

# **Auswirkungen hoher Temperaturen auf die Auslegung und Gestaltung aktiver Magnetlager**

**Torsten Rottenbach, Christian Vanek, Frank Worlitz**  
*Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik*  
*Hochschule Zittau/Görlitz*  
*Theodor-Körner-Allee 16*  
*02763 Zittau, Germany*  
*Tel.: +4935836124388, Fax: +4935836123449*  
*Email: t.rottenbach@hszg.de, c.vanek@hszg.de, f.worlitz@hszg.de*

## **Kurzfassung**

Der Einsatz aktiver Magnetlager an Turbomaschinen in Kraftwerken führt aufgrund der wesentlich geringeren Lagerreibung und dem Wegfall der Ölschmierung zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Aggregates. Dieser wird jedoch erheblich reduziert, da die über die Welle in die Magnetlager eingeleitete Prozesswärme durch geeignete Kühlmaßnahmen abgeführt werden muss. Alternativ dazu sind Konzepte, die auf eine Erhöhung der Grenztemperaturen der Isolation der Lagerspulen und der Rotor- bzw. Statorbleche durch temperaturbeständigere Isolierstoffe abzielen. Der Beitrag gibt, ausgehend von den Auswirkungen hoher Temperaturen auf die elektrischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften der Magnetkreismaterialien, einen Überblick über verfügbare Werkstoffe und deren Hersteller/Anbieter sowie auf den Auslegungs- bzw. Designprozess von Magnetlagern.

## **1 Einleitung und Zielstellung**

Der Einsatz aktiver Magnetlager an Turbomaschinen in Kraftwerken bietet gegenüber den üblicherweise mit hydrodynamischen Lagern ausgestatteten Aggregaten eine Reihe von Vorteilen:

- erheblich geringere Lagerreibung
- Reduzierung des Wartungs- und Instandhaltungsaufwandes, Möglichkeit der Online-Überwachung/-diagnose
- Erhöhung der Betriebssicherheit durch die Verringerung der Brandlast in der Anlage infolge des Wegfalls des Schmieröls

Daneben reduziert sich der anlagentechnische Aufwand, da das Ölsystem entfällt. Damit verbunden ist jedoch, dass die aus dem Prozessraum über die Welle an die Lagerstellen geleitete sowie die in den Lagern entstehende Wärme nicht mehr über das Öl zum Ölkühler abgeführt wird. Der Magnetlagerluftspalt wirkt zudem als thermische Isolierung. Das führt zu

hohen thermischen Belastungen der Magnetlager und der in unmittelbarer Nähe angebrachten Lagesensoren und erfordert den Einsatz aufwändiger Kühlkonzepte. Während der Stator relativ einfach durch einen Wasserkreislauf gekühlt werden kann, gestaltet sich die Kühlung des Rotorblechpaketes weitaus komplizierter. Konstruktionsbedingt können hier lediglich gasförmige Kühlmedien genutzt werden. Die Bereitstellung und Führung der Kühlmedien führt zu einem zusätzlichen technischen Aufwand und reduziert die erzielbaren Wirkungsgradverbesserungen beim Einsatz von aktiven Magnetlagern gegenüber Gleitlagern. Ziel muss es daher sein, Magnetlager zu entwickeln, die ohne diese Kühlung auskommen und die o. g. Vorteile vollumfänglich ausschöpfen.

Eine Alternative zu den Kühlkonzepten ist der Einsatz von temperaturbeständigeren Isolationswerkstoffen bzw. Beschichtungen für die Lagerspulen und der Rotor- bzw. Statorbleche. Die im Elektromaschinenbau üblicherweise genutzten Standardwerkstoffe sind dafür nicht geeignet, da diese erheblichen Einschränkungen bezüglich der oberen Dauereinsatztemperaturen unterliegen. Im Rahmen einer Literatur- und Internetrecherche wurde daher geprüft, ob Werkstoffe am Markt verfügbar sind, die diesen Ansprüchen genügen.

## **2 Thermische Belastungen an einer magnetgelagerten Turbomaschine**

Die Magnetlager einer Turbomaschine werden durch Wärmeleitung in der Welle und durch Verluste im Lager selbst thermisch belastet. Die über die Welle eingetragene Wärmemenge ist abhängig vom Temperaturunterschied zwischen Lager und Prozessraum, den Materialei-

genschaften sowie der konstruktiven Gestaltung der Maschine. Diese Problematik wurde auch an der seit März 2015 im Kraftwerk Jänschwalde eingesetzten magnetgelagerten SPAT deutlich: „Außerdem ist es äußerst wichtig, die hohen Prozesstemperaturen von 535° Celsius von den elektrischen Wicklungen der Lagerung fern zu halten“ [1]. Zu diesem Zweck wurde an der SPAT eine fertigungstechnisch sehr aufwändige Kühlung installiert, bei der Kühlluft axial durch die Hülse unterhalb der Rotorblechpakete geblasen wird. Die Kühlluft wird durch zwei Gebläse bereitgestellt.

