

Interner Bericht

DLR-IB-FT-BS-2025-19

**Untersuchung von
Lagerströmen einer
elektrischen Maschine auf Basis
verschiedener Messmethoden**

Bachelorarbeit

Justus Näser

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Institutsbericht
DLR-IB-FT-BS-2025-19

Untersuchung von Lagerströmen einer elektrischen Maschine auf Basis verschiedener Messmethoden

Justus Näser

Institut für Flugsystemtechnik
Braunschweig

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Flugsystemtechnik
Abteilung Flugversuchstechnik & IT

**Stufe der Zugänglichkeit: I, Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird
elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt.**

Braunschweig, den 30.01.2025

Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. S. Levedag
Abteilungsleitung: Dr.-Ing. Carl-Henrik Oertel
Betreuer:in: Dr.-Ing. Carl-Henrik Oertel
Verfasser:in: Justus Näser





Ostfalia

Hochschule für angewandte
Wissenschaften

Fakultät Elektro- und Informationstechnik

Untersuchung von Lagerströmen einer elektrischen Maschine auf Basis verschiedener Messmethoden

Abschlussarbeit zur Erlangung des Hochschulgrades

„Bachelor Of Engineering“

des Studiengangs „Elektro- und Informationstechnik“

Schwerpunkt: Elektromobilität und Energiesysteme

an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

- Hochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

verfasst von Justus Näser

Eingereicht am: 7. Januar 2025

Bearbeitungszeitraum:	11/2024 - 01/2025
Matrikelnummer:	██████████
Erstprüfer:	Prof. Dr. Karl-Dieter Tieste
betreuende Firma:	DLR e.V., Braunschweig
Zweitprüfer (Betreuer):	Dr.-Ing. Carl-Henrik Oertel

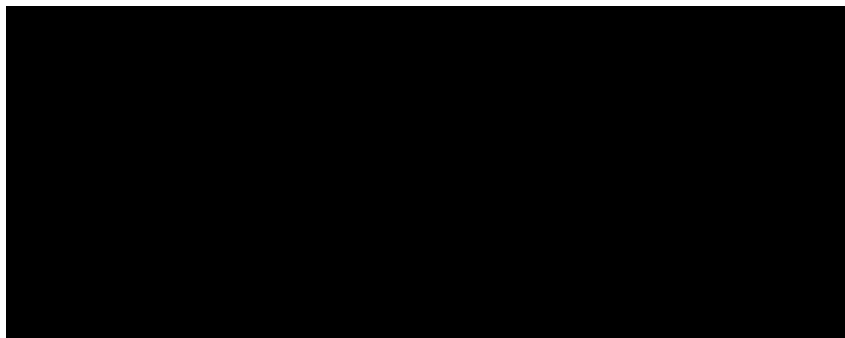


Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt habe, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Dies gilt explizit auch für die Verwendung von text- oder codegenerierenden KI-Werkzeugen als Quelle.

Diese Arbeit wurde noch nicht, auch nicht auszugsweise, für eine andere Studien- oder Prüfungsleistung verwendet. Ich bin damit einverstanden, dass die Arbeit einer elektronischen Plagiatsprüfung unterzogen werden kann.

Ort, Datum, Unterschrift



Kurzfassung

Diese Bachelorarbeit wird in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Braunschweig, unter Betreuung von Herrn Dr.-Ing. Carl-Henrik Oertel durchgeführt.

Im Zuge dieser Arbeit sollen Lagerströme in einem modernen, dreiphasig betriebenen Elektromotor untersucht werden. Zu diesem Zweck wird ein Motorprüfstand der Firma imx Solutions GmbH, Berlin (IMX) verwendet. Der darin enthaltene Prüfling ist ein Synchron-Servomotor, welcher an einen modernen Frequenzumrichter in Insulated-Gate-Bipolar-Transistor (IGBT) - Bauweise angeschlossen ist. Da durch diesen Aufbau eine typische Industrieanwendung nachgebildet wird, ist die Untersuchung von auftretenden Lagerströmen in Bezug auf eine potenzielle Schädigung der Motorlager unter realistischen Bedingungen möglich.

Das betrachtete Thema ist hochaktuell, da die Problematik auftretender Lagerströme, durch die Weiterentwicklung der Umrichtertechnik, in den letzten Jahren stetig an Aktualität zugenommen hat. Es wird daher auch eine Unterscheidung der Lagerstromproblematik vergangener Jahrzehnte zu der heute verwendeten Technik diskutiert.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verständnis der im Motor auftretenden parasitären Effekte und daraus resultierenden Strömen zu erhalten. Aus diesem Grund werden Messungen an der Maschine durchgeführt, welche auftretende Lagerströme bei verschiedenen Drehzahl-, sowie Lastbedingungen nachweisen sollen.

Es werden verschiedene Messverfahren angewandt und anschließend hinsichtlich der gewonnenen Messergebnisse bewertet.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Formelzeichenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Methodik und Aufbau	2
1.2 Quellenlage	2
2 Theoretische Betrachtungen	3
2.1 Die Synchronmaschine	3
2.1.1 Betrieb einer Synchronmaschine am starren Netz	5
2.2 Die elektronisch kommutierte Synchronmaschine	5
2.2.1 U-Frequenzumrichter	6
2.3 Lagerströme	11
2.3.1 Parasitäre Effekte in elektrischen Antrieben	11
2.3.2 Frequenzabhängigkeit von Kapazität und Induktivität	11
2.3.3 Gleichtaktspannung	13
2.3.4 Kapazitives Ersatzschaltbild der Synchronmaschine	13
2.3.5 du/dt -Ströme	16
2.3.6 Impulsförmige Wellenspannung und zirkulierende Lagerströme	17
2.3.7 EDM-Ströme	18
2.3.8 Einfluss der Motorerdung und kapazitive Erdströme	20
2.3.9 Klassische Wellenspannung	20
2.3.10 Zusammenfassung	21
2.4 Schutzmaßnahmen gegen Lagerströme	23
2.4.1 Wahl des Umrichters	23
2.4.2 Optimierte Modulationsverfahren	24
2.4.3 Filterschaltungen	24
2.4.4 Leitungsbasierte Schutzmaßnahmen	25
2.4.5 Isolierte Motorlager	26
2.4.6 Erdungsbürsten	26
2.5 Wirtschaftliche Bedeutung von Lagerströmen	27
3 Aufbau des Synchronmotorprüfstandes	28
3.1 Frequenzumrichter	29

3.2	Motor	30
3.3	Erdungskonzept und Fehlerschaltungen	31
3.4	Messpunkte	32
3.5	Prüfstandssoftware	32
4	Messtechnik	34
5	Messungen	42
5.1	Grundlegendes	42
5.2	Einfluss des Betriebspunktes auf den Lagerstrom	44
5.3	Einfluss des IMDs auf den Lagerstrom	46
5.4	Messung der Gleichtaktspannung	48
5.5	Messung der Wellenspannung ohne Ableitung des Lagerstroms	52
5.6	Messung des B-seitigen Lagerstroms mit der Speichen-Messmethode ohne Ableitung des Lagerstroms	55
5.7	Messung des B-seitigen Lagerstroms mit dem AEGIS Wellenerdungsring	60
5.8	Messung des B-seitigen Lagerstroms mit Erdungsbürsten	63
5.9	Messung des Erdstroms	68
6	Ausblick und Fazit	71
6.1	Schwächen des verwendeten Messaufbaus	71
6.2	Ausblick auf alternative Messmethoden	72
6.3	Fazit	73
	Literaturverzeichnis	V
	Anhang	VII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Querschnittszeichnung einer permanenterregten Synchronmaschine [2]	3
Abbildung 2:	Vereinfachtes generalisiertes Ersatzschaltbild eines U-Umrichters mit Transistoren V1-V6 [3]	6
Abbildung 3:	Prinzip der elektronischen Drehfelderzeugung durch ein von Transistoren erzeugtes Schaltmuster. V1-V6 bezieht sich auf die Transistoranordnung in Abbildung 2. [3]	8
Abbildung 4:	Blockschaltbild der direkten Selbstregelung [3]	10
Abbildung 5:	Schematischer Längsschnitt einer Drehfeldmaschine mit dargestellten Kopplungskapazitäten [6]	14
Abbildung 6:	Vereinfachtes kapazitives Ersatzschaltbild einer Drehfeldmaschine für hohe Frequenzen	15
Abbildung 7:	Lauffläche eines durch Lagerströme zerstörten Motorlagers (Quelle: Prof. Dr. Karl-Dieter Tieste, Ostfalia Hochschule) . .	19
Abbildung 8:	Abbildung des Motorprüfstandes im DLR-Braunschweig (Quelle: DLR, Braunschweig)	29
Abbildung 9:	Beispielhafter Programmablauf des Motorprüfstandes im grafischen Editor der Prüfstandssoftware (Quelle: DLR, Braunschweig)	33
Abbildung 10:	Abbildung der Stromzange in der FE-Erdleitung des Prüflingsmotors (Quelle: DLR, Braunschweig)	37
Abbildung 11:	Abbildung des eingebauten Wellenerdungsringes (Die Verbindungswelle zwischen den Maschinen wurde zu Demonstrationszwecken ausgebaut.) (Quelle: DLR, Braunschweig) .	39
Abbildung 12:	Abbildung des eingebauten Kohlebürstenhalters mit Wellenspannungssonde (Die Verbindungswelle zwischen den Maschinen wurde zu Demonstrationszwecken ausgebaut.) (Quelle: DLR, Braunschweig)	40
Abbildung 13:	Abbildung der Speichenmessung mit gleichzeitig angeschlossenen Erdungsring (Quelle: DLR, Braunschweig)	41
Abbildung 14:	Strommesswerte an der Kohlebürste C60 bei Variation der Motordrehzahl	45
Abbildung 15:	Strommesswerte an der Kohlebürste C60 bei Variation des Motordrehmoments	45
Abbildung 16:	Frequenzspektrum des Lagerstromes mit Speichen-Strommessung am Lagerschild „B“ - ohne Ableitung des Lagerstroms	47

Abbildung 17:	Frequenzspektrum des Lagerstromes mit Speichen-Strommessung am Lagerschild „B“ ohne Ableitung des Lagerstroms - IMD vom Zwischenkreis und FE-Potenzial getrennt	47
Abbildung 18:	Frequenzspektrum der Wellenspannung ohne Ableitung des Lagerstroms - mit und ohne angeschlossenen IMD	48
Abbildung 19:	Frequenzspektrum der Gleichtaktspannung am Sternpunkt .	49
Abbildung 20:	Effektivwertberechnung der Zwischenkreisspannungen sowie der Gleichtaktspannung	51
Abbildung 21:	Frequenzspektrum der positiven Zwischenkreisspannung . .	51
Abbildung 22:	Messung der Gleichtaktspannung über dem Sternpunkt sowie der Wellenspannung	53
Abbildung 23:	Frequenzspektrum der Gleichtaktspannung über dem Sternpunkt sowie der Wellenspannung	53
Abbildung 24:	Effektivwertberechnung der Gleichtakt- sowie der Wellenspannung	54
Abbildung 25:	Messung des Lagerstroms mit der Speichen-Messmethode .	55
Abbildung 26:	Frequenzspektrum des Lagerstroms mit der Speichen-Messmethode	56
Abbildung 27:	Messung des Lagerstroms mit der Speichen-Messmethode - Ausschnitt der vier addierten Speichenströme	57
Abbildung 28:	Messung der Wellenspannung mit der Wellenspannungssonde - gleichzeitige Messung zu Abbildung 27	57
Abbildung 29:	Gestahlte Emissionen neben dem B-seitigen Lagerschild der Prüflingsmaschine - gemessen mit der Rogowskispule bei anliegendem Betriebspunkt	59
Abbildung 30:	Gemessener Erdstrom durch den Wellenerdungsring - parallel zum Motorlager	61
Abbildung 31:	Effektivwertberechnung des Erdstromes durch den Wellenerdungsring - parallel zum Motorlager	62
Abbildung 32:	Fehlerhafte Messung des Lagerstroms mit der Speichenmessmethode - gleichzeitig zur Erdungsringmessung	63
Abbildung 33:	Messung des Erdstroms durch die Kohlebürsten - parallel zum Motorlager	64
Abbildung 34:	Effektivwertberechnung des Erdstroms durch die Erdungsbürsten - parallel zum Motorlager	65
Abbildung 35:	Messung des Erdstroms durch Erdungsring und Kohlebürste S15	65

Abbildung 36:	Effektivwertberechnung des Lagerstroms ohne Ableitung („Aufbau3“), sowie der drei Wellenspannungen bei Ableitung mit den Erdungsbürsten („Aufbau8“ bis „Aufbau10“)	67
Abbildung 37:	Messung des Erdstroms auf dem Potenzial Functional Earth (FE) - mit und ohne Ableitung des Lagerstroms	68
Abbildung 38:	Frequenzspektrum des Erdstroms auf dem Potenzial FE - mit und ohne Ableitung des Lagerstroms	69
Abbildung 39:	Transferimpedanz der verwendeten Stromzange (verwendet in Configuration 2 - Ausschnitt aus dem Datenblatt [4])	70
Abbildung A1:	Vereinfachter Schaltplan des Motorprüfstandes im DLR - Teil 1 (Quelle: DLR, Braunschweig)	VII
Abbildung A2:	Vereinfachter Schaltplan des Motorprüfstandes im DLR - Teil 2 (Quelle: DLR, Braunschweig)	VIII
Abbildung A3:	Aufbauplan der Messungen	IX

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der wichtigsten Betriebswerte der EKSM „TG-Drives TGT5-1700“	31
Tabelle 2:	Zusammenfassung der verwendeten Messmittel	34
Tabelle 3:	Auswahltabelle der Betriebspunkte am Motorprüfstand	44
Tabelle 4:	Einteilung der Wellenerdungsmethoden in zwei Gruppen (Messwerte für bessere Vergleichbarkeit auf 5 mA gerundet (siehe Abschnitt 5.8)	66
Tabelle 5:	Zusammenfassung der berechneten Effektivwerte und Scheinleistungen mit und ohne Ableitung des Lagerstroms .	67

Abkürzungsverzeichnis

ALM	Active Line Module
AIM	Active Interface Module
BNC	Bayonet Neill Coelman - standardisierter Steckverbinder
BVR	Bearing Voltage Ratio
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DSR	Direkte Selbstregelung
EDM	Electronic Discharge Machining
EKSM	Elektronisch Kommutierte Synchronmaschine
FE	Functional Earth
FFT	Fast-Fourier-Transformation
Gegen EMK	Gegen-Elektromagnetische-Kraft
HF	Hochfrequenz
IGBT	Insulated-Gate-Bipolar-Transistor
IMD	Isolationsüberwachungsgerät
IMX	imx Solutions GmbH, Berlin
IT-Netz	Isolé-Terre-Netz
PC	Personal Computer
PE	Protected Earth
PTC	Kaltleiter-Temperaturwiderstand
PWM	Pulsweitenmodulation
RCD	Fehlerstromschutzschalter
RMS	Root-Mean-Square
SMM	Single Motor Module
ZK	Zwischenkreis

Formelzeichenverzeichnis

$2p$	Polpaarzahl
C	Kapazität
C_{sf}	Kapazität zwischen Ständerwicklung und Motorgehäuse
C_{sr}	Kapazität zwischen Ständerwicklung und Läufer
C_{rf}	Kapazität zwischen Läufer und Motorgehäuse
C_B	Kapazität im Motorlager
η	Wirkungsgrad des Motors
f_a	Abtastfrequenz
f_d	Drehfeldfrequenz
f_o	höchste abgetastete Frequenz
f_s	Schaltfrequenz
f_u	niedrigste abgetastete Frequenz
\underline{I}_B	Lagerstrom
\underline{I}_C	Strom durch eine Kapazität
I_{eff}	Effektivwert des Stromes
\underline{I}_L	Strom durch eine Induktivität
I_{max}	Maximalstrom des Motors
I_{pk}	Spitzenstrom
I_n	Nennstrom des Motors
I_{pp}	Strom Spitze zu Spitze
n_{max}	maximale Drehzahl des Motors
$I_{mess-umgerechnet}$	mit Dämpfungsfaktor der verwendeten Stromzange korrigierter Strom-Messwert
L	Induktivität
M_{max}	maximales Drehmoment des Motors
M_n	Nennmoment des Motors

n	Drehzahl
n_n	Nenn Drehzahl des Motors
ω	Kreisfrequenz
P_{mech}	mechanisches Drehmoment an der Motorwelle
$S_{eff \rightarrow abgeleitet}$	Effektivwert der abgeleiteten Scheinleistung
$S_{eff \rightarrow gesamt}$	Effektivwert der im Lager ohne Ableitung des Lagerstroms umgesetzten Scheinleistung
$S_{eff \rightarrow Lager}$	Effektivwert der im Lager umgesetzten Scheinleistung
U_{eff}	Effektivwert der Spannung
$U_{eff \rightarrow Bürste S15}$	Effektivwert der bei Ableitung durch die Erdungsbürste S15 gemessenen Wellenspannung
$U_{eff \rightarrow Erdungsring}$	Effektivwert der bei Ableitung durch den Erdungsring gemessenen Wellenspannung
$U_{Gleichtakt}$	Gleichtaktspannung
U_{mess}	mit dem Oszilloskop aufgenommener Wert bei Messung mit der verwendeten Stromzange
U_n	Nennspannung des Motors
U_{pk}	Spitzenspannung
U_{Welle}	Wellenspannung
X	frequenzabhängiger Widerstand (Reaktanz)
Z	Impedanz
Z_T	Transferimpedanz der verwendeten Stromzange

1 Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit soll die Thematik der Lagerströme an einer elektrischen Maschine untersucht werden. Die Arbeit wird mit Unterstützung des Institutes für Flugsystemtechnik, Abteilung FTV im DLR (Standort Braunschweig) durchgeführt und an der „Ostfalia - Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel“ eingereicht.

Der Begriff des Lagerstroms beschreibt einen elektrischen Strom, der durch ein Motorwellen-Lager eines Elektromotors fließt. Lagerströme sind unerwünschte, parasitäre Effekte, welche in der Lage sind, einen erheblichen Schaden an einem Elektromotor zu verursachen. Sie treten prinzipiell an jedem Motor auf, der mit einem elektrischen Wechselstrom betrieben wird.

Die Lagerstromproblematik ist seit langem bekannt. Für die meisten Anwendungen im Industrie- und Endverbraucher-Bereich existieren entsprechende Lösungen, die die zerstörerischen Auswirkungen dieser Ströme abmildern.

Lagerströme besitzen dennoch eine hohe und tendenziell steigende Relevanz für Anwendungen, bei denen das Hauptaugenmerk auf folgenden Punkten liegt:

- geringe Reaktionszeiten des Antriebes
- hohe Beschleunigungswerte
- hoher Leistungsumsatz
- hohe Ausfallsicherheit

Insbesondere Servoantriebe, wie sie in Abschnitt 2.2 beschrieben sind, stehen hier im Fokus.

Ein Grund sind die für den Betrieb der Motoren benötigten Frequenzumrichter. Diese Geräte wurden in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt. Sie erlauben, infolge schnellerer Transistortechnik und ausgefeilterer Modulationsverfahren immer schnellere Reaktionszeiten und Leistungsumsätze. Ein Nebeneffekt ist der Anstieg der Lagerströme, welche ebenso ausgefeilte Maßnahmen zu ihrer Vermeidung erfordern. Ein davon abhängiger Bereich ist die Automobilindustrie, welche in hohem Maß automatisierte Fertigungsstraßen einsetzt. Die Elektromotoren dort eingesetzter Industrieroboter müssen schnelle Reaktionszeiten, Brems- und Beschleunigungsmanöver leisten und sind daher durch den Einsatz der Servo-Antriebstechnik besonders betroffen.

Ein Bereich, der gegenwärtig noch Gegenstand der Forschung und Entwicklung ist, ist die elektrifizierte Luftfahrt. Dabei geht es speziell um den Einsatz von Servomotoren anstelle der Strahltriebwerke eines Verkehrsflugzeuges.

Im Rahmen dieser Forschung plant das DLR das Projekt „GENTwoPro“, welches sich mit den möglichen Auswirkungen der Lagerströme auf einen elektrischen Flugzeugantrieb befasst und gegenwärtig die Antragsphase durchläuft. Diese Bachelorarbeit wird im Vorfeld dazu durchgeführt, um einen Einstieg in das Thema zu geben, sowie Methoden für die Verhinderung von Lagerströmen vorzustellen und zu erproben. Das DLR verfügt für seine Forschungsarbeit über einen Motorprüfstand, an dem Lagerströme in einem realitätsnahen Umfeld untersucht werden können.

1.1 Methodik und Aufbau

Für den Aufbau der Bachelorarbeit wurde eine quantitative Methode gewählt, infolge welcher das große Feld der Lagerströme auf den vom DLR genutzten Prüfstand beschränkt wurde. Die hier durchgeführte Untersuchung reduziert sich daher auf die Betrachtung von Lagerströmen an einer Synchronmaschine, die mit einem bestimmten Umrichter betrieben wird. Maßnahmen der Vermeidung dieser Ströme werden auf eine Ableitung der elektrischen Energie am Lager vorbei beschränkt. An die Fragestellung angrenzende Themengebiete werden kurz behandelt, um eine Einordnung der Untersuchung in ein größeres Forschungsfeld zu ermöglichen.

Die Arbeit ist daher folgendermaßen aufgebaut. Nach einem kurzen Einblick in die Funktion einer elektrischen Maschine wird der Leser immer weiter in die Thematik der Lagerströme an einem modernen Elektromotor eingeführt. Dabei orientiert sich die Arbeit stets am Wirkprinzip der hier untersuchten Maschine. Nach Beschreibung aller relevanten theoretischen Grundlagen (Kapitel 2), wird der Aufbau des Motorprüfstandes (Kapitel 3) und der verwendeten Messinstrumente (Kapitel 4) betrachtet. Anschließend folgen die Messungen in Kapitel 5, welche die vormals betrachtete Theorie in Bezug zur realen Maschine stellen. Abschließend wird ein Ausblick und ein Fazit gegeben, welches den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn der Untersuchung auswertet (Kapitel 6).

1.2 Quellenlage

Die theoretischen Betrachtungen dieser Arbeit fußen zum großen Teil auf den Forschungen des Dipl. Ing. Volkmar Hausberg, welcher in den 1990er und frühen 2000er Jahren an damals aufkommenden IGBT-Frequenzumrichtern geforscht hat [6]. Hausbergs Forschungen sind heute noch hochaktuell, da Frequenzumrichter nach wie vor nach den gleichen Prinzipien arbeiten und Hausberg infolge seiner Forschung wesentliche Wirkprinzipien der Lagerströme durch Messung nachweisen konnte.

2 Theoretische Betrachtungen

2.1 Die Synchronmaschine

Im Zuge dieser Arbeit werden Lagerströme anhand einer Synchronmaschine betrachtet. Daher ist es sinnvoll, sich zunächst mit dem Prinzip einer solchen elektrischen Maschine auseinanderzusetzen.

Eine Synchronmaschine ist ein Elektromotor, welcher von einem elektrisch rotierenden Drehstrom gespeist wird. Sie enthält einen rotierenden Läufer (auch Rotor genannt), sowie einen axial darum angeordneten fest stehenden Ständer (siehe Abbildung 1).

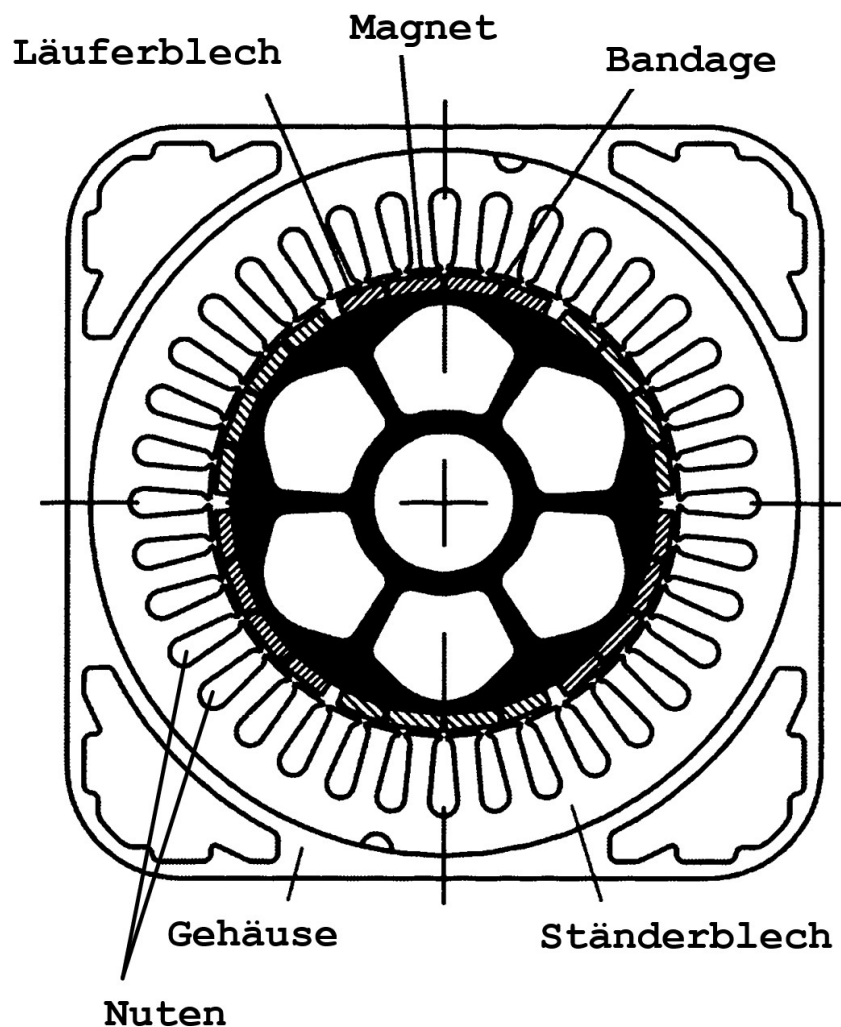


Abbildung 1: Querschnittszeichnung einer permanenten Synchronmaschine [2]

Der elektrische Drehstrom besteht aus drei sinusförmigen Strömen einer bestimmten Frequenz f , die einander so überlagert werden, dass die positiven Nulldurchgänge jedes Stromes exakt 120° phasenverschoben auseinander liegen. Diese Ströme werden daher auch Phasen genannt. Sie werden auf drei Leitern transportiert, welche sich auf einen gemeinsamen Sternpunkt beziehen. Im Sternpunkt herrscht der Theorie zufolge eine Spannung von 0 V.

