

Induktionsthermographie zur automatischen Prüfung von Generatorkomponenten

Hubert MOOSHOFER, Matthias GOLDAMMER,
Wolfgang HEINE, Max ROTHENFUSSER, Siemens AG, München
Jason BASS, Erik LOMBARDO, Siemens Energy, Charlotte, USA
Johannes VRANA, Siemens Energy, Orlando, USA

Kurzfassung. In der Energietechnik werden an verschiedenen Stellen hochbeanspruchte Bauteile eingesetzt, bei denen Defekte unbedingt vermieden werden müssen. Neben dem Turbinenbau ist dies auch im Generatorbereich der Fall: Bei regelmäßigen Inspektionen müssen auch kleinste Risse zuverlässig detektiert werden, um Risswachstum und Ausfälle im Betrieb auszuschließen. Mittels bildgebender Thermographie lässt sich eine schnelle Komplettprüfung mit 100% Prüfabdeckung durchführen. Durch Automatisierung lassen sich Prüfzeiten verkürzen, der Durchsatz der Prüfung steigern und damit Prüfkosten senken. Außerdem wird durch Automatisierung eine zuverlässige Prüfdurchführung sichergestellt, bei der alle geforderten Defekte gefunden werden. In diesem Beitrag wird die Prüfautomatisierung am Beispiel der Inspektion von Rotorwedges bei Siemens Energy in Charlotte gezeigt und eine dafür bei Siemens entwickelte, neuartige Prüfanlage vorgestellt.

Einführung

Großtechnische Generatoren setzen mechanische Energie in elektrische Energie um, und sind ein Kernbestandteil fossiler Kraftwerke. Siemens Energy in Charlotte, USA fertigt solche Generatoren und führt Generator Service durch.

Neben dem feststehenden Stator besteht ein Generator aus einem Rotor bzw. Läufer, einem Schmiedeteil, in dessen Schlitzen die Rotorwicklungen verlaufen. Zur Fixierung der Wicklungen werden Keile benutzt, sogenannte Rotorwedges (siehe Bild 1). Diese zaunlattengroßen Stangen bestehen aus hochfestem nichtmagnetischem Stahl und sind mit Kupfer beschichtet. Im Betrieb sind die Rotorwedges hohen mechanischen Kräften ausgesetzt. Ein Defekt hätte fatale Folgen: Die Zentrifugalkräfte, die auf die Keile wirken, könnten sie zerbrechen. Die Bruchstücke würden dann den Generator massiv beschädigen.

Aus diesem Grund werden die Rotorwedges im Rahmen des Service für die Weiterverwendung requalifiziert. Bislang erfolgte die Untersuchung auf Defekte mittels Fluoreszierender Eindringprüfung. Das Verfahren ist zwar zuverlässig, es hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: Die Beschichtung der Rotorkeile muss vor der Prüfung entfernt und bei den wieder verwendbaren Keilen nach der Prüfung wieder aufgebracht werden. Aus diesem Grund wurde intensiv nach einem praktikableren Prüfverfahren gesucht.

Gegenüber der Eindringprüfung, die nur zur Oberfläche offene Defekte findet, hat die Thermographie den Vorteil, dass auch Defekte unter der Oberfläche detektiert werden. Dadurch kam es zur Idee, die Rotorwedges mittels Aktiver Thermographie zu prüfen, um

so die im bisherigen Prüfprozess notwendigen Schritte, die keinerlei Wertschöpfung darstellen, zu eliminieren.


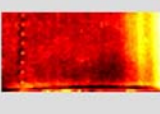

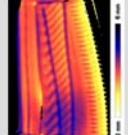

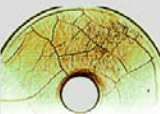

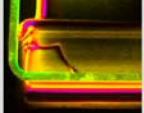

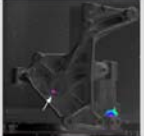


Bild 1. Bild eines Rotors – In einem Schlitz befinden sich viele Rotorwedgen hintereinander

1. Prüfverfahren

Die aktive Thermographie ermöglicht schnelle und zuverlässige Defektdetektion. Im Gegensatz zur passiven Thermographie wird bei der Aktiven Thermographie mittels verschiedener Anregungstechniken Energie in den Prüfling eingebracht, und anhand deren Verteilung und Ausbreitungsverhalten auf Defekte geschlossen.

