

Lagerströme

Die fünf wichtigsten Punkte

1. Lagerströme entstehen durch den Einsatz von Frequenzumrichtern (FU) bei elektrischen Antriebssystemen und können zu einem frühzeitigen Defekt der Lager führen.
2. Lagerströme und präventive Massnahmen müssen bereits bei der Planung von Antriebssystemen mit einem FU berücksichtigt werden.
3. Es gibt drei Lagerstromarten:
 - Entladungs-Lagerströme
 - Zirkulierende Lagerströme
 - Rotorerdströme
4. Mögliche Massnahmen zur Vermeidung von Lagerströmen:
 - Allgemein: gute, hochfrequente Erdung sicherstellen
 - Symmetrische, abgeschirmte Motorkabel (dreiphasig) verhindern Rotorerdströme.
 - Einsatz spezieller Lager (Hybrid-, Keramik- und isolierte Lager)
 - Einsatz von Wellenerdungsbürsten, Gleichtaktdrossel oder Filter
5. Lagerströme können indirekt erfasst werden, eine direkte Messung ist aber nicht möglich.

Hintergrund

Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern (FU) kann der Energieverbrauch von elektrischen Antriebssystemen in vielen Fällen vermindert werden. FU werden deshalb heute in Antriebssystemen mit wechselnder Last häufiger eingesetzt. Allerdings können durch den Einsatz von FU unerwünschte Lagerströme in den elektrischen Motoren entstehen, welche zu Lagerschäden und vorzeitigen Ausfällen führen können.

Einleitung

Dass Lagerströme in elektrischen Motoren zu vorzeitigen Ausfällen führen können, ist bereits sehr lange bekannt. Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Kategorien von Lagerströmen:

1. Lagerströme, die durch asymmetrische Magnetfelder des Motors entstehen.
2. Lagerströme, die durch die vom Motor angetriebene Last (z.B. durch elektrostatische Aufladung der angetriebenen Maschine) entstehen.
3. Lagerströme, die durch den Einsatz von Frequenzumrichtern entstehen.

Die ersten beiden Kategorien sind schon sehr gut untersucht worden und es gibt verschiedene Massnahmen, um diese Lagerströme zu verhindern. In diesem Merkblatt werden daher nur Lagerströme behandelt, welche durch den Einsatz von Frequenzumrichtern mit Spannungszwischenkreis entstehen.

Schäden durch Lagerströme

Ursache für Lagerströme ist bei einem elektrischen Motor immer eine über dem Rotorlager angelegte elektrische Spannung. Elektrisch gesehen verhält sich das Lager im normalen Betrieb des Motors wie eine Kapazi-

Grundlagen

tät; der Schmierfilm bildet dabei das Dielektrikum. Wenn die Lagerspannung einen bestimmten Schwellwert übersteigt, kommt es im Lager zu einem elektrischen Durchschlag und es können infolgedessen lokal sehr hohe Ströme durch das Lager fließen.

Ist die Stromdichte (Stromstärke pro Flächeneinheit) gross genug, kann Metall im Lagerring geschmolzen oder gar verdampft werden. Es entstehen unzählige kleine Krater. Nach einiger Zeit zeigt sich im Lagerring eine typische graue Spur oder gar Riffel. Auch das Schmiermittel kann durch die Lagerströme beeinträchtigt werden. Beides kann zu einem frühzeitigen Ausfall der Lager führen.



Abbildung 1: Die beiden typischen Schadensbilder durch Lagerströme; links: graue Spur, rechts: Riffelbildung.

Gleichtaktspannung

Das Entstehen von Frequenzumrichter-bedingten Lagerströmen ist immer auf die Gleichtaktspannung zurückzuführen.

Beim Netzbetrieb ist die Summe der drei Phasenspannungen am Motor immer Null. Bei einem herkömmlichen Frequenzumrichter trifft dies jedoch nicht mehr zu, da in einem Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis nur diskrete Spannungen und Schaltzustände zur Verfügung stehen. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Gleichtaktspannung eines zweistufigen Frequenzumrichters über eine Netzperiode.

Diese Gleichtaktspannung liegt über den parasitären Kapazitäten des Motors an und ist die Quelle der Lagerströme. Sowohl die Höhe der Gleichtaktspannung als auch die Steilheit der Spannungsänderung kann dabei einen Einfluss auf die Lagerströme haben.

