

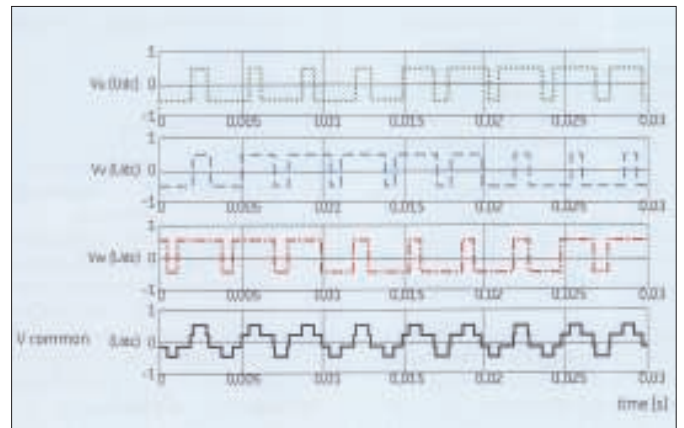
# Stromisolierte Wälzlager: Maßnahme gegen Elektroerosion

Elektroerosion führt zum vorzeitigen Ausfall des Lagers. Verbranntes Fett, kleine, vereinzelt auftretende Krater, Riffelbildung, das sind die typischen Anzeichen von Lagerschäden, hervorgerufen durch Spannungsüberschläge oder Lichtbogenbildung. Das Problem ist keineswegs neu. Doch, mit zunehmendem Einsatz von Frequenzumrichtern, die in modernen Antriebssystemen zur Steuerung von Elektromotoren eingesetzt werden, gewinnt das Thema Stromdurchgang in Wälzlagern immer mehr an Bedeutung.



**Bild 1**

Eine matte, graue Oberfläche der Wälzkörper kann auf Mikrokrater hinweisen



**Bild 2**

Die Summe der drei Phasen ist nicht gleich null, sondern erzeugt eine Gleichtaktspannung

Wann in einer Anwendung Stromdurchgang auftreten kann, welcher Teil des Systems besonders gefährdet ist und wie man eine Anlage wirkungsvoll schützen kann, damit beschäftigt sich eine SKF-interne Forschungsgruppe sehr intensiv und verfügt mittlerweile über Prüf-anlagen, eine umfangreiche Datenbank und eine eigene Software und kann so Lösungen anbieten, die Schäden, hervorgerufen durch Stromdurchgang, ausschließen. Die besonders von Frequenzumrichtern verursachten Lager-

ströme erfordern Maßnahmen, die man schon bei der Auslegung von elektrischen Maschinen berücksichtigen sollte. So ist grundsätzlich auf eine korrekte Verkabelung zu achten. Um den vom Frequenzrichter ausgelösten hochfrequenten Ströme zu begegnen, ist für eine ausreichende Erdung zu sorgen. Die Kupplung hin zur Arbeitsmaschine sollte isoliert sein. Diverse elektrische Filter, Erdung des Rotors und eventuell der Bürsten sind weitere Maßnahmen. Die wichtigste Maßnahme jedoch ist die richtige Auswahl des Lagers, um den Stromdurchgang zu verhindern. Hier bieten sich „In-socoat“-Lager und Hybridlager an, da bei diesen Lagern die isolierende Funktion integraler Bestandteil des Lagers ist.

## Mögliche Ursachen für Lagerströme

Asymmetrischer Magnetfluss im Motor, asymmetrische, nicht geschirmte Verkabelung sowie schnell schaltende Frequenzumrichter sind die wesentlichen Ursachen für Lagerströme. Zunächst sei auf den Stromdurchgang infolge magnetischer Asymmetrie hingewiesen.

