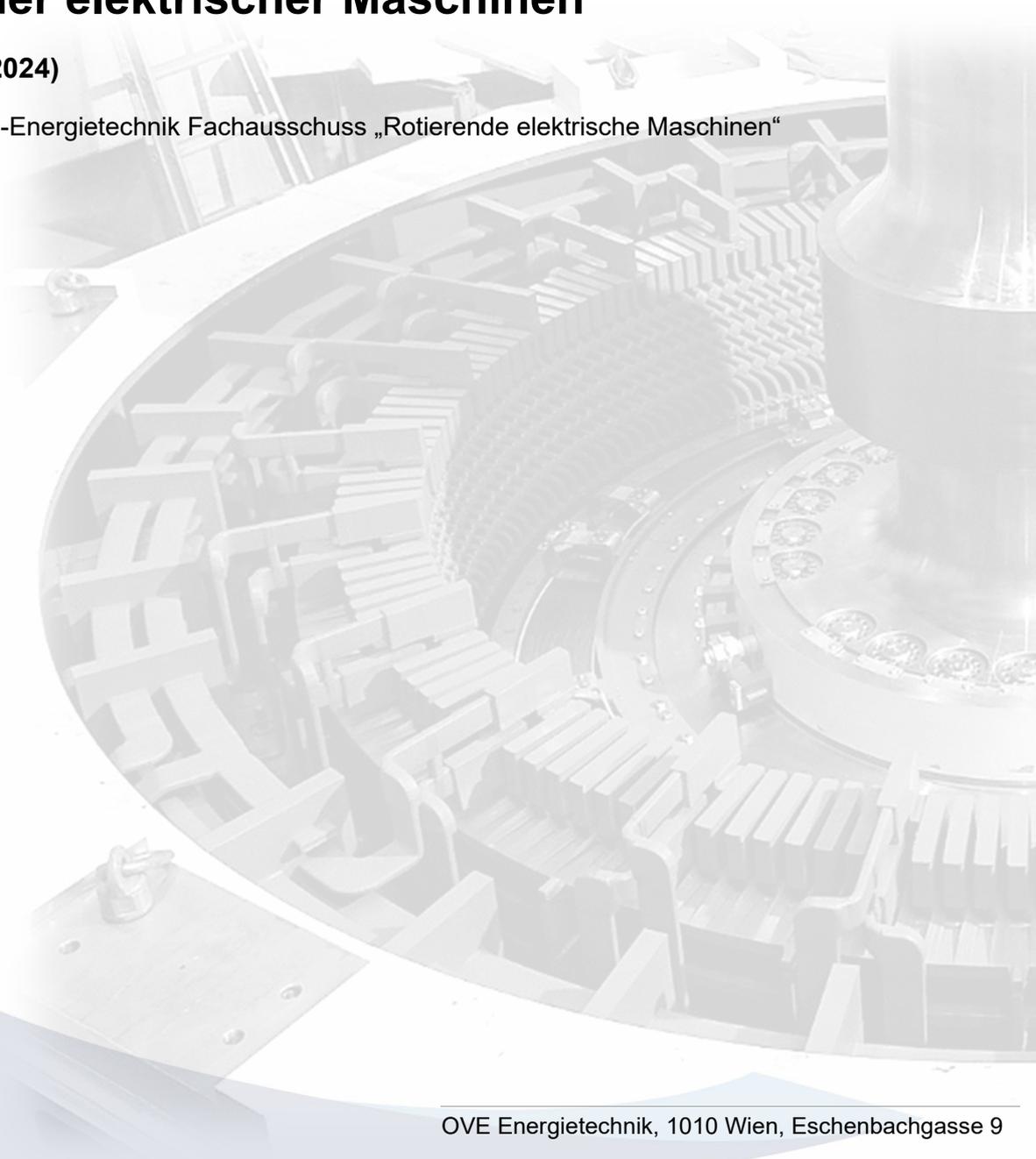


# **Leitfaden für Messverfahren zur Zustandserfassung von Ständerblechpaketen rotierender elektrischer Maschinen**

**Ausgabe 1.1 (2024)**

Erstellt vom OVE-Energiertechnik Fachausschuss „Rotierende elektrische Maschinen“



## Vorwort

Dem OVE-Energietechnik Fachausschuss „Rotierende elektrische Maschinen“ (FA REM) obliegt unter anderem die Aufgabe, Beiträge zur fachlichen Weiterbildung der Mitglieder zu leisten. Vorliegendes Dokument ist eine Überarbeitung des Kapitels „Bedingt zerstörungsfreie Hochspannungsprüfverfahren“ des 1990 herausgegeben OVE-Merkblattes 2 „Empfehlungen für die Zustandserfassung der Aktivteile rotierender elektrischer Maschinen“. Es erfolgt eine Neubewertung der Eignung für Zustandsbeurteilungen durch in der Anwendung gewonnene Erfahrungen aus der Sicht der Anwender. Zielgruppe sind Betriebsingenieure und Techniker, die mit der Wartung und Instandsetzung von elektrischen Maschinen betraut sind.

Um weitere nationale und internationale Fachkollegen, welche nicht Mitglied im FA REM sind, anzusprechen, erfolgt die Veröffentlichung über die Homepage der OVE-Energietechnik.

Wien im November 2024

Im Namen der Mitglieder des FA REM  
Karl Zikulnig (Vorsitzender)

**Verfasser:** Martin Althoff, Christian Fuhrmann, Fabian Öttl, Jürgen Weidner  
**Redaktionelle Leitung:** Martin Althoff  
**Revisionsteam:** Martin Althoff, Thomas Hildinger, Werner Ladstätter, Fabian Öttl, Alexander Schwery, Karl Zikulnig

## Änderungsverzeichnis:

Version	Datum	Verfasser		Kapitel	Änderung, Ergänzung
1.1	11 / 2024	Althoff, Fuhrmann, Öttl, Weidner		Alle	Basisversion

## Copyright:

Die Urheberrechte an dieser Publikation liegen bei der OVE-Energietechnik im Österreichischen Verband für Elektrotechnik (OVE)

A-1010 Wien ■ Eschenbachgasse 9  
Tel. +43 1 587 63 73 - 0 ■ E-Mail: [oge@ove.at](mailto:oge@ove.at) ■ [www.ove.at](http://www.ove.at)

## Inhalt

1	Allgemeines, Zweck der Prüfung bzw. Messung.....	4
2	Geltungsbereich .....	5
3	Normen und Empfehlungen:.....	5
4	Physikalische Grundlagen und Beschreibung des Mess- oder Prüfverfahrens .....	5
4.1	Messprinzip .....	5
4.2	Physikalische Grundlagen .....	5
4.3	Messverfahren .....	7
5	Beschreibung der Prüfverfahren .....	7
5.1	Messverfahren mit hoher Induktion .....	7
5.1.1	Magnetisierungsprüfung mit Nennfrequenz (50 / 60 Hz) .....	7
5.1.1.1	Messmethode.....	7
5.1.1.2	Messgeräte und Messaufbau.....	8
5.1.2	Magnetisierungsprüfung mit erhöhter Frequenz (400 - 600 Hz) .....	10
5.1.2.1	Messmethode.....	10
5.1.2.2	Messgeräte und Messaufbau:.....	11
5.1.3	Auswertung und Grenzwerte .....	11
5.1.3.1	Neu gefertigte Blechpakete (informativ):.....	12
5.1.3.2	Ältere Blechpakete bei Revisionen:.....	12
5.2	Messverfahren mit niedriger Induktion - ELCID (ELectric-Core Imperfection Detection) .....	13
5.2.1.	Messmethode.....	13
5.2.2	Messequipment und Messaufbau.....	14
5.2.3	Auswertung und Grenzwerte .....	15
5.2.4	Erfahrungen .....	17
5.3	Vergleich der Messverfahren .....	19
	Literaturverzeichnis .....	20

## 1 Allgemeines, Zweck der Prüfung bzw. Messung

Die Blechpakete von Generatoren sind im Betrieb hohen elektrischen, thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Diese bestehen aus relativ langsamen thermischen Längenänderungen sowie schnellen elektromagnetischen Wechselbeanspruchungen, die periodisch mit doppelter Netzfrequenz das Blechpaket verformen. Hierdurch sind die Ständerbleche permanent kleinsten Relativbewegungen ausgesetzt, die in erster Linie auf die Isolierbeschichtung wirken und diese verschleifen.

