



## Zustandsbewertung von Blechpaketen mit CPC 100

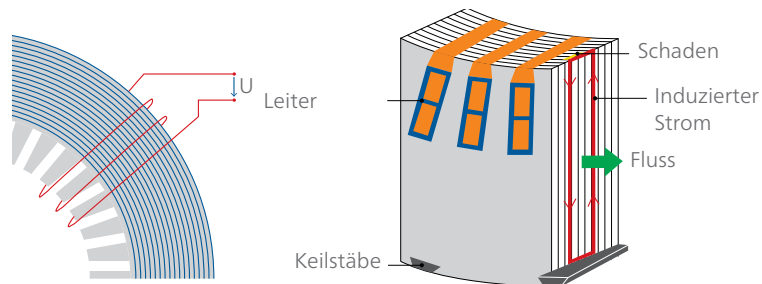
Blechpakete von rotierenden elektrischen Maschinen bestehen aus einzelnen, zueinander isolierten Blechen, um die Kernverluste (Stichwort: Wirbelströme) zu minimieren. Ein Kurzschluss zwischen zwei oder mehreren Blechen verursacht ein örtliches Ansteigen der Wirbelströme, woraus wiederum lokale Heißstellen entstehen können. Diese können im schlimmsten Fall eine partielle Schmelze des Blechpaketes und somit einen Totalschaden der Maschine zur Folge haben. Eine frühzeitige Detektion potentieller Fehlstellen ist deshalb essentiell, ist aber – bei einer Messung mit Nennfluss und Thermografie – mit sehr hohem Aufwand verbunden. Außerdem ist der Aufbau zeit- und ressourcenaufwendig.

Eine zuverlässige Alternative dazu ist die Streuflussmessung mit CPC 100. Das Gerät vereint Messgerät sowie Quelle für die Erregung des Kerns in einem tragbaren System, welches über einen normalen Netzstecker versorgt werden kann. Neben der Messung bei Nennfrequenz erlaubt CPC 100 auch eine Erregung mit höheren Frequenzen von bis zu 400 Hz. In diesem Artikel werden der Effekt der Einspeisung bei unterschiedlichen Frequenzen und die Erkennung von tiefer liegenden Fehlern erläutert sowie die Streuflussmessung mit der Heistellendetektion bei Nennfluss verglichen.

### I. EINFÜHRUNG

Zur Erkennung von Schwachstellen in der Isolierung von Blechpaketsegmenten kann neben anderen Verfahren auch eine Streuflussmessung zum Einsatz kommen. Bei dieser Messung wird ein kleiner Anteil des Nennflusses im Bereich von 2 % bis 10 % über eine Hilfswicklung in den Kern induziert (Abbildung 1 links) [1]. Tritt zwischen den Kernblechen ein Kurzschluss auf, kommt es durch einen erhöhten lokalen Wirbelstrom zu einem höheren Streufluss

Abbildung 1



Links: Hilfswicklung mit Darstellung der Flusslinien (blau); Rechts: höherer Wirbelstrom infolge eines Schadens im Blechpaket

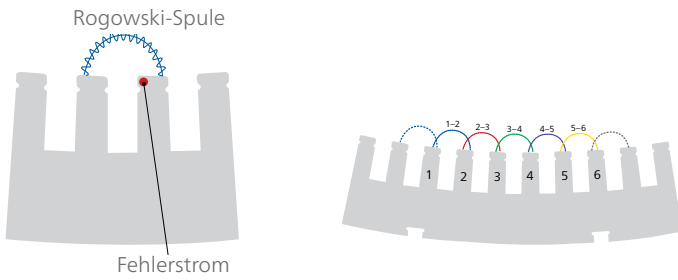
an der Oberfläche des Kerns (siehe Abbildung 1 rechts).

Dieser wird durch eine Rogowski- oder Chattock-Spule erkannt, die die Stnderoberflche abfhrt (siehe Abbildung 2). [3] Die Messwerte der Spule werden in mA angegeben und mit der jeweiligen Position innerhalb des Blechpakets korreliert. Da Messspulenbreite und Windungszahl des Sensors bei jeder Messung gleich sind, kann vor jeder Messung eine Kalibrierung durchgeführt werden.