In einer Synchronmaschine sind mindestens drei symmetrisch angeordnete Spulenwicklungen eingebaut, in welche der erwähnte Drehstrom geleitet wird. Diese Wicklungen befinden sich im Ständer und werden Ständerwicklungen genannt. Der Ständer enthält neben den Wicklungen auch das Motorgehäuse und die Lagerungen der Läuferwelle.

Im Ständer laufen die Wicklungen in sogenannten Nuten. Eine Wicklung wird dabei immer durch zwei Nuten des Ständers gezogen. Entsprechend der elektrischen Phasenverschiebung zwischen den drei Leitern müssen Spulen, die unterschiedlich phasenverschobene Ströme transportieren, auch entsprechend um 120° gegeneinander verschoben angeordnet werden. Die einfachste Anordnung enthält dabei drei Spulen, welche die Welle „umschlingend“ im Ständer angeordnet sind. Der Abstand zwischen zwei Spulen beträgt 120° . Man spricht von einer Polpaarzahl von $2p = 1$. Zwischen den Ständerspulen entsteht nun ein nach dem Durchflutungssatz rotierendes magnetisches Feld, dessen Drehfelddrehzahl n nach Gleichung 1 der Frequenz f_d entspricht. [2]

Wird nun genau zwischen die Spulen ein weiteres Spulentripel eingesetzt, beträgt der Abstand zweier benachbarter Spulen nur noch 60° . Man spricht von einer Polpaarzahl von $2p = 2$. Nach Gleichung 1 folgt eine Drehfelddrehzahl, die der halben Frequenz des angelegten Drehstromsystems entspricht.

$$n = \frac{f_d}{2p} \quad (1)$$

Es ergibt sich ein Ständer, in dem, getrieben durch den rotierenden Drehstrom, ein magnetisches Drehfeld bestimmter Frequenz entsteht. Dazu kommt der angesprochene Läufer, welcher axial innerhalb der Wicklungen angeordnet ist. Auf die Darstellung verschiedener Bauformen, wie der Ausführung einer fremderregten Ankerwicklung, wird hier verzichtet. Da es sich bei der in dieser Arbeit untersuchten Maschine um eine Synchronmaschine mit permanent magnetischer Erregung handelt, wird lediglich auf diese Funktionsweise näher eingegangen.

Die hier untersuchte Maschine besitzt einen Läufer, der keine feste elektrische Verbindung zu den Leitungsklemmen der Maschine aufweist, sondern aufgrund auf der Oberfläche aufgebrachtener Magneten dem Ständerdrehfeld folgt. Dabei werden die

Pole des Läufers synchron vom Drehfeld mitgerissen und bringen den Läufer in eine mechanische Drehbewegung. Die mechanische Drehzahl der Welle entspricht also genau der Drehfelddrehzahl, welche wiederum von der Frequenz des angelegten Drehstromsystems abhängt [3].

2.1.1 Betrieb einer Synchronmaschine am starren Netz

In Deutschland wird ein Drehstrom von 400 V zwischen den Außenleitern, bei einer Frequenz von 50 Hz, von den Stromnetzbetreibern bereitgestellt. Aus diesem Grund kann eine Synchronmaschine direkt am öffentlichen Stromnetz betrieben werden. Allerdings ist aufgrund der Netzfrequenz nur eine Wellendrehzahl, abhängig von der gewählten Polpaarzahl, möglich. Man spricht daher auch vom Betrieb am „starren“ Netz.

Der Einsatz am starren Netz reicht für viele Anwendungen, bei denen gleichförmig drehende Bewegungen ohne veränderliche Drehzahlen gefordert sind, wie dem Einsatz an Förderbändern oder Werkzeugmaschinen völlig aus. Doch überall, wo eine veränderliche Drehzahl und schnelles Reagieren des Antriebes vonnöten sind, wie bei elektrisch betriebenen Zügen, Elektroautos oder Industrierobotern, muss eine andere Form der Motorspeisung gefunden werden.

2.2 Die elektronisch kommutierte Synchronmaschine

Um eine Synchronmaschine mit veränderlicher Drehzahl betreiben zu können, müssen die Eigenschaften des angelegten Drehfeldes manipuliert werden. Dazu werden verschiedene Wege beschritten.

Hier soll lediglich die Elektronisch Kommutierte Synchronmaschine (EKSM) in Verbindung mit einem passenden Frequenzumrichter betrachtet werden, da für diese Arbeit an einer solchen Maschine geforscht wird.

Die EKSM stellt im Wesentlichen eine moderne Bauform der Synchronmaschine dar. Sie bietet eine Ständerwicklung sowie einen mit Permanentmagneten besetzten Läufer. Da in diesem Fall eine Sinus-Bestromung der Maschine verwendet wird, muss sich zu einer sinusförmig angelegten Spannung auch ein sinusförmiger magnetischer Fluss einstellen. Das wird über eine spezielle Anordnung der Permanentmagnete erreicht. So verfügt der Läufer über eine parallele Magnetisierung der Magnete entlang der Läuferachse, sowie eine Reduzierung der Magnete an den Polen auf etwa zwei Drittel Bedeckung. Auffälligstes Merkmal dieser Maschinen ist aber ein an der Stirnseite der

Welle angebrachter Läuferlagegeber. Dieser Lagegeber wird häufig als Resolver oder Inkrementalgeber ausgeführt und kann die genaue Position sowie Geschwindigkeit und Drehrichtung des Läufers ermitteln und an den Umrichter zur Auswertung weitergeben. Man spricht von einer selbstgeführten Maschine.

Zusätzlich ist in vielen Fällen eine elektromagnetische Haltebremse mit in das Ständergehäuse integriert. Diese ermöglicht sowohl eine schnelle Verzögerung als auch exaktes Halten der Wellenposition im Stillstand.

Die EKSM wird häufig auch als Servomotor betitelt. Ein Servomotor ist ein Elektromotor, der selbst bei niedrigen Drehzahlen ein zeitlich konstantes Drehmoment liefern kann. Damit ist eine winkelgenaue Positionierung der Läuferwelle möglich.

Das Betriebsverhalten der hier beschriebenen Maschine weicht deshalb auch von einer normalen Synchronmaschine ab, die fremdgesteuert von einem Umrichter ohne Ansehen des Ist-Zustandes der Maschine betrieben wird.

2.2.1 U-Frequenzumrichter

Die EKSM wird grundsätzlich an einem U-Umrichter betrieben. Der Begriff des U-Umrichters beutet auf eine Energiespeicherung im Zwischenkreis in Form einer Spannung hin.

Solch ein Umrichter gehört in die Kategorie der Stromrichter mit Zwischenkreis (ZK), einer Einrichtung, die das speisende Netz mit fester Frequenz galvanisch vom Maschinennetz mit variabler Frequenz trennt. Der Umrichter kann grundsätzlich in einen Eingangsstromrichter, einen ZK, sowie einen Maschinenstromrichter unterteilt werden (siehe Abbildung 2).

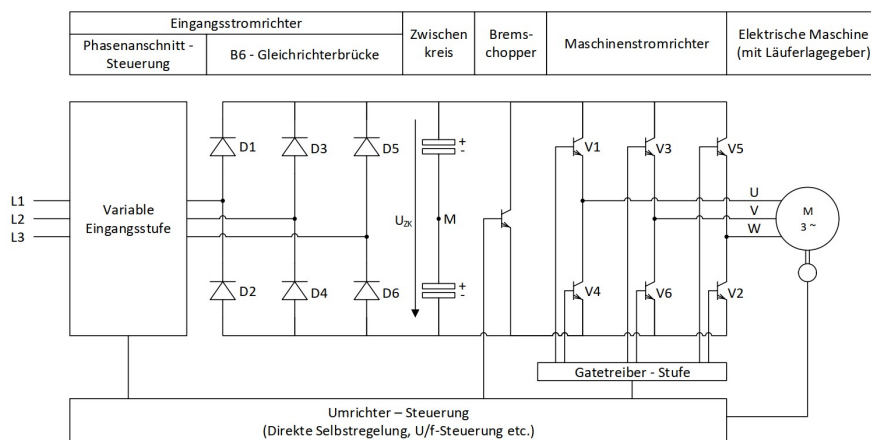


Abbildung 2: Vereinfachtes generalisiertes Ersatzschaltbild eines U-Umrichters mit Transistoren V1-V6 [3]

Der Eingangsstromrichter wird typischerweise aus dem öffentlichen Drehstromnetz gespeist und richtet die dreiphasige Wechselspannung in eine geglättete Gleichspannung um. Er besteht aus einer dreiphasigen Gleichrichterbrücke in sogenannter B6-Konfiguration. Die erzeugte Gleichspannung wird ZK-Spannung genannt und in Kondensatoren zwischengespeichert. Dabei sollte erwähnt werden, dass es sich um eine zu Null symmetrische Gleichspannung mit mittlerem Bezugspotenzial handelt. Aus diesem Grund werden, wie in Abbildung 2 dargestellt, zwei Kondensatoren für die Zwischenspeicherung verwendet.

Es bestehen mehrere Verfahren für die Verwendung einer festen oder variablen ZK-Spannung. Da im Falle des hier untersuchten Antriebspaketes eine variable ZK-Spannung verwendet wird, wird auf diese Konfiguration näher eingegangen. Der positive sowie negative Anteil dieser Spannung wird symmetrisch zum Null-Potenzial variiert. In der Praxis wird dazu eine Phasenanschnittsteuerung vor die Gleichrichterbrücke geschaltet. Diese schneidet, gesteuert vom Maschinenumrichter, die gleichzurichtende Netzspannung so an, dass sich eine geringere Amplitude im Vergleich zur Netzspannung einstellt. Nach Gleichrichtung entsteht so eine geringere, variabel einstellbare Gleichspannung im ZK. Grund dieser Methode ist die Höhe der Spannung in den Motorwicklungen, die direkt von der Höhe der ZK-Spannung abhängt. Das Verfahren begünstigt zwar geringe Schaltverluste im Umrichter, kann jedoch eine gewisse Blindleistung in das Stromnetz zurückspeisen. Dies geschieht, wenn sich die Maschine im Bremsbetrieb befindet. Aus diesem Grunde wird es nur, wie im hier untersuchten Fall, bei Maschinen geringer Leistung eingesetzt [3].

Im Folgenden wird der Zwischenkreis beschrieben. Da die Energie im ZK in Form einer Spannung gespeichert wird, wird diese Bauform U-Umrichter genannt. Im Gegensatz dazu existiert ein I-Umrichter, der zur Energiespeicherung eine Drossel im ZK besitzt. Auf diesen Umrichtertyp wird hier nicht näher eingegangen. Zusätzlich zu dem Kondensator enthält der ZK überdies einen sogenannten Brems-Chopper, welcher die folgende Funktion erfüllt. Wird die Maschine abgebremst, wirkt sie generatorisch und es wird Energie in die ZK-Kondensatoren zurückgeladen. Um den ZK vor Überspannung zu schützen, muss diese überschüssige Energie umgesetzt werden, was mithilfe eines getaktet zugeschalteten Widerstandes parallel zu den ZK-Kondensatoren geschieht [3].

Nach der Behandlung von Eingangsstromrichter und Zwischenkreis soll nun der Maschinenstromrichter näher erläutert werden. Dieser Umrichter übernimmt die eigentliche Ansteuerung der Maschine und erzeugt aus der Gleichspannung des ZK ein gepulstes Drehspannungssystem. Es handelt sich also um einen Wechselrichter, realisiert in B6C-Konfiguration, sprich mit drei Halbbrücken, bestehend aus sechs IGBTs mit je einer antiparallelen Freilaufdiode. Diese Halbbrücken werden über Gatetreiber-

2 THEORETISCHE BETRACHTUNGEN

Transistoren angesteuert und erhalten ihre Signale von einem Mikrocontroller. Sie erzeugen pulswidenmodulierte (PWM) Signale mit variabler Pulsbreite, über welche das Dreiphasen-Sinussystem erzeugt wird.

Prinzipiell kann man sich die sechs IGBTs als Schalter vorstellen, welche die symmetrische ZK-Spannung sowohl positiv (oberer Transistor einer Halbbrücke durchgeschaltet), als auch negativ (unterer Transistor einer Halbbrücke durchgeschaltet) auf die drei Motorwicklungen geben. Es ist dabei von hoher Wichtigkeit, dass der obere und untere Transistor einer Halbbrücke niemals gleichzeitig einschalten. Die ZK-Spannung würde sonst kurzgeschlossen, was eine Zerstörung des Umrichters zur Folge hat.

Im Falle einer durch den U-Umrichter betriebenen Synchronmaschine würden die IGBTs, ohne weitere Beachtung der tatsächlichen Läuferlage der Maschine das Drehfeld schalten. In Bezug auf eine EKSM ist jedoch eine Berücksichtigung der aktuellen Läuferlage notwendig. Basierend auf den Daten des Läuferlagegebers schaltet der Maschinenstromrichter die nächste Wicklung immer so ein, dass ein maximales Drehmoment wirkt. Auf diese Weise wird ein gleichförmiges, drehwinkelabhängiges Drehmoment auf die Welle übertragen. Um diese Forderung zu erreichen, muss der elektrische Polradwinkel, sprich die Phasenverschiebung zwischen Läufer- und Ständerfeld, 90° betragen [3]. Die Ständerströme werden, basierend auf dem bekannten Läuferwellenwinkel, nach Betrag und Phase entsprechend gesteuert. Wie bei der Synchronmaschine wird eine Drehzahlerhöhung durch Erhöhung der Drehfeldfrequenz erreicht.

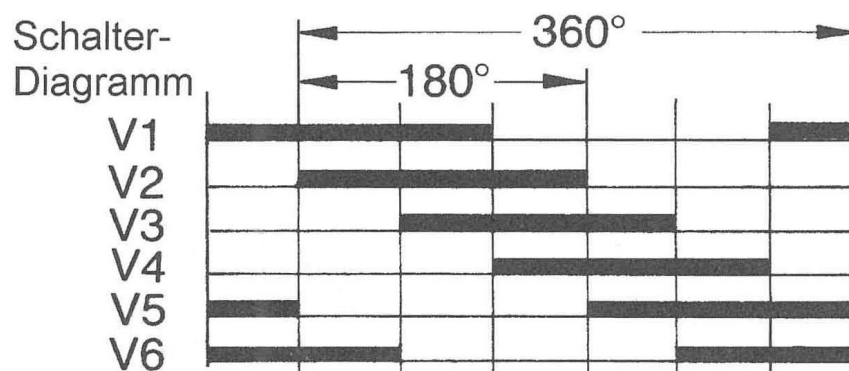


Abbildung 3: Prinzip der elektronischen Drehfelderzeugung durch ein von Transistoren erzeugtes Schaltmuster. V1-V6 bezieht sich auf die Transistoranordnung in Abbildung 2. [3]

Grundsätzlich werden die sechs IGBTs mit überlappenden Schaltzeiten angesteuert, um in den Wicklungen der EKSM um 120° phasenverschobene, sinusförmige Strangspannungen zu erzeugen (siehe Abbildung 3). Aus den Schaltimpulsen der Transistoren entsteht so ein Drehstromsystem.

Es wird in diesem Fall allerdings eine spezielle Regelung, Direkte Selbstregelung (DSR) genannt, vorgeschaltet. Diese Form der Regelung arbeitet feldorientiert. Das bedeutet, dass der magnetische Fluss in der Maschine in die Regelung einbezogen wird. Da der magnetische Fluss nicht direkt gemessen werden kann, wird ein elektrisches Ersatzmodell der Maschine im Umrichter berechnet. Solche Ersatzmodelle können je nach Ausstattung des Umrichters sehr aufwendig werden und erfordern höhere Rechenleistungen als in nicht feldorientiert arbeitenden Frequenzumrichtern. Die Funktion der DSR kann anhand der Abbildung 4 nachvollzogen werden. Die Prinzipien der DSR wurden [3] entnommen.

Wie in Abbildung 4 zu sehen, wird zur Regelung zunächst ein elektrisches Modell berechnet. In dieses geht, neben den in den Phasen gemessenen Spannungen und Strömen, auch der Schaltzustand der Transistoren ein. Das Modell gibt drei Parameter aus. Das ist zum einen eine Ist-Drehzahl, die mit dem Drehzahlwert des Lagegebers abgeglichen wird und eine Sollwertregelung der Maschine ermöglicht. Die Sollwertregelung regelt den Fluss und das Drehmoment über zwei getrennte Regler. Dabei wird eine vorgegebene Drehzahl, sowie die aktuelle Drehzahl einbezogen. Darüber hinaus gibt das Modell ein Ist-Drehmoment und einen Ist-Fluss aus.

In der DSR werden alle ermittelten Parameter zusammengeführt. Zusätzlich wird die Schaltfrequenz vom Mikrocontroller des Umrichters vorgegeben. Diese Frequenz bestimmt den Zeitabstand, in dem die IGBTs schalten. Eine hohe Schaltfrequenz ermöglicht die Erzeugung einer möglichst glatten Sinuskurve, ruft aber auch ungewollte, hochfrequente Effekte hervor, auf die im Laufe der Arbeit näher eingegangen wird. Die Soll- und Istwerte von Drehmoment und magnetischem Fluss werden in einen speziellen Hystereseregler geführt, welcher direkt alle sechs IGBTs ansteuert. Es entsteht ein wie in Abbildung 3 gezeigtes Muster überlagerter Schaltzeiten, welche zur Bildung eines Drehstromsystems führen.

2 THEORETISCHE BETRACHTUNGEN

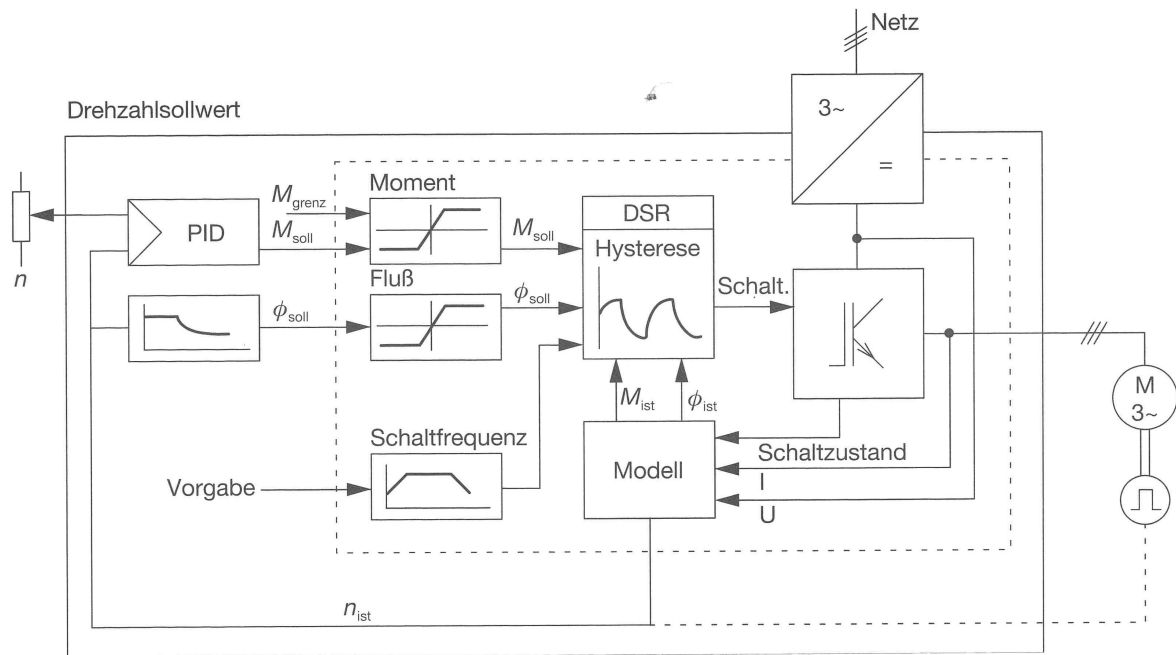


Abbildung 4: Blockschaltbild der direkten Selbstregelung [3]

2.3 Lagerströme

2.3.1 Parasitäre Effekte in elektrischen Antrieben

Im vorherigen Abschnitt wurde die ideale Synchronmaschine beschrieben. In dem vorgestellten Modell wurde davon ausgegangen, dass die in die Maschine geleiteten Ströme allein in den Wicklungen fließen und ein Magnetfeld erzeugen. In einer elektrischen Maschine treten jedoch noch weitere Effekte auf, die nur schwer durch eine verbesserte Konstruktion der Maschine abzumildern sind.

Damit sich der magnetische Fluss in der Maschine homogen verteilt und vollständig auf den Läufer wirkt, muss die Maschine konzentrisch um den Läufer angeordnet und unendlich lang sein. Alle zusätzlichen, nicht direkt für den idealen Feldverlauf verantwortlichen Elemente wie Standfüße, Wellenlager, Anschlusskasten, Lagegeber, Trageösen, Kühlrippen usw. stören das ideale Gefüge der Maschine und wirken sich auf das magnetische Feld in der Maschine aus. Dazu kommt, dass die elektrischen Eigenschaften der Wicklungen niemals gleich sind. Dieses Thema war in der Vergangenheit noch relevanter, als der mechanische Aufbau noch nicht so ausgereift war.

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind elektrische Effekte in der Maschine. Die Verteilung des magnetischen Feldes in der Maschine kann als induktive Kopplung zwischen den Maschinenelementen angesehen werden. Entsprechend der elektrischen Wechselstromlehre existiert auch eine kapazitive Kopplung zwischen Orten unterschiedlichen elektrischen Potentials. Die kapazitive Kopplung ist für das Verständnis der hier untersuchten Lagerströme wichtig, da Kapazitäten eine zu Induktivitäten verschiedene Frequenzabhängigkeit aufweisen, welche bei Umrichterspeisung besonders relevant ist. [14]

2.3.2 Frequenzabhängigkeit von Kapazität und Induktivität

Die in folgendem Abschnitt dargestellten Ausführungen wurden [13] entnommen. Um den Zusammenhang zwischen Kapazität (C), Induktivität (L), Spannung (U) und Stromstärke (I) verstehen zu können, muss zunächst das Ohm'sche Gesetz betrachtet werden. Der in Formel 2 dargestellte Zusammenhang gilt für Gleichspannungen, also für nicht sinusförmige Spannungen und Ströme und bezieht sich rein auf den ohm'schen Widerstand. Das Gesetz trifft keine Aussage über das Verhalten von Induktivitäten und Kapazitäten, ist aber die Grundlage für die Betrachtung der „Wechselstromwiderstände“.

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

Da die Synchronmaschine mit sinusförmigen, oder annähernd sinusförmigen Spannungen betrieben wird, muss das Ohm'sche Gesetz für Wechselströme betrachtet werden. Dabei bedient man sich der komplexen Rechnung. Der komplexe Widerstand, Impedanz (\underline{Z}) genannt, ist eine Zusammensetzung aus reellem „Gleichstromwiderstand“ (R) und frequenzabhängigem Widerstand (X). Der Zusammenhang ist in Formel 3 dargestellt. Das hier dargestellte Gesetz ist damit frequenzabhängig und lässt sich auf Kapazität und Induktivität anwenden.

$$\underline{Z} = R + jX \quad (3)$$

Die Impedanz einer Induktivität (L), ohne reell ohm'schen Anteil ist dabei in Formel 4, die Impedanz der Kapazität (C) in Formel 5 gezeigt. Die Variable ω steht für die Kreisfrequenz. Es gilt $\omega = 2\pi f$.

$$\underline{Z}_L = \frac{U}{I} = j\omega L \quad (4)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{U}{I} = \frac{1}{j\omega C} \quad (5)$$

Diese Formeln werden nach dem Strom (I) umgestellt. Es folgen die Formeln 6, sowie 7.

$$I_L = \frac{U}{j\omega L} \quad (6)$$

$$I_C = \underline{U} j\omega C \quad (7)$$

Betrachtet man nun Formel 6, so lässt sich eine umgekehrte Proportionalität zwischen Frequenz und Stromstärke feststellen. Eine Induktivität leitet den elektrischen Strom demnach bei niedrigen Frequenzen ideal, während bei hohen Frequenzen kaum noch ein Strom fließen kann. Im Gegensatz dazu leitet eine Kapazität den elektrischen Strom bei niedrigen Frequenzen schlecht und bei hohen Frequenzen sehr gut. Siehe dazu den direkt proportionalen Zusammenhang in Formel 7.

2.3.3 Gleichtaktspannung

In einem klassischen Drehstromsystem addieren sich die drei Phasenspannungen im Sternpunkt zu 0 V. Das Drehstromsystem in einem U-Umrichter wird jedoch durch eine geschaltete Zwischenkreisspannung erzeugt.

