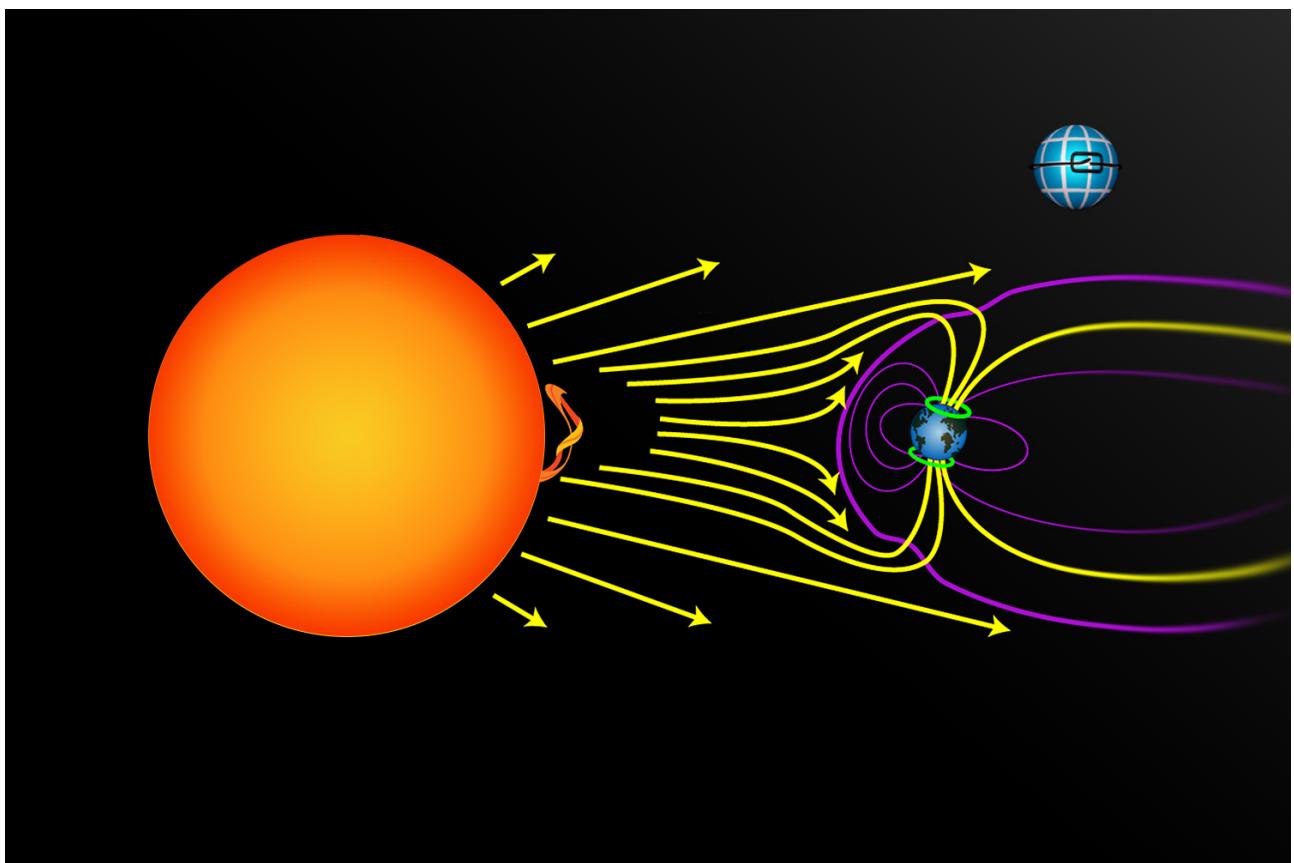




Parasitäre DC-Ströme?

Auswirkungen auf induktive Stromwandler



HERZlich Willkommen, liebe Freunde der Schutz-, Leit- und Elektrotechnik. Können Stromwandler durch kleine parasitäre DC-Ströme in ihrer Messgenauigkeit deutlich beeinträchtigt werden? In einem spannenden Fachbeitrag geht unser Gastauteur **Roland Bürger (SENSELEQ)** dieser Frage intensiv nach, zeigt mögliche Ursachen auf und hat eine interessante Antwort parat. **Viel Spaß beim Lesen!**

Parasitäre DC-Ströme in AC-Systemen und deren Auswirkungen auf induktive Stromwandler

Einführung

In allen Spannungsebenen des Elektrizitätsnetzes werden hauptsächlich induktive Strom- und Spannungswandler eingesetzt. Durch diese Wandler werden verschiedenste Mess- und Schutzmessungen realisiert. Im Bereich der Verrechnungsmessung werden Stromwandler überwiegend mit den Genauigkeitsklassen 0,1 und 0,2S eingesetzt. Während die Auswirkungen von DC-Anteilen im AC-Signal auf Leistungstransformatoren in der Literatur ausführlich beschrieben sind, sollen im folgenden Stromwandler näher betrachtet werden. Daneben wird auf verschiedene parasitäre DC-Quellen eingegangen.

GIC-Ströme

Parasitäre DC-Ströme können aus unterschiedlichen Quellen in das AC-System einkoppeln. Eine natürliche Quelle, die nicht durch den Menschen beeinflusst werden kann, ist die Sonne. Die Sonne besteht aus einem Plasma, das sich aus negativen Elektronen und positiven Ionen zusammensetzt. Dieses Plasma ist in der äußeren Zone durch Konvektionsströme ständig in Bewegung. Die Elektronen besitzen aufgrund ihrer geringeren Masse eine höhere Geschwindigkeit als die Ionen. Es fließt ein elektrischer Strom, der ein Magnetfeld induziert. Zum Teil wölben sich dabei Magnetfeldschläuche nach außen. Verdrehen sich diese Schläuche zu geschlossenen Schleifen, schließen sich die Magnetfeldlinien kurz, und es kommt es zu einer abrupten Änderung der Struktur des Magnetfeldes und große Energiemengen werden freigesetzt (magnetische Rekonnexion). Dieses Phänomen ist wahrscheinlich für Sonneneruptionen verantwortlich. Aufgrund der entgegengesetzten Orientierung des Magnetfeldes wird die Schleife mit dem eingeschlossenen Material fortgeschleudert.