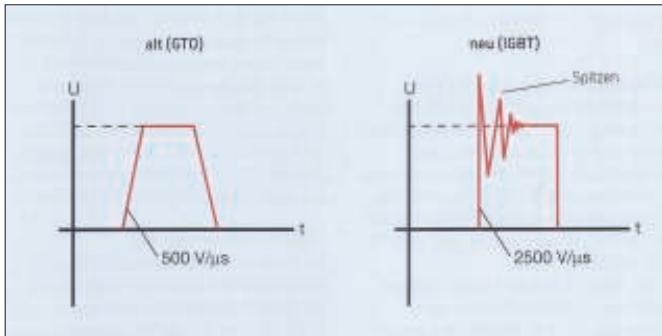
Aufgrund von Grenzen bei der Fertigung ist es nahezu unmöglich, eine perfekte elektromagnetische Symmetrie zu erreichen. Bei einer sinusförmigen Netzspeisung kann deshalb ein Strom im Lager durch Asymmetrien im Magnetfeld des Motors fließen. Die asymmetrische Verteilung des magnetischen Flusses im Motor induziert eine Spannung in der Welle, die bewirkt, dass niederfrequente Ströme (50/60 Hz) durch die Lager fließen. Auch durch unymmetrische, nicht geschirmte Motorverkabelung können schädliche Ströme im Lager entstehen. Deshalb sind Entwurf und Anordnung dieser Verkabelung mit größter Sorgfalt auszuführen.

Diese „klassischen“ Lagerströme treten vor allem in größeren Motoren mit einer geringen Zahl von Polpaaren auf, weil hier stärkere magnetische Asymmetrien auftreten als bei kleinen Motoren mit größerer Polzahl.

Die Verbindung eines Motors oder Generators mit einem Frequenzumrichter führt zu neuen Effekten, da die Spannungen am Drehstromausgang des Frequenzumrichters nicht als Sinuswellen, sondern als Rechteckimpulse auftreten. Dabei ist die Summe der drei Phasen dieser Drehstromspannungen nicht gleich null

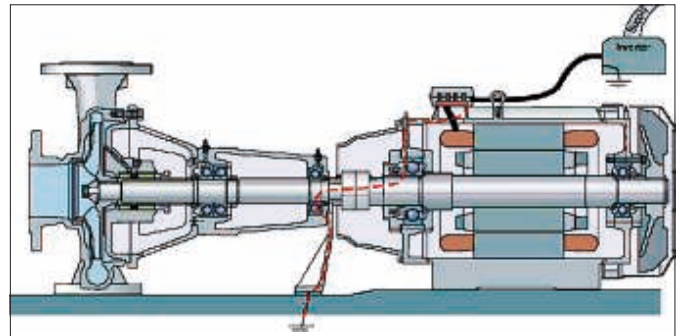
### Autor

Dipl.-Wirt.-Ing. Steffen Hain  
Application Engineering  
Industrial Electrical, Medical  
SKF GmbH  
Gunnar-Wester-Str. 12  
97421 Schweinfurt  
Tel.: 0 97 21/56 24 42  
E-Mail: steffen.hain@skf.com  
www.skf.de



**Bild 3**

Spannungspuls eines IGBT Halbleiterbauteils mit kurzen Schaltzeiten und steilen Pulsflanken im Vergleich zu GTO-Transistoren



**Bild 4**

Hochfrequente Wellenerdungsströme (unterbrochene rote Linie), Pfad des Erdungsstroms durch den Antrieb

(Bild 2), wodurch eine Gleichtaktspannung erzeugt wird.

In den meisten Umrichtern werden als Leistungsschalter sogenannte Bipolartransistoren mit isoliertem Gate (IGBT) verwendet, die eine pulsbreitenmodulierte Ausgangsspannung erzeugen, wodurch der Wirkungsgrad und die dynamische Leistungsfähigkeit der Antriebe verbessert wird. Diese Transistoren arbeiten nicht nur mit hoher Schaltfrequenz, d.h. hoher Pulsrate, sondern auch mit extrem schnellen Spannungswechseln, wodurch sich hohe Impulsflanken ergeben. Die schnell schaltenden IGBT-Halbleiterelemente rufen einen steilen Spannungsanstieg mit extremen Spannungsflanken im Ausgang des Frequenzumrichters (Bild 3) hervor, wodurch sich eine weitere Quelle für Lagerströme mit hochfrequenten Stromspitzen ergibt. Dieser Effekt wird als Gleichtaktstörung bezeichnet und führt zu folgenden beiden Strömen als Ursache für Lagerausfälle:

- hochfrequente Erdungsströme der Welle,
- hochfrequente zirkulierende Ströme (Kreisströme).

