



## Schlussbericht

---

# Zustandsüberwachung von Lagerströmen in elektrischen Maschinen

ZueLs

---





Zürcher Hochschule  
für Angewandte Wissenschaften



School of  
Engineering

IMS Institut für  
Mechatronische Systeme

**Datum:** 14.08.2018

**Ort:** Bern

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)  
[energieforschung@bfe.admin.ch](mailto:energieforschung@bfe.admin.ch)

**Auftragnehmer/in:**

Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW  
Institut für mechatronische Systeme  
Technikumstrasse 9, 8401 Winterthur  
[www.zhaw.ch/ims](http://www.zhaw.ch/ims)

**Autor/in:**

Alberto Colotti, ZHAW, IMS, [alberto.colotti@zhaw.ch](mailto:alberto.colotti@zhaw.ch)  
Hanna Putzi, ZHAW, IMS, [hanna.putzi-plesko@zhaw.ch](mailto:hanna.putzi-plesko@zhaw.ch)

**BFE-Bereichsleitung:** Dr. Michael Moser, [michael.moser@bfe.admin.ch](mailto:michael.moser@bfe.admin.ch)  
**BFE-Programmleitung:** Roland Brüniger, [roland.brueiniger@brueniger.swiss](mailto:roland.brueiniger@brueniger.swiss)  
**BFE-Vertragsnummer:** SI/501364-01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.**



## Zusammenfassung

In elektrischen Maschinen mit Umrichterspeisung entstehen Lagerströme wegen der auftretenden Gleichtaktspannung und wegen hochfrequenten Ableitströmen. Diese schädigen die Lagersysteme und führen zu vorzeitigen Ausfällen. Dadurch wird die Energieeinsparung, welche durch den Einsatz von Frequenzumrichter erzielt werden kann, geschmälert oder gar zunichte gemacht.

Das Projekt "Zustandsüberwachung von Lagerströmen in elektrischen Maschinen" befasst sich mit denjenigen Lagerstrom-Problemen, welche durch die Umrichterspeisung von elektrischen Maschinen entstehen. Die Schädigung der Lagersysteme sollte dabei durch geeignete Gegenmassnahmen verhindert werden oder durch eine Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) frühzeitig erkannt werden.

Im Rahmen einer Vorstudie konnte festgestellt werden, dass das Thema Lagerströme sehr aktuell ist. Gegenmassnahmen sind zwar insbesondere bei grösseren Maschinen bekannt, die Wirksamkeit der Massnahmen wird aber häufig in Frage gestellt. Auch ist das Wissen bei kleinen Maschinen noch nicht gleich vertieft.

Die Entstehung der Lagerströme und der aktuelle Stand der Technik zur Verringerung oder gar Verhinderung der Lagerströme wurde zusammengefasst. Um die Wirksamkeit der Gegenmassnahmen zu demonstrieren, wurde am Institut für Mechatronische Systeme (IMS) ein Langzeitversuch durchgeführt, bei dem elf baugleiche Motor/Inverter-Systeme kleiner Leistung mit unterschiedlichen Konfigurationen (wie zum Beispiel verschiedene Erdungsarten) betrieben wurden. Dabei wurden Lagerspannungen sowie Vibrationsmuster aufgezeichnet. Die neu entwickelte Bewertung der Lagerstrom-Gefährdung wurde durch Simulationen und durch die Theorie gestützt und zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der optischen Auswertung der Lager. Der Langzeitversuch hat gezeigt, dass auch kleine Maschinen durch Lagerströme geschädigt werden. Die Erdungsart hat dabei nur bei der Verhinderung von Rotor-Erdströmen einen Einfluss, nicht aber bei den Entladungslagerströmen. Auch konnte gezeigt werden, dass eine Gleichtaktrossel die Schädigung durch Endladungslagerströme sogar verstärken kann. Durch Erdungsbürstenringe und isolierte Lager können Lagerströme verhindert werden.

Durch den Langzeitversuch wurde auch gezeigt, dass sich die Schädigung durch Lagerströme schon frühzeitig im Vibrationsmuster zeigt. Die Lager können bei ersten Anzeichen von Schädigung noch Wochen weiterbetrieben werden, so dass mit dem angestrebten Condition Monitoring zwar der Schaden am Lager nicht verhindert werden kann, aber es können rechtzeitig Gegenmassnahmen oder das Auswechseln der Lager in die Wege geleitet werden.

Obwohl die Trends in der Varianz des Vibrationssignales sehr gut mit den Gefährdungszahlen und den optischen Auswertungen übereinstimmen, sind für eine frühzeitige Detektion von Lagerströmen weitere Parameter nötig. Für eine frühzeitige und ursachenbezogene Überwachung sollen daher Spektrogramme verwendet werden, wobei der Algorithmus für die Detektion über ein neuronales Netzwerk gewonnen werden soll. Die aus den Feldversuchen und dem Langzeitversuch gewonnen Daten sind jedoch für ein Training des neuronalen Netzwerkes noch zu klein. Aktuell werden mehr Daten beschaffen, ein Update zum aktuellen Condition Monitoring zur ursachenbezogenen Erkennung von Lagerströmen ist für 2019 geplant.

Durch den Einsatz von geeigneten Massnahmen lassen sich Lagerströme verhindern, und durch ein Condition Monitoring kann die (langfristige) Wirksamkeit der Massnahmen überprüft werden. Dem Einsatz von Frequenzumrichtern zur Energieeinsparung stellt sich somit nichts entgegen.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Ausgangslage</b> .....	<b>8</b>
2.1 Hintergrund / Stand der Technik .....	8
2.2 Motivation des Projektes .....	8
2.3 Ziele der Arbeit .....	8
<b>3 Vorgehen und Methode</b> .....	<b>9</b>
3.1 Aufarbeitung Stand der Technik .....	9
3.2 Vorstudie.....	11
3.3 Condition Monitoring (CM).....	11
3.3.1 Wahl des Überwachungsparameters .....	11
3.3.2 Aufbau eines Online Analysetools.....	12
3.4 Lagerprüfstand .....	15
3.5 Langzeitversuch .....	16
3.5.1 Aufbau .....	16
3.5.2 Messungen .....	19
3.5.3 Auswertung Vibrationsdaten.....	20
3.5.4 Auswertung Spannungs- und Strommessung.....	20
3.5.5 Schädigung und Alterungsmechanismus .....	20
<b>4 Resultate</b> .....	<b>22</b>
4.1 Vorstudie - Erfahrungen der Anwender .....	22
4.2 Abschätzung der Kosten durch Lagerstromschäden .....	22
4.3 Online-Detektion über Vibrationsmessung.....	23
4.4 Zusammenhang zwischen Strom und Spannung am Lager .....	24
4.5 Bewertung der Lagergefährdung.....	26
4.5.1 Entladungs-Lagerströme (EDM Ströme) .....	26
4.5.2 Rotorerdströme (Rotor Ground Current, RGC) .....	29
4.6 Simulation der Gleichtaktspannung für die verschiedenen Konfigurationen.....	30
4.7 Gefährdungszahlen im Langzeitverlauf .....	32
4.8 Optische Auswertung der Lager .....	36
4.9 Alterungsprozess im Langzeitversuch.....	40
4.10 Wirksamkeit der Gegenmassnahmen bei kleinen Maschinen .....	41
4.11 Analysetool für Condition Monitoring - mmViewer .....	43
4.12 Implementierung Condition Monitoring - Auswertung Langzeitverlauf.....	46
4.12.1 Wiederinbetriebnahme eines Testaufbaus.....	54 <sup>5/67</sup>



4.12.2	Weitere Parameter für Condition Monitoring .....	55
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.....</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>Publikationen .....</b>	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>Referenzen .....</b>	<b>59</b>
<b>9</b>	<b>Anhänge .....</b>	<b>60</b>
9.1	Anhang 1: Merkblatt Lagerströme .....	60
9.2	Anhang 2: Gemessene Sternpunkt- und Lagerspannungen.....	62
9.3	Anhang 3: Kopplung der verschiedenen Frequenzumrichter .....	65



## Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
BPFI	Ball pass frequency of inner ring
BPFO	Ball pass frequency of outer ring
CM	Condition Monitoring, Zustandsüberwachung
DE	Drive End
EDM	Electric Discharge Machining, Entladungs(-Lagerströme)
FTF	Fundamental train frequency (Dt. Käfigfrequenz)
FU	Frequenzumrichter
IMS	Institut für mechatronische Systeme
NDE	Non Drive End
NN	Neuronales Netzwerk
RF	Radiofrequenz
RGC	Rotor Ground Current, Rotorerdstrom
RPM	Revolutions per minutes (Dt. U/min)
SNR	Signal to noise ratio
ZHAW	Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften



# 1 Einleitung

In elektrischen Maschinen mit Umrichterspeisung entstehen Lagerströme wegen der auftretenden Gleichtaktspannung und aufgrund hochfrequenter Ableitströme. Diese Lagerströme beschädigen sowohl das Schmiermittel wie auch die Oberflächen der Wälzkörper und Schalen. Dadurch treten vorzeitige Lagerdefekte auf, die zu Betriebsunterbrüchen, Reparaturen oder Neuinstallationen führen. Durch den zunehmenden Einsatz von Umrichtern auch an mittleren und kleineren elektrischen Maschinen nimmt die Zahl der potentiell gefährdeten Anlagen zu.

Mit den Ergebnissen dieses Projektes sollen die Ressourceneffizienz durch gezielte Ursachenbehebung der Schädigung durch Lagerströme verbessert und Barrieren gegen den Einsatz von Frequenzumrichtern reduziert werden. Die konkreten Ziele, die zu diesen Ergebnissen führen, sind im Kapitel 2 beschrieben.

## 2 Ausgangslage

### 2.1 Hintergrund / Stand der Technik

Seit Anfang des 20. Jh. ist bekannt, dass in elektrischen Maschinen Lagerströme auftreten können, die vorzeitig Schaden verursachen und schliesslich zum Ausfall der Maschinen führen kann. Seit den 90'er Jahren wird der Einfluss der Umrichterspeisung untersucht. Die Ursachen sind erkannt, und mögliche Massnahmen sind bekannt. Die Voraussage der Gefährdung in einem konkreten Fall und die Einschätzung des Zustandes der elektrischen Maschine ohne Demontage und Analyse der eingebauten Lager ist hingegen noch immer mit einer grossen Unsicherheit behaftet.

Mit der Zunahme der Schaltfrequenzen und der Steilheit der Schaltflanken der Umrichter hat sich die Gefährdung von anfänglich nur grossen Motoren (> MW) auch auf mittlere Antriebe (ab einige 10 kW) und kleine Maschinen ausgeweitet. Eine verbesserte Einschätzung der Gefährdung und eine „on-line“ Diagnose des Zustandes von Anlagen werden benötigt.

### 2.2 Motivation des Projektes

In der Energieverordnung EG 640/2009 wird der Einsatz von IE3 Motoren ab dem 1. Januar 2015 vorgeschrieben. Alternativ dazu können IE2 Motoren mit einer Drehzahlregelung verwendet werden. Der Einsatz der Frequenzumrichter, im Folgenden FU genannt, für die Drehzahlregelung erhöht einerseits die Systemeffizienz, andererseits aber auch die Komplexität der Antriebe.

Das Energiesparpotential durch den Einsatz von FU ist erheblich. Als Beispiel dient hier Grossbritannien, wo schätzungsweise 40% des industriellen Stromverbrauchs durch unregelmässige und überdimensionierte Pumpen und Ventilatoren verbraucht werden. Rockwell Automation hat aufgezeigt, dass eine Energieeinsparung von gegen 50% erzielt werden kann. Aber eine zu grosse Anzahl von Maschinenreparaturen, hervorgerufen durch Defekte aus Lagerströmen, kann diesen Gewinn wieder zunichtemachen.

### 2.3 Ziele der Arbeit

Um den Einsatz von Frequenzumrichtern weiter voranzutreiben, muss die Hemmschwelle vor Lagerstrom-Schäden bei den Anwendern abgebaut werden. Dies kann dadurch geschehen, dass die Anwender wissen, ob ihre Maschine überhaupt Lagerstrom gefährdet ist und falls ja, welche Gegenmassnahmen dafür existieren. Zudem kann eine Zustandsüberwachung der Lager Sicherheit



bieten, da Lagerschäden frühzeitig erkannt oder gar verhindert werden können. Daher sollen in diesem Projekt zwei Ziele erreicht werden.

Erstens sollen die Barrieren gegen den Einsatz von Frequenzumrichtern reduziert werden. Dazu wurde die Theorie zu den Lagerströmen aufgearbeitet und zusammengefasst, um eine umfassende Grundlage für den folgenden Teil zu haben. Auch wurde eine Analyse des Alterungsmechanismus in lagerstrombehafteten elektrischen Antrieben durchgeführt und vielzählige Strom- und Spannungsmessungen für eine Detektion der Lagerströme durchgeführt. Um herauszufinden, in welchem Themen-Bereichen den Anwendern noch Information fehlen, wurde ausserdem von verschiedenen Anwendern die Erfahrung zum Thema Lagerströme gesammelt.

Mit den im ersten Ziel erarbeiteten Grundlagen soll zweitens ein Condition Monitoring entwickelt werden, um den Anwendern die Möglichkeit zu geben, diese Lagerströme besser zu fassen und quantifizieren zu können. Idealerweise soll die Zustandsüberwachung dabei nicht nur die Lagerschädigung frühzeitig anzeigen, sondern bereits beim Auftreten erster Lagerströme anschlagen.

## 3 Vorgehen und Methode

### 3.1 Aufarbeitung Stand der Technik

Das Thema Lagerströme wird in vielen Publikationen aufgenommen. Dabei lässt sich die Literatur in mehrere Richtungen unterteilen.

- i) Untersuchung der Entstehung oder des Phänomens der Lagerströme (z.B. (1)).  
Es werden verschiedene Modelle zur Simulation der Lagerströme bei gegebener Gegentakt-Spannung genannt.  
Für die parasitären Kapazitäten existieren verschiedene Näherungsformeln, welche jedoch meist stark vereinfacht sind. Auch für das Lager existieren verschiedene Modelle, zum Beispiel in (2) und (3).
- ii) Detektion von Lagerströmen und damit verbundener Zustandsüberwachung.  
Hier werden verschiedene Verfahren wie Vibrationsanalyse und Radiofrequenz (RF) Detektion verfolgt. Anhand bestimmter Parameter wird dann die voraussichtliche Lebensdauer der Lager bestimmt.
- iii) Auswirkung der Lagerströme auf die Lebensdauer des Lagers  
Das Lager wird mit einem bestimmten Spannungsverlauf belastet und es wird untersucht, bei welchen Spannungsstärken und nach welcher Dauer eine Lagerschädigung auftritt.
- iv) Gegenmassnahmen  
In der Literatur werden verschiedene Gegenmassnahmen zur Unterdrückung von Gegentaktspannungen und Lagerströmen genannt. Beispiele sind
  - Umrichter-orientierter Massnahmen
    - Multi-Level Konverter
    - Spezielle Modulationsverfahren
    - Filter
  - Motor-orientierte Massnahmen:



- Isolierte Lager
- Erdungsbürsten
- Gute Erdung

Lagerströme können abhängig von ihrer Entstehung in verschiedene Typen eingeteilt werden. Da bei all den erwähnten Forschungs-Richtungen der Typ des Lagerstromes einen wichtigen Einfluss hat, werden hier die drei gängigsten Lagerstromtypen in durch Frequenzumrichter gespeisten Maschinen zusammengefasst.

### Entladungs-Lagerströme (auch EDM („Electrical Discharge Machining“) Ströme genannt)

Entladungs-Lagerströme treten bei kleinen Maschinen auf. Ihre Entstehung kann über den Spannungsteiler gemäss Ersatzschaltbild in Abbildung 1 erklärt werden. Dabei ist  $U_0$  die Gleichtaktspannung, welche an der Maschine anliegt und  $U_{\text{Lager}}$  die Lagerspannung. Die Motorkapazitäten zwischen Windungen (w), Rotor (r) und Gehäuse (f: frame) sowie die beiden Lagerkapazität (b: bearing) bilden einen Spannungsteiler. Bei Überschreiten einer gewissen Schwellenspannung bricht das Lager durch.

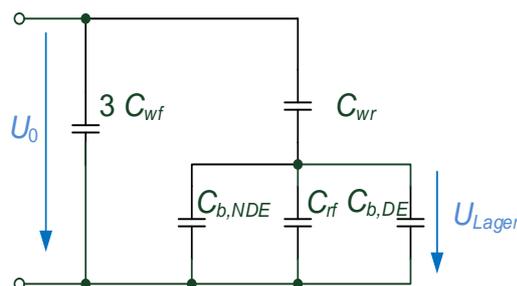


Abbildung 1: Ersatzschaltbild zur Bestimmung der Lagerspannung (ohne Lager-Durchbruch)

### Zirkulärer Lagerströme

Zirkuläre Lagerströme treten bei grossen Maschinen auf.

### Rotorerdströme (auch Rotor Ground Current oder RGC genannt)

Rotorerdströme treten bei allen Maschinen auf, wenn der Rotor besser geerdet ist als das Gehäuse.

Alle drei Lagerstrom-Typen werden durch die Gleichtaktspannung verursacht. Während bei den zirkulären Lagerströmen und den Rotorerdströmen die Änderung der Gleichtaktspannung zu Lagerströmen führt, ist bei den EDMs nur die momentane Höhe der Gleichtaktspannung ausschlaggebend.

Ausgehend von der vorliegenden Recherche wurde ein Bericht erstellt [1]. Die wichtigsten Ergebnisse wurden zudem in einem „Facts-Sheet zu Lagerströmen“ zusammengefasst, siehe Anhang. Der Vollständigkeit halber seien hier nochmals die gängigsten Massnahmen aufgelistet, um Maschinen vor Lagerströmen zu schützen (Zitat aus [1]):

- Reduzierung der Gleichtaktspannung durch Filter oder Pulsmuster
- Hybrid- oder Keramiklager: Bei zirkulierenden Lagerströmen reicht ein NDE-Hybrid-Lager, bei den anderen Typen schützen nur zwei Hybrid-Lager



- Kohlebürsten, Wellenerdungsringe: Bei Entladungs-Lagerströmen reicht eine Kohlebürste, bei den anderen Typen schützen nur zwei Bürsten. Bei Rotor-Erdströmen besteht die Gefahr, dass die Lager der Lastmaschine beschädigt werden
- Pulsmuster-Filter, welche die Flankensteilheit ( $du/dt$ ) reduzieren: Pulsmuster-Filter wirken nicht bei Entladungsströmen
- Gleichtaktrosseln: Gleichstromdrosseln wirken nicht bei Entladungsströmen
- Sicherstellung einer guten hochfrequenten Gehäuse-Erdung zur Vermeidung von Rotor-Erdströmen, zum Beispiel durch Verwendung geschirmter Kabel

## 3.2 Vorstudie

Das Aufarbeiten der Theorie hat gezeigt, dass das Wissen über Lagerströme relativ breit ist. Die direkte Umsetzung der Theorie ist aber für viele Anwender nicht gegeben. Um herauszufinden, in welchem Bereich Maschinen-Anwender noch mehr Informationen wünschen, wurde darum von verschiedenen Anwendern die Erfahrung zum Thema Lagerströme in einer Vorstudie gesammelt. Die Erkenntnisse aus dieser Vorstudie wurden durch Gespräche mit einer Schlüsselperson in Bezug auf Lagerströme ergänzt.

Da viele Anwender dem Einsatz von FU skeptisch gegenüberstehen, weil sie mit grossen Folgekosten aufgrund von Lagerstromproblemen rechnen, wurde zusätzlich eine Abschätzung zu den durch Lagerstromdefekte entstehenden Kosten durchgeführt.

## 3.3 Condition Monitoring (CM)

### 3.3.1 Wahl des Überwachungsparameters

Für das Condition Monitoring wurde zuerst ermittelt, welche Parameter für die Überwachung in Frage kommen. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden verschiedene Ansätze gefunden, um die Lageralterung zu modellieren und die Restnutzungsdauer („remaining usefule life“) zu bestimmen; als Beispiel sei nur (4) genannt. Diese Modelle basieren auf aktuellen Messungen z.B. der Vibration und werden zur Laufzeit immer wieder angepasst.

Es liegen auch verschiedene Patente zum Thema Condition Monitoring vor. In (5) wird mittels eines Lagerstromsensors ein elektrischer Strom durch das Lager gemessen. Aus dieser Messung soll eine aktuelle Betriebszustandsklasse und ein Lagerstromkennwert ermittelt werden. Anhand dieser zwei Parameter erfolgt die Zustandsüberwachung. Das Patent betrifft das Projekt nur indirekt, da hier auf einen Lagerstromsensor verzichtet werden soll. Ein früheres Patent von Siemens ist allgemeiner gehalten (6).

In (7) wird ein spezielles Lager zur Lagerstrom-Überwachung beschrieben. Da das aktuelle CM einfach einbaubar sein soll, ist dieser Ansatz nicht relevant für das Projekt.

In (8) wird schliesslich die Detektion von Lagerströmen mittels Radio-Frequenz Signal erwähnt.

Aufgrund der Patente soll der Schwerpunkt des Condition Monitorings auf der Vibrationsmessung liegen. Andere Verfahren sollen aber zur Überprüfung eingesetzt werden. Ein Condition Monitoring der Lagerströme hat den zusätzlichen Vorteil, dass über den gleichen Sensor auch die klassische Überwachung der Motoren erfolgen kann.



Unabhängig von der Implementation wäre ein CM ideal, welches nicht erst beim Auftreten erster Ermüdungs-Vibrationen anschlägt, sondern grundsätzlich das Auftreten von Lagerströmen detektiert.

In einem ersten Ansatz wurde daher untersucht, ob im Moment des Auftretens der Lagerströme eine messbare Vibration entsteht. Wie im Abschnitt Resultate gezeigt, ist diese augenblickliche Detektion der Lagerströme über Vibrationssensoren jedoch nicht möglich.

Im neu gewählten Ansatz soll über Vibrationsmessungen zu einem möglichst frühen Zeitpunkt die Lager-Schädigung festgestellt werden. Aufgrund der Patentlage wird die RF(Radiofrequenz) Messung nach aktuellem Stand nur für die Entwicklung des Verfahrens, nicht aber im Verfahren selbst genutzt.

### 3.3.2 Aufbau eines Online Analysetools

Werden die Daten für das Condition Monitoring über Vibrationssensoren ermittelt, so müssen die (ausgewerteten) Parameter den Anwendern zur Verfügung stehen. Mechmine entwickelte dazu eine Box zur Daten-Akquise, so dass die Sensor-Parameter online gesichert und ausgewertet werden können.

Ausserdem entwickelte Mechmine ein Online Analysetool inklusive Viewer, welches dem Anwender über den Browser die Möglichkeit gibt, jederzeit die ausgewerteten Daten einzusehen. Die Box zur Daten-Akquise, das Analysetool und der Viewer sollen nicht nur zum Monitoring klassischer Motor- und Lagerprobleme dienen, sondern sollen auch die frühzeitige Erkennung von Lagerstrom-Schäden ermöglichen. Zu diesem Zweck wurde unter anderem das erwähnte Online Analysetool um weitere Messparameter aus der Literatur, wie zum Beispiel (9) und (10), erweitert. Details zum Viewer sind im Kapitel 4.11 zu finden.

Für erste Vibrationsmessungen wurde ein Lagerprüfstand verwendet, welcher im folgenden Abschnitt näher beschrieben wird. Die Messungen auf dem Lagerprüfstand wurden durch mehrere Motorprüfstand-Messungen in verschiedenen Konfigurationen ergänzt. Zusätzlich werden über die Mechmine-Tools und Data-Mining bei bestehenden Anlagen Vibrationsmessungen durchgeführt.

Im Rahmen eines Pilotversuches wurden zu Beginn des Projektes bereits 105 Lager „im Feld“ mit Vibrationssensoren ausgerüstet. Die Vibrationsdaten werden über die Mechmine-Tools fortlaufend gesichert. Einige der ausgerüsteten Motoren haben oder hatten nachweislich Probleme mit Lagerströmen. Auch bei baugleichen Motoren haben sich dabei Unterschiede gezeigt (keine Probleme mit Lagerströmen ↔ Probleme mit Lagerströmen).

Aus der Kombination der Prüfstand-Messung und der zahlreichen Vor-Ort Messungen sollte später ein typisches Vibrationsmuster zur frühzeitigen Erkennung von Lagerschäden entwickelt werden. Bei den Messungen fehlt zwar der direkte Zusammenhang mit dem Lagerstrom. Es wird jedoch vermutet, dass durch die nachträgliche Auswertung der Daten ein Muster detektiert werden kann, welches schon frühzeitig das Vorhandensein von Lagerströmen anzeigt und ein Lagerschaden somit erfolgreich verhindert werden kann.



Abbildung 2 Eine Maschine aus dem Pilotversuch, welche mit dem Messsystem ausgerüstet wurde



Abbildung 3 Ein mit Frequenzrichter betriebener Motor aus dem Pilotversuch, welcher aufgrund von Lagerstrom- Problemen später mit Aegis Ringen nachgerüstet wurde

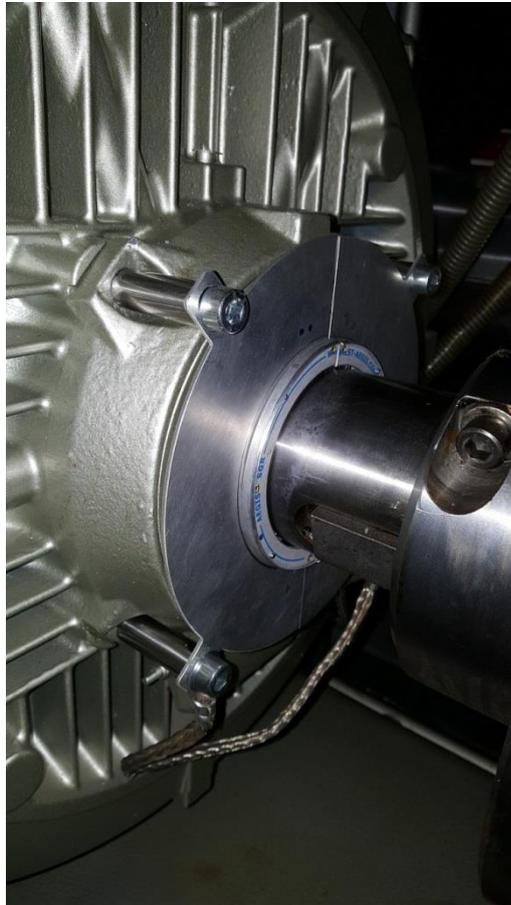


Abbildung 4 Nahaufnahme eines nachträglich installierten Aegis-Ringes



### 3.4 Lagerprüfstand

Für eine gezielte Ausmessung und eine kontrollierte Alterung der Lager wurde von einem Industriepartner ein Lagerprüfstand entwickelt und aufgebaut (siehe Abbildung 5). Der Lagerprüfstand wurde der ZHAW zur Verfügung gestellt und am Institut für Mechatronische Systeme (IMS) zur Ausmessung der Lager betrieben.

Auf diesem Lagerprüfstand kann an das zu testende Lager eine Lagerspannung  $U_{\text{Lager}}$  angelegt werden. Der Lagerstrom wird dabei direkt gemessen, so dass anders als bei einem Motoren-Prüfstand tatsächlich die Lagergrößen gemessen werden. Über den Antriebsmotor kann das Lager bei verschiedenen Drehzahlen betrieben werden, und durch einen Schraubmechanismus sind unterschiedliche radiale Belastungen möglich.