Der Schaltzustand eines Transistors im Wechselrichterteil kann nur zwei Werte annehmen: Null und die ZK-Spannung. Daher kann kein perfektes Drehstromsystem erzeugt werden, und der Sternpunkt addiert sich niemals zu Null. Dazu kommt, dass die Wicklungen wie angesprochen nicht exakt gleich sein können und nicht exakt gleich verlegt werden können. Ein Effekt, der bei Umrichterspeisung und symmetrisch aufgebauten Motoren heutzutage eine untergeordnete Rolle spielt.

Durch die Drehstromerzeugung im Umrichter besitzt das Drehstromsystem nun eine sogenannte Nullkomponente, die zusätzlich zu den drei verketteten Spannungen besteht. Sie kann am Sternpunkt des Motors gegen Erde gemessen werden. Diese zusätzliche Spannung wird Gleichtaktspannung oder „common-mode-voltage“ genannt. Sie wird auf allen drei Motorwicklungen gleichphasig übertragen [6]. Die Gleichtaktspannung enthält alle Schalthandlungen der Wechselrichter-Transistoren. Typischerweise beträgt die Schaltzeit eines IGBTs um die 150 ns. Dadurch entstehen sehr steile Schaltflanken, die zu einem stark gezackten, unregelmäßigen Verlauf der Gleichtaktspannung führen. Die Gleichtaktspannung enthält drei besonders hervorzuhebende Frequenzanteile. Die Transistoren des Wechselrichters sowie des Gleichrichters schalten mit einer Frequenz im unteren Kilohertz-Bereich. Beide Schaltfrequenzen werden gleichermaßen auf den drei Motorphasen wie auch auf der Gleichtaktspannung abgebildet. Der zweite Anteil ist die Netzfrequenz von 50 Hz, sowie deren dritte Harmonische. Sie wird durch eine leicht wellige ZK-Spannung, über die Gleichrichterstufe des Umrichters übertragen. Die Netzfrequenz spielt in der folgenden Betrachtung eine untergeordnete Rolle, da sie sich nur in geringem Maß negativ auf eine moderne Maschine auswirkt. Als Drittes ist die Drehfeldfrequenz sowie deren dreifache Harmonische zu nennen. Sie hängt, wie in Formel 1 beschrieben, direkt mit der Drehzahl des Motors zusammen. Ihre dritte Harmonische wird vom Umrichter bewusst auf die Motorströme geprägt, um die maximale Ausgangsspannung zu erhöhen. [6]

2.3.4 Kapazitives Ersatzschaltbild der Synchronmaschine

Wie in Abschnitt 2.3.1 angerissen, werden die parasitären Kapazitäten innerhalb der Maschine besonders bei Umrichterspeisung relevant. Das liegt daran, dass die vom Umrichter eingespeisten Ströme hohe Frequenzanteile aufweisen, welche einen Anstieg der Stromstärke in den parasitären Kapazitäten des Motors begünstigen

2 THEORETISCHE BETRACHTUNGEN

(siehe Abschnitt 2.3.2). So wird eine kapazitive Kopplung ermöglicht, welche sich besonders zwischen Ständer und Läufer sowie in den Maschinenlagern auswirkt und hochfrequente Lagerströme ermöglicht. Nach Hausberg [6] darf ein Drehstrommotor für Schaltfrequenzen oberhalb von 1 kHz nicht mehr als Netzwerk von ohm'schen Widerständen und Induktivitäten angesehen werden. Vielmehr wird der Motor, bezogen auf seine parasitären Eigenschaften, als Netzwerk kapazitiver Kopplungen betrachtet. Die dafür verantwortlichen Kapazitäten sind in Abbildung 5 zu sehen. C_{sf} (stator-frame) zwischen der Ständerwicklung und dem geerdeten Ständergehäuse, C_{rf} (rotor-frame) zwischen Läufer und Ständergehäuse, sowie C_{sr} (stator-rotor) zwischen Ständerwicklung und Läufer liegen direkt im magnetischen Feld der Maschine. Dazu kommt die Lagerkapazität C_B (bearing), welche nicht in Abbildung 5 dargestellt ist. Das zugehörige Ersatzschaltbild ist in Abbildung 6 zu sehen. [6]

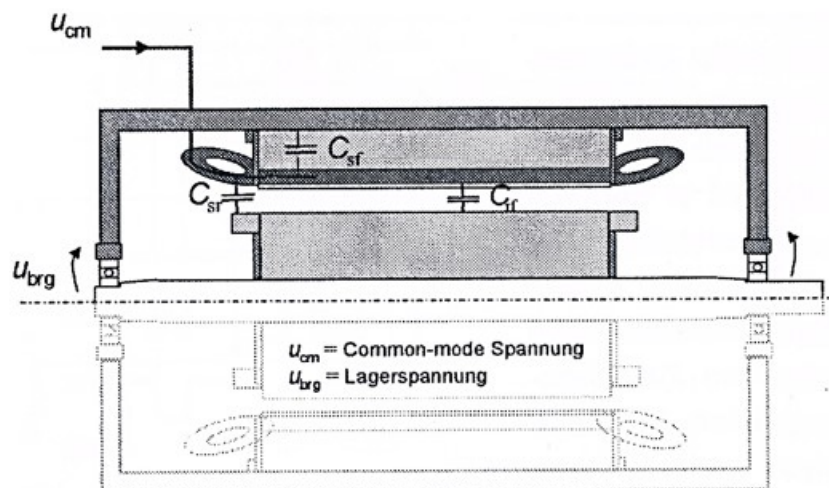


Abbildung 5: Schematischer Längsschnitt einer Drehfeldmaschine mit dargestellten Kopplungskapazitäten [6]

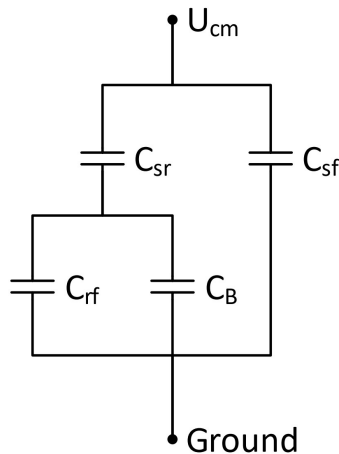


Abbildung 6: Vereinfachtes kapazitives Ersatzschaltbild einer Drehfeldmaschine für hohe Frequenzen

Die Gleichtaktspannung wird über das Motorkabel übertragen und liegt in der Maschine über den Motorwicklungen an. Dadurch, dass diese Spannung schnell schaltende, hochfrequente Anteile besitzt, kann sie die Wicklungen über die kapazitive Kopplung zum Ständergehäuse hin verlassen. Ein Teil des entstehenden Gleichtaktstromes fließt daher direkt über das Gehäuse gegen Erde ab. Ein anderer Teil nimmt den Weg durch das kapazitive Netzwerk. Dieser Anteil wird erst auf den Läufer und schließlich auf die Motorlager gekoppelt. Die Spannung, die sich dadurch über der Motorwelle und den Lagern ausbildet, wird Lagerspannung genannt. Sie kann bei ausreichender Höhe einen Stromfluss bewirken, der über die Motorlager und die Erde zurück zum Umrichter führt. Die Lagerspannung liegt je nach Netzspannung und Steuerverfahren des Umrichters im Bereich von 2 V bis 30 V. Dazu weist der Verlauf der Lagerspannung eine starke Abhängigkeit vom Verlauf der Gleichtaktspannung auf. [6]

Die Motorwicklungen bilden also, gekoppelt über das kapazitive Netzwerk, einen Gleichtaktkreis, der das Gehäuse, die Welle, die Motorlager sowie die Erdungsleitung zurück zum Umrichter umfasst.

Das Verhältnis der Lagerspannung zur Gleichtaktspannung des Umrichters ist die Bearing Voltage Ratio (BVR). Die BVR kann auch als kapazitiver Spannungsteiler beschrieben werden (siehe Formel 8). Sie gibt die Kopplung der im Umrichter erzeugten Gleichtaktspannung auf die Lager der elektrischen Maschine an und kann als Gradmesser für die Anfälligkeit einer Maschine für lagerstrombedingte Schäden gesehen werden (siehe Abschnitt 2.3.7). Die BVR liegt üblicherweise und abhängig von der Bauart des Motors bei 0,5 % bis 10 %. [6]

$$BVR = \frac{U_{Lager}}{U_{Gleichtakt}} = \frac{C_{sr}}{C_{sr} + C_{rf} + 2C_B} \quad (8)$$

Die Motorlager können nicht, wie die Formel zur Berechnung der BVR vermuten lässt, als ideale Kapazität angesehen werden. Ein sogenanntes Wälzlager, wie es in Elektromotoren verbaut wird, besteht aus drei Komponenten. Ein äußerer Lagerring ist in das Motorgehäuse eingelassen. Er besitzt eine sehr gut leitende Verbindung zum geerdeten Motorgehäuse. Der innere Lagerring ist fest mit der Motorwelle verbunden und besitzt eine sehr gut leitende Verbindung zu dieser. Zwischen den Lagerringen sind Kugeln oder Rollen angeordnet, auf denen sich der innere Lagerring dem Äußeren gegenüber drehen kann. Im Folgenden wird der Einfachheit halber nur noch von einem Kugellager ausgegangen. Die Kugeln laufen in einer Schmierfilmschicht zwischen den Lagerringen. Überschreitet die Wellendrehzahl eine bestimmte Grenze, schwimmen die Kugeln im Schmiermittel auf und verhindern eine ohm'sche Kopplung zwischen Welle und Gehäuse. Es besteht dann eine als rein kapazitiv angenommene Kopplung zwischen beiden Seiten des Lagers. In diesem Fall wird von der Kapazität C_B ausgegangen. Verringert sich die Wellendrehzahl aber, schwimmen die Kugeln nicht mehr im Schmiermittel, sondern stellen, bedingt durch die auf die Welle wirkende Gewichtskraft, einen ohm'schen Widerstand zwischen Welle und Gehäuse dar. Das Lager wird damit kurzgeschlossen.

2.3.5 du/dt-Ströme

Der Bewegungszustand der Welle hat direkten Einfluss auf die über die Lager abfließenden Ströme. An dieser Stelle sollen zunächst die du/dt-Ströme betrachtet werden, die in beiden Bewegungszuständen des Lagers auftreten, sowohl bei kapazitiver als auch bei ohm'scher Wirkung.

Der Begriff du/dt-Strom leitet sich von der Betrachtung der Lagerkapazität im Zeitbereich ab. Formel 7 muss dafür vom Bildbereich in den Zeitbereich transformiert werden. Dies geschieht mithilfe der Laplace-Korrespondenztabelle, nach der eine Ableitung im Zeitbereich einer Multiplikation im Bildbereich entspricht (siehe Formel 9). [13]

$$\frac{d}{dt}x(t) \iff pX(p) - f(0) \quad (\text{mit: } p = \sigma + j\omega) \quad (9)$$

Bezogen auf Formel 7 ergibt sich Folgendes:

$$I_C = \underline{U} j \omega C \iff i_c = \frac{du}{dt} C \quad (10)$$

Der Strom durch eine Kapazität hängt also von der Ableitung der Spannung über diese Kapazität ab. Die Ableitung der Spannung beschreibt die Anstiegsrate. Steigt diese also schnell, infolge kurzer Spannungsimpulse, an, steigt auch der Strom schnell an. Bei einem U-Umrichter wird das Drehfeld durch schnelles Ein- und Ausschalten der Transistoren im Wechselrichter erzeugt. In der Schaltfrequenz entstehen steile Flanken von mehreren kV/s. Wie erläutert wird das entstehende Schaltmuster auf der Gleichtaktspannung, die über den Lagern anliegt, abgebildet. Der Strom durch die Lager hängt also direkt von den Schaltzeiten und der damit verbundenen Flankensteilheit ab. Dreht sich die Welle nun mit einer ausreichend hohen Geschwindigkeit, schwimmen die Kugeln auf und das Lager lässt sich elektrisch mit der Kapazität C_B beschreiben. Diese Lagerkapazität liegt der Literatur [6] zufolge bei einem Wert um $C_B = 100 \text{ pF}$, was abhängig von der Flankensteilheit des Umrichters einen Lagerstrom von etwa $I_B = 5 \text{ mA}$ zur Folge hat. Bei geringerer Drehzahl verliert der Schmierfilm seine isolierende Wirkung. Das Lager und damit die Kapazität C_B , wird kurzgeschlossen. Der ohm'sche Widerstand des Lagers wird vernachlässigt. Gleichzeitig wird die Kapazität zwischen dem Läufer und dem Gehäuse C_{rf} kurzgeschlossen. Im kapazitiven Ersatzschaltbild des Motors (siehe Abbildung 6) ist nur noch der Stromteiler aus C_{sf} und C_{sr} relevant. C_{sr} hat eine Kapazität im Bereich von 100 pF , während C_{sf} mit etwa 10 nF viel höher liegt [6]. Der Lagerstrom entspricht dem Ladestrom der Kapazität zwischen der Wicklung und dem Läufer C_{sr} , welche sich über den Luftspalt zwischen Läufer und Ständerpaket erstreckt. du/dt -Ströme können dann auf Werte um die 200 mA ansteigen.

In der Forschung werden du/dt -Ströme aufgrund ihrer geringen Amplituden als ungefährlich für die Motorlager eingestuft. [6]

2.3.6 Impulsförmige Wellenspannung und zirkulierende Lagerströme

Die impulsförmige Wellenspannung ist ein Effekt, der nur bei elektrischen Maschinen auftritt, welche mit einem Frequenzumrichter betrieben werden. Sie entsteht, wie die Lagerspannung, aus der im Umrichter generierten Gleichtaktspannung.

Die Gleichtaktspannung bewirkt wie beschrieben einen Gleichtaktstrom, der die Wicklungen durchströmt. Der Großteil dieser Ströme fließt über das kapazitive Netzwerk ab.

Das bewirkt, dass die hochfrequenten Stromanteile auf der Hin- und der Rückleitung der Wicklung nicht mehr identisch sind und sich ein hochfrequenter magnetischer Ringfluss ausbildet. Dieser umläuft die Motorwelle gleichzeitig zum gewollten, die Maschine antreibenden Ringfluss. Er induziert dabei eine hochfrequente, impulsförmige Wellenspannung, die entlang des Läufers abfällt. [6]

Als Folge dieser impulsförmigen Wellenspannung bildet sich ein Strom aus, der entlang des hochfrequenten Ringflusses verläuft. Dieser Strom wird zirkulierender Lagerstrom genannt. Er fließt entlang der Welle über beide Lager hin und über die Ständerwicklungen wieder zurück. Im Gegensatz zu den anderen, hier vorgestellten Lagerstromarten fließt der zirkulierende Lagerstrom nicht über den Erdleiter ab, sondern verbleibt in der Maschine. Der zirkulierende Lagerstrom tritt in beiden Motorlagern gegenphasig auf und verläuft zeitgleich mit dem kapazitiven Erdstrom. Eine eindeutige Abgrenzung zu anderen Lagerstromarten ist daher bei simultaner Messung an beiden Motorlagern möglich.

Er ist außerdem von der Größe der Maschine abhängig. Nach Hausberg gelten zirkulierende Lagerströme besonders für Maschinen ab einer Achshöhe von 315 mm als gefährlich für die Motorlager. Die an solch großen Maschinen gemessenen Spitzenwerte betragen mehrere Ampere. [6]

2.3.7 EDM-Ströme

Im Gegensatz zu den du/dt -Strömen sind die sogenannten Electronic Discharge Machining (EDM)-Ströme äußerst schädlich für die Motorlager einer elektrischen Maschine. Gemeint ist ein impulsförmiger Entladungsstrom, der sich in der Lagerkapazität aufbaut und schlagartig entlädt. Ein solcher Strom entsteht nur bei kapazitiver Wirkung des Lagers (höhere Wellengeschwindigkeit) und wird durch hohe Schaltfrequenzen verstärkt.

Das parasitäre Netzwerk in der Maschine wird durch die anliegende Gleichtaktspannung aufgeladen. Der Strompfad durch die Lager ist allerdings zunächst durch die Lagerkapazität blockiert. Steigt die Spannung über die sogenannte „Frittspannung“ an, kann das Schmiermittel im Lager der anstehenden Spannung nicht mehr standhalten. Die Frittspannung liegt bei Spitzenwerten von 1.5 bis 15 V [6]. Eine sehr schnelle und starke Spannungsspitze schlägt durch die isolierende Schmierfilmschicht und leitet einen Teil der im Gleichtaktkreis gespeicherten Energie gegen Erde ab. Dabei verläuft die Amplitude des Stromes proportional zum Einbruch der Wellenspannung. Es ist unbedeutend, ob sich die Gleichtakt- bzw. Wellenspannung zum Durchschlagszeitpunkt auf einem positiven oder negativen Niveau befindet. [6]

Die Entladung der EDM-Ströme erfolgt gleichzeitig zum Fließen der sehr viel gerin-

geren du/dt Ströme. Der Effekt tritt mit bestimmter Häufigkeit in einem bestimmten Zeitintervall auf. Er hängt dabei von der Schaltfrequenz und dem Modulationsverfahren des Umrichters ab. Eine höhere Schaltfrequenz begünstigt mehr Entladungen pro Zeit. Die Abhängigkeit ist zumindest bei Umrichtern mit fester Schaltfrequenz gut beobachtbar [6]. Der Umrichter beeinflusst allerdings nicht den Energiegehalt der EDM-Ströme. Dieser hängt allein vom Spannungsabfall auf der Welle und damit von den parasitären Kapazitäten der Maschine ab. Aus diesem Grund kann die BVR auch als Gradmesser für die Gefährdung einer elektrischen Maschine herangezogen werden.

Die Entladungsströme können hohe Amplituden erreichen. Ihre genauen Höhen hängen von der Motorgröße, der Lagerkonfiguration sowie dem Erdungskonzept ab. Es sind jedoch Ströme von bis zu mehreren Ampere möglich [3]. Fließt eine derart hohe Stromspitze durch das rotierende Lager, kommt es zu einem kurzzeitigen Verschmelzen der Lagerkugeln mit der Laufringfläche. Durch die Rotation wird die Verbindung sofort wieder gelöst. Der Effekt wird „pitting“ genannt [6]. Zurück bleibt eine Rille in der Laufläche. Infolge mehrerer auftretender EDM-Spitzen wird die Laufläche immer weiter beschädigt, das Lager beginnt zu rattern und wird schließlich zerstört [9]. In Abbildung 7 ist die äußere Laufläche eines durch Entladungsströme zerstörten Motorlagers zu sehen. Die Stelle mit den breiteren Rillen bezeichnet dabei den tiefsten Punkt des Lagers. An dieser Stelle hat die Gewichtskraft auf die Welle eine geringere Kapazität zwischen Lagerkugel und äußerer Laufläche bewirkt. Der EDM-Strom konnte hier besonders heftig durchschlagen.

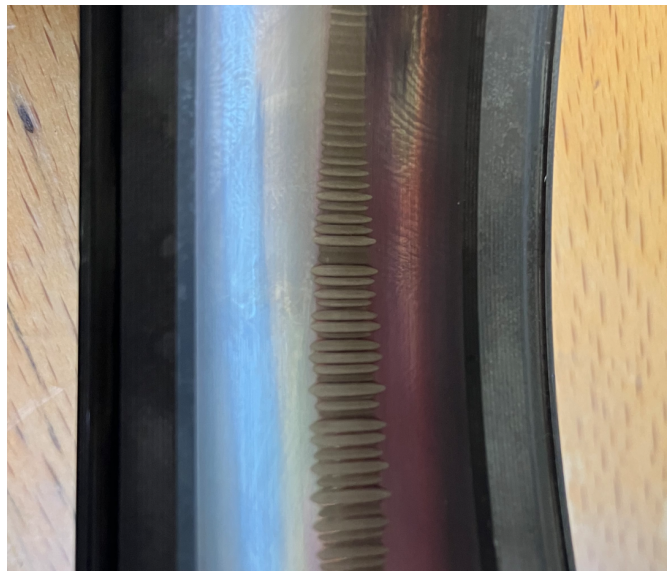


Abbildung 7: Laufläche eines durch Lagerströme zerstörten Motorlagers
(Quelle: Prof. Dr. Karl-Dieter Tieste, Ostfalia Hochschule)

2.3.8 Einfluss der Motorerdung und kapazitive Erdströme

Eine gute Motorerdung ist nicht nur im Fehlerfall für die einwandfreie Funktion des Motors wichtig. Auch die im Lager fließenden Ströme, wie zum Beispiel die EDM-Ströme, werden darüber zurück zum Umrichter geleitet. Außerdem wird die in den parasitären Kapazitäten der Maschine gespeicherte Energie teils direkt über das Motorgehäuse abgeleitet. Bezogen auf das Ersatzschaltbild in Abbildung 6 wirkt maßgeblich die Kapazität zwischen Ständerwicklung und Ständergehäuse C_{sf} . Der direkt über das Ständergehäuse abfließende Strom wird kapazitiver Erdstrom genannt. Dieser Strom ist kein Lagerstrom im eigentlichen Sinne, da er nicht über die Motorlager abfließt. Er wird jedoch wie die umrichtergetriebenen Lagerströme aus dem Gleichtaktkreis gespeist.

Eine korrekte Ableitung funktioniert nur, wenn die Erdungsleitung nicht zu lang und nicht mit schlechtem Kontakt angebunden ist. Eine schlechte Erdungsleitung kann mit einem relevanten induktiven sowie resistiven Anteil behaftet sein. Nach Gleichung 4 hat sie für die hochfrequenten kapazitiven Erdströme eine hohe (induktiv wirkende) Impedanz. Das führt zu einem Spannungsabfall auf der Leitung und damit zu einem Anstieg des Erdpotenzials über 0 V hinaus. Der Spannungsverlauf über den Lagern verändert sich durch die zusätzlich in Reihe geschaltete Induktivität. In der Folge steigen die Spitzenwerte der Lagerspannung stark an. Ein Teil des kapazitiven Erdstroms nimmt nun den Weg über die Motorlager. Eine höhere Spitzen-Lagerspannung begünstigt zudem das Auftreten von EDM-Strömen, und ein früherer Lagerausfall ist die Folge. [6]

2.3.9 Klassische Wellenspannung

Die klassische Wellenspannung wird durch magnetische Asymmetrien in der elektrischen Maschine hervorgerufen. Sie ist nicht wie die impulsförmige Wellenspannung von einem Umrichter abhängig. Die Existenz dieser Spannungen ist seit Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt und daher gut erforscht. Im Abschnitt 2.3.1 wurde dieses Thema schon angeschnitten und soll hier ausführlicher beschrieben werden.

Magnetische Asymmetrien entstehen durch einen asymmetrischen Aufbau der Maschine. Störende Faktoren sind dabei zum Beispiel Standfüße, Anschlusskasten, Trageösen oder Kühlrippen, die in das Ständergehäuse eingelassen sind. Aber auch eine nicht vollkommen symmetrisch verlegte Wicklungsum- bzw. -ableitung sowie Lüftungskanäle oder Bolzenlöcher im Ständer-Blechkpaket tragen zur Asymmetrie der Maschine bei. Diese Asymmetrie bewirkt, dass sich das magnetische Feld der

Maschine nicht vollkommen auf das Läufermagnetfeld übertragen lässt und ein Teil der magnetischen Feldenergie über das kapazitive Netzwerk auf die Läuferwelle gekoppelt wird. Es bildet sich eine niederfrequente Spannung entlang der Welle aus. Die Frequenz dieser Spannung entspricht der Frequenz des angelegten Drehfeldes. Sie tritt sowohl bei Umrichterbetrieb, durch den von den Umrichterimpulsen erzeugten Sinusstrom, als auch bei Betrieb am starren Netz auf.[6]

Wellenspannungen gelten erst oberhalb einer Schwelle von ca. 500 mV als gefährlich, da sich erst dann ein zirkulierender Lagerstrom durch Welle, Lager und Ständer ausbilden kann, der in beschriebener Weise zu einer Schädigung der Lager führt (siehe Abschnitt 2.3.6).

Wie erwähnt ist das Thema seit Langen bekannt und vor allem in der Vergangenheit problematisch gewesen, als Elektromotoren noch nicht so ausgereift wie heute konstruiert wurden. In modernen Motoren, wie der hier erwähnten EKSM spielen klassische Wellenspannungen nur in Verbindung mit anderen Wellenspannungsarten eine Rolle und sind für sich genommen ungefährlich. [6]

Die von Hausberg durchgeführte Untersuchung lässt auf eine Verbindung der klassischen Wellenspannung zu den Effekten der impulsförmigen Wellenspannung bei Umrichterbetrieb schließen. Ihm zufolge wirkt die klassische, niederfrequente Wellenspannung als initiierender Faktor für das Auftreten eines hochfrequenten zirkulierenden Lagerstromes. Er begründet das damit, dass die hochfrequenten Spitzen des Zirkularstroms nicht stochastisch verteilt auftreten, sondern vom Zeitverlauf der niederfrequenten Wellenspannung abhängen. Darüber hinaus werden die EDM-Ströme durch den Einfluss der über den Lagern anstehenden niederfrequenten Wellenspannung verstärkt. Bricht nämlich der Schmierfilm im Lager aufgrund einer hochfrequenten Spannungsspitze zusammen, ist es vor allem die klassische Lagerspannung, die für kurze Zeit einen niederfrequenten Stromfluss im Lager bewirkt. [6]

2.3.10 Zusammenfassung

An dieser Stelle soll eine kurze Zusammenfassung der in den letzten Abschnitten behandelten Lagerstromarten gegeben werden, die an umrichtergespeisten elektrischen Maschinen auftreten.