Hochfrequente Erdungsströme gehen in ähnlicher Weise auf die Verkabelung zurück. Hier

entsteht jedoch eine induzierte Spannung wesentlich höherer Frequenz in der Schutzterde, bedingt durch die Gleichtaktspannung des Umrichters. Wenn die Impedanz des Rückleitungskabels zu hoch und die Statorerdung unzureichend ist, sucht sich der Strom einen Weg vom Stator über die Lager und die Welle zur Erde und somit zurück zum Umrichter (Bild 4).

Die Gleichtaktstörung ruft eine Stromasymmetrie zwischen den drei Phasen in den Statorwicklungen hervor. Die Summe des Stroms über den Statorumfang ist ungleich null. Eine hochfrequente Flussänderung umgibt die Welle und erzeugt eine hochfrequente Wellenspannung. Es besteht die Gefahr, dass hochfrequente zirkulierende Ströme axial entlang des Rotors, durch ein Lager und zurück durch das andere Lager laufen (Bild 5).

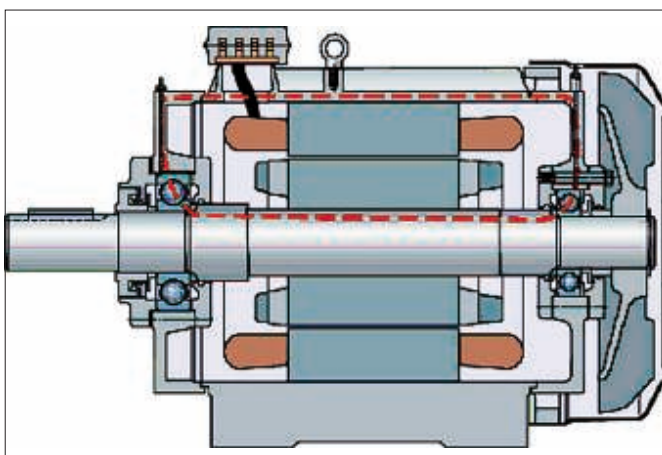
Als dritte bedeutende Ursache für Elektroerosion in Wälzlagern sind kapazitive Ströme zu nennen, die nicht durch die Gleichtaktstörung hervorgerufen werden. In einem normal umlaufenden Wälzlager sind die Wälzkörper von den Laufbahnen durch einen dünnen Schmierfilm getrennt. Dieser Schmierfilm wirkt als Dielektrikum eines Kondensators, das von der Rotorspannung aufgeladen wird. Die Kapazität die-

ses Kondensators hängt von verschiedenen Parametern wie Schmierstoffsorte, Temperatur, Viskosität und auch der Dicke des Schmierfilms ab. Wenn die Spannung einen Schwellenwert – die Durchschlagsspannung des Schmierstoffs – übersteigt, entlädt sich der Kondensator, und ein hochfrequenter kapazitiver Strom entsteht. In diesem Fall wird der Strom von den inneren Streukapazitäten des Motors begrenzt, tritt aber bei jedem Schaltvorgang des Umrichters auf.

Ein Induktionsmotor, der durch einen Frequenzumrichter gesteuert wird, ist also ein sehr komplexes Antriebssystem, auf das viele Parameter einwirken. Der gesamte Antrieb einschließlich Stromversorgung, Gleichstromzwischenkreis, Schaltelementen, Kabel und mechanischer Belastung muss als ein System aus Induktivitäten und Kapazitäten betrachtet werden.