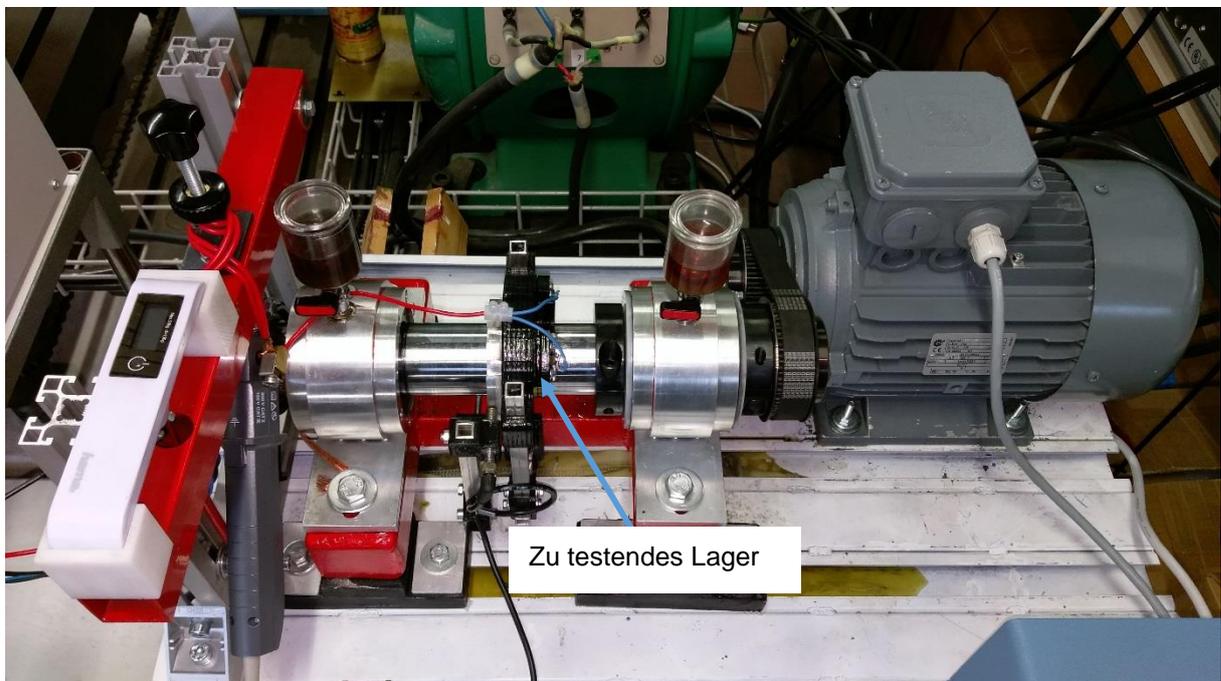


Abbildung 5: Lagerprüfstand mit zu testendem Lager und Antriebsmotor.

Nicht alle Lagerströme führend zwingend zu einer Lageralterung, und die Schädlichkeit der Lagerströme hängt weniger von der Stromstärke als von der Stromdichte ab. In der Literatur wird häufig für einzelne „Durchschläge“ der Lager über die Hertz'sche Fläche die maximale Stromdichte berechnet. Stromdichten unter circa  $0.4 \text{ A/mm}^2$  werden bei Inverter induzierten Lagerströmen allgemein als nicht schädigend angesehen. Wie die Gefährdungszunahme bei höheren Stromdichten aussieht, wird in der Literatur meist nicht erläutert. Es existieren jedoch Ansätze, wie anhand der insgesamt durch den „Durchschlag“ auftretenden Leistung auf die neu zugeführte Schädigung des Lagers geschlossen werden kann (11). In diesem Paper wird auch gezeigt, dass bei vorgegebenem Lastprofil und bekannter Beschaltung (Kabellänge etc.) die Lebensdauer des Lagers im Voraus abgeschätzt werden kann aus der Anzahl der Lager-Durchschläge, den jeweiligen Stromspitzen sowie den Spannungsverläufen. Der Zusammenhang zwischen Oberflächen-Schädigung beziehungsweise Schmierfettalterung und den obigen Parametern wird auch durch verschiedene Messungen wie in (12) bestätigt. Diese Voraussage soll in diesem Projekt nicht implementiert werden. Die gängige Literatur zeigt aber, dass für ein gegebenes Lager die Strommessung als Indikator für die Lageralterung dienen kann.



Mit dem Lagerprüfstand sollten folgende Ziele erreicht werden:

- Zusammenhang zwischen Spannungsverlauf und Stromstärke am Lager bestimmen
- Test für „online“ Detektion von Vibrationsmustern durchführen
- Einfluss verschiedener Parameter wie Drehzahl und Temperatur auf die Durchbruchspannung untersuchen

Die Lagerspannung wurde dabei nicht direkt von einer Quelle an das Lager gelegt. Im realen System liegt die Gleichtaktspannung über einem kapazitiven Spannungsteiler gemäss Abbildung 1 an. Um beim Lagerprüfstand möglichst realitätsnahe Bedingungen zu erhalten, wurde daher ein externes RC-System aufgebaut und zwischen „Lager-Versorgung“ und Lager geschaltet.

### 3.5 Langzeitversuch

Ausgehend von der Vorstudie (siehe Kapitel 3.2) wurde für die Demonstration der Wirksamkeit der Gegenmassnahmen ein Testsystem aufgebaut, bei dem elf baugleiche Motoren/Inverter mit verschiedenen Konfigurationen betrieben wurden. Da die Vorstudie gezeigt hat, dass insbesondere bei kleinen Maschinen das Wissen bei den Anwendern noch nicht sehr vertieft ist, wurde ein System „kleiner Leistung“ mit 1.5kW gewählt. Gemäss Theorie werden bei kleinen Maschinen nur zwei Lagerstromtypen erwartet, Entladungslagerströme (EDM) und Motor-Erdströme. Der dritte Lagerstromtyp, zirkulierende Lagerströme, tritt in ähnlicher Form auch bei netzbetriebenen Maschinen auf. Da dieser Lagerstromtyp bei grossen Maschinen auftritt und diese auch im drehzahlvariablen Betrieb viel besser untersucht worden sind, wird dieser Typ im Versuch nicht berücksichtigt.

Da sich gezeigt hat, dass eine direkte Detektion der Lagerströme über Vibrationsmessung nicht möglich ist, sollte der Langzeitversuch auch zum Aufnehmen von Vibrationsmustern für den Vergleich mit der resultierenden Schädigung genutzt werden.

#### 3.5.1 Aufbau

Mit dem Aufbau der elf Antriebe sollte der Einfluss verschiedener Parameter auf die Lagerströme untersucht werden. Abbildung 6 zeigt eine Übersicht über die gewählten Konfigurationen, und Tabelle 1 zeigt, welche Einflussgrösse mit der jeweiligen Konfiguration getestet werden soll (letzte Spalte). Die Gleichtaktrosseln in den Konfigurationen M4 und M5 sind gleich gross gewählt. Um allfällige Wechselwirkungen mit der Last auszuschliessen und um bei allen Motoren die gleichen Verhältnisse zu erreichen, wurden alle Motoren ohne Last betrieben.

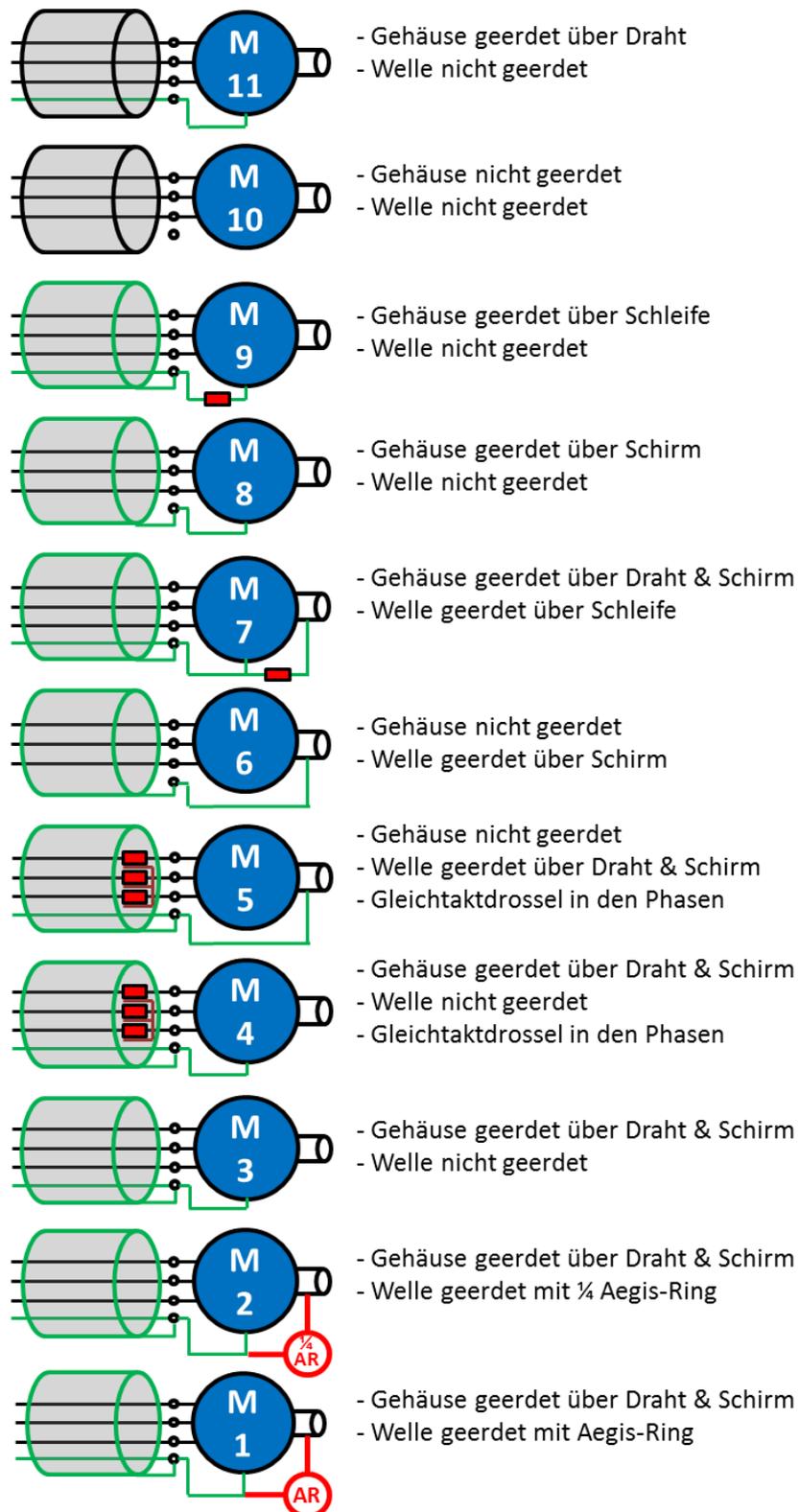


Abbildung 6: Überblick über die elf verschiedenen Konfigurationen



Der tatsächliche Aufbau des Langzeitversuches ist in Abbildung 7 gezeigt. Alle Inverter werden am gleichen Netz betrieben. Um die gegenseitige Vibrations-Beeinflussung der Motoren zu verhindern und um den ursprünglichen Einsatzbedingungen der Motoren möglichst nahe zu kommen, werden die Motoren auf Styroporblöcken gelagert. Die Gehäuse- und Lagertemperatur ist daher höher als bei guter Wärmeabfuhr.



Abbildung 7: Aufbau der elf verschiedenen Konfigurationen



Tabelle 1 zeigt, welcher Lagerstromtyp vor der ersten Inbetriebnahme bei welcher Konfiguration erwartet wurde.

- Zirkulierende Lagerströme werden aufgrund der Grösse der Maschinen nicht auftreten.
- Bei Motoren 1 und 2 wird aufgrund der Schutzschaltung nicht mit Lagerströmen gerechnet.
- Da nur bei einer existierenden direkten Verbindung des Rotors mit der Erde ein Rotor-Erdstrom fließen kann, werden Rotorerdströme nur in den Motoren 5-7 erwartet. Gemäss (13) wurde erwartet, dass beim Auftreten von Rotorerdströmen keine EDMs auftreten. Da die Lager durch die Rotorerdströme immer im ohmschen Zustand sind, kann es nicht zum Durchbruch der Lager-Kapazität kommen.
- Bei allen anderen Motoren wird mit Entladungs-Erdströmen gerechnet.

	EDM erwartet	Rotorerdstrom	Einflussgrösse
<b>Motor 11</b>	Ja	Nein	Erdung (nur Draht)
<b>Motor 10</b>	Ja	Nein	Erdung (keine Erdung)
<b>Motor 9</b>	Ja	Nein	Erdung (mit „Schleife“)
<b>Motor 8</b>	Ja	Nein	Erdung (nur Schirm)
<b>Motor 7</b>	Eventuell	Eventuell	Rotorerdung (Stator besser geerdet)
<b>Motor 6</b>	Nein	Ja	Rotorerdung (Stator nicht geerdet)
<b>Motor 5</b>	Nein	Ja	Rotorerdung (Stator nicht geerdet)
<b>Motor 4</b>	Ja	Nein	Gleichtaktdrossel
<b>Motor 3</b>	Ja	Nein	Erdung (Schirm und Draht)
<b>Motor 2</b>	Nein	Nein	Schutz (1/4 Aegis-Ring, später ganzer Aegis-Ring)
<b>Motor 1</b>	Nein	Nein	Schutz (Aegis-Ring, später isoliertes Lager)

Tabelle 1: Vorgängig erwartete Lagerstrom-Typen inklusive Einflussgrösse, welche getestet werden soll

### 3.5.2 Messungen

Jeder Motor wurde mit einem Vibrationssensor ausgestattet. Täglich und zeitgleich wurden für rund 7.5 Sekunden Daten (Vibration) und Temperatur (des Sensors) aufgenommen und in die Cloud geladen.

Es wurden drei Messboxen installiert um die 11 Motoren überwachen zu können.

- Zuelst1 – Motor 8, 9,10,11
- Zuelst2 – Motor 1, 2, 3, 4
- Zuelst3 – Motor 5, 6, 7

Täglich wurde zwischen 05:00 und 05:45 eine Messung gemacht und die Daten zu einem Server geschickt. Dieses Zeitfenster wurde gewählt unter der Annahme, dass man dort gleichbleibende Umgebungseinflüsse antrifft, vor allem bezüglich Temperatur oder Störsignalen. Im Cloudserver wurden die Daten aufbereitet und konnten mittels eines Web-Portals analysiert oder dargestellt werden. Die Datenakquise wurde mit einer Sampling-Frequenz von  $f_s=52734\text{Hz}$  und 24-Bit durchgeführt. Es wurden 393216 Samples aufgenommen, was einer Messdauer von rund 7.5 Sekunden entspricht, ein Vielfaches der Umdrehungen der Motorenwelle, welche mit 3000 RPM drehte. Auf eine Drehzahlmessung wurde verzichtet, weil die Motoren im Leerlauf (unbelastet) zwischen 2999.4 RPM (entspricht 49.99Hz) und 2504.5 RPM (entspricht 50.09Hz) drehten, siehe exemplarisch Abbildung 8 von Motor 6.

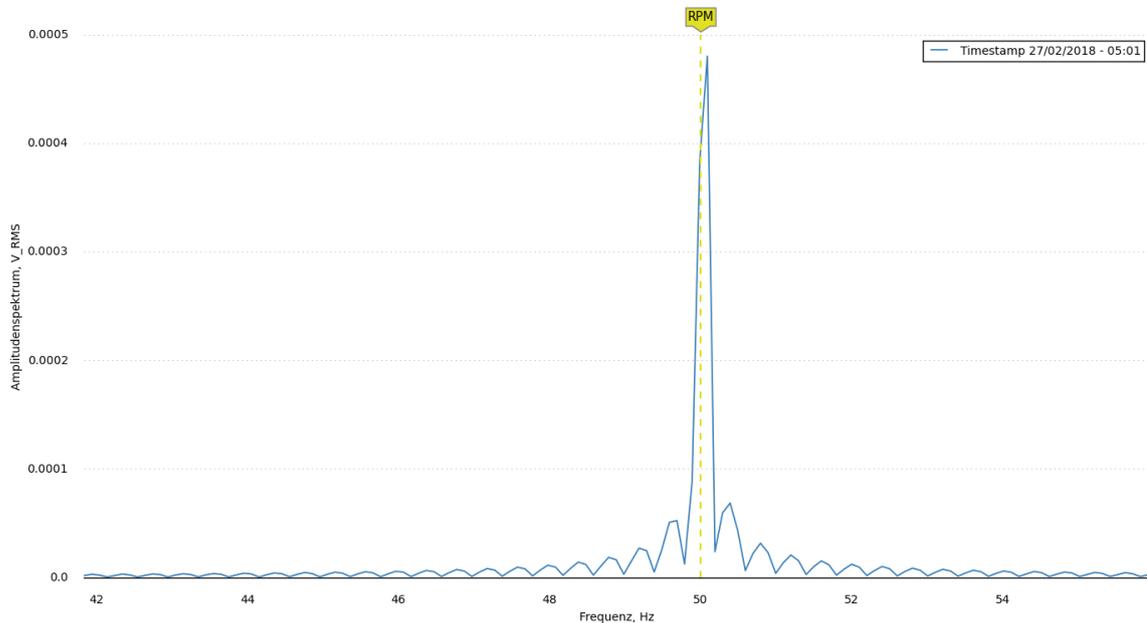


Abbildung 8: Drehzahlspitze im FFT Spektrum bei Motor 6, die Signalenergie findet sich auf 2 FFT-bins verteilt.

Einmal wöchentlich wurden für jeden Motor die Spannung über dem Lager und die Sternpunktspannung gemessen.

### 3.5.3 Auswertung Vibrationsdaten

Die Vibrationsdaten wurden laufend ausgewertet. Verschiedene Ansätze für das Condition Monitoring sind in Verwendung. Der RMS-Wert des Vibrationssignales ist ein gängiger Indikator in Schwingungsanalysen, da er proportional zur Energie der Vibrationen ist. Da bei den vorliegenden Messungen der Mittelwert der Vibrationen über einen Messzyklus Null ist, wurde statt des RMS-Wertes die Varianz des Spannungssignals betrachtet. Dies hat den Vorteil, dass ein Spannungsoffset des Sensors nicht falsch einfließt. Dabei ist der absolute Wert der Varianz vom Motor abhängig. Die Annahme war, dass die langfristige Veränderung der Varianz auf die Belastung durch die Lagerströme zurückzuführen ist.

### 3.5.4 Auswertung Spannungs- und Strommessung

Die tatsächliche Schädigung der Lager wurde am Ende der Versuchslaufzeit bewertet, indem die Lager aufgeschnitten und optisch ausgewertet wurden. Damit schon zu Laufzeit eine ungefähre Abschätzung gemacht werden kann, welche Konfiguration wie gefährdet ist, wurde eine Gefährdungsbewertung in Form einer Gefährdungszahl eingeführt (siehe Kapitel 4.2). Idealerweise kann so schon zu Laufzeit eine Übereinstimmung zwischen Gefährdungsbewertung und Vibrationsmuster erfolgen. Für diese Abschätzung der Schädigung wurde die Entstehung von Lagerschäden und der damit einhergehende Alterungsmechanismus aus der Literatur aufgearbeitet.

### 3.5.5 Schädigung und Alterungsmechanismus

Durch den Strom, welcher durch das Lager fließt, entstehen Schäden am Lager und am Schmiermittel. Durch die hohe Stromdichte beziehungsweise Energie wird das Metall im Lagerring



geschmolzen oder gar verdampft, und es bildet sich ein Krater. Je grösser die Energie ist, desto grösser ist auch der Krater (11).

Bei geschädigten Lagern zeigen sich zwei Schadenstypen: Durch die Kraterbildung kann es zu grauen Spuren oder zu Riffelbildung kommen (Abbildung 9). Dabei scheint auf den ersten Blick keine Voraussage möglich, welcher der beiden Schadenstypen auftritt.

Gemäss heutigem Verständnis gibt es zwei Theorien zu den Schadenstypen. In der ersten Theorie führt insbesondere die Verdampfung zu Riffelbildung im Lager und damit zu einer Verkürzung der Lebensdauer der -Lager (11). Durch das Schmelzen entstehen zwar auch Krater. Diese manifestieren sich aber nur als graue Spur, welche die Lebensdauer der Lager kaum beeinflusst.

Diese Abgrenzung der Schäden wird allerdings nicht von allen Experten unterstützt, und es wird teilweise auch argumentiert, dass die graue Spur nur eine Vorstufe der Riffelbildung darstelle. Abschliessende Versuche, welche die eine oder die andere Theorie stützen, fehlen. Die erste Theorie wird in der Literatur häufiger vertreten, Anwender vertreten hingegen häufiger die zweite Theorie.



Abbildung 9: Lagerschädigung. Links «Graue Spur», rechts Riffelbildung

Auch das Schmiermittel wird durch die Lagerströme geschädigt. Hierzu gibt es verschiedene Studien wie zum Beispiel (14). Der Fokus in diesem Projekt soll jedoch aufgrund der einfacheren Auswertbarkeit und der höheren Aussagekraft auf der Laufbahn-Schädigung liegen.



## 4 Resultate

### 4.1 Vorstudie - Erfahrungen der Anwender

Im Folgenden werden die Erfahrungen der Anwender zum Thema Lagerströme zusammengefasst.

Bei Maschinen grösserer Leistung (ab 100kW) traten schon früher Probleme mit Lagerströmen auf. In diesem Bereich sind die Erfahrungen bei den Industriepartnern gut vertieft. Um Probleme zu vermeiden, werden häufig isolierte Lager beziehungsweise Hybridlager oder Bürstenringe eingesetzt.

Bei Motoren kleinerer Leistung fehlen jedoch meist die Erfahrungen. So herrscht die Meinung vor, dass bei „sehr kleinen“ Maschinen keine Lagerströme auftreten können. Dies entspricht jedoch nicht dem aktuellen Forschungsstand, welcher insbesondere für sehr kleine und sehr grosse Motoren eine Gefährdung voraussagt (1). Aufgrund der verhältnismässig günstigen Motoren werden bei kleinen Leistungen ausserdem aus Kostengründen nur ungern Hybridlager oder Bürsten eingebaut.

Beim Auftreten von Lagerschäden ist oft nicht ersichtlich, ob der Schaden aufgrund von Lagerströmen auftrat. Selbst wenn die Lager detailliert untersucht werden und klar auch Lagerströme auftraten, ist nur selten klar, ob die Lagerströme Ursache für den Ausfall waren oder ob die Lagerströme nur als Auswirkung eines anderen, für die Zerstörung entscheidenden, Defektes auftraten. Zahlen zu den Ausfällen aufgrund von Lagerströmen sind daher nur schwer zu bestimmen.

Allgemein herrscht selbst beim Einsatz von Hybridlagern etc. Unsicherheit, ob durch die gewählten Massnahmen die Lagerströme tatsächlich verhindert werden. Aus Gesprächen mit Servicetechnikern ging zum Beispiel hervor, dass die sogenannten isolierten Lager oftmals beim Einbau verletzt werden und dass dann deren Schutzwirkung nicht beobachtet werden kann.

Ein einfaches, kostengünstiges Condition Monitoring würde daher von den Gesprächspartnern sehr begrüsst.

Für ein Condition Monitoring sind neben dem Preis eine einfache Installation und eine selbständige Auswertbarkeit die wichtigsten Kriterien für eine Installation.

Gespräche mit einer Schlüsselperson in Bezug auf Lagerströme haben die obigen Aussagen bestätigt. Probleme mit Lagerströmen treten in allen Leistungsklassen der Maschinen und in zahlreichen Anwendungsgebieten auf. Ein besonders gefährdeter Anwendungsbereich konnte somit nicht festgestellt werden. Jedoch wurde auch hier wieder festgestellt, dass viele Anwender bei kleinen Maschinen nicht mit Lagerströmen rechnen.

Während Anwender vermuten, dass beim Betrieb mit dem gleichen Frequenzumrichter heutige Motoren (z.B. IE2) anfälliger sind für Lagerstromprobleme als früher Gefertigte, kann dies durch Zahlen nicht direkt bestätigt werden. Eine veränderte Lagerstromgefährdung durch die veränderte Geometrie in den Maschinen ist jedoch durchaus denkbar.

### 4.2 Abschätzung der Kosten durch Lagerstromschäden

Wenn Lagerströme auftreten, so zeigen sich die Schäden an den Lagern oft schon nach wenigen Monaten. Für eine Abschätzung der Implikationen durch Lagerströme wird darum davon ausgegangen, dass die Lager ohne geeignete Massnahmen jährlich ausgewechselt werden müssen. Der Mehraufwand für den Ersatz der Kugellager wird auf 10% der Maschinenkosten geschätzt.

Besteht von der Anwendung her die Wahl, ob die Maschine mit oder ohne Frequenzumrichter betrieben werden kann, so muss die Energiekosten-Einsparung mit Frequenzumrichter so gross sein, dass die Anschaffungskosten übertroffen werden. In Tabelle 2 wird für verschiedene Motorleistungen



gezeigt, wie gross die jährlichen Energie-Einsparungen durch einen Frequenzumrichter sein müssen, um die zusätzlichen Kosten durch Lagerströme zu decken. Nimmt man an, dass der Frequenzumrichter während der Hälfte der Zeit ausgeschaltet ist, dann ergeben sich die mittleren nötigen Leistungseinsparungen in diesem Betriebspunkt in der letzten Zeile von Tabelle 2. Bei einer 1.1kW Maschine kann somit der jährliche Wechsel der Lager gedeckt werden, wenn durch den Frequenzumrichter im Jahresmittel 22W eingespart werden. Nicht berücksichtigt werden dabei die Ausfallkosten, welche allenfalls durch den Stillstand der Maschine entstehen. Bei einem rechtzeitigen Wechsel der Lager können die Ausfallkosten jedoch minimiert werden.

Auch der Einsatz von Gegenmassnahmen kann durch Energieeinsparungen kompensiert werden. Beim Einsatz eines Bürstenerdungsringes und einer Lebensdauer von 10 Jahren können beim 1.1kW Motor mit einem Ring-Einkaufspreis von circa 150 CHF (Listenpreis plus Montage) die Ring-Kosten wiederum amortisiert werden, wenn dank dem Frequenzumrichter im Jahresmittel 22W eingespart werden. Beim Einsatz von Gegenmassnahmen entstehen auch keine Ausfallkosten.

Motor-Leistung	Kosten Motor	Kosten Lagerwechsel	Strompreis <sup>1</sup> in Rp/kWh	Nötige Energie-Einsparung	Ø Einsparung bei 4380h/Jahr Betrieb
1.1 kW	165 CHF	16.5 CHF/Jahr	17.5	94 kWh/Jahr	22 W ≈ 2.0% P <sub>N</sub>
11 kW	1100 CHF	110 CHF/Jahr	15	733 kWh/Jahr	167 W ≈ 1.5% P <sub>N</sub>
110 kW	11000 CHF	1100 CHF/Jahr	14	7857 kWh/Jahr	1794 W ≈ 1.4% P <sub>N</sub>

Tabelle 2: Kosten der Lagerschäden und nötige Einsparungen durch Frequenzumrichter pro Jahr

Auch wenn die obigen Berechnungen nur eine grobe Abschätzung darstellen, ist doch klar ersichtlich, dass sogar bei jährlichem Lagerwechsel oder beim Einsatz von Lagerstrom-Gegenmassnahmen bereits eine geringe Energieeinsparung durch den Frequenzumrichter-Betrieb reicht, um die zusätzlichen Kosten zu amortisieren. Insbesondere bei Antrieben, bei denen die Energie-Einsparung durch den Frequenzumrichter-Einsatz sowohl die Frequenzumrichter-Kosten als auch die Kosten für die Gegenmassnahmen decken, besteht somit kein Grund auf den Einsatz von Frequenzumrichter zu verzichten.