Tabelle 1. Übersicht über Anregungstechniken der Aktiven Thermographie

Blitz Thermographie			Detektion von Delaminationen Messung der Beschichtungsdicke
Heißluft Thermographie			Durchgängigkeit von Kühlkanälen Messung der Wandstärke
Flying-Spot Thermographie			Detektion von Oberflächenrissen
Induktions-Thermographie			Rissdetektion (an und unter der Oberfläche)
Akustische Thermographie			Rissdetektion (an und unter der Oberfläche)

In den letzten Jahren hat die Aktive Thermographie erhebliche Fortschritte gemacht [1],[2],[5],[7]. Es gibt inzwischen eine ganze Reihe von Anregungsformen, bei Siemens

sind z.B. Blitz-, Flying-Spot-, Akustische-, Heißluft- und Induktionsthermographie im Einsatz [1],[2]. Je nach Art der Anregung können unterschiedliche Arten von Defekten (bzw. andere Eigenschaften) ermittelt werden (siehe Tabelle 1).

Zur Inspektion metallischer Teile mit regulärer Geometrie - wie bei den Rotorwedges der Fall - eignet sich am besten die Induktionsthermographie, da sie kontaktlos und bildgebend arbeitet und relativ große Energiemengen eingebracht werden können. Die Anregung erfolgt dabei mit einer Spule, die im Prüfling einen entgegengesetzten Strom induziert. Die Eindringtiefe s des induzierten Stromes bestimmt sich aus den Materialeigenschaften und der Frequenz des Spulenstromes nach folgender Formel:

$$s = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \sigma \pi f}}$$

Die Rotorwedges bestehen aus nichtmagnetischem Stahl. Für dieses Material ergibt sich bei 1,5 kHz eine Eindringtiefe von ca. 10 mm, bzw. bei 150 kHz eine Eindringtiefe von ca. 1 mm [3]. Die Beschichtung der Rotorwedges ist relativ dünn (unter 1/10 mm), so dass 1 mm Eindringtiefe zum Auffinden von Defekten unterhalb der Beschichtung völlig ausreicht. Außerdem verbessert sich die Induktion mit steigender Anregungsfrequenz.

Durch den induzierten Strom wird das Material erwärmt. Defekte im Material beeinflussen den Stromfluss und bewirken dadurch einen lokal unterschiedlichen Temperaturverlauf über der Zeit. Die Amplitude des Temperaturverlaufs wird primär von der Entfernung zum Induktor und von der Emissivität der Prüflingsoberfläche bestimmt, die jedoch beide für die Defektdetektion nicht von Interesse sind. Indem bei der Auswertung Größen benutzt werden, die nicht von der Amplitude des zeitlichen Verlaufes abhängen [6], lassen sich Einflüsse bedingt durch unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit vermeiden.

Aufgrund der schnellen Wärmeausbreitung im Stahl ändert sich die Oberflächentemperatur entsprechend schnell. Dies hat einerseits zur Folge, dass die die Temperaturverläufe zeitlich fein aufgelöst werden müssen, andererseits ergeben sich dadurch kurze Prüfzeiten.

2. Automatisierung des Prüfvorgangs

Die Anzahl der zu prüfenden Rotorwedges hängt von der Größe und dem Typ des Läufers (bzw. Generators) ab, im Mittel sind es etwa 300 Stück pro Generator. Die Anregung mittels Induktion örtlich ist begrenzt auf einen Bereich von einigen Zentimeter um den Induktor herum, d.h. es müssen nebeneinander versetzt mehrere Prüfungen durchgeführt werden.

Die Prüfung mittels Induktionsthermographie lässt sich grundsätzlich als handgeführtes System ausführen. Bei Siemens in München wurde bereits ein solches System aufgebaut. Während dies im Sinne geringer Investitionskosten ist, verzichtet man damit auf eine mögliche Automatisierung. Eine Automatisierung ist jedoch insbesondere deswegen wünschenswert, weil sich damit die Prüfzeit verkürzen, der Durchsatz steigern und damit die Prüfkosten senken lassen. Außerdem wird - gewissermaßen als „Nebenprodukt“ - eine zuverlässige Prüfdurchführung sichergestellt, und die Inspektionsergebnisse werden automatisch dokumentiert.