Die Eigenerwärmung des Lagers ist abhängig von den Verlusten im Lager. Diese unterteilen sich in ohmsche Wicklungs- und Eisenverluste, letztere werden durch Wirbelstrom- und Ummagnetisierungsverluste verursacht und sind drehzahlabhängig. Abb. 1 zeigt in einer Übersicht die thermischen Lasten an der Magnetlagerung einer Turbomaschine.

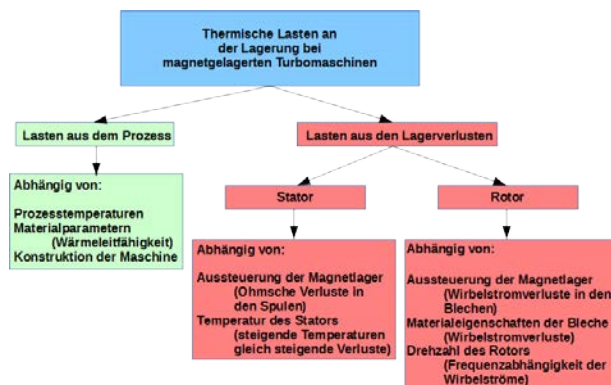


Abb. 1: Thermische Lasten an der Magnetlagerung einer Turbomaschine

### 3 Auswirkungen hoher Temperaturen auf die Auslegung und Gestaltung aktiver Magnetlager

#### 3.1 Vorbetrachtung

Die spezifischen Eigenschaften der für aktive Magnetlager eingesetzten Werkstoffe sind temperaturabhängig. Das betrifft sowohl die für die Funktion der Magnetlager maßgeblichen elektrischen und magnetischen als auch mechanische und chemische Eigenschaften.

#### Elektrische Eigenschaften

Die im Elektromaschinenbau für Wicklungen eingesetzten Werkstoffe Kupfer und Aluminium sind Kaltleiter und haben einen positiven

Temperaturkoeffizienten für den elektrischen Widerstand, d. h. mit steigender Temperatur nimmt auch der elektrische Widerstand dieser Materialien nach Glg. 1 zu [2].

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20}(\vartheta - 20^{\circ}\text{C})] \quad (\text{Glg. 1})$$

Die Temperaturkoeffizienten  $\alpha_{20}$  für Kupfer ( $0,00392 \text{ K}^{-1}$ ) und Aluminium ( $0,004 \text{ K}^{-1}$ ) sind über den Temperaturbereich von  $-200^{\circ}\text{C}$  bis  $600^{\circ}\text{C}$  nahezu konstant, der Widerstand  $R$  steigt demnach linear mit der Temperatur. Beträgt bspw. der Widerstand  $R$  eines Kupferdrahtes 10 Ohm bei  $20^{\circ}\text{C}$ , so steigt der Widerstand bei  $200^{\circ}\text{C}$  auf 17,06 Ohm.

$$P_V = i^2 \cdot R \quad (\text{Glg. 2})$$

Die Wicklungsverluste  $P_V$  steigen entsprechend Glg.2 und führen wiederum zu einer Erhöhung der Temperatur und der Verluste bis zur Einstellung eines thermischen Gleichgewichts.

Die für den magnetischen Kreis verwendeten ferromagnetischen Werkstoffe für Elektrobleche bestehen aus Eisenlegierungen mit Zusätzen von Silizium oder Aluminium zu Erhöhung des spezifischen Widerstandes. Dadurch werden die Wirbelstromverluste bei magnetischen Wechselfeldern z. B. gegenüber der Verwendung von Reineisen deutlich reduziert. Der positive Temperaturkoeffizient dieser Werkstoffe bewirkt bei steigender Temperatur ebenfalls einen Anstieg des ohmschen Widerstandes, wodurch die Wirbelstromverluste reduziert werden.