### 4.3 Online-Detektion über Vibrationsmessung

Um zu überprüfen, ob schädliche Lagerströme bereits beim Auftreten über die Vibrationsmessung detektiert werden können, wurde die Vibration der Maschine aufgrund der Kraterbildung abgeschätzt. Dazu wird angenommen, dass die durch den Lagerstrom und die Lagerspannung entstehende Energie  $E_{Lager}$  vollständig in Bewegungsenergie umgewandelt wird. Die Masse, welche aus dem Krater herausgelöst wurde, und das Gehäuse (beziehungsweise ein Teil des Gehäuses) werden dabei aus dem Stillstand beschleunigt. Aufgrund der Impulserhaltung und der Energieerhaltung kann damit die Geschwindigkeit des Gehäuses berechnet werden. Mit der Annahme, dass eine konstante Beschleunigung wirkt, wurde dann für verschiedene Beschleunigungszeiten und Sensoren die Messbarkeit der Vibration bestimmt. Für alle Simulationswerte ist trotz unrealistisch optimistischen Annahmen die Vibration, welche durch den Lagerstrom entsteht, zu klein um messbar zu sein. Es

<sup>1</sup> Strompreise gemäss (21) aus 2017, wobei der Preis der günstigsten Kategorie auf 0.5Rp gerundet wurde. (C1, C3, C4). Bei höheren Strompreisen muss weniger Energie eingespart werden um die Lagerwechselkosten zu decken.



kann daher bei der Vibrationsmessung nur die Auswirkung beziehungsweise die Schädigung durch Lagerströme detektiert werden, nicht aber der Lagerstrom selbst.

#### 4.4 Zusammenhang zwischen Strom und Spannung am Lager

Abbildung 10 zeigt den Lagerprüfstand im Betrieb mit dem RC-Netzwerk und mit Aufnahme des Lagerstromes bzw. der Lagerspannung. Auf dem Oszilloskop ist deutlich der Einbruch der Lagerspannung beim Durchschlag zu erkennen. In Abbildung 11 ist der gemessene Spannungs- und Stromverlauf über dem Lager nochmals detaillierter dargestellt. Messungen bei verschiedenen Drehzahlen und verschiedenen radialen Lagerbelastungen haben die in der Literatur erwähnten Abhängigkeiten bestätigt.

- Temperatur: Die Durchbruchspannung sinkt mit steigender (Lager-)Temperatur
- Drehzahl: Bei kleinen Drehzahlen verhält sich das Lager wie ein ohmscher Widerstand. Erst bei höheren Drehzahlen (abhängig von der Temperatur, ca. 500rpm) kann das Lager kapazitiv wirken, d.h. es treten bei kleinen Drehzahlen keine Durchschläge auf. Der Widerstand des Lagers nach Durchbruch ist drehzahlabhängig (steigend bis zu einer bestimmten Drehzahl, dann abnehmend, wobei diese bestimmte Drehzahl Temperatur und Lagerabhängig ist)
- Radiale Lagerbelastung: Die Durchbruchspannung sinkt mit steigender Last, da der Schmiermittelfilm dünner wird.

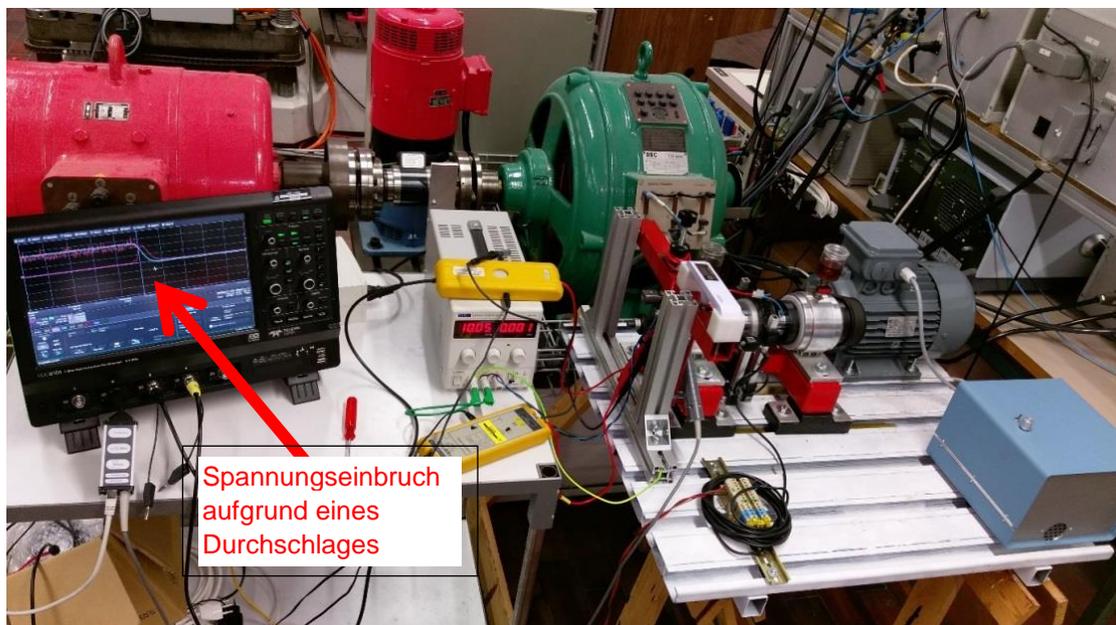


Abbildung 10: Aufbau mit Nachbildung der Lagerspannung über ein RC-Netzwerk und Messung des Lagerstromes. Auf dem Oszilloskop ist der Einbruch der Lagerspannung beim Durchbruch zu sehen.

Für ein besseres Verständnis der Strom- und Spannungsverläufe wurde zudem ein elektrisches Ersatzschaltbild des Lagers aufgebaut. Der Vergleich der gemessenen Grössen in Abbildung 11 mit den durch das Netzwerk in Abbildung 12 simulierten Grössen zeigt die gute Übereinstimmung von Messung und Simulation.

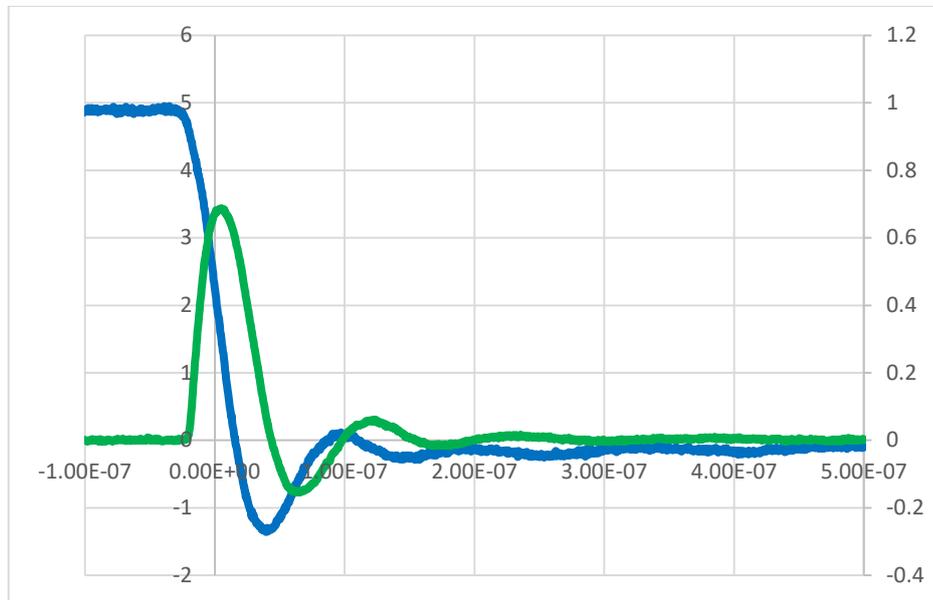


Abbildung 11: Gemessener Verlauf der Lagerspannung (blau) mit Skala links in Volt und des Lagerstromes (grün) mit Skala rechts in Ampere in Abhängigkeit der Zeit in Sekunden

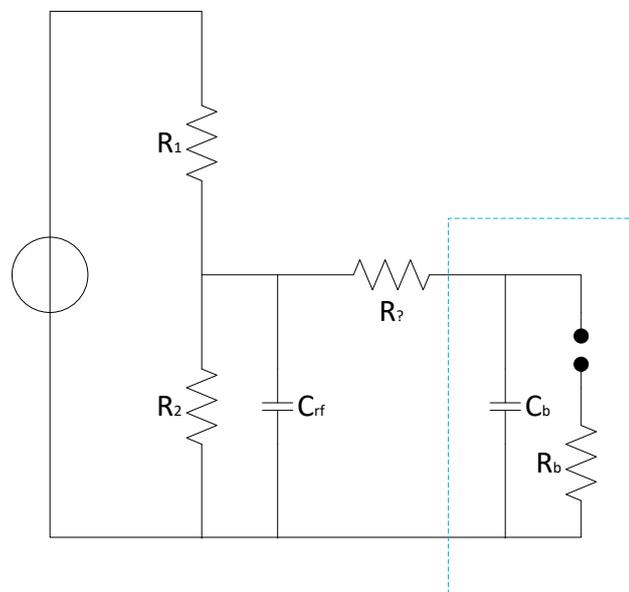


Abbildung 12: Simulation mit Nachbildung der Lagerspannung über ein RC-Netzwerk und Ersatzschaltbild des Lagers (blau umrandet). Der Lagerwiderstand ist abhängig vom Betriebspunkt.



## 4.5 Bewertung der Lagergefährdung

Für die Bewertung der Lagergefährdung wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Gefährdung durch eine einzige Zahl ausdrückt. Dies erlaubt eine übersichtliche und schnelle Bewertung der Gefährdung. Für Entladungslagerströme und RGC müssen dabei zwei verschiedene Ansätze gewählt werden. Durch die Vereinfachung gehen jedoch auch wichtige Informationen verloren, so dass bei den Entladungs-Lagerströmen für eine detailliertere Bewertung zusätzlich ein Histogramm gewählt wurde.

### 4.5.1 Entladungs-Lagerströme (EDM Ströme)

Ausgangspunkt für die Berechnung der Lagergefährdung durch EDM Ströme ist der Verlauf der Lagerspannung. Abbildung 13 zeigt ein Beispiel der gemessenen Lagerspannung. Deutlich erkennbar ist der Einbruch der Lagerspannung, welcher das Auftreten eines EDMs anzeigt.

Es wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher anhand der Steilheit  $\frac{du_{Lager}}{dt}$  das Auftreten von EDMs erkennt. Der Algorithmus speichert zusätzlich die Spannungen  $U_{Lager}$ , welche vor dem Einbruch am Lager anliegen. Grundidee ist, dass diese Spannungen ein Mass für die Energie  $E_{EDM} = \frac{1}{2} C_{ers} U_{Lager}^2 = \frac{1}{2} (C_{rf} + C_b) U_{Lager}^2 \approx \frac{1}{2} C_{rf} U_{Lager}^2$  sind. Die Energie  $E_{EDM}$  wird dabei zum Schmelzen bzw. zur Kraterbildung beitragen.

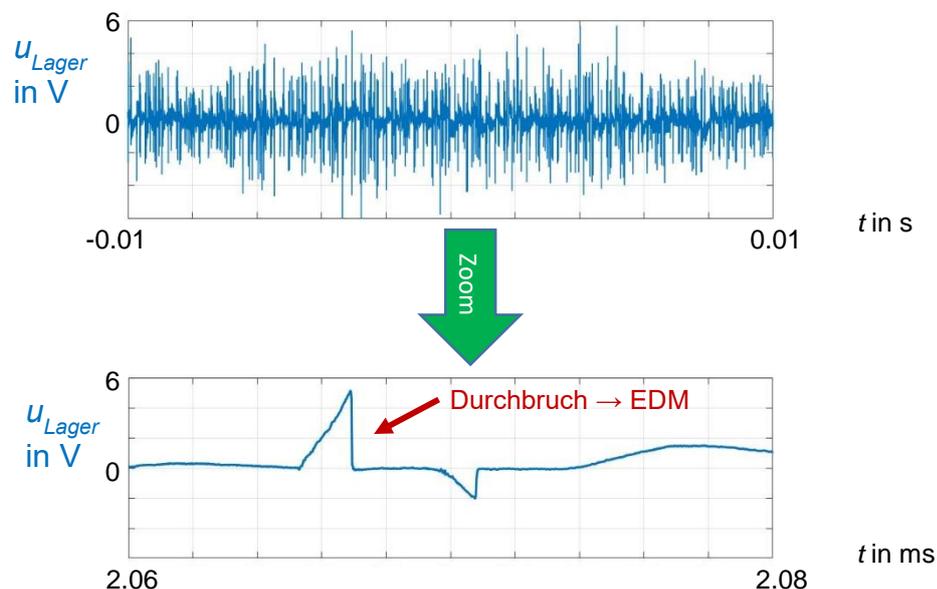


Abbildung 13: Lagerspannung a) über eine Netz-Periode und b) Zoom mit zwei Spannungseinbrüchen aufgrund von Entladungs-Lagerströmen

Würde diese gesamte Energie für das Schmelzen bzw. für das Verdampfen des Metalls eingesetzt, würde für die Krater-Radii gelten:

$$r_{Schmelzen,max} = \sqrt[3]{\frac{C_{rf} U_{Lager}^2}{4.4 \cdot 10^{10}}} \quad \text{und} \quad r_{Verdampfen,max} = \sqrt[3]{\frac{C_{rf} U_{Lager}^2}{28.6 \cdot 10^{10}}}$$



Mit einer typischen Rotor-Gehäuse Kapazität von 1nF gilt somit:

$$r_{\text{Schmelzen,max}} = 0.2833 \cdot U_{\text{Lager}}^{\frac{2}{3}} \frac{\mu\text{m}}{\text{V}^{\frac{2}{3}}} \quad \text{und} \quad r_{\text{Verdampfen,max}} = 0.1518 \cdot U_{\text{Lager}}^{\frac{2}{3}} \frac{\mu\text{m}}{\text{V}^{\frac{2}{3}}}$$

Würde also die gesamte Energie, welche durch den Lager-Durchbruch entsteht, für die Kraterbildung eingesetzt, ergäben sich die Kraterdurchmesser gemäss Abbildung 14. Die tatsächlichen Durchmesser werden kleiner sein, weil zusätzliche Verluste auftreten und nicht alles, was weggeschmolzen wird, vom Krater entfernt wird.

Bei sehr kleinen Durchmessern wird auch langfristig keine Schädigung des Lagers erwartet. Da jedoch die Grenze nicht bekannt ist, wurden hier nur Durchbrüche bei sehr kleinen Spannungen unter 1V nicht berücksichtigt, da der (allenfalls) entstehende Kraterdurchmesser sicher deutlich unter 1µm liegen wird.

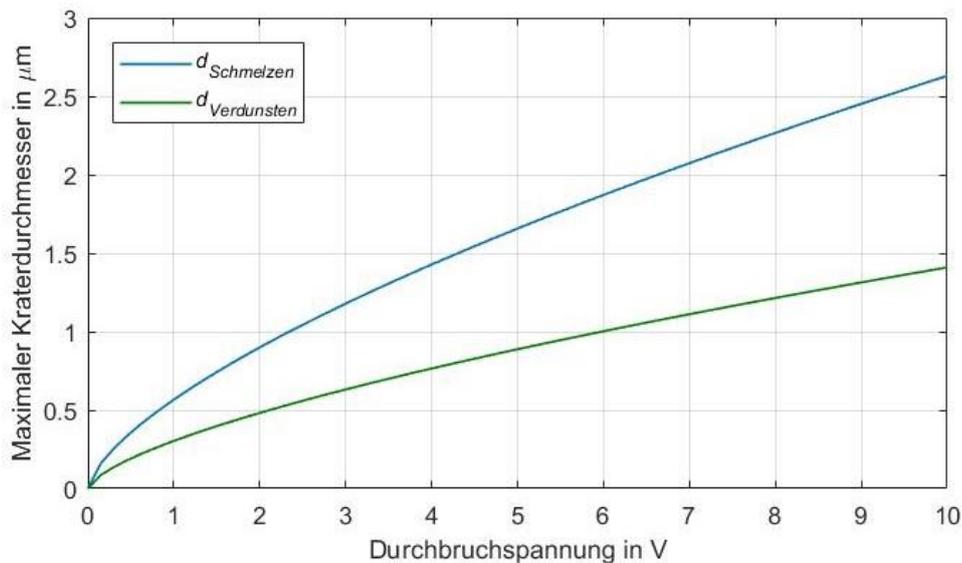


Abbildung 14: Kraterdurchmesser, welcher sich bei vollständiger Nutzung der Energie  $E_{\text{EDM}}$  zum Schmelzen beziehungsweise Verdampfen ergeben würde.

Als Mass für die Schädigung werden daher die Energien aller EDM Durchbrüche während einer Netzperiode aufsummiert, sofern die Durchbruchspannung  $\geq 1\text{V}$  ist.

Damit wirklich nur Durchbrüche des Lagers gezählt werden und nicht zum Beispiel Schwingungen der Lagerspannung ohne Durchbruch, wird zudem die Steilheit des Spannungsabfalls  $\frac{du_{\text{Lager}}}{dt}$  mitberücksichtigt. Nur wenn die Spannung steiler als ein vorgegebener Grenzwert abfällt, wird dies als Auftreten eines Lagerstromes bewertet. Die Grenze wurde empirisch ermittelt und für die folgenden Auswertungen auf 12.5kV/ms gelegt.

$$\text{EDM-Gefährdungszahl } z_{\text{EDM}} = \sum_{\text{Netzperiode}} U_{\text{EDM,Lager}}^2 C_{rf} \quad \text{falls } \frac{du_{\text{Lager}}}{dt} > \text{Grenze und } U_{\text{Lager}} \geq 1\text{V}.$$

Da der Frequenzrichter mit einer PWM-Frequenz von etwa 3kHz betrieben wurde mit einem Schaltmuster, welches vier Schaltungen pro PWM-Zyklus erzeugt, werden etwa 240 Durchbrüche pro Netzperiode auftreten (bei Schwingungen der Gleichtaktspannung und sehr kleinen Durchbruchspannungen sogar mehr). Die Höhe der Durchbruchspannung hängt von einer Vielzahl



von Parametern wie aktuelle Lage des Lagers, Unebenheiten auf dem Lager, Verunreinigungen im Schmiermittel etc. ab. Die Höhe der Durchbruchspannung wird daher oft als stochastisch bezeichnet, das heisst ihre Höhe lässt sich nicht vorhersagen. Die EDM-Gefährdungszahl wird als quadratische Summe von mehreren Hundert Durchbruchspannungen selbst bei gleichen „äusseren“ Bedingungen Schwankungen unterliegt. Ihr Nutzen wird in der Betrachtung über sehr viele Messungen und im Vergleich von verschiedenen Motoren sichtbar: Bei einem Motor mit unveränderter Beschaltung und Lagersystem ändert sich die Gefährdungszahl nicht.

Abbildung 15 zeigt, dass die Gefährdungszahl einer grossen Streuung unterliegt. Sie zeigt die Gefährdungszahlen mit der statistischen Auswertung für 20 Messungen, welche direkt hintereinander beim gleichen Motor durchgeführt wurden. Die Standardabweichung beträgt dabei 23% des Mittelwertes. Auch die Verteilung der einzelnen Durchbruchspannungen sieht für jede der 20 Messung anders aus (Abbildung 16).

Die entwickelte Gefährdungszahl kann also nicht zur Beurteilung einer einzelnen Situation verwendet werden. Hingegen konnte sie im vorliegenden Versuch zum Vergleich der verschiedenen Konfigurationen und ihrer Schädigungen verwendet werden. Zudem konnte die Wirkung beim Einsatz von Erdungsringen sofort erkannt werden, da sich in diesem Fall die Gefährdungszahl in weit grösserem Mass als die Schwankungen verändert hat.

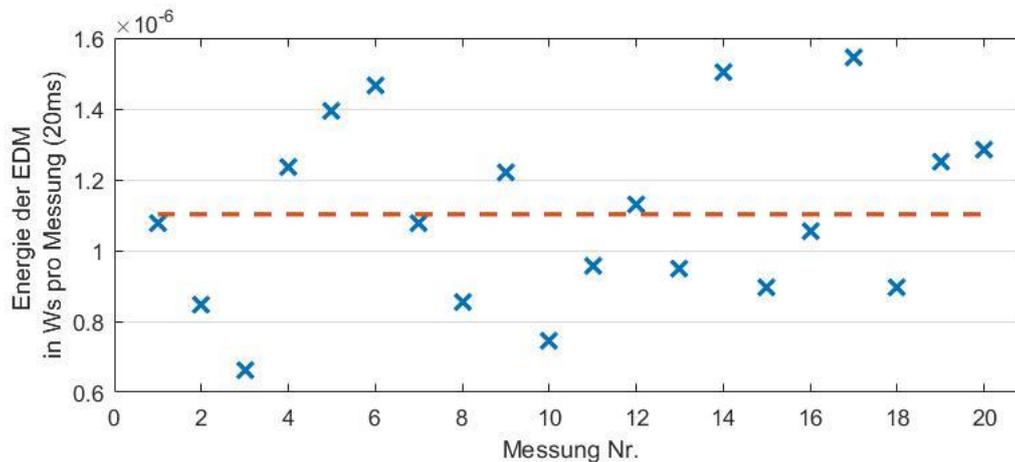


Abbildung 15:  $z_{EDM}$  für 20 Messungen an Motor 3 mit Mittelwert (gestrichelt). Die Standardabweichung beträgt 23% des Mittelwertes.

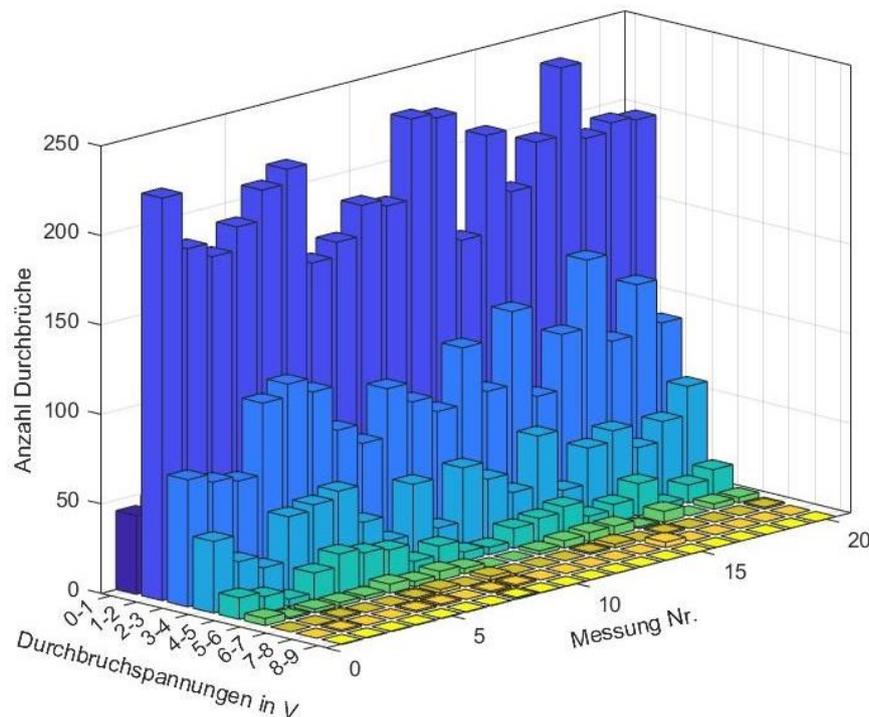


Abbildung 16: Verteilung der EDM für 20 Messungen an Motor 3, wobei die Kategorie «1-2» alle EDM enthält, die bei einer Durchbruchspannung  $1V \leq U_{Lager} < 2V$  auftreten.

#### 4.5.2 Rotorerdströme (Rotor Ground Current, RGC)

Rotorerdströme können nur in den Motoren 5, 6 und 7 auftreten, da die anderen Motoren keine direkte Verbindung zwischen Rotor und Erde aufweisen. Ausgangspunkt für die Berechnung der Lagergefährdung durch Rotorerdströme ist wieder der Verlauf der Lagerspannung. Allerdings kann aus der Lagerspannung allein noch keine Aussage über Rotorerdströme gemacht werden. Durch den gewählten Aufbau bei den Motoren 5, 6 und 7 ist es jedoch möglich, die Lagerströme beziehungsweise die Rotorerdströme direkt zu messen. Abbildung 17 zeigt den Verlauf der Lagerspannung und des Rotorerdstromes.

Die gesamte Energie, die während einer Netzperiode durch Rotorerdströme entsteht, kann über

$$E_{RGC} = \int_0^{T_{Netz}} i_{RGC} * u_{Lager} * dt \approx \int_0^{T_{Netz}} \frac{u_{Lager}^2}{R_{Lager}} dt$$

Angenähert werden. Diese Näherung gilt je besser, desto länger sich das Lager während  $T_{Netz}$  im ohmschen Zustand befindet.

Als Mass für die Schädigung werden daher der RMS-Wert der Lagerspannung über eine Netzperiode gewählt:

$$Z_{RGC} = U_{Lager,RMS}$$

$Z_{RGC}$  ist nur dann aussagekräftig, wenn wirklich Rotorerdströme fließen. Ohne Rotorerdstrom kann aus einem grösseren  $Z_{RGC}$  nicht auf eine grössere Gefährdung des Lagers geschlossen werden. Im Langzeitversuch sind somit nur die Gefährdungszahlen von Motor 5 und 6 aussagekräftig (bei Motor 7 wurden keine Rotorerdströme gemessen, bei allen anderen Konfigurationen kann kein Rotorerdstrom auftreten).

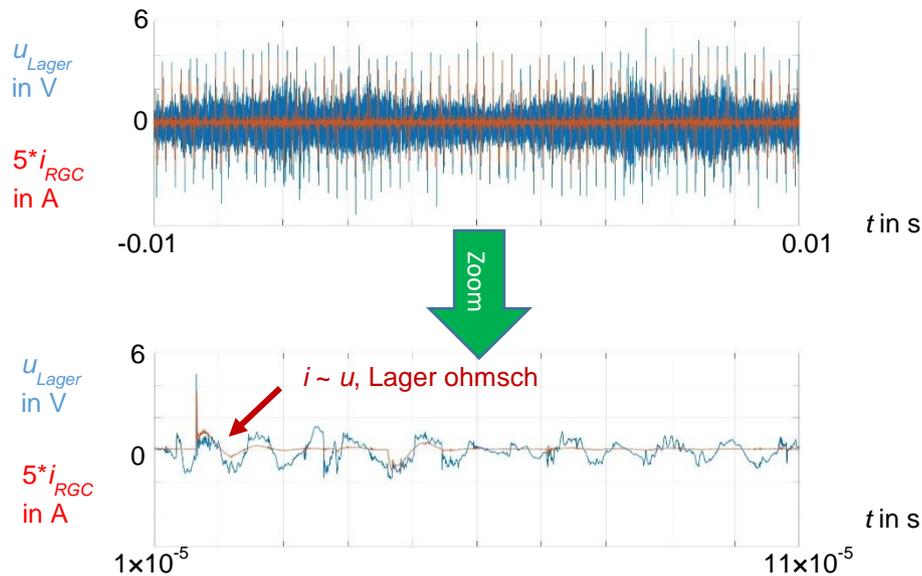


Abbildung 17: Lagerspannung und Lagerstrom a) über eine Netz-Periode und b) Zoom mit ohmschem Strom-/Spannungsverlauf aufgrund von Rotorerdströmen

#### 4.6 Simulation der Gleichtaktspannung für die verschiedenen Konfigurationen

Ursprung aller Lagerströme ist die Gleichtaktspannung. Um die Theorie zur Entstehung der Lagerströme zu überprüfen, werde daher für die verschiedenen Konfigurationen die Gleichtaktspannung (beziehungsweise die Sternpunktspannung) gemessen und simuliert. Abbildung 18 zeigt die an Motor 3 gemessene Sternpunktspannung, bezogen auf das geerdete Motor-Gehäuse.