Bei einer Messung mit einer Einspeisung von 4 % des Nennflusses [1] muss die Erregung der Quelle typischerweise nicht mehr als 2 kVA bis 3 kVA liefern [2]. In den meisten Maschinen ist sogar noch weniger Leistung erforderlich. Im Vergleich zu anderen Verfahren, wie z. B. der Messung bei hoher Induktion, ist dies ein großer Vorteil, da die Versorgung und der Aufbau für diese Messung einfach und schnell zu bewerkstelligen sind.

Ein üblicher Wert, der bei der Messung nicht überschritten werden sollte, sind 100 mA des Quadraturstroms, wenn Messungen bei 4 % des Nennflusses und der Nennfrequenz durchgeführt werden [1, 2].

Abbildung 2



Messung des Streuflusses durch die Rogowski-Spule. Die einzelnen Nuten werden nacheinander abgefahren. Um die gesamte Fläche des Ständers abzudecken, weisen die einzelnen Messungen einen Überlappungsbereich auf.

## II. BESONDERHEITEN DER LÖSUNG

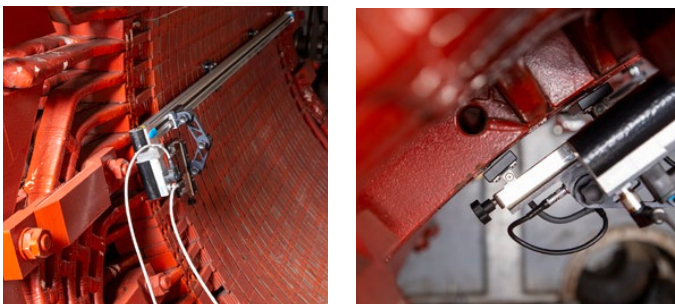
Die in Kapitel I erläuterten Parameter gelten auch für die CPC 100-Lösung. Zusätzlich ermöglichen einige Besonderheiten dieser Lösung eine schnelle und zuverlässige Messung und eine intuitive Bedienung:

### A. Einfachere Durchführung von Messungen dank halbautomatischer Sensorbewegung

Da ein händisches Abfahren der gesamten Blechpaket-Innenseite umständlich und zeitaufwendig ist, wurde versucht, die Durchführung der Messung so einfach wie möglich zu gestalten. Daher bewegt sich der Sensor bei der CPC-100-Lösung für die Streuflussmessung automatisch über die einzelnen Nuten. Möglich wird diese Bewegung durch eine Schiene (RAA1), welche mit starken Magneten am Blechpaket angebracht wird. Zusätzliche Absturz-Sicherungen sorgen dafür, dass die Schiene nach dem Anbringen sicher an ihrem Platz bleibt.

Der Sensor auf dem Schlitten fährt in einem Abstand von 2 bis 3 Millimetern über die Ständeroberfläche, was eine hohe Messempfindlichkeit gewährleistet. Außerdem sorgt

Abbildung 3

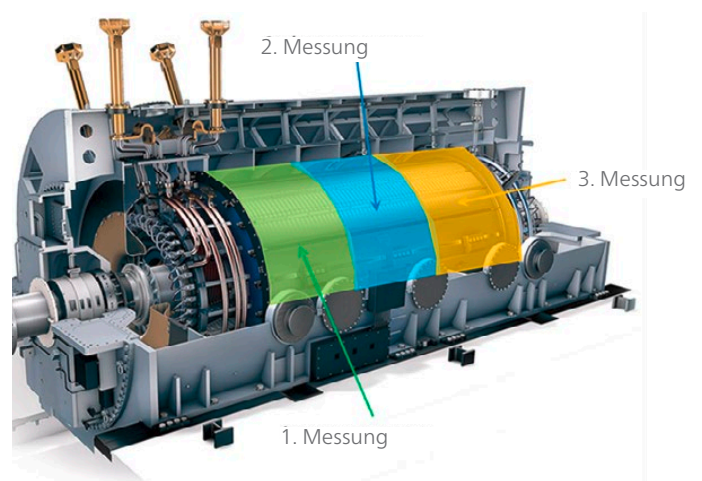


Schiene und Spule im Messeinsatz

die berührungslose Messung dafür, dass die Ergebnisse nicht durch von Lüftungsschlitzen verursachte Spitzen oder andere Unebenheiten verfälscht werden.