Zunächst wird durch Asymmetrien in der Maschine eine niederfrequente, klassische Wellenspannung induziert, die einen klassischen zirkulierenden Lagerstrom bewirkt. Klassische Wellenspannung und klassischer Lagerstrom hängen direkt von der Drehfelddrehzahl der Maschine ab.

Davon unabhängig wird die im Umrichter erzeugte Gleichtaktspannung über die Motorwicklungen auf die Maschine gekoppelt. Diese Gleichtaktspannung enthält ver-

schiedene hochfrequente und niederfrequente Anteile und zeichnet sich durch eine starke Abhängigkeit von der Schaltfrequenz des Umrichters aus. Ein Teil dieser Spannung fließt, direkt über die kapazitive Kopplung der Wicklungen zum Ständergehäuse, zurück zum Umrichter. Dieser Anteil wird kapazitiver Erdstrom genannt. Ein weiterer Anteil wird auf den Läufer gekoppelt und fließt über die Lager als EDM-Strom und du/dt -Strom ab. Darüber hinaus bewirkt die kapazitive Kopplung an den Wicklungen eine Differenz zwischen in die Wicklung einfließendem Strom und die Wicklung verlassendem Strom. Diese Differenz bewirkt einen hochfrequenten magnetischen Fluss, der eine hochfrequente Wellenspannung und einen hochfrequenten zirkulierenden Lagerstrom zur Folge hat.

2.4 Schutzmaßnahmen gegen Lagerströme

Es gibt mehrere Ansätze, einen Elektromotor vor Lagerschäden zu schützen. Alle Methoden können in drei Kategorien eingeordnet werden, nämlich in Umrichter-basierte, Leitungs-basierte und Motor-basierte Maßnahmen. Sämtliche Maßnahmen werden, soweit sie nicht im Prüfaufbau (siehe Kapitel 3) enthalten sind, theoretisch vorgestellt. Der Nutzen jeder Maßnahme muss für den Einzelfall geprüft und durch Messungen belegt werden. Basierend auf den Forschungen Hausbergs sind besondere Schutzmaßnahmen bei Normmotoren bis zu einer Achshöhe von 315 mm entbehrlich, sofern der Umrichter eine Schaltfrequenz nicht über 5 kHz verwendet und die ZK-Spannung die 550 V nicht übersteigt. [6]

2.4.1 Wahl des Umrichters

Der Frequenzumrichter gilt als Quelle für alle die Motorlager schädigenden Effekte, die nicht durch den Motor selbst entstehen. Nach dem Grundsatz, eine Gefahr am wirkungsvollsten an der Quelle zu bekämpfen, sollte auch der Umrichter-getriebene Lagerstrom direkt im Umrichter bekämpft werden [6]. Nach dieser Prämisse gilt es, die Entstehung einer schädlichen Gleichtaktspannung von vornherein zu verhindern. Das kann durch eine geänderte Umrichtertopologie, spezielle Modulationsverfahren der Motorströme oder Filter im Leistungspfad geschehen.

So können EDM-Ströme durch die Verwendung eines „Dual-Bridge-Inverters“ fast vollständig unterdrückt werden. Dieser Umrichtertyp besteht aus zwei gegenphasig arbeitenden Wechselrichter-Brücken, die zwei galvanisch getrennte Motorwicklungen speisen. Auf diese Weise addiert sich die Nullkomponente in beiden Brücken nahezu zu Null und es wird keine nennenswerte Gleichtaktspannung mehr übertragen. Bei derart aufwendigen Lösungen stellt sich natürlich immer die Frage von Kosten gegenüber dem erzielbaren Nutzen. Daher ist die Verwendung von „Dual-Bridge-Inverters“, insbesondere bei großen elektrischen Maschinen im Bereich von einem bis mehreren Megawatt Leistung, sinnvoll [6]. Eine weitere Topologie stellt der „Vier-Phasen-Umrichter“ dar, der nach eigenen Recherchen allerdings keine nennenswerte Marktrelevanz darstellt.

In der Praxis ist der hier vorgestellte Frequenzumrichter in BLDC- oder Sinusstrom-Arbeitsweise der am häufigsten in Verbindung mit Drehzahl-geregelten, mehrphasigen Antrieben verwendete Stromrichter.

2.4.2 Optimierte Modulationsverfahren

Unabhängig vom verwendeten Umrichtertyp übt das Modulationsverfahren einen großen Einfluss auf Anzahl und Anstehzeiten der Null-Raumzeiger und damit auf die Entstehung einer Gleichtaktspannung aus [6]. Das Modulationsverfahren ist das Verfahren, nach dem die Strangspannungen im Umrichter gebildet und bereitgestellt werden.

Mit einem optimierten Verfahren können zum einen Reflexionen auf der Leitung sowie die Klirrfaktoreigenschaften des Strangstroms verbessert werden und zum anderen sogenannte „Doppelumschaltungen“ vermieden werden. Damit ist das gleichzeitige Schalten zweier Transistoren in unterschiedlichen Halbbrücken gemeint. Die Folge dieser „Doppelumschaltungen“ kann eine kurzzeitige Verdopplung der Gleichtaktspannung sein. Infolgedessen verdoppeln sich die impulsförmigen, kapazitiven Erdströme sowie die impulsförmige Wellenspannung und damit die zirkulierenden Lagerströme.[6] Darüber hinaus hat die Verwendung eines Steuerverfahrens mit variabler Schaltfrequenz entscheidende Vorteile. So kann diese gerade bei großer Aussteuerung des Umrichters herabgesetzt werden, was zu flacheren Signalflanken und damit geringeren Überschwüngen der Gleichtaktspannung führt. Besonders EDM-Ströme lassen sich so wirkungsvoll abmildern.[14]

2.4.3 Filterschaltungen

Filter verhindern nicht die Entstehung einer Gleichtaktspannung im Frequenzumrichter. Sie können aber dazu beitragen, dass die Auswirkungen dieser auf den Motor abgemildert werden. Ein Filter wird generell nah am Umrichter, sprich nah an der Quelle der Störung, platziert. Er kann direkt in das Umrichtergehäuse integriert oder als zusätzliches Gerät ausgeführt werden.

Die zur Reduzierung der Gleichtaktspannung eingesetzten Filter arbeiten in der Regel passiv und lassen sich in zwei Arten unterteilen. Das sind sogenannte du/dt -Filter und Sinusfilter. Darüber hinaus existieren weitere, teils aktiv arbeitende Schaltungen für spezielle Einsatzfälle.

Beim Sinusfilter kommt es darüber hinaus auf ein festes Bezugspotenzial an. Das heißt der Filter darf nicht allein zwischen den Phasen angeschlossen sein, sondern muss einen Bezug zum Erdpotenzial des Motors aufweisen. Nur so können sowohl die Strangspannungen, als auch die Leiterspannungen gegen Erde geglättet werden. Bei richtiger Auslegung fungiert ein solcher Filter als wirksamer Schutz gegen die pulsfrequenten Anteile der Gleichtaktspannung. Die dreifachen Anteile der Netzspannung, die ebenfalls in der Gleichtaktspannung enthalten sind, werden dann allerdings

nur gering gefiltert. Diese können wie beschrieben eine klassische Wellenspannung hervorrufen, die wiederum von dem mechanischen Aufbau des Motors abhängt. Die Aufgabe eines du/dt -Filters ist es, die Flankensteilheit der Strangspannungen herabzusetzen. Auf diese Weise kann die impulsförmige Wellenspannung sowie der zirkulierende Lagerstrom stark gedämpft werden. Darüber hinaus hilft ein solcher Filter, Reflexionen auf langen Motorleitungen zu reduzieren, die sonst zu Überschwingern der Strangspannungen führen können.[6]

2.4.4 Leitungsbasierte Schutzmaßnahmen

Eine der wichtigsten Maßnahmen zur Unterdrückung von Lagerströmen ist, wie in Abschnitt 2.3.8 erläutert, die korrekte Anbindung der Motorerdung. Zusätzlich sollte die Motorzuleitung symmetrisch aufgebaut sein. Ein solches Kabel ist in der Regel geschirmt (beidseitig aufgelegt) und besitzt für jede Motorphase einen Schutzleiter. Es handelt sich also um ein sechsadriges Kabel. Dieser Aufbau dämpft Reflexionen auf der Leitung und sorgt für eine Reduzierung der entstehenden Überschwingungen, insbesondere bei langen Motorkabeln. Überschwingungen können, neben einer höheren Belastung der Motorwicklungen, die impulsförmigen Erdströme und in der Folge auch die impulsförmige Wellenspannung antreiben. Es folgt ein erhöhter, zirkulierender Lagerstrom. [14] [6]

Über diese Maßnahmen hinaus hat man die Möglichkeit, einen Trenntransformator zwischen Umrichter und Motor zu installieren. Die Wicklungsinduktivität wirkt sich glättend auf die steilen Schaltflanken der Strangspannungen aus. Impulsförmige Erdströme werden größtenteils vom Transformator abgefangen und fließen direkt über dessen Masseanbindung zum Umrichter zurück. Allgemein wird der Einfluss der Gleichtaktspannung fast vollständig eliminiert. Nach Hausberg reduziert sich die Gefährdung des Motors auf das Niveau eines am starren Netz betriebenen Motors. In der Regel sprechen hohe Anschaffungskosten gegen den Einsatz eines Trenntransformators. Daher wird diese Lösung nur verwandt, sofern weitere Punkte die Verwendung nötig machen. [6]

2.4.5 Isolierte Motorlager

Die augenscheinlichste Methode zur Reduzierung des Lagerstromes ist die Isolierung der Motorlager selbst. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, von isolierten Kugeln, über beschichtete Lagerringe bis zu Isolierhülsen um den Außenring. Das Ziel aller Isolierungen ist es, die Durchlässigkeit des Lagers für elektrische Ströme zu verhindern.

Beim Einbau isolierter Lager muss darauf geachtet werden, ob ein oder beide Lager isoliert werden sollen. Wird nur ein isoliertes Lager verbaut, sollte dies auf der der Kraftabgabe abgewandten Seite geschehen, um den Lagerstrom bei metallisch leitender Anbindung einer Antriebsmaschine nicht durch diese zu leiten. Der Lagerstrom wird dann über das nicht isolierte Lager vor der Antriebsmaschine abgeleitet. Ein einseitig isoliertes Lager ist in Bezug auf die klassische Wellenspannung bereits ein vollkommen wirksamer Schutz, da sich infolge dieser Wellenspannung ein niederfrequenter zirkulierender Lagerstrom ausbildet, der bereits durch nur eine Lagerisolierung unterbunden wird (siehe Abschnitt 2.3.9).

Ist das Ziel aber, einen EDM-Strom zu unterdrücken, reicht eine einseitige Isolierung nicht mehr aus. Diese Art der Lagerströme tritt an beiden Motorlagern gegen Erde auf. Ziel der Lagerisolierung ist es hier, die Lagerkapazität ausreichend (über die durch das Aufschwimmen der Lagerkugeln erreichte Kapazität) zu erhöhen, um einen Durchschlag der Lagerspannung zu verhindern (siehe auch Abschnitt 2.3.7). Ströme, die trotz der erhöhten Barriere über die Lagerkapazitäten fließen, werden „Restströme“ genannt. Sie beziehen sich insbesondere auf die hochfrequent zirkulierenden Lagerströme. Für diese stellt die Lagerisolierung ein, mit zunehmender Schaltfrequenz kleiner werdendes Hindernis dar. Sie treten insbesondere bei geringen Drehzahlen auf, wenn die Schmierfilmisolierung noch gering ist. Restströme stellen laut Hausberg, aufgrund ihrer geringen Größenordnung (Scheitelwerte von einigen hundert mA), keine nennenswerte Gefahr dar. [6]

2.4.6 Erdungsbürsten

Neben den genannten Maßnahmen gibt es die Möglichkeit, den Motor mit sogenannten Erdungsbürsten auszustatten. Das meist als klassische Kohlebürste ausgeführte System sitzt schleifend auf der Motorwelle und ist mit einer kurzen Erdungsleitung an das Lagerschild angebunden. Die Welle wird so direkt mit dem Motorgehäuse geerdet. Erdungsbürsten sind in verschiedenen Materialien verfügbar, die im Laufe dieser Arbeit genauer untersucht und verglichen werden.

2.5 Wirtschaftliche Bedeutung von Lagerströmen

Ein Lagerschaden macht sich in der Regel nur langsam bemerkbar. Da ein Wälzlager ein geschlossenes System ist, ist ein solcher Schaden schlecht beobachtbar und kann nur aufgrund von Erfahrungswerten bewertet werden. Es besteht zwar die Möglichkeit, das Lager durch Schwingungsmessungen zu beobachten. Das ist jedoch nur an Orten, an denen nicht schon von vornherein starke Schwingungen auftreten, möglich. Der Lagerschaden kündigt sich langsam durch ein lauter werdendes, hörbares Lagerspiel an, welches nach einiger Zeit zur mechanischen Zerstörung des Lagers führt. Die Folgen von Lagerschäden können sich erheblich auf den technischen Betrieb eines Unternehmens auswirken. So führt etwa der Ausfall eines Industrieroboters im schlimmsten Fall zum vorübergehenden Ausfall der ganzen Produktionslinie und damit zu finanziellen Nachteilen.

Bedenkt man einen möglichen Einsatz von EKSM in der Luftfahrt, kann ein Ausfall eines Triebwerkes fatale Folgen haben und zum Absturz eines Flugzeuges führen. Es ist daher umso wichtiger, der Erforschung der Lagerhaltbarkeit im Langzeitbetrieb besonderes Augenmerk zu schenken und von vornherein Schutzmaßnahmen zu ergreifen.

3 Aufbau des Synchronmotorprüfstandes

In diesem Kapitel wird der Prüfaufbau, an dem im Laufe der Arbeit gemessen wurde, erläutert. Es handelt sich dabei um einen von der Firma IMX entwickelten Prüfstand, in dem zwei direkt mechanisch gekoppelte Elektromotoren fest verbaut sind. Einer der Motoren treibt den Rotor des zweiten Motors direkt an. Er wird daher nachfolgend als Prüflingsmotor bezeichnet. An diesem Motor soll das Auftreten von Lagerströmen untersucht werden. Der zweite Motor arbeitet als mechanische Last und erzeugt ein dem Prüflingsmotor entgegen gerichtetes Drehmoment. Er wird daher Lastmotor genannt. Bei den Elektromotoren handelt es sich um identische EKSM. Diese Motorenart wurde im Abschnitt 2.2 bereits beschrieben. Beide Motoren werden über Frequenzumrichter geregelt, welche von einem Personal Computer (PC) der Firma „ico - Innovative Computer GmbH“ gemeinsam gesteuert werden. Zudem verfügt der Prüfstand über ein spezielles Erdungskonzept sowie die Möglichkeit, an verschiedenen Stellen elektrische Fehler zu schalten.

Der Prüfstand besteht dabei aus zwei rollbaren Schaltschränken und dem Elektromotor-Modul. Der in Abbildung 8 links dargestellte Schrank (Schaltschrank 2) beherbergt hauptsächlich einen Industrie-PC sowie die Elektronik des Lastmotors. Darüber hinaus ist ein Trenntransformator verbaut, welcher den Schaltschrank 1 (mittig im Bild 8) versorgt. Schrank 1 ist als IT-Netzsystem mit zugehörigem Isolationsüberwachungsgerät (IMD) aufgebaut. Hier befindet sich die Antriebselektronik des Prüflingsmotors, sowie die Fehlerrelais, mit denen externe Widerstände in den Leistungspfad geschaltet werden können. An der linken Seite von Schaltschrank 2 ist ein PC-Terminal angebracht, über welches der Prüfstand gesteuert wird.

Weitere Elemente, wie die CAN- und Ethernet-Netzwerke in den Schränken sind nicht Gegenstand dieser Arbeit und werden daher nicht weiter beschrieben.

Ein vereinfachter Schaltplan des Prüfstandes ist im Anhang unter den Abbildungsnummern A1 und A2 zu finden.



Abbildung 8: Abbildung des Motorprüfstandes im DLR-Braunschweig
(Quelle: DLR, Braunschweig)

3.1 Frequenzumrichter

Im Motorprüfstand werden zwei verschiedene Frequenzumrichter verwendet, die sich in ihrem Schaltungsaufwand unterscheiden. Der Lastmotor wird von einem Umrichter des Typs „Metronix BL 4312-C“ betrieben. Dabei handelt es sich um einen dreiphasigen Umrichter, in dem Eingangsstromrichter, ZK und Maschinenstromrichter in einer Einheit gekapselt sind. Das Modulationsverfahren dieses Umrichters ist für die durchgeführten Messungen nicht weiter von Bedeutung. Der Umrichter ist über einen Funkentstörfilter sowie eine Netzdrossel an das öffentliche Drehstromnetz angeschlossen. Über einen zusätzlichen Anschluss kann überschüssige Bremsenergie in das Netz zurückgespeist werden. Zu diesem Zweck ist eine Rückspeiseeinheit des Typs „Yaskawa R1000“ mit dem Umrichter-ZK verbunden. Im Zuge der hier durchgeführten Messungen wird das Paket aus Lastmotor und Lastumrichter, nur auf seine Funktion der Erzeugung eines Gegendrehmomentes reduziert, betrachtet.

Der Umrichter des Prüflingsmotors ist dagegen mit einem verteilt aufgebauten Umrichter der „Siemens AG“ ausgestattet. Verwendet wurden Geräte der Serie „S120“ im Format „Booksize“. Der Umrichter besteht demzufolge aus einem Active Line Module (ALM), welches aus einer vom öffentlichen Stromnetz bereitgestellten Drehspannung eine ZK-Spannung erzeugt. Dieses Modul stellt den Eingangsstromrichter

dar. Es wird über das sogenannte Active Interface Module (AIM) versorgt, welches die Spannung aus dem öffentlichen Drehstromnetz filtert und Netzurückwirkungen aus dem Antrieb verhindert. Auf der anderen Seite der Wirkkette steht das Single Motor Module (SMM), welches als Maschinenstromrichter fungiert. Es ist im Schaltplan als „Prüflingsumrichter MoMo 9A“ gekennzeichnet.

Die Einheit aus ALM und SMM stellt einen U-Frequenzumrichter dar, wie er in Abschnitt 2.2.1 beschrieben wurde. Die Bestromung der Motorwicklungen wird stets an das durch Strommesswerte und Läuferlagegeber ermittelte Motormodell angepasst. Die Schaltfrequenz des Maschinenstromrichters (nachfolgend als Schaltfrequenz bezeichnet) liegt bei 4 kHz. [10]

3.2 Motor

Bei den Motoren des Prüfstandes handelt es sich wie beschrieben um zwei gleiche, elektronisch kommutierte Synchronmotoren. Sprich, beide Motoren sind mit Läuferlagegebern ausgestattet, die an den entsprechenden Maschinenstromrichter angeschlossen sind. Die Motoren wurden vom Hersteller „TG-Drives s.r.o.“ gefertigt und verfügen über ein speziell gefrästes, antriebsseitiges Lagerschild. In dieses Lagerschild sind je vier konzentrisch angeordnete Schlitze gefräst, welche eine sogenannte „Speichenmessung“ für die Bestimmung der im Lagerschild fließenden Ströme ermöglichen. Sie besitzen je zwei isoliert ausgeführte Motorlager und verfügen über einen angezapften und an die Motorstecker herausgeführten Sternpunkt.

Beide Motoren stehen sich Welle an Welle gegenüber und sind mit einer Kohlefaser-Kupplung starr gekoppelt. Die so entstandene Einheit ist in einen Aluminiumkasten eingebaut und mit Gummifüßen auf einem Betonfundament verschraubt.

Die Polpaarzahl der Maschinen liegt bei 3 und beide ermöglichen ein maximales Drehmoment von 51 Nm, sowie eine Maximaldrehzahl von $9000 \frac{1}{\text{min}}$. Die Prüfstandssoftware lässt aus Sicherheitsgründen allerdings nur eine Drehzahl von $8000 \frac{1}{\text{min}}$ zu. Drehmoment und Drehzahl im Arbeitspunkt liegen bei 11 Nm und $4500 \frac{1}{\text{min}}$. In diesem Punkt liegt eine Strangspannung von 380 V über den Wicklungen und es fließt ein Strangstrom von 16.6 A.

Alle wichtigen Betriebswerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

3 AUFBAU DES SYNCHRONMOTORPRÜFSTANDES

	Beschreibung	Formelzeichen	Wert
Allgemeine Werte	Polpaarzahl	$2p$	3
	Wirkungsgrad	η	94 %
Nominalwerte (Arbeitspunkt)	Drehzahl	n_n	$4500 \frac{1}{\text{min}}$
	Drehmoment	M_n	11 Nm
	Strangspannung	U_n	380 V
	Strangstrom	I_n	16.6 A
Spitzenwerte	Drehzahl	n_{max}	$9000 \frac{1}{\text{min}}$
	Drehmoment	M_{max}	51 Nm
	Strangstrom	I_{max}	123 A

Tabelle 1: Zusammenfassung der wichtigsten Betriebswerte der EKSM „TG-Drives TGT5-1700“

3.3 Erdungskonzept und Fehlerschaltungen

Der Schaltschrank 1 verfügt zusammen mit dem Prüflingsmotor über ein spezielles Erdungskonzept. Das bedeutet, dass sämtliche Komponenten des Prüflingsumrichters sowie auch der Motor selbst auf einer isoliert angebrachten Erdungsschiene sitzen. Diese Komponenten haben keinen Erdkontakt zum öffentlichen Stromnetz. Die Energieversorgung aus dem öffentlichen Netz erfolgt über einen Trenntransformator, welcher das Inselnetz des Prüflingsmotors galvanisch vom öffentlichen Stromnetz und damit auch vom restlichen Motorprüfstand trennt. Das Erdpotenzial dieses Netzes wird, in Abgrenzung zur Protected Earth (PE), FE genannt.

Ein derartig aufgebautes Netz zeichnet sich dadurch aus, dass der Erdleiter am Sternpunkt (dem Trenntransformator) nicht mit dem N-Leiter verbunden ist. Es wird daher Isolé-Terre-Netz (IT-Netz) genannt. Da IT-Netze nicht über die Möglichkeit verfügen, einen sinnvoll funktionierenden Fehlerstromschutzschalter (RCD) einzubauen, wird ein IMD eingesetzt, welcher alle Phasen sowie die FE-Schiene überwacht. Dieses System ist für die, im Rahmen dieser Arbeit, durchgeführten Messungen allerdings nicht relevant. Der Einfluss des Gerätes wird in Abschnitt 5.3 verifiziert.

Der Motorprüfstand verfügt an mehreren Stellen des ZK, sowie der Motorstränge über die Möglichkeit, elektrische Fehler zu schalten. Dazu sind diese Fehlerpunkte über zuschaltbare Relais an eine Klemmleiste geführt. An dieser Klemmleiste kann dann ein

Leistungswiderstand angeschlossen und das entsprechende Relais bei einem in der Prüfstandssoftware definierten Zustand geschlossen werden. Die Auswirkungen auf den Umrichter und den Motor können daraufhin durch interne und externe Messungen untersucht werden. Die Lage der Fehlerrelais kann dem Schaltplan im Anhang (siehe Abbildungen A1 und A2) entnommen werden.

Um die Umrichterkomponenten vor Spannungsspitzen, insbesondere beim Schalten der Fehlerrelais, zu schützen, wurden zwischen den Motorphasen, sowie im Zwischenkreis entsprechende Schutzbeschaltungen angebracht. Diese bestehen jeweils aus einem Varistor (einem spannungsabhängigen Widerstand), sowie parallel dazu zwei in Serie geschalteten Suppressordioden. Bei vom DLR durchgeführten Messungen konnte eine relativ linear verlaufende, stark kapazitive Impedanz der Schutzbeschaltungen von etwa 100 pF festgestellt werden.

3.4 Messpunkte

Der Prüfstand verfügt an mehreren Stellen des Schaltschranks 1 über Messpunkte. So ist im Schrank ein Brett montiert, auf dem sich verschiedene Messbuchsen befinden. An diesen können die Potenziale von PE, FE, den Motorphasen, sowie des ZK abgenommen werden. Darüber hinaus kann der Sternpunkt des Prüflingsmotors an diesem Punkt ausgemessen werden. Für einen Schutz der Messelektronik vor Überspannungen sind Kaltleiter-Temperaturwiderstände (PTCs) in die Messleitungen integriert.

Auch für die Messung der Strangströme sind vorbereitete Messpunkte verfügbar. Diese können an den Klemmen X22.17 bis X22.22 über Leitungsbrücken mithilfe von Rogowskispulen gemessen werden (siehe Schaltplan im Anhang).

3.5 Prüfstandssoftware

Der Motorprüfstand wird wie erwähnt über einen Industrie-PC gesteuert. Auf diesem ist die vom Hersteller des Prüfstandes entwickelte Software „imc-Studio“ installiert, welche auf die Steuereingänge der Frequenzumrichter zugreifen kann. Außerdem können damit die Fehlerrelais geschaltet sowie Statusnachrichten des Isolationsüberwachungsgerätes ausgewertet werden.

Im „Grafischen Editor“ der Prüfstandssoftware kann nun ein transienter Bewegungsablauf des Prüflingsmotors sowie ein über die Lastmaschine einwirkendes Drehmoment programmiert werden. In diesem Ablauf lassen sich ebenfalls die Schaltpunkte der Fehlerrelais programmieren. Für eine punktgenaue Messung der Motorverläufe kann

3 AUFBAU DES SYNCHRONMOTORPRÜFSTANDES

ein externes Triggersignal in den Zeitablauf eingepflegt und über eine Schnittstelle in der Außenwand von Schrank 1 an ein Messgerät ausgegeben werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, den Lüfter des Schaltschranks 1 zu deaktivieren. Eine Maßnahme, die unerwünschte elektromagnetische Effekte verhindern soll.