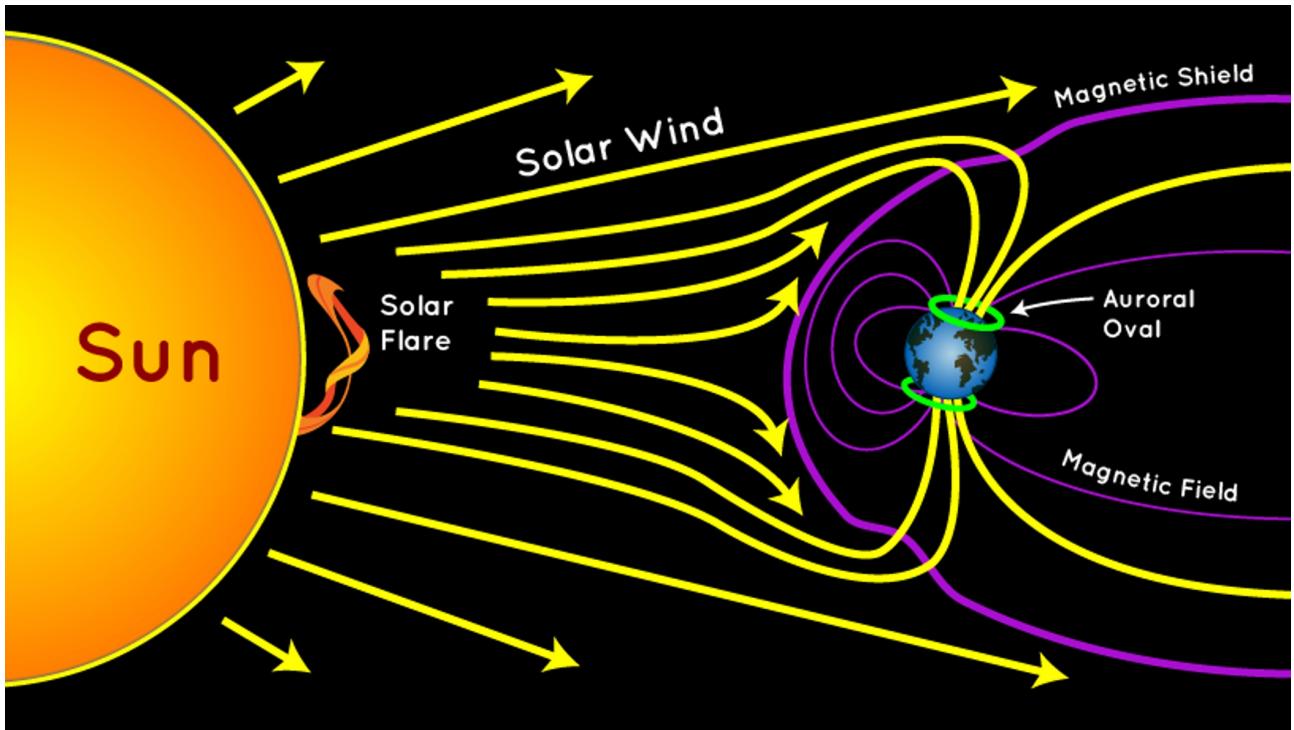


Abbildung 1: Prinzip der Sonnenstürme /1/

Dieser koronale Masseentwurf (englisch coronal mass ejection, CME) besteht hauptsächlich aus Elektronen, Protonen und zu kleinen Anteilen aus Kernen schwerer Elemente wie Helium, Sauerstoff und Eisen und ist elektrisch leitend. Trifft dieser Sonnensturm auf die Erde, kann das Magnetfeld der Erde so stark verformt werden, dass geladene Teilchen zur Erde beschleunigt werden, die ein Magnetfeld zur Folge haben. Dieses Magnetfeld steht in Wechselwirkung mit der Leitfähigkeit der Erde, was zu Erdspannungsdifferenzen führt. Es fließen im Erdreich geomagnetisch induzierte Ströme (englisch geomagnetically induced currents (GIC)). Um die Potentialunterschiede auszugleichen, suchen sich die Ströme die Wege des geringsten Widerstands. Geerdete Transformatorensternpunkte bieten den Strömen die niederohmigen Hochspannungsleitungen als Strompfad an.

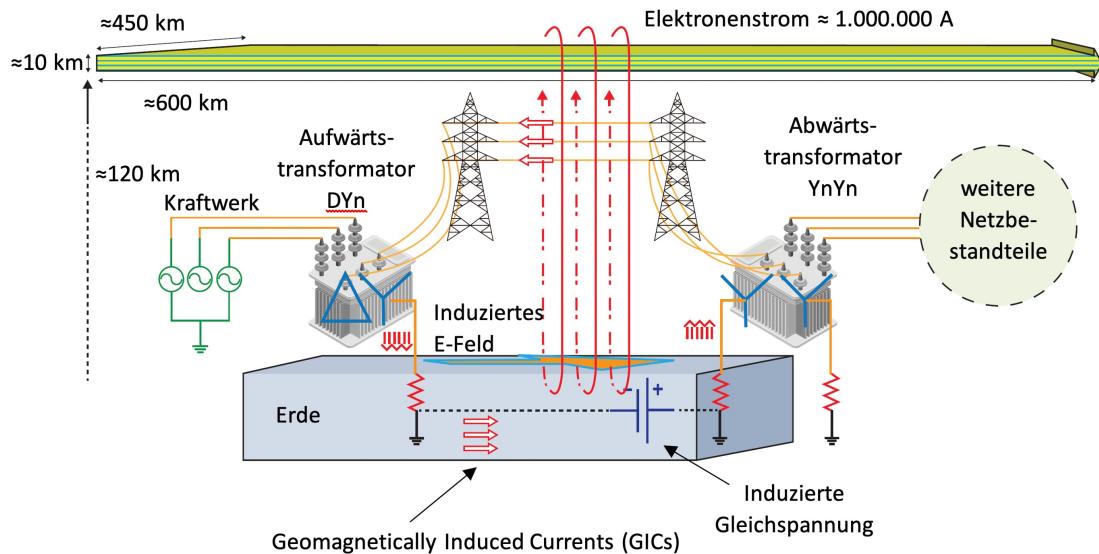


Abbildung 2: Entstehung von GICs

Die Frequenzen von GIC-Strömen liegen zwischen 100 µHz und 8 mHz. Diese niedrigen Frequenzen werden oftmals als DC-Ströme verallgemeinert. Bereits bei geringen Amplituden können diese Frequenzanteile induktive Bauteile in den magnetischen Sättigungsbereich treiben. Dies führt bei einem Leistungstransformator beispielsweise zu einem Anstieg der Leerlaufverluste, Vibrationen und Geräuschen.

Um die Sicherheit und Lebensdauer der Transformatoren auch bei vorhandenen GICs zu gewährleisten, ist durch die IEEE 2015 ein Leitfaden /2/ veröffentlicht worden, der für das Betriebsmittel Transformator unterschiedliche Kategorien hinsichtlich der zu erwartenden GICs definiert.

Klassifizierung / GIC-Empfindlichkeit	Niedrig $GIC \leq 15 A$	Mittel $15 A \leq GIC \leq 75 A$	Hoch $GIC \geq 75 A$
Keine (A)	I	I	I
Niedrig (B)	I	II	III
Mittel (C)	II	III	III
Hoch (D)	II	IV	IV

Tabelle 1: Kategorisierung der Gesamtanfälligkeit des Transformators gegenüber der Konstruktion und der GIC-Exposition (Bezug pro Phase) /3/

Die Stromstärke des GICs hängt hauptsächlich von der Intensität des auftretenden Sonnensturms ab. Unmittelbar wirken sich auch die Position und die Ausrichtung der Freileitung sowie die Erdimpedanzen zwischen den Leitungsenden auf die DC-Amplituden

aus. Generell können die GICs durchaus als stark schwankend beschrieben werden. In Einzelfällen können Amplituden bis zu 100 A oder mehr erreicht werden. /4/ Generell sind Gebiete mit hohen Breitengraden durch GICs öfter betroffen.