Die Schiene kann eine maximale Länge von 1760 Millimetern abdecken. Da die Ergebnisse der einzelnen Messverfahren in der Software miteinander kombiniert werden können, können aber auch längere Ständer gemessen werden. In diesem Fall wird empfohlen, den Ständer in Segmente zu unterteilen und jedes Segment einzeln zu messen (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4



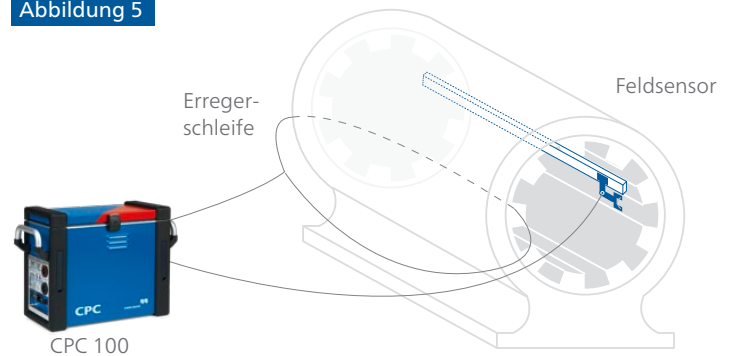
Vorgehensweise beim Messen langer Ständer; Bildquelle: Siemens

Für die lokale Diagnose sowie für Sonderfälle, wie z. B. lange, abgestufte Endbereiche von großen Turbogeneratoren, sind auch Messungen im manuellen Modus möglich.

### B. Schlüsselfertiges System mit Messung und Erregung

Aufgrund der geringen Leistungsanforderung von weniger als 3 kVA kann CPC 100 gleichzeitig als Quelle und als Messgerät dienen. Auch höhere Erregerleistungen sind möglich, da die Erregung nur dann aktiv ist, wenn sich der Sensor auf der Schiene bewegt. Zusammen mit der Schiene (RAA1), der Steuereinheit (SCU1) und dem Wicklungsmultiplikator (WMP1) haben Anwender alles zu Verfügung, was für die Messung benötigt wird.

Abbildung 5



Vereinfachtes Schema der CPC-100-Lösung als Erregungsquelle und Messgerät

Das Erregerkabel liegt ebenfalls bei und ist für die Messung an größeren Maschinen verlängerbar. Je nach Art der zu messenden Maschine (Turbo- oder Wasserkraftgenerator) können zwei unterschiedliche Erregerkabel angeschlossen werden: ein zweiadriges und ein achtadriges Kabel.

### C. PTM-Unterstützung

Der Anwender wird von der Primary Test Manager (PTM)-Bediensoftware durch den Prüfvorgang geleitet. PTM bietet darüber hinaus Anschlusspläne und eine automatisierte

Berechnung der Erregerwicklung abhängig vom Wicklungsschema (empfohlen, sofern verfügbar) oder von den Blechpaketabmessungen.

Außerdem stehen dem Anwender eine Anzeige der Messergebnisse in Echtzeit und eine Falschfarbendarstellung der Blechpaketoberfläche (eine sogenannte „Heatmap“), die einen Überblick über die Messung gibt (siehe Abbildung 14), zur Verfügung. PTM ermöglicht eine sehr einfache Messbericht-Erstellung und bietet zusätzlich die Zusammenfassung aller Ergebnisse der mit CPC 100 durchgeführten Messungen am Betriebsmittel in einem Prüfprotokoll.

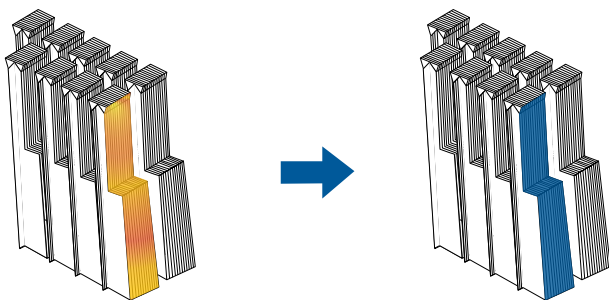
### III. VERSUCHSAUFBAU

Die Untersuchungen zu Reproduzierbarkeit und Messung mit verschiedenen Frequenzen wurden an einem kleinen, ausgemusterten Wasserkraftgenerator mit einer Nennspannung von 6,4 kV und 156 Nuten durchgeführt. Die Ständerwicklung ist eine Spulenwicklung mit 2 Wicklungen pro Spule. Alle anderen in den Kapiteln VI und VII beschriebenen Versuche wurden an anderen Maschinen durchgeführt. Der genaue Prüfaufbau wird in den jeweiligen Kapiteln beschrieben.