Ein beispielhafter Programmablauf ist in Abbildung 9 zu sehen. Die obere blaue Kurve stellt den Drehzahl-Sollwert des Prüflings, die rote Kurve den Drehmoment-Sollwert der Lastmaschine dar. Die gelbe Kurve zeigt eine Pausierung des Lüfters an. Die untere blaue Kurve steuert die Ausgabe des Triggersignals von etwa 1 V Höhe.

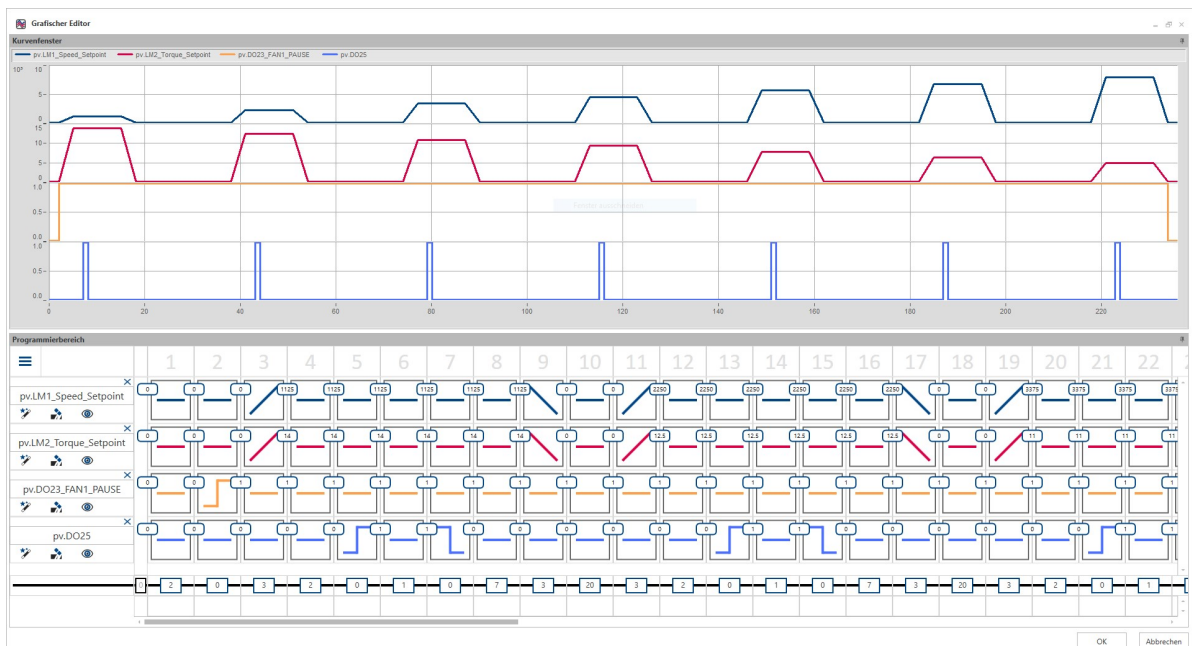


Abbildung 9: Beispielhafter Programmablauf des Motorprüfstandes im grafischen Editor der Prüfstandssoftware
(Quelle: DLR, Braunschweig)

4 Messtechnik

In diesem Kapitel soll eine Übersicht über die bei den folgenden Messungen verwendete Messtechnik gegeben werden. Die Typenbezeichnungen und Kennwerte der verwendeten Messmittel sind in Tabelle 2 dargestellt. Im Folgenden werden einzelne Geräte genauer erklärt.

Messgerät	Typbezeichnung	Charakteristische Werte	
		Beschreibung	Wert
Oszilloskop [11]	Tektronix MSO68B	Bandbreite	$\leq 1 \text{ GHz}$
Spannungstastkopf [12]	Tektronix THDP0200 (Differenzastkopf)	Bandbreite	$\leq 200 \text{ MHz}$
		Spannung max.	$U_{pk} = 1500 \text{ V}$
Stromzange [4]	FCC F-210930-1005-1 verwendet in Konfiguration 2 (siehe [4])	Bandbreite	10 Hz – 250 MHz
		Strom max.	$I_{pk} = 100 \text{ A}$
Rogowskispule [8]	CWT Mini50HF 015/R	Bandbreite	$\leq 50 \text{ MHz}$
		Sensitivität	$200 \frac{\text{mV}}{\text{A}}$
		Strom max.	$I_{pk} = 30 \text{ A}$
		Rauschanteil	$I_{pp} = 100 \text{ mA}$
Wellenspannungssonde [1]	AEGIS SVP-510	Bandbreite	$\leq 100 \text{ MHz}$
		Spannung max.	1X: $U_{pk} = 150 \text{ V}$ 10X: $U_{pk} = 300 \text{ V}$
Wellenerdungsring [1]	AEGIS SGR-22.8-53.3-3MFH	/	/
Erdungsbürsten	Doppelschenkelhalter (Herst. unbek.)	/	
	2x Kohlebürste Schunk C60	Bronzegravith 92 % Metall	/
	2x Kohlebürste Schunk E43	Niederohmiger Elektrographit	
	2x Kohlebürste Schunk S15	Naturgraphit 80 % Silber	

Tabelle 2: Zusammenfassung der verwendeten Messmittel

Oszilloskop

Das Oszilloskop wird verwendet, um Spannungen und Ströme am Prüfstand zu messen. Es kann die gemessenen Werte sowohl als Zeitverlauf ausgeben als auch eine interne Fast-Fourier-Transformation (FFT) durchführen und damit ein Frequenzspektrum des gemessenen Signals erzeugen. Diese Transformation ist für die Bestimmung beispielsweise einer Gleichtaktspannung besonders wichtig, um signifikante Frequenzanteile zu extrahieren. Bei den hier durchgeführten Messungen wird das Oszilloskop allerdings nur für die Messwertaufnahme verwendet. Die Auswertung der Messwerte erfolgt extern.

Das Gerät stellt 8 Messkanäle bereit und ermöglicht daher komplexe Messreihen an mehreren Messstellen gleichzeitig. Außerdem ist es mit einem externen Triggereingang ausgestattet. Zusammen mit dem eingebauten Trigger des Prüfstandes kann eine punktgenaue Auslösung der Messung im Programmablauf erfolgen. Zusätzlich kann das Oszilloskop über eine Ethernet-Schnittstelle von einem PC gesteuert werden. Dabei werden die aufgenommenen Messdaten direkt übertragen und ausgewertet.

Messprogramm

Für die Messwertaufnahme, sowie Auswertung wird ein in der Programmiersprache „Python“ geschriebenes Programm verwendet. Das Programm wurde vom DLR bereitgestellt.

Es gliedert sich in zwei Skripte, auf deren Funktion hier kurz eingegangen wird. Der erste Teil ist für die Messwertaufnahme bestimmt. Der PC, auf dem das Programm ausgeführt wird, wird mit einer Ethernet-Verbindung an das Oszilloskop angeschlossen. Das Programm bindet bestimmte Bibliotheken ein, welche vom Hersteller des Oszilloskops herausgegeben wurden.

In der Programmlogik wird für jede Messung ein bestimmter Messaufbau festgelegt, in welchem die verwendeten Messgeräte zu den acht Oszilloskop-Kanälen zugeordnet sind. Diese Zuordnung wird in einer Excel-Tabelle auf dem PC, entsprechend einer festen Struktur, hinterlegt. Jeder Aufbau bekommt eine eindeutige Bezeichnung der Art „Aufbau1, Aufbau2, ...“. Zusätzlich muss diese Zuordnung genau so am Oszilloskop angeschlossen und entsprechend Anschlusswiderständen, Dämpfungsfaktoren, Bandbreite etc. konfiguriert werden. Der Messaufbau wird dann als „Setup-Datei“ in einem proprietären Format auf dem Oszilloskop gespeichert.

Im Messwertaufnahme-Skript muss nun noch die Aufbau-Bezeichnung, Betriebspunkte der Prüfstandsmotoren sowie Zusatzinformationen zu Fehlerschaltungen und dabei verwendeten Widerständen eingegeben werden. Diese Informationen bilden zusam-

men mit aktuellem Datum, Uhrzeit und Messkanal den Dateinamen einer Messreihe. Bei voller Belegung des Oszilloskops werden folglich acht Messreihen aufgenommen. Die Samplerate sowie Messdauer werden ebenfalls am Oszilloskop eingestellt und bestimmen die Größe der Messdateien.

Nach Konfiguration von Messprogramm und Oszilloskop wird das Programm gestartet. Bei erfolgreichem Verbindungsaufbau des Oszilloskopes erscheint eine Aufforderung in der Konsole. Diese gibt den vormals angegebenen Prüfstands-Betriebspunkt (Drehzahl, Drehmoment) wieder und fordert den Bediener auf, eine bestimmte Taste bei Erreichen dieses Betriebspunktes zu drücken. Der Prüfstandslauf wird händisch in der Prüfstandssoftware gestartet und bei Erreichen des Betriebspunktes die Messung am Mess-PC ausgelöst. Das Oszilloskop wartet daraufhin das externe Triggersignal des Prüfstandes ab und speichert die aufgenommenen Werte für jeden Kanal auf der eigenen Festplatte ab. Ist ein weiterer Betriebspunkt im Messprogramm angegeben, wartet das Programm erneut auf die Tastatureingabe des Bedieners und führt die nächste Messung nach dem gleichen Schema aus. Die Messreihen werden auf diese Weise automatisch mit dem richtigen Betriebspunkt benannt.

Nach Beendigung des Prüfstandslaufs können die aufgenommenen Daten mit einem „USB-Stick“ vom Oszilloskop auf den Mess-PC übertragen werden. Sie werden in einem bestimmten Verzeichnis abgelegt, welches im Auswerteprogramm hinterlegt wird.

Im Auswerteprogramm können einzelne oder mehrere Messreihen eingebunden und in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt werden. Dabei sind Schrittweiten und Messzeit basierend auf den verfügbaren Daten feiner einstellbar. Es ist so möglich, in die aufgenommene Kurve zu zoomen. Die in der Excel-Zuordnung festgelegten Messmittel bestimmen dabei, ob Werte direkt dargestellt werden, oder ob die Spannungsmesswerte aus dem Oszilloskop in Strommesswerte umgerechnet werden müssen. So werden Werte, die mit einer Rogowskispule aufgenommen wurden, mit einem festen Faktor verrechnet und dargestellt. Werte, die mit der Stromzange aufgenommen wurden, werden komplizierter umgerechnet. Dies geschieht, indem alle Werte der betreffenden Reihe zunächst in den Frequenzbereich (mittels der FFT) transformiert werden, um mit dem Dämpfungsfaktor der Stromzange für jeden Frequenzbereich einzeln verrechnet zu werden. Die Werte werden dabei interpoliert, da die Schrittweite der Transferimpedanz-Tabelle nicht mit der Schrittweite der aufgenommenen Messwerte übereinstimmt. Die Dämpfungsfaktor-Tabelle ist in einem Verzeichnis als Excel-Datei abgelegt und im Programm als Dateipfad hinterlegt. Nach erfolgreicher Umrechnung werden die Messwerte mit einer inversen FFT in den Zeitbereich zurücktransformiert und ausgegeben.

Die FFT ist nicht nur auf die Umrechnung von Strommesswerten beschränkt, sondern

bietet die Möglichkeit, die Messreihen auch im Frequenzbereich in einem Diagramm darzustellen. Dieses Diagramm ist dann doppelt logarithmisch eingeteilt und zeigt die y-Achse in dBV bzw. dB A. Daneben können Messreihen addiert und anschließend im Zeit- sowie Frequenzbereich dargestellt werden. Abschließend können Diagramme mit einem Titel sowie einer Legende der einzelnen Kurven versehen werden.

Bis auf die Bildschirmaufnahmen des Oszilloskops, sind alle im Rahmen dieser Arbeit gezeigten Graphen mit dem Auswerteprogramm erstellt worden.

Stromzange

Um Erdströme auf dem FE-Potenzial messen zu können, ist eine Stromzange mit großem Innendurchmesser erforderlich. Es wird daher eine Stromzange der Firma „Fischer Custom Communications, Inc.“ verwendet und geschirmt an das Oszilloskop angeschlossen. Der Anschlusswiderstand der Stromzange beträgt $50\ \Omega$. Im Gegensatz dazu werden alle anderen Messmittel mit $1\ \text{M}\Omega$ angeschlossen. Die von dieser Stromzange erzeugten Messwerte müssen, wie vormals beschrieben, mit einer Korrekturkurve verrechnet werden. Für alle weiteren Strommessungen wurden Rogowskispulen verwendet. Die eingebaute Stromzange ist in Abbildung 10 zu sehen.



Abbildung 10: Abbildung der Stromzange in der FE-Erdleitung des Prüflingsmotors
(Quelle: DLR, Braunschweig)

Wellenspannungssonde

Die Wellenerdungssonde ist eine spezielle Einrichtung zur Messung der Wellenspannung eines Elektromotors im Betrieb. Sie besteht aus einem manuellen Spannungstastkopf, auf dem ein „Puschel“ aus Kohlenstofffasern befestigt ist. Dadurch kann die Tastspitze das elektrische Wellen-Potenzial direkt an der drehenden Motorwelle abnehmen. Für eine genaue Messung ist es nötig, den manuellen Tastkopf am Test-Rechteckgenerator des Oszilloskops abzugleichen. Dies wurde im Vorfeld der Messungen erledigt. Da ein manueller Tastkopf stets ein Bezugspotenzial benötigt, wurde dieser am Prüflingsmotor über eine Schraube auf dem FE -Potenzial geerdet (siehe Abbildung 12). Am Oszilloskop wird der Tastkopf in der Dämpfungseinstellung „1X“ betrieben, da diese zwar einen kleineren Messbereich (siehe Tabelle 2), dafür aber eine höhere Genauigkeit bietet. Vorab durchgeführte Tests bei der Einstellung „10X“ legten eine Wellenspannung im unteren Bereich nahe. Daher wurde zugunsten der Genauigkeit auf die niedrigere Dämpfungseinstellung gewechselt. Der Anschluss am Oszilloskop erfolgt mit dem für Tastköpfe üblichen, hochohmigen Eingangswiderstand von $1\text{ M}\Omega$.

Die Sonde wird mithilfe eines magnetischen Stativs sicher am Motorprüfstand befestigt und an der Welle in Position gehalten.

Wellenerdungsring

Der Wellenerdungsring ist kein Messmittel im eigentlichen Sinne. Er wurde entwickelt, um die Motorlager eines Drehstrommotors vor Lagerströmen zu schützen. Das funktioniert, indem die Wellenspannung von der Welle abgenommen und am Lager vorbei gegen Masse geführt wird. Für einen guten Kontakt zwischen Erdungsring und Welle hat der Ring auf seiner Innenseite Kohlenstofffasern, die elektrisch leiten. Das Prinzip entspricht damit dem der Wellenspannungssonde.

Für die Messungen wurde der Ring auf einem 3D-gedruckten Kunststoffteil am Lagerschild des Prüflingsmotors montiert und mit einem Stück gewobener Kupferlitze an das Lagerschild massenmäßig angebunden. An dieser Masseleitung kann auch der abgeleitete Strom durch eine Rogowskispule gemessen werden. Der eingebaute Erdungsring ist in Abbildung 11 zu sehen. Eine Kombination dieser Messmethode mit der Messung der Wellenspannung ist allerdings nicht möglich. Der vorhandene Bauraum zwischen Lagerschild und Kupplung reicht dafür nicht aus.



Abbildung 11: Abbildung des eingebauten Wellenerdungsringes
(Die Verbindungswelle zwischen den Maschinen wurde zu Demonstrationszwecken ausgebaut.)
(Quelle: DLR, Braunschweig)

Erdungsbürsten

Auch eine Erdungsbürste ist, wie der Name schon sagt, kein Messmittel, sondern ein Mechanismus zur Wellenerdung. In diesem Fall wurden verschiedene Kohlebürstenmaterialien (siehe Tabelle 2) auf einem Doppelschenkelhalter montiert. Dieser Halter wurde mit einem Kunststoff-Frästeil am Lagerschild der Prüflingsmaschine isoliert befestigt. Auch hier wurde eine Leiterschleife, allerdings aus einem Stück Kupfer-Flachbandleitung, für die Masseanbindung verwendet. Die Funktion der Erdungsbürste ist dieselbe wie die des Erdungsringes. Die Strommessung wurde analog zum Erdungsring an der Masseschleife durchgeführt.

Eine Abbildung des eingebauten Erdungsbürsten-Halters und der Wellenspannungssonde ist in Abbildung 12 zu sehen. Diese Konfiguration wird so auch in den nachfolgend beschriebenen Messungen verwendet.

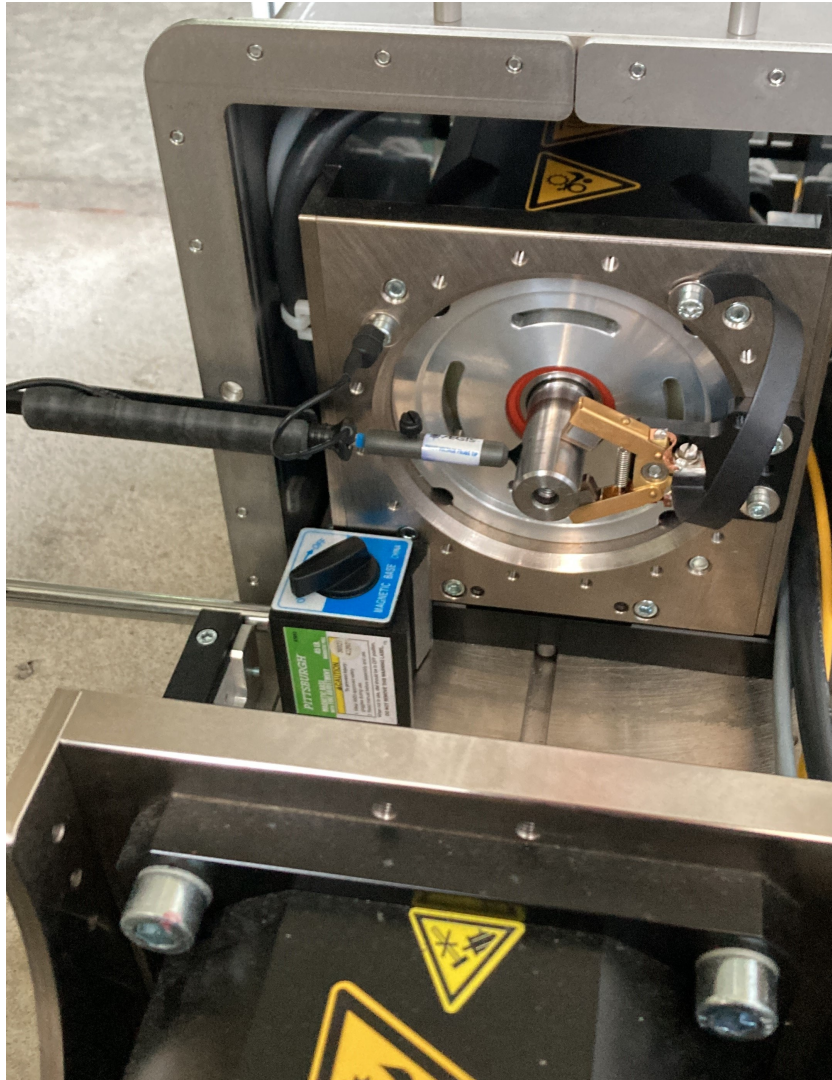


Abbildung 12: Abbildung des eingebauten Kohlebürstenhalters mit Wellenspannungssonde
(Die Verbindungswelle zwischen den Maschinen wurde zu Demonstrationszwecken ausgebaut.)
(Quelle: DLR, Braunschweig)

Speichenmessung

Die Speichenmessmethode verwendet die im Abschnitt 3.2 angesprochenen Schlitze, um vier Rogowskispulen um die Speichen des Lagerschildes legen zu können. Bei diesem Aufbau muss ganz besonders auf die Durchflussrichtung des Stromes

durch die Rogowskispulen geachtet werden. Das ist nötig, da die aufgenommenen vier Messreihen später durch das Auswertprogramm addiert werden und somit vorzeichengleich sein müssen. Nach der Addition erhält man den gesamten über das Motorlager abgeleiteten Strom.

In Abbildung 13 ist die Speichenmessung dargestellt. Wie hier zu sehen ist es möglich, eine Speichenmessung durchzuführen und eine gleichzeitige Messung mithilfe des Erdungsrings durchzuführen. Auf die Weise können die durch das Motorlager fließenden Restströme bei Ableitung durch den Erdungsring bestimmt werden. Gleiches trifft auf die Erdungsbürsten zu. Auch der Einbau des Bürstenhalters ist gleichzeitig zur Speichenmessung möglich. Die Messung wird dadurch nicht beeinflusst.

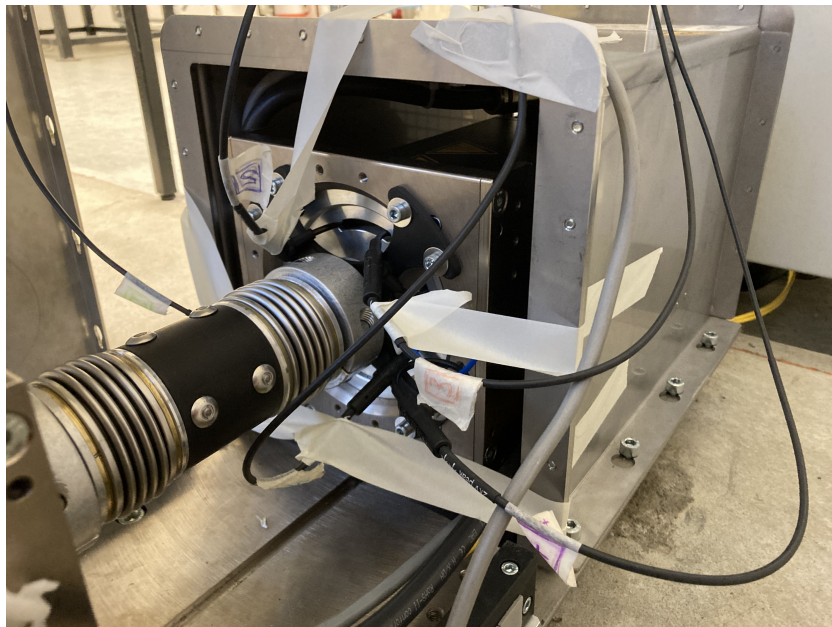


Abbildung 13: Abbildung der Speichenmessung mit gleichzeitig angeschlossenen Erdungsring
(Quelle: DLR, Braunschweig)

5 Messungen

5.1 Grundlegendes

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen.

Alle direkt am Prüflingsmotor durchgeführten Messungen erfolgen an der Antriebsseite (Seite B) des Motors. Auf Seite A der Motorwelle, also der Seite, die der Lastmaschine abgewandt ist, ist keine Messung möglich. An diesem Ende der Welle befindet sich der Läuferlagegeber in einem gekapselten Gehäuse. Die einseitige Messung an nur einem der beiden Lageschilde hat eine signifikante Einschränkung zur Folge. Es ist keine Messung von zirkulierenden Lagerströmen möglich, da diese Ströme gegenphasig durch beide Lager fließen (siehe Abschnitt 2.3.6). Infolgedessen können die Einflüsse dieser Ströme auch nicht eindeutig von den Einflüssen der du/dt -Ströme und der EDM-Ströme abgegrenzt werden.

Alle Messungen laufen nach dem gleichen Schema ab. Der Motor wird mithilfe der Prüfstandssoftware auf einen bestimmten Betriebspunkt gefahren und daraufhin die Messung ausgelöst. Ein Betriebspunkt besteht aus Drehzahl und Drehmoment. Dem Prüflingsmotor wird die Drehzahl vorgegeben. Die Lastmaschine erhält das zu erreichende Gegen-Drehmoment. Dabei muss auf die maximal abgebbare Leistung des Last-Umrichters geachtet werden. Diese liegt bei 4800 W. Gegen-Drehmomente können daher nicht an die mechanischen Grenzen der Motoren gefahren werden. Die Messungen werden im eingeschwungenen Zustand vorgenommen, sprich dann, wenn der Prüfstand den Soll-Betriebspunkt erreicht hat. Schaltvorgänge werden ebenfalls nicht untersucht. Auf Grund dessen werden du/dt -Ströme nur im kapazitiv wirksamen Zustand des Lagers betrachtet, also dann, wenn die Lagerkugeln im Schmierfett aufschwimmen. Diese Einschränkung weist jedoch aufgrund der geringen Bedeutung dieser Ströme keine Relevanz für die Schädigung des Motorlagers auf (siehe Abschnitt 2.3.5).

Die mechanisch am Motor abgegebene Leistung wird nach Gleichung 11 berechnet [15]. Aufgrund des hohen Wirkungsgrades (siehe Tabelle 1) kann die mechanische Leistung anstelle der vom Umrichter generierten Leistung herangezogen werden. Die geringe Abweichung fungiert als Sicherheitsabstand.

$$P_{mech_{max}} = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n \quad (11)$$

5 MESSUNGEN

Für den Arbeitspunkt von $4500 \frac{1}{\text{min}}$ ($\cong 75 \frac{1}{\text{s}}$) an 11 Nm gilt:

$$P_{\text{mech}_{4500,11}} = 2 \cdot \pi \cdot 11 \text{ Nm} \cdot 75 \frac{1}{\text{s}} = 5183.6 \text{ W} \quad (12)$$

Der Arbeitspunkt kann nicht erreicht werden. Die Gleichung muss also nach dem Drehmoment umgestellt werden, um das maximal einstellbare Drehmoment bei dieser Drehzahl und der Leistung von 4800 W zu ermitteln:

$$M_{4500} = \frac{4800 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot 75 \frac{1}{\text{s}}} \approx 10 \text{ Nm} \quad (13)$$

Basierend auf dieser Grenzwertrechnung werden die verwendeten Betriebspunkte in Abschnitt 5.2 festgelegt.