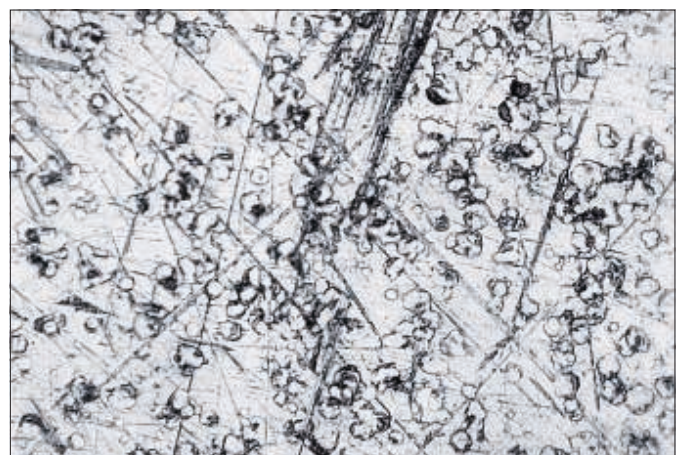
## Folgen von Stromdurchgang für das Lager

Wenn ein elektrischer Strom durch die Kontaktzone von Wälzkörper und Laufbahn fließt, erzeugt die Energie der elektrischen Entladung



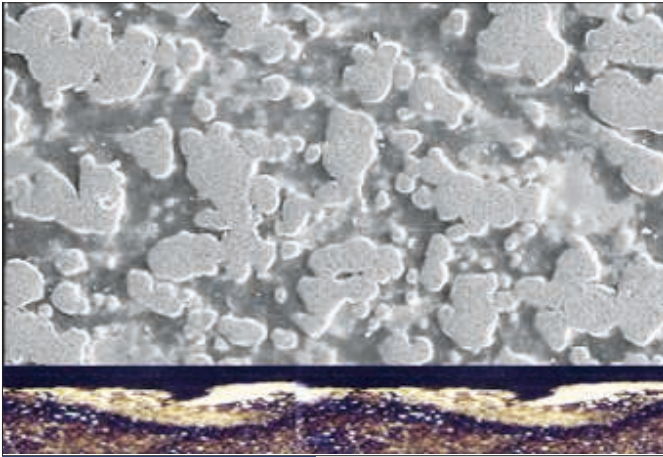
**Bild 5**

Hochfrequente zirkulierende Ströme



**Bild 6**

Typische Kraterbildung, stark vergrößert



**Bild 7**

Kraterlandschaft, wie sie das Mikroskop zeigt



**Bild 8**

Durch Stromdurchgang verursachte Schwarzfärbung des Schmierfetts

Wärme, die ein punktuelles Schmelzen der Oberfläche verursacht, wodurch kleine Krater entstehen können.

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Frequenzumrichtern in modernen, drehzahlvariablen Antrieben sind solche Krater in Mikrometergröße (Bild 6 und 7) die häufigste Schadensform bei Stromdurchgang. Das Schadensbild ist durch Schmelzmarken gekennzeichnet, und man erkennt mit dem bloßen Auge eine matte, graue Oberfläche. Dabei sind die Wälzkörper und Lagerringe mit Mikrokratern übersät, deren Durchmesser in der Regel 5 bis 8  $\mu\text{m}$  betragen. Nur bei starker Vergrößerung unter einem Mikroskop ist die genaue Form der Krater erkennbar, deren Größe unabhängig davon ist, ob die Krater auf dem Innenring, der belasteten Zone des Außenrings oder auf den Wälzkörpern liegen.

Die Riffelbildung, auch als Waschbretteneffekt bezeichnet, zeigt sich als eine Vielzahl von grauen Streifen quer zur Laufbahn (Bild 9). Sie entstehen durch mechanische Schwingun-

gen, wenn die Wälzkörper kleine Krater überrollen. Riffelbildung ist daher kein primär durch den Stromdurchgang verursachter Lagerschaden, sondern tritt erst in Erscheinung, wenn sich im Lager bereits Krater gebildet haben. Es ist vielmehr ein Sekundärschaden, der erst nach einer gewissen Zeit sichtbar wird.