Die Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sowie der Einfluss der unterschiedlichen Erregerfrequenzen wurden an einer Nut mit einer künstlichen Fehlstelle durchgeführt. Dazu wurde eines der Ständersegmente mithilfe eines Kupferdrahts kurzgeschlossen (siehe Abbildung 6). Diese Modifikation wird vorgenommen, weil es einfacher ist, den Draht über zwei Lüftungskanäle zu legen, als eine Beschädigung des Blechpakets hinzunehmen.

In Kapitel IV wurde ein anderer künstlich herbeigeführter Fehler als in Kapitel V verwendet.

Abbildung 6



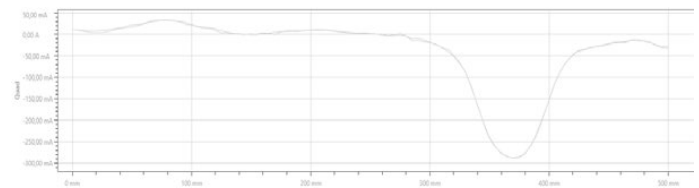
Vorgehensweise bei der künstlichen Herbeiführung eines Fehlers

### IV. REPRODUZIERBARKEIT

Um sicherzugehen, dass die Messergebnisse nicht durch den Messaufbau beeinflusst werden, wurden Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit durchgeführt. Dies ist besonders dann wichtig, wenn Messergebnisse von einem Betriebsmittel von zwei unterschiedlichen Messungen verglichen werden. So kann die Entwicklung von potentiellen Schwachstellen über die Zeit beobachtet werden.

Der erste Vergleich in Abbildung 7 zeigt zwei Messungen an derselben fehlerbehafteten Nut, ohne dass Einstellungen an der Schiene oder am Sensor geändert wurden.

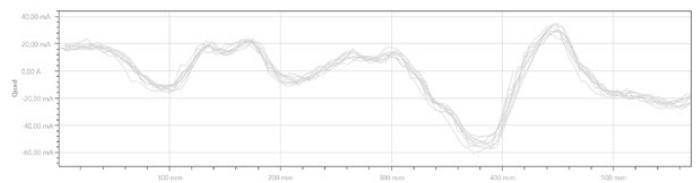
Abbildung 7



Zwei Messungen an derselben Nut

Da die hohe Reproduzierbarkeit nicht überrascht, wurde beim nächsten Vergleich in Abbildung 8 zu Beginn jeder Messung der mechanische Aufbau geändert. In diesem Fall wurde dieselbe intakte Nut gescannt, das heißt, diese Messungen fanden ohne künstlich herbeigeführten Fehler statt. Nach jedem mechanischen Neuaufbau zu Beginn einer Messung wurde die Messkurve erfasst. Die Streuung der Ergebnisse ist höher als in Abbildung 7, aber immer noch sehr niedrig und stellt damit kein Hindernis für eine zuverlässige Messung dar.

Abbildung 8



Vorgehensweise bei der künstlichen Herbeiführung eines Fehlers

### V. MESSUNGEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN FREQUENZEN

Der Effekt der Messung mit höheren Frequenzen wird anhand zweier Vergleichsmessungen – bei 50 Hz und bei 400 Hz – erläutert. Beide Messungen wurden an derselben Nut mit demselben künstlich herbeigeführten Fehler durchgeführt. Zwischen den Messungen wurden keine Änderungen oder Modifikationen vorgenommen; nur die Erregerparameter wurden geändert. Die Messung wurde am kleinen Wasserkraftgenerator mit 24 Erregerwicklungen durchgeführt (siehe Beschreibung in Kapitel III).

Der Fluss verhält sich bekanntlich umgekehrt proportional zur Frequenz, aber proportional zur Spannung. Für den Vergleich der beiden Messungen mit unterschiedlichen Frequenzen wurde die Erregerspannung beim ersten Versuch unverändert gelassen. Folglich verringerte sich der Fluss bei der Messung mit 8-fach höherer Frequenz um den Faktor 8.