#### Elektrische Isolation

Bei der elektrischen Isolation in elektrischen Maschinen wird unterschieden in die Isolation der elektrischen Leiter und die Blechisolation. Aufgabe der Leiterisolation ist die galvanische Trennung der betriebsmäßig unter Spannung stehenden elektrischen Leiter gegeneinander und gegen geerdete Bauteile. Zur Reduzierung von Wirbelstromverlusten werden bei magnetischen Wechselfeldern die magnetischen Kreise der Maschinen aus gegeneinander elektrisch isolierten Blechen gefertigt. Die Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe ist abhängig vom eingesetzten Material. Dementsprechend sind unterschiedliche Höchstwerte zulässig. Eine Überschreitung der höchstzulässigen Dauertemperaturen beeinflusst die Funk-

tion und Lebensdauer der Maschine negativ und beschleunigt den chemischen Alterungsprozess der Isolation.

### Magnetische Eigenschaften

Die magnetischen Sättigungspolarisationen verschiedener Ferromagnetika sind in gleicher Weise von der Temperatur nichtlinear abhängig – vgl. Abb. 2. Die Sättigungspolarisation sinkt mit steigender Temperatur zunächst langsam, dann immer stärker bis zur Curietemperatur  $T_C$  auf den Wert Null ab. Oberhalb der Curietemperatur gehen die ferromagnetischen Eigenschaften verloren und das Material verhält sich paramagnetisch. Bezieht man die Sättigungspolarisation  $I_S$  auf den Wert bei Zimmertemperatur  $I_{S0}$  und die Temperatur  $T$  auf die materialabhängige Curietemperatur  $T_C$ , so kann die temperaturabhängige Sättigungspolarisation  $I_S$  nach Abb. 2 ermittelt werden [3].

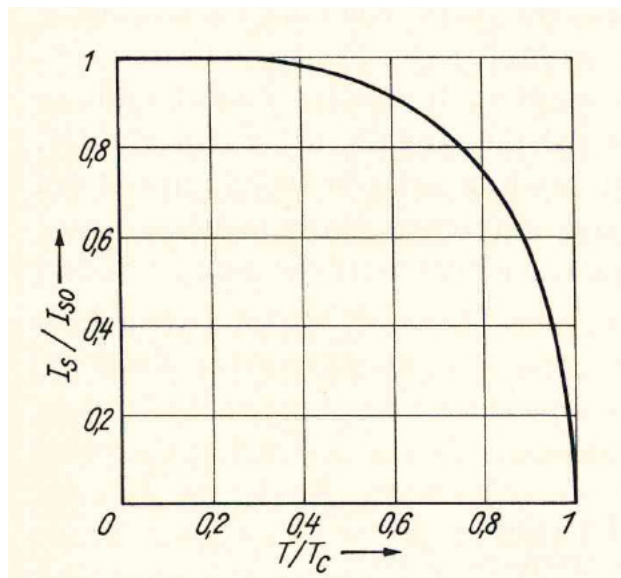


Abb. 2: Temperaturabhängigkeit der Sättigungspolarisation von Ferromagnetika [3]

### Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von in aktiven Magnetlagern eingesetzten Werkstoffen werden wesentlich durch temperaturabhängige, spezifische Werkstoffkennwerte wie Elastizitätsmodul  $E$  oder Dehngrenze  $R_{p0,2}$  bestimmt und kennzeichnen das Verhalten der Werkstoffe gegenüber äußeren Belastungen. Die Werkstoffkennwerte nehmen mit zunehmender Temperatur ab. Die Schmelztemperatur der eingesetzten Blechmaterialien spielt insofern eine Rolle, als es bei einem Verhältnis

von Einsatztemperatur zu Schmelztemperatur größer 0,4 zum Kriechen des Werkstoffes kommt. Sollte dieses Verhältnis überschritten sein, muss die Zeitstandfestigkeit der Bauteile überprüft und die maximale Einsatzzeit bei den entsprechenden Temperaturen definiert werden.

### Thermische Ausdehnung

Die thermische Ausdehnung von Werkstoffen kann bei hohen Temperaturen nicht vernachlässigt werden. Der sichere Betrieb von Magnetlagern hängt wesentlich von der Berücksichtigung des Verhaltens der Werkstoffe bei hohen Temperaturen ab. Unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten von Materialien können zu erhöhten Belastungen (z. B. innere Spannungen) oder zu erhöhten Spielen zwischen den Materialien führen, welche in der konstruktiven Gestaltung für die gesamte Temperaturspanne der Einsatzbedingungen berücksichtigt werden müssen.

### Chemische Reaktionen

Die Atmosphäre der Betriebsumgebung beeinflusst das Verhalten der eingesetzten Werkstoffe. So korrodieren Werkstoffe infolge Oxidation schon bei Raumtemperatur. Dieser Vorgang kann bei hohen Temperaturen wesentlich beschleunigt werden. Die Auswahl entsprechender Materialien oder der Einsatz in einer oxidationsmittelfreien Atmosphäre verlangsamen dieses Phänomen [4].

