

LAGERSTRÖME

M. R. Rezaei

1 EINLEITUNG

Stromfluss durch Lager kann bei Maschinen mit Wälz- und Gleitlagern zu Schäden bis hin zum totalen Ausfall führen.

Im Netzbetrieb geht die Gefährdung ausschließlich von Wellenspannungen aus. Man versteht hierunter Spannungen, welche in einer Leiterschleife induziert werden, die aus der Welle, den beiden Lagern, den Lagerschilden sowie dem Gehäuse bzw. Grundrahmen besteht. Physikalische Ursache der Wellenspannungen sind magnetische Teilflüsse innerhalb der Maschine, die sich aufgrund von Unsymmetrien des magnetischen Kreises nicht zu null ergänzen und deshalb die Ausbildung eines magnetischen Ringflusses verursachen.

Bei Speisung eines Motors aus einem Umrichter mit eingepprägtem Gleichstrom im Zwischenkreis (sog. I-Umrichter) sind die Stromharmonischen an der Bildung der magnetischen Felder in der Maschine und somit an der Erzeugung der Wellenspannung beteiligt. Bei Speisung aus dem Pulswechselrichter entsteht eine zweite Art der elektrischen Lagerbeanspruchung, nämlich eine kapazitiv eingekoppelte Lagerspannung. Die physikalische Ursache dieser Art der Lagerspannung sind die steilen Spannungsflanken am Wechselrichterausgang, die durch die schnellen Schaltvorgänge erzeugt werden sowie das Steuerverfahren des Pulswechselrichters, das im direkten Zusammenhang mit der Gleichtaktspannung (common mode voltage) steht. Diese Gleichtaktspannung enthält eine Komponente mit der Schaltfrequenz des Umrichters und außerdem Anteile mit dreifacher Netz- und dreifacher Ausgangsfrequenz. Bei Frequenzen oberhalb von 1 kHz spielen die Kapazitäten zwischen den verschiedenen Maschinenteilen die entscheidende Rolle.

Im Folgenden werden die Lagerströme, ihre Ursachen sowie Schutzmaßnahmen gegen Lagerschäden untersucht und diskutiert.

2 WELLENSPANNUNGEN

Die Ursachen der klassischen Wellenspannungen liegen darin, dass im magnetischen Kreis der Maschinen Unsymmetrien bzw. Inhomogenitäten auftreten. Dadurch entstehen magnetische Teilflüsse, die die Welle so durchfließen, dass eine Spannung im elektrischen Stromkreis „Welle-Lager-Lagerschilde-Gehäuse“ induziert wird.

Es können drei Ursachen für diese klassischen Wellenspannungen genannt werden:

- 1) Flussunsymmetrie (**Bild 1**)
- 2) Ringerregung
- 3) Das Ringintegral der magnetischen Feldstärke aufgrund der magnetischen Inhomogenitäten des Statorjoches

Zu 1)

Unsymmetrien im magnetischen Kreis haben ihre Ursache in:

- nicht symmetrischem Luftspalt , exzentrisch gelagerter Welle
- Teilfugen im Statorblechpaket
- Anisotropie der magnetischen Eigenschaften der Blechpakete infolge unterschiedlicher magnetischer Eigenschaften in Walzrichtung und senkrecht dazu
- Kühlkanäle im Magnetkreis
- Pressbolzen im Blechpaket
- Lüftungslöcher im Blechpaket
- Nuten
- Verformung der Ständerbohrung durch Radialkräfte im Luftspalt

In **Bild 1** sind die aus den Unsymmetrien im magnetischen Kreis resultierenden magnetischen Teilflüsse und die Strombahn dargestellt:

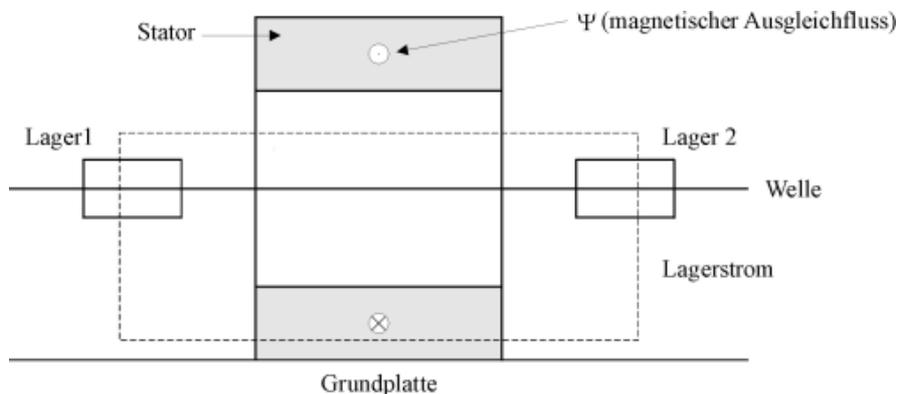


Bild 1: Erzeugung der Wellenspannung durch Unsymmetrie des magnetischen Feldes

Zu 2)

