werden. Zusätzlich zur digitalen Auswertung der vom ADC ermittelten Werte wurde ein Oszilloskop verwendet, welches die Ausgangssignale der Rogowskispulen und des Instrumentationsverstärkers aufzeichnete. Da keine Referenz im Sinne einer vollständig geschlossenen Rogowskispule zur Verfügung stand wurden aus den Messwerten der drei Versuche die Mittelwerte gebildet, um die Abweichung der einzelnen Messungen zu den Mittelwerten aufzuzeigen. In **Tab. 1** sind die Mittelwerte dargestellt.

Tab. 1: Mittelwerte der drei Versuche. Die erste Spalte entspricht der eingestellten Stromstärke, die zweite Spalte der Ausgangsspannung des Instrumentationsverstärkers und die dritte Spalte dem digitalisierten und berechneten Messwert des ADCs.

Strom [A]	U_Inst. [V]	ADC [V]
5	0,03	0,05
10	0,05	0,07
25	0,10	0,12
50	0,19	0,21
100	0,38	0,39
200	0,75	0,76
300	1,12	1,13
400	1,49	1,49
500	1,87	1,87
600	2,24	2,24
750/738	2,54	2,52

Hierbei entspricht die erste Spalte der eingestellten Stromstärke, die zweite Spalte der gemessenen Spannung am Ausgang des Instrumentationsverstärkers und die dritte dem digital gewandelten und berechneten Messwert des ADCs. Die Abweichung zwischen der Spannung des Verstärkers und dem Messwert des ADCs sind einerseits durch Fehlabtastungen des ADCs bedingt. Andererseits durch Schwankungen im Messsignal des Oszilloskops. Die Werte wurden im Oszilloskop mit Hilfe von stochastischer Messwertverteilung ermittelt. Im Fall der Stromstärke von 750A ist anzumerken, dass die Leiterseilnachbildung mit Durchmesser 20mm diesen Strom nicht dauerhaft tragen konnte und der Wert nach Erwärmung des Leiters sank. Die Impedanz war zu groß und es konnten nur 738A erreicht werden.

Um die Kalibrierungsfreiheit des Messverfahrens nachzuweisen, müssen die Messwerte der Einzelmessungen mit den Mittelwerten verglichen werden. **Tab. 2** zeigt die entsprechende Übersicht.

Tab. 2: Vergleich der Messwerte der einzelnen Versuche mit den Mittelwerten über alle Versuche. Die erste Spalte entspricht der eingestellten Stromstärke, die zweite Spalte der digitalisierten und berechneten Spannung des ADCs und die Spalten drei bis fünf den Abweichungen der Versuche mit unterschiedlichen Leiterseildurchmessern gegenüber dem Mittelwert.

I [A]	ADC [V]	20mm [%]	30mm [%]	40mm [%]
5	0,05	0,6	1,2	1,8
10	0,07	1,3	0,5	1,9
25	0,12	0,5	1,1	1,9
50	0,21	0,7	0,9	1,1
100	0,39	0,7	0,7	0,9
200	0,76	0,2	1,0	0,0
300	1,13	-0,6	1,6	-0,2
400	1,49	0,4	0,6	-2,4
500	1,87	-0,1	0,5	-2,3
600	2,24	-0,2	0,2	-0,4
750/738	2,52	-1,1	-0,3	-1,1

Die Spalten drei bis fünf stellen die Abweichungen der einzelnen Versuche gegenüber dem Mittelwert aller Versuche dar. Dabei beträgt die Abweichung maximal 2,4% und im Mittel unter 1%. Auch im direkten Vergleich zwischen den Versuchen treten nur kleine Abweichungen von maximal 3% auf. Diese geringen Messabweichungen lassen den Schluss zu, dass der Leiterseilquerschnitt keinen Einfluss auf die Messwerte des Stromsensors hat. Die Abweichungen sind bedingt durch Fehlabtastungen, Messrauschen und durch die Ungenauigkeit beim Einstellen der Stromstärke. Die Stromeinstellung geschieht manuell und unterliegt einem Fehler von ca. +/-1A bis 300A und +/-4A zwischen 300A und 750A. Dementsprechend ist die Wiederholgenauigkeit zwischen den Versuchen gering.

Fazit

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Messprinzip einer leiterplattenintegrierten Rogowskispule unter Einhaltung der aufgezeigten Randbedingungen keine Kalibrierung bezüglich des

Leiterseilquerschnittes erfordert. Lediglich initial müssen die Messparameter identifiziert werden, um aus der gemessenen Induktionsspannung auf die erregende Stromstärke schließen zu können. Die Randbedingungen werden einerseits durch die Leiterplattenintegration einer kreisförmigen Luftspule garantiert. Andererseits sind sie im Sinne der Leiterseilführung im Zentrum der Rogowskispule konstruktiv sehr genau einstellbar und wiederholgenau.

Nicht Bestandteil der hier durchgeführten Untersuchungen ist der Einfluss von magnetischen Feldern, welche durch Leiter außerhalb des Stromsensors erzeugt werden und in die Rogowskispule einkoppeln. Im Kontext von Hochspannungsfreileitungen wird dies besonders interessant bei der Betrachtung von Bündelleitern.

Der hier entwickelte Stromsensor konnte nicht gegenüber einer Referenz im Sinne einer geschlossenen Rogowskispule verglichen werden. Die Untersuchung der geschlossenen und einer noch weiter geöffneten Spule, zum Beispiel mit einem Öffnungswinkel von 270° , bieten Potential, den Stromsensor kleiner und somit kostengünstiger herzustellen. Zudem kann ein Korrekturmodell geschaffen werden, um vom Referenzwert der geschlossenen Spule auf die Messwerte aller Varianten mit Öffnungen schließen zu können. Ob dieses Verfahren auch kalibrierungsfrei sein kann, müssen zukünftige Arbeiten zeigen.

Eine weitere mögliche Entwicklung besteht in der Senkung des Energiebedarfs bei bestehenbleibender Auflösung und Genauigkeit. Dies kann durch reduzierten Schaltungsaufwand und optimierte Bauteilwahl geschehen. In diesem Zuge kann auch die Versorgungsspannung gesenkt werden.

Literaturnachweis

- [1] W. Rogowski und W. Steinhaus. "Die Messung der magnetischen Spannung. (Messung des Linienintegrals der magnetischen Feldstärke.)", 1912. Archiv für Elektrotechnik, Band I, Heft 4, S.141ff.
- [2] Ljubomir A. Kojovic. „PCB ROGOWSKI COILS – HIGH PRECISION LOW POWER SENSORS“, 2004. Cooper Power Systems, USA.
- [3] Christoph Neeb Jan Niklas Fritz and Rik W. De Doncker. "A PCB Integrated Differential Rogowski Coil for Non-Intrusive Current Measurement Featuring HighBandwidth and dv/dt Immunity", 2015. Institute for Power Electronics and Electrical Drives, RWTH Aachen University Jaegerstr. 17/19, 52066 Aachen, Germany.

- [4] 田慧, 张亚, 堵文灿. „A kind of open-close ring PCB type pulse high current sensor“, 2021. Nanjing University of Science and Technology.