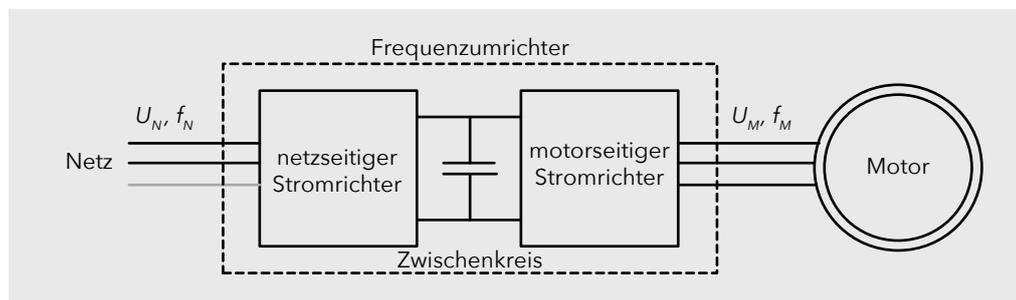


Abbildung 2: Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis und Motor (Merkblatt 25) mit den Phasenspannungen.

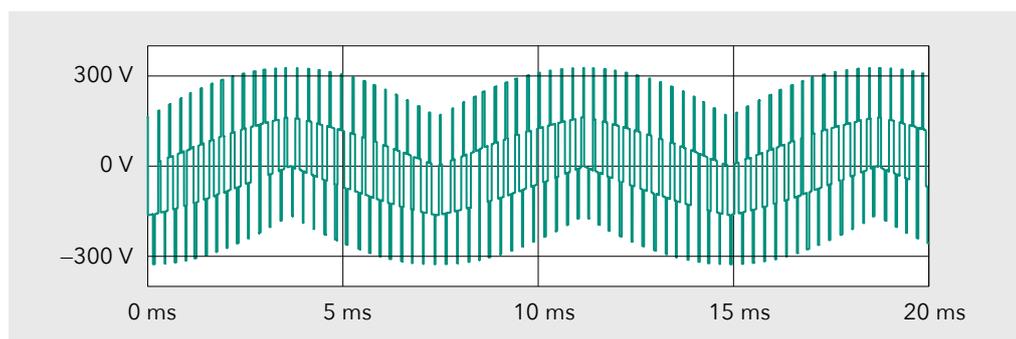


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Gleichtaktspannung über eine Netzperiode.

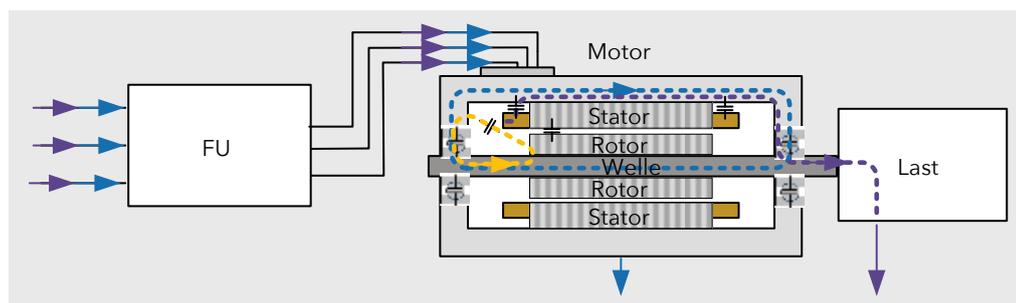


Abbildung 4: Pfade der Lagerströme. Gelb: Entladungs-Lagerströme. Blau: Zirkulierende Lagerströme. Violett: Rotorerdströme.

Frequenzumrichter bedingte Lagerströme

Die durch die Gleichtaktspannung erzeugten Lagerströme lassen sich in verschiedene Arten unterteilen (Abbildung 4). Diese Unterteilung ist wichtig, weil die Gegenmassnahmen für jede Art verschieden sind. Problematisch können folgende drei Lagerstromarten sein:

- Entladungs-Lagerströme (gelb)
- Zirkulierende Lagerströme (blau)
- Rotorerdströme (violett)

Entladungs-Lagerströme

Die Gleichtaktspannung wird über verschiedene Kapazitäten zur Erde geleitet. Entsprechend dem Spannungsteiler fällt auch ein Teil der Gleichtaktspannung über dem Lager ab. Die Lagerspannung entspricht für gängige Motoren circa 5% der Gleichtaktspannung und wird somit durch die Höhe der Gegentaktspannung bestimmt. Bei einem elektrischen Durchschlag im Lager wird die in den parasitären Kapazitäten gespeicherte Energie im Lager umgesetzt. Die Stromstärke der Entladungsströme hängt häufig nicht von der Motorengrösse ab. Da aber kleine Motoren kleinere Lager haben, ist die Stromdichte und damit die Schädlichkeit der Entladungs-Lagerströme bei kleinen Motoren meist deutlich gesteigert.