Im zweiten Versuch wurde bei beiden Messungen der Fluss konstant belassen, sodass die Erregerspannung entsprechend angepasst werden muss. Die beiden unterschiedlichen Einstellungen werden in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1

Frequenz (in Hz)	Erregerspannung (in V)	Nennfluss (in % von $\phi$ )	Kalibrierungsfaktor (in mV/A)
50	18,6	4	36,6
400	18,6	0,5	336,7

Messung mit identischer Erregerspannung bei beiden Frequenzen

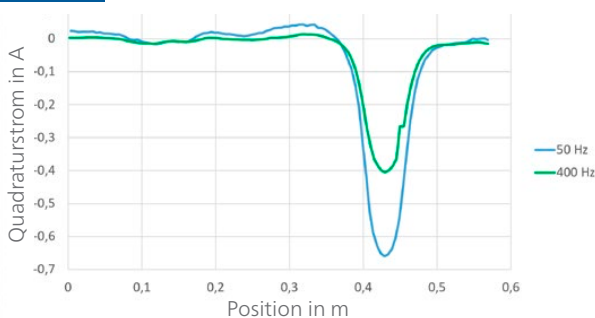
Tabelle 2

Frequenz (in Hz)	Erregerspannung (in V)	Nennfluss (in % von $\phi$ )	Kalibrierungsfaktor (in mV/A)
50	18,6	4	36,6
400	148,3	4	336,7

Messung mit identischem Fluss bei beiden Frequenzen

Bei Messung mit 0,5 % des Nennflusses und 400 Hz hat der höchste Peak an der Fehlstelle einen absoluten Amplitudenwert von etwa 400 mA, während der Peak bei 4 % und 50 Hz etwa 650 mA erreicht (Abbildung 9). Obwohl dies deutlich geringer ist, muss man sich in Erinnerung rufen, dass der Fluss um den Faktor 8 (!) verringert wurde.

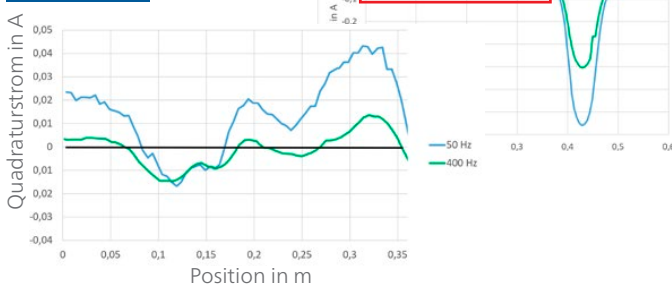
Abbildung 9



Messung mit identischer Erregerspannung

Außerdem sehen wir bei Betrachtung des intakten Abschnitts der Nut auch einen deutlich stabileren Verlauf der Kurve um die Nulllinie während der 400-Hz-Messung (Abbildung 10).

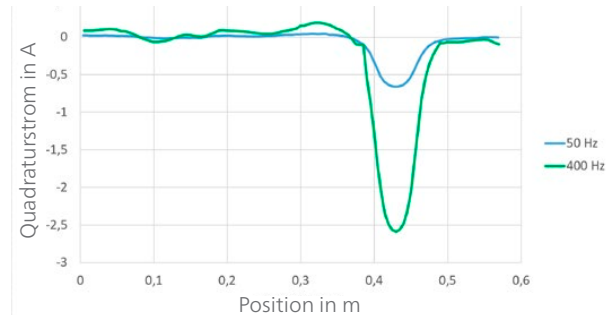
Abbildung 10



Vergrößerte Darstellung des Nutabschnitts ohne den Fehler

Das Bild ändert sich vollkommen, wenn der Fluss für beide Frequenzen konstant gehalten wird (siehe Abbildung 11). In diesem Fall ist die Amplitude der 400-Hz-Messung deutlich höher als jene der 50-Hz-Messung an der Fehlstelle. Beim Vergleich dieser Messung mit der Messung in Abbildung 10 ist zu beachten, dass die Skalierungen der vertikalen Achsen unterschiedlich sind.