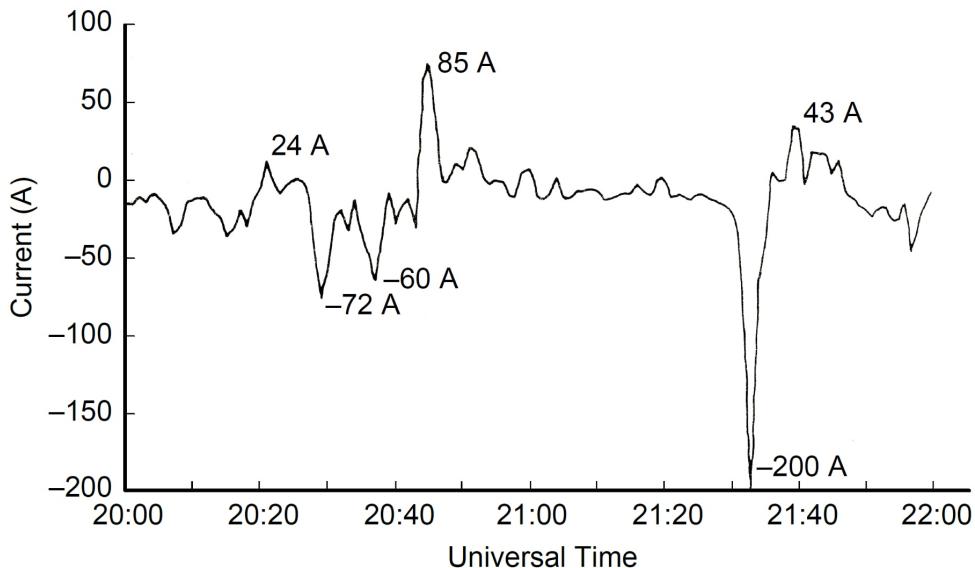


Abbildung 3: GICs gemessen in einem Transformator-Neutralanschluss in Finnland während eines geomagnetischen Sturms am 24. März 1991 /5/

Hybridleitungen

Neben GICs sind heute ebenfalls Hybridleitungen, bei denen ein konventionelles Wechselstromsystem (AC) zusammen mit einem Hochspannungsgleichstromsystem (HGÜ) auf einer gemeinsamen Freileitungstrasse geführt wird, eine potenzielle Quelle für DC-Ströme in AC-Systemen. Aufgrund der unmittelbaren Nähe und dem Potentialunterschied zwischen 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 10 mA/km auf parallel angeordneten Leitungen. /6/

DC-Systeme mit Erdleiter

Neben Hybridleitungen stellen DC-Systeme mit Erdleiter eine weitere potenzielle Quelle für unerwünschte DC-Ströme dar. Die einfachste Ausgestaltung einer Gleichstromübertragung ist eine monopolare Anordnung, die aus einer Hochspannungs-DC-Leitung und einer geerdeten Elektrode als Rückleiter besteht. Diese Betriebsart ist besonders für ältere Systeme mit Seekabeln üblich. Die Kosten für eine Rückleitung

können so eingespart werden. Aber auch bei nicht maritimen Anlagen wurde das Erdreich für die Rückleitung des Gleichstroms eingesetzt. Diese Anlagen sind aber nicht mehr genehmigungsfähig. Grundsätzlich muss bei monopolaren Gleichstromübertagungen ein zusätzlicher metallischer Rückleiter verbaut werden.

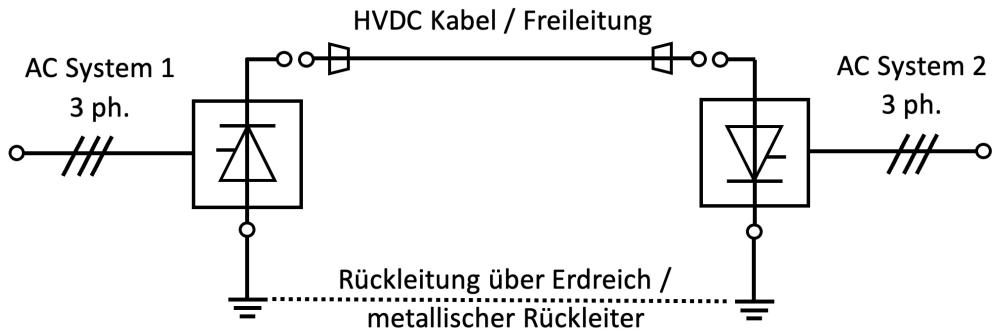


Abbildung 4: Systemstruktur eines monopolaren LCC-HGÜ-Systems

Neuanlagen werden zumeist als bipolare Systeme ausgeführt. Bipolar bedeutet, dass im Gegensatz zur monopolaren HGÜ zwei metallische Leiter eingesetzt werden, wobei auf mittlerem Potential geerdet wird: ein Leiter, der gegenüber dem Erdpotential eine positive Spannung aufweist, und ein Leiter, der gegenüber dem Erdpotential eine negative Spannung aufweist, beispielsweise ± 450 kV. In diesem Fall beträgt die Gleichspannung zwischen den beiden Leitern die doppelte Spannung wie zwischen einem Leiter und Erde, also in diesem Beispiel 900 kV. Je nach Ausführung kann auch ein metallischer Rückleiter mitgeführt werden, der in seinem Verlauf gegenüber der Erde isoliert geführt wird. Dann ist bei Ausfall einer Leitung der Weiterbetrieb mit halber Spannung möglich. Die bipolare Variante hat den Vorteil, dass das Magnetfeld des Stroms im Rückleiter das des Hinleiters ziemlich gut kompensiert, da sie gegenläufig orientiert sind. Nach etlichen Metern ist die Feldstärke unter dem des schwachen Erdmagnetfeldes, umso mehr je dichter Hin- und Rückleitung angeordnet sind.

Der Stromfluss in jedem Pol ist notwendigerweise symmetrisch, die unsymmetrischen Stromanteile, die zur Erde hin abfließen, sind in der Regel kleiner als 1-2% des Nennstromes. /7/

Bipolare Anlagen können auch so ausgelegt werden, dass bedarfsweise ein Betrieb als ein einzelner Monopol möglich ist. Durch einen einpoligen Fehler oder Wartungsarbeiten kann das bipolare System in der folgenden Abbildung einpolig betrieben werden.

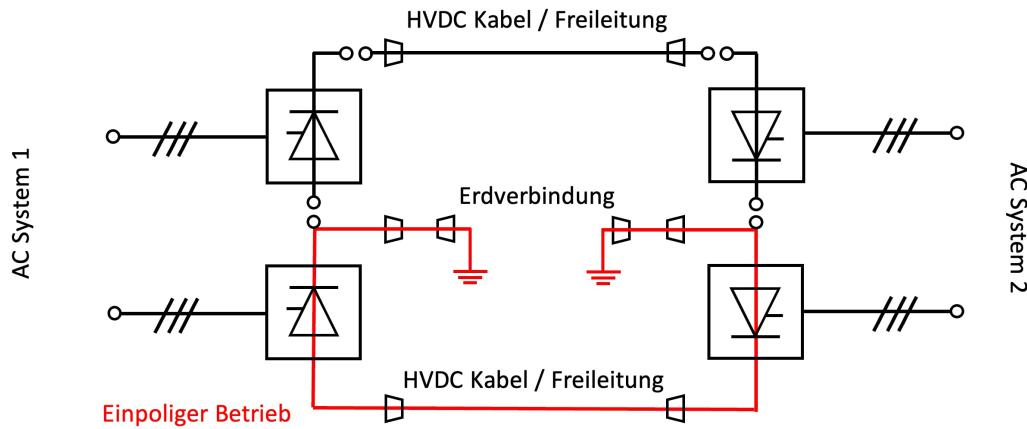


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer bipolaren Zweipunktverbindung mit der Serienschaltung von zwei Monopolen auf beiden Umrichterseiten

Generell gilt, dass jedes DC-System, das die Erde als Rückleiter verwendet, eine potenzielle Ursache für DC-Beeinflussungen in Hochspannungsfreileitungen ist. Die Rückleiterströme können AC-Systeme mit geerdetem Sternpunkt als Bypass zu dem Stromflusspfad im Erdreich darstellen.