Auch der gemessene Frequenzbereich sollte im Vorfeld festgelegt werden. Da die Schaltfrequenz des Umrichters im unteren Kilohertz-Bereich liegt, werden Gleichtaktstörungen ebenfalls in diesem Bereich auftreten. Es sollen allerdings auch die Einflüsse der Netzfrequenz aus den Messwerten abgelesen werden können. Der Messbereich wird daher generell auf 10 Hz – 6 MHz festgelegt.

Im Zuge der Festlegung des Frequenz-Messbereiches muss auch die Abtastrate und Messdauer jeder Messung festgelegt werden. Die Abtastrate gibt an, wie viele diskrete Werte pro Sekunde aufgenommen werden. In diesem Fall wird sie für alle Messungen auf 12,5 MS/s eingestellt. Das bedeutet, dass 12,5 Millionen Werte (Megasamples (MS)) pro Sekunde aufgenommen werden. Nach dem Shannon-Theorem [5] muss die Abtastrate (bzw. Abtastfrequenz $f_a = 12,5 \text{ MHz}$) mindestens doppelt so groß sein wie die höchste abzutastende Frequenz. Diese liegt im hier verwendeten Messbereich bei $f_o = 6 \text{ MHz}$. Das Shannon-Theorem wird demzufolge nach Gleichung 14 erfüllt.

$$f_a \geq 2 \cdot f_o \quad \curvearrowright \quad 12,5 \text{ MHz} \geq 2 \cdot 6 \text{ MHz} \quad (14)$$

Mit der Festlegung der Abtastrate wird die obere Grenze des Frequenzbereiches eingestellt. Die untere Grenze wird über die Messdauer bestimmt [5]. In diesem Fall wird die Messdauer auf $T = 100 \text{ ms}$ festgelegt. Sie ergibt sich nach Formel 15 zu $f_u = 10 \text{ Hz}$.

$$f_u = \frac{1}{T} \quad \curvearrowright \quad 10 \text{ Hz} = \frac{1}{100 \text{ ms}} \quad (15)$$

Die Messergebnisse werden als Diagramm (siehe Abschnitt 4) dargestellt. Jedes der Diagramme enthält einen Titel, welcher (zuzüglich des Erstellungszeitpunktes) gleichbedeutend mit dem Dateinamen ist. Darüber hinaus enthält ein Diagramm eine

Legende. Sind im Diagramm mehrere „Graphen-Fenster“ zu sehen, bezieht sich die Legende auf alle Graphen im Diagramm. Die Legende gibt jeweils die Farbe und eine zugehörige Information zum Graphen wieder. Sie befindet sich stets im oberen Graphen-Fenster.

5.2 Einfluss des Betriebspunktes auf den Lagerstrom

Nach Festlegung des Messbereiches müssen die bei den Messungen verwendeten Betriebspunkte festgelegt werden. Wesentliches Kriterium ist dabei der Einfluss des Motorlaufes auf den Lagerstrom.

Die Betriebspunkte sollen daher so gewählt werden, dass eine möglichst große Variation des Lagerstromes erreicht wird.

Entsprechend der Gleichung 11 werden die in Tabelle 3 dargestellten Betriebspunkte hinsichtlich des Verhaltens des Lagerstromes ausgewertet. Es werden zwei Messreihen durchgeführt. Die erste Messreihe variiert die Drehzahl bei einem mittleren Drehmoment. Die zweite Messreihe variiert das Drehmoment bei mittlerer Drehzahl. So soll eine hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse erzielt werden.

Während beider Messreihen wurde der Lagerstrom an der Erdungsbürste mit dem Material „C60“ gemessen (siehe Tabelle 2). Es wurde der Messaufbau „Aufbau8“ verwendet. Alle bei den folgenden Messungen verwendeten Messaufbauten sind im Anhang unter der Nummer A3 zusammengefasst.

Messreihe	Betriebspunkt in (in $\frac{1}{\text{min}}$ / Nm)
Drehzahl-Variation	2000 / 4,5
	4500 / 4,5
	7500 / 4,5
Drehmoment-Variation	4500 / 0,5
	4500 / 4,5
	4500 / 9,5

Tabelle 3: Auswahltabelle der Betriebspunkte am Motorprüfstand

Die aufgenommenen Werte sind in den Abbildungen 14 und 15 zu sehen.

5 MESSUNGEN

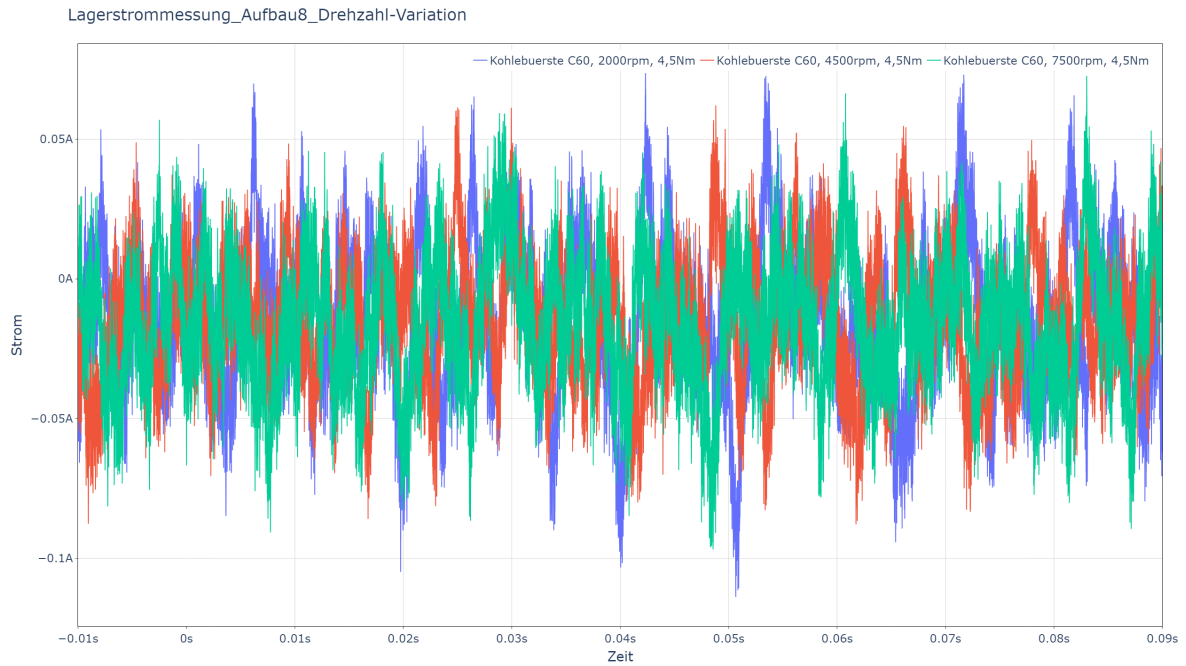


Abbildung 14: Strommesswerte an der Kohlebürste C60 bei Variation der Motordrehzahl

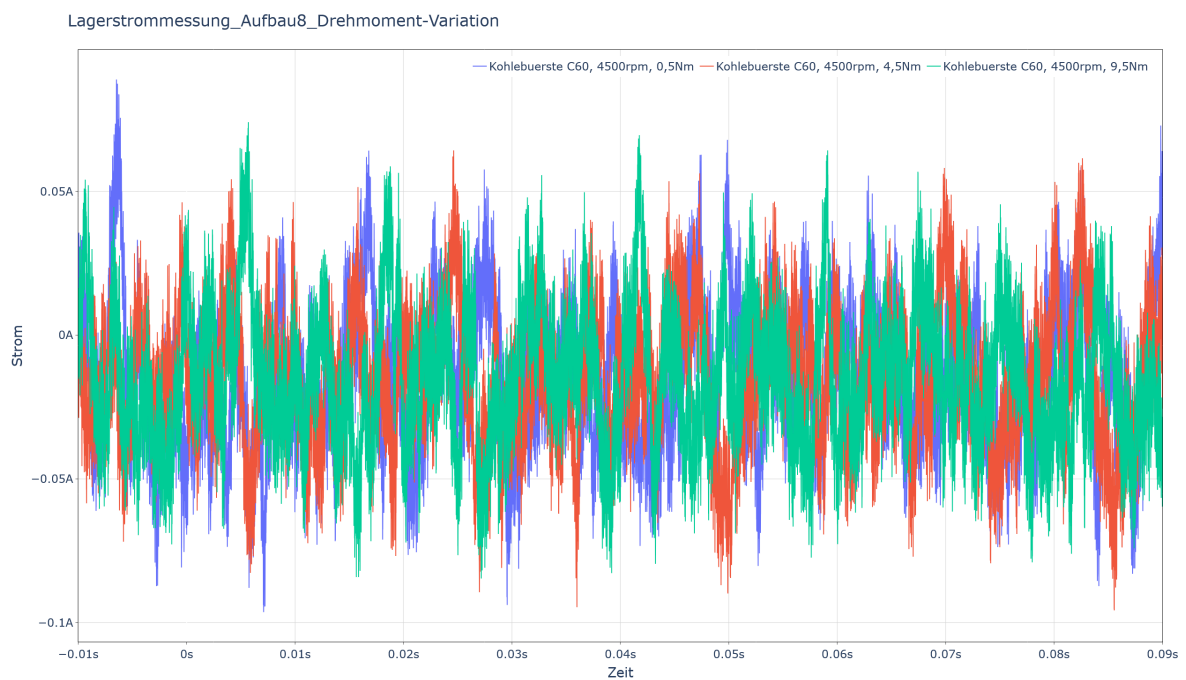


Abbildung 15: Strommesswerte an der Kohlebürste C60 bei Variation des Motordrehmoments

Sieht man sich die Werte an, kommt man zu dem Schluss, dass alle Werte nah beieinander liegen. Der Lagerstrom oszilliert um etwa 0 A und bewegt sich, von gelegentlichen Spitzen abgesehen, im Bereich von ca. -0.06 A bis 0.05 A. Auf eine Darstellung der Werte im Frequenzbereich kann an dieser Stelle verzichtet werden. Die Änderung der Betriebswerte fügt den Lagerströmen keine veränderlichen Frequenzanteile hinzu. Die Schaltfrequenz sowie deren Harmonische ändern sich nicht bei verschiedenen Betriebspunkten. Lediglich die Frequenz des auf den Strängen aufgeprägten Sinus ändert sich. Diese Frequenz ist allerdings nicht auf der Wellenspannung bzw. dem Lagerstrom zu erwarten, da sich die drei Strangspannungen im Sternpunkt annähernd aufheben und die Drehfeldfrequenz dabei durch destruktive Interferenz ausgelöscht wird. Bei Variation des Drehmomentes wäre allein eine Veränderung der Stromhöhen des Lagerstromes zu erwarten gewesen, da die Motorströme bei steigendem Drehmoment betragsmäßig ansteigen.

Da aus diesen Kurven keine nennenswerten Auswirkungen sowohl der Drehzahl als auch des Drehmomentes herauslesbar sind, wird das Vorgehen bei den weiteren Messungen wie folgt geändert. Es wird von nun an nur noch ein Betriebspunkt im mittleren Drehzahl-, sowie Drehmoment-Bereich gewählt.

Der Betriebspunkt wird daher auf $4500 \frac{1}{s}$ bei 4.5 Nm festgelegt.

5.3 Einfluss des IMDs auf den Lagerstrom

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, ist im Motorprüfstand ein IMD verbaut, der die ordnungsgemäße Funktion des IT-Netzes am Prüflingsmotor überwacht. Das Gerät IMD überlagert das Netz mit hochfrequenten Messimpulsen, um eine permanente Impedanzmessung auf dem Zwischenkreis, sowie dem Erdleiter *FE* durchführen zu können.

In diesem Abschnitt soll es nun darum gehen, inwiefern der Isolationswächter den Lagerstrom beeinflussen oder die Messungen stören kann. Es wurde daher der „Aufbau3“ (siehe Anhang A3) zweimal durchgeführt. Dieser Aufbau enthält die in Kapitel 5.6 verwendete Speichen-Messmethode sowie eine Messung der Wellenspannung per Wellenspannungssonde.

Ein Testlauf erfolgte im Normalzustand mit angeschlossenem IMD und ohne dass dieser einen Isolationsfehler registrierte. Der zweite Testlauf erfolgte bei getrenntem IMD. In diesem Fall wurde das Überwachungsgerät vom ZK und dem Erdpotenzial *FE* getrennt. Der IMD zeigte daraufhin erwartungsgemäß einen Fehler an.

In den Abbildungen 16, 17, sowie 18 sind Frequenzspektren des Lagerstromes, gemessen mit der Speichenmessmethode, sowie die gleichzeitig abgenommene Wellenspannung dargestellt. Die gemessenen Kurven sollen an dieser Stelle nicht genau analysiert

5 MESSUNGEN

werden. Es geht lediglich um einen Vergleich zwischen den beiden Testläufen.

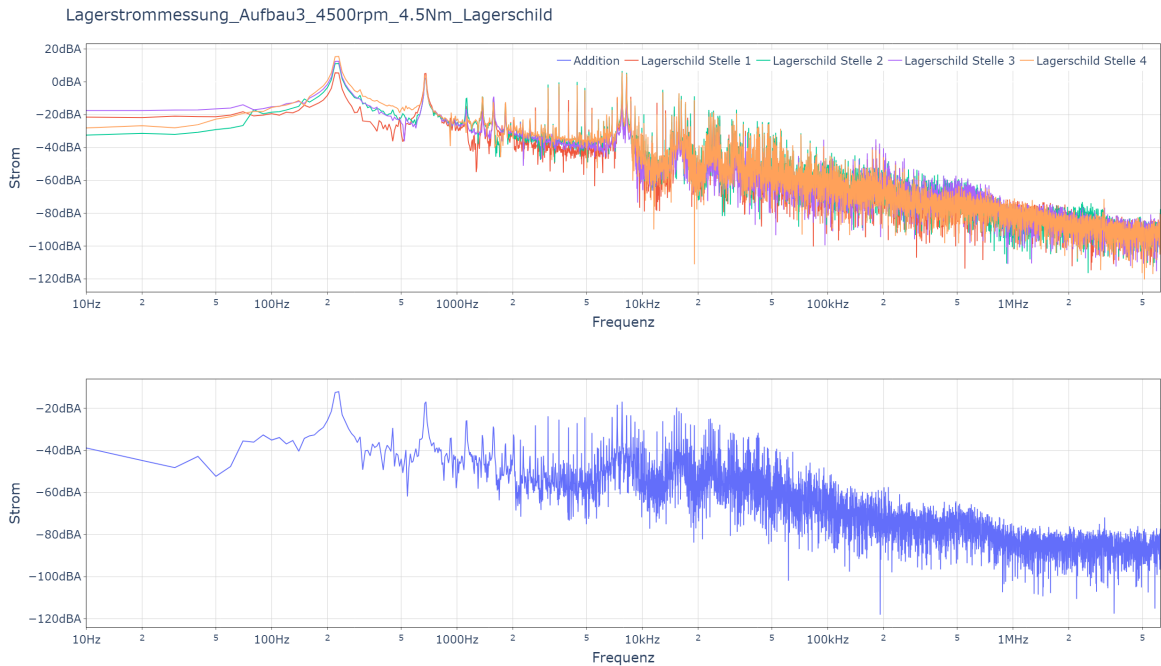


Abbildung 16: Frequenzspektrum des Lagerstromes mit Speichen-Strommessung am Lagerschild „B“ - ohne Ableitung des Lagerstroms

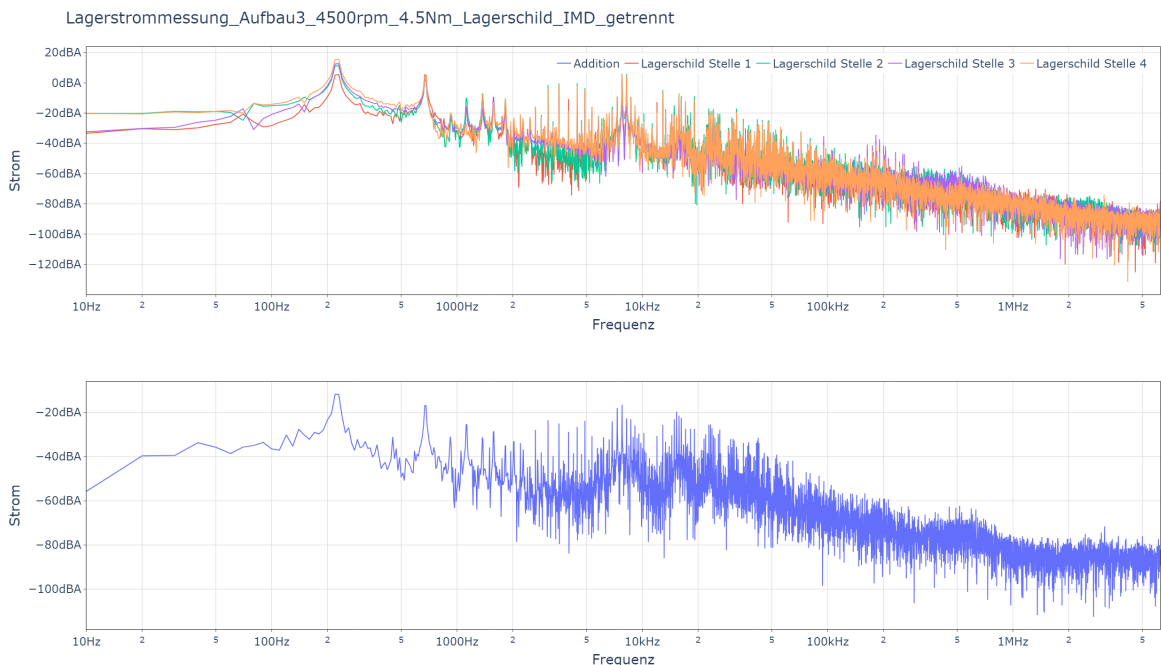


Abbildung 17: Frequenzspektrum des Lagerstromes mit Speichen-Strommessung am Lagerschild „B“ ohne Ableitung des Lagerstroms - IMD vom Zwischenkreis und FE-Potenzial getrennt

5 MESSUNGEN

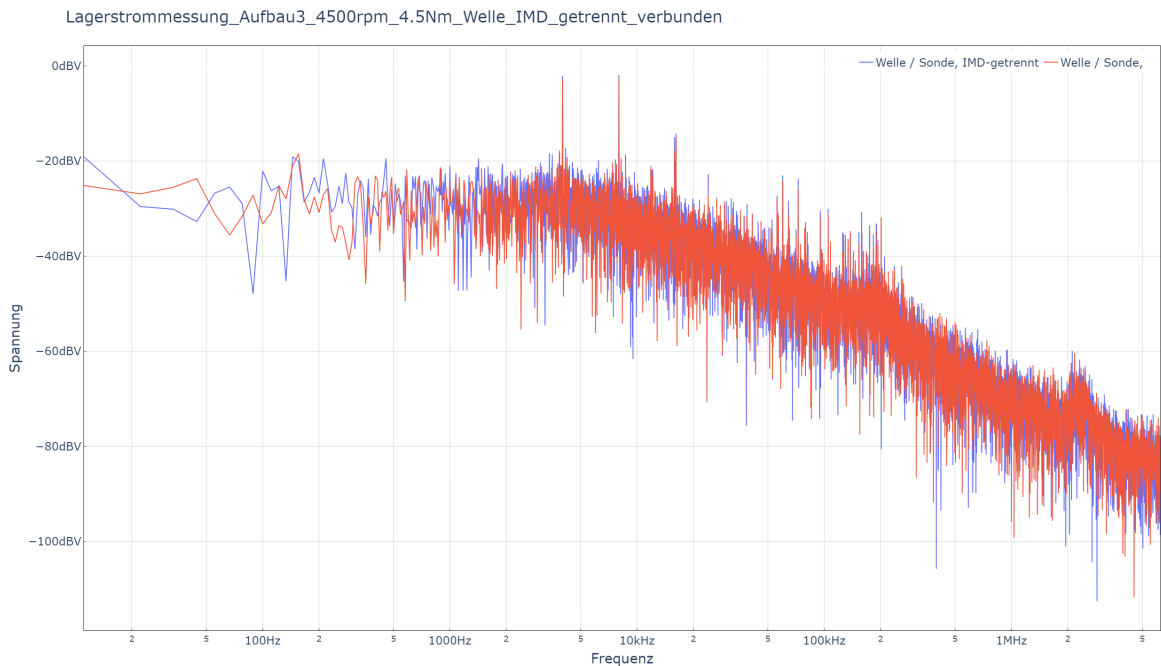


Abbildung 18: Frequenzspektrum der Wellenspannung ohne Ableitung des Lagerstroms - mit und ohne angeschlossenen IMD

Bei einem Vergleich der addierten Speichen-Strommesswerte der Testläufe, stellt man fest, dass diese sich in Kurvenform und Wertebereich sehr stark ähneln. Ein Vergleich der Wellenspannungen bei beiden Messreihen führt zum gleichen Ergebnis. Ein signifikanter Einfluss des IMD auf den Lagerstrom kann daher ausgeschlossen werden.

5.4 Messung der Gleichtaktspannung

Mit der Messung der Gleichtaktspannung beginnen die eigentlichen Messungen. Wie in Abschnitt 2.3.3 ausgeführt, kann die Gleichtaktspannung als Ursache aller hochfrequenten Lagerströme angesehen werden. Die Bestimmung dieser Gleichtaktspannung ist daher von hoher Relevanz für das Verständnis der Lagerströme am Prüflingsmotor. Gemessen wird sie zwischen dem Sternpunkt des Motors und gegen Erde. Der Sternpunkt ist wie unter 3.4 beschrieben an das Klemmbrett in Schaltschrank 1 herausgeführt. Da sich der Umrichter, der die Quelle dieser Gleichtaktspannung darstellt, auf das FE-Potenzial bezieht, wird der Sternpunkt gegen das Erdpotenzial des IT-Netzes gemessen. Die Messung erfolgt wie beschrieben über einen Differenzstastkopf. Gemessen wurde mit „Aufbau1“, wie er unter Abbildung A3 dargestellt ist. Das Frequenzspektrum der Gleichtaktspannung ist in Abbildung 19 zu sehen.

5 MESSUNGEN

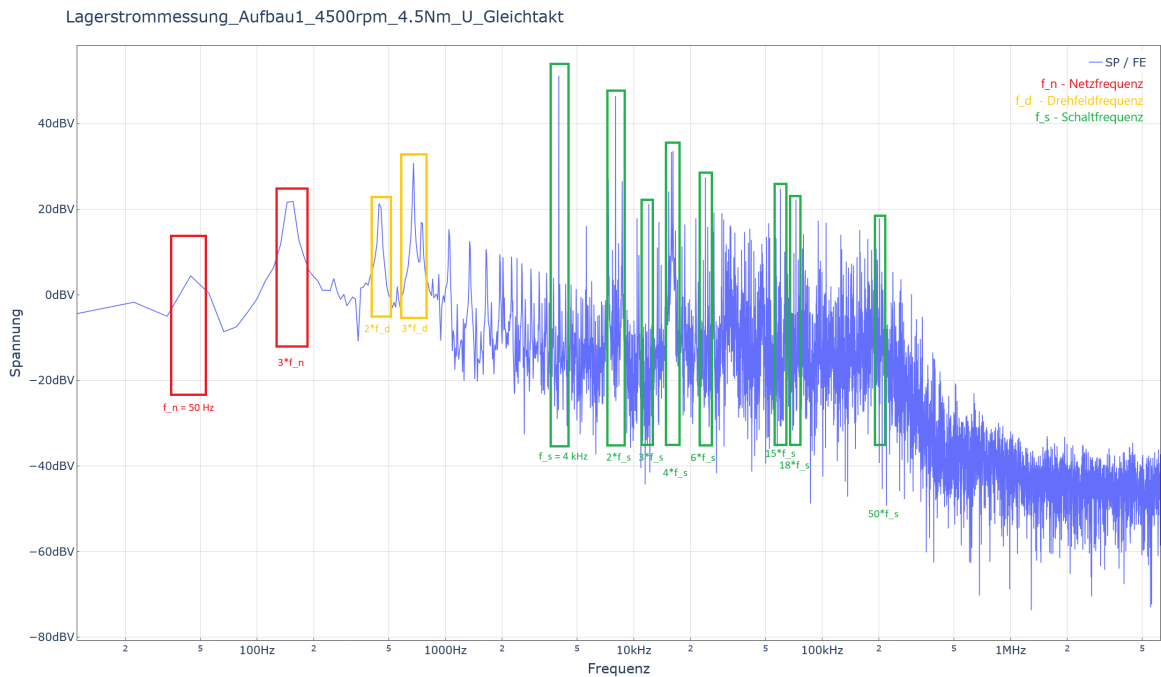


Abbildung 19: Frequenzspektrum der Gleichtaktspannung am Sternpunkt

An diesem Spektrum können die unter Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Frequenzanteile identifiziert werden. Zunächst ist die Netzfrequenz mit einem Peak in der Region um 50 Hz (Ungenauigkeit aufgrund grober Quantisierung) sowie die dreifache Netzfrequenz bei 150 Hz (in der Abbildung jeweils rot dargestellt) erkennbar. Danach folgen die zweifache sowie dreifache der Drehfeldfrequenz des Motors. Die Drehfeldfrequenz wird mit Formel 1 nach den Daten in Tabelle 1 berechnet. Die Rechnung ist in Formel 16 dargestellt.

$$f_d = n \cdot 2p = 4500 \frac{1}{\text{min}} \cdot 3 = 225 \text{ Hz} \quad (16)$$

Demnach ergibt sich eine Drehfeldfrequenz von, 225 Hz. Im Spektrum der Gleichtaktspannung ist die Drehfeldfrequenz nicht dominant erkennbar, wohl aber ihre dritte Harmonische, welche sehr dominant hervortritt (in der Abbildung gelb gekennzeichnet).