Zirkulierende Lagerströme

Durch die Frequenzumrichter-Speisung entsteht um die Welle ein zirkulärer magnetischer Fluss, welcher sich hochfrequent ändert. Dies führt zu einer Spannung zwischen den Wellenenden, und es bilden sich über den beiden Lagern gegengleiche Spannungen aus. Bei einem gegebenen Antrieb wird somit die Stärke der Lagerströme durch die Steilheit der Spannungsänderung bestimmt. Bei kleinen Motoren sind im Normalfall die Wellen so kurz, dass diese Lagerspannungen genug klein sind und keine schädlichen Lagerströme auftreten.

Rotorerdströme

Wird das Gehäuse des Motors schlecht geerdet, entsteht eine zusätzliche Gefährdung. Wenn die Erdungsimpedanz über die Welle und die Arbeitsmaschine deutlich kleiner ist als über die Gehäuse-Erdung, fliesst ein Teil des Gleichtaktstromes als Rotorerdstrom vom Gehäuse über den Weg «Motorlager – Kopplung – Lager der Last» ab und schädigt dabei die Lager. Dieser Lagerstromtyp kann bei Motoren jeglicher Grösse auftreten. Bei einem gegebenen Antrieb wird die Stärke der Lagerströme durch die Steilheit der Spannungsänderung bestimmt.

Grob verallgemeinert können die obigen Aussagen wie folgend zusammengefasst werden:

- **Entladungsströme** können zwar bei allen Motorgrössen auftreten. Schädlich sind sie aber hauptsächlich bei kleinen bis mittleren Motoren (bis circa 75 kW).
- **Zirkulierende Lagerströme** treten hauptsächlich bei mittleren bis grossen Motoren (ab ca. 10 kW) auf.
- **Rotorerdströme** können immer dann auftreten, wenn der Rotor über die Last geerdet ist und gleichzeitig das Gehäuse des Motors schlecht geerdet ist. Bei Verwendung von geschirmten Kabeln mit gutem Anschluss auf Frequenzumrichter- und Motorseite ist nicht mit Rotorerdströmen zu rechnen.

Messung

Ob Lagerströme auftreten, welche Lagerstromart auftritt, und ob die Lagerströme schädlich sind, hängt von sehr vielen Faktoren ab. Daher ist es teilweise unumgänglich, vor Ort zu messen, ob Lagerströme vorhanden sind. Direkt messen lassen sich Lagerströme nicht, indirekt können sie aber auf verschiedene Arten erfasst werden.

Vibrationsmessung

Häufig sind Vibrationen und Geräusche die ersten Hinweise darauf, dass schädliche Lagerströme auftreten. Durch Vibrationssensoren und ausgeklügelte Auswertungen lassen sich Lagerschäden zwar verhältnismässig frühzeitig erkennen. Jedoch werden auf diese Weise Lagerströme erst entdeckt, wenn bereits ein Schaden besteht.

Messung der Spannung zwischen Welle und Gehäuse

Die Spannung zwischen Welle und Gehäuse entspricht der Spannung über dem Lager. Mittels Bürsten lässt sich diese Spannung messen und bietet eine gute Möglichkeit, um Lagerströme zu detektieren. Der Verlauf der Spannung über dem Lager entspricht dabei ohne Lagerströme dem Verlauf der Gleichtaktspannung, wobei für gängige Motoren die Lagerspannung circa 20-mal kleiner als die Gleichtaktspannung ist.

Treten Entladungs-Lagerströme auf, bricht die Lagerspannung einige Zeit nach der Spannungsänderung ein. Ein plötzlicher Einbruch der Lagerspannung deutet somit auf Entladungs-Lagerströme hin (Abbildung 5).

Bei zirkulierenden Lagerströmen und Rotorerdströmen tritt der elektrische Durchschlag im Lager direkt beim Schaltvorgang auf. Die Lagerspannung fällt aber nicht auf Null zurück, da auch nach dem Durchschlag weiterhin ein Strom durch das Lager beziehungsweise im Motor zirkuliert. Die hohe Spannung vor dem Durchschlag liegt nur verhältnismässig kurz an. Daher kann es sein, dass je nach Oszilloskop-Einstellung trotz Lagerströmen die Lagerspannung scheinbar nur kleine Werte annimmt. Die Form der Lagerspannung deutet aber klar auf Lagerströme hin. Nachteil dieser Spannungsmessung ist, dass die Welle zugänglich sein muss. Aufgrund der relativ schnellen Spannungsänderungen muss zudem darauf geachtet werden, dass ein geeignetes Oszilloskop verwendet wird.