DC-Bahnsysteme mit nichtisoliertem Rückleiter

Neben HGÜ-Systemen können ebenfalls Streuströme aus Bahnnetzen in das Hochspannungsnetz über geerdete Transformatoren eindringen.

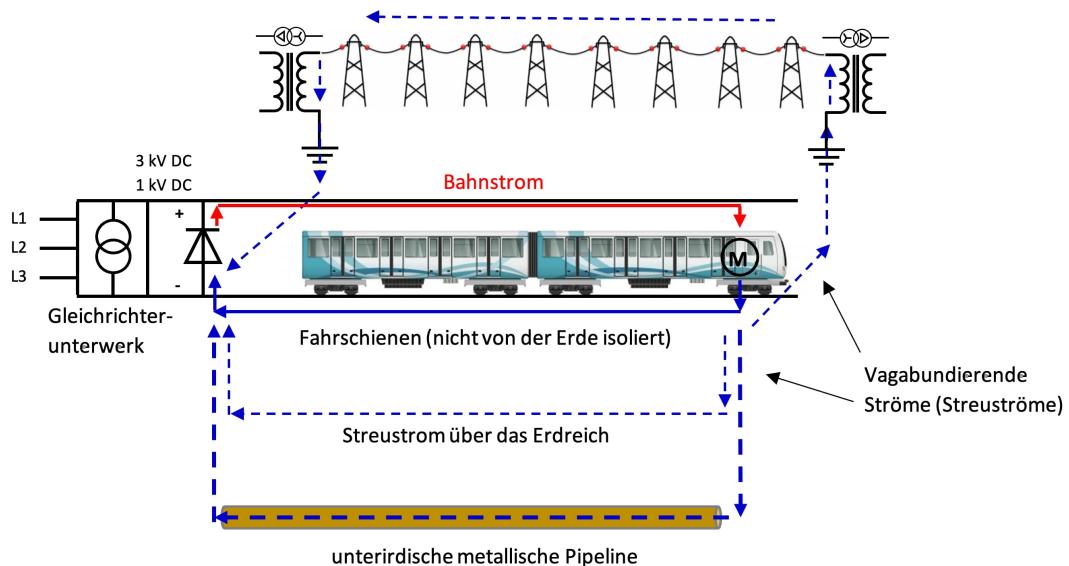


Abbildung 6: Streuströme eines DC-Bahnsystems

Eine komplette Isolation der Rückleiter ist meistens nicht gegeben, wodurch andere Strompfade nicht gänzlich ausgeschlossen werden können. Die Stromamplituden der Streuströme korrelieren mit den Widerständen der alternativen Strompfaden.

DC Komponenten durch nicht-lineare Lasten und Einspeiseanlagen

Vielen Normgremien ist bereits bewusst, dass beispielsweise Wechselrichter von Photovoltaikanlagen DC-Anteile in das Versorgungsnetz einspeisen können. Verantwortlich sind zumeist kleine Unterschiede in den u-i-Kennlinien der verwendeten Halbleiterbauelemente. In der deutschen VDE-AR-N 4100 von 2019 findet sich daher der folgende Passus.

VDE-AR-N 4100:2019-04
5.4.4.9 Einspeisung von Gleichströmen in das Niederspannungsnetz
Ein Umrichter darf nicht mehr als 0,5 % seines Bemessungsstromes oder maximal 20 mA (der höhere Wert ist zu wählen) als Gleichstrom einspeisen.
Anmerkung 1: Die Messung von Gleichströmen erfolgt auf Basis der DIN EN 61000-4-7 (VDE 0847-4-7) über 10 Grundschwingungsperioden
Anmerkung 2: Gleichströme können zu Korrosionsschäden an Kabeln und Schäden an anderen Betriebsmitteln sowie zur Sättigung von Transformatoren und anderen Induktivitäten führen.

Abbildung 7: Normative Regelung in Deutschland hinsichtlich der DC-Komponente

Der DC Anteil wird gemäß dieser Richtlinie auf 0,5 % oder maximal 20 mA des Bemessungsstromes begrenzt.

In einer aktuellen Veröffentlichung sind drei verschiedene Umrichter untersucht worden. Folgende Resultate wurden ermittelt. /8/

	Typ A	Typ B	Typ C
Nennleistung [kVA]	2.600	2.500	3.300
Nennspannung [V]	230	230	230
Nennstrom [A]	11,3	14,2	14,5
Stromamplitude 50 Hz [A]	9,266	9,17	9,13
THDI [%]	1,98	5,22	3,88
DC Anteil [%]	0,8	0,25	0,12
DC Anteil [mA]	74	23	11

Tabelle 2: Transformatorlose Photovoltaik-Wechselrichter

Zwei der drei untersuchten Modelle produzieren einen DC Anteil, der über der Grenze von 20 mA liegt. Eine Kontrolle dieser Werte im Feld wird in der Regel durch den Verteilnetzbetreiber nicht durchgeführt.

Aber auch jedes PC-Netzteil ist eine potenzielle DC Quelle. Durch leichte Unterschiede in den u-i-Kennlinien der Dioden (rote Dioden ungleich blaue Dioden) kommt es zu einer Asymmetrie der beiden Halbwellen.

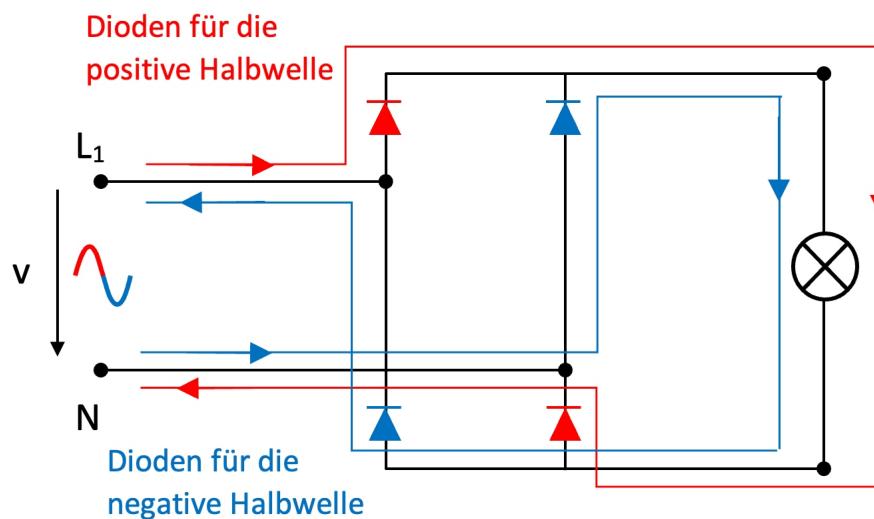


Abbildung 8: Prinzipieller Aufbau eines Brückengleichrichters

Wird nun ein Brückengleichrichter mit leicht unterschiedlichen Dioden realisiert, ergeben sich folgende Stromverläufe.