2.1 Aufbau der Prüfanlage

Bild 2 zeigt die Prüfanlage. Auf der linken Seite befindet sich der Ladebereich, dort werden die Rotorwedges zur Prüfung eingelegt, und danach wieder entnommen. Im gekapselten

rechten Teil findet die Prüfung statt, dort befinden sich Infrarotkamera und Induktor. Der Prüfer bedient die Anlage per Computer über die am Schwenkarm befindliche Tastatur mit Monitor.



Bild 2. Außenansicht der Prüfanlage

Kernelement des Prüfsystems sind Induktor und Infrarotkamera. Der Induktor ist liegend über dem Prüfling angeordnet (siehe Bild 3), die Kamera blickt von oben auf den Induktor und den Prüfling.

Entsprechend der schnellen Wärmeausbreitung im Stahl wird eine High-Speed Infrarotkamera eingesetzt, die im MWIR-Bereich bis zu 400 Bildern/sec aufnimmt. Um störende Reflexe zu vermeiden ist die Kamera gegenüber der Umgebung abgeschirmt. Der verwendete Induktionsgenerator kann eine Leistung bis zu 10kW abgeben. Es wird ein Gerät eingesetzt, wie es auch zur Induktionserwärmung verwendet wird, jedoch kann dieses zeitlich präzise gesteuert werden. Aufgrund des hohen Stromes im Kiloampere-Bereich wird der Induktor wassergekühlt. Zuleitungsverluste werden durch Transformation des Stromes unmittelbar vor dem Induktor verringert.

Um Defekte unabhängig von der Orientierung detektieren zu können muss Strom in zwei zueinander senkrechten Richtungen induziert werden. Hierzu wird ein dreiecksförmiger Induktor eingesetzt, dessen Seiten um 90° gegeneinander gedreht sind.

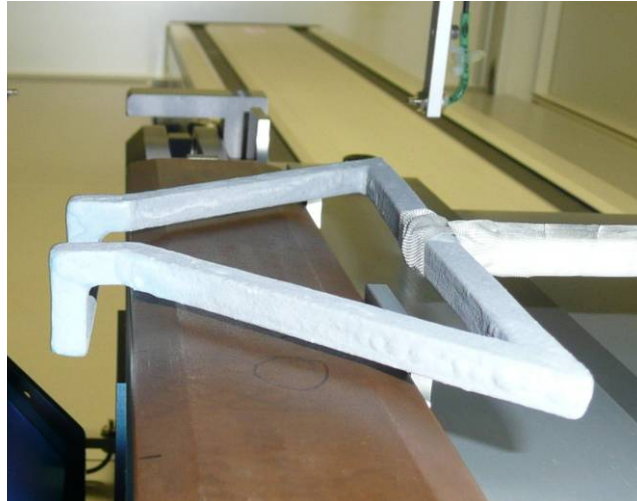


Bild 3. Prüfling und Induktor

2.2 Inspektionsablauf

Im Rahmen der Requalifizierung muss die Oberseite und die Unterseite der Rotorwedges auf Defekte geprüft werden. Dies erfolgt in zwei Schritten: Die zu testende Wedge wird vom Prüfer zunächst mit der Oberseite nach oben eingelegt und der Prüfvorgang wird gestartet. Während der Inspektion wird der Prüfling durch Klemmung fixiert und mittels Schlitten unter dem Induktor durchgeschoben. Nach dem Ende der automatisch ablaufenden Inspektion der Oberseite, wendet der Prüfer den Rotorwedge und startet nun die Inspektion der Unterseite. Ist auch diese abgeschlossen, kann der Prüfer mit der Inspektion des nächsten Teils fortfahren.

Eine Inspektion der Seitenflächen ist zur Requalifizierung nicht erforderlich, das Prüfsystem ist jedoch bereits dafür vorbereitet: Über einen Spiegel kann parallel zur Oberseite auch die Vorderseite der Rotorwedge von der Kamera aufgenommen werden. Durch Wenden des Prüflings werden – abgesehen von den Stirnflächen – alle Seiten abgedeckt. Zur Prüfung der Seitenflächen muss jedoch ein dafür entworfener Induktor eingesetzt werden, der auch an der Vorderseite Strom in den Prüfling induziert.