Abbildung 6 zeigt noch einmal deutlich, dass der Effektivwert der Lagerspannung allein keine Aussage über Lagerströme zulässt. Messungen mit Multimetern sind somit unzulässig, und nur der Zeitverlauf der Lagerspannung zeigt, ob Lagerströme auftreten.

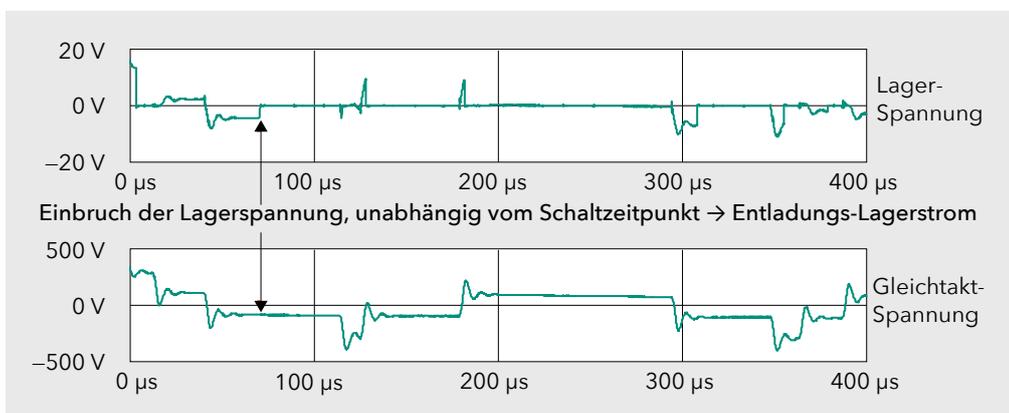


Abbildung 5: Verlauf der Lagerspannung (oben) und der Gleichtaktspannung (unten) beim Auftreten von Entladungs-Lagerströmen.

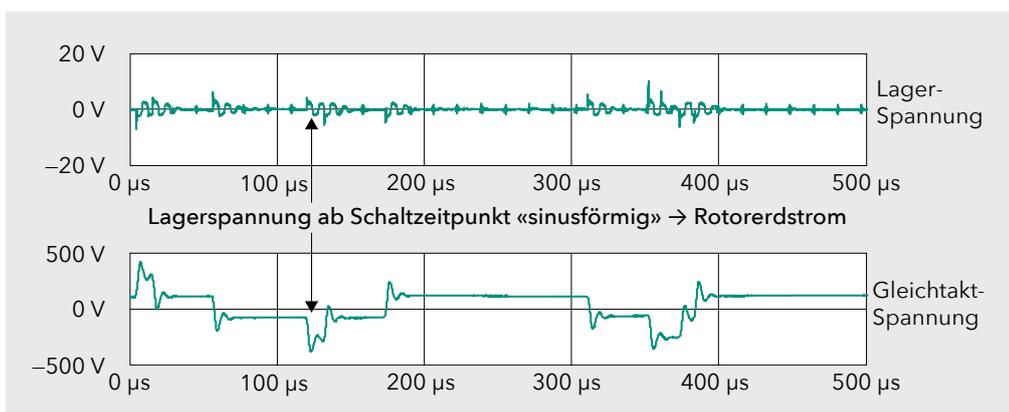


Abbildung 6: Verlauf der Lagerspannung (oben) und der Gleichtaktspannung (unten) beim Auftreten von Rotorerdströmen.

Messung des Gleichtaktstromes

Vielfach wird die Messung des Gleichtaktstromes zur Detektion von Lagerströmen herangezogen.

Entladungs-Lagerströme sind eine Entladung im Motor. Dieser Entladungsstrom ist jedoch nicht als Gleichtaktstrom sichtbar. Über die Messung des Gleichtaktstromes kann somit keine Aussage über das Vorhandensein von Entladungs-Lagerströmen gemacht werden.