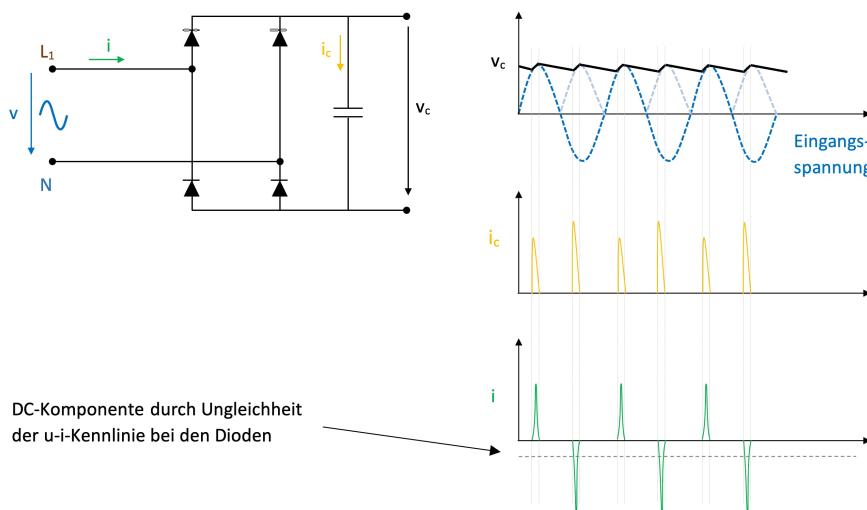


Abbildung 9: Brückengleichrichter mit Dioden, die eine leicht unterschiedliche u-i-Kennlinie aufweisen

Das komplette u-i-Diagramm ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die negative Halbwelle des Stroms in grüner Farbe ist durch die Asymmetrie der u-i-Kennlinie deutlich größer als die positive Halbwelle (gestrichelt).

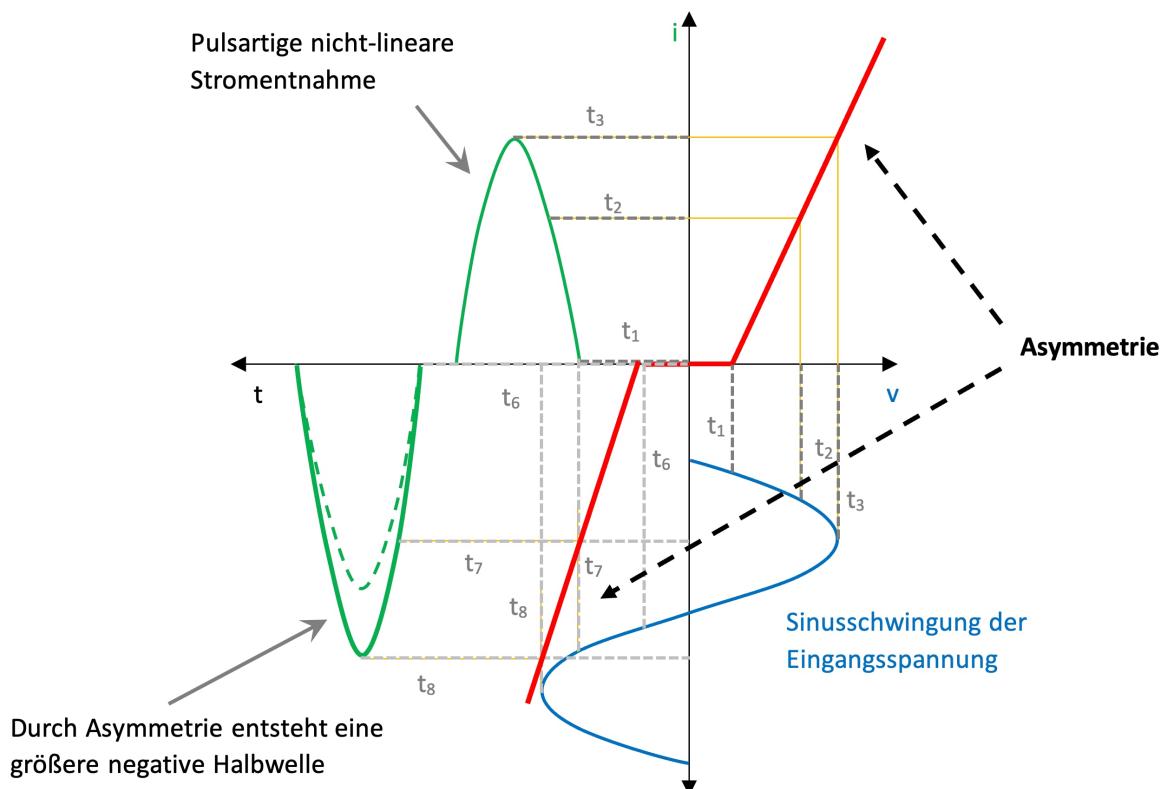


Abbildung 10: DC Komponente durch Asymmetrie der u-i-Kennlinie bei Dioden

In der Praxis konnten diese DC Anteile bereits nachgewiesen werden. /9/ Hierzu wurden neun Desktop-Rechner und ein Laptop untersucht. Der DC Anteil ist von der aktuell bezogenen Leistung des Rechners abhängig.

Art und Leistung des Rechners	Minimumwert [mA]	Maximumwert [mA]	Durchschnittswert [mA]
Desktop (400 W)	-57	56	17
Desktop (250 W)	-44	43	12
Desktop (200 W)	-38	30	6
Desktop (350 W)	-44	43	11
Desktop (350 W)	-41	51	13
Desktop (250 W)	-44	44	13
Desktop (300 W)	-33	34	10
Desktop (350 W)	-42	49	11
Desktop (400 W)	-57	74	16
Laptop (90 W)	-15	26	4
Durchschnitt	-41,5	45	11,3

Tabelle 3: DC-Anteile von PCs

Im Durchschnitt generierte ein Rechner 11,3 mA. Bei ungünstigen Konstellationen können somit in Bürogebäuden erhebliche DC Komponenten erreicht werden.

Aber es reicht auch ein gewöhnlicher Haartrockner als Verbraucher, um einen DC-Anteil zu generieren. Die elektronische Schaltung besteht in den meisten Fällen aus einem Einweg-Gleichrichter mit ohmscher Last. Es wird dadurch nur die positive Halbwelle für die Energiebereitstellung genutzt. Ein Stromfluss kann nur in den positiven Halbwellen der Spannung fließen.