Ringerregung kann auftreten, wenn z. B. im Bereich der Wickelköpfe in den Verbindungen zwischen den Spulen ein Stromkreis entsteht, der die Welle als Koaxialspule (**Bild 2**) umschlingt. Infolge zeitlicher Änderungen des Stroms in der genannten Strombahn, die als Primärspule eines Transformators wirkt, wird in der Sekundärspule, dem Stromkreis „Welle-Lager-Lagerschilde-Gehäuse“ eine Spannung induziert, die den Lagerstrom treiben kann.

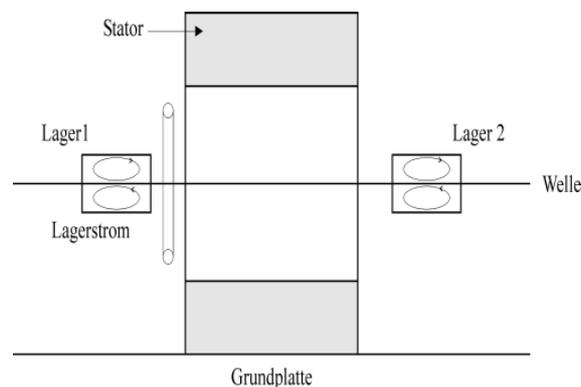


Bild 2: Ringerregung

Der von der Ringerregung erzeugte magnetische Fluss fließt durch die Welle in axialer Richtung. Im Bereich der Lager jedoch ist er ein radialer Fluss. In diesem Fall dreht sich die Welle und ist selbst magnetisch. In der Welle wird eine Unipolarspannung (konstante oder pulsierende Gleichspannung) induziert, die sich vom Punkt A in **Bild 3** zum Punkt B von null zu einem Maximalwert aufbaut. Diese Spannung treibt einen Strom, der nur im Lagerbereich und dabei durch die Welle fließt.

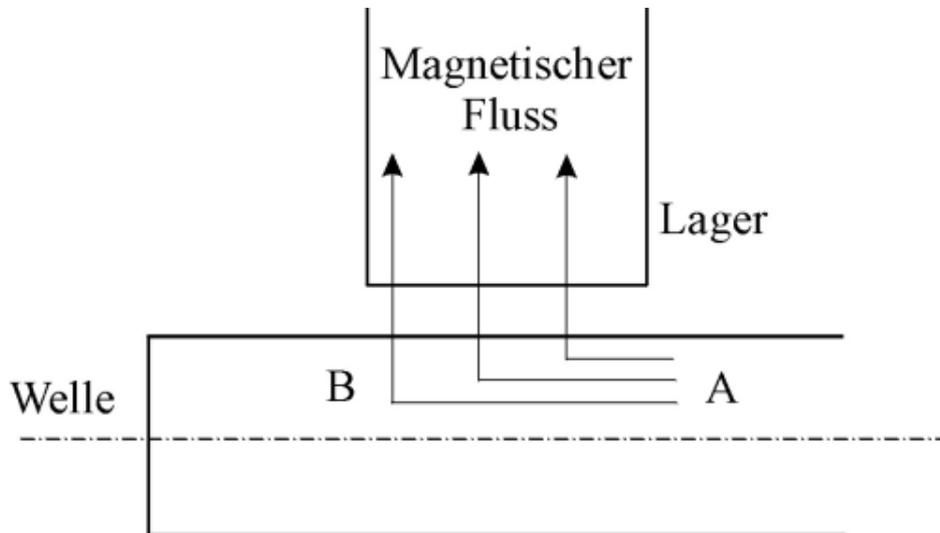


Bild 3: Entstehung der Unipolarspannung im Lager

Zu 3)

Die Wellenspannungen können auch aufgrund der magnetischen Inhomogenitäten des Statorjoches auftreten. Die im Luftspalt radial verlaufenden Felder schließen sich in den Jochen von Ständer und Läufer in tangentialer Richtung. Die Flussdichtevektoren im Joch wechseln ihr Vorzeichen von Pol zu Pol. Deshalb ist das Ringintegral der magnetischen Jochfeldstärke über den Maschinenumfang für die betrachtete Feldwelle bei homogenem Jochaufbau gleich null. Bei nichtlinearer Blechkennlinie können insbesondere hochpolige Felder zu einem von null verschiedenen Ringintegral führen.