Abbildung 11



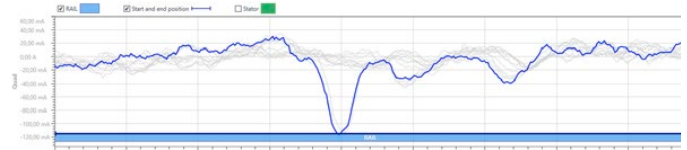
Messung mit identischem Fluss; zu beachten ist, dass die Skalierung der vertikalen Achse von der in Abbildung 9 abweicht.

Für Messungen mit einer Frequenz der Erregerspannung, welche nicht der Nennfrequenz der Maschine entspricht, gibt es keine absoluten Grenzwerte. Dies könnte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. Obwohl keine Grenzwerte vorhanden sind, kann die Messung mit höheren Frequenzen ein interessanter Ansatz sein. Da die Streuflussmessung auch ein vergleichendes Verfahren ist, können die Messspitzen an potentiellen Fehlerstellen auch bei höheren Frequenzen deutlich von den intakten Bereichen unterschieden werden.

## VI. ERKENNEN VON FEHLERN TIEFER IM BLECHPAKET

Fehler zwischen Kernblechen können auch dann erkannt werden, wenn sie tiefer im Inneren des Blechpaketes liegen. Dies wird an einem Anwendungsfall aus der Praxis gezeigt, bei dem ein Motor aufgrund eines einphasigen Erdschlusses in der Maschine repariert werden musste. Der Maschinenschutz hat in diesem Fall gut funktioniert und sofort ausgelöst, sodass der durch den Fehler verursachte Schaden in der Maschine vergleichsweise gering ausfiel und von außen nicht erkennbar war. Das Problem konnte durch eine Endoskopie in den einzelnen Lüftungsschlitzen lokalisiert werden. Diese hat auch gezeigt, dass sich der Fehler am Boden einer Nut befindet.

Abbildung 12



Messergebnis des Motors vor der Reparatur; im Blechpaket bei ca. 800 mm ist deutlich ein Problem erkennbar

Reparatur zuständige Projektleiter wollte wissen, ob auch das Blechpaket einen Schaden erlitten hat und ebenfalls repariert werden muss.

Außerdem konnte auch gegenüber dem Betreiber der Maschine nachgewiesen werden, dass das Problem im Blechpaket bereits vor den Wartungsarbeiten vorhanden war und der Schaden nicht beim Austausch der Spule zustande gekommen ist.

## VII. VERGLEICH MIT MESSUNGEN MIT HOHER INDUKTION

Um Aussagen zum Vergleich mit der Streuflussmessung und zur Situation während des Betriebs der Maschine machen zu können, wurde eine Vergleichsmessung zwischen der Messung mit niedriger Induktion und der Messung mit Nennfluss durchgeführt. Die Versuchsmaschine wurde komplett erneuert, sodass es möglich war, Fehler einzubauen und diese mit der Prüfung bei hoher Induktion und einer Thermografie zu vergleichen.

Abbildung 13 zeigt den Einbau dieser Fehler exemplarisch an zwei Stellen. Es wurden unterschiedliche Fehlereinbaumethoden versucht.

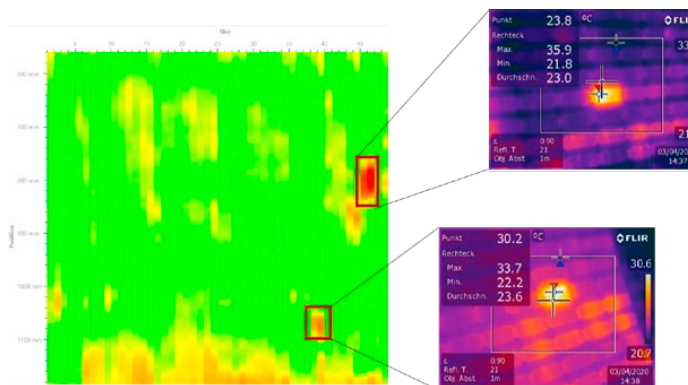
Abbildung 13



Beispiel für einen eingebauten Fehler und die anschließende schwarze Lackierung zur Vermeidung von Reflexionen während der Thermografie