Dieser Verschleißprozess kann mit der Zeit lokale Fehlerstellen in der Blechisolation hervorrufen. Unter der Voraussetzung, dass der Blechpaketrückten galvanisch gut geerdet ist, entstehen in diesen Fehlerstellen Wirbelströme, die lokale Überhitzung bewirken. Die kleinen Heißstellen (Hot-Spots) breiten sich aus und die kurzgeschlossene Zahnstelle erhitzt sich aufgrund der jetzt fließenden hohen induzierten Ströme immer schneller und es kommt zu einem lokalen Blechpaketbrand.

Andere Ursachen mit den gleichen Folgen sind z.B. auch Fehler bei der Wicklungsmontage oder bei Revisionen, bei denen die Oberfläche der Bleche im Zahn- oder auch Nutbereich beschädigt werden.



Abbildung 1-1: zeigt einen typischen Blechpaketschaden an einem Generator mit Blechpaketbrand und Zahnschmelze.

Derartig schwere Blechpaketschäden entstehen im Allgemeinen nicht spontan, sondern entwickeln sich über längere Zeiträume ausgehend von kleinen metallischen Kurzschlüssen zwischen mehr als drei Blechen.

Solchen Schäden kann mit einer wiederkehrenden Prüfung der Blechpaketisolation (bei ausgebautem Rotor) durch eine Magnetisierungsprüfung des Blechpaketes vorgebeugt werden.

## 2 Geltungsbereich

Ein- oder mehrteilige Ständerblechpakete von Wasserkraftgeneratoren.

## 3 Normen und Empfehlungen:

- EN IEC 60034-27-4
- IEEE Std. 43

## 4 Physikalische Grundlagen und Beschreibung des Mess- oder Prüfverfahrens

### 4.1 Messprinzip

Für die Magnetisierungsprüfung, auch Ringprobe genannt, wird eine Magnetisierungswicklung um das Ständerblechpaket gelegt, an die eine Wechselspannung angelegt wird. Diese Wicklung induziert einen magnetischen Fluss im Rücken des Blechpaketes, der eine Spannung in axialer Richtung in die einzelnen Blechlagen induziert.

### 4.2 Physikalische Grundlagen

Im Betrieb des Generators wird durch das rotierende Erregerfeld ein umlaufender magnetischer Fluss mit einer radialen Komponente in den Zähnen des Blechpaketes und einer tangentialen Komponente im Blechpaketrückens erzeugt (Abbildung 4-1a).

Im Gegensatz dazu wird bei einer Magnetisierungsprüfung nur ein tangentialer Fluss im Blechpaketrückens erzeugt (Abbildung 4-1b).

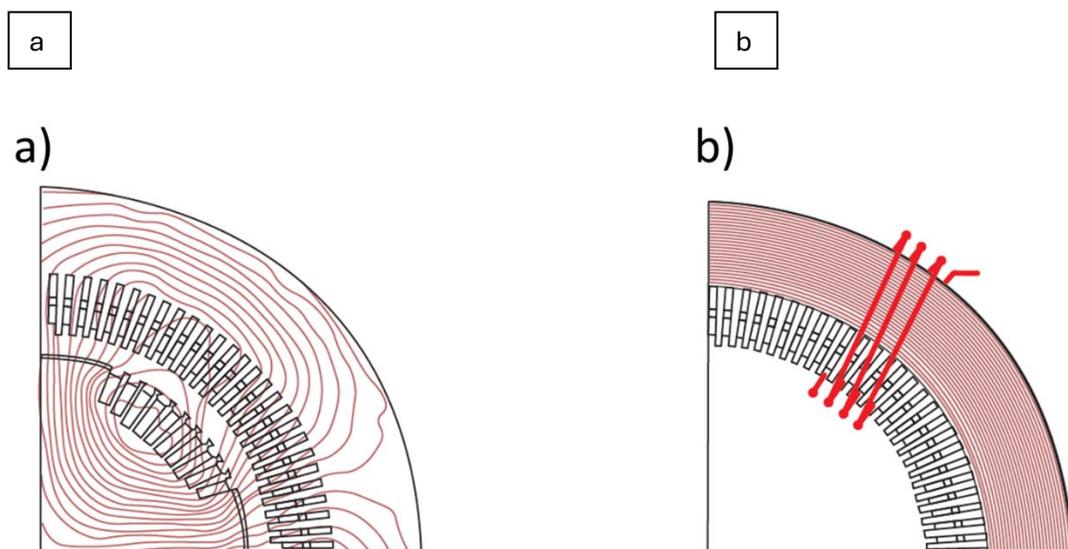


Abbildung 4-1: Verlauf des magnetischen Flusses während des Betriebes a) und während der Prüfung b)

Dieser magnetische Fluss induziert eine Spannung in den geschichteten Blechen des Ständers. Im Fehlerfall, wie bei einer beschädigten Blechisolierung, treibt diese Spannung einen Strom

über die Fehlerstelle, wobei sich der Stromkreis über die Führungsleisten (i.d.R. Schwalbenschwanzleisten) im Rücken des Ständers schließt (Abbildung 4-2).

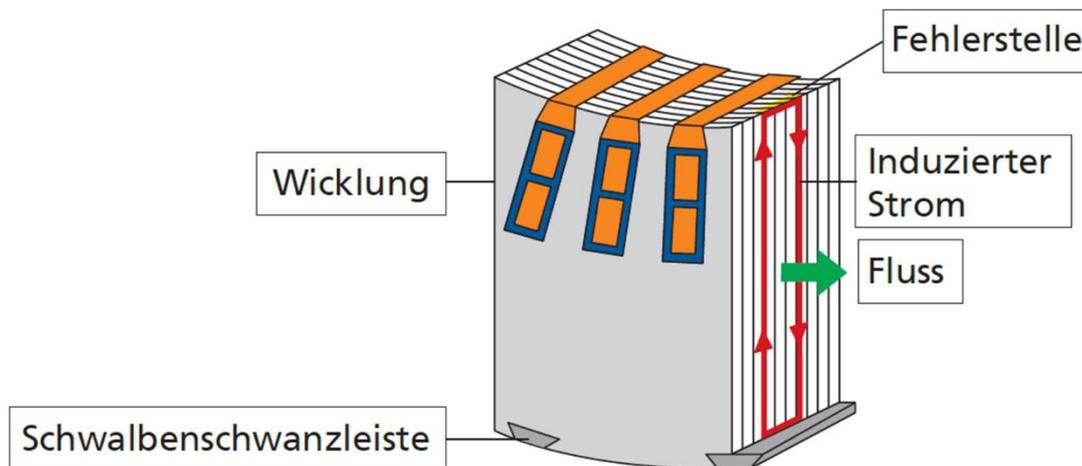


Abbildung 4-2: Ausbildung des Fehlerstromes, welcher in der Leiterschleife „Fehlerort – Blechpaket - Schwalbenschwanzleiste“ vom angelegten Fluss induziert wird.

Durch ein geeignetes Messverfahren, mit dem dieser „Fehlerstrom“ oder seine thermischen Auswirkungen erfasst werden können, werden Fehler in der Blechisolierung erkannt, die im Betrieb zu einer unzulässigen lokalen Erwärmung führen können.

Im Gegensatz zur Prüfung eines fabrikneuen und nicht bewickelten Ständers liegt bei der Zustandserfassung in der Regel ein Ständer mit eingebauter und verkeilter Wicklung vor, so dass hier im Wesentlichen eine Überprüfung des Zahnbereiches des Blechpaketes erfolgt.

Grundsätzlich haben sich zwei Prüfverfahren etabliert. Bei dem Standardverfahren „Messung mit hoher Induktion“ wird durch die Magnetisierungswicklung eine Spannung über die axiale Länge des Blechpaketes erzeugt, die in der Größenordnung der induzierten Spannung im Nennbetrieb liegt und somit die Verhältnisse bei Betrieb des Generators abbildet. In der Regel reicht zur Fehlererkennung eine Induktion von ca. 1T, wobei thermische Effekte und Übermäßige Vibrationen (Eigenfrequenz) zu berücksichtigen sind.

Bei dem Verfahren mit „niedriger Induktion“ wird durch die Magnetisierung ein magnetischer Fluss im Blechpaket erzeugt, der nur ein Bruchteil (ca. 4%) des Nennflusses beträgt und damit auch nur eine entsprechend geringere Spannung über die axiale Länge des Blechpaketes erzeugt. In der Theorie können mit dieser Methode auch Fehler im Nutgrund detektiert werden.