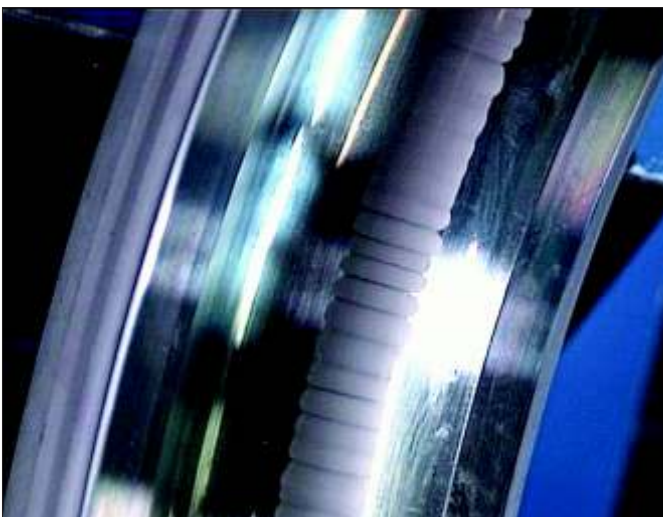
Nicht nur die metallischen Lagerflächen werden bei Stromdurchgang in Mitleidenschaft gezogen, sondern die örtlich auftretenden hohen Temperaturen führen auch dazu, dass der Schmierstoff altert, indem er seine Zusammensetzung verändert und damit an Schmierfähigkeit verliert. Aufgrund hoher Temperaturen reagieren die Additive im Schmierstoff und das Grundöl miteinander, das Grundöl verkohlt oder verbrennt und die Additive zersetzen sich, bis der Schmierstoff schließlich schwarz verfärbt und verhärtet (Bild 8).

Diese schnelle Zersetzung verkürzt die Lebensdauer des Schmierfetts erheblich und kann als ein typischer Schaden bei Stromdurchgang durch das Lager angesehen werden.

## „Insocoat“- und Hybridlager: Lösungen gegen Stromdurchgang in Wälzlagern

„Insocoat“-Lager und Hybridlager sind zwei Lagerlösungen von SKF, mit denen man das Problem der Elektroerosion in den Griff bekommt.

**Insocoat-Lager** (Bild 10) sind Wälzlager mit einer elektrisch isolierenden Keramikbeschichtung, die wahlweise auf die Mantel- und Seitenflächen des Außenrings, oder in die Bohrung und auf die Seitenflächen des Innenrings aufgebracht wird. Die in der Standardausführung nominell 100  $\mu\text{m}$  dicke Aluminiumoxidschicht des Außenrings hält Gleichspannungen von bis zu 1000 V stand. Dabei beträgt der ohmsche Widerstand mindestens 50  $\text{M}\Omega$ . Zusätzlich zur Standardausführung werden für den Außenring Beschichtungsdicken von 200  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$  und für die Innenringbohrung Schichtdicken von 100  $\mu\text{m}$  und 200  $\mu\text{m}$  angeboten. Die



**Bild 9**

Typische Riffelbildung quer zur Laufbahn



**Bild 10**

„Insocoat“-Lager

Isolationsschicht wird im Plasmaspritzverfahren auf die Lagerbauteiloberfläche aufgebracht. Durch entsprechende Vor- und Nachbehandlung entsteht eine Beschichtung von hoher Dichte und Qualität. Die abschließende Versiegelung der Keramikoberflächen gewährleistet einen sicheren und zuverlässigen Einsatz in feuchter Umgebung. Insocoat-Lager werden als einreihige Rillenkugellager und einreihige Zylinderrollenlager in den gebräuchlichsten Größen und Ausführungen vorrätig gehalten. Andere Lagertypen und -größen können auf Anfrage angeboten werden.