Im höheren Frequenzbereich der Gleichtaktspannung tritt die Schaltfrequenz des Maschinenstromrichters zutage, welche bekanntermaßen als Hauptursache für Umrichterbedingte Lagerströme gilt. Die Schaltfrequenz liegt, wie bereits ausgeführt, bei 4 kHz und tritt gemeinsam mit ihren Harmonischen dominant bis in den oberen Kilohertz-Bereich auf. Die gemessenen Frequenzanteile stimmen mit den in Abschnitt 2.3.3 beschriebenen Erwartungen überein.

Darüber hinaus lässt sich eine Aussage über die Höhe der Gleichtaktspannung treffen,

die in Abbildung 22 im Zeitbereich dargestellt ist. Es fällt auf, dass die im Sternpunkt gemessene Spannung sehr hohe Peaks bis auf etwa ± 900 V aufweist. Das lässt sich damit erklären, dass der Umrichter eine durch PWM erzeugte ZK-Spannung besitzt und die schnellen Schaltflanken dieser PWM für eine Kopplung der ZK-Spannung auf die Gleichtaktspannung sorgen. Die Kopplung erfolgt über das Erdpotenzial FE und wird bereits durch Volkmar Hausberg beschrieben [6]. Der Zusammenhang zwischen ZK-Spannung und Gleichtaktspannung kann über eine Effektivwertberechnung (Root-Mean-Square (RMS)) genauer beschrieben werden. Diese Berechnung erfolgt direkt im Oszilloskop aus den aufgenommenen Werten. Abbildung 20 zeigt den Bildschirm des Oszilloskops mit den Graphen für beide ZK-Potenziale, sowie des Sternpunktpotenzials, jeweils gegen FE gemessen. Am rechten Rand des Bildes sind die Effektivwerte zu jedem Potenzial zu sehen. All diese Werte liegen in einem Bereich von etwa 330 V bis 400 V. Besonders die positive ZK-Spannung und die Gleichtaktspannung liegen nah beieinander.

Die Untersuchungen der Zwischenkreisspannung führten nun zu einer weiteren Betrachtung der Schaltfrequenz des Eingangstromrichters, welche in den vorigen Messungen der Gleichtaktspannung noch nicht identifiziert werden konnte. Es wurde daher das Frequenzspektrum der positiven ZK-Spannung gegen FE berechnet. Dieses Spektrum ist in Abbildung 21 zu sehen. Darin ist besagte Schaltfrequenz mit 8 kHz klar erkennbar. Auch der Umstand, dass diese Frequenz in der Gleichtaktspannung zunächst nicht identifiziert werden konnte, löst sich nun auf. Die Schaltfrequenz des Eingangstromrichters entspricht der zweiten Harmonischen der Schaltfrequenz des Maschinenstromrichters. Sie ist damit recht günstig gewählt, da die Kopplung des ZK auf den Gleichtaktkreis, diesem keine relevanten Frequenzanteile hinzufügt. Eine eventuelle Schädigung der Maschine durch die eingekoppelte ZK-Spannung kann dennoch nicht ausgeschlossen werden, da kein Vergleichsaufbau mit analog erzeugter ZK-Spannung vorliegt.

5 MESSUNGEN

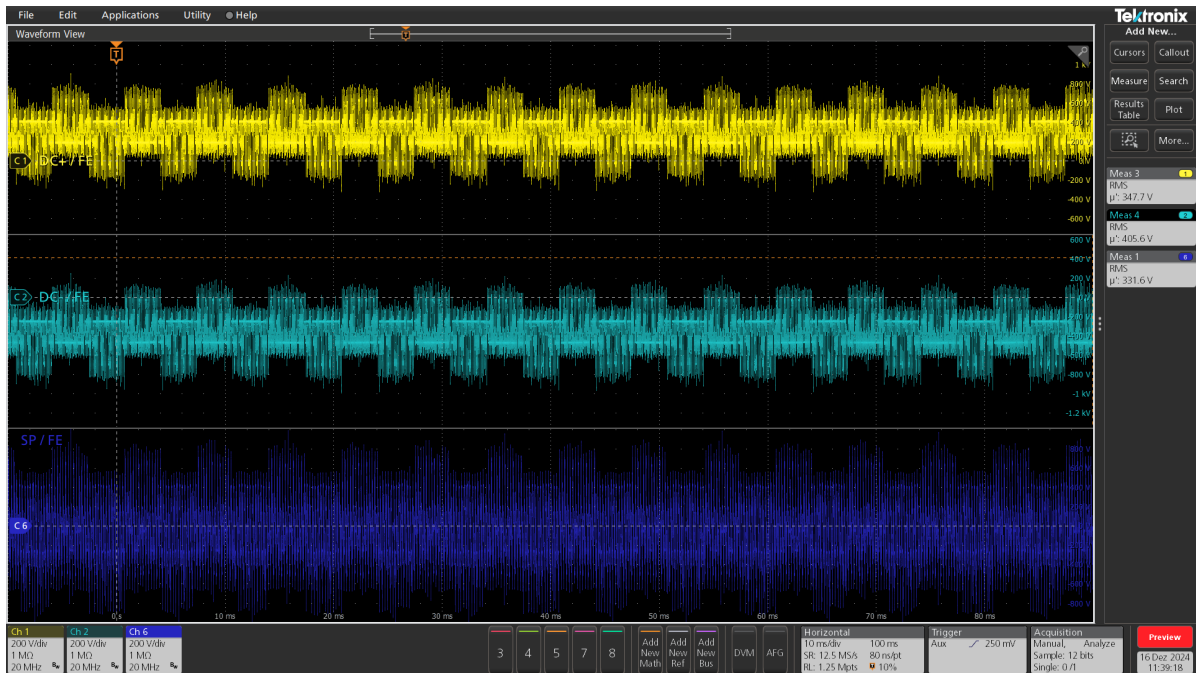


Abbildung 20: Effektivwertberechnung der Zwischenkreisspannungen sowie der Gleichtaktspannung

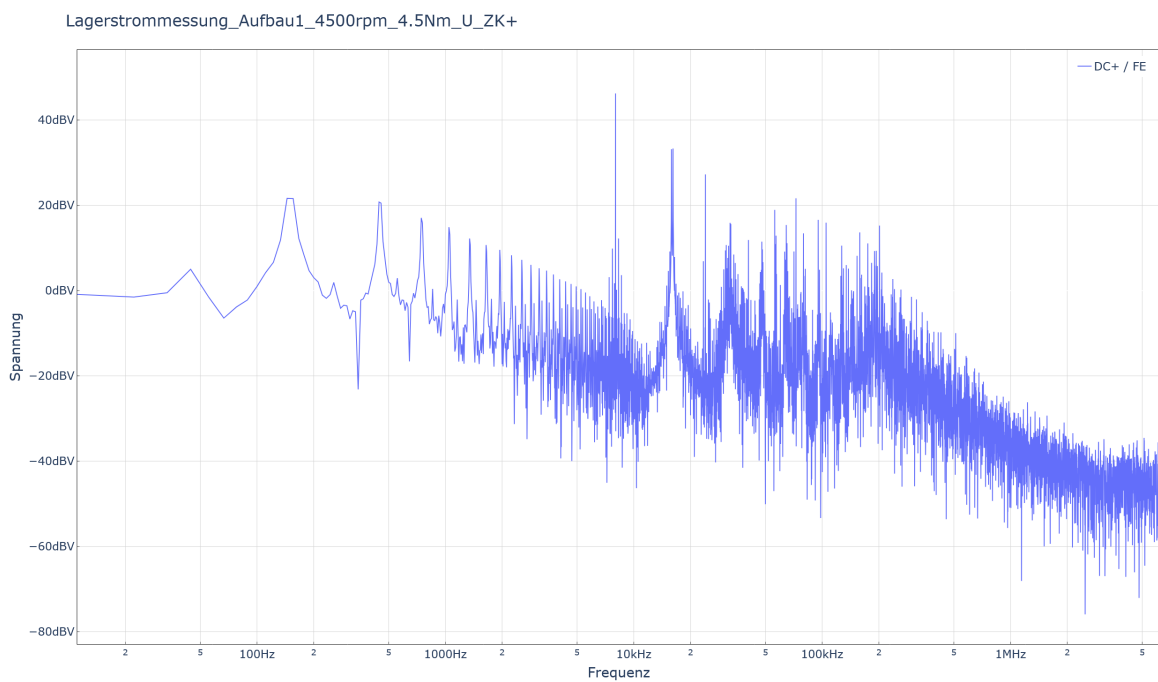


Abbildung 21: Frequenzspektrum der positiven Zwischenkreisspannung

5.5 Messung der Wellenspannung ohne Ableitung des Lagerstroms

Nach Bestimmung der Gleichtaktspannung soll eine weitere für die Entstehung des Lagerstroms wichtige Spannung untersucht werden. Die Wellenspannung bezieht sich direkt auf die Gleichtaktspannung. Sie steht, nach Kopplung der Gleichtaktspannung auf die Motorwicklung und das Ständer-Blechkpaket, an der Motorwelle an. Für die Bestimmung dieser Spannung wird, wie in Abschnitt 4 beschrieben, eine Wellenspannungssonde verwendet, die das B-seitige Wellenpotenzial an der drehenden Motorwelle abnimmt. Dabei wurde die in „Aufbau1“ beschriebene Konfiguration genutzt.

Die Abhängigkeit der aufgenommenen Wellenspannung von der Gleichtaktspannung ist in Abbildung 22 ersichtlich. Es wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit ein repräsentativer Ausschnitt der gesamt aufgenommenen Messwerte gewählt. Wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben, liegt die Wellenspannung üblicherweise in einem Bereich zwischen 2 V und 30 V. Diese These wird von den hier gemachten Beobachtungen gestützt, da die hier gemessene Spannung Maxima von etwa 4 V – 6 V aufweist. Es ist dabei eine vollkommene Abhängigkeit der Wellenspannung von der Gleichtaktspannung zu beobachten. Die Verläufe unterscheiden sich nur in ihrer Höhe, nicht aber in ihrer Gestalt. Diese Aussage wird durch eine Frequenzanalyse und Gegenüberstellung beider Spannungen bekräftigt, die in Abbildung 23 zu sehen ist.

Im Frequenzband der Wellenspannung treten jedoch zwei Abweichungen auf. Bei der Frequenz 225 Hz ist ein deutlicher Peak zu sehen, welcher wie beschrieben genau bei der Drehfeldfrequenz des Maschinenstromrichters liegt und in der Gleichtaktspannung nicht hervortritt. Eine mögliche Erklärung kann in der Gegen-Elektromagnetischen-Kraft (Gegen EMK) des Motors gefunden werden. Das ist eine magnetische Flusskomponente, die der Drehrichtung des Motors entgegenwirkt und eine Spannung induziert, welche der Umdrehungsfrequenz des Motors folgt. Diese symmetrische Spannung ist am Sternpunkt des Motors aufgrund der Addition der drei Phasen nicht bestimmbar, wohl aber an der Motorwelle, die keiner negativen Interferenz der Phasen unterliegt. Die zweite Abweichung liegt im Megahertz-Bereich bei etwa 2,5 MHz. Die Identifizierung dieses Peaks fällt nicht so leicht, da in diesem Bereich keine bekannten vom Umrichter produzierten Frequenzen liegen. Diese Frequenz entspricht allerdings dem 625-fachen der Schaltfrequenz des Maschinenstromrichters. Warum der dominante Peak allerdings nur auf der Wellenspannung, nicht aber auf der Gleichtaktspannung auftritt, konnte nicht geklärt werden. Auf die Motorlager sollten Frequenzen im Megahertz-Bereich allerdings keine weiteren Auswirkungen mehr haben, da ihr Betrag weit unter dem der schaltfrequenten Anteile liegt.

5 MESSUNGEN

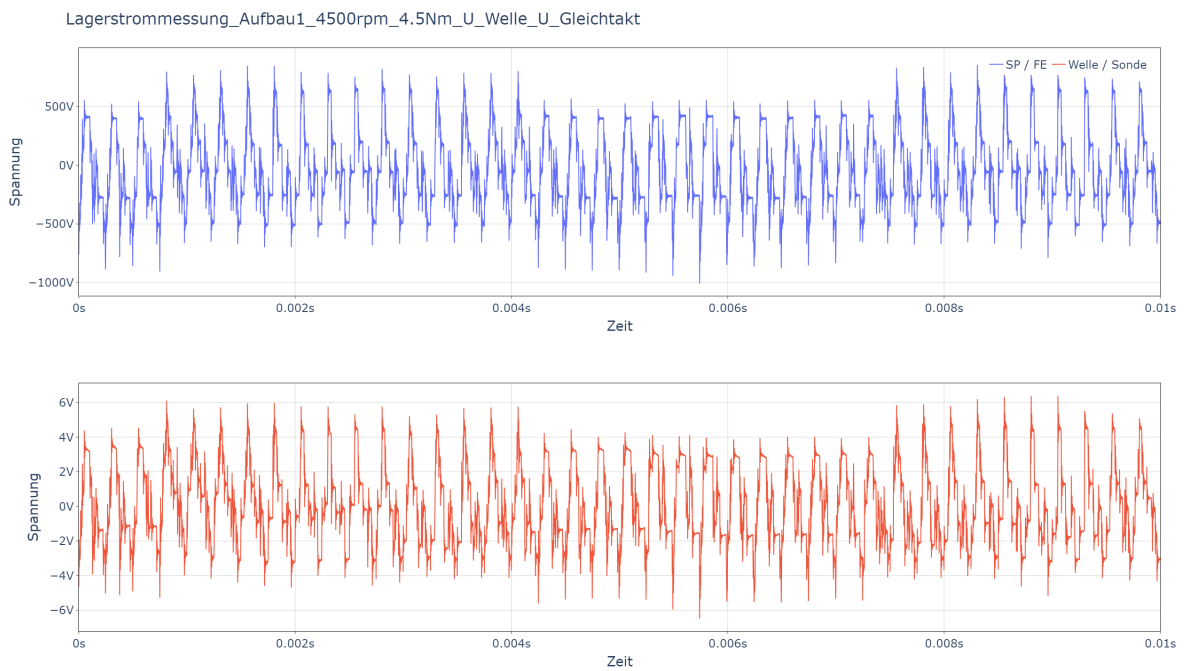


Abbildung 22: Messung der Gleichtaktspannung über dem Sternpunkt sowie der Wellenspannung

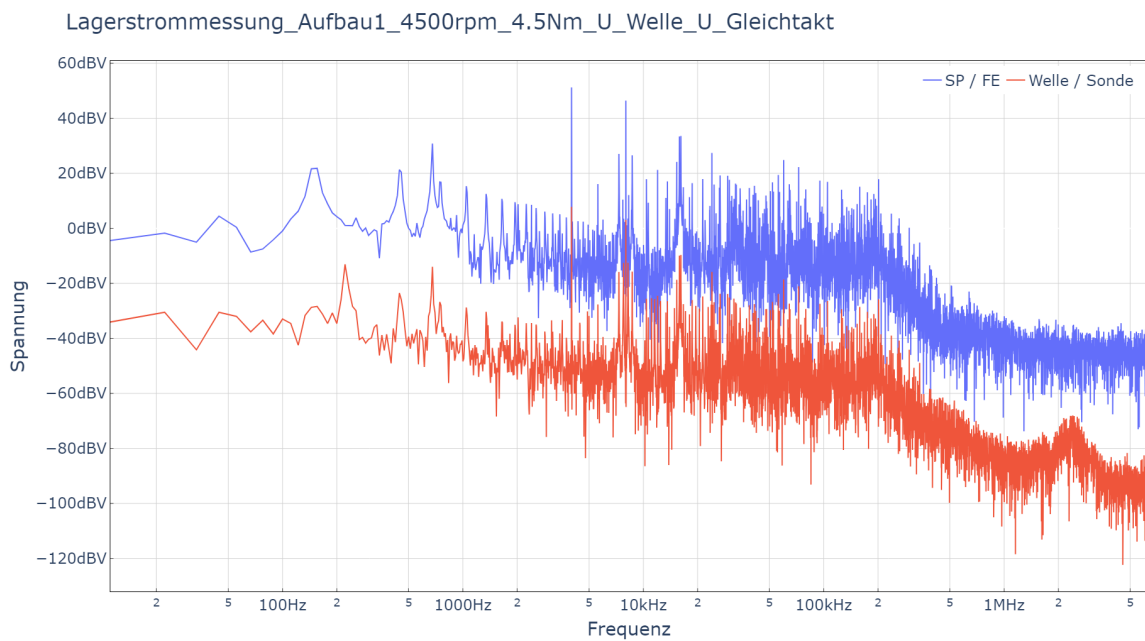


Abbildung 23: Frequenzspektrum der Gleichtaktspannung über dem Sternpunkt sowie der Wellenspannung

5 MESSUNGEN

Eine weitere wichtige Untersuchung ist die Bestimmung der BVR des Elektromotors. Diese ist, nach Formel 8, über die internen Kapazitäten des Motors und damit durch das Verhältnis von Gleichtaktspannung und Wellenspannung beschrieben.

Für eine zweckmäßige Berechnung werden, wie in Abschnitt 5.4, die Effektivwerte beider Spannungen mit dem Oszilloskop bestimmt. Abbildung 24 ist analog zu Abbildung 20 aufgebaut.

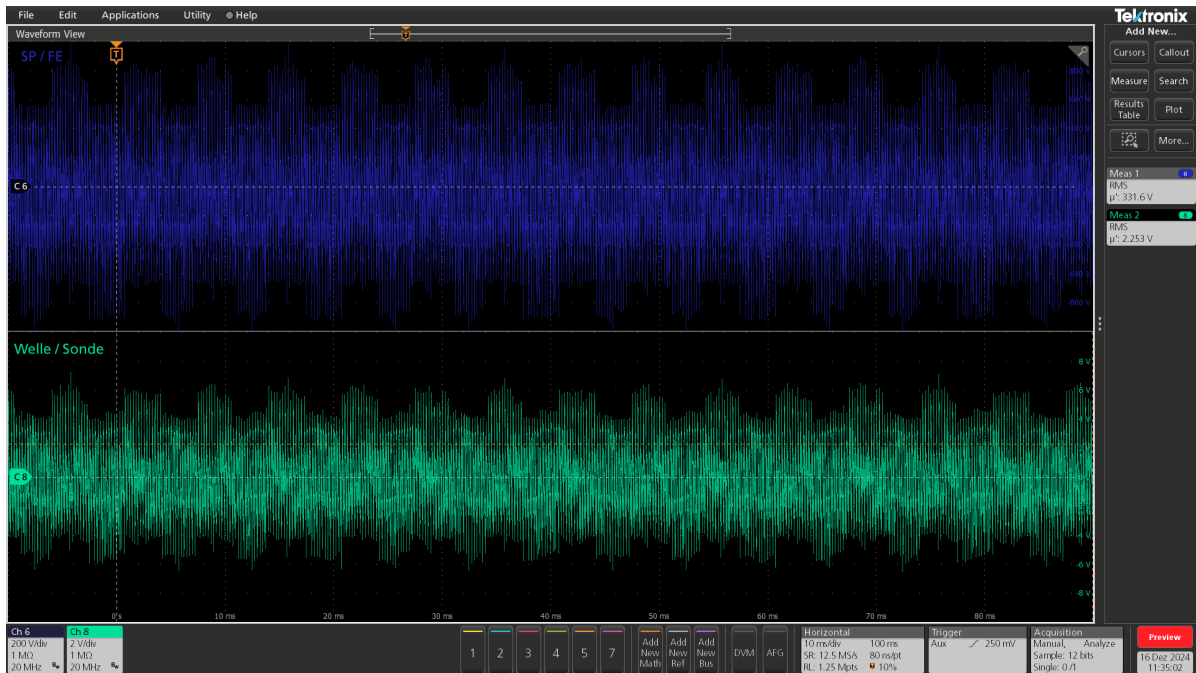


Abbildung 24: Effektivwertberechnung der Gleichtakt- sowie der Wellenspannung

Werden nun die in Abbildung 24 ermittelten Werte in Formel 8 eingesetzt, ergibt sich folgende BVR:

$$BVR = \frac{U_{Welle}}{U_{Gleichtakt}} = \frac{U_{eff(Welle)}}{U_{eff(Gleichtakt)}} = \frac{2.253 \text{ V}}{331.6 \text{ V}} = 0.0068 \approx 0.68 \% \quad (17)$$

Das Ergebnis der Rechnung fällt sehr gering aus und bewegt sich am unteren Rand des üblichen Bereiches (siehe Abschnitt 2.3.4). Praktisch bedeutet dies, dass nur ein sehr geringer Teil der in den Kapazitäten des Gleichtaktkreises gespeicherten Energie auf die Welle gekoppelt werden kann. Im vorliegenden Aufbau können die Gründe dafür in den beidseitig isolierten Lagern (hohe Lagerkapazität C_B) sowie dem weitgehend optimierten Aufbau von Ständerblechpaket und Gehäuse liegen.

Durch eine geringe Ankopplung der Motorwelle kann daher auch nur eine geringe Energiemenge über die Lager gegen Erde fließen. Damit ist das Risiko einer Lagerschädigung als eher gering einzuschätzen.

5.6 Messung des B-seitigen Lagerstroms mit der Speichen-Messmethode ohne Ableitung des Lagerstroms

In diesem Abschnitt soll der Lagerstrom selbst gemessen werden. Es geht dabei um eine Messung des Lagerstroms, ohne dass Maßnahmen zum Schutz der Motorlager, in Form des Wellenerdungsringes oder der Erdungsbürsten, ergriffen werden. Eine solche Messung wird möglich, indem der durch das B-seitige Lagerschild selbst abgeleitete Strom gemessen wird. Auf diese Weise können die direkten Auswirkungen auf das Lager beobachtet werden. Es wird die in Abschnitt 4 beschriebene Methode verwendet, ohne dass zusätzliche Messmittel zur Ermittlung des Lagerstroms verwendet werden. Lediglich die Wellenspannungssonde wird an die Motorwelle angesetzt. Es wird daher „Aufbau3“ (siehe Abbildung A3) verwendet. Alle vier Strommesswerte sind gemeinsam mit dem addierten Gesamtstrom in Abbildung 25 zusehen. Auch hier wurde lediglich ein Detailausschnitt der aufgenommenen Messwerte dargestellt, um einzelne Kurvenformen identifizieren zu können. Die dazugehörige Spektralanalyse ist in Abbildung 26 dargestellt.



Abbildung 25: Messung des Lagerstroms mit der Speichen-Messmethode

5 MESSUNGEN

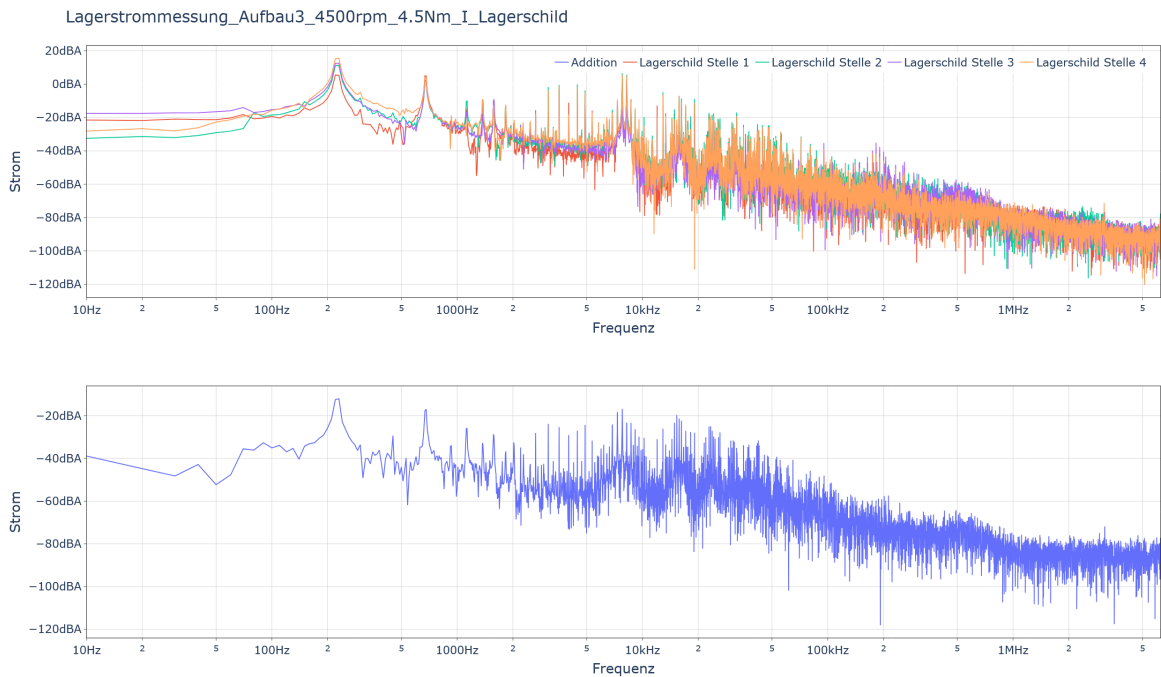


Abbildung 26: Frequenzspektrum des Lagerstroms mit der Speichen-Messmethode

Wie in Abbildung 25 zu sehen, folgt der Lagerstrom der Drehfeldfrequenz von 225 Hz. Erkennbar ist das an der leichten Welligkeit der Grundschiwingung, ohne Betrachtung der Peaks. Dieser Effekt ist auch in Abbildung 26 mit einem dominant herausstechenden Peak erkennbar. Der mit Drehfeldfrequenz fließende Lagerstrom zählt nach Abschnitt 2.3.9 zu den klassischen Lagerströmen. Er ist im unteren Teil von Abbildung 25, in der Summe des B-seitigen Lagerstroms, als angedeutete, langsame Welle erkennbar. In dieser Ansicht ist ebenfalls ersichtlich, dass der klassische Lagerstrom in einem Bereich unter $\pm 500 \text{ mA}$ liegt (Wert unter Vorbehalt wegen fehlerhafter Messung - siehe weiter unten in diesem Abschnitt). Deswegen und aufgrund der geringen Bedeutung bei modernen EKSM kann dieser Lagerstrom als ungefährlich angesehen werden.