### 4.3 Messverfahren

Für die Zustandserfassung eines Blechpaketes stehen grundsätzlich drei Messmethoden zur Verfügung:

- a. Messung mit hoher Flussdichte:
  - 1) Magnetisierungsprüfung mit Nennfrequenz (50 bzw. 60 Hz)
  - 2) Magnetisierungsprüfung mit erhöhter Frequenz (400 – 600 Hz)
- b. Messung mit niedriger Flussdichte:
  - 3) Electric-Core Imperfection Detection - ELCID

Üblicherweise werden Fehlerstellen bei den Messverfahren, die mit Induktionen in der Größenordnung der Nenninduktion 1) und 2) durchgeführt werden, mit Hilfe einer Wärmebild- oder Infrarotkamera detektiert.

Beim Verfahren mit niedriger Induktion 3) reicht die Höhe der Wirbelströme nicht aus, um eine Erwärmung der Fehlerstelle hervorzurufen. Hier wird eine Rogowski-Spule zur Detektion des Fehlerstromes mit Amplitude und Phasenwinkel eingesetzt.

## 5 Beschreibung der Prüfverfahren

### 5.1 Messverfahren mit hoher Induktion

#### 5.1.1 Magnetisierungsprüfung mit Nennfrequenz (50 / 60 Hz)

##### 5.1.1.1 Messmethode

Die Magnetisierungsprüfung wird mit Hilfe einer 1-phasigen Spannungsquelle durchgeführt, mit der eine Flussdichte in der Größenordnung ca. 1,0 Tesla im Blechpaket erzeugt wird. Dies entspricht einer über die axiale Länge des Blechpaketes induzierte Längsspannung von ca. 85 – 100 V/m.

Im Idealfall steht eine ausreichend leistungsfähige regelbare 1-phasige Spannungsversorgung zur Verfügung, mit der sich die gewünschte Spannung an der Magnetisierungswicklung einstellen lässt. Da diese in den meisten Fällen nicht verfügbar ist, ist die Magnetisierungswicklung auf die vor Ort verfügbare Spannungsversorgung (z.B. Eigenbedarfstransformator) auszulegen, die einen magnetischen Fluss in der Größenordnung des Nennflusses erzeugt.

Entsprechende Schutz- und Sicherheitseinrichtungen, wie Auslösung durch Not-Aus, Erdung des Ständers, Sicherung und Absperrung von spannungsführenden Teilen müssen vorhanden sein und auf Funktionsfähigkeit geprüft sein.

Zur Kontrolle und Verifizierung der induzierten Spannung ist eine Messwicklung vorzusehen.

Die Leistungsbedarf der 1-phasigen Spannungsquelle kann bei den Ständerblechpaketen großer Wasserkraftgeneratoren in der Größenordnung von bis zu >1 MVA bei niedrigem Leistungsfaktor (cos phi) betragen. Abbildung 5-1 zeigt den Aufbau einer solchen Prüfung und die Messung mittels der Thermographie beim Hersteller.



Abbildung 5-1: Magnetisierungsprüfung an einem kurzen unbewickelten Blechpaket;  
 Links: Gleichmäßige Umwicklung des Blechpaketes mit der Erregerleitung;  
 Rechts: Infrarotaufnahme während der Magnetisierungsprüfung

### 5.1.1.2 Messgeräte und Messaufbau

Zur Erzeugung des magnetischen Flusses wird eine Magnetisierungswicklung auf dem kürzesten Weg um das Blechpaket gelegt. Abbildung 5-2 stellt einen solchen Messaufbau schematisch dar. Außerdem sind in der Abbildung die Einrichtungen zur Messung des Erregerstroms und der Erregerspannung sowie weiterhin während der Messung zu überwachender elektrischer Größen dargestellt.

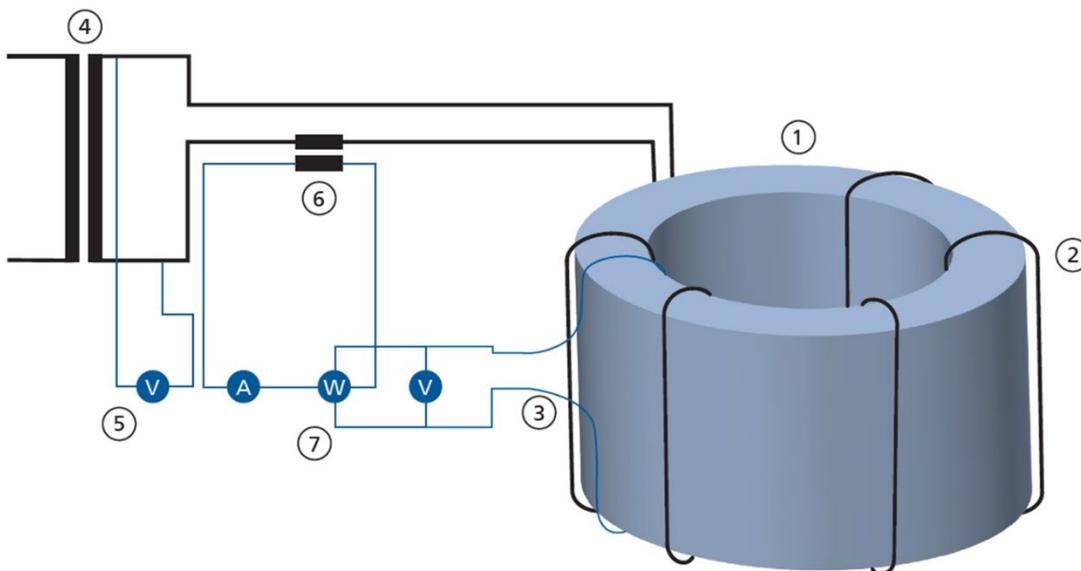
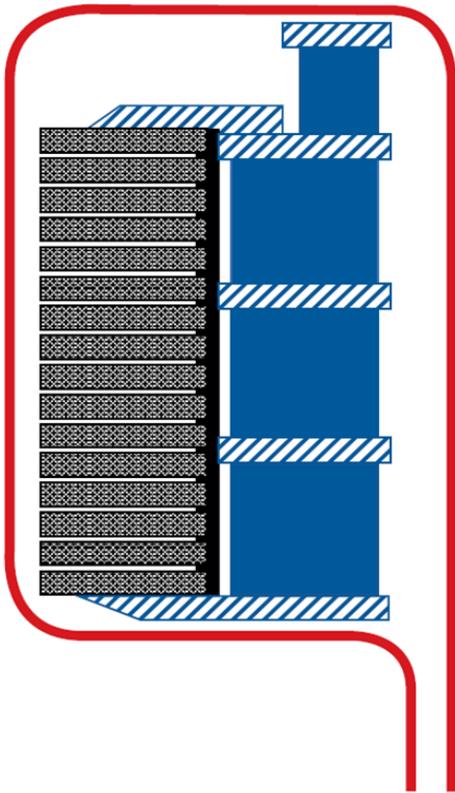


Abbildung 5-2: Schematischer Messaufbau der Prüfung mit hoher Induktion mit Ständer-Kern (1), Erregerwicklung (2), Messwicklung (3), Einphasentransformator (4), Spannungs- und Strommessung (5) und (6), sowie Messgeräte zum Erfassen und Monitoren der verschiedenen Kenngrößen während der Messung (7)

a) Magnetisierungswicklung



b) Messwicklung

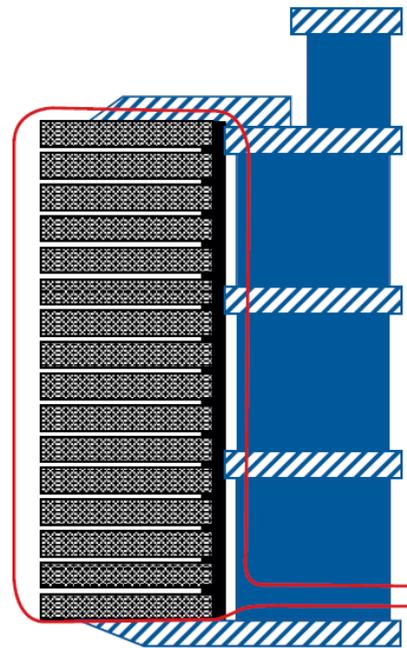


Abbildung 5-3: Querschnitt des Blechpaket mit Gehäuse und Magnetisierungswicklung a), sowie Messwicklung b)

Die Kabel können ohne nennenswerte Auswirkungen auch das Gehäuse umschlingen (Abbildung 5-3a) und sollten gleichmäßig am Umfang des Blechpaketes verteilt werden. Bei mehrteiligen Ständern sollten die Windungen so aufgeteilt werden, dass die Anzahl der Windungen gleichmäßig auf die Ständer Teile aufgeteilt wird.