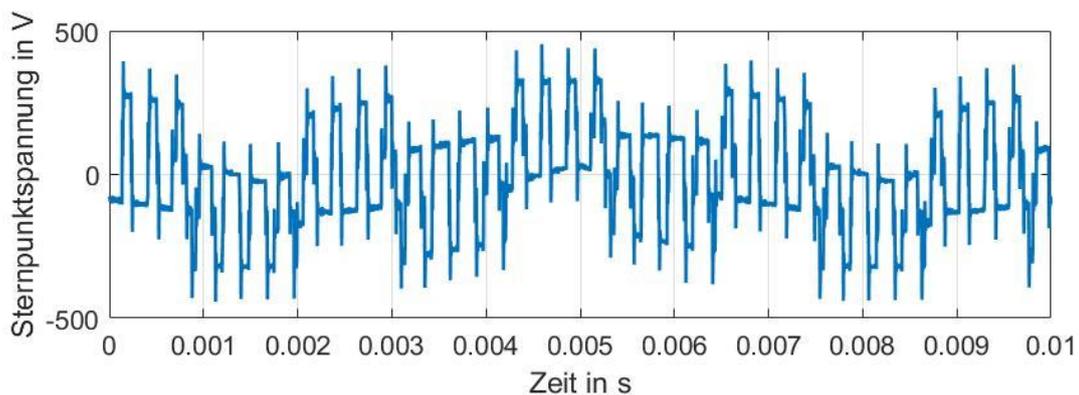


Abbildung 18: Gemessener Verlauf der Sternpunktspannung an Motor 3 über eine halbe Netzperiode

Für den gewählten Betrieb verhält sich der Motor-Sternpunkt in Bezug auf die Gleichtaktspannung näherungsweise wie eine Kapazität  $C_0$ . Diese setzt sich gemäss Abbildung 1 zusammen aus

$$C_0 = 3C_{wf} + \frac{C_{wr} \cdot (C_{rf} + 2C_b)}{C_{wr} + C_{rf} + 2C_b} \approx 3C_{wf}$$

Mit den Näherungen gemäss (1) folgt für eine angenommene Achsenhöhe von  $H = 90\text{mm}$



$$3C_{wf} = 3 \cdot \left( 0.0024 \cdot \frac{H^2}{\text{mm}^2} - 0.039 \cdot \frac{H}{\text{mm}} + 2.2 \right) \text{nF} = 1.9 \text{nF}$$

Die Frequenzumrichter-Motor-Sternpunkt Verbindung verhält sich näherungsweise wie ein RLC Schwingkreis, die Spannung über  $C_0$  entspricht der Sternpunktspannung.

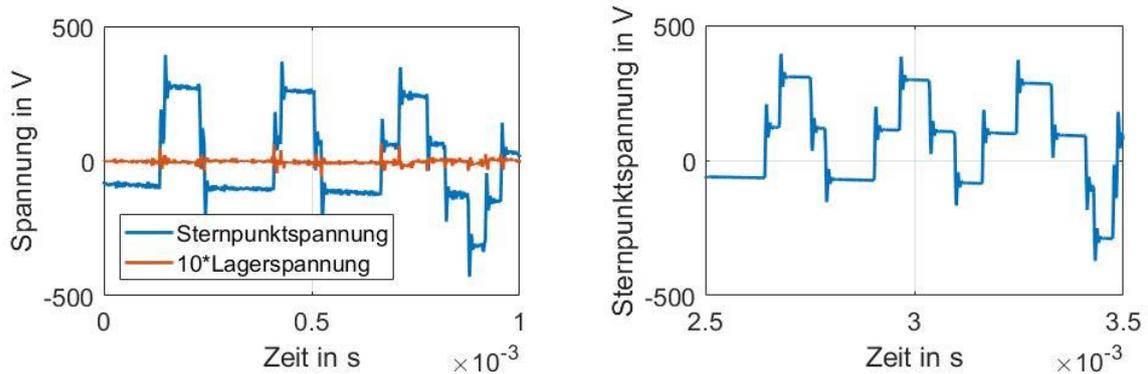


Abbildung 19: Sternpunktspannung an Motor 3 (Blau), links gemessen, rechts simuliert. Links zudem gemessene Lagerspannung (Rot).

Abbildung 19 zeigt den gemessenen und den simulierten Verlauf der Sternpunktspannung für Motor 3. Bei jedem Schalten ändert sich die Gleichtaktspannung am Inverter sehr schnell und bewirkt bei der Sternspannung ein zusätzliches (Über-) Schwingen.

Die Motoren 1, 2, 3, 6, 7, 8 und 11 haben in etwa die gleiche Gleichtaktspannungsform. Ohne Bürstenringe wird damit die gleiche Gefährdung durch Entladungs-Lagerströme erwartet.

Bei Motor 4 und 5 wird durch die zusätzliche Induktivität die Gleichtaktspannung verändert. Abbildung 20 zeigt den gemessenen und simulierten Verlauf für Motor 4. Durch die höhere Amplitude der Schwingung wird nicht nur das Lager stärker belastet, sondern die zusätzliche Schwingung führt dazu, dass das Lager zwischen zwei Schaltvorgängen sogar mehrmals durchbrechen kann. Der Verlauf bei Motor 5 ist aufgrund der gleichen Induktivität ähnlich, die Erdung des Rotors statt des Gehäuses hat kaum einen Einfluss. Bei Motor 5 ist jedoch die Gefährdung durch Rotorerdströme viel grösser, so dass die EDM-Gefährdung nicht ins Gewicht fällt.

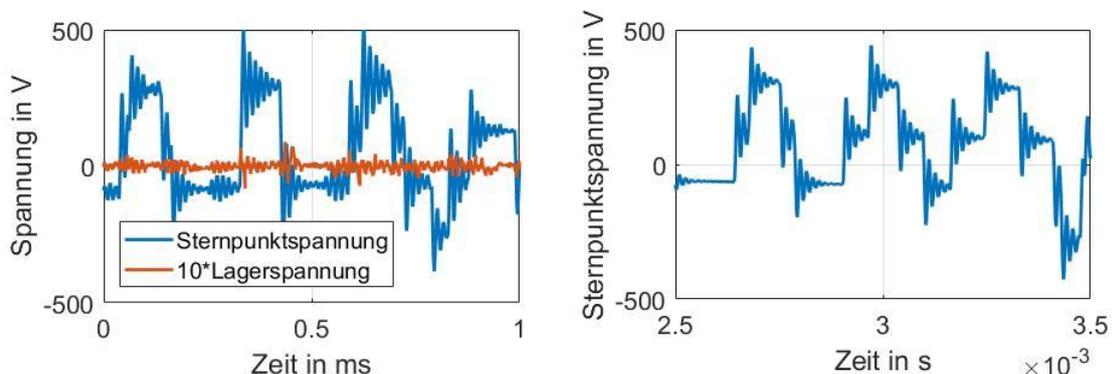


Abbildung 20: Sternpunktspannung an Motor 4 (Blau), links gemessen, rechts simuliert. Links zudem gemessene Lagerspannung (Rot).

Bei Motor 9 wiederum ist der Einfluss der Luft-Spule (im Vergleich zur Gleichtakt-Spule bei Motoren 4 und 5 deutlich kleiner) so gering, dass das Lager nicht stärker beschädigt wird. Bei Motor 10



schliesslich ist der Verlauf der Sternpunktspannung gegenüber dem Gehäuse nicht aussagekräftig, da das Gehäuse gar nicht geerdet ist. Hier hat erst das Messen der Lagerspannung gezeigt, dass auch hier die gleiche Gefährdung wie zum Beispiel bei Motor 3 zu erwarten ist.

In Abbildung 20 ist bei der Messung deutlich zu erkennen, dass zwischen 0.2ms und 0.3ms eine neue Anregung der Sternpunktspannung stattfindet, obwohl der Inverter von Motor 4 nicht schaltet. In Anhang 9.3 wird gezeigt, dass dies vom gleichzeitigen Betrieb aller FUs am gleichen Netz herrührt. Im Vergleich zu den Schwingungen durch das «eigene» Schalten sind jedoch die Amplituden der zusätzlichen Schwingungen so klein, dass sie keine EDM Durchbrüche verursachen können. Auch auf die Rotor-Erdströme haben die Schwingungen keinen grossen Einfluss.

## 4.7 Gefährdungszahlen im Langzeitverlauf

Abbildung 21 bis Abbildung 24 zeigen die Auswertung der EDM Gefährdungszahlen für die verschiedenen Motoren über die gesamte Laufzeit. Ausserdem wird für die Rotorerdstrom-gefährdeten Motoren 5 bis 7 die RGC-Gefährdungszahl dargestellt.

Es fällt auf, dass bei den Motoren 1 und 2 sowie 5 und 6 entgegen der Erwartungen in Tabelle 1 EDMs auftreten.

Die Motoren 1 und 2 wurden durch Bürstenringe geschützt. Der Verlauf der EDM-Gefährdung zeigt, dass der anfängliche Schutz nach kurzer Laufzeit nicht mehr gegeben war. Die Verwendung von Silberleitlack (Motor 2 in der Woche 10/07, Motor 1 in der Woche 24/07) führte zur sofortigen Eliminierung der EDMs. Zur Überprüfung wurden die Lager von Motor 2 ausgewechselt und der Motor extern wieder mit neuen Bürstenringen bestückt. Bis zum Ende des Versuches sind keine neuen EDMs aufgetreten, so dass davon ausgegangen werden muss, dass das Problem an der ersten Montage gelegen hat.

Um eine weitere Gegenmassnahme testen zu können, hat der Industriepartner Mechmine isolierte Lager beschafft, welche Mitte November bei Motor 1 eingebaut wurden. Die «alten» Lager an Motor 1 wurden daher ausgewechselt.

Bei den Motoren 5 und 6 wurde davon ausgegangen, dass EDM und Rotorerdströme nicht gleichzeitig auftreten (13). Diese Vermutung hat sich in der Praxis als falsch erwiesen. Der Vergleich zwischen  $E_{EDM}$  und  $E_{RGC}$  (berechnet aus der Strommessung) zeigt jedoch, dass die Belastung durch die Rotorerdströme beinahe 100 Mal so hoch ist. Exemplarisch sind hier die Vergleiche für eine der Messungen (17. Oktober) aufgezeigt:

- Motor 5:  $E_{EDM} = 0.44 \mu J$ ,  $E_{RGC} = 58.3 \mu J$
- Motor 6:  $E_{EDM} = 0.52 \mu J$ ,  $E_{RGC} = 39.04 \mu J$

Es war zu erwarten, dass die Motoren 5 und 6 die stärkste Lagerschädigung aufzeigen werden. Der Vergleich der RGC-Zahlen lässt eine stärkere oder schnellere Schädigung bei Motor 5 erwarten.

Bei Motor 7 traten keine Rotor-Erdströme auf. Die EDM-Gefährdungszahl ist etwas tiefer als bei den anderen EDM-Motoren. Durch die Versuchsanordnung mit der Rotor-Erdung entsteht eine zusätzliche Verbindung (RL-System) zwischen Rotor und Gehäuse (siehe Abbildung 1) wird das Ersatzschaltbild verändert, so dass insgesamt etwas weniger und weniger hohe Entladungsströme auftreten.

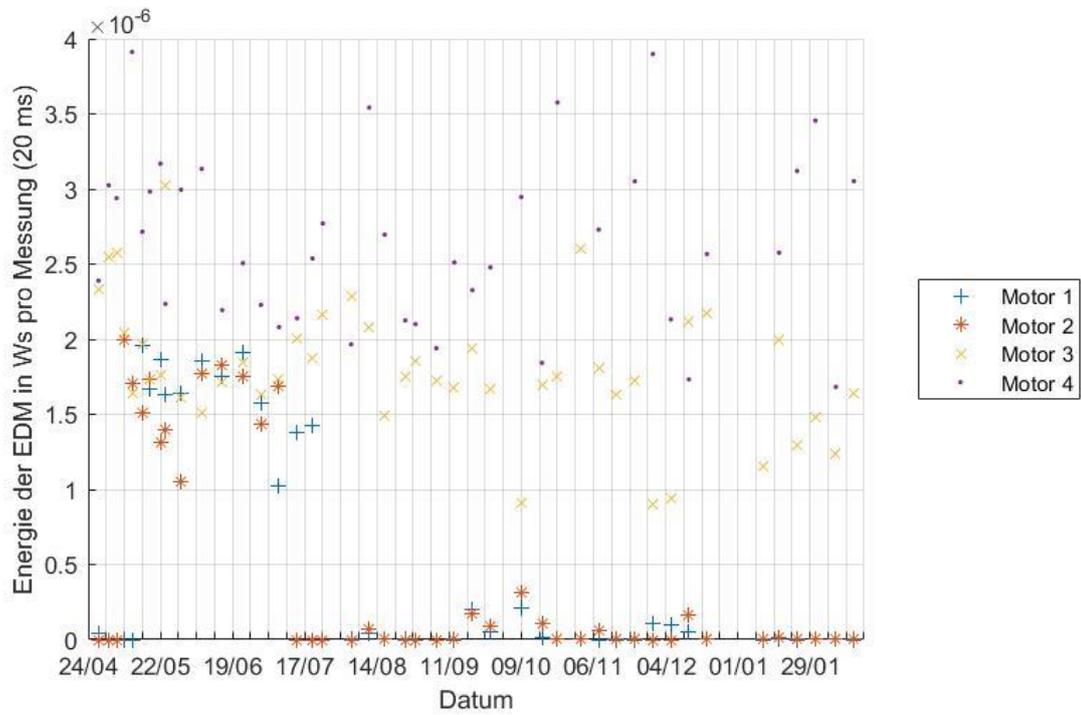


Abbildung 21:  $z_{EDM}$  für die Motoren 1 bis 4

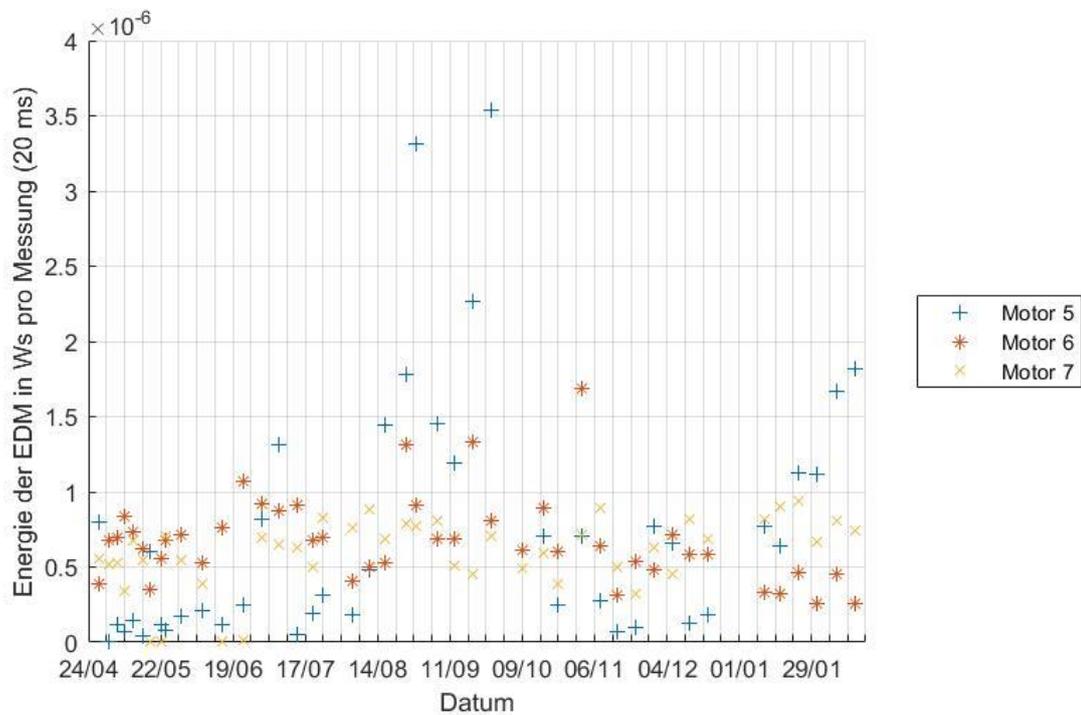


Abbildung 22:  $z_{EDM}$  für die Motoren 5 bis 7

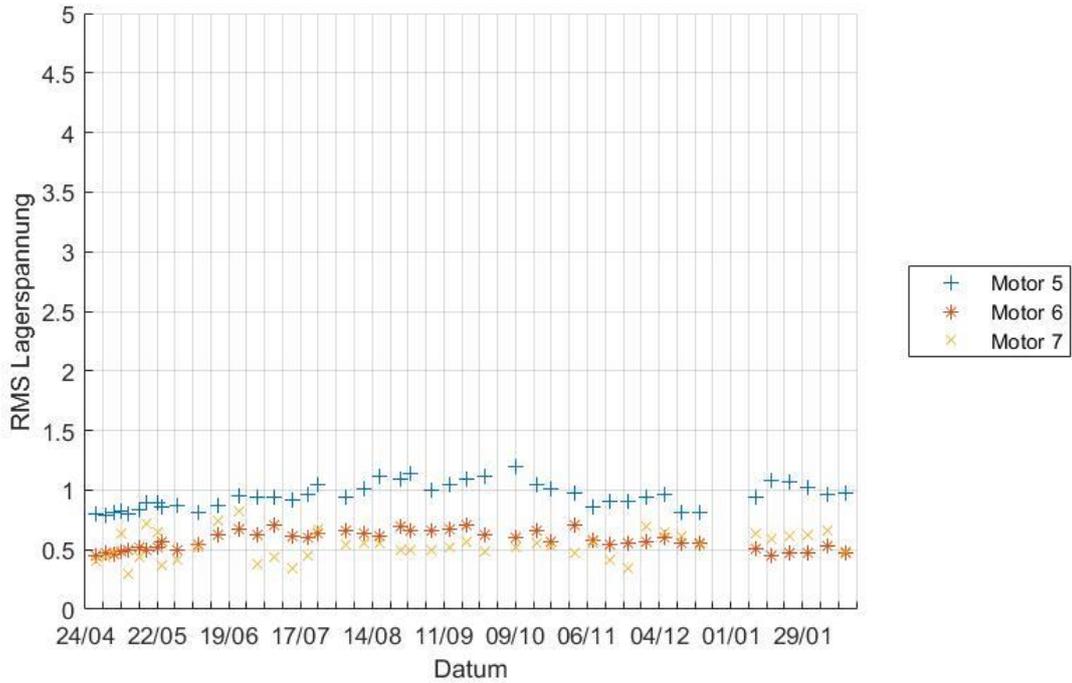


Abbildung 23:  $z_{\text{REG}}$  für die Motoren 5 bis 7

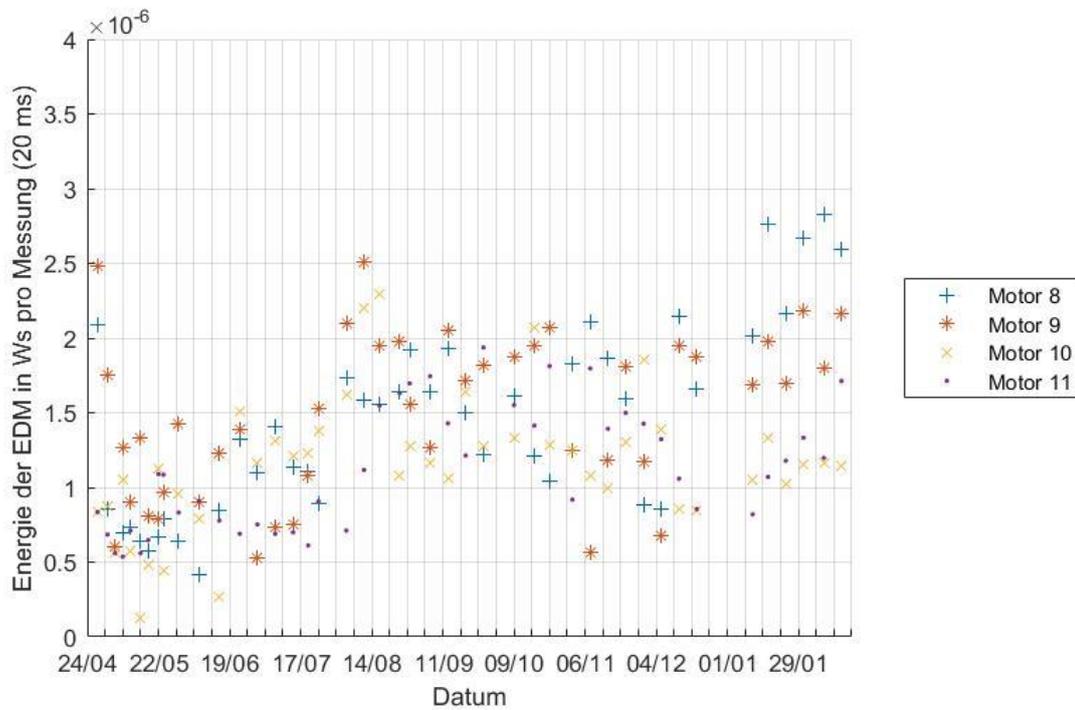


Abbildung 24:  $z_{\text{EDM}}$  für die Motoren 8 bis 11



Es fällt auf, dass die EDM-Gefährdungszahlen für alle Motoren in der gleichen Grössenordnung sind, auch wenn die einzelnen Werte wie erwartet relativ stark schwanken. Einzige Ausnahme bilden einige Messungen bei Motor 5. Genauere Analysen haben ergeben, dass hier einige wenige Durchbrüche bei sehr hohen Spannungen stattgefunden haben ( $>30V$ ). Da die Belastung durch die Rotorerdströme jedoch deutlich höher ausfällt, sind diese Ausreisser nicht von Bedeutung.

Allgemein sind die Durchbruchspannungen im Versuch deutlich kleiner, als normalerweise in der Literatur angegeben. Mit ein Grund dafür sind sicher die hohen Lagertemperaturen aufgrund der Styropor-Blöcke. Bereits die Messungen am Lagerprüfstand haben gezeigt, dass bei tiefen Temperaturen die Durchbruchspannung deutlich höher ist als bei hohen Temperaturen. Die Aussagen über die Wirksamkeit der Gegenmassnahmen sind jedoch allgemeingültig.

Über den Zeitverlauf der EDM-Gefährdungszahl konnten zwar Probleme einzelner Motoren erkannt werden, für einen abschliessenden Vergleich der Motoren ist jedoch die statistische Auswertung in Abbildung 25 aussagekräftiger. Dabei ist neben dem Median (rot) jeweils die 25% bzw. 75% Perzentil (blaue Box) über alle Messungen beziehungsweise Berechnungen der EDM-Gefährdungszahl dargestellt. Es lassen sich grob vier Gruppen bilden, welche für den Vergleich mit der optischen Auswertung verwendet werden sollen:

- Motoren 1 und 2 mit sehr kleinem  $z_{EDM}$  dank Schutzmassnahmen
- Motor 7 mit kleinem  $z_{EDM}$  (5 und 6 sind wegen der dominanten Rotorerdströme nicht dabei)
- Motoren 3 und 8 bis 11 mit mittlerem  $z_{EDM}$
- Motor 4 mit hohem  $z_{EDM}$

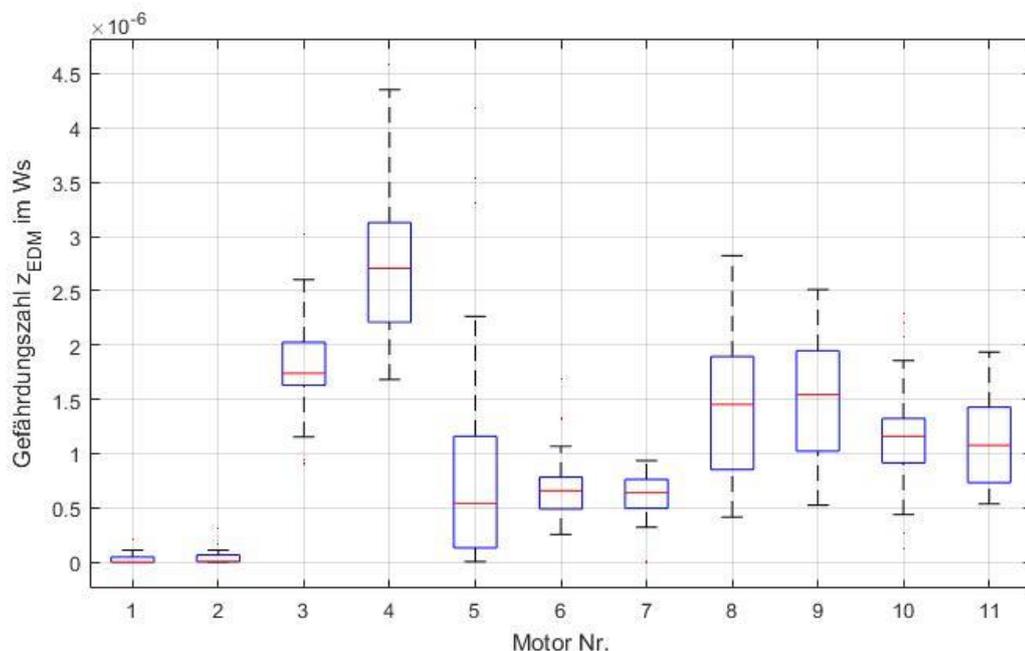


Abbildung 25: Statistische Auswertung über alle Messungen bzw. Berechnungen von  $z_{EDM}$  mit Median (rot) und 25% bis 75% Perzentil Box (blau). Für die Motoren 1 und 2 wurden nur die Messungen nach dem Ersatz der Lager berücksichtigt.



## 4.8 Optische Auswertung der Lager

Für die Bewertung der Lager-Schädigung wurden die Lager der Motoren aufgeschnitten und optisch untersucht. Die Lager der Motoren 1, 3 und 8 wurden dabei nicht berücksichtigt, da diese Motoren für weitere Langzeittests verwendet werden. Von Motor 1 sind jedoch die beiden Lager, welche vor dem Wechsel auf das Hybridlager verwendet wurden, ausgewertet worden.

	Stereomikroskop	Detaillierte Auswertung	Laufzeit in Wochen
<b>Motor 11</b>	Graue Spur	Ja	45
<b>Motor 10</b>	Graue Spur	Nein	45
<b>Motor 9</b>	Graue Spur	Nein	45
<b>Motor 8</b>	Nicht ausgewertet	Nein	45
<b>Motor 7</b>	Graue Spur	Nein	45
<b>Motor 6</b>	Riffel	Nein	45
<b>Motor 5</b>	Riffel	Ja	45
<b>Motor 4</b>	Stellenweise Riffel	Nein	45
<b>Motor 3</b>	Nicht ausgewertet	Nein	45
<b>Motor 2 (ab Woche 04/09)</b>	Leichte graue Spur	Ja	25
<b>Motor 2 (bis Woche 21/08)</b>	Graue Spur	Nein	17 (9 ohne Schutz)
<b>Motor 1 (bis Woche 30/10)</b>	Graue Spur	Nein	27 (11 ohne Schutz)

Tabelle 3: Optische Auswertung der Lager

Alle aufgeschnittenen Lager wurden mit dem Stereomikroskop ausgewertet. Hier sind bei allen Lagern entweder graue Spuren oder gar Riffel erkennbar.