Der Jochaufbau einer elektrischen Maschine enthält außerdem häufig Störstellen. Bei Maschinen mit sehr großen Durchmessern muss das Ständerblechpaket aus technologischen Gründen zwei- oder dreiteilig ausgeführt werden. Dann sind kleine Luftspalte in den Teilungsfugen unvermeidbar.

Wenn bei einem geteilten Blechpaket die Trennfugen um ein geradzahliges Vielfaches der Polteilung auseinander liegen, so addieren sich die magnetischen Spannungen in den Trennfugen algebraisch. Das Ringintegral der Jochfeldstärke über den Umfang ist nicht mehr null. Wenn bei einem isolierten Lager das Ringintegral der Jochfeldstärke über den Umfang nicht null ist, so muss sich den Jochfeldern, welche sich über den Luftspalt schließen, ein Ausgleichs-Ringfluss im Joch überlagern, der die Wellenspannung induziert.

3 LAGERSTRÖME INFOLGE VON STROMRICHTER-SPEISUNG

Um einen drehzahlvariablen Betrieb zu ermöglichen, werden die elektrischen Maschinen über Umrichter mit teilweise hoher Taktfrequenz gespeist.

Ein typischer Stromrichter mit Gleichspannungszwischenkreis (U-Umrichter) besteht aus:

- Gleichrichter
- Zwischenkreis mit konstanter Spannung
- Wechselrichter

Aus der konstanten Zwischenkreisspannung wird ein dreiphasiges Spannungssystem erzeugt, welches in Frequenz und Amplitude einstellbar ist.

Die Speisung mit hoher Taktfrequenz ermöglicht nahezu sinusförmige Maschinenströme, eine Minimierung der Zusatzverluste in den Wicklungssträngen sowie eine Reduzierung der zusätzlichen magnetischen Geräusche und Drehmomentschwankungen. Typische Werte für die Taktfrequenz liegen im Bereich von 6 bis 20 kHz. Die Taktfrequenz ist abhängig von der abgegebenen Leistung des Umrichters und den Maschineninduktivitäten.

Die Zwischenkreisspannung hat keinen festen Bezug zum Erdpotential. Infolge der Pulsung tritt zwischen dem Erdpotential und den Motorsträngen eine Spannung auf, die der halben Zwischenkreisspannung ($\pm U_d/2$) entspricht. Diese Spannung tritt in allen drei Strängen „gleichphasig“ auf, daher wird sie als Gleichtaktspannung (common mode voltage) bezeichnet. **Bild 4** zeigt die entsprechende Schaltung.

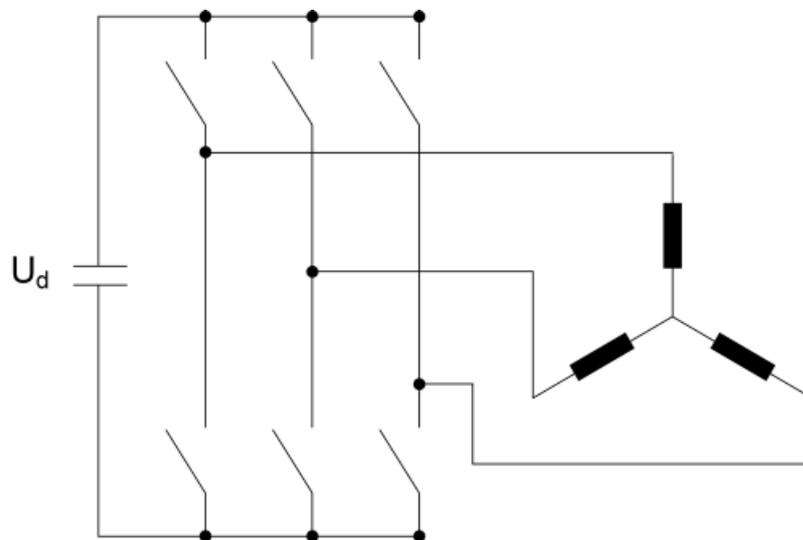


Bild 4: Schematische Wechselrichtertopologie

Aufgrund der kurzen Schaltzeiten wird eine hohe Änderung du/dt der Spannung bis zu $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$ erreicht. Bei diesen Spannungssteilheiten können die Kapazitäten der Wicklung gegen das geerdete Ständerpaket (C_{WG}), Wicklung gegen Rotorpaket (C_{WR}) und Ständer gegen Läufer (C_{RG}) nicht vernachlässigt werden.