Da bei dieser Messmethode hohe Ströme in der Magnetisierungswicklung auftreten, können diese auf parallele Kreise aufgeteilt werden, auch um die notwendigen Kabelquerschnitte in einer handhabbaren Größenordnung zu halten. Auf gleichen Wickelsinn und bei parallelen Kreisen gleicher Anzahl der Windungen ist zu achten.

Zur Kontrolle und zur Verifizierung der magnetischen Flußdichte ist eine Messwicklung um das Joch des Blechpaketes (Abbildung 5-3b) zu legen und am Ständerücken zusammenzubinden. Der Rest der Messleitung ist zu verdrehen und an ein geeignetes Spannungsmessgerät anzuschließen.

Das Blechpaket muss frei von Metallkörpern und Schmutzteilchen sein, die die Bleche überbrücken könnten. Das Generatorgehäuse, das Blechpaket und - falls vorhanden – die Ständerwicklung sind zu erden.

Zur Detektion und Messung der Temperaturen des Ständerblechpaketes an der Bohrungsfläche wird üblicherweise eine Wärmebildkamera (Infrarotkamera) eingesetzt. Beim Prüfaufbau ist darauf zu achten, dass die Bohrungsfläche rundum optisch zugänglich ist und durch die Wärmebildkamera erfasst werden kann.

Nach dem Einschalten der Spannungsversorgung sind die Strom- und Spannungswerte der Magnetisierungswicklung sowie die Spannung an der Messwicklung zu protokollieren und zu dokumentieren.

Nach dem Zuschalten ist insbesondere auf das Auftreten von Glühstellen zu achten, um allfällige Schäden am Blechpaket zu vermeiden. Sollten Glühstellen auftreten, ist die Spannung sofort abzuschalten und die Fehlerstellen zu beseitigen. Anschließend ist die innere Bohrungsoberfläche des Blechpaketes mit der Wärmebildkamera zu beobachten und auf Heißstellen abzutasten.

Grundsätzlich sollten Fehlerstellen, die Temperaturerhöhung von ca.  $>15\text{K}$  aufweisen, vor der Fortsetzung der Magnetisierungsprüfung beseitigt werden.

Das Blechpaket ist während der gesamten Prüfdauer mit der Wärmebildkamera zu beobachten, um unzulässige und schädigende Erwärmungen während der Prüfung zu vermeiden.

Nach ca. 15-30 min Magnetisierungsdauer ist das Blechpaket abschließend mit der Wärmebildkamera abzutasten. Wärmestellen sind zu klassifizieren und z.B. mit Kreide zu markieren.

Hinweis: Während der Magnetisierungsprüfung wird empfohlen, auf das vom Ständer abgestrahlten Geräusch zu achten. Im Falle einer plötzlichen Erhöhung des Geräuschpegels oder einer plötzlichen Änderung der Tonfrequenz wird empfohlen, den Test zu unterbrechen, um schweren Schaden am Blechpaket zu vermeiden.

## **5.1.2 Magnetisierungsprüfung mit erhöhter Frequenz (400 - 600 Hz)**

### *5.1.2.1 Messmethode*

Zur Verringerung des Transportgewichtes von Stell- und Leistungstransformatoren, sowie Zuleitungskabeln wird für die Erzeugung der Blechpaketlängsspannung eine Magnetisierung mit erhöhter Frequenz von etwa. 500 Hz angewandt. Der elektronische Frequenzumformer mit Steuereinheit wiegt deutlich weniger als die konventionellen Transformatoren.

Die Magnetisierungsprüfung mit höherer Frequenz unterscheidet sich von der normalen – auch Vollflussmessung genannten – Magnetisierungsprüfung dadurch, dass die Magnetisierung des Blechpaketes nicht mit der Netzfrequenz (50 Hz oder 60 Hz) erfolgt, sondern mit einer frei wählbaren höheren Frequenz des elektronischen Frequenzumformers bis zu 600 Hz. Üblicherweise werden Frequenzen von etwa 500 Hz gewählt und eingesetzt.

Bei dieser Messmethode macht man sich die physikalische Gesetzmäßigkeit zu Nutze, dass bei konstant gehaltenem Produkt aus Induktion  $B$  und Frequenz  $f$  die induzierte Spannung gleichbleibt.

Die normalerweise angewandte Vollflussmessung wird nach Möglichkeit mit nahezu dem Bemessungswert der magnetischen Flussdichte im Ständerjoch durchgeführt. Dabei entspricht die Beanspruchung der Isolierung zwischen den Blechen ungefähr derjenigen die bei Betrieb des Generators auftritt.

Die Magnetisierungsprüfung mit höherer Frequenz wird mit ähnlicher Längsspannung im Blechpaket wie bei der Prüfung mit Nennfrequenz durchgeführt. Es ergibt sich also eine vergleichbare Beanspruchung der Blechisolierung. Aufgrund der höheren Frequenz wird der magnetische Fluss im Blechpaket allerdings umgekehrt proportional zu Frequenz kleiner, und somit auch die zu in die Magnetisierungswicklung einzuspeisende Leistung.

### 5.1.2.2 Messgeräte und Messaufbau:

Der Messaufbau erfolgt gemäß Abbildung 5-2 wie bei der Messung mit Nennfrequenz, allerdings wird das Blechpaket aus einem elektronischen Frequenzumformer mit erhöhter Frequenz von 400-600Hz gespeist. Die Messdurchführung entspricht ebenfalls der Magnetisierungsprüfung mit Nennfrequenz.

Die Magnetisierung wird langsam so weit gesteigert, bis an der Referenzwicklung eine induzierte Längsspannung von etwa 80% der Bemessungslängsspannung des Blechpaketes erreicht ist. Abbildung 5-4 zeigt den Prüfaufbau mit den verwendeten Messgeräten und der IR-Kamera zur Erfassung möglicher Heißstellen im Blechpaket.



Abbildung 5-4: Magnetisierungsprüfung mit einer mobilen elektronischen 500-Hz-Anlage während einer Großrevision in einem Kraftwerk

### 5.1.3 Auswertung und Grenzwerte

Anhand der IR-Kamera lassen sich entstehende Heißstellen frühzeitig lokalisieren und quantitativ bestimmen (Abbildung 5-5). Maßgebend für die Ermittlung der Übertemperatur ist die Differenz der Temperatur der Heißstelle zur mittleren Temperatur der benachbarten Region des Blechpaketes.

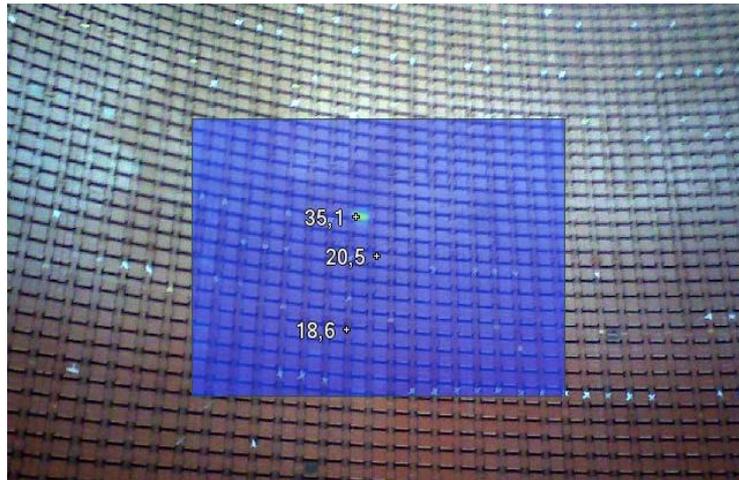


Abbildung 5-5: Beispiel einer Heißstelle während einer Blechpaketprüfung mittels Thermokamera

Als Kriterium für eine kritische Heißstelle, die näher untersucht und gegebenenfalls beseitigt werden muss, gilt folgendes:

#### 5.1.3.1 Neu gefertigte Blechpakete (informativ):

Die IEC 60034 gibt es hierzu keine Vorgaben oder Empfehlungen. In der IEEE 62.2-2004 wird ein Grenzwert für eine Heißstelle von 10K zur mittleren Temperatur des Blechpaketes in der unmittelbaren Umgebung der entsprechenden Stelle genannt.