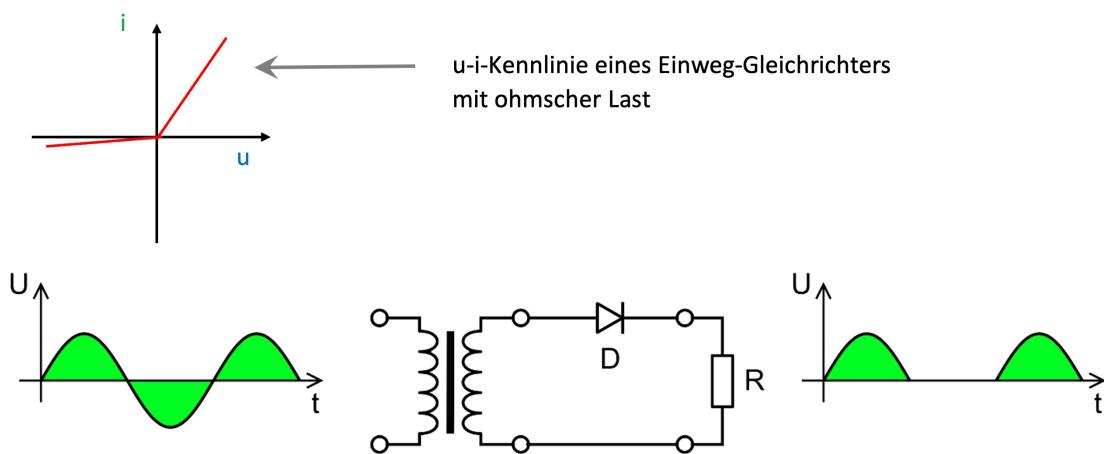


Abbildung 11: Einweg-Gleichrichter: u-i-Kennlinie und Ersatzschaltbild /10/

Auswirkungen des DC-Anteils auf induktive Stromwandler

Wie alle Transformatoren besitzt der Stromwandler ebenfalls einen Eisenkern, der durch die primäre Größe magnetisiert wird. Diese primäre Größe wird auf die Sekundärseite mit dem gewünschten Übersetzungsverhältnis transformiert. Der Stromwandler ist ein Transformator, der nahezu im Kurzschluss betrieben wird. Somit ist der Strom die eingeprägte Größe und nicht die Spannung wie bei Leistungstransformatoren. Eine DC-Komponente im AC-Signal wird den Eisenkern magnetisieren, aber eine Transformation auf die Sekundärseite kann aufgrund der physikalischen Grundgesetze nicht stattfinden. Durch die Teilmagnetisierung des Kerns wird der magnetische Arbeitspunkt des Stromwandlers verschoben. Der Magnetisierungsstrom des Eisenkerns, der hauptverantwortlich für den Amplituden- und Phasenfehler ist, ändert sich. Die Randbedingungen, unter denen die Genauigkeit des Wandlers definiert wurde, haben sich mit einem DC Anteil geändert. Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss bereits kleine DC-Anteile auf die Genauigkeit von Stromwandlern haben.

Bei GICs handelt es sich um niederfrequente Anteile im Bereich zwischen 100 µHz und 8 mHz. Es handelt sich trotz der Bezeichnung DC-Strom um eine Schwingung. Daher kann die Berechnungsformel, die die magnetische Flussdichte in Tesla ausgibt, verwendet werden

$$B_{peak} = \frac{\sqrt{2} \times \left(I_p \times \frac{N_1}{N_2} \right)^2 \times R \times 10.000}{2 \times \pi \times f \times I_p \times N_1 \times A_{Fe} \times f_u}$$

B_{peak} = magnetische Flussdichte [Tesla]
 I_p = Primärstrom [A]
 f = Bemessungsfrequenz [Hz]
 A_{Fe} = eff. Eisenquerschnitt [cm^2]
 R = Bürdenwiderstand [Ohm]
 N_2 = Sekundärwindungen
 N_1 = Primärwindungen
 f_u = Füllfaktor des Eisenkerns

Abbildung 12: Berechnung des magnetischen Arbeitspunktes bei Stromwandlern

Nehmen wir nun einen Durchführungsstromwandler für Messaufgaben mit dem Übersetzungsverhältnis von 100/1 A und einer Bürdenleistung von 5 VA. Bei einem Eisenquerschnitt von 6 cm² liegen wir bei einer nicht unüblichen magnetischen Flussdichte von ca. 0,4 T für Fe-Si-Legierungen. Für die Bemessungsfrequenz wählen wir 50 Hz. Der Sättigungsbereich dieser Legierungen liegt in einem Bereich zwischen 1,65 und 2 Tesla.

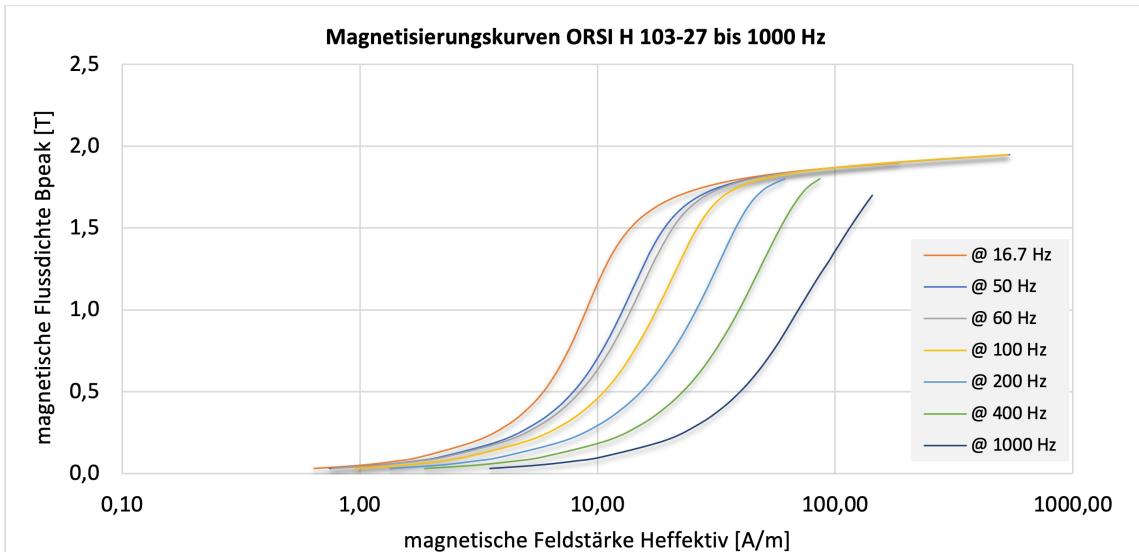


Abbildung 13: Magnetisierungskurven (Neukurven) der Fe-Si-Legierung ORSI H 103-27 bis 1000 Hz

Nehmen wir nun an, dass dieser Stromwandler in der Praxis lediglich mit der noch erlaubten Viertelbürde von 1,25 VA belastet wird, senkt diese Maßnahme den magnetischen Arbeitspunkt noch einmal auf ca. 0,1 T ab. Hierbei wird der Parameter elektrischer Widerstand (R) auf 1,25 Ohm herabgesetzt. Kalkulieren wir jetzt allein für einen GIC von 5 mA und 0,0001 Hz den magnetischen Arbeitspunkt, liegen wir bei beachtlichen 2,47 T. Das bedeutet, der Wandler ist bei einer Signalkomponente von 5 mA und 0,0001 Hz bereits tief in der Sättigung.

Die Universität Stuttgart hat die Auswirkungen von parasitären DC-Komponenten auf induktive Stromwandler untersucht /11/. Während Schutzkerne mit Luftspalt erwartungsgemäß deutlich resistenter auf DC-Anteile reagieren, verlässt der Stromwandler für Messzwecke bereits bei 100 mA DC die spezifizierte Klasse 0,2 und liegt mit dem Amplitudenfehler bei ca. -0,55 %. Grundsätzlich reagieren Messkerne empfindlicher auf DC-Anteile, weil diese Wandler oftmals mit einem Überstrombegrenzungsfaktor ausgelegt werden. Dieser liegt üblicherweise bei 5 oder 10. Das bedeutet der Stromwandler muss bei voller Belastungsbürde spätestens bei dem 5- bzw. 10-fachen Überstrom sättigen. Das wiederum bedeutet, dass der übertragene Sekundärstrom begrenzt wird. Diese Schutzmaßnahme gilt vor allem dem nachgeschalteten Messgerät. Oftmals ist diese Schutzmaßnahme aber nicht mehr relevant, da viele Messgeräte für die Stromeingänge selbst kleine Stromwandler verwenden, die ein entsprechendes Sättigungsverhalten aufweisen, um den nachgeschalteten präzisen Messshunt zu schützen.

Ist nun der Arbeitspunkt des Stromwandlers durch eine DC-Komponente verschoben worden, stellt sich die Frage, ob die unerwünschte Aufmagnetisierung wieder durch den Standardbetrieb neutralisiert werden kann.