Zirkulierende Lagerströme und Rotorerdströme sind jedoch anteilmässig im Gleichtaktstrom sichtbar. Da dieser Anteil jedoch von sehr vielen Faktoren abhängt, ist eine Aussage über die tatsächliche Höhe der Lagerströme schwierig. Zudem kann auch ohne Lagerströme ein Gleichtaktstrom auftreten. Bei sehr kleinem Gleichtaktstrom kann aber davon ausgegangen werden, dass keine schädlichen zirkulierenden Lagerströme und keine schädlichen Rotorerdströme auftreten. Ausserdem lässt sich die Wirksamkeit von Gegenmassnahmen durch die Gleichtaktstrommessung vor und nach Einsetzen der Massnahme sehr gut bewerten.

Messung der hochfrequenten Entladungsenergie

Jede Entladung im Lager führt auch zu einer hochfrequenten Energieabstrahlung. Da diese abgestrahlte Entladungsenergie von der Lagergrösse abhängt und damit bei kleinen Motoren auch klein ausfällt, kann eine Detektion schwierig werden. Der Vorteil der Messung der hochfrequenten Entladungsenergie (HF-Messung) ist die kontaktlose und damit sehr bequeme Messung mit einer HF-Sonde.

Gegenmassnahmen

Für schädliche Lagerströme existieren verschiedene Gegenmassnahmen. Ob die Gegenmassnahmen wirksam sind, beziehungsweise wie sie gewählt werden müssen, hängt wieder von der Lagerstromart ab. Allgemein wird eine gute hochfrequente Erdung empfohlen.

Symmetrische, abgeschirmte Motorkabel

Die Verwendung von symmetrischen, abgeschirmten Motorkabeln mit beidseitiger Anbindung der Schirmung bietet einen sehr guten Schutz gegen Rotorerdströme. Gegenüber anderen Gegenmassnahmen haben diese Kabel den weiteren Vorteil, dass auch die Last geschützt ist.

Auf zirkulierende Lagerströme und Entladungs-Lagerströme hat die Verwendung von symmetrischen, abgeschirmten Kabeln keinen nennenswerten Einfluss.

Weitere Massnahmen, welche Rotorerdströme verhindern können und gleichzeitig auch die Last schützen, sind die Verwendung von isolierten Kupplungen und das Anbringen einer guten, hochfrequenten Verbindung zwischen Gehäuse und angetriebener Last. Auch diese Massnahmen haben keinen Einfluss auf die anderen Lagerstromarten.

Lager

Der Einsatz von speziellen Lagern verhindert einen elektrischen Durchschlag im Lager trotz erhöhter Lagerspannung. Durchgesetzt haben sich vor allem Hybrid-, Keramik- und isolierte Lager mit einer Innenbeschichtung.

■ **Entladungsströme:** Es müssen beide Lager als Hybrid- oder Keramiklager ausgeführt werden. Isolierte Lager verhindern Entladungsströme nicht. Es gibt auch die Möglichkeit, Lager mit spezieller Schmierung (niederohmig) einzusetzen. Diese Lager verhindern jedoch nur Entladungsströme und aufgrund der fehlenden Langzeiterfahrungen wird davon abgeraten.

■ **Zirkulierende Lagerströme:** Es reicht, ein Hybrid-, Keramik- oder isoliertes Lager zu verwenden; vorzugsweise auf der Nichtantriebsseite (Englisch non-drive end, NDE).

■ **Rotorerdströme:** Es müssen beide Lager als Hybrid-, Keramik- oder isolierte Lager ausgeführt werden.

Wellenerdungsbürsten

Beim Einsatz von Wellenerdungsbürsten ist auf einen guten, niederohmigen Kontakt zwischen Bürste und Welle zu achten.

- **Entladungsströme:** Es reicht, wenn ein Lager mit einer Wellenerdungsbürste ausgestattet ist.
- **Zirkulierende Lagerströme:** Es müssen beide Lager mit einer Wellenerdungsbürste ausgestattet werden.
- **Rotorerdströme:** Es reicht, wenn ein Lager mit einer Wellenerdungsbürste ausgestattet ist. Es besteht aber die Gefahr, dass die Rotorerdströme weiter zu Schäden in der Last führen.

Gleichtaktdrosseln

Gleichtaktdrosseln reduzieren oder verhindern zirkulierende Lagerströme und Rotorerdströme. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass die Gleichtaktdrossel korrekt ausgelegt ist. Entladungsströme werden durch Gleichtaktdrosseln nicht verringert.

Filter- oder Steuerungsmuster, die die Gleichtaktspannung unterdrücken

Filter, welche die Gleichtaktspannung reduzieren oder unterdrücken, sind bei allen Lagerstromtypen wirksam.