In der Praxis der europäischen Hersteller hat sich bei Beanspruchung mit Bemessungsinduktion bzw. Bemessungslängsspannung eine zulässige Übertemperatur von lokalen Heißstellen gegenüber der mittleren Temperatur des Blechpaketes von 5 K etabliert.

#### 5.1.3.2 Ältere Blechpakete bei Revisionen:

Bei Magnetisierungsmessungen, die im Rahmen von geplanten Generatorrevisionen an Blechpaketen mit längerer Betriebszeit ausgeführt werden, wird häufig entschieden, das alte Blechpaket nicht zu stark zu beanspruchen, zumal die betriebsmäßige Kühlung beim Magnetisierungstest fehlt.

Lokale Erwärmungen mit 15K oder mehr gegenüber der Umgebung im Blechpaket deuten auf eine eingeschränkte Isolierung zwischen den Blechen hin und sollten regelmäßig beobachtet und ggf. repariert werden.

## 5.2 Messverfahren mit niedriger Induktion - ELCID (ELectric-Core Imperfection Detection)

### 5.2.1. Messmethode

Bei der Messung mit niedriger Induktion wird mit Hilfe einer Erregerwicklung ein Fluss in das Eisenpaket eingepreßt, welcher sich im unteren Prozentbereich des Nennflusses der Maschine befindet. Dieser liegt zwischen 2 und 10%, typischerweise bei 4%. Anschließend wird mit einer doppelagigen Luftspule (offene Rogowski-Spule) die Stator Oberfläche abgefahren. Dabei umspannt die Rogowski Spule eine Nut mitsamt den benachbarten Nutzähnen, wie in Abbildung 5-6 dargestellt. Da die Abmessungen der Spule von Maschine zu Maschine unterschiedlich sind, muss vor jeder Messung einmalig eine Kalibrierung mit bekanntem Strom durchgeführt werden.

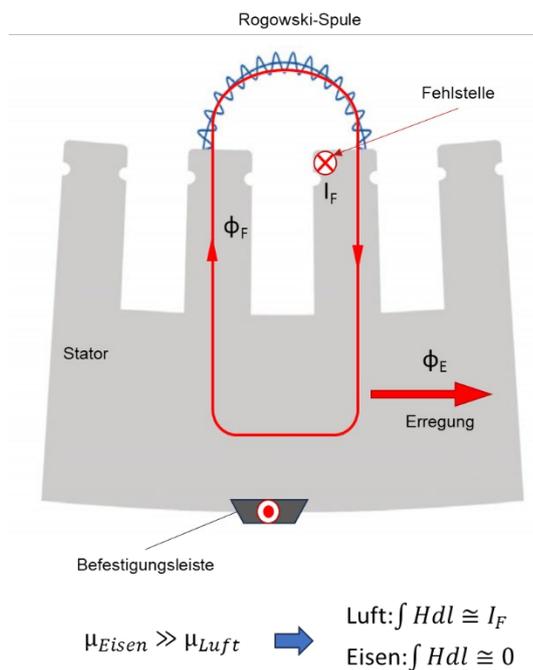


Abbildung 5-6: Physikalische Grundlagen des Messprinzips

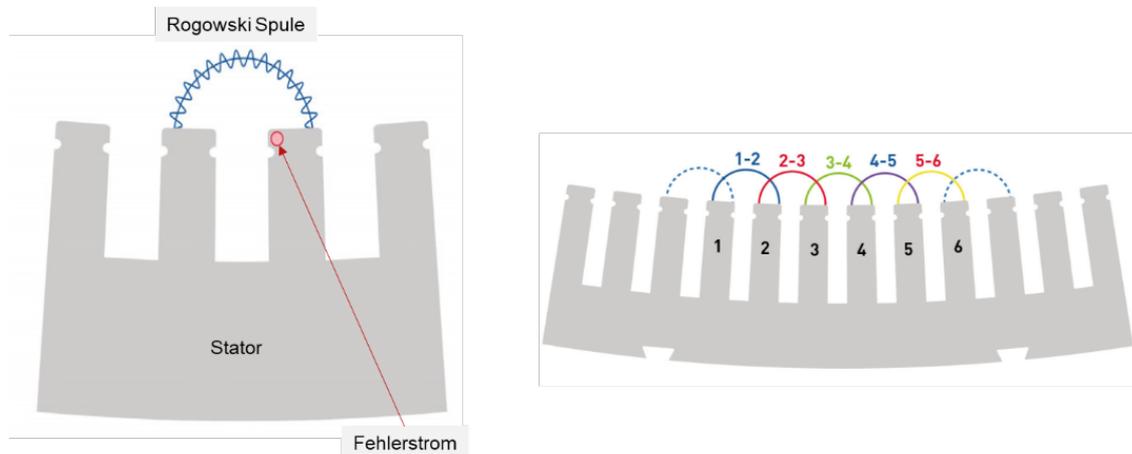


Abbildung 5-7: Positionierung der Luftspule an der Stator Oberfläche

Werden zwei oder mehrere Blechlamellen durch einen Fehler kurzgeschlossen, so wird durch den eingespeisten Fluss ein Fehlerstrom provoziert, welcher einen erhöhten Streufluss an der Oberfläche zu Folge hat (Abbildung 5-6). Deshalb wird die Messung oft auch als Streuflussmessung bezeichnet. Wegen der hohen Permeabilität des magnetischen Feldes im Eisen ist der Anteil der magnetischen Feldstärke gegenüber jener in Luft vernachlässigbar klein. Der Ausschlag eines an die Rogowski-Spule angeschlossenen Messgerätes ist daher ein gutes Maß für den Fehlerstrom.

Das Verfahren wird in der Regel bei Nennfrequenz durchgeführt. Die induzierte Spannung zwischen den einzelnen Blechlamellen kann mit Hilfe von frequenzvariablen Quellen jedoch deutlich gesteigert werden. Dabei kann mit einer Erregung von 400 Hz diese auf bis 25 V/m erhöht werden. Die Messung mit Nennfrequenz kommt üblicherweise auf bis zu 5 V/m.

### 5.2.2 Messequipment und Messaufbau

Auf Grund des vergleichsweise geringen Leistungsbedarfs zur Erzeugung der Induktion kann die Magnetisierungswicklung über einen 230 V Netzanschluss versorgt werden. Abbildung 5-8 stellt einen solchen Messaufbau dar. In der Abbildung 5-9 ist die Messung an einem Wasserkraft-generator ersichtlich.

Neben der Quelle und der Erregereinrichtung sind die entsprechende Rogowski-Spule mit Kalibriereinheit notwendig.