Im Hinblick auf einheitliche Prüfempfindlichkeit wird ein fester Abstand zwischen Prüfling und Induktor verwendet. Andererseits unterscheidet sich die Geometrie der Rotorwedges je nach Generatortyp in Länge, Breite und Dicke(=Höhe). Zur Inspektion von Prüflingen größerer Dicke lässt sich die auf dem Schlitten befindliche Auflage mittels Einstellschrauben absenken, bzw. bei geringerer Dicke anheben. Dadurch befindet sich die Oberseite immer an derselben Stelle und es kann auf eine Verstellung des Induktors verzichtet werden. In gleicher Weise kann der Anschlag für die Rückseite eingestellt werden. Die Anpassung an die Länge erfolgt automatisch über einen Pneumatikzylinder mit entsprechend großem Verstellweg, der den Prüfling während der Inspektion fixiert.

Eine manuelle Einstellung ist damit nur erforderlich, wenn der Typ der zu prüfenden Wedges wechselt. Um zu verhindern, dass durch falsche oder vergessene Einstellung der Prüfling an den Induktor stoßen kann, wird die Lage der Vorder- und Oberseite bereits vor dem Induktor überwacht. Ggf. wird die Inspektion abgebrochen und der Prüfer hat die Möglichkeit die Einstellung zu korrigieren.

Die Prüfung kann entweder schrittweise oder scannend durchgeführt werden. Die Prüfung eines Keils dauert je nach Prüfmodus ein bis fünf Minuten.

3. Ergebnisse

Zum Test der Funktion und Empfindlichkeit der Prüfanlage wurde eine Wedge mit erodierten Schlitzn präpariert (Tiefe 0,75mm, Länge 3mm). Bei Inspektion dieser Referenz-Wedge ergibt sich, das charakteristische Muster für ideale Schlitzn [4]: An den Schlitzenden sind kreisförmige Anzeigen zu erkennen, die den Bereichen erhöhter Stromdichte entsprechen. Um nachzuweisen, dass die Detektion unabhängig von der Orientierung funktioniert, enthält die Referenz-Wedge in 45°-Schritten gedrehte Defekte (siehe Bild 4). Beim Test einer zweiten beschichteten Referenz-Wedge, die ebenso wie die erste Referenz-Wedge präpariert wurde, ließen sich die Testdefekte bedingt durch höhere Emissivität im Vergleich zur unbeschichteten Referenz-Wedge sogar noch besser erkennen.

Das Prüfungsergebnis ist ein Bild, das den zeitlichen Wärmefluss im Keil in Falschfarbendarstellung zeigt. Bild 5 zeigt das Inspektionsergebnis für den Fall einer Rotorwedge mit natürlichen Defekten (Rissen). Im Gegensatz zu künstlichen Defekten ergeben sich lineare Anzeigen, eine Gegenüberstellung zeigt die Korrespondenz zum Ergebnis der Farbeindringprüfung.

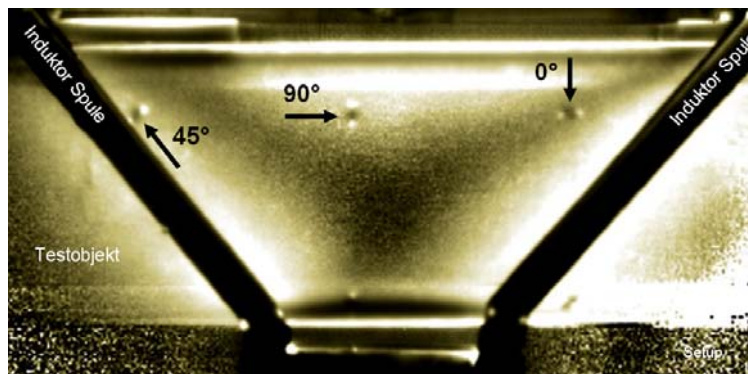


Bild 4. Referenz-Wedge mit Testdefekten (erodierte Schlitzn)



Bild 5. Rotorwedge mit natürlichen Defekten (Rissen)

Ein Vergleich der Induktionsthermographie mit der bisher durchgeführten Eindringprüfung zeigt, dass die Induktionsthermographie in den meisten Punkten überlegen ist (siehe Tabelle 2). Trotz der Anschaffungskosten für eine mit Induktionsthermographie arbeitende Prüfanlage, ist dies mittelfristig die kostengünstigere Lösung, da sich die Anschaffungskosten bereits innerhalb von 1 bis 2 Jahren amortisieren.