Grundsätzlich ergeben sich bei geschlossenen Ringbandkernen relativ große Remanenzen. Der Remanenzfaktor K_r wird in der Norm als Quotient aus Remanenzfluss und Sättigungsfluss errechnet. /12/

$$K_R = \frac{\psi_{r,max}}{\psi_s \times 100\%}$$

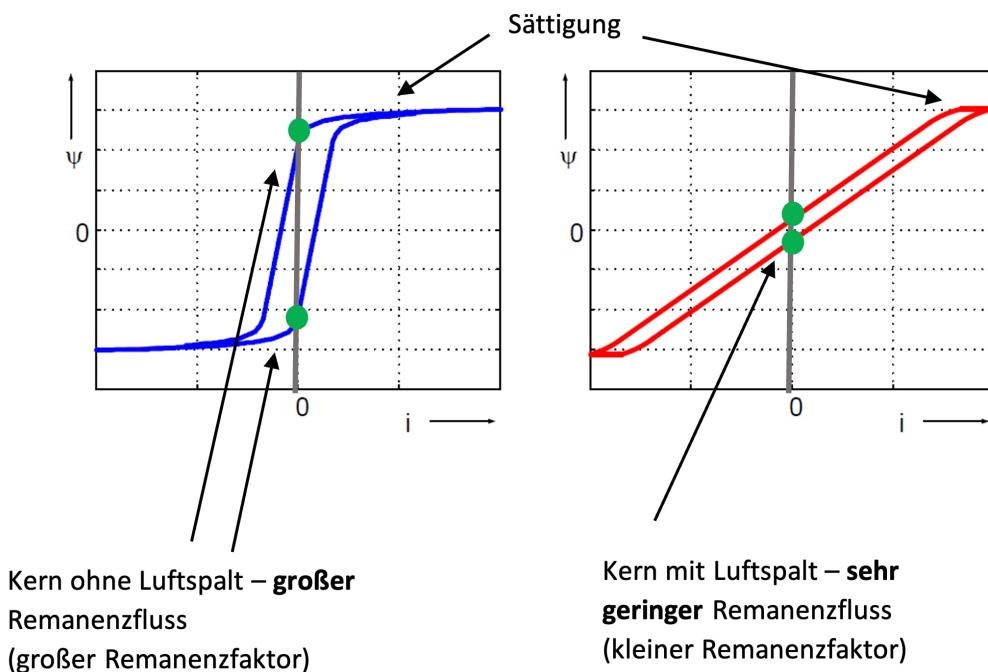


Abbildung 14: Geschlossener Eisenkern mit großem Remanenzfaktor und Eisenkern mit Luftspalt mit kleinem Remanenzfaktor

Fließt nun ein GIC durch den Primärleiter, kann der magnetische Arbeitspunkt verschoben werden. Statt der blauen Hysteresekurve wird nun durch das AC-Signal die rote Kurve durchfahren. Nicht nur die Genauigkeit leidet, sondern der Wandler zieht ebenfalls einen deutlich größeren Magnetisierungsstrom, wenn der Sättigungsbereich tangiert wird.

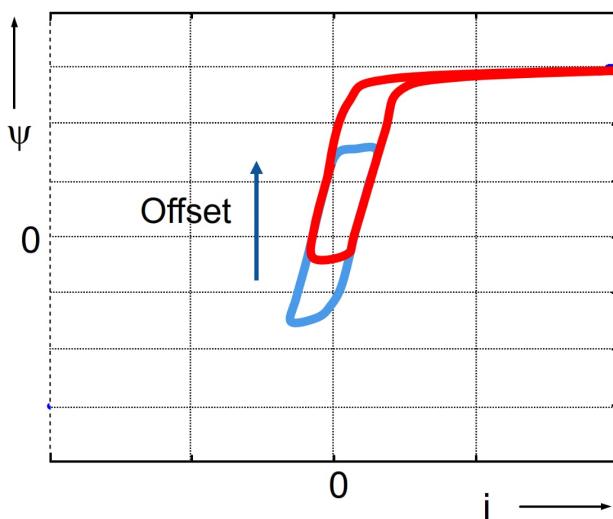


Abbildung 15: Durch einen DC-Offset verschobene Hysteresekurve

Die Restmagnetisierung baut sich im Standardbetrieb nur zu einem Teil ab. Dies konnte bei Schutzkernen bereits 2006 nachgewiesen werden /13/. Messkerne unterscheiden sich hauptsächlich durch den früheren Eintritt der Sättigung bei Überströmen. In einer weiteren Studie von Omicron wurden Remanenzfaktoren und die im Feld vorhandene Restmagnetisierung bei 26 Mittelspannungs-Stromwandlern untersucht /14/. Es konnte gezeigt werden, dass geschlossene Stromwandlerkerne einen durchweg hohen Remanenzfaktor größer 60 % aufweisen. Die Restmagnetisierung vor der Messung lag bei Werten zwischen 0 % und 100 %.

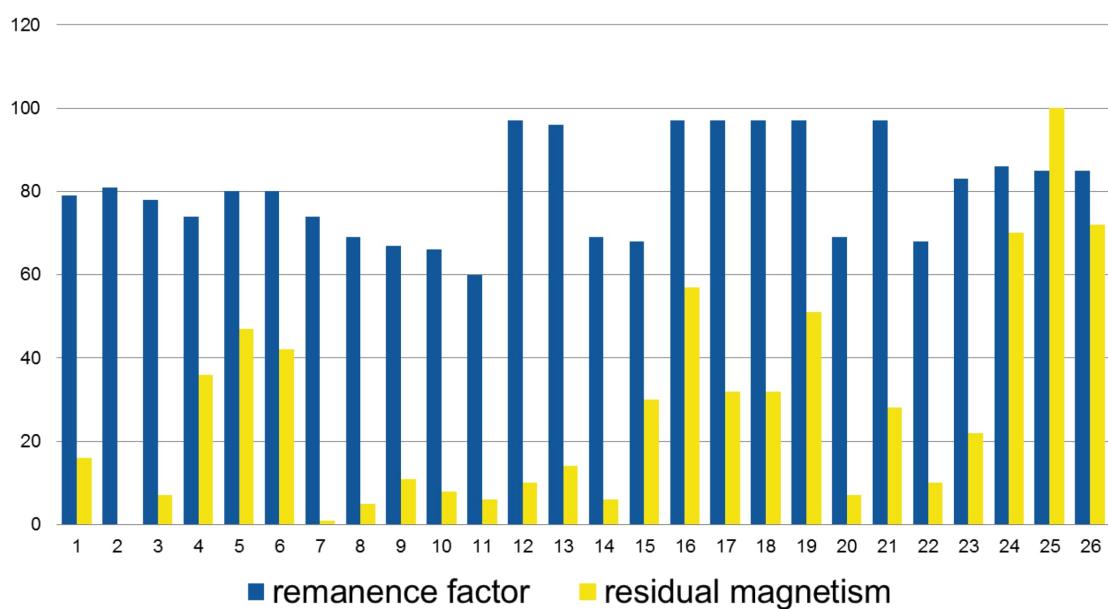


Abbildung 16: Remanenzfaktor (Blau) und Restmagnetisierung (Gelb) in einer Fallstudie an 26 eisengeschlossenen Stromwandlern

Bei Energiezählern werden aufgrund der möglichen DC-Anteile durch nicht-linearen-Verbraucher bereits DC-Tests normativ erwähnt /15/. Das Kernmaterial der Eingangsstromwandler, das bei diesen Zählern verwendet wird, gleicht von der B-H-Charakteristik einem Kern mit Luftspalt. Eine unerwünschte Aufmagnetisierung mit DC-Strömen kann somit verhindert werden. Oftmals ergeben sich bei diesen Kernmaterialien aber große Phasenfehler, die anschließend in der Zählerelektronik nachträglich korrigiert werden müssen.