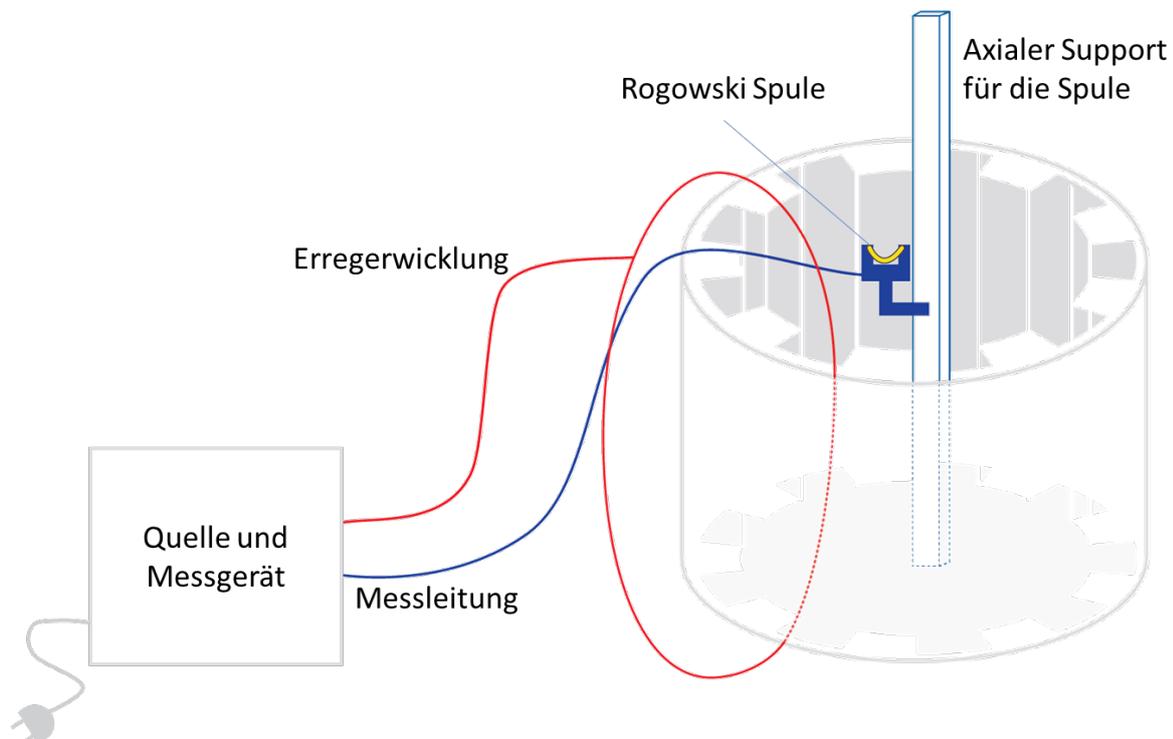


Abbildung 5-8: Stark vereinfachtes Schema des Prüfaufbau



Abbildung 5-9: Prüfaufbau im Kraftwerk. Die Erregerwicklung befindet sich rechts

Zur Kontrolle und zur Verifizierung der Erregung wird eine Messwicklung ähnlich wie in Abbildung 5-2 um den Ständer gezogen und mit einem geeigneten Spannungsmessgerät verbunden.

### 5.2.3 Auswertung und Grenzwerte

Das Verfahren ist ein vergleichendes Verfahren. Dabei wird die Kurvenschar aus den Messungen der einzelnen Nuten gegenübergestellt und Maxima bzw. Minima identifiziert. Die Messung liefert den Fehlerstrom abgeleitet von der Spannung an der Rogowski-Spule. Da dieses Verhältnis abhängig von den Dimensionen dieser ist, ist vor der Messung auch eine Kalibration notwendig. Der berechnete Strom wird mit der Erregung korreliert und die Phasenverschiebung ergibt einen Anteil in Phase und einen Imaginär Anteil (auch Quadratur-Strom genannt). Ein erhöhter Quadratur-Strom weist dabei auf einen erhöhten Streufluss hin. International wird dieser meist mit einem Grenzwert von 100 mA bei 4% des Nennflusses im Stator angegeben. Da vor allem der Quadratur-Anteil des Stromes für die Interpretation interessant ist, wird in den weiteren Beispielen zur besseren Übersicht nur dieser angegeben.

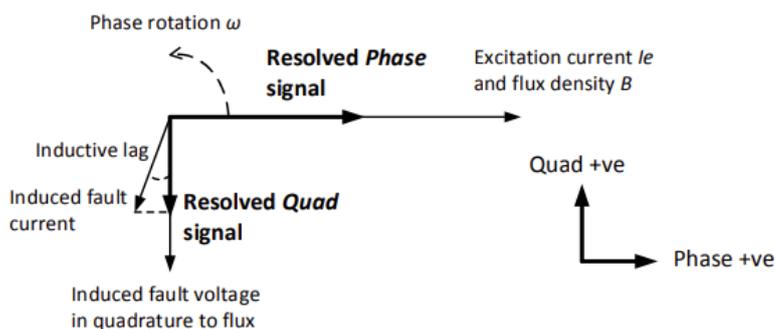


Abbildung 5-10: EL CID Phasendiagramm

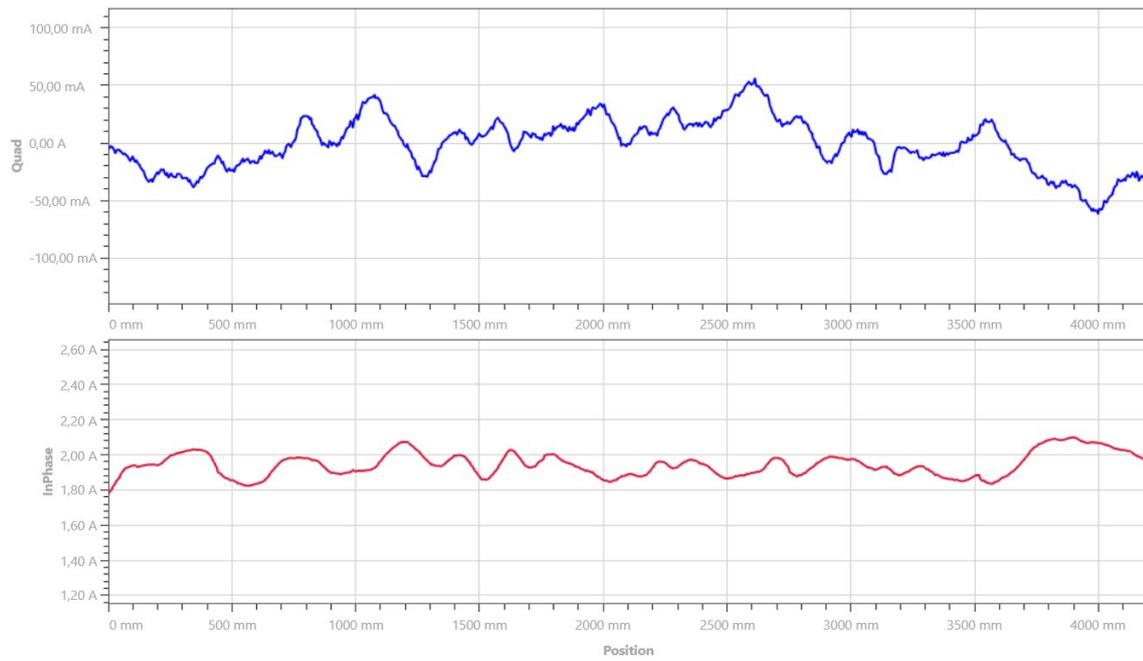


Abbildung 5-11: EL-CID Messung entlang einer Nut von Quadratur- und Phasen-Anteil mit Positionsangaben