Daneben kommt es beim Kontakt zweier Werkstoffe zu chemischen Reaktionen zwischen diesen. Viele Werkstoffe sind bei Raumtemperatur inert, jedoch nicht mehr bei hohen Temperaturen. So kommt es bspw. zwischen Nickel und Kupfer bei hohen Temperaturen zur Diffusion, welche die Leitfähigkeit des Kupferleiters beeinträchtigt [4].

## 3.2 Analyse verfügbarer Hochtemperaturwerkstoffe für Magnetlager

### Ferromagnetische Werkstoffe

Ferromagnetische Werkstoffe für aktive Magnetlager bei Hochtemperaturanwendungen stellen besondere Anforderungen an die Werkstoffeneigenschaften. So müssen sie sehr gute magnetische, mechanische und elektrische Eigenschaften über einen großen Temperaturbereich und über der Zeit aufweisen [4]. Eben-

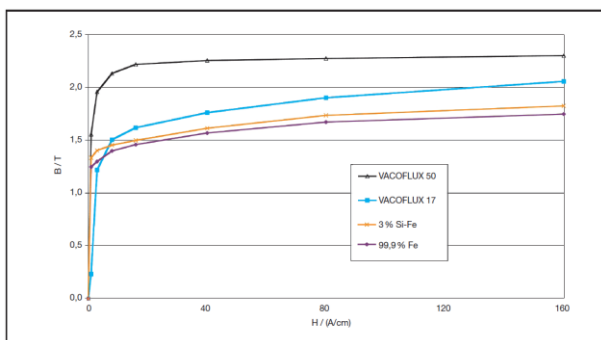
so spielt die Curietemperatur eine wesentliche Rolle, oberhalb derer die ferromagnetischen Eigenschaften des Materials in paramagnetische übergehen - vgl. auch Abb. 2. Magnetlagerwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen sollten eine möglichst hohe Sättigungsflussdichte aufweisen, damit bei der angestrebten Einsatztemperatur am Arbeitspunkt noch eine ausreichende Induktion für die Krafterzeugung bereitgestellt werden kann. Dafür sind weichmagnetische Eisen-Kobalt-Legierungen prädestiniert. Eine Auswahl dieser Legierungen und deren Hersteller zeigt Tabelle 1.

**Tabelle 1:** hochpermeable Fe-Co-Legierungen

Legierung	Hersteller
AFK 502	Aperam Alloys Inchy
Hiperco 50	Carpenter Technologies Corp.
Vacoflux 50	Vacuumschmelze GmbH Hanau
Vacodur 50	Vacuumschmelze GmbH Hanau

Diese Legierungen zeichnen sich durch hohe Sättigungsinduktionen von  $> 2,2$  T, hohe relative Permeabilitäten von  $> 12000$ , Curietemperaturen von  $\geq 900$  °C und großen spezifischen elektrischen Widerständen von  $\geq 40$   $\mu\Omega\text{cm}$  aus. Die Werkstoffe sind auf Grund des hohen Kobaltanteiles spröde und schwer bearbeitbar. Bleche sind in unterschiedlichen Dicken i. d. R. von 0,025 bis 2,0 mm, jedoch nur in Breiten von max. 300 mm lieferbar.

Abb. 3 zeigt die Magnetisierungskurven von Vacoflux 50/17 im Vergleich zu Silizium- und Reineisen.



**Abb. 3:** Magnetisierungskurve Vacoflux im Vergleich zu Silizium- und Reineisen

### Blechisolationen

Die vorrangige Aufgabe der Blechisolation ist die galvanische Trennung der Bleche im Blechpaket gegeneinander mit dem Ziel der Reduzierung der Wirbelstromverluste in mag-

netischen Wechselfeldern. Daneben übernehmen die Beschichtungen den Korrosionsschutz. Die Isolationen bestehen aus Oxidschichten oder aufgetragene Beschichtungen. Die Beschichtungen beinhalten organische und/oder anorganische Bestandteile. Eine Einteilung der Isolationen auf Elektroblech und -band gibt die DIN EN 10342. Grundlage dafür sind die allgemeinen chemischen Zusammensetzungen der Isolationen, deren relative Isolierfähigkeit sowie typische Einsatzgebiete. Hersteller bzw. Lieferanten von Elektroblech und -band bieten i. d. R. Isolationssysteme für die Bleche an. Diese weisen bis zu einem gewissen Grad Dauertemperaturbeständigkeit auf. Diese ist abhängig von der Art der Beschichtung (organisch/anorganisch, Zuschlagstoffe) und liegt im Allgemeinen bei Temperaturen zwischen 150 °C und 200 °C. Für Anwendungen im Hochtemperaturbereich sind weitaus höhere Temperaturen erforderlich. In Tabelle 2 sind beispielhaft Isolierungen für Elektrobleche einschließlich der zulässigen Dauertemperatur aufgelistet.