Je nach Art der Modifikation zeigt sich nicht an jeder Stelle ein deutlicher Anstieg sowohl der Temperatur während der Prüfung bei hoher Induktion als auch des Quadraturstromes während der Streuflussmessung. Bei zwei Modifikationen kam es zu einer deutlichen Temperaturerhöhung von  $s > 10\text{ °C}$  im Vergleich zur Umgebung, was als kritisch angesehen wird [1]. Diese Stellen konnten auch mit der Streuflussmessung und einer Amplitude von über 100 mA zuverlässig erkannt werden. Abbildung 14 zeigt die Heatmap mit den Ergebnissen der gesamten Blechpaketoberfläche sowie das Thermografiebild der beiden kritischen Stellen. An den anderen modifizierten Stellen fiel die Temperaturerhöhung im Vergleich zum Umfeld geringer aus. Auch diese sind in der Streuflussmessung sichtbar und auch dort blieben diese unterhalb der Grenze von 100 mA.

Abbildung 14



Heatmap der Streuflussmessung und Thermografiebilder der Vergleichsmessung bei hoher Induktion. Die beiden Stellen mit der größeren Temperaturerhöhung ließen sich in der Streuflussmessung ebenfalls erkennen, bei der beide Stellen eine Amplitude von über 100 mA hatten.

## VIII. FAZIT

In diesem Artikel wurde gezeigt, dass die Streuflussmessung mit CPC 100 ein zuverlässiges Verfahren zum Erkennen von Schwachstellen im Blechpaket von rotierenden elektrischen Maschinen ist. Die kompakte, leichte Ausrüstung und der schnelle Aufbau machen die Lösung sowohl für Vor-Ort-Messungen im Feld als auch für den Einsatz beim Hersteller interessant. Außerdem sorgen die halbautomatische Bewegung des Sensors und die Unterstützung der PTM-Software für eine hohe Bedienerfreundlichkeit.

Es konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass tiefer im Blechpaket liegende Fehler erkannt werden können. Außerdem zeigte der Vergleich mit der Messung bei hoher Induktion dieselben Fehlstellen.

## Verweise

1. IEEE Std 56-2016 „IEEE Guide for Insulation Maintenance of Electric Machines“, Annex D (informative), September 2016.
2. Cigre-Broschüre 257, „EL CID (Electromagnetic - Core Imperfection Detector) Testing of Large Steam-Turbine-Driven Generators“, Working Group A1.01.06, Oktober 2004
3. [3] Bertenshaw, David Ronald: „Stator Core Interlamination Faults and their Detection by Electromagnetic Means“. Manchester, 2014

## Der Autor

**Fabian Öttl** ist Produktmanager bei OMICRON Technologies in Italien. Dort ist er für die Prüfung und Diagnose rotierender elektrischer Maschinen zuständig. Bevor er zu OMICRON kam, war Fabian Öttl als Spezialist für Hochspannungsisolierungen in der F&E-Abteilung eines Herstellers großer Generatoren tätig. Er hat bis 2011 an der TU Graz studiert und dort den Titel eines Diplomingenieurs erworben.

Er ist Autor von vielen wissenschaftlichen Arbeiten und Fachbeiträgen und gehört verschiedenen Cigre- und IEC-Arbeitsgruppen an.

fabian.oettl@omicronenergy.com



OMICRON ist ein weltweit tätiges Unternehmen, das innovative Prüf- und Diagnoselösungen für die elektrische Energieversorgung entwickelt und vertreibt. Der Einsatz von OMICRON-Produkten bietet höchste Zuverlässigkeit bei der Zustandsbeurteilung von primär- und sekundärtechnischen Betriebsmitteln. Umfassende Dienstleistungen in den Bereichen Beratung, Inbetriebnahme, Prüfung, Diagnose und Schulung runden das Leistungsangebot ab.

Kunden in mehr als 160 Ländern profitieren von der Fähigkeit des Unternehmens, neueste Technologien in Produkte mit überragender Qualität umzusetzen. Servicezentren auf allen Kontinenten bieten zudem ein breites Anwendungswissen und erstklassigen Kundensupport. All dies, zusammen mit einem starken Netz von Vertriebspartnern, ließ OMICRON zu einem Marktführer der elektrischen Energiewirtschaft werden.

Mehr Informationen, eine Übersicht der verfügbaren Literatur und detaillierte Kontaktinformationen unserer weltweiten Niederlassungen finden Sie auf unserer Website.