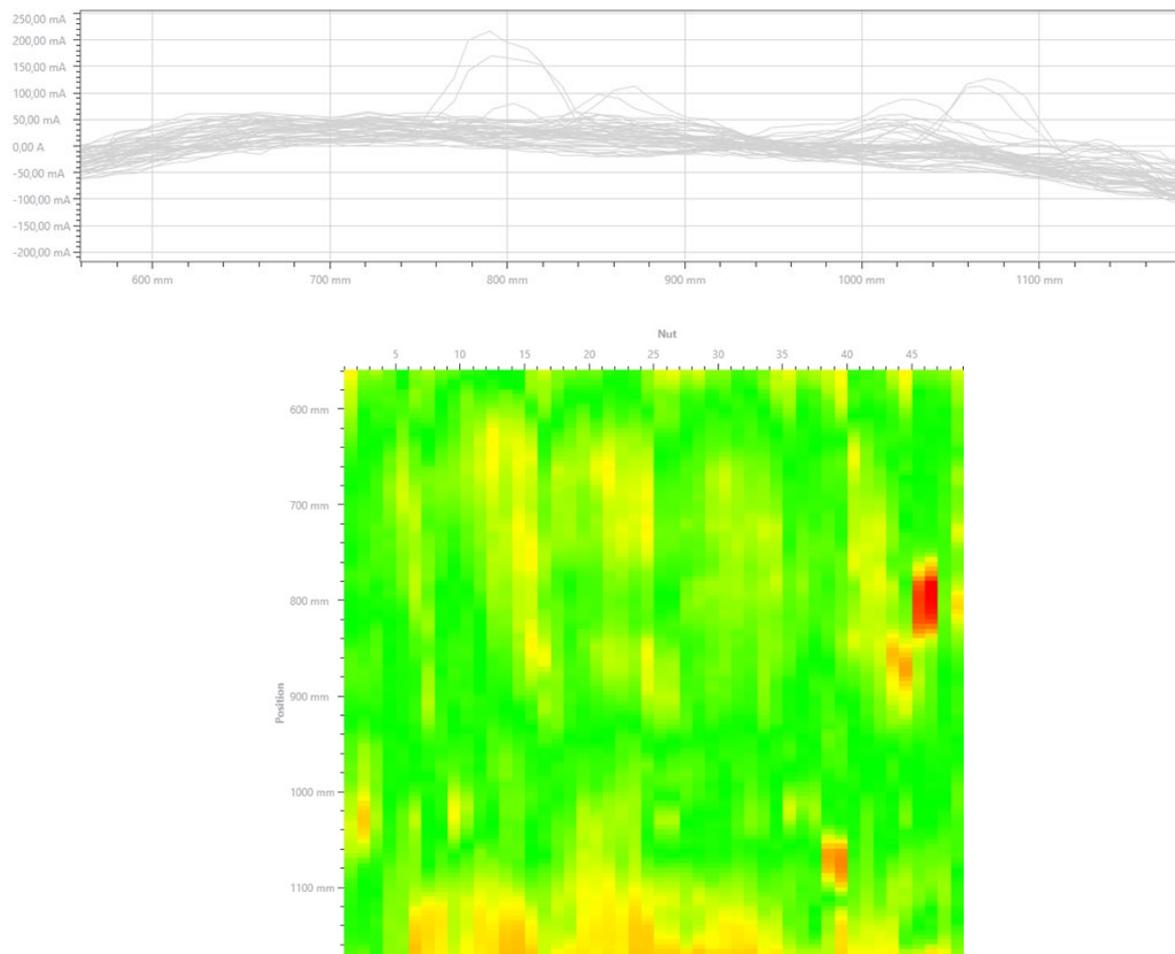


Abbildung 5-12: Vergleichende Kurvenschar (oben) und dazugehörige Falschfarbendarstellung der Stator Oberfläche (unten)

Da keine Rückschlüsse auf dem Fehlerstrom, zu der im Betrieb herrschenden Temperatur an der Fehlerstelle gezogen werden können (der Widerstandswert ist nicht bekannt), ist dieser absoluter Grenzwert mit Vorsicht zu genießen. Vielmehr sollte auf Vergleichswerte mit anderen Nuten bei derselben Messung bzw. zwischen vorangegangenen Messungen geachtet werden. Abbildung 5-12 stellt einen Fall mit entsprechend erhöhtem Streufluss inklusive der Falschfarbendarstellung dar.

## 5.2.4 Erfahrungen

### Fehler im Nut-Grund

Bei diesem Beispiel kam die Maschine mit einem Phase-Erde Fehler zur Reparatur. Nachdem der Fehler auf dem Nut-Grund identifiziert werden konnte, wollte der Betreiber wissen, ob auch das Blechpaket beschädigt ist. Dies war der Fall, wie aus der blau markierten Kurve in Abbildung 5-13 zu erkennen ist.

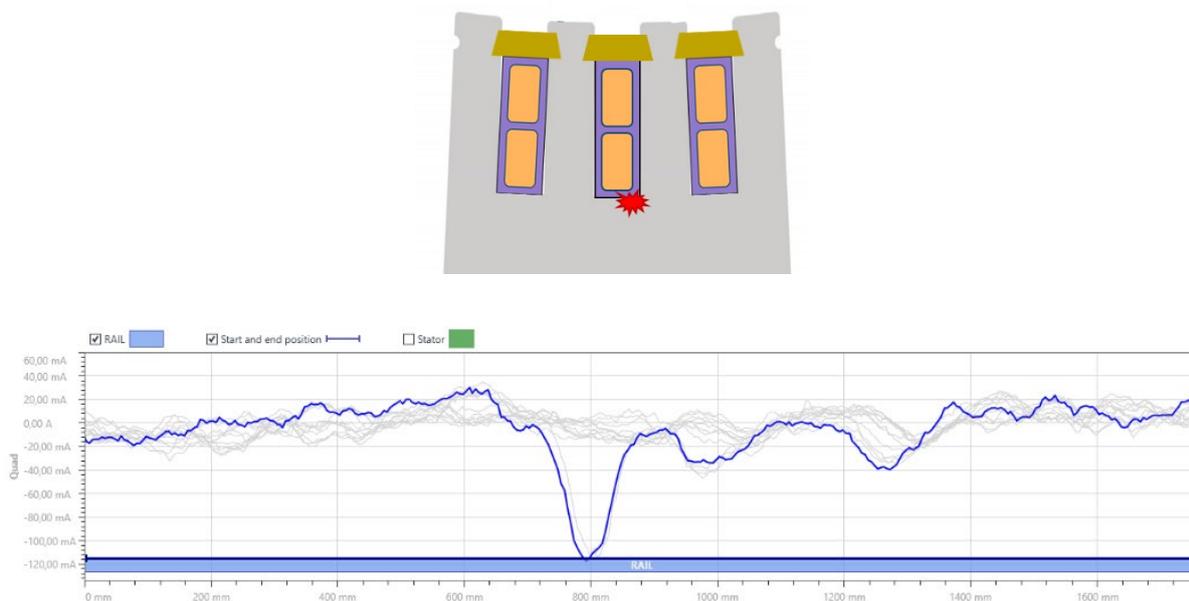


Abbildung 5-13: Fehlerort (oben) und die dazugehörige Messung (unten).

### Neubewicklung eines Stators

Nach dem Entfernen der Wicklung wurde der Stator überprüft, um dessen Zustand für die etwaige Neubewicklung zu erheben. Dabei wurde eine Fehlstelle festgestellt. Die Auswirkung der Reparatur ist in ersichtlich. Hier wurde nach dem ersten Durchgang der Säurebehandlung gestoppt. Es wurde lediglich darauf vertraut, dass der Wert unterhalb der oben angesprochenen 100 mA fällt. Es ist jedoch ratsam hier mindestens einen weiteren Versuch zu unternehmen, um zu sehen, ob der Peak noch weiter reduziert werden kann.

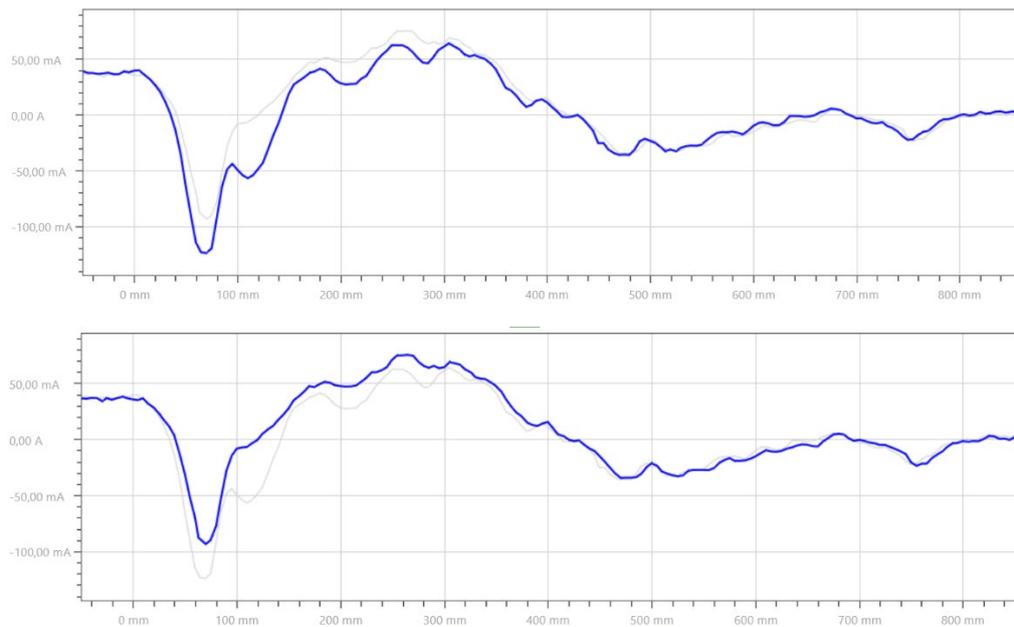


Abbildung 5-14: Auswirkung der Reparatur, oben: vor der Säurebehandlung; unten: nach dem Ätzen. Die jeweils andere Kurve ist im selben Diagramm ausgegraut dargestellt

#### *Fehlerdetektion und dessen Reparatur:*

In diesem Beispiel konnte mit Hilfe der Streuflussmessung eindeutig eine Fehlerstelle identifiziert werden. Nach anschließender Reparatur dieser, wurde die Messung wiederholt. Die Messergebnisse vor und nach der Reparatur sind in Abbildung 5-15 dargestellt. Klar erkennbar ist der Erfolg der Reparatur.