Auslegung

Da das Auftreten des Stromes, die Höhe des Stromes und damit auch die Schädlichkeit im Lager vom gesamten System abhängt, sollten allfällige Lagerströme schon bei der Auslegung und Ausschreibung mitberücksichtigt werden. Insbesondere, wenn Frequenzumrichter und Motor von verschiedenen Anbietern bezogen werden, können sonst Probleme entstehen.

Bei bestehenden Anlagen lässt sich bei einem Verdacht durch eine der obigen Messungen feststellen, ob Lagerströme auftreten. Bei zugänglicher Welle empfiehlt sich hier die Messung der Spannung zwischen Gehäuse und Welle. Als Faustformel gilt, dass Lagerspannungen unter 5 V nicht auf schädliche Lagerströme hindeuten. Ausschlaggebend ist dabei der Zeitverlauf der Lagerspannung und nicht deren Effektivwert, wie im Abschnitt Messung beschrieben wurde.

Sehr verallgemeinernd können folgende Massnahmen zur Verhinderung von schädlichen Lagerströmen empfohlen werden:

- Bei allen Motoren: Eine gute, hochfrequente Erdung des Motorgehäuses verhindert Rotorerdströme
- Bei Motoren kleiner und mittlerer Leistung mit Zwischenkreisspannung ab 560 V: Vorsehen einer Gegenmassnahme für Entladungs-Lagerströme, z.B. Verwendung einer Wellenerdungsbürste
- Bei Motoren ab ca. 100 kW: Vorsehen einer Gegenmassnahme für zirkulierende Lagerströme, z.B. isoliertes Lager/Hybridlager bei Nichtantriebsseite (NDE)
- Bei Motoren ab ca. 400 kW zusätzlich: Weitere Massnahmen wie Gleichtaktfilter vorsehen

Weiterführende Informationen

Begriffe und Einheiten

Bezeichnung	Abkürzung	Einheit	Indizes, Erklärung
Frequenz	f	Hz	N: Netz M: Motor
Frequenzumrichter	FU		Englisch: variable frequency drive (VFD)
Hochfrequenz	HF		Englisch: high frequency, auch radio frequency (RF)
Hochfrequenz-Sonde	HF-Sonde		Gerät zur Messung hoher Frequenzen. Engl. radio frequency probe (RF probe)
International Electrotechnical Commission	IEC		
Institute of Electrical and Electronics Engineers	IEEE		
Leistung	P	W	
Nichtantriebsseite	NDE		Auch Lüfterseite, B-Seite. Englisch: non-drive end (NDE)
Spannung	U	V	N: Netz M: Motor
Technisches Komitee (der IEC)	TK		Englisch: IEC Technical Committee (IEC TC)
Technische Spezifikation (der IEC)	TS		Englisch: IEC Technical Specification (IEC TS)
Wechselstrom	AC	A	Englisch: alternating current
Zeit	t	s	

IEC-Spezifikationen

■ Allgemeine Bedingungen Lagerströme: IEC TS 60034-25, 2014: Rotating electrical machines - Part 25: AC electrical machines used in power drive systems - Application guide, Chapter 8.

■ Allgemeine Bedingungen Installation: IEC TS 60034-25, 2014: Rotating electrical machines - Part 25: AC electrical machines used in power drive systems - Application guide, Chapter 9.

■ Zusätzliche Informationen für verschiedene Motor-technologien: IEC TS 60034-25, 2014: Rotating electrical machines - Part 25: AC electrical machines used in power drive systems - Application guide, Chapters 10 to 19.

Quellen und weiterführende Literatur

■ Technische Anleitung Nr. 5 - Lagerströme in modernen AC-Antriebssystemen, ABB Automation, 2001

■ A. Muetze, «Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors», Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Deutschland, 2004

■ A. Muetze und A. Binder, «Practical Rules for assessment of Inverter-Induced Bearing currents in Inverter-Fed AC Motors up to 500 kW», IEEE Transaction on Industrial Electronics, June 2007.

■ Impact Energy, Merkblatt Nr. 25 - Frequenzumrichter

Editorischer Vermerk

Das Topmotors Merkblatt Nr. 31 Lagerströme wurde von Impact Energy im Rahmen des Umsetzungsprogrammes für effiziente Antriebssysteme Topmotors erstellt. Es wurde von Hanna Putzi-Plesko ZHAW, Rolf Tieben (iE) und Viktor Hangartner (iE) erarbeitet. Lektorat und graphische Umsetzung: Faktor Journalisten AG.