Insocoat-Lager verhalten sich unterschiedlich bei Gleich- und Wechselstrom. In Gleichstromanwendungen wirkt Insocoat wie ein ohmscher Widerstand. Die Beschichtung aus Aluminiumoxid ist ein Isolator, und der entscheidende Wert ist ihr Gleichstromwiderstand  $R$ . Die Durchschlagspannung beträgt 1000 VDC, der Widerstand mehr als  $50 \text{ M}\Omega$ , so dass das Lager wirksam isoliert ist.

In Wechselstromanwendungen, insbesondere bei den hohen Frequenzen von pulsweitenmodulierenden Umrichtern, gilt dies nicht. Hier muss das gesamte Insocoat-Lager einschließlich Innen- und Außenring, Wälzkörper, Käfig, Schmierstoff, Kontaktfläche zwischen Wälzkörpern und Laufbahnen und Keramikbeschichtung als „elektrisches Ersatzschaltbild“, bestehend aus parallel und in Reihe geschalteten Widerständen und Kondensatoren, gesehen werden. Dieses gesamte Ersatzschaltbild bestimmt die Wirksamkeit des Lagers gegen kapazitiven Stromdurchgang. Hierbei ist die Impedanz der Keramikschicht von entscheidender Bedeutung. Die Impedanz beschreibt das Strom-Spannungs-Verhältnis in



AC-Stromkreisen. Der Betrag der Impedanz wird maßgeblich durch die Frequenz und die Kapazität der Beschichtung beeinflusst. Die negativen Auswirkungen steigender Frequenzen des Umrichters können nur durch möglichst kleine Kapazitätswerte des Lagers und somit insbesondere der Isolierung aufgehoben werden, um einen wirksamen Schutz vor hochfrequenten elektrischen Strömen zu liefern. Die physikalische Größe der Schicht bestimmt die Kapazität des Lagers. Mit steigender Dicke der Schicht, aber auch mit abnehmender Oberfläche der Beschichtung, werden die Kapazitätswerte des Insocoat-Lagers verringert und somit dessen Wirksamkeit gegen hochfrequente elektrische Ströme verbessert. So erweist sich eine Innenringbeschichtung als doppelt so

wirksam wie eine Außenringbeschichtung bei gleicher Lagergröße und Schichtdicke.

Steigende Frequenzen und Leistungen der Frequenzumrichter bedeuten ein erhöhtes Risiko durch kapazitive Ströme. Dem kann nur mit geringeren Kapazitätswerten des Lagers entgegengewirkt werden. Dies kann durch erhöhte Schichtdicken oder kleinere Schichtoberflächen erreicht werden.

**Hybridlager** (Bild 11) sorgen für wirksamen Schutz gegen Lagerschäden durch Elektroerosion, sowohl bei Gleichspannung als auch Wechselspannung. Hybridlager haben einen extrem niedrigen Kapazitätswert dank des großen isolierenden Anteils – der keramischen Wälzkörper.

Deshalb ist auch bei hohen Frequenzen die Impedanz des Lagers hoch, was einen optimalen Schutz gegen hochfrequente kapazitive Ströme ergibt. Hybridlager haben Ringe aus Wälzlagerstahl und Wälzkörper aus einem wälzlagergeeigneten Siliziumnitrid. Siliziumnitrid hat einen extrem hohen spezifischen Widerstand und wirkt deshalb als Isolator.

Neben den herausragenden Eigenschaften als Schutz vor Elektroerosion bieten Hybridlager eine Reihe zusätzlicher Vorteile. Aufgrund des geringen spezifischen Gewichts und somit der geringeren Masse der Wälzkörper gegenüber Stahlkugeln eignet sich das Hybridlager auch besonders für den Einsatz in Anwendungen mit hohen Drehzahlen und Beschleunigungen. Weitere Vorteile sind die geringe Reibung, ein höheres E-Modul und der niedrigere, thermische Ausdehnungskoeffizient. Sie sind unempfindlicher gegenüber Mangelschmierungszuständen und Start-/Stopvorgängen und bewirken eine Vervielfachung von Fettgebrauchsdauern bzw. Schmierfristen.