Dominant ist die Kapazität zwischen Ständerwicklung und Gehäuse, die im nF-Bereich liegt. Die anderen Kapazitäten sind wesentlich kleiner. **Bild 5** zeigt diese Kapazitäten schematisch.

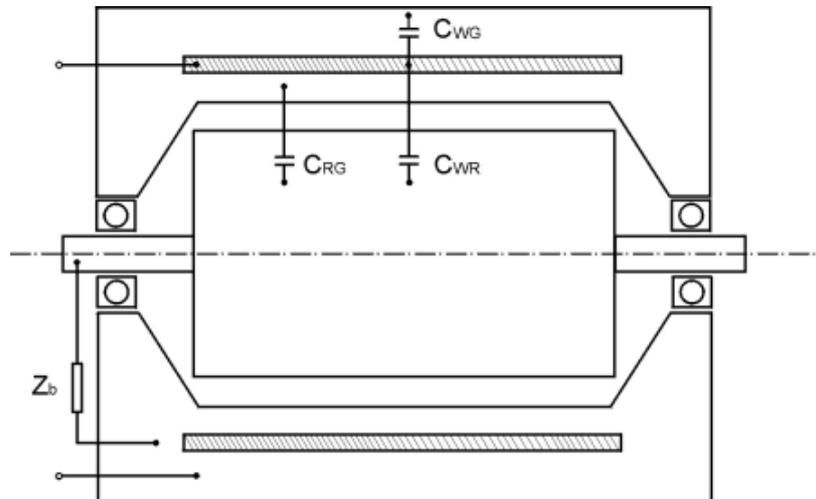


Bild 5: Kapazitäten (schematisch)

C_{WG} : Kapazität zwischen Statorwicklung und Erde,
 C_{WR} : Kapazität zwischen Statorwicklung und Rotor,
 C_{RG} : Kapazität zwischen Rotor und Erde, Z_b : Nichtlineare Lagerimpedanz

In **Bild 5** stellt Z_b die nichtlineare Lagerimpedanz eines Lagers dar. Sie kann schematisch gemäß **Bild 6** (hier z. B. für ein Wälzlager) als eine Serienschaltung eines ohmschen Widerstandes und einer Kapazität, die am Schmierfilm auftritt, aufgefasst werden.

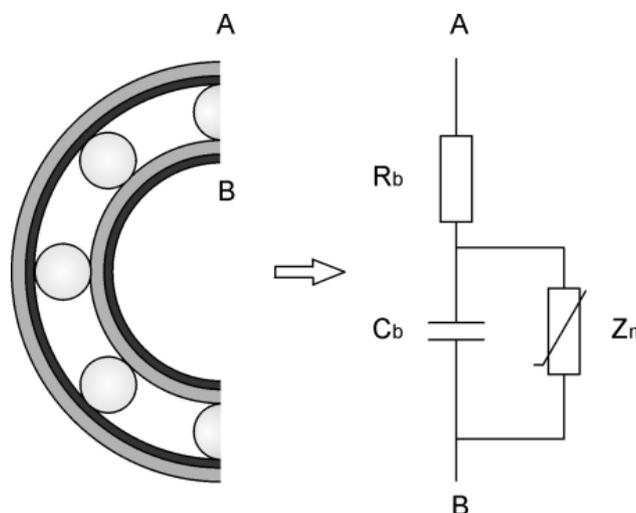


Bild 6: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Wälzlagers
 R_b : Ohmscher Lagerwiderstand, C_b : Kapazität des Lagers
 Z_n : Nichtlineare Impedanz

Z_n beschreibt das Verhalten des Schmierfilms. Die Kapazität C_b ist groß, wenn kein Lagerstrom fließt, und klein, wenn Lagerstrom auftritt. Die Ströme durch die Kapazitäten bestimmen sich aus:

$$i(t) = C \frac{dU}{dt}$$

Der Schmierfilm des Lagers ist ebenfalls von der Drehzahl abhängig. Bei kleinen Drehzahlen kann praktisch ein mechanischer Kontakt des Lagers vorhanden sein, wogegen sich bei höheren Drehzahlen ein hydrodynamischer Schmierfilm ausbildet. **Bild 7** zeigt das allgemeine Ersatzschaltbild eines Motors bei Gleichtaktspannung.