**Tabelle 2:** Blechisolationen für erhöhte Temperaturen

Dauertemperatur	Name
$> 450$ °C	isovac BLUE, Magnesiumoxid
300 °C	Remisol EB 5620 (C-4)
270 °C	Remisol EB 5308 (C-5)
270 °C	SURALAC 7000
270 °C	CDW AN8
250 °C	ArcelorMittal G11

### Hochtemperaturwickeldrähte/-leiterisolationen

Zur elektrischen Isolation der Windungen einer Spule gegeneinander und gegen geerdete Bauteile werden die Leiter mit Isolierstoffen umgeben. Die Art der Isolierstoffe beeinflusst neben der Spannungsfestigkeit die Wärmeableitung aus der Wicklung und die konstruktiven Gegebenheiten wie Wicklungsvolumen oder auch die Schutzklasse. Die zulässige Erwärmung ist durch die Wärmebeständigkeit der Isolation begrenzt. Eine Überschreitung der höchstzulässigen Dauertemperatur beeinflusst wesentlich die Lebensdauer.

An die Drahtisolation für Hochtemperaturanwendungen werden im Allgemeinen folgende Anforderungen gestellt [4]:

- hochtemperaturbeständig
- gute elektrische Isoliereigenschaften

- gute Wärmeleitfähigkeit
- kompakt
- flexibel

Für diese Anwendungsfälle sind die Anforderungen an die Isolierstoffe z. T. gegensätzlich und schwer erfüllbar.

Nachfolgend werden von verschiedenen Produzenten hergestellte Hochtemperaturwickeldrähte und ihre wesentlichen Eigenschaften kurz vorgestellt:

- vonRoll  
SK 650 SamicaFirewall  
Mica-umwickelte Kupfer- oder vernickelte Kupferwickeldrähte für Betriebstemperaturen bis 500 °C (abhängig von der Dicke der Nickelschicht, ohne Vernickelung bis 230 °C), Ø 0,7 mm - 3,5 mm, Durchmesserzuwachs durch die Isolation 0,21 mm
- Karl Schupp AG  
KD500 Wickeldrähte mit Keramikisolation, Dauertemperaturbereich -90 °C bis 500 °C, Ø 0,07 mm - 1,0 mm, Isolationsdicke 5 µm - 20 µm
- Ceramawire  
HT Wire mit Glas-Emaille-Isolation, vernickelte Kupferdrähte (Ø 0,101 mm - 1,02 mm) oder Nickeldrähte (Ø 0,071 mm - 0,51 mm), Dauertemperaturbereich -232 °C – 538 °C, Isolationsdicke 3,8 µm – 7,6 µm
- CGP  
CERAFIL 500 – Kupfer-Nickel-Draht mit Keramikisolation, Temperaturbereich von -90 °C - 500 °C, Ø 0,07 mm - 1,0 mm, Isolationsdicke 5 µm – 20 µm

Als Alternative dazu werden keramische Textilien wie Nextel 440, beschichtete Glasseide-, Glimmer- oder Fiberglasumhüllungen eingesetzt, deren Temperaturbeständigkeit im Einzelfall zu prüfen ist. Dadurch wird jedoch der Kupferfüllfaktor der Spulen erheblich herabgesetzt. Daneben kommen Keramiken als Schlicker für die Isolation und mechanische Fixierung der Spulen zum Einsatz. Abb. 4 zeigt ein Axialmagnetlager mit keramischen Schlicker. Nachteilig bei der Verwendung solcher Keramiken ist, dass der Isolierstoff spröde und hygroskopisch ist und eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Neben den o. g. Wickeldrähten können auch Drähte mit elektrisch isolierenden Oxidschichten eingesetzt werden, die eine hohe Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit aufweisen, wie z. B. ISOTAN.



Abb. 4: Axialmagnetlager mit keramischer Isolation

### Spulenkörper

Bei körperlosen Lackdrahtspulen wird deren Stabilität und Formtreue durch Verbacken mit Backlack gesichert, alternativ erfolgt die Fixierung durch Umwickeln mit Tape. Keramikisolierte Wickeldrähte sind zur Erreichung der Isoliereigenschaften nach der Verarbeitung thermisch auszuhärten oder ggf. zu trocknen. Außerdem ist die Isolierung sehr spröde und vor mechanischen Einflüssen zu schützen. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Spulen auf separate, wärmebeständige Spulenkörper zu wickeln. Diese Vorgehensweise hat mehrere Vorteile, die Spulen

- können einer separaten Wärmebehandlung unterzogen werden,
- sind problemlos einzeln austauschbar,
- werden bei der Aufbringung auf die Pole nicht mechanisch beansprucht und
- sind über die Spulenkörper gegenüber dem Blechpaket sehr gut elektrisch isoliert.