Sowohl bei den EDM Strömen als auch bei den RGC bricht im Normalfall nur eines der beiden Lager durch. Welches der Lager zuerst durchbricht, hängt von vielen Parametern wie Grösse des Lagers und Lagertemperatur ab. Im vorliegenden Aufbau sollten die Lager alle gleich belastet sein. Welches Lager häufiger durchbricht und somit mehr geschädigt wird, war daher nicht voraussagbar und es wurden jeweils beide Lager (NDE und DE) untersucht. Bis auf Motor 4 und 7 sind jedoch bei allen Motoren beide Lager in etwa gleich stark geschädigt.

Für eine genauere Untersuchung wurden die sechs Lager der Motoren 2 (ab Woche 04/09), 5 und 11 bei der Firma Rieter detaillierter untersucht. Diese Untersuchung hat ergeben, dass alle sechs Lager sichtbare Spuren aufweisen (15). Die «Krater» bei allen Lagern sind relativ klein (Durchmesser unter 1µm), wobei die Lager des Motors 6 am Aussenring bereits Riffelbildung durch Stromdurchgang aufweisen. Gemäss Bericht konnten keine Defekte wie Ausbrüche, übermässig viele Unebenheiten oder Verschmutzung festgestellt werden.

Während Riffelbildung fast immer auf Stromdurchgänge im Lager zurückzuführen sind, können graue Spuren auch andere Ursachen wie etwa mechanischen Abrieb haben. Um zu überprüfen, ob die «Krater» wirklich durch Stromdurchgang entstanden sind, wurden für je ein Lager der drei Motoren jeweils drei Schriffe in Umfahungsrichtung angefertigt. Dabei hat sich gezeigt, dass die bei Stromdurchgang entstehende Umschmelzzone bei Motor 6 deutlich tiefer ist als bei Motor 11, während das Lager bei Motor 2 keine Umschmelzzone zeigt.

Abbildung 26 zeigt von den detailliert untersuchten Lagern Aufnahmen jeweils eines der Lager-Aussenringe. Die Aufnahmen links wurden mit dem Stereomikroskop an der ZHAW durchgeführt, die



Aufnahmen rechts mit dem Elektronenmikroskop (1000.0x mit 15.0kV) stammen aus dem detaillierten Bericht von Rieter (15). Aufnahmen mit dem Stereomikroskop wurden von allen Lagern angefertigt, um einen Vergleich mit den detaillierten Auswertungen zu erhalten.

Wie erwartet, sind die Lager der Motoren 5 (Abbildung 28) und 6 deutlich am stärksten geschädigt. Dies zeigt sich in der Riffelbildung. Optisch lässt sich die Stärke der Schäden in 5 und 6 nicht unterscheiden. Die Vibrationsdaten geben aber einen Hinweis darauf, dass die Schäden in Motor 5 vermutlich früher entstanden sind, was aufgrund der grösseren RGC-Gefährdungszahl bei Motor 5 zu erwarten war.

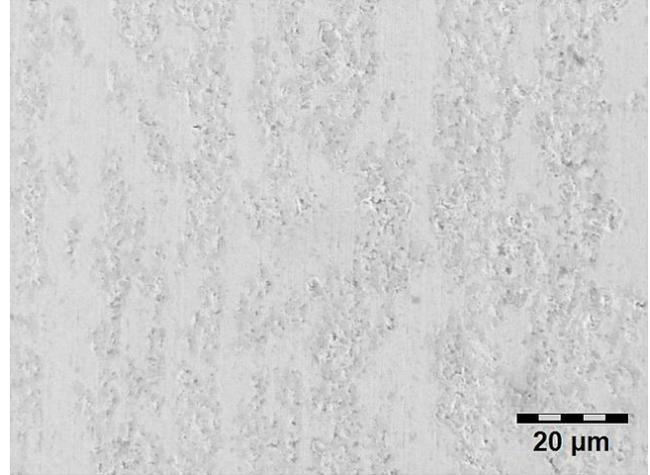
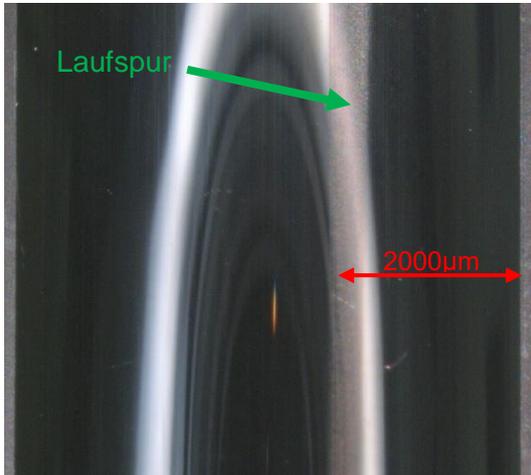
Die Lager von Motor 4 (Abbildung 27) sind mit stellenweiser Riffelbildung auch relativ stark geschädigt, wobei die Riffelbildung im NDE Lager (noch) kaum ausgeprägt ist. Bei den Motoren 4 bis 6 ist somit die Schädigung der Lager sicher auf Lagerströme zurückzuführen.

Die übrigen Lager weisen eine graue Spur auf. Die graue Spur bei den Lagern von Motor 7 ist dabei optisch nicht von den Lagern mit mittlerem  $z_{EDM}$  zu unterscheiden. Die Spuren beider Lager (ab Woche 04/09) von Motor 2 wirken deutlich schmaler und weniger ausgeprägt als die meisten anderen Spuren.

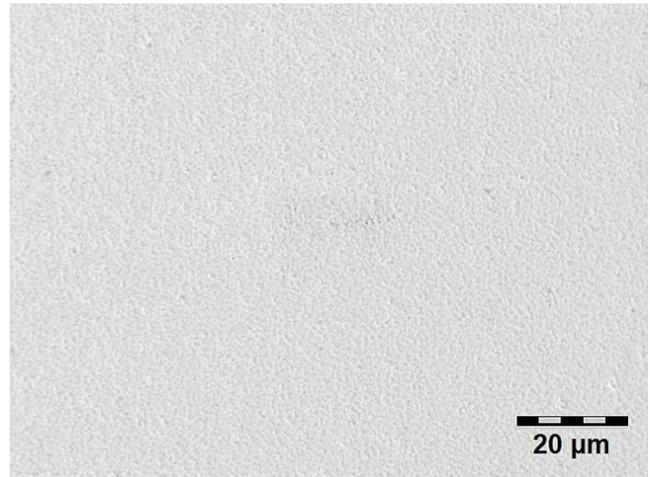
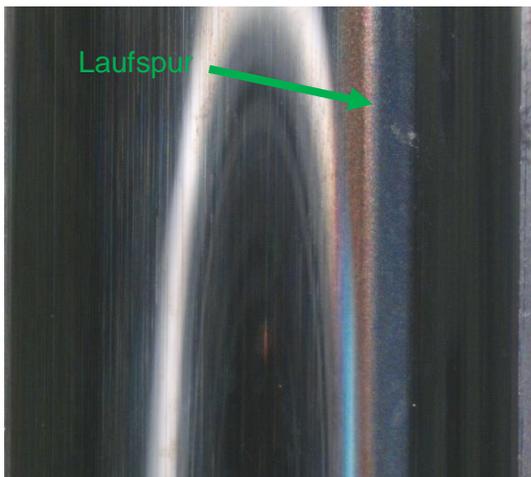
Die optische Auswertung der Lager hat somit die aufgrund der Gefährdungszahl erwartete Beanspruchung der Lager bestätigt. Ob die kleinen  $z_{EDM}$  bei Motor 7 weniger schädigen als die mittleren  $z_{EDM}$  bei den Motoren 3 und 8 bis 9, ist nicht erkennbar. Erstaunt hat einzig die optische Auswertung der Lager des Motors 2. Ob sich bei Motor 2 aufgrund der kürzeren Lager-Laufzeit noch keine (genug tiefe) Umschmelzzone ausgebildet hat, oder ob die «Krater» nicht durch Stromdurchgang entstanden sind, kann nicht abschliessend beantwortet werden. Aufgrund der Lagerspannungs-Messung und Auswertung, bei denen bis auf eine Messung die Abbruchspannung immer unter 2V war und bei dieser einen Messung nur wenige Werte bis 3V detektiert wurden, wird stark vermutet, dass keine Schädigung durch Lagerströme auftrat. Auch der Vergleich mit den „alten“ Lager von Motor 2 (bis Woche 04/09, davon neun Wochen ohne Schutz), welche insgesamt etwa gleich lange beansprucht wurden wie die Lager ab Woche 04/09, lässt zumindest eine weniger starke Schädigung vermuten.



Lager Motor 2:



Lager Motor 11:



Lager Motor 6:

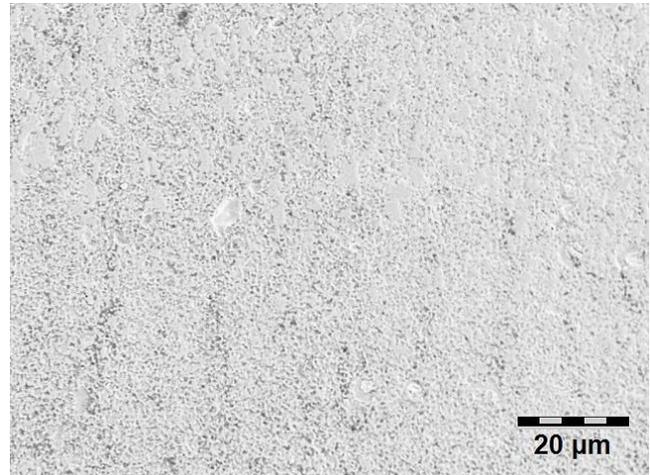
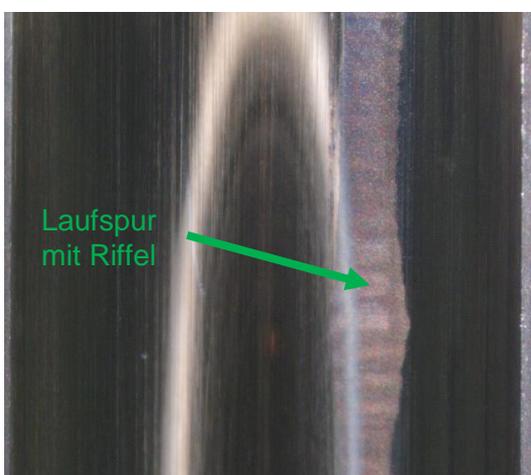


Abbildung 26: Aufnahmen jeweils eines der Lager-Aussenringe. Aufnahme links jeweils mit dem Stereomikroskop an der ZHAW, Aufnahme rechts mit dem Elektronenmikroskop (1000.0x mit 15.0kV) aus dem detaillierten Bericht (15).

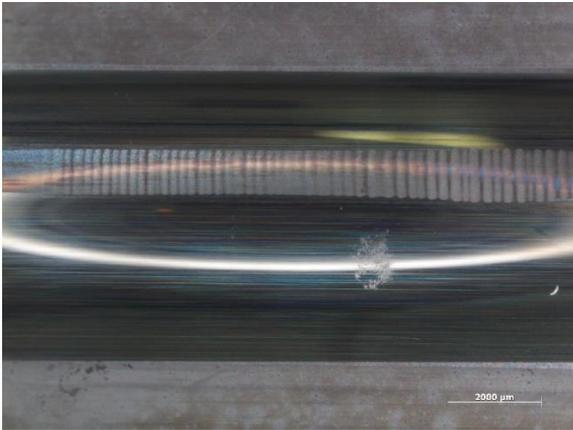


Abbildung 27: Aufnahmen mit Stereomikroskop, Motor 4, DE.

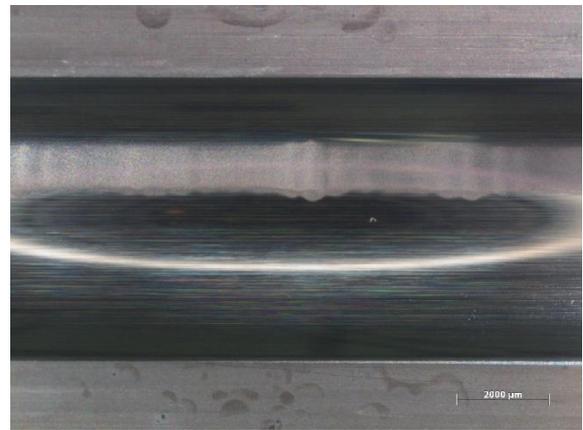


Abbildung 28: Aufnahmen mit Stereomikroskop, Motor 5.

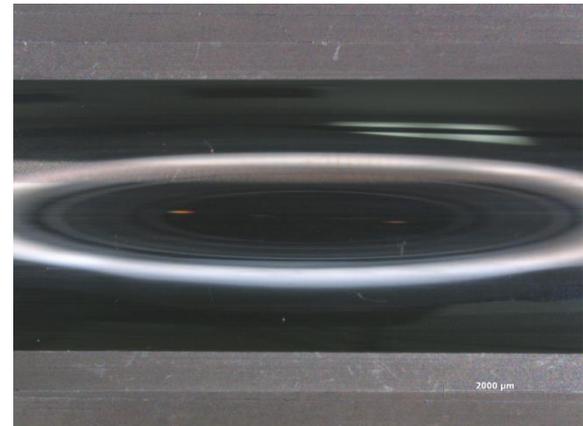
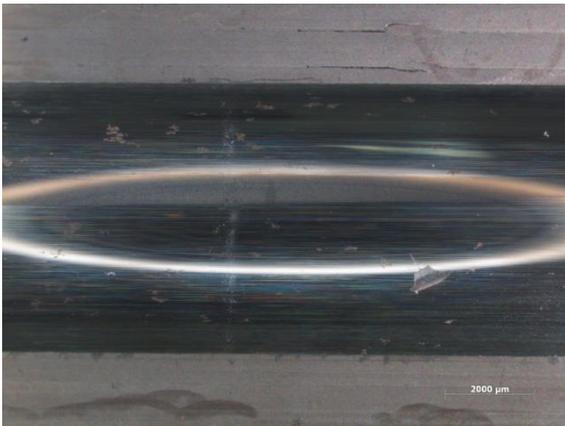


Abbildung 29: Aufnahmen mit dem Stereomikroskop an der ZHAW, Motor 2; links „altes“ Lager, welches sieben Wochen mit nicht funktionierendem Aegis-Ring betrieben wurde (die grösseren Flecken sind auf den mehrmaligen Transport der aufgeschnittenen Lager zurückzuführen), rechts „neues“ Lager.



## 4.9 Alterungsprozess im Langzeitversuch

Ausgehend von den optischen Untersuchungen, der Theorie zur Kraterbildung und den Messungen, können folgende Aussagen zur Lageralterung gemacht werden:

- Die Kratergrösse hängt von der Lagerenergie und damit bei den EDMs auch von der Durchbruchspannung ab.
  - Die im Lager umgesetzte Energie pro Netzschwingung war in Motor 6 rund 40 Mal höher als in Motor 11 (vgl. 4.7). Die Krater in Motor 6 sind deutlich grösser als in Motor 6.
- Auch graue Spuren zeigen sich in den Vibrationsdaten, siehe zum Beispiel Motor 9 in 4.12
- Die im Lager umgesetzte Gesamtenergie allein ist kein Indikator für die Lagerschädigung. Wenige Durchschläge bei hoher Energie schädigen mehr als viele Durchschläge bei kleiner Energie.
  - Die Vibrationsdaten zeigen, dass Motor 4 schon zur Hälfte der Laufzeit einen sehr starken Anstieg in der Varianz aufzeigt. Es ist somit zu vermuten, dass die Riffelbildung zu diesem Zeitpunkt schon stattgefunden hat. Anhand der Gefährdungszahl kann aber abgeschätzt werden, dass die bis dahin umgesetzte Energie jedoch kleiner ist, als die insgesamt in Motor 11 umgesetzte Energie. Trotzdem weist Motor 11 nur eine graue Spur auf.

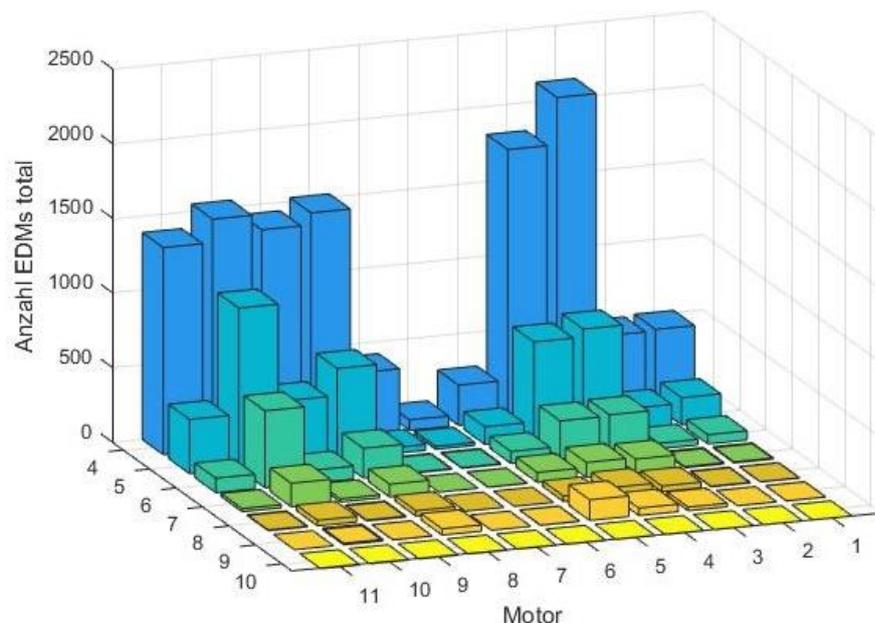


Abbildung 30: Verteilung der Anzahl EDM pro Durchbruchspannung über alle Messungen während des Langzeitversuches für alle elf Motoren. Die Kategorie 4 enthält dabei alle Durchbruchspannungen zwischen 4V und 5V.

Insgesamt zeigt sich, dass schon nach kurzen Laufzeiten Schäden auftreten können und dass der Alterungsmechanismus zwar mit der im Lager umgesetzten Energie zusammenhängt, dass dieser Zusammenhang jedoch nicht linear ist. Die oben genannten Beobachtungen bei Motor 4 und 11 stärken zudem die Vermutung, dass graue Spuren nicht durch eine längere Laufzeit in Riffel übergehen, sondern dass für die Riffelbildung tatsächlich Durchschläge bei höherer Energie ausschlaggebend sind. Abbildung 30 zeigt für die Anzahl der EDMs pro Durchbruchspannung, aufsummiert über alle Messungen während des Langzeitversuches.



## 4.10 Wirksamkeit der Gegenmassnahmen bei kleinen Maschinen

Der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Lagerschädigung wird in Tabelle 4 nochmals zusammengefasst.

	Stereomikroskop	Schaden	Einflussgrösse
<b>Motor 11</b>	Graue Spur	+	Erdung (nur Draht)
<b>Motor 10</b>	Graue Spur	+	Erdung (keine Erdung)
<b>Motor 9</b>	Graue Spur	+	Erdung (mit „Schleife“)
<b>Motor 8</b>	Nicht ausgewertet	+	Erdung (nur Schirm)
<b>Motor 7</b>	Graue Spur	+	Rotorerdung (Stator besser geerdet)
<b>Motor 6</b>	Riffel	+++	Rotorerdung (Stator nicht geerdet)
<b>Motor 5</b>	Riffel	+++	Rotorerdung (Stator nicht geerdet)
<b>Motor 4</b>	Stellenweise Riffel	++	Gleichtaktdrossel
<b>Motor 3</b>	Nicht ausgewertet	+	Erdung (Schirm und Draht)
<b>Motor 2</b>	Leichte graue Spur	0	Schutz (Aegis-Ring,)
<b>Motor 2</b>	Graue Spur	+	Schutz (nicht wirksam, 1/4 Aegis-Ring)
<b>Motor 1</b>	Graue Spur	+	Schutz (nicht wirksam, Aegis-Ring,)
<b>Motor 1</b>	Nicht ausgewertet	0	isoliertes Lager

Tabelle 4: Schadensbewertung und Einflussgrössen. (Bei fehlender mikroskopischer Auswertung wurde die Gefährdungszahl als Indikator verwendet)

Im Detail können folgende Aussagen über die Wirksamkeit der Gegenmassnahmen getroffen werden.

Wird der Rotor nicht geerdet, so treten nur Entladungs-Lagerströme (EDMs) auf. Für EDMs gelten folgende Aussagen:

- Erdung des Gehäuses: Motoren 3, 8, 9, 10, 11  
Die Art der Erdung des Gehäuses hat im Normalfall keinen Einfluss auf die EDMs. Da für die Entstehung der EDMs die Höhe der Gleichtaktspannung und nicht die Steilheit der Schaltflanken verantwortlich ist, hat auch eine bessere hochfrequente Erdung keinen positiven Einfluss.
  - Beispiel Vergleich Motor 10 ohne Erdung und Motor 11 ohne HF Erdung und Motor 3 mit HF Erdung über Schirm: Vergleichbares Schadensbild
- Gleichtaktdrossel: Motor 4  
Für eine Verringerung der EDM muss die Gleichtaktspannung am Motor verringern oder unterdrückt werden. Eine Gleichtakt-Drossel verhindert daher die EDMs nicht; im ungünstigsten Fall vergrössert sie sogar die Gleichtaktspannung am Motor.
  - Beispiel Vergleich Motor 4 mit Drossel und Motor 11 ohne Drossel: Riffelbildung bei Motor 4 aufgrund von Spannungsüberschwingern wegen der Drossel gegenüber grauer Spur bei Motor 11
- Filter:  
Filter können nur dann die EDMs verringern oder unterdrücken, wenn Sie die Gleichtaktspannung am Motor verringern oder unterdrücken.
- Bürstenringe: Motor 1 und Motor 2  
Bei korrekter Installation werden EDMs durch Montage eines Bürstenrings verhindert.



- Beispiel Vergleich Motor 2 mit funktionierendem Schutz und Motor 2 ohne Schutz: Deutlich geringere graue Spur mit Schutz; Fast keine Durchbrüche mit isoliertem Lager gemessen
- Isolierte Lager und Hybridlager: Motor 1, zweite Hälfte  
Bei korrekter Installation werden EDMs durch Montage zweier isolierter Lager verhindert.
  - Beispiel Vergleich Motor 1 mit isoliertem Lager und Motor 1 ohne Schutz: Keine messbaren Durchbrüche mit isoliertem Lager, viele Durchbrüche bei fehlendem Schutz
- Schaltfrequenz des Inverters:  
Die Schaltfrequenz des Inverters ist direkt proportional zur Schädigung der Lager. Bei einer Verdoppelung der Schaltfrequenz treten ohne Gegenmassnahmen in etwa doppelt so viele EDMs auf, was zu einer früheren Schädigung der Lager führt.
- Flankensteilheit des Inverters:  
Die Flankensteilheit des Inverters hat keinen direkten Einfluss auf EDMs. Indirekt kann die Spannungsüberhöhung, welche durch lange Zuleitungskabel zustande kommen kann, zu mehr EDMs oder höheren EDMs führen.
- Last:  
Die Last der Maschine kann auf zwei Arten Einfluss nehmen. Durch die Last werden im Lager die Dicken der Schmiermittel-Schichten verändert. Bei kleineren Schichtdicken schlägt das Lager bereits bei kleineren Lagerspannungen durch. Zusätzlich kann durch die Last auch die Temperatur im Lager beeinflusst werden. Bei höheren Temperaturen schlägt das Lager (im Normalfall) bereits bei kleineren Lagerspannungen durch. Keinen direkten Einfluss hat jedoch der höhere Inverter-Strom.  
Ob der Schaden am Lager durch diese beiden Effekte im Vergleich zum Leerlauf grösser wird, weil mehr EDMs auftreten, oder ob der Schaden kleiner wird, weil die auftretenden EDMs weniger gross sind, lässt sich nicht pauschal aussagen.

Wird der Rotor geerdet, so können Rotorerdströme (RGC) auftreten und es gelten folgende Aussagen:

- Erdung des Gehäuses: Motor 5, 6, 7  
Wird das Gehäuse deutlich besser als der Rotor geerdet, so treten keine RGC auf. Abhängig von der Erdung des Rotors ist daher eine hochfrequente Erdung des Gehäuses nötig.
  - Beispiel Vergleich Motor 5 ohne Gehäuseerdung und Motor 7 mit Gehäuseerdung (besser als Rotor): Rotorerdstrom mit Riffelbildung bei Motor 5 gegenüber nicht messbarem Rotorerdstrom und grauer Spur (durch EDM) bei Motor 7
- Filter:  
Filter können RGCs verringern oder unterdrücken, wenn Sie die Flankensteilheit der Motorspannungen verringern oder unterdrücken. Eine Common Mode Drossel kann RGCs verhindern, wenn sie optimal ausgelegt wird.
- Bürstenringe:  
Bei korrekter Installation werden RGCs durch Montage zweier Bürstenringe verhindert.
- Isolierte Lager:  
Bei korrekter Installation werden RGCs durch Montage zweier isolierter Lager verhindert.
- Schaltfrequenz des Inverters:  
Die Schaltfrequenz des Inverters ist direkt proportional zur Schädigung der Lager. Bei einer



Verdoppelung der Schaltfrequenz treten ohne Gegenmassnahmen in etwa doppelt so viele RGCs auf, was zu einer früheren Schädigung der Lager führt.

- **Flankensteilheit des Inverters:**  
Die Flankensteilheit des Inverters hat einen direkten Einfluss auf RGCs. Höhere Flankensteilheit bedeutet grössere RGCs und damit grössere Schädigung.
- **Last:**  
Die Last der Maschine kann auf zwei Arten Einfluss nehmen. Durch die Last werden im Lager die Dicken der Schmiermittel-Schichten verändert. Bei kleineren Schichtdicken schlägt das Lager bereits bei kleineren Lagerspannungen durch. Zusätzlich kann durch die Last auch die Temperatur im Lager beeinflusst werden. Bei höheren Temperaturen schlägt das Lager bereits bei kleineren Lagerspannungen durch. Keinen direkten Einfluss hat jedoch der höhere Inverter-Strom.  
  
Ob der Schaden am Lager durch diese beiden Effekte im Vergleich zum Leerlauf grösser wird, weil mehr EDMs auftreten, oder ob der Schaden kleiner wird, weil die auftretenden EDMs weniger gross sind, lässt sich nicht pauschal aussagen.

Bei geerdetem Rotor können sowohl EDMs als auch RGCs auftreten.

Zusammenfassend sind die beiden folgenden Massnahmen für die Verhinderung von Lagerströmen bei kleinen Maschinen empfohlen. Eine gute (hochfrequente) Erdung des Gehäuses verhindert Rotorerdströme, während Entladungs-Erdströmen durch die (korrekte) Verwendung von einer Erdungsbürste unterbunden werden.

#### 4.11 Analysetool für Condition Monitoring - mmViewer

Insgesamt überwacht Mechmine zurzeit mehr als 140 Lager bei 18 Kunden in der ganzen Deutschschweiz. Um möglichst viele Vibrationsdaten zu sammeln, hat Mechmine die Daten von diesen Systemen und seit der Inbetriebnahme der Testanlage auch von den elf Motor/Invertersystemen in deren Cloud-Lösung integriert. Über das Analysetool «mmViewer», welches im Browser verwendet wird, können die gemessenen Motorparameter ausgewertet werden.

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen zwei der vier Grafiken im Übersichtsmenü des mmViewers für den Langzeitversuch und die Motoren 3 und 4.

Für jedes Lager werde die drei statistischen Parameter Mittelwert, Varianz und Kurtosis ausgewertet, deren Verlauf in Abbildung 31 beobachtet werden kann. Wenn die Kurtosis über Null ist, dann haben die Daten überdurchschnittlich hohe Anteile von hohen Amplituden, im Vergleich zur Normalverteilung.