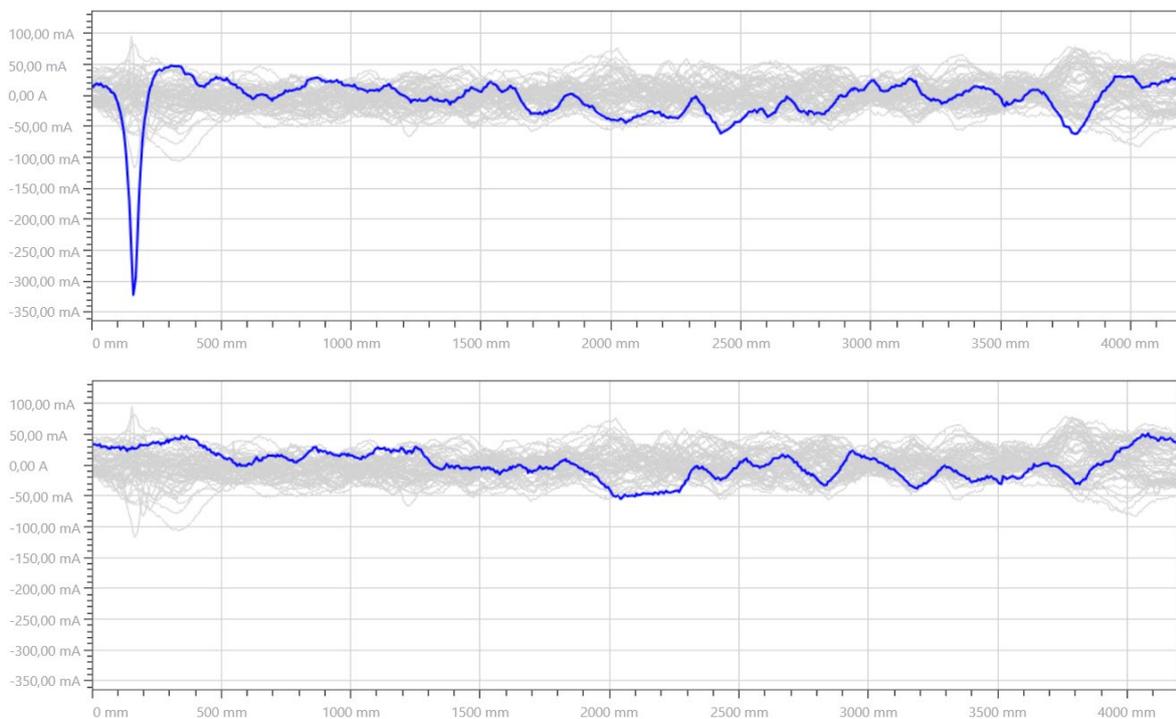


Abbildung 5-15: Blechpaketprüfung vor (oben) und nach der Reparatur einer Fehlerstelle (unten) ca. 16 cm im Stator. Im Hintergrund ist die Kurvenschar der restlichen Nuten dargestellt. Diese wurde nur einmal aufgenommen.

### 5.3 Vergleich der Messverfahren

Das international übliche und anerkannte Standardverfahren für die Zustandserfassung von Blechpaketen ist die Magnetisierungsprüfung mit hoher Induktion und Nennfrequenz.

Neben diesem Standardverfahren ist das Messverfahren mit hoher Frequenz entwickelt worden, das den Vorteil eines erheblich geringeren Aufwandes beim Messaufbau und des Energiebedarfs zur Magnetisierung bietet.

Alternativ wird das Messverfahren mit niedriger Induktion angeboten, das eine Prüfung bei wenig Aufwand und handlichem Equipment ermöglicht. Darüber hinaus ist hier im Gegensatz zu den anderen Messverfahren unter bestimmten Umständen eine Prüfung des Ständers bei eingebautem Rotor möglich.

Für eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Methoden zur Blechpaketüberprüfung gibt es noch keine nationalen oder internationalen Standards. Deshalb sind zuerst die Maßstäbe für die Prüfbedingungen und das Detektieren von Hot-Spots zu diskutieren.

Fehlstellen im Blechpaket können nur als Folge mechanischer und thermischer Beanspruchungen entstehen. Beide sind ausschließlich betrieblicher Natur. Die Fehlstellen können sich auch nur unter betrieblichen Bedingungen ausbreiten. Das Verhalten dieser Stellen in einem mechanisch und thermisch unbelasteten Blechpaket, wie z.B. bei der Niederinduktionsprüfung, ist bisher nicht untersucht bzw. bekannt.

Unabhängig von der Prüfmethode können Fehlerstellen nur dann detektiert werden, wenn sich ein Kreisstrom ausbilden kann.

Die beiden Verfahren mit hoher Induktion (mit Nennfrequenz sowie mit erhöhter Frequenz) bilden die Bedingungen bei Betrieb realistisch ab und zeigen in beiden Fällen bei einer vergleichenden Prüfung eine vergleichbare Intensität der Fehlstellen.

Qualitativ vergleichende Messungen der Prüfung bei niedriger Induktion zur Prüfung mit Nenninduktion und Nennfrequenz ergaben, dass die bei hoher Induktion detektierten Fehlstellen von dem ELCID-Messverfahren nicht immer reproduziert wurden.

Weiter kommt dieses Verfahren in den beiden Endbereichen, insbesondere bei getreppten Endpaketen sowie bei segmentierten Blechpaketen im Bereich der Teilfugen an seine Grenzen.

Der direkte Vergleich der ELCID-Messung mit einer Hochinduktionsmessung ist nicht zulässig. Vergleichende Messungen der beiden Methoden haben gezeigt, dass mit dem Hochinduktions-Messverfahren Heißstellen erkannt werden, die die ELCID-Messung nicht aufdeckt. Diese eine Messung an einem Turbogenerator ist in Literaturstelle [1] erläutert. Andere Literaturquellen (unter anderem [6]) zeigen sehr wohl eine gute Vergleichbarkeit der ELCID Messung mit der Messung bei hoher Induktion. Sehr wohl erlaubt die ELCID-Methode einen relativen Vergleich der Zahnstreufelder entlang der einzelnen Nuten.

	ELCID	50/60 Hz	400-600 Hz
Induktion B (Tesla)	ca. 4% der Bemessungsinduktion, entspricht ca. 60 mT (entsprechend geringer bei Messung mit 400 Hz)	ca. 85% der Bemessungsinduktion (ca. 1T)	0,1T – 0,15T
Induzierte Längsspannung (V)	ca. 5V/m bis 25 V/m bei 400 Hz	ca. 100V/m	ca. 80V/m
Magnetisierungsverluste (kW)	ca. 1,0 bis 1,5 kW	ähnlich wie im Betrieb	ähnlich wie im Betrieb
Detektionsverfahren	Detektieren, Messen und Lokalisieren des Fehlerstroms	Detektieren und Lokalisieren der Fehlerstellen mit Wärmebildkamera (IR-Kamera)	
Prüfaufbau Aufwand	Gering	hoch	mittel

Tabelle 5-1: Vergleich der drei unterschiedlichen Magnetisierungsprüfungen für Generatorblechpakete – EL-CID Messung – netzfrequente Ringflussmagnetisierung mit 50/60 Hz – höherfrequente Magnetisierung mit 500 Hz

#### Literaturverzeichnis

- [1] Jürgen R. Weidner, Vergleich der Heißstellendetektion von verschiedenartigen Magnetisierungstests an Blechpaketen großer Turbogeneratoren, 14. Essener Tagung HdT – Technik, Instandhaltung, Schäden am 18. - 19. Februar 2020
- [2] C.-R. Richter, J. R. Weidner, Testing the stator core of large turbine generators using the ring flux method, IMechE 2012, UK
- [3] Jim Lau / Gustavo Gamboa, Elevated frequency loop test for large generators, EPRI 2016
- [4] S. Voßkühler; “Die Bedeutung von Diagnosemessungen für die Zustandsbewertung von Generatoren am Beispiel der Verlustfaktor und Hochinduktionsprüfung”, ETG-Kongress 2009, Düsseldorf
- [5] Siemens-Baustein D735-220; “Kontrolle auf Eisenschluss an Ständerblechpaketen und Langzeitmagnetisierung”
- [6] F. Öttl, M. Lachance, “ELECTROMAGNETIC IMPERFECTION MEASUREMENTS FOR STATOR CORE CONDITION ASSESSMENT”, NETA World, Spring 2023  
<https://netaworldjournal.org/electromagnetic-imperfection-measurements-for-stator-core-condition-assessment/>