Nachteilig dagegen ist, dass die Spulenkörper mehr Platz beanspruchen und die Wärmeableitung zum Blechpaket stark reduziert ist.

Als Material für die Spulenkörper können Glimmerplatten oder Elektrokeramik eingesetzt werden. Glimmerplatten sind dauer temperaturbeständig bis 500 °C und werden aus Muscovite- oder Phlogopiteglimmer hergestellt. Durch Stanzen können einfach Formteile für die Spulenkörper hergestellt werden. Elek-

trokeramische Spulenkörper können durch Gießen oder Formpressen hergestellt werden, möglich ist auch eine drehtechnische Bearbeitung des Grünteils. Problematisch sind dünne Wandstärken aufgrund der Sprödigkeit des Materials [5]. Auch eine Kombination beider Werkstoffe für die Fertigung der Spulenkörper ist möglich [4].

#### 4 Auswirkungen hoher Temperaturen auf den ML-Designprozesse

Für die Auslegung und Konstruktion von Hochtemperaturmagnetlagern ist, ausgehend von den geforderten Parametern der Lagerung wie bspw. der Tragkraft, die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen. Dabei ist die Funktion des Lagers für Arbeitspunkte bei verschiedenen Temperaturen nachzuweisen, so bspw. bei Raum- und Maximaltemperatur.

Die Tragkraft eines Magnetlagers ist von der Flussdichte und der Eisenfläche abhängig. Gemäß Abb. 2 reduziert sich die Sättigungspolarisation über der Temperatur. Dementsprechend verringert sich auch die zur Auslegung des Magnetlagers zugrunde gelegte Flussdichte. Abb. 5 zeigt den Einfluss der Temperatur auf die Magnetisierung von Elektroblech M250 gemäß der Funktion nach Abb. 2.

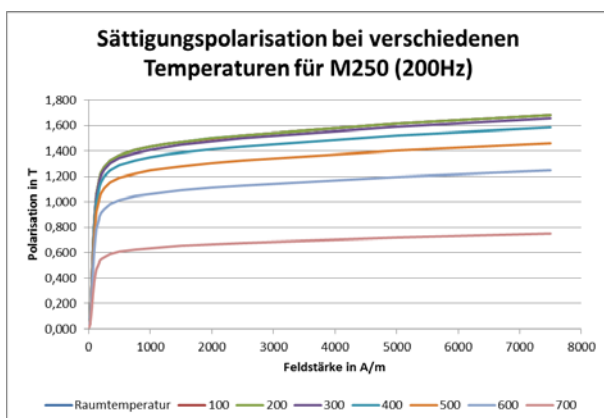


Abb. 5: Einfluss der Temperatur auf die Magnetisierung von Elektroblech M250

Die temperaturbedingte Verringerung der Flussdichte führt unter Beibehaltung der Tragkraft zwangsläufig zu einer Erhöhung der Eisenfläche und somit des Lagervolumens. Alternativ dazu ist die Verwendung von hochpermeablen Kobalt-Eisen-Legierungen.

Die Verwendung von o. a. Hochtemperaturdrähten oder Isolierungen führt ebenfalls zur

Erhöhung des Lagervolumens, da für erstere Spulenkörper verwendet werden und letztere den Kupferfüllfaktor deutlich herabsetzen. Das ist in der Konstruktion der Magnetkreise zu berücksichtigen und der erforderliche Platz dafür vorzusehen. Ebenso sind bei keramisierten Wickeldrähten die geforderten minimalen Biegeradien vom 5- bis 7-fachen des Leiteraußendurchmessers einzuhalten. Abb. 6 zeigt ein Radialmagnetlager mit Keramikisolation und verdeutlicht deren Nachteile:

- Der Isolierstoff ist sehr spröde und wird bei mechanischen Beanspruchungen leicht beschädigt bzw. zerstört.
- Das Volumen der Isolation ist im Vergleich zu Isolationen im kleineren Temperaturbereich wesentlich größer.
- Die Isolation besitzt eine hohe Wärmeisolation.
- Die keramischen Werkstoffe sind meist hygroskopisch und damit ohne zusätzliche Maßnahmen nur in trockener Umgebung einsetzbar.