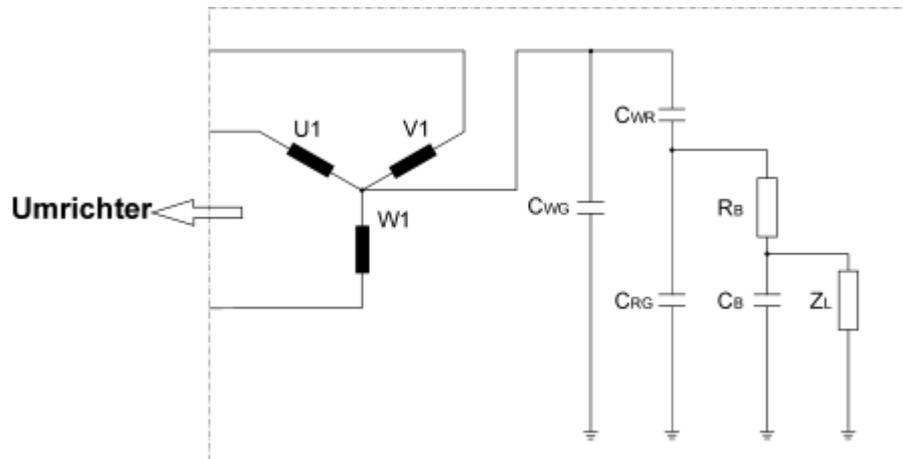


Bild 7: Modell des Motors für die Gleichtaktspannung

Die Frequenz der kapazitiven Ströme ist mit der Schaltfrequenz gekoppelt, wobei wegen möglicher Resonanzen zwischen verteilten Induktivitäten und Kapazitäten der Maschine höhere Frequenzen auftreten können. Hier muss beachtet werden, dass die physikalische Natur der Ströme sehr viel komplizierter als eine einfache Gleichung ist, wie sie durch das ESB beschrieben wird. Aufgrund der entstehenden Kapazitäten fließen nicht nur kapazitive Ladeströme und Entladeströme, sondern auch ein Motor-Erdstrom sowie kapazitive Rotor-Erdströme.

3.1 Kapazitive Ladeströme

Aufgrund der Größenordnung der Lagerkapazitäten ergeben sich kapazitive Ladeströme des Schmierfilms im Milliampere-Bereich.

3.2 Entladeströme im Schmierfilm

Beide Lager bilden eine Kapazität (in **Bild 7** zu $C_B = 2C_b$ zusammengefasst), die über den Spannungsteiler $(C_{WR} + C_{RG}) // C_B$ von der Gleichtaktspannung (Mittelpunktspannung) mit der Schaltfrequenz geladen wird. Ist die Durchbruchspannung erreicht, so entlädt sich die Kapazität über den Schmierfilm mit einem Stromimpuls.

3.3 Motor-Erdstrom

Über die Kapazität C_{WG} wird ein Strom von der Statorwicklung zum Gehäuse getrieben. Da die Gleichtaktspannung an allen Motorsträngen gleichphasig und gleichzeitig anliegt, ist dieser Strom in allen Wicklungen gleichphasig vorhanden. Je nach Maschinengröße können diese Ströme die Größenordnung von 1 bis 10 A erreichen.

3.4 Rotor-Erdstrom

Die Erdungsbedingungen können die Lagerströme beeinflussen. Dass die Erdungsimpedanz des Läufers Z_{rg} nicht mit der Erdungsimpedanz des Gehäuses Z_{hg} identisch ist, zeigt **Bild 8**.