Neben der Kostenersparnis durch den Wegfall der Entschichtung und der Beschichtung reduziert sich die Dauer des gesamten Prüfzyklus erheblich. Zudem kann die Prüfung nun vollständig intern ausgeführt werden, so dass sich das kurze Zeitfenster, das für die Wartung eines Generators zur Verfügung steht, deutlich leichter einhalten lässt, da mehr Zeit für evtl. notwendige Reparaturen bzw. Nachfertigung zur Verfügung steht.

Tabelle 2. Vergleich bisheriges und neues Prüfverfahren

	Eindringprüfung	Induktionsthermographie
Empfindlichkeit	Sehr hoch	Sehr hoch
Anschaffungskosten	Niedrig	Hoch
Betriebskosten	Mittel	Niedrig
Prüfdauer	20 Tage	5 Tage
Prüfvorbereitung	Entschichtung	Keine
Prüfnachbereitung	Reinigen / Beschichtung (Gutteile)	Keine
Objektivität	Bildaufn. Prüferabhängig	Bildaufn. Prüferunabhängig
Umweltverträglichkeit	Chem. Verbrauchsmittel	Ja
Automatisierung	Nein	Ja
False Positives	Mittel	Selten
Archivierbarkeit	Manuell (Kamera)	Automatisch
Statistische Auswertung	Manuell	Automatisch

4. Ausblick

Das vorgestellte Projekt zeigt, dass sich die Induktionsthermographie in einem industriellen Service- und Fertigungsumfeld einsetzen lässt. Es wurde eine Prüfanlage für Rotorwedges entwickelt und aufgebaut. Diese ist inzwischen im Werk in Charlotte, USA im Einsatz und hat sich bereits bei der Prüfung der Rotorwedges mehrerer Generatoren bewährt.

Die Prüfanlage lässt sich gleichermaßen für Scannende Induktionsthermographie wie auch für "konventionelle" Induktionsthermographie (d.h. schrittweise Inspektion) einsetzen. Durch das Wegfallen wesentlicher Teile der Prüfvor- und Nachbereitung ergeben sich bereits nach kurzer Zeit beträchtliche Kosteneinsparungen, bei gleichzeitiger Verkürzung des Prüfzyklus.

Über den gezeigten Einsatzfall hinaus, hat die Induktionsthermographie Potential für ein breites Spektrum weiterer Anwendungen. Ein wesentlicher Vorteil der gegenüber der Eindringprüfung ist die Möglichkeit Defekte zu finden, die nicht bis hin zur Oberfläche reichen, was gerade bei der Inspektion beschichteter Bauteile entscheidend ist.

Referenzen

- [1] C. Homma: *Untersuchungen zu Mechanismus und technischer Umsetzung der akustischen Thermographie*. Dissertation, Universität des Saarlandes (2007)
- [2] J. Vrana, M. Goldammer: *Induktionsthermographie*. DGZfP 92, Vortrag 3 (2005)
- [3] J. Vrana: *Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit Elektromagnetischer Anregung*. Dissertation, Universität des Saarlandes (2008)
- [4] J. Vrana, M. Goldammer, J. Baumann, M. Rothenfusser, W. Arnold: *Mechanisms and Models for Crack Detection with Induction Thermography*. AIP Conference Proceedings (2007)
- [5] J. Bamberg, S. Neuhäusler, G. Zenzinger, V. Carl: *Induktions-Thermografie - Ein innovatives Rissprüfverfahren*. DGZfP-Berichtsband 98, Vortrag 13 (2005)
- [6] X. Maldague, S. Marinetti: *Pulse Phase Infrared Thermography*. J. Appl. Phys. 79, 2694-2698 (1996)
- [7] G. Riegert, A. Gleiter, G. Busse: *Potential and Limitations of Eddy Current Lockin-Thermography*. SPIE 6205, 62051E (8 Seiten) (2006)