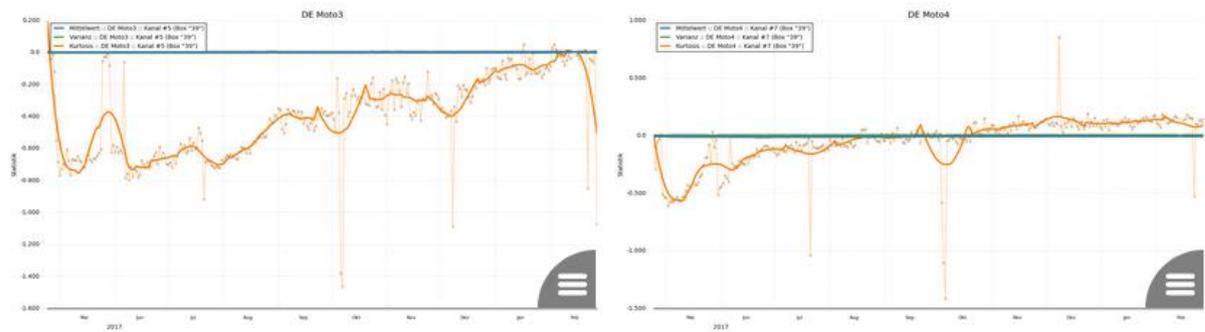


Abbildung 31: Statistik - Mittelwert (blau), Varianz (grün) und Kurtosis (orange) der Motoren 3 und 4 aus dem mmViewer.

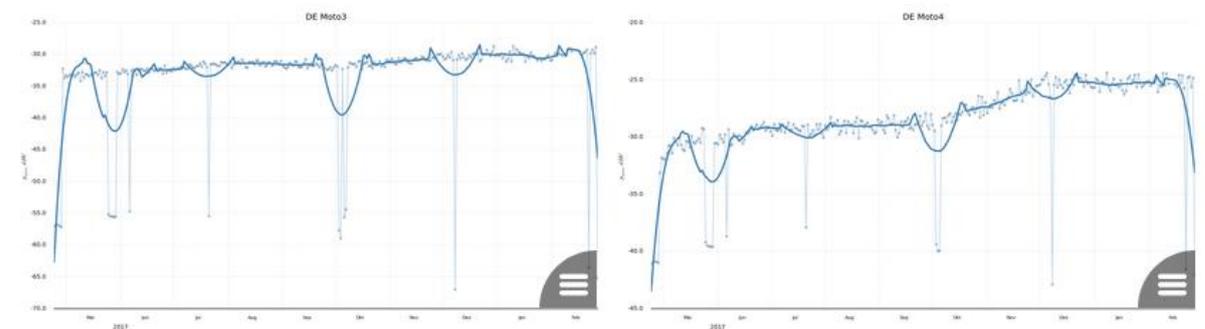


Abbildung 32: Aktivität – Die zwei Kurven zeigen den Verlauf eines Mechine internen Parameters, welcher es erlaubt Rückschlüsse auf den Maschineneinsatz zu gewinnen, wenn kein Drehzahlsignal vorhanden ist. Die diversen „Dips“ zeigen, wann die Maschine ausser Betrieb war.

Der Nutzer kann im mmViewer aus einer Vielzahl von Analyseverfahren wählen. Mechine bietet die wichtigsten Verfahren zur Schwingungsanalyse wie Fehlertrend und Schwinggeschwindigkeit sowie weitere Methoden (FFT, Kurtogramm, etc.) an. Weitere Resultate, mit mmViewer generiert, werden im nächsten Kapitel präsentiert.

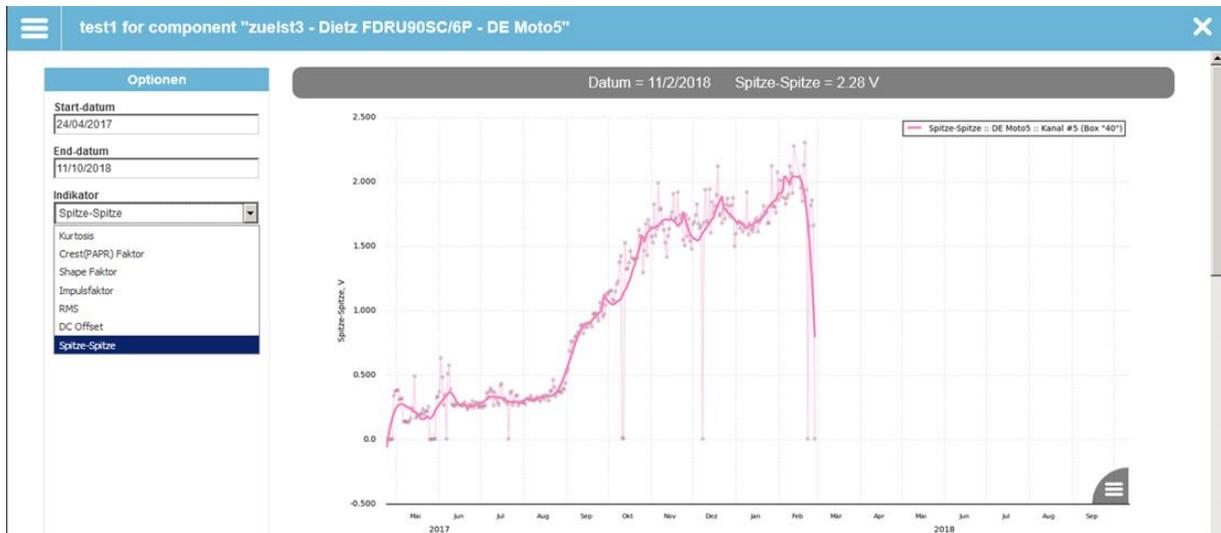


Abbildung 33 : Unter Menüpunkt „Statistische Indikatoren“ kann der Experte sich weitere Messwerte anzeigen lassen. Hier zu sehen ist der Verlauf des Spitze-Spitze wertes für Motor 5 aus dem Langzeitversuch.

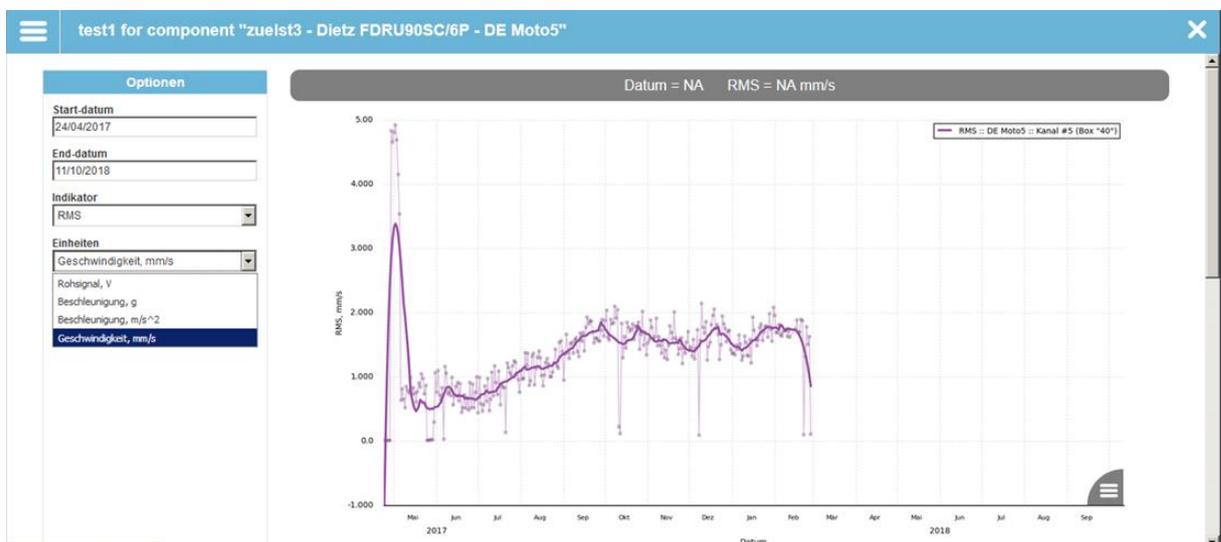


Abbildung 34: Unter der Rubrik RMS kann der Bediener auch wieder aus diversen Messgrößen wählen. Besonders interessant ist die Schwing-Geschwindigkeit, wofür die ISO Norm 10816-3 Grenzwerte für Lagerschwingungen festlegt. Der erste Grenzwert liegt bei 2.5mm/s, und dieses exemplarische Lager müsste man von nun an kontinuierlich beobachten. Hier zu sehen ist der Verlauf der Schwingungsgeschwindigkeit für Motor 5 aus dem Langzeitversuch.

Das aktuelle Produkt von Mechine ermöglicht dem Kunden, sich die regelmässige Analyse zu sparen, und mittels Masken Schwellwerte zu definieren, deren Überschreitung einen Alarm auslöst, wo der Kunde mittels Email oder SMS benachrichtigt wird. Mechine hat vier verschiedene Optionen von Schwellwerten im Angebot, was über den üblichen Schwellwert der Amplitude hinausgeht. Der mit der Schwingungstheorie wenig bewanderte Kunde hat auch die Möglichkeit, einen vom Tool vorgeschlagenen Schwellwert zu verwenden. Dieser Pegel ist dann optimiert, um zu viele oder unnötige Falschalarme zu vermeiden.



Die nächste Neuerung befasst sich mit der Vorhersage von Defekten. Diese Funktion wird nächstes Jahr lanciert. Hierfür sind die gewonnenen Daten aus dem vorliegenden Projekt von grosser Wichtigkeit. Denn die Vibrationsdaten, die den Verlauf der Defektentwicklung aufgezeichnet haben, werden zum Trainieren von Modellen verwendet, welche dann autonom Defekte von anderen Lagern vorhersagen können. Dies stellt einen grossen Mehrwert für Anlagenbetreiber dar, welche z.B. Vergütungsleistungen erhalten (16).

#### 4.12 Implementierung Condition Monitoring - Auswertung Langzeitverlauf

Nachdem die Detektion direkt beim Auftreten der Lagerströme mittels Vibrationsmessung nicht möglich ist, war ein erster, einfacher Ansatz für das Condition Monitoring der Verlauf der Vibrations-Varianz. Da bei den Lagern im Feldversuch selbst beim Ausfall eines Lagers nicht immer Rückschlüsse auf die tatsächliche Ursache des Ausfalls getroffen werden können und weil vor allem der Zusammenhang mit dem Strom- und Spannungsverlauf fehlt, sollen die Vibrationsmessungen aus dem Langzeitversuch für die Gewinnung eines guten Algorithmus für die Früherkennung von Schäden dienen.

Abbildung 35 bis zeigen die Auswertung der Varianzen der Vibrationssignale für die verschiedenen Motoren. Es ist zu beachten, dass die Vibrationssensoren um den 29.05. neu eingestellt wurden, so dass sich die Werte vor dem 29.05. und danach nur bedingt vergleichen lassen.

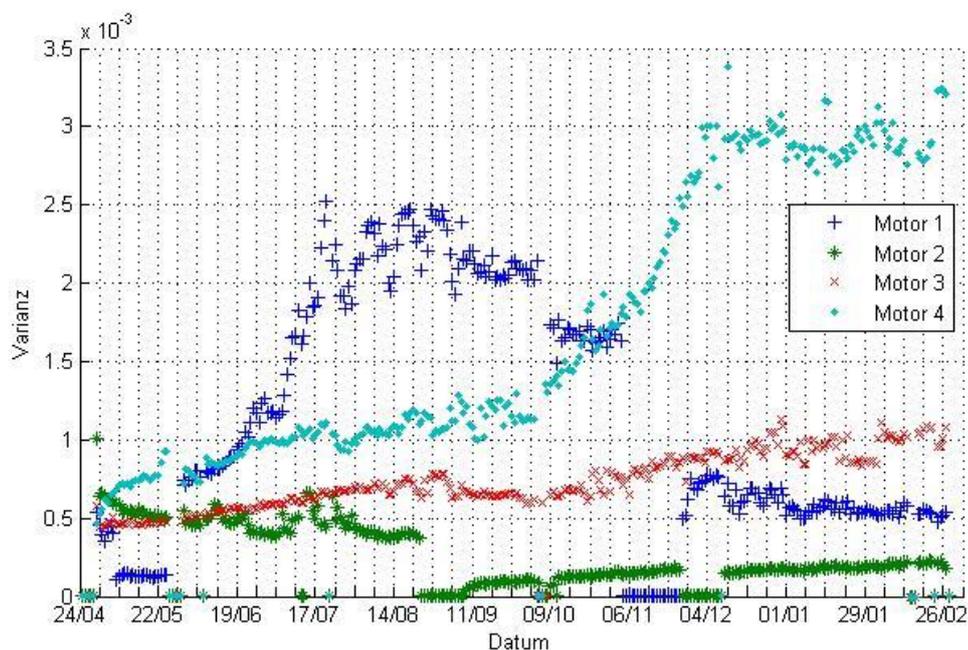


Abbildung 35: Varianz der Vibrationssignale in  $V^2$  für die Motoren 1 bis 4

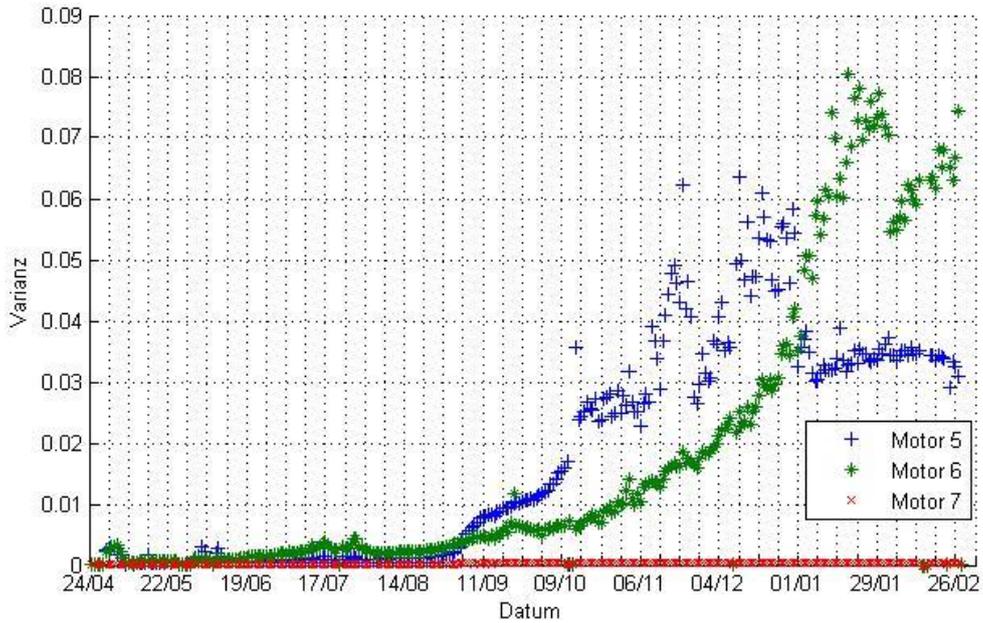


Abbildung 36: Varianz der Vibrationssignale in  $V^2$  für die Motoren 5 bis 7

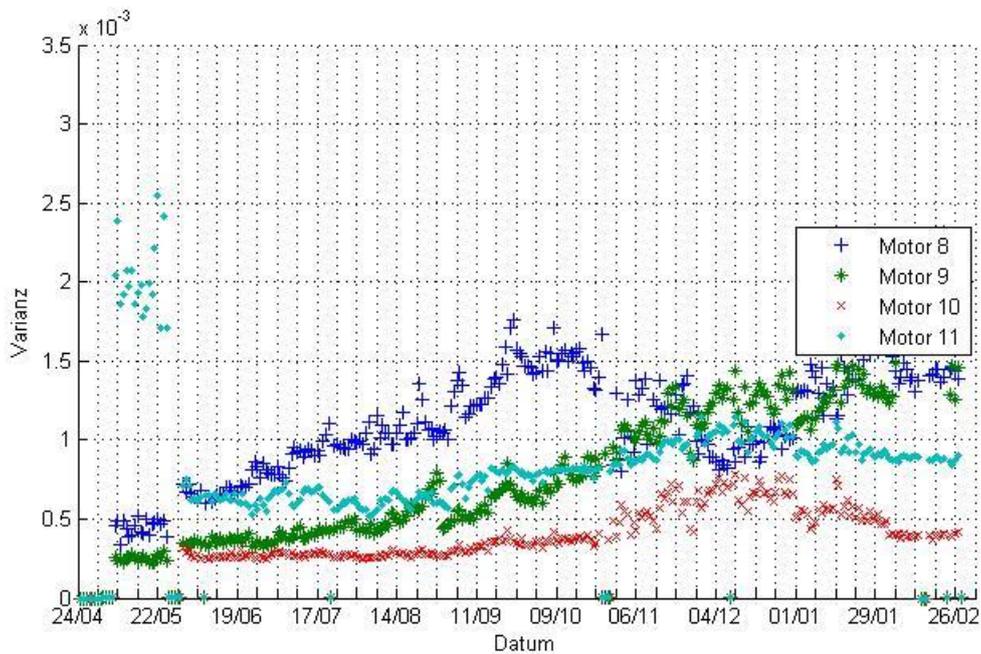


Abbildung 37: Varianz der Vibrationssignale in  $V^2$  für die Motoren 8 bis 11

Bei fast allen Motoren sind Trends zu sehen, wobei Motoren 5 und 6 deutlich den stärksten Anstieg der Varianz zeigen. Ausserdem fällt auf, dass zwischen November und Januar die Varianz viel stärker schwankt. Für eine Erklärung dieser Schwankungen wurde der Temperaturverlauf betrachtet.



Abbildung 38 zeigt den Verlauf der Sensortemperatur (blau) und der Temperatur der Sender-Box (grün) für die Motoren 5 bis 7. Die anderen Sensortemperaturen verhalten sich ähnlich. Wenn ein Motor ausgeschaltet wird, geht die entsprechende Motor-Temperatur auf die Raumtemperatur zurück, aber die CPU-Temperatur und Innentemperatur der Box (Elektronik) bleibt unverändert. Über die ganze Messdauer kann an den Sensoren ein  $\Delta T_{\max}$  von rund  $13^{\circ}\text{C}$  gemessen werden.

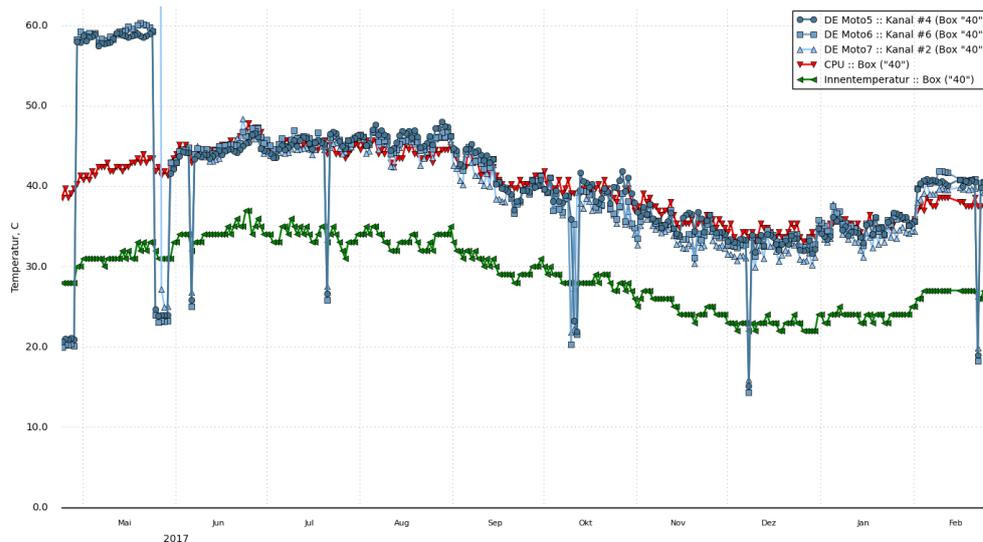


Abbildung 38: Temperaturverlauf der Motoren 5 bis 7 (blau) und Verlauf der Temperatur in der Sender-Box (grün).

Die stärkere Schwankung der Vibrationsdaten korreliert mit der tieferen Temperatur. Die Auswirkung dieser Kopplung wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Die Auswertung der Varianz der Vibrationsdaten zeigt zusammenfassend, dass die sehr stark geschädigten Lager der Motoren 5 und 6 sowie die stark geschädigten Lager an Motor 4 einen (sehr) starken Anstieg in der Varianz zeigen. Ein Condition Monitoring aufgrund der Varianz-Verläufe ist daher möglich. Bei den weniger stark geschädigten Lagern mit grauer Spur zeigt sich bei den meisten Motoren auch ein (leichter) Anstieg der Varianz, jedoch ist eine zuverlässige und möglichst frühzeitige Erkennung der Schäden nicht immer möglich. Insbesondere bei tiefen Temperaturen schwankt die Varianz relativ stark. Während bei einigen Motoren weiterhin eine zunehmende Varianz beobachtet werden kann, ist beispielsweise bei Motor 10 im Januar gar eine Abnahme der Varianz zu beobachten. Deutliche «kontinuierliche» Anstiege der Varianz sind somit langfristig ein guter Indikator für Lagerprobleme, für eine aussagekräftige kurzfristige Auswertung müsste jedoch mindestens die Sensor-Temperatur mitberücksichtigt werden oder es müssen andere Parameter überwacht werden. Es wurden daher verschiedene andere Ansätze für die Auswertung überprüft, welche nachfolgend durch eine Vielzahl von Messkurven aus dem Langzeitversuch veranschaulicht werden.

Abbildung 39 zeigt die Beschleunigung und die Schwinggeschwindigkeit der Motoren 8 und 9. Bei beiden Motoren steigt die Beschleunigung mit der Zeit an (oben), aber die Schwinggeschwindigkeit (unten) bleibt über den ganzen Langzeitversuch relativ konstant.

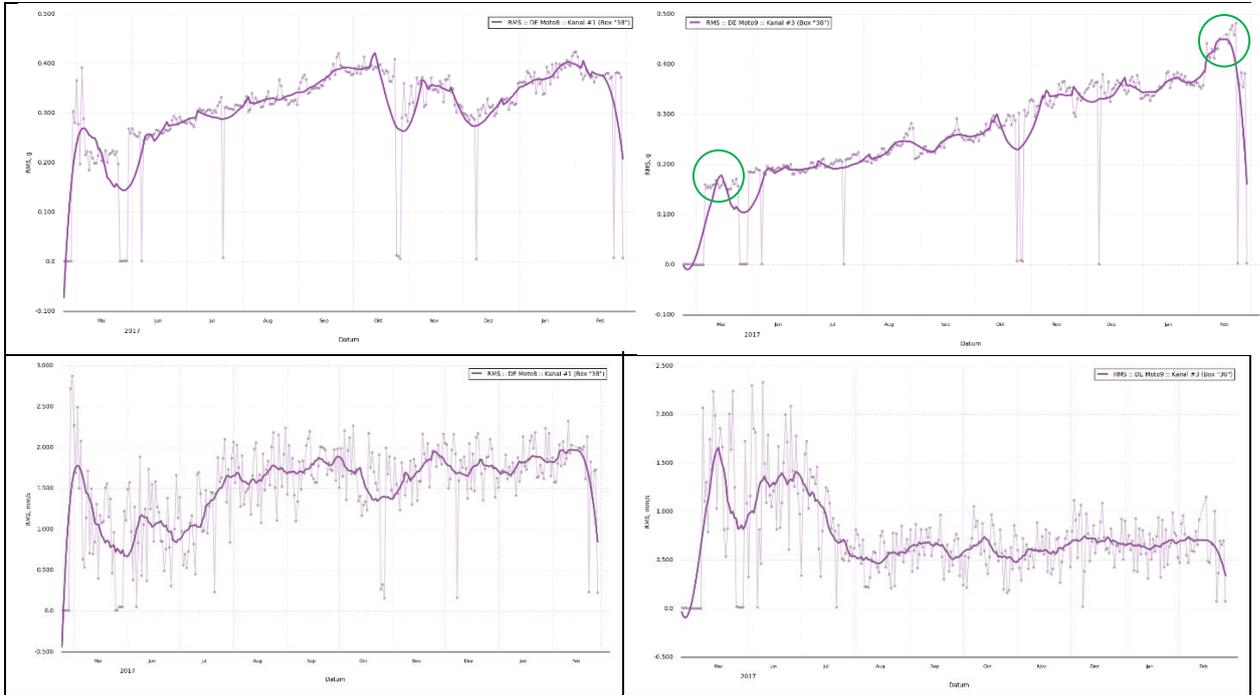


Abbildung 39 : Motor 8 (links) und 9 (rechts) sind zwei Beispiele wo die Beschleunigung stetig ansteigt (oben, in g) aber die Schwinggeschwindigkeit (unten, in mm/s) relativ konstant bleibt.

Auffällig ist, dass bei Motor 9 am Ende des Versuches ein Höcker (grüner Kreis) auftritt. Daher wurde als nächstes untersucht, wie die Signale bei Motor 9 zu Beginn der Messphase (erster Höcker) und am Ende der Messung aussehen (grüne Kreise). Einerseits wurden die Rohdaten, Abbildung 40, und andererseits deren Hüllkurvenanalyse, Abbildung 41, betrachtet.

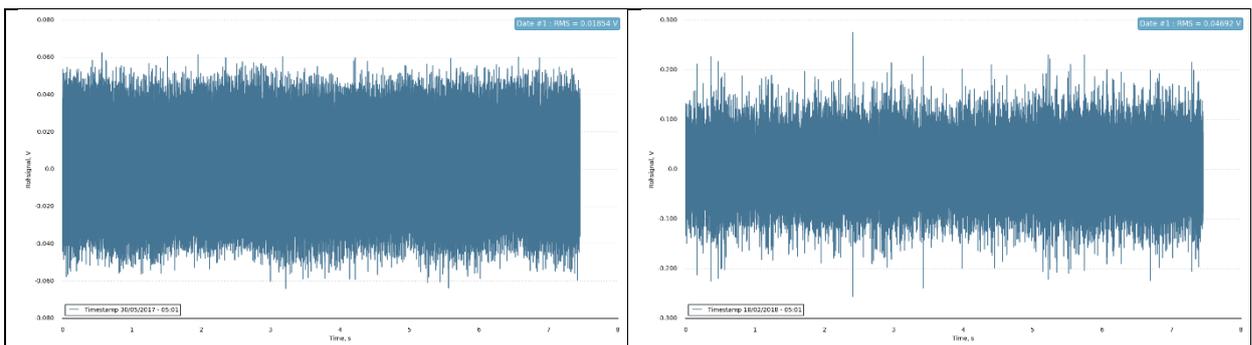


Abbildung 40: Rohsignale in V von Motor 9, zu Beginn (Bereichsgrenzen +/-80mV) und am Ende (Bereichsgrenzen +/-300mV) der Messkampagne.

Im Rohsignal in Abbildung 40 ist die Zunahme der Vibration im Verlauf des Langzeitversuches deutlich zu erkennen. Eine Erklärung für die Höcker liefert das Rohsignal aber nicht.