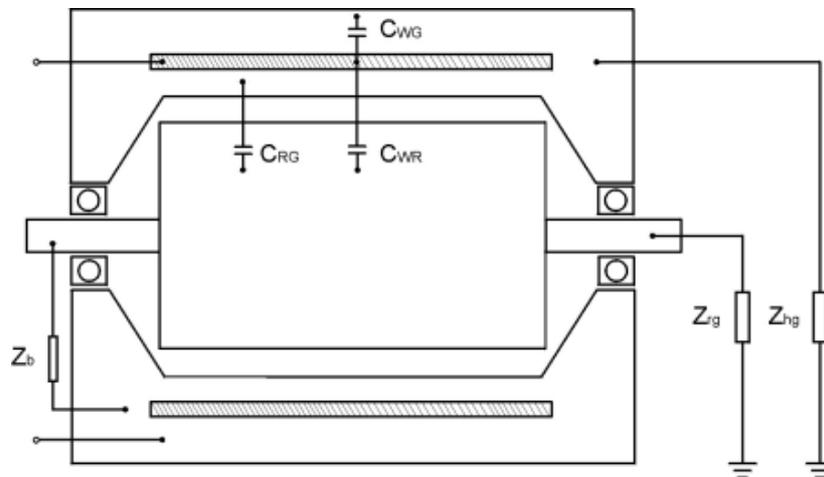


Bild 8: Maschinenmodell mit Erdungsimpedanzen

Ist aufgrund langer Erdleitungen die Gehäuse-Erdungsimpedanz deutlich höher als die Erdungsimpedanz des Läufers, wird der Erdstrom bevorzugt über Z_{rg} fließen.

Da die Lager nun direkt im Strompfad liegen, werden sie bei symmetrischer Aufteilung mit ungefähr halbem Motor-Erdstrom belastet. Dadurch können die Lager beschädigt werden.

1 MAßNAHMEN GEGEN LAGERSTRÖME

Die Lagerströme können, wie oben ausgeführt, aufgrund magnetischer oder elektrischer Ursachen auftreten, wobei eine Trennung dieser beiden Ursachen nicht immer möglich ist.

Die Beurteilung der Gefährdung von Lagern durch Ströme ist dabei von der sogenannten scheinbaren Lagerstromdichte abhängig. Durch die elastische Verformung der Wälzkörper an den Lagerringen ergibt sich rechnerisch eine Fläche zwischen den Kontaktpartnern als Bezugsquerschnitt für den Stromdurchtritt (Bezugsfläche für die Berechnung der Stromdichte). Allgemein werden Stromdichten unter 0,3 A/mm als sicher und unkritisch eingestuft, während Werte über 0,7 A/mm als kritisch gelten.

Gegen die Lagerströme können verschiedene Maßnahmen an der Maschine, im Wechselrichter oder im System getroffen werden. Die folgenden Maßnahmen haben sich bewährt, wobei eine Kombination einzelner Maßnahmen zweckmäßig sein kann:

- Isolierung eines Lagers
- Keramische Lager
- Überbrückung der Lager mit Schleifkontakt
- Leitfähiges Wälzlagerfett (gute Leitfähigkeit reduziert das Auftreten der Spannungsdurchschläge, wobei die Lebensdauer des Fettes allerdings begrenzt ist)
- Isolierte Kupplung
- Nutschrägung
- Filter am Wechselrichterausgang
- Änderung des Pulsmusters

2 ZUSAMMENFASSUNG

Durch Stromfluss können die Lager einer elektrischen Maschine beschädigt werden. Die Gründe für die Entstehung solcher Ströme können induzierte Wellenspannungen oder kapazitive Lagerströme aufgrund der Anwendung eines Pulsumrichters sein. Die Lagerströme, die durch Wellenspannungen entstehen, schließen sich im elektrischen Stromkreis „Welle-Lager-Lagerschilde-Gehäuse“, d. h. es entsteht ein Zirkularstrom durch beide Lager. Die kapazitiven Lagerströme infolge der Anwendung eines Pulsumrichters fließen nur durch ein Lager über den Erdungskreis und zurück zum Umrichter. Maßgeblich für die Beurteilung der Gefährdung von Lagern ist die Lagerstromdichte. Die Lagerströme können durch die aufgezeigten Maßnahmen verhindert oder zumindest reduziert werden.

LITERATUR

- [1] Budig, P.-K.: *Stromrichtergespeiste Synchronmaschine*, VDE Verlag GmbH, Berlin
- [2] Binder, A.; Schrepfer, A.: *Lagerströme bei umrichtergespeisten Drehstrommotoren*, Antriebstechnik 38 (1999) H. 3, S. 46-48
- [3] Hausberg, V.; Seinsch, H. O.: *Wellenspannung und zirkulierende Lagerströme bei umrichtergespeisten Induktionsmaschinen*, Electrical Engineering 82 (2000) 313-326, Springer Verlag, 2000
- [4] Hausberg, V.; Seinsch, H. O.: *Schutzmaßnahmen gegen Lagerschäden umrichter-gespeicher Motoren*, Electrical Engineering 82 (2000) 339-345, Springer Verlag 2000
- [5] Tareilus, G. H.: *Der Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter im Umfeld schalt-verlustreduzierter IGBT-Pulswechselrichter*, Dissertation, TU Braunschweig, 2002