Die zweite, in Abbildung 25 erkennbare Lagerstrom Art sind die EDM-Ströme. Sie sind die einzige, im Abschnitt 2.3 betrachtete Lagerstrom-Art, welche mit einem gleichzeitigen Einbruch der Wellenspannung verbunden ist. Es ist jedoch wichtig, dass der hier betrachtete EDM-Strom trotzdem nicht vollständig von einem zirkulierenden Lagerstrom abgrenzbar ist. Grund dafür ist, wie beschrieben, eine fehlende Messung an Lager-A des Motors (siehe Abschnitt 5.1). Dazu kommt, dass sich beide Lagerstromarten in ihren Stromhöhen ähneln.

Im unteren Teil der Abbildung 25 sind die als EDM-Strom angesehenen Anteile zyklisch verteilt. Es handelt sich um Gruppen von positiven und negativen Strompeaks, die abwechselnd auftreten. Die Abstände dieser Gruppen hängen offensichtlich mit

5 MESSUNGEN

dem Verlauf der Drehfeldfrequenz zusammen (Erläuterung am Ende des Abschnittes).

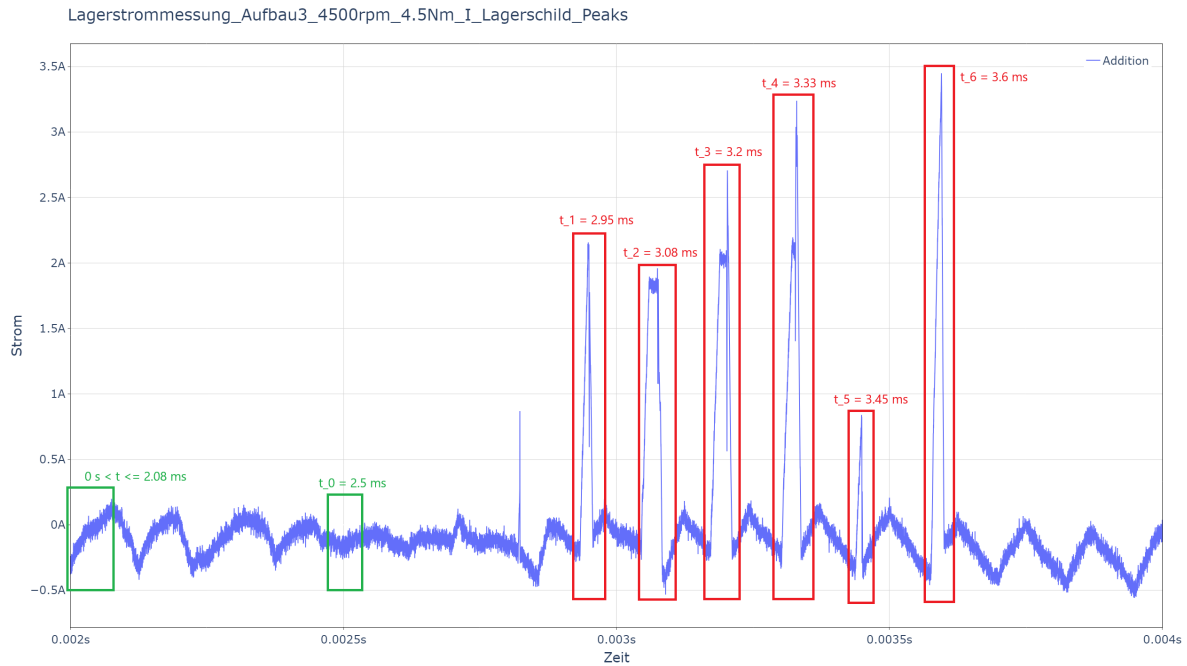


Abbildung 27: Messung des Lagerstroms mit der Speichen-Messmethode - Ausschnitt der vier addierten Speichenströme

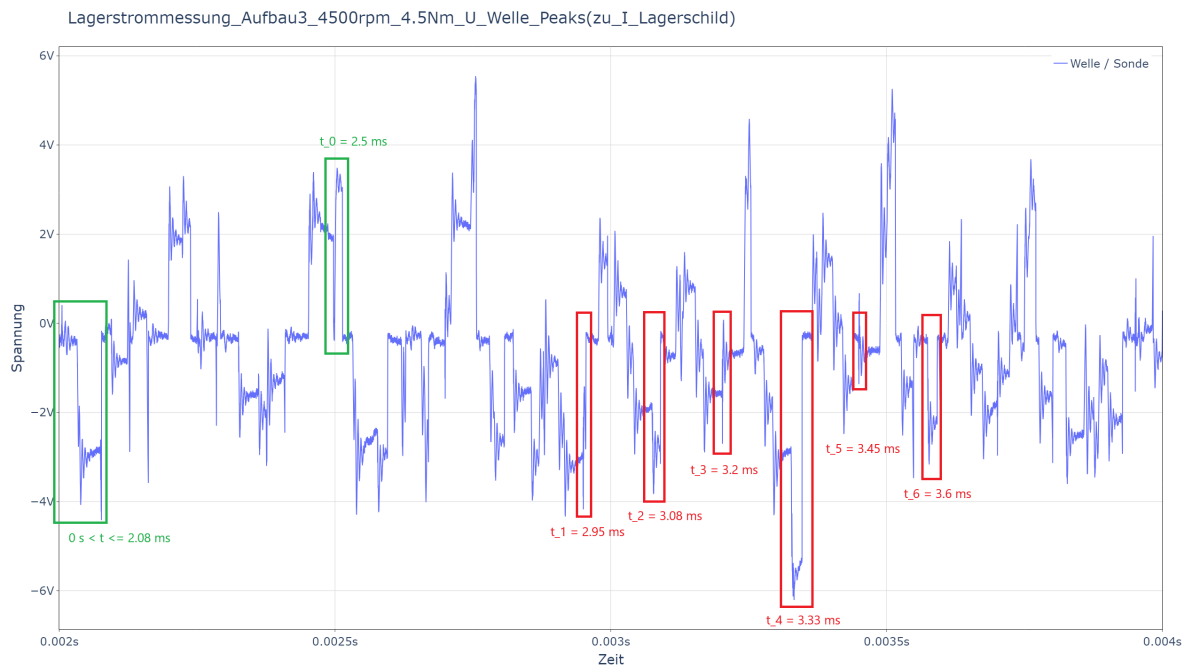


Abbildung 28: Messung der Wellenspannung mit der Wellenspannungssonde - gleichzeitige Messung zu Abbildung 27

Abbildung 27 zeigt einen Ausschnitt der in Abbildung 25 dargestellten Kurve der addierten Speichenströme. Die darin enthaltene Gruppe hoher, positiver Strompeaks (in der Abbildung rot gekennzeichnet), mit Stromhöhen von bis zu ± 4.5 A, deutet auf die Existenz von EDM-Strömen hin. Diese These wird von den Einbrüchen der Wellenspannung gestützt, welche in Abbildung 28 dargestellt sind (ebenso rot umrandet). Betrachtet man die Wellenspannungseinbrüche genauer, scheinen diese nicht den Stromhöhen der Strompeaks zu folgen. Sprich, die Wellenspannung bricht nicht in dem Maße ein, in dem der mutmaßliche EDM-Strom durch das Motorlager jagt. Vielmehr bricht die Wellenspannung selbst bei sehr geringen Anstiegen des Lagerstromes (linker grün markierter Peak in Abbildung 27 sowie linker grüner Einbruch in Abbildung 28) stark ein. Die in den Abbildungen grün umrandeten Peaks verlaufen, ähnlich dem klassischen Lagerstrom, zyklisch. Im Gegensatz zu diesem oszillieren die kleinen Peaks aber sehr viel schneller mit der Schaltfrequenz des Eingangsstromrichters sowie der zweiten Harmonischen der Schaltfrequenz des Maschinenstromrichters (siehe Abbildung 26). Die geringere Ausprägung der Grundfrequenz des Maschinenstromrichters ist durch die positive Interferenz beider Harmonischen zu erklären, welche daher einen besonders dominanten Frequenzanteil bei 8 kHz bilden. Der kleine, schaltfrequent verlaufende Anteil des Lagerstromes besitzt relativ geringe Amplituden und verläuft im Bereich von -0.4 A bis 0.2 A. Aufgrund des Einbruchs der Lagerspannung bei jedem dieser kleinen Anstiege des Lagerstromes, ist der schaltfrequente Lagerstromanteil ebenso als mutmaßlich EDM-artig anzusehen.

Eine Erklärung des Verhaltens des Lagerstroms kann im Messaufbau gefunden werden. Nach dem Datenblatt der verwendeten Rogowskispule besitzt diese einen signifikanten Rauschanteil von $I_{pp} = 100$ mA (siehe auch Tabelle 2)[8]. Demnach sind kleine Ströme wie du/dt -Ströme (ca. 5 mA bei schwimmenden Lagerkugeln - siehe auch Abschnitt 2.3.5) schlichtweg nicht messbar und die Messergebnisse der in den Abbildungen 27 und 28 grün dargestellten, kleineren Peaks infrage zu stellen. Die tatsächliche Gestalt dieser Peaks kann deshalb nicht genau referenziert werden. Dazu kommt eine relativ hohe Anfälligkeit der verwendeten Rogowskispulen für gestrahlte Emissionen. Dadurch, dass diese im Lagerschild angebracht sind, besteht eine große Nähe zu dem rotierenden Läufer, welcher sowohl die Drehfeldfrequenz als auch die Schaltfrequenzen von Eingangs- und Maschinenstromrichter emittiert.

Abbildung 29 beweist den strahlenden Einfluss des Motors auf die Lagerstrommessung. Zu sehen ist darin eine Aufnahme des Oszilloskop-Bildschirms. Diese zeigt die auf den Strom umgerechnete Messkurve einer Rogowskispule in orange. Darüber ist das Frequenzspektrum zu dieser Messung in violett zu sehen. Die beschriebenen Frequenzanteile der Schaltfrequenz des Eingangsstromrichters (vermutlich mit der

5 MESSUNGEN

zweiten Harmonischen des Maschinenstromrichters) sowie die Drehfeldfrequenz sind in diesem Spektrum ersichtlich. Die Höhe des hier gemessenen Stroms liegt mit ca. $I_{pp} = 200 \text{ mA}$ weit über dem Bereich des Rauschens der Rogowskispule. Die Messung wurde aufgenommen, indem die Rogowskispule dicht neben das Lagerschild der Prüflingsmaschine gehalten wurde und der Motor mit dem Standard-Betriebspunkt lief.

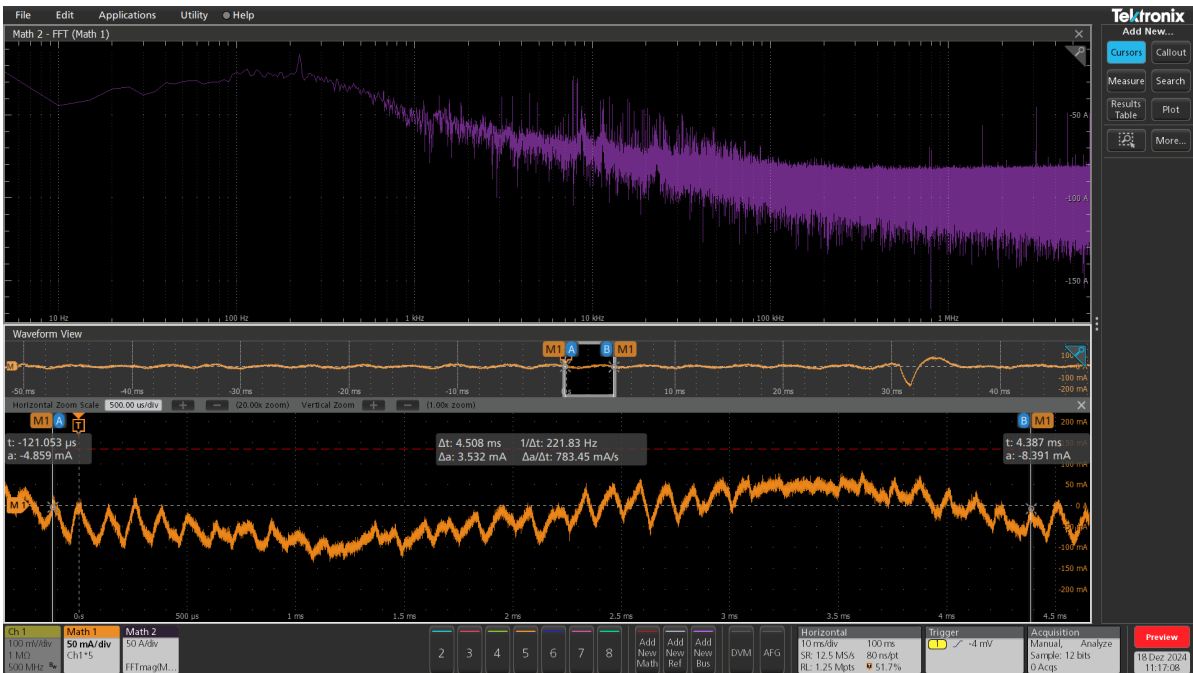


Abbildung 29: Gestrahlte Emissionen neben dem B-seitigen Lagerschild der Prüflingsmaschine - gemessen mit der Rogowskispule bei anliegendem Betriebspunkt

Eine weitere Fehlerquelle ist der offensichtlich zu knapp bemessene Messbereich, der bei dieser Messung eingesetzt wurde. In Abbildung 25 ist der Fehler klar erkennbar, da die im oberen Teil der Abbildung dargestellten Kurven bei $\pm 12.8 \text{ A}$ abgeschnitten sind. Das führt zu einer geringen Abweichung der addierten Gesamt-Lagerstromkurve aufgrund des eher geringen zu erwarteten Datenverlustes. Speziell auf die Höhe der hohen Strompeaks kann dieser Fehler jedoch Auswirkungen haben. Darüber hinaus wirkt sich die so entstehende Rechteckbildung an den Strommaxima bzw. -minima auf den Frequenzbereich aus. Sie führt dazu, dass im oberen Frequenzbereich zusätzliche Oberwellen dargestellt werden. Auf die hier näher beschriebenen Frequenzen wird der Effekt keine Auswirkungen haben.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse lässt sich folgern, dass die in Abbildung 25 dargestellte Messung stark verzerrt ist. Die Existenz der Schaltfrequenzen sowie der Drehfeldfrequenz sollte allerdings nicht grundsätzlich infrage gestellt werden. Auf der Wellenspannung wurden diese Frequenzanteile ebenso nachgewiesen. Darüber hinaus ist die Höhe der gemessenen, langsamen Drehfeldschwingung im Rahmen der klassischen Lagerströme wie beschrieben plausibel.

Ebenso kann die Existenz von EDM-Strömen zumindest unter Vorbehalt nachgewiesen werden. Die positiven sowie negativen Gruppen starker Peaks sprechen zusammen mit den gleichzeitigen Einbrüchen der Wellenspannung für eine Existenz dieser Ströme. Auch die kleinen, als EDM-Strom bewerteten, schaltfrequent verlaufenden Lagerströme sprechen aufgrund ihres Zusammenhangs mit der Wellenspannung dafür. Wie hoch die tatsächlichen Lagerströme ausfallen, kann aufgrund der Beeinflussung der Messung sowie des fehlerhaften Messbereichs nicht zweifelsfrei festgestellt werden. Allerdings gibt es einen weiteren Grund, der für die Identifizierung der hohen Strompeaks als EDM-Strom spricht. Wie weiter oben angedeutet, treten die Gruppen dieser Peaks abhängig vom Verlauf der Drehfeldfrequenz und damit abhängig vom Verlauf der klassischen Wellenspannung auf. Wie in Abschnitt 2.3.9 bereits erläutert, besteht eine Verbindung zwischen klassischer Wellenspannung und dem Auftreten von EDM-Strömen. Hausberg zufolge wirkt die niederfrequente Wellenspannung als verstärkender Faktor für das Auftreten dieser Ströme.

Darüber hinaus ist eine Existenz geringerer EDM-Stromspitzen außerhalb des durch die klassische Wellenspannung vorgegebenen Zyklus zwar möglich, durch die veräuschte Lagerstrommessung aber nicht verifizierbar. Die in Formel 17 berechnete, sehr geringe BVR, welche auf einen eher geringen Einfluss der EDM-Ströme hindeutet, spricht nicht für hohe Auswirkungen dieser Lagerstromart.

Abschließend bleibt nur die Folgerung, dass die Lagerstrommessung mit der Speichenmethode am Lagerschild lediglich einen Anhaltspunkt der durch das Motorlager fließenden Ströme vermitteln kann. Eine Verbesserung der Messmethode durch geeignetere Messmittel kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

5.7 Messung des B-seitigen Lagerstroms mit dem AEGIS Wellenerdungsring

Nach Abschluss der Lagerstrommessung im ungeschützten Zustand der Motorlager soll es nun um die Möglichkeit gehen, den Prüflingsmotor vor auftretenden Lagerströmen zu schützen. Dafür wird zunächst der Wellenerdungsring am B-seitigen Lagerschild des Motors befestigt und mit der Erdleitung an das FE-Potenzial ange-

geschlossen. Verwendet wird „Aufbau7“.

Abbildung 30 zeigt den an der Erdleitung des Erdungsrings gemessenen Strom. Bei dieser Messung kam wieder eine Rogowskispule zum Einsatz. Der durch Erdungsring und Bürsten laufende Strom wird im Folgenden als Erdstrom betitelt. Es handelt sich hier nicht um den Erdstrom, welcher auf dem FE-Potenzial zum Umrichter zurückfließt, sondern um den Strom, der zwischen Wellenpotenzial und FE-Potenzial auftritt. Dieser Strom ist allerdings Teil des FE-Erdstromes.

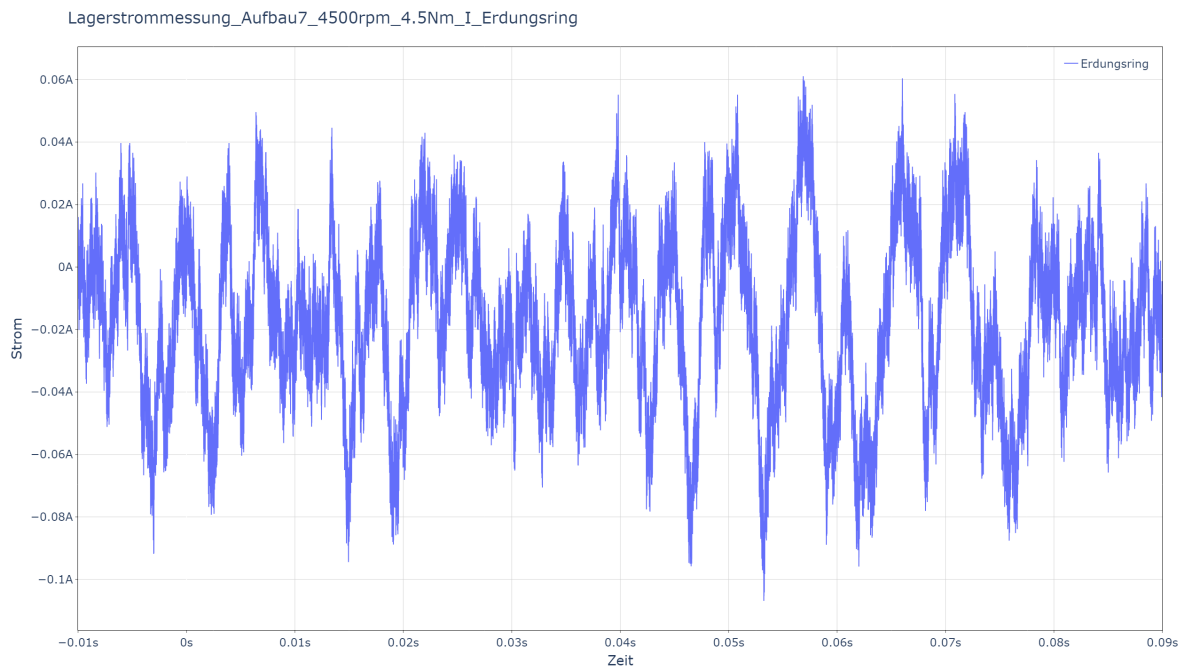


Abbildung 30: Gemessener Erdstrom durch den Wellenerdungsring - parallel zum Motorlager

Die Kurve zeigt plausible Messwerte. Die durch den Erdungsring fließenden Ströme bewegen sich in einem Bereich von etwa -100 mA bis 60 mA . Diese Werte sind, bezogen auf beidseitig isolierte Lager sowie die BVR durchaus glaubhaft. Bedenkt man allerdings die Rauschgrenze der Rogowskispulen, welche mit $\pm 100\text{ mA}$ angegeben ist, können die Ergebnisse als keinesfalls gesichert angesehen werden (siehe Tabelle 2). Um den Effektivwert des Stromes durch den Erdungsring trotzdem auswerten zu können, wurde dieser wieder mit dem Oszilloskop berechnet. Der Effektivwert beträgt etwa 32 mA und ist als Bildschirmaufnahme des Oszilloskops in Abbildung 31 zu sehen. Der Wert liegt im positiven Bereich. Der Strom fließt daher im Mittel von der Welle Richtung Erde. Eine umgekehrte Stromrichtung würde auf eine schlechte Erdanbindung und ein dadurch gestiegenes Erdpotenzial hindeuten (siehe Abschnitt 2.3.8).

5 MESSUNGEN

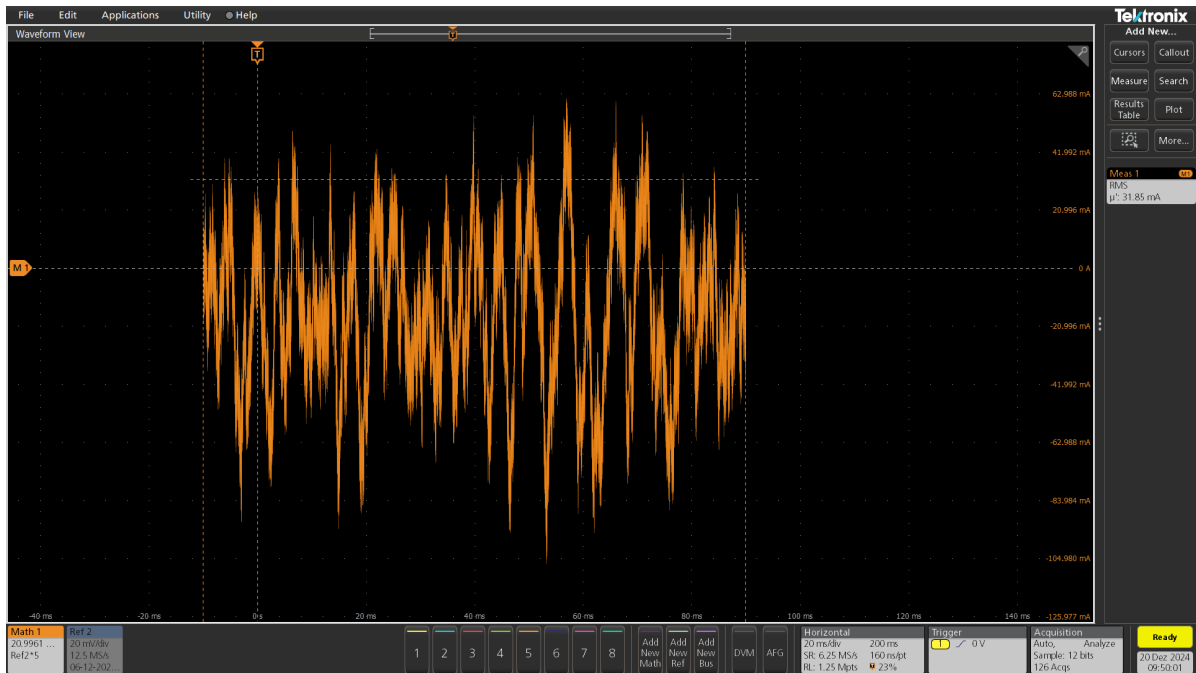


Abbildung 31: Effektivwertberechnung des Erdstroms durch den Wellenerdungsring - parallel zum Motorlager

Eine Spektralanalyse