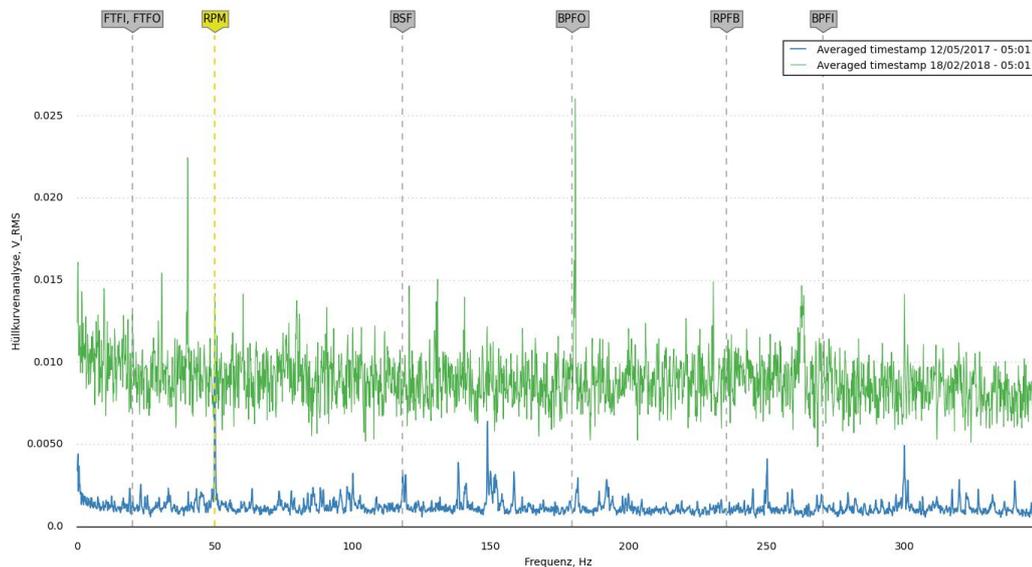


Abbildung 41: Hüllkurvenanalyse beider Rohsignale (4-fach gemittelt) für Motor 9: blau zu Beginn des Langzeitversuches, grün zum Ende des Langzeitversuches; Man erkennt, dass der Signalpegel angestiegen ist und besonders markant, dass am Ende der Messkampagne ein Peak bei der Lagerausseringdefektfrequenz (BPFO) vorhanden ist.

Wie in Abbildung 41 ersichtlich, hat sich ein Lagerdefekt am Aussenlagerring (BPFO) gebildet, welcher als graue Spur auch erkennbar ist. Mechmine geht hier davon aus, dass er durch Lagerströme entstanden ist. Aber wie aus Abbildung 39 unten links ersichtlich ist, liegt die Schwinggeschwindigkeit bei unter 1mm/s, was unter dem empfohlenen ISO Grenzwert (17) von 2.5mm/s liegt. Dieses Kugellager ist immer noch betriebstauglich nach ISO. Die Hüllkurvenanalyse an verschiedenen Daten zeigt, dass sich der Peak bei der Lagerausseringdefektfrequenz erst zu Beginn Februar ausprägt, was mit dem Zeitraum des Höckers in der Beschleunigung übereinstimmt.

Die Schwinggeschwindigkeit der eigentlichen Frequenzen (Aussenlagerring, BPFO) sind in Abbildung 42 dargestellt und zeigen, dass die Amplituden noch sehr klein sind. Die Unterschiede der Absolutwerte im Vergleich zur vorherigen Abbildung ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Messbandbreite bei Abbildung 42 von 10Hz bis 1000Hz geht (17), wohingegen bei Abbildung 41 die ganze Signalbandbreite (25kHz) verwendet wird.

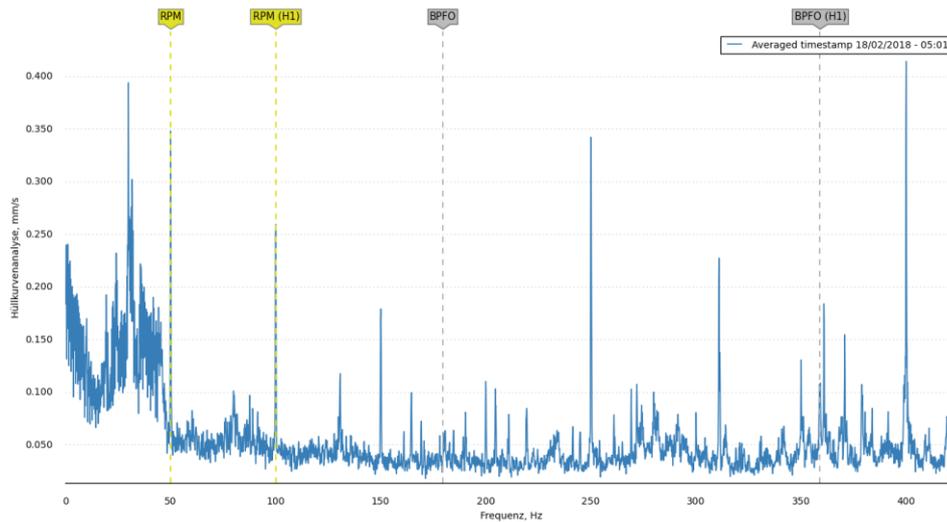


Abbildung 42 : Hüllkurvenanalyse der Schwinggeschwindigkeit von Abbildung 41 für Motor 9.

Um die nützlichsten Parameter zur Findung von sich anbahnenden Defekten zu kennen, wurde eine Reihe von bekannten (18) Messwerten verwendet und verglichen. Es stellt sich heraus, siehe Tabelle 5, dass die Anzahl gewinnbringender Messwerte begrenzt ist, was in (9) auch erkannt und bestätigt wurde.

Parameter	Lager										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Volt RMS (variance)			P	P	P	P	0		P		
Kurtosis		0	P	P				P			
Beschleunigung			P	P	P	P	0	P	P		0
Schwinggeschwindigkeit	0	0	0	0	P	N	P	N	0	N	N
Clearance factor			P	P		0	0	P	P	0	0
Crest factor		0	P	P		0	0	P	P	0	0
Signalenergie in der FFT	0	0	P	P	P	(P)	0	P	P	0	0
Impulse factor	N	0	P	P	0	0	0	P	P	0	0
Line integral		N	P	P	P	P	0	P	P	P	P
Spitzenwert			P	P	P	P	0		P		
Shannon entropy		0	N	N				N	N	0	N
Shape factor		0	P	P				P	P		
Skew		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wavelet Koeffizienten D1,D2,D3	N	N	P	P	P	P	0	0	0	0	0

Tabelle 5: Zusammenstellung verschiedener Messkriterien (18) und deren Gradient<sup>2</sup> {Positiv, Negativ,0} bei jedem Lager.

Mit den bekannten und in der Branche oftmals verwendeten Messparametern (Vrms, Vpp, Kurtosis) lässt sich somit nur bedingt ein Defekt feststellen. Um Lagerschäden identifizieren zu können, braucht es zusätzlich die Spektralanalyse, denn nur mit ihr kann man zum Beispiel Lagerinnenschalen- und

<sup>2</sup> Wenn kein klarer Trend erkennbar ist, weil z.B. die Kurve rauf & runter geht, dann ist das Feld leer.



Lageraussenschalenschäden unterscheiden. Um Lagerstrom-Lagerschäden identifizieren zu können, braucht es zusätzlich noch weitere neue Ansätze.

Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen zwei Beispiele von unterschiedlichen Lagerdefekten.

Abbildung 43 zeigt für Motor 5 (starke Riffel-Bildung) die Hüllkurvenanalyse. Diese zeigt die typischen Merkmale eines Lagerinnenschadens inklusive deren Seitenbändern. Bei Motor 5 sieht man fast keine Peaks an den Lageraussenschalendefektfrequenzen, daher wird die BPFi auch nicht gezeigt.

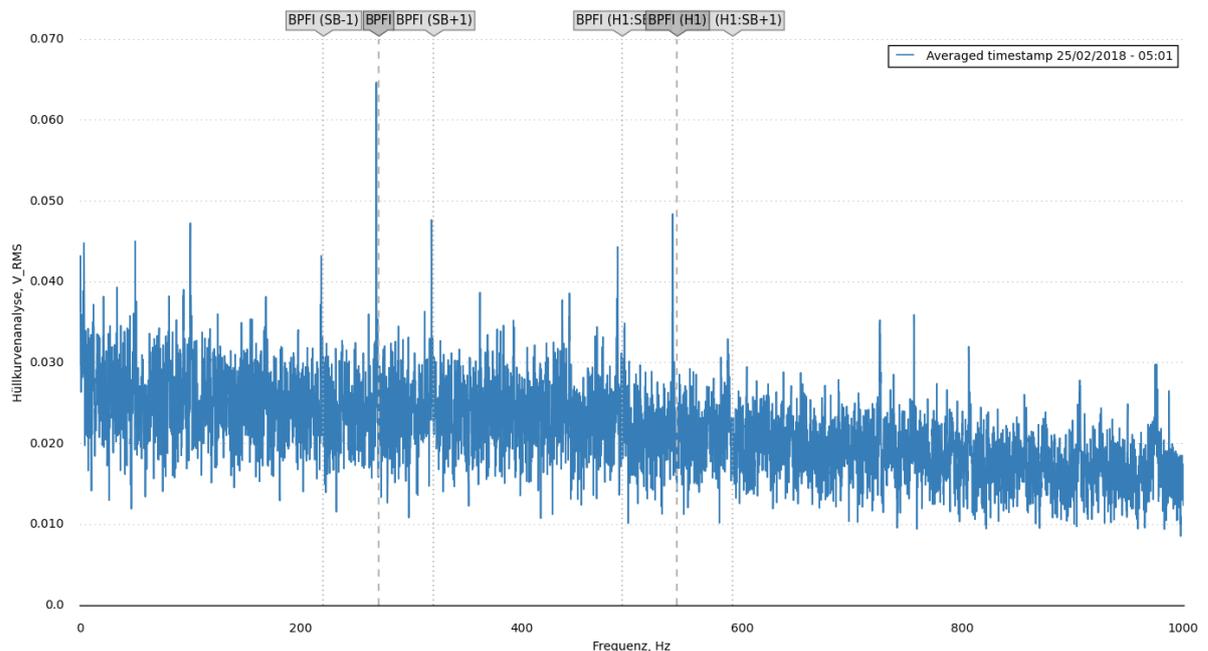


Abbildung 43: Das Lager von Motor 5 zeigt die typischen Merkmale eines Lagerinnenschadens inklusive deren Seitenbändern.

Abbildung 44 zeigt für Motor 6 (starke Riffel-Bildung) die Hüllkurvenanalyse. Diese zeigt die Merkmale eines Lageraussenschadens. Die grauen BPFi Linien liegen nicht perfekt auf den blauen BPFi Peaks, weil die BPFi Linien basierend auf einer Drehzahl von 3000 RPM (50.0Hz) berechnet werden. Aber durch Effekte wie den Lager-Slip, typischerweise im Bereich bis zu 2%, kann die eigentliche Drehzahl des Lagers davon abweichen und entspricht nicht mehr der Wellendrehzahl.

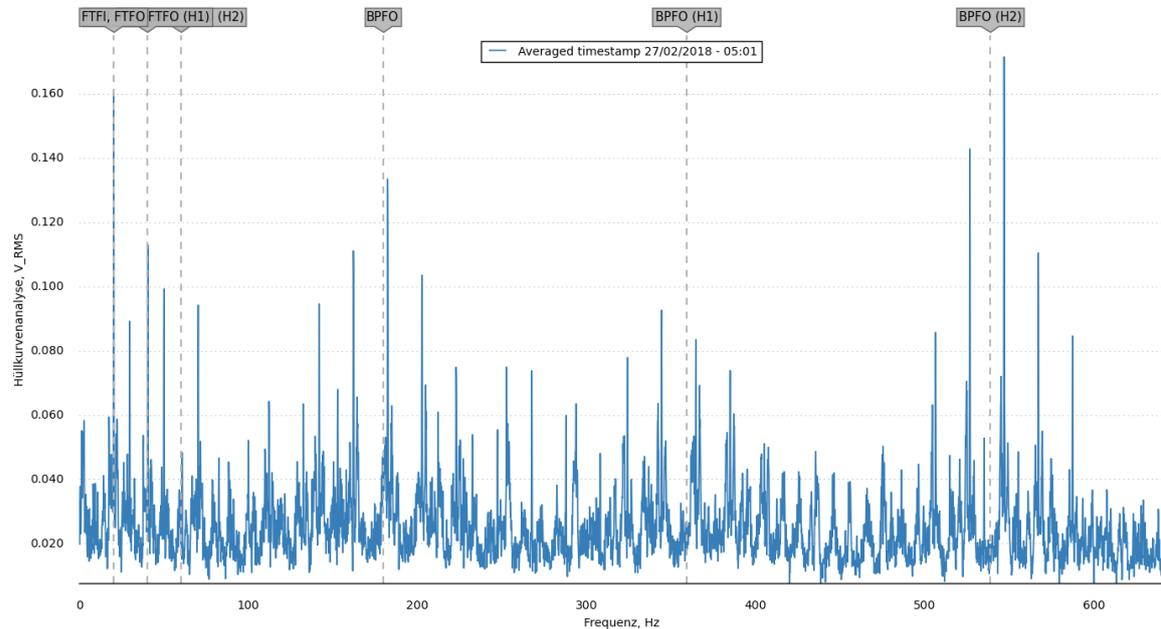


Abbildung 44: Das Lager von Motor 6 zeigt Merkmale eines Lageraussenschadens und der Käfigdefektfrequenz.

Weitere Informationen zur Identifizierung von Lagerstrom-Lagerschäden können zum Beispiel durch ein Spektrogramm geliefert werden.

In Abbildung 45 sind vier Spektrogramme gezeigt. Die beiden Lager der Motoren 2 und 7 wurden bei der stereomikroskopischen Auswertung durch die ZHAW mit Anzeichen einer „grauen Spur“ klassifiziert, wohingegen die Lager der Motoren 5 und 6 Riffelstrukturen hatten. Deshalb sieht man im Bild oben rechts in Abbildung 45 auch viel höhere Signalpegel im Bereich um die -60dB. Die vertikalen Linien, welche man in allen 4 Bildern erkennt, stammen von verschiedenen Quellen. Das können zum Beispiel die 50Hz Netzfrequenz sein, die Drehzahl oder Lagerdefektfrequenzen, und deren harmonische und eventuell sogar deren Seitenbänder.

Weil die Anzahl solcher Bilder noch beschränkt ist, wir sprechen hier von um die 50-100 Bildern (je nach visueller Beurteilung, ob ein Bild gut genug ist oder doch nicht), kann man damit noch kein Neuronales Netzwerk gewinnbringend trainieren, das heisst mit akzeptabler Güte in Bezug auf Klassifizierungsfehler und Falschalarmrate. Man muss also noch mehr Daten beschaffen.

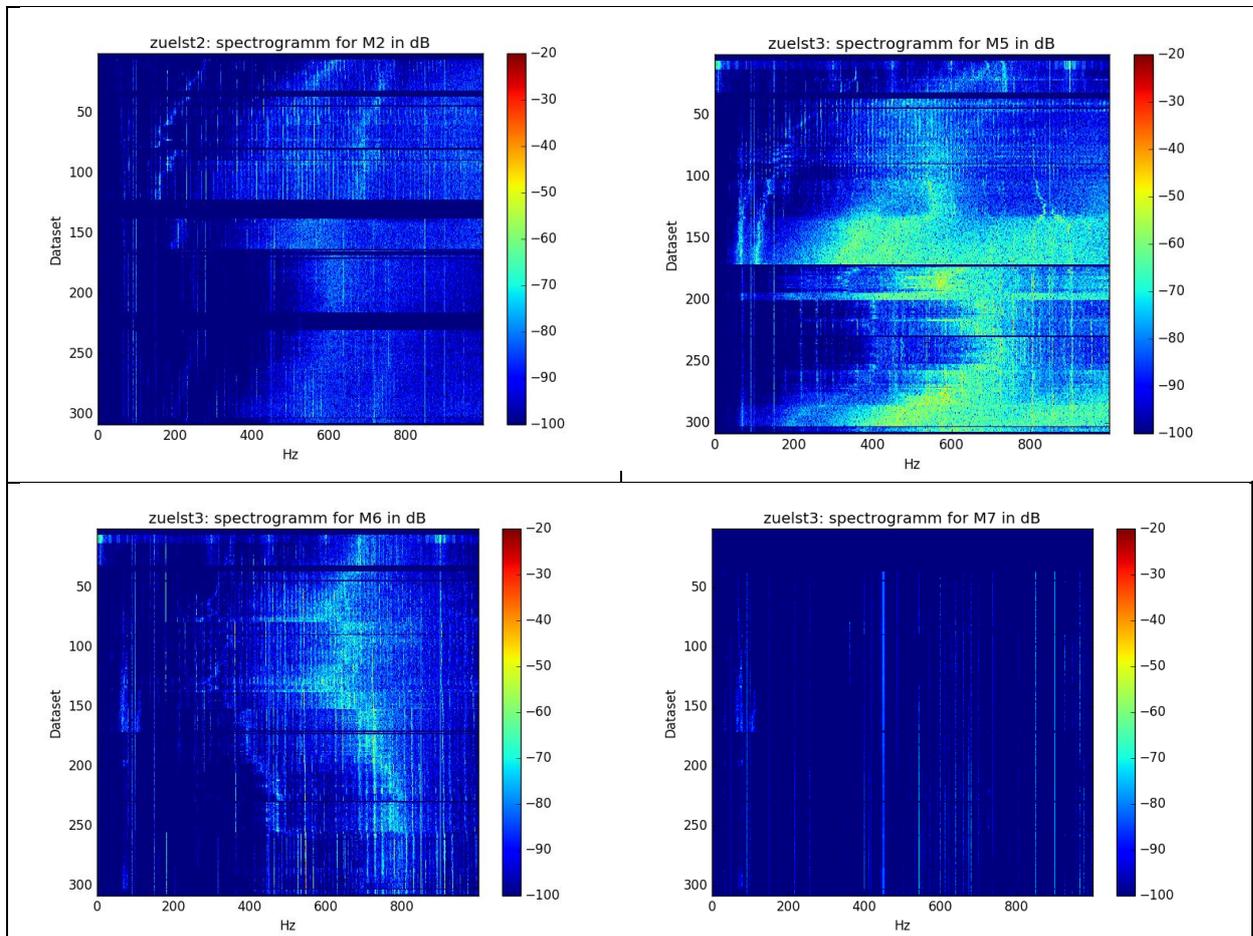


Abbildung 45: Spektrogramm von Motor 2 (links oben), 5 (rechts oben), 6 (links unten) und 7 (rechts unten).

#### 4.12.1 Wiederinbetriebnahme eines Testaufbaus

Um zusätzliche Daten zu generieren, werden die Motoren 1, 3 und 8 auf unbestimmte Zeit weiter bei Mechmine betrieben. Die Anzahl der notwendigen Daten, um die erstgenannten Ziele erreichen zu können, ist leider ungewiss. Eine Literaturrecherche von wissenschaftlichen Publikationen, welche Neuronale Netzwerke (NN) einsetzen zur Lagerdiagnose, war weder erfolgreich noch endgültig. Zum einen wurden die Daten zerstückelt und dem NN zum Training zugefügt (19), oder andere Fehler beim Training gemacht, was die Resultate zu mindestens verfälscht, oder die Daten selber waren fehlerhaft und somit die Resultate nicht glaubwürdig (18). Deshalb wurde entschieden, durch eigene Messungen diesbezüglich Erkenntnisse zu erlangen. Die drei Motoren werden ähnlich wie in der ZHAW betrieben, siehe Abbildung 46.

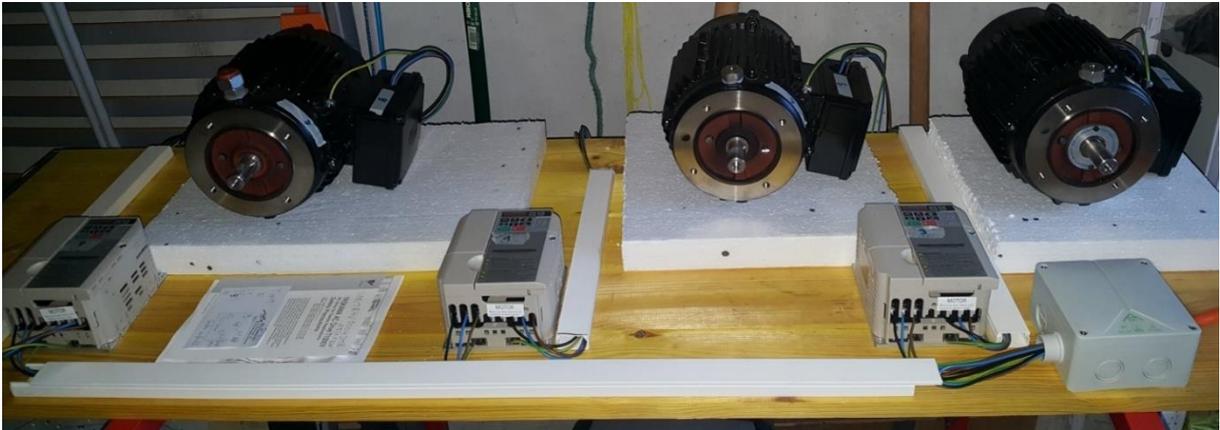


Abbildung 46: Motoren 1,3, und 8 bereit für den weiteren Langzeittest. Die Motorenzuleitung wird noch durch ein abgeschirmtes Kabel ersetzt.

#### 4.12.2 Weitere Parameter für Condition Monitoring

Um einen weiteren Parameter für das Condition Monitoring zu überprüfen, hat sich Mechmine beim Partner Fa. Frei das Lagerstrommessgerät TKED1 beschafft (20). Die Messung an den elf Motoren hatte ergeben, dass das TKED1 keine Events zählen konnte. Es wird vermutet, dass die (Funken-)Energien unter der Messempfindlichkeit des TKED1 lagen, denn dieses Gerät wird normalerweise bei Motoren >100kW eingesetzt. Leider gibt es kein Datenblatt, welches diese Hypothese bestätigen könnte. Um aber Funken (Lagerströme) passiv erkennen zu können, entwickelt Mechmine einen eigenen Sensor und hat Messgeräte und einen Radiofrequenz Signalgenerator beschafft. Das Ziel ist ein kompakter kleiner Sensor, analog zum Mechmine Motoren Lastsensor. Dies wird aber durch die notwendige Grösse der Antenne erschwert. Der zusätzliche Sensor soll als Ergänzung zum aktuellen Condition Monitoring dienen, da gemäss den Vorrecherchen eine direkte Detektion der Lagerströme über die Vibrationsmessung nicht möglich ist.



## 5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

In diesem Projekt wurden der Stand der Technik bezüglich Ursachen und Massnahmen zum Thema Lagerströme erarbeitet und in einem Bericht [1] sowie in einem Merkblatt (siehe Anhang) zusammengefasst.

In einer Vorstudie wurde die Lagerstrom-Exponiertheit bei verschiedenen Anwendern abgeklärt. Die Vorstudie hat unter anderem gezeigt, dass insbesondere die Wirksamkeit der Gegenmassnahmen häufig angezweifelt wird. Auch fehlen bei Motoren kleinerer Leistung die Erfahrungen. Beim Auftreten von Lagerschäden ist zudem oft nicht ersichtlich, ob der Schaden aufgrund von Lagerströmen auftrat. Konkrete Zahlen zu den Ausfällen aufgrund von Lagerströmen existieren daher nicht, und ein Condition Monitoring wird von vielen Anwendern begrüsst, insbesondere wenn es kostengünstig und einfach zu installieren ist.

Für die Überprüfung verschiedener Gegenmassnahmen bei kleinen Maschinen wurde ein Langzeitversuch mit elf baugleichen Maschinen aber unterschiedlicher Konfiguration durchgeführt.

Der Langzeitversuch hat gezeigt, dass auch bei kleinen Maschinen Lagerströme auftreten können und dass diese zu Schäden führen können. Während verschiedene Erdungsarten nur geringen Einfluss auf die Schädigung haben, kann eine falsch gewählte Gleichaktrossel die Lagerströme sogar verstärken. Durch isolierte Lager und korrekt installierte Bürstenringe können Lagerströme verhindert werden.

Weiter konnten durch den Langzeitversuch die in der Theorie gefundenen Annahmen zur Lageralterung überprüft werden und aus der Vielzahl von Lagerspannungsmessungen konnten typische Signalmuster zur Erkennung von Lagerströmen extrahiert werden.

Zusammenfassend sind die Entstehungsarten der Lagerströme bei kleinen Maschinen detailliert gemessen und simuliert worden mit guter Übereinstimmung im Langzeitversuch. Die Gegenmassnahmen sind bekannt und verifiziert.

Idealerweise würde ein CM nicht erst beim Auftreten erster Ermüdungs-Vibrationen anschlagen, sondern grundsätzlich das Auftreten von Lagerströmen detektieren. Simulationen haben aber gezeigt, dass selbst bei unrealistisch optimistischen Annahmen der Lagerstrom nicht über eine Vibrationsmessung detektiert werden kann. Ein Condition Monitoring über Vibrationsmessung kann daher nur bei bereits beginnenden Schäden anschlagen.

Durch den Langzeitversuch wurde gezeigt, dass sich die Schädigung durch Lagerströme schon frühzeitig im Vibrationsmuster zeigt. Die Lager können bei ersten Anzeichen von Schädigung noch Wochen weiterbetrieben werden, so dass mit dem angestrebten Condition Monitoring zwar der Schaden am Lager nicht verhindert werden kann, aber es können rechtzeitig Gegenmassnahmen oder das Auswechseln der Lager in die Wege geleitet werden.

Obwohl die Trends in der Varianz des Vibrationssignales sehr gut mit den Gefährdungszahlen und den optischen Auswertungen übereinstimmen, sind für eine frühzeitige Detektion von Lagerströmen weitere Parameter nötig. Auch lässt sich aus der Varianz keine Aussage machen, ob der Schaden durch Lagerströme oder andere Ursachen entstanden ist. Es wurden darum verschiedene Einflussgrössen wie Schwingungsgeschwindigkeit analysiert, aber die gängigen Grössen lassen keine Interpretation zu. Durch die Hüllkurvenanalyse der Schwingungsdaten lassen sich jedoch bereits bestehende Schäden lokalisieren. Für eine frühzeitige und ursachenbezogene Überwachung sollen daher Spektrogramme verwendet werden, wobei der Algorithmus für die Detektion über ein neuronales Netzwerk gewonnen werden soll. Die aus den Feldversuchen und dem Langzeitversuch



gewonnen Daten sind jedoch für ein Training des neuronalen Netzwerkes noch zu klein. Man muss also noch mehr Daten beschaffen.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Lagerströme sind erwiesenermassen ein wichtiges Thema sowohl für Motorenanwender als auch Motorenhersteller. Der Langzeitversuch hat deutlich gezeigt, dass auch kleine Motoren durch Lagerströme gefährdet sind. Weder die Erdungsart noch der Einsatz von Common Mode Chokes kann Entladungs-Lagerströme verhindern. Einzig korrekt installierte Erdungsbürsten oder der Einsatz von isolierten Lagern beziehungsweise Hybridlagern schützen vor Entladungs-Lagerströmen. Auch Filter, welche die Gleichtaktspannung unterdrücken, würden vor Entladungs-Lagerströmen schützen, bedeuten aber wieder einen Kostennachteil insbesondere bei kleinen Maschinen.

Rotorendströme können durch eine gute Erdung des Motorgehäuses verhindert werden.

Zirkulierende Lagerströme treten nur in mittleren bis grossen Maschinen auf. Da im vorliegenden Projekt nur kleine Maschinen untersucht wurden, konnten die Gegenmassnahmen für zirkulierende Lagerströme nicht untersucht werden. Eine detaillierte Betrachtung inklusive Simulationen und Langzeitversuch mit optischer Auswertung der Lager wäre interessant.

Durch die EDM-Gefährdungszahl wurde ein einfaches Mittel gefunden, wie durch die Messung der Lagerspannung direkte Aussagen über die Wirksamkeit von Gegenmassnahmen gemacht werden können. Bei Gesprächen mit Anwendern wurde Interesse an dieser Auswertungsmethode bekundet. Eine Anpassung für verschiedene Lager und Motoren soll in einer Projektfortsetzung umgesetzt werden.