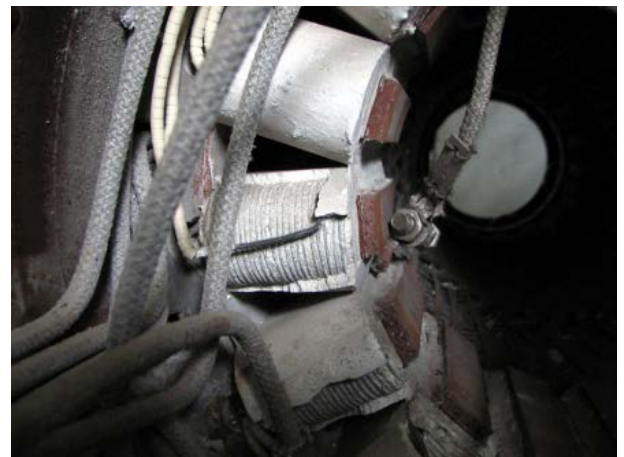
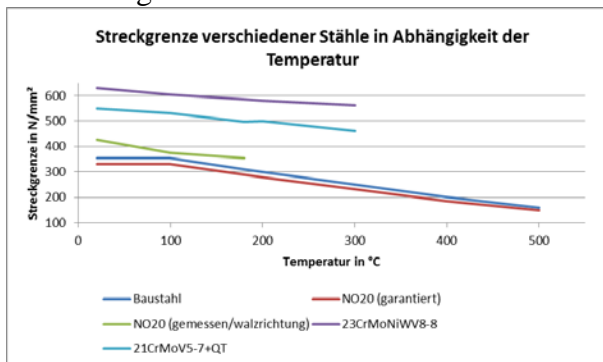


Abb. 6: Hochtemperatur-Radialmagnetlager mit Keramikisolation

Neben der Tragkraft als magnetischer Zug wirken in den Magnetlagern weitere Kräfte, die bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen. So wirken Fügekräfte zwischen Bauteilen, Fliehkräfte infolge der Rotation der Welle und durch thermische Dehnung hervorgerufene Spannungen zwischen Bauteilen unterschiedlicher Temperaturen. Dementsprechend werden die temperaturabhängigen Werkstoffparameter, wie Temperaturexpansionskoeffizienten, Elastizitätsmodul, Streckgrenzen oder Spannungs-Dehnungsverläufe für den Standsicherheitsnachweis für die ein-

gesetzten Materialien über den anvisierten Temperaturbereich benötigt. Abb. 7 zeigt beispielhaft den temperaturabhängigen Verlauf der Streckgrenzen verschiedener Stähle.



**Abb. 7:** Temperaturabhängige Streckgrenzen verschiedener Stähle

Für die Berücksichtigung der Auswirkungen der Temperaturabhängigkeit der Werkstoffparameter ist die zu erwartende radiale und axiale Temperaturverteilung innerhalb der Lagerkomponenten zu bestimmen. Diese ist neben der eingetragenen Prozesswärme von den Verlusten innerhalb der Lager, aber auch von konstruktiven Gegebenheiten der Maschine abhängig. So verringern freie Wellenabschnitte zwischen Prozessraum und Lager den Wärmeeintrag in die Lager erheblich.

Für die Anordnung der Sensor- und Lagerebenen innerhalb der Maschine als auch für die Lageregelung ist die Rotordynamik für den kalten und für den heißen Zustand zu ermitteln. Daneben ist die wärmebedingte Längenausdehnung des Rotors zu berücksichtigen.

In diesem Zusammenhang ist auch die Luftspaltänderung infolge der temperaturbedingten Wärmeausdehnung der Materialien zu beachten. So kann durch den Wärmeeintrag in das Lager der Rotor eine gegenüber dem Stator verschiedene Wärmeausdehnung erfahren, so dass sich der Lagerluftspalt verkleinert. Das bedeutet, dass sich temperaturbedingt die Arbeitspunkte im Lager verändern. Dies muss bei der Reglerauslegung berücksichtigt werden.

Die sich in unmittelbarer Nähe zur Magnetlageraktuatorik befindliche Sensorik zur Lagemesung des Rotors ist den gleichen Umgebungsbedingungen wie die Magnetlager ausgesetzt, daher sind o. g. Ausführungen auch für die Sensoren relevant.