Zero-Flux-Stromwandler

Für Referenzmessungen in den verschiedenen Spannungsebenen und bei Verrechnungsmessungen oberhalb von 110 kV-Systemen werden aus den hier genannten Gründen Zero-Flux-Stromwandler eingesetzt, die DC-Ströme wie auch AC-Ströme hochgenau auf die Sekundärseite transformieren können.

DC-Anteile und Power Quality-Parameter wie z. B. Oberschwingungen werden mit einem Powerquality-Analyzer erfasst und über ein SCADA System in die Zentrale übermittelt. Gleichzeitig können die hochgenauen 50 Hz Werte für Digitalisierungsvorhaben über das Protokoll der IEC 61850 in die Leitwarte übermittelt werden. Störungen bei Schutzsystemen und Fehlmessungen können dadurch leichter analysiert werden. Gefährliche DC-Anteile für induktive Bauteile können jederzeit detektiert werden.

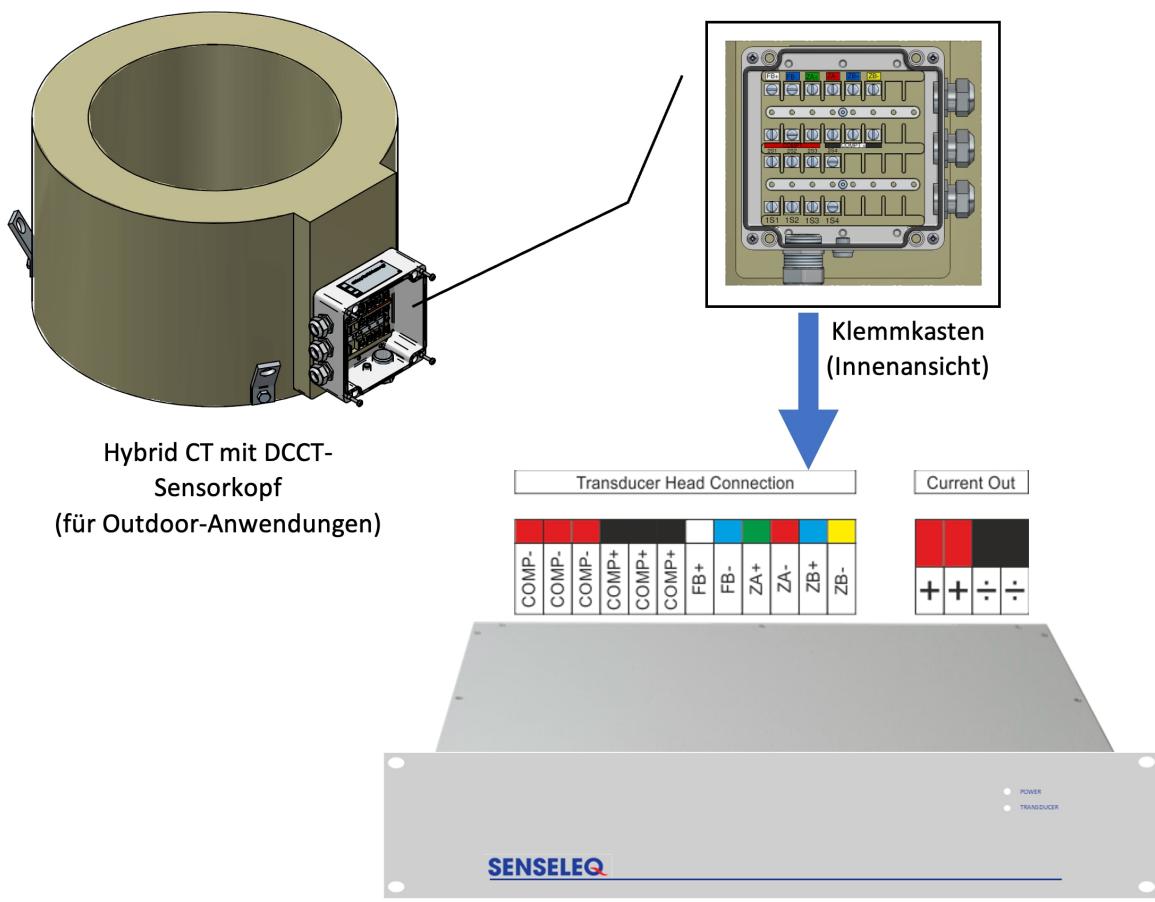


Abbildung 17: Zero-Flux-Sensor in Gießharz für Outdoor-Anwendungen von SENSELEQ

Zusammenfassung

Messkerne von Stromwandlern können schon durch kleine parasitäre DC-Ströme in ihrer Genauigkeit deutlich beeinträchtigt werden. Potenzielle DC-Quellen finden sich mittlerweile auf allen Spannungsebenen. Wie im Laborbereich kann es sinnvoll sein, DCCTs mit dem Zero-Flux-Prinzip zu nutzen, um die komplette Kontrolle über die Netze zu behalten. Es ist bereits in den zurückliegenden Jahren deutlich geworden, dass die Labormesstechnik mit einem zeitlichen Versatz ihren Platz auch in der Netzinfrastruktur erhält. Bei Strommessungen im Labor werden größtenteils Zero-Flux-Stromwandler eingesetzt, um Subharmonische und DC-Komponenten mitmessen zu können. Gleichzeitig können zuverlässig Stromharmonische bis in den Megahertzbereich gemessen werden. Die Genauigkeit ist nahezu perfekt.

Quellen:

/1/ <https://scijinks.gov/aurora/>

/2/ IEEE C57.163-2015

/3/ IEEE C57.163-2015 IEEE Guide for Establishing Power Transformer Capability while under Geomagnetic Disturbances.

/4/ 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.

/5/ J. Elovaara, P. Lindblad, A. Viljanen, T. Mäkinen, R. Pirjola, S. Larsson, and B. Kielén, “Geomagnetically Induced Currents in the Nordic Power System and Their Effects on Equipment, Control, Protection and Operation,” paper 36-301 of the proceedings of the CIGRE 1992 Session, Paris, France, 1992.

/6/ B. Rusek, „Ohmic coupling between AC and DC circuits on hybrid lines,“ Cigré – Symposium Auckland, 2013

/7/ [Hochspannungsgleichstromübertragung – Eigenschaften des Übertragungsmediums Freileitung](#)

/8/ Investigation of the Effects of DC Current Injected by Transformer-Less PV Inverters on Distribution Transformers Md. Ashib Rahman , Member, IEEE, Md. Rabiul Islam , Senior Member, IEEE, A. M. Mahfuz-Ur-Rahman , Member, IEEE, Kashem M. Muttaqi , Senior Member, IEEE, and Danny Sutanto , Senior Member, IEEE

/9/ [The Effect of DC Current on Power Transformers A dissertation submitted by Ashley Karl Zeimer](#)

/10/ [Von Wdwd - Eigenes Werk, CC BY 3.0](#)

/11/ [Beeinflussung von induktiven Stromwandlern in Hoch- und Höchstspannungsnetzen durch parasitäre Gleichströme](#)

/12/ IEC 61869-2

/13/ Dickert, J.; Luxemburger, R.; Schegner, P.: Investigation on the behavior of the remanence level of protective current transformers. 2006

/14/ Dr. Michael Freiburg / Rainer Luxenburger, OMICRON - Remanenz bei Stromwandlern und Auswirkung auf den Schutz

/15/ DC Tolerance Test according to IEC 62053-21, -23