Ein Condition Monitoring durch die Auswertung der Vibrations-Varianz ist umsetzbar, ermöglicht aber nicht immer eine frühzeitige Reaktion. Auch ist es nicht möglich, die Ursache des Lagerschadens festzustellen. Die Auswertung der Spektrogramme sieht vielversprechend aus, für eine definitive Beurteilung müssen jedoch deutlich mehr Datensätze mit bekannter Lagerschädigung ausgewertet werden können. Diese Auswertung wird zurzeit vom Industriepartner Mechmine durchgeführt. Drei der Motor/Invertersysteme laufen weiter, um noch mehr Daten für das Neuronale Netzwerk zu sammeln. Diese Daten werden zum Trainieren von Modellen verwendet, welche dann autonom Defekte von anderen Lagern vorhersagen können. Die Vorhersage von Defekten soll in das bestehende Condition Monitoring eingebaut werden und wird nächstes Jahr von Mechmine lanciert.



## 7 Publikationen

Putzi, H. (07 2017). Schädliche Lagerströme in Drehstrom-Maschinen verhindern. Aktuelle Technik.  
<https://aktuelletechnik.blverlag.ch/schaedliche-lagerstroeme-in-drehstrom-maschinen-verhindern/>



## 8 Referenzen

### Literaturverzeichnis

1. **Muetze, A.** *Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*. 2004.
2. **Binder, Andreas und Muetze, Annette.** Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in AC Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications* ( Volume: 44, Issue: 3, May-june 2008 ). 2008.
3. **Gemeinder, Yves, et al., et al.** Calculation and validation of a bearing impedance model for ball bearings and the influence on EDM-currents. *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*. 2014.
4. **Muetze, A. und Strangas, E. G.** On inverter induced bearing currents, bearing maintenance scheduling, and prognosis. *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference*. 2014.
5. **HASSEL, J., Klos, H.-H. und Tischmacher, H.** *METHOD AND DEVICE FOR MONITORING THE STATE OF A DRIVE SYSTEM COMPRISING AN ELECTRICAL DRIVE UNIT*. WO2015043619 2013/2015.
6. **HASSEL, J., Probol, C. und Tischmacher, H.** *Method and device for the early detection of the development of damage in a bearing*. WO 2011107110 A1 2010/2011.
7. **General Electric Company.** *APPARATUS AND METHOD FOR BEARING CONDITION MONITORING*. US2011040495 2011.
8. **Pekola, J., Haring, T. und Mäki-Ontto, P.** *METHOD AND APPARATUS FOR MEASURING BEARING CURRENTS IN AN ELECTRICAL MACHINE*. WO/2010/007203 2010/2011.
9. **Siew, W., et al., et al.** Fault severity trending in rolling element bearings. *Acoustics*. 2015.
10. **Zare, Firuz, Adabi, Jafar und Ghosh, Arindam.** Different approaches to reduce shaft voltage in AC generators. *Conference: Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09*. 2009.
11. **Kriese, M., et al., et al.** Influence of bearing currents on the bearing lifetime for converter machines. *Proceedings - 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012*. 2012.
12. **Muetze, A. und Binder, A.** Practical Rules for Assessment of Inverter-Induced Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors up to 500 kW. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on, June 2007*. 2007.
13. **Mütze, A. und Binder, A.** Practical Rules for Assessment of Inverter-Induced Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors up to 500 kW. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017.
14. **Romanenko, A., Muetze, A. und Ahola, J.** *Effects of Electrostatic Discharges on Bearing Grease Dielectric Strength and Composition*. s.l. : IEEE, 2016.
15. **Mühlematter, J. und Werner, D.** *Zustandsanalyse der Lager aus Testsetup bei der ZHAW mit 11 Motoren*. 2018.
16. **Tanner, R.** Ist die Zeit reif für intelligente Anlagenüberwachung? *Wasser Energie Luft*. 2018, Bd. Heft 3.
17. *DIN/ISO 10816-3*. s.l. : Beuth Verlag.
18. **Lessmeier, C., et al., et al.** Condition Monitoring of Bearing Damage in Electromechanical Drive Systems by Using Motor Current Signals of Electric Motors: A Benchmark Data Set for Data-Driven Classification. *PHME*. 2016.
19. **Guo, L. und Gao, H.** Multi features fusion and nonlinear dimension reduction for intelligent bearing condition monitoring. *Shock and Vibration*. 2016.
20. SKF Messgerät zum Erkennen von Funkenerosion. [Online] 2017.  
<http://www.skf.com/ch/de/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/electrical-discharge-detector/index.html>.
21. Die kantonalen Strompreise im Vergleich. [Online]  
<https://www.strompreis.elcom.admin.ch/Map/ShowSwissMap.aspx>.



## 9 Anhänge

### 9.1 Anhang 1: Merkblatt Lagerströme

Durch den Einsatz von Umrichtern kann die Effizienz von Antriebssystemen gesteigert werden. Allerdings können durch den Umrichtereinsatz Lagerströme in den elektrischen Maschinen entstehen, welche zu Lagerschäden und vorzeitigen Ausfällen führen können.

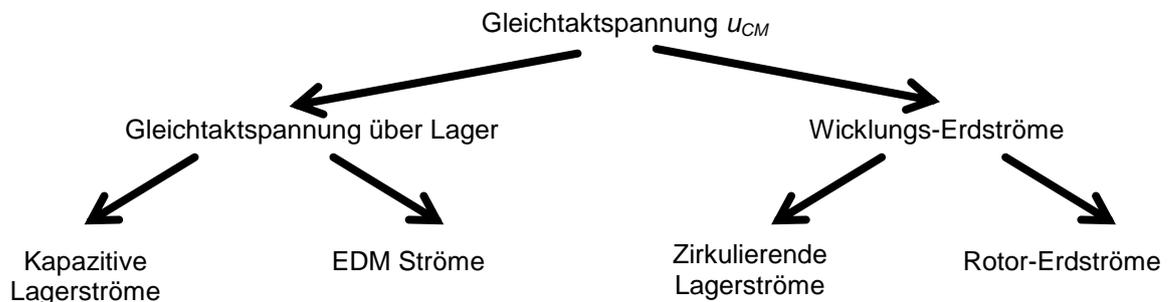
#### Ursache der Lagerströme

Ursache für die Lagerströme ist immer eine Spannung über dem Lager.

- Im normalen Betrieb der Maschine verhält sich das Lager wie eine Kapazität, wobei der Schmierfilm das Dielektrikum bildet.
- Wird ein bestimmter Schwellwert der Lagerspannung überschritten, bricht dieser Schmierfilm durch, und es können sehr hohe Stromdichten auftreten.
- Ist die Stromdichte genug gross, kann Metall im Lagerring geschmolzen oder gar verdampft werden.
- Es entstehen unzählige kleine Krater, und nach einiger Zeit zeigt sich im Lagerring eine typische graue Spur oder gar Riffel.

#### Die vier Lagerstrom-Typen im Umrichterbetrieb

Im Umrichter-Betrieb gibt es neben den klassischen Lagerströmen vier Lagerstrom-Typen:



Da die vier Lagerstromtypen verschiedene Ursachen haben, müssen sie gesondert behandelt werden. Abhängig von der Grösse der Maschine treten nur gewisse Lagerstrom-Typen auf. Nach aktuellem Stand der Technik sind kapazitive Lagerströme unabhängig von der Maschinengrösse nicht schädigend.

Maschinenleistung	Entladungs-Lagerströme	Zirkulierende Lagerströme	Rotor-Erdströme (nur bei Rotor-Erdung)
Klein (bis ca. 10kW)	Stark gefährdet	Nicht gefährdet	Gefährdet
Mittel (10kW bis 100kW)	Gefährdet	Gefährdet	Gefährdet
Gross (ab 100kW)	Nicht gefährdet	Stark gefährdet	Gefährdet

#### Gefährdung durch Lagerströme?

Ob ein Antrieb Lagerströmen ausgesetzt ist, hängt schlussendlich von vielen Faktoren wie Verkabelung und Last-Erdung ab. Als grobe Richtlinie gilt:



- Kleinen Maschinen: Bei Speisung mit dreiphasigem Umrichter und Zwischenkreisspannung  $\geq 560\text{ V}$  treten mit hoher Wahrscheinlichkeit schädigende Entladungs-Lagerströme auf.
- Motoren über ca. 100kW: Es ist mit zirkulierenden Lagerströmen zu rechnen.
- Erdung des Rotors über Last bei gleichzeitig schlechter Erdung des Gehäuses: Es ist mit Rotor-Erdströmen zu rechnen.
- Bei Verwendung von geschirmten Kabeln mit gutem Anschluss auf Frequenzumrichter- und Motorseite ist nicht mit Rotorerdströmen zu rechnen.

Im konkreten Fall kann aber meist nur eine **Messung vor Ort** die Notwendigkeit von Gegenmassnahmen zeigen. Da Lagerströme nicht direkt gemessen werden können, muss auf eine der folgenden Möglichkeiten zurückgegriffen werden:

Messgrösse	Bemerkung
Lagerspannung $U_{Lager}$	Faustformel: $ u_{Lager,max}  < 5\text{V}$ → keine Schäden erwartet Achtung: Schnelle Spannungsänderung! Kleines $U_{Lager,RMS}$ ist keine Garantie für Lagerstromfreiheit!
Entladungsenergie mittels RF-Probe	Schlägt bei kleinen Maschinen oft nicht an
Gleichtakt-Strom	Entladungs-Ströme sind nicht «sichtbar» im Gleichtakt-Strom Bei vorhandenem zirkulierendem Lagerstrom gilt: $i_{Lager} \leq 0.4 \cdot i_{Gleichtakt}$ Faustformel (gilt nicht für kleine Maschinen): $i_{Lager} < 1\text{A}$ → keine Schäden

## Gegenmassnahmen

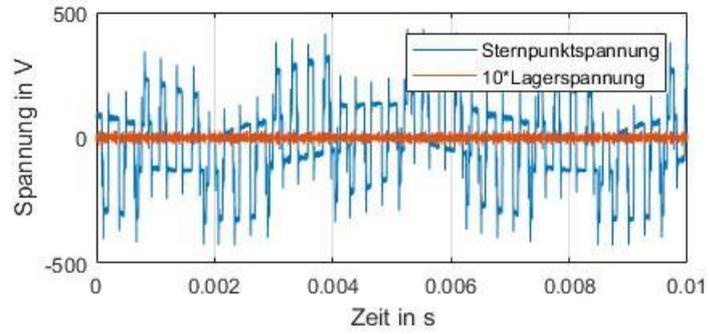
Die folgende Tabelle listet die **gängigsten Gegenmassnahmen** und ihre Wirksamkeit bei Lagerströmen auf.

Massnahme	Entladungs-Lagerströme	Zirkulierende Lagerströme	Rotor-Erdströme
Hybrid- oder Keramiklager	Wirksam bei zwei Hybrid/Keramiklagern	Wirksam bei einem Hybrid/Keramiklager	Wirksam bei zwei Hybrid/Keramiklagern
Filter oder Pulsmuster mit reduzierter $U_{CM}$	Wirksam	Wirksam	Wirksam
Filter oder Pulsmuster mit reduzierter Änderung von $U_{CM}$	Nicht wirksam	Wirksam	Wirksam
Kohlebürsten, Wellenerdungsringe	Wirksam bei einer Bürste/ einem Ring	Wirksam bei zwei Bürsten/ Ringen	Wirksam bei zwei Bürsten/ Ringen
Gleichtaktdrosseln	Nicht wirksam	Wirksam bei korrekter Auslegung	Wirksam bei korrekter Auslegung
Gute hochfrequente Gehäuse-Erdung	Kaum Einfluss	Kaum Einfluss	Wirksam

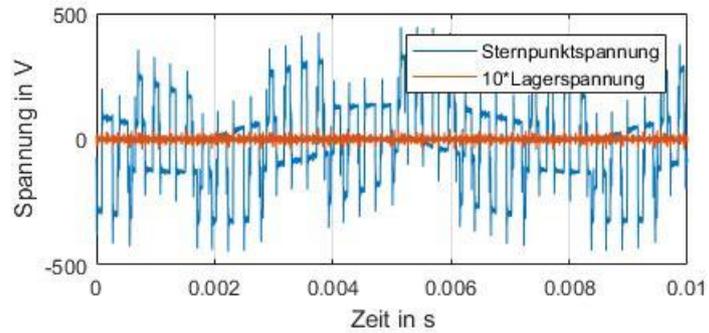


## 9.2 Anhang 2: Gemessene Sternpunkt- und Lagerspannungen

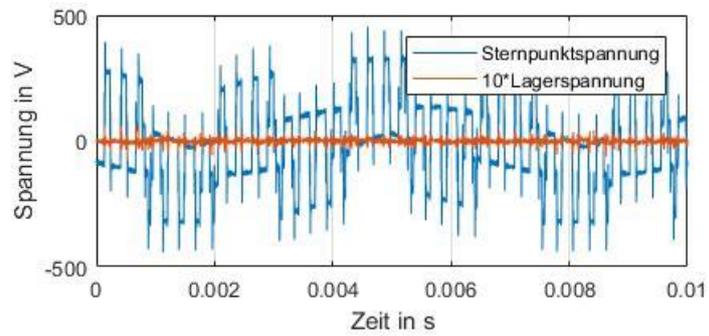
M1:



M2:

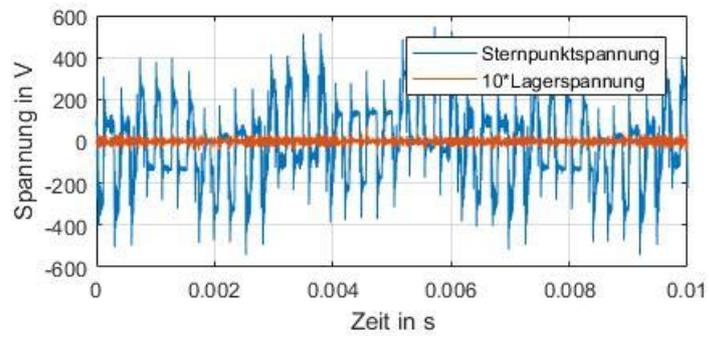


M3:

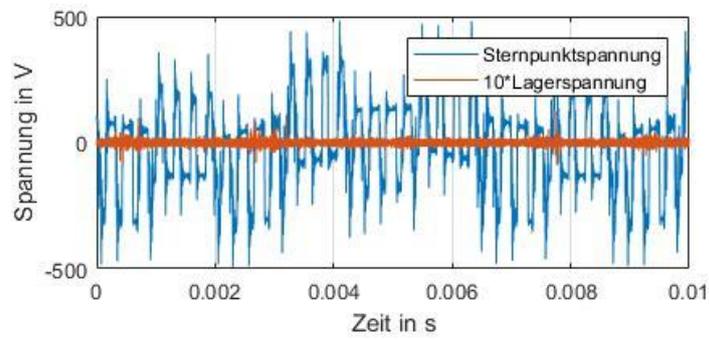




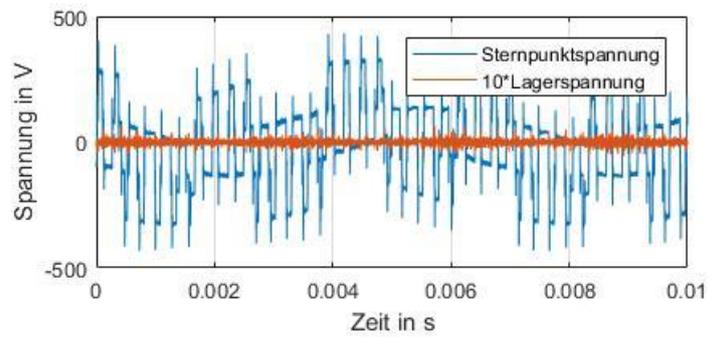
M4:



M5:

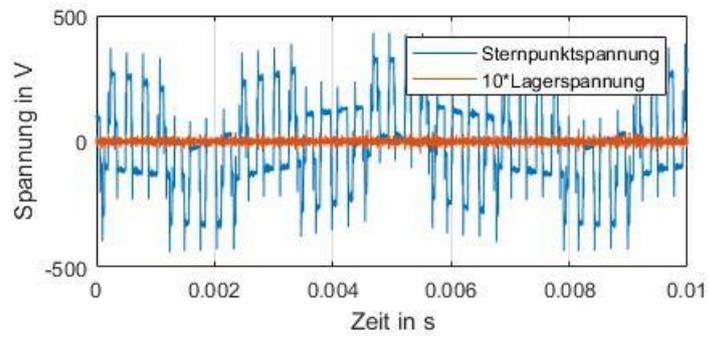


M6

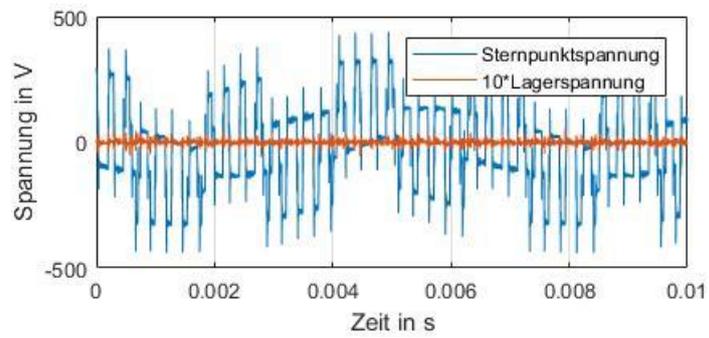




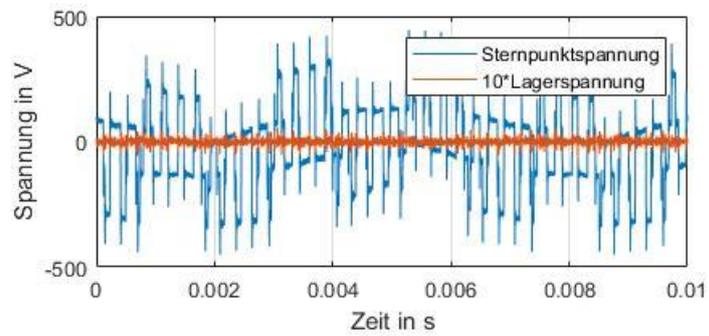
M7:



M8:

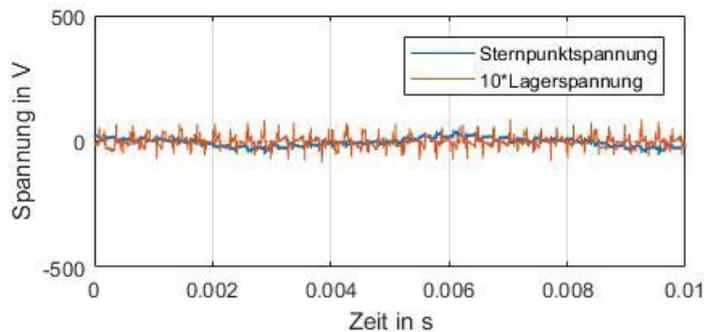


M9:

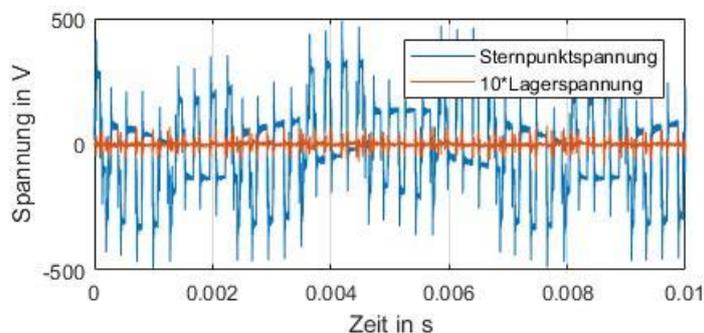




M10:



M11:



### 9.3 Anhang 3: Kopplung der verschiedenen Frequenzumrichter

In Abbildung 20 ist bei der Messung deutlich zu erkennen, dass zwischen 0.2ms und 0.3ms eine neue Anregung der Sternpunktspannung stattfindet, obwohl der Inverter von Motor 4 nicht schaltet. Diese Schwingungsanregungen, welche nicht zu den Schaltzeitpunkten der jeweiligen Inverter-IGBTs passen, sind auf allen gemessenen Sternpunktspannungen und Lagerspannungen vorhanden. Die Zwischenkreisspannung und die verketteten Spannungen am Motoreingang zeigen keine Erklärung für diese Anregung. In den drei Phasenspannungen am Motoreingang sind zu den massgebenden Zeiten jedoch jeweils Sprünge «gleicher Höhe» zu sehen. Abbildung 47 zeigt den an Motor 2 gemessenen Verlauf der drei Phasenspannungen  $u_1$ ,  $u_2$  und  $u_3$ . Zusätzlich eingezeichnet ist der berechnete Verlauf des Potentials der negativen Zwischenkreisschiene und der positiven Zwischenkreisschiene. Deutlich erkennbar sind die Sprünge der Phasenspannungen, welche mit dem Schalten zusammenhängen z.B. in  $u_3$  um 5ms. Obwohl Phase 3 nicht geschaltet wird, bewirkt das Schalten in Phasen 1 und 2 eine Verschiebung des Potentials der Zwischenkreisspannung gegenüber der Netz-Erde. Diese Sprünge entsprechen aber den «normalen» Sprüngen in der Gleichtaktspannung.

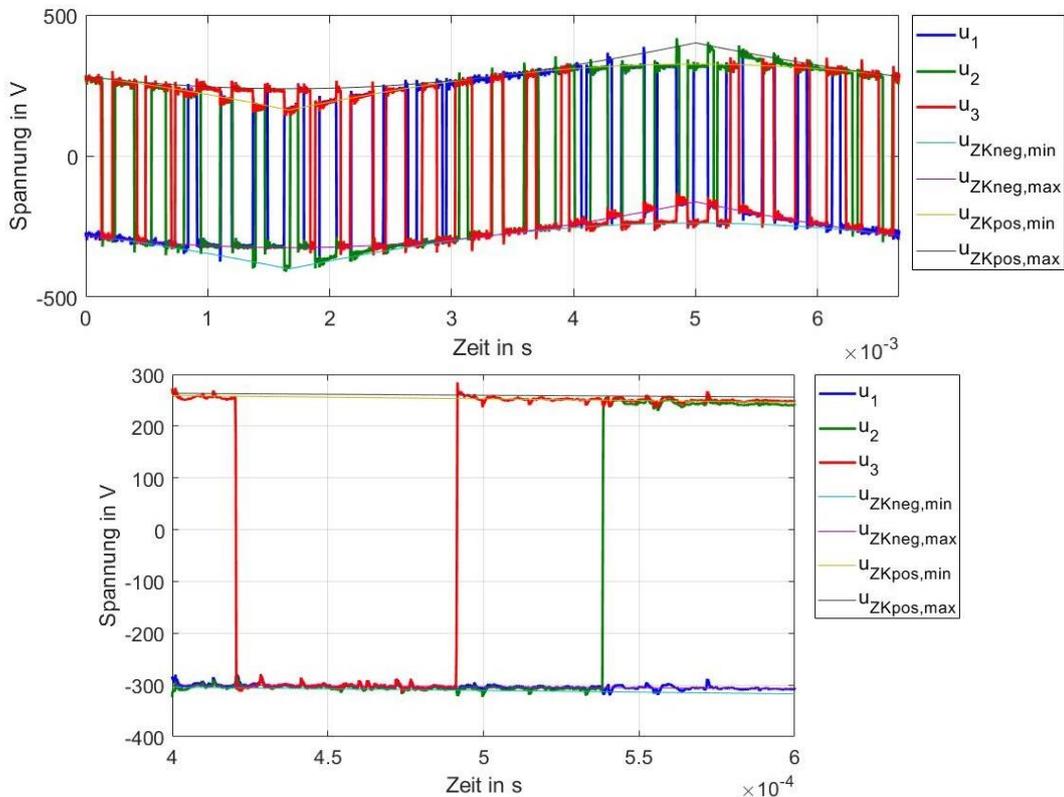


Abbildung 47: Verlauf der drei Phasenspannungen  $u_1$ ,  $u_2$  und  $u_3$  am Motor, gemessen gegenüber dem geerdeten Motorgehäuse. Ausserdem eingezeichnet sind die möglichen Potentiale der positiven und negativen Schiene der Zwischenkreisspannung. Oben: Verlauf über eine Netzperiode, Unten: Zoom

Abbildung 48 zeigt links den simulierten Verlauf der Phasenspannungen, wenn nur ein Inverter am Netz angeschlossen ist. Bei leitenden Dioden ist jeweils die positive oder die negative Zwischenkreisschiene an die entsprechende Phasenspannung gebunden. Ist das Potential der positiven Schiene grösser als das grösste Potential der verketteten Spannung und das Potential der negativen Schiene kleiner als das kleinste Potential der verketteten Spannung, so ist das Potential der Zwischenkreisspannung nicht direkt vorgegeben. Über das geschirmte Motorkabel ist der Zwischenkreis mit der Netz-Erde über ein RLC-System verbunden.

Wird nun zusätzlich Motor 3 an das Netz angeschlossen, so wird bei jedem Schalten von Inverter 3 ein Nullstrom fliessen. Leitet eine der Inverter-Dioden, so fliesst dieser Strom auch durch die entsprechende Diode und bewirkt einen Spannungsabfall an der Netzimpedanz. Abbildung 48 zeigt rechts den simulierten Verlauf der Phasenspannungen, wenn zwei Inverter am gleichen Netz hängen. Dieser Sprung der Inverter-Phasenspannungen bildet sich dann bei der Sternpunktspannung als angeregte Schwingung ab. Im Vergleich zu den Schwingungen durch das «eigene» Schalten sind jedoch die Amplituden der zusätzlichen Schwingungen so klein, dass sie keine EDM Durchbrüche verursachen können. Auch auf die Rotor-Erdströme haben die Schwingungen keinen grossen Einfluss.

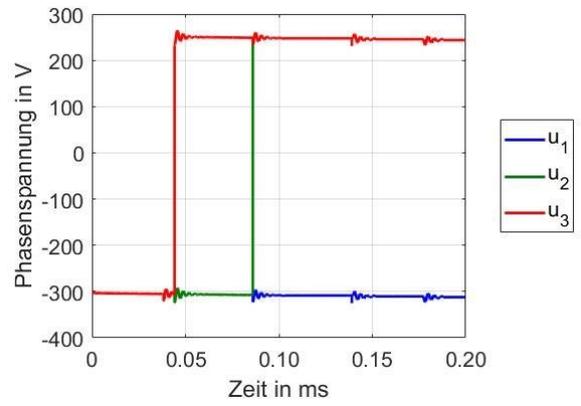
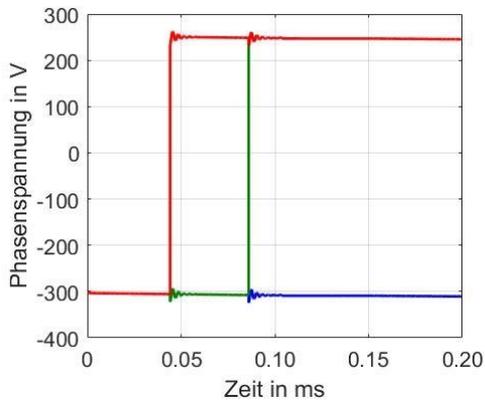


Abbildung 48: Simulierter Verlauf der drei Phasenspannungen  $u_1$ ,  $u_2$  und  $u_3$ . Links bei nur einem Inverter-Motor System am Netz, rechts mit einem zweiten Inverter-Motor System am gleichen Netz.