Für den Einsatz von Magnetlagern unter aggressiven Medien, wie bspw. Flüssigkeiten, Gase oder Dämpfe, die herkömmliche Werk-

stoffe bei dauerhaftem Kontakt schädigen (z. B. Säuren oder auch Salzwasser), sind besondere Maßnahmen bezüglich der Trennung der elektrisch aktiven Teile zu treffen. Hierfür bietet sich die Verwendung eines Spaltrohres bspw. aus Hastelloy, einer hochkorrosionsbeständigen, paramagnetische Nickel-Molybdän-Legierung mit einer relativen Permeabilität von max. 1,001 und einem spezifischen elektrischen Widerstand von ca.  $125 \mu\Omega\text{cm}$  an.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von aktiven Magnetlagern an Turbomaschinen in Kraftwerken führt zu erheblichen Wirkungsgradverbesserungen des Aggregates infolge des Wegfalls der Lagerreibung und der Ölschmierung und dem damit verbundenen anlagentechnischen Aufwand. Allerdings entfällt damit auch die Kühlung der Lagerstellen, so dass der anfallende Wärmestrom nicht mehr abgeführt wird. Dieser resultiert einerseits aus dem Lager selbst und andererseits aus dem Prozessraum und wird über die Welle zu den Lagerstellen geleitet. Der funktionsbedingte Luftspalt der Magnetlager wirkt zudem wie eine thermische Isolation. Die in den Lagern anfallende Wärme muss durch geeignete Kühlmaßnahmen abgeführt werden. Die Bereitstellung und Führung der Kühlmedien erfordert einen zusätzlichen technischen und energetischen Aufwand, der die erzielbaren Wirkungsgradverbesserungen beim Einsatz von Magnetlagern erheblich reduziert. Eine Alternative zur Lagerkühlung bietet der Einsatz von temperaturbeständigeren Werkstoffen für die Magnetlager.

Der Beitrag beschreibt die Auswirkungen hoher Einsatztemperaturen auf den Auslegungs- und Designprozess von Magnetlagern. Dabei werden die Auswirkungen hoher Temperaturen allgemein auf die elektrischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften, auf die elektrische Isolation, die thermische Ausdehnung und die chemischen Reaktionen betrachtet. Im Rahmen einer Internet- und Literaturrecherche wurde geprüft, ob die Magnetlagerkühlung für künftige Anwendungen durch den Einsatz anderer, temperaturbeständigerer Werkstoffe für die aktiven Magnetlager entfallen kann. Dazu wurden entsprechende Werkstoffe und Hersteller/Anbieter ermittelt. Dabei

zeigte sich, dass auf diese Weise nur sehr schwer Daten von Werkstoffen für hohe Temperaturen beschaffbar sind, so dass für die Auslegung von Hochtemperaturmagnetlagern Annahmen getroffen werden müssen. Ein weiterer Ausbau der Datenbasis ist somit unabdingbar.

Mit der Verwendung hochtemperaturstabiler Werkstoffe in Magnetlagern geht i. d. R. eine Vergrößerung des Lagervolumens bei gleichbleibender Tragkraft einher. Das liegt einerseits an der temperaturbedingten Verringerung der erreichbaren Flussdichten, andererseits am geringeren Kupferfüllfaktor infolge der mechanisch empfindlichen Hochtemperaturisolation und der daraus resultierenden Verwendung von Spulenkörpern. Mit dem Einsatz hochpermeabler Eisen-Kobalt-Legierungen kann einer Volumenvergrößerung entgegen gewirkt werden.

Die Recherche ergab, dass sowohl Leiter- als auch Isolationswerkstoffe für den anvisierten Temperaturbereich von bis zu 500 °C verfügbar sind. Allerdings gibt es nur punktuell Aussagen zur Langzeitstabilität der elektrischen und magnetischen Eigenschaften sowie zur Korrosionsbeständigkeit und Alterungsvorgängen beim Hochtemperatureinsatz.

Die vorgestellten Ergebnisse sind dahingehend auch als Diskussionsgrundlage zu verstehen und sollen den Erfahrungsaustausch forcieren.

## Quellen

- [1] Enders, K. in „Ein schwebender Rotor im 3.000 Megawatt-Kraftwerk“; Zitat aus <https://www.leag.de/de/blog/artikel/ein-schwebender-rotor-im-3000-megawatt-kraftwerk/>
- [2] Führer, A.; Heidemann, K.; Nerreter, W.: Grundgebiete der Elektrotechnik Band 1: Stationäre Vorgänge, Carl Hanser Verlag München Wien, 1990
- [3] Mierdel, G.: Elektrophysik, Verlag Technik Berlin, 1970
- [4] Burdet, L.: Active Magnetic Bearing Design and Characterization for High Temperature Applications, PhD-Thesis N° 3616 (2006), 06.09.2006

- [5] METOXIT AG: Konstruieren mit Keramik; Quelle: <http://www.metoxit.com/deutsch/downloads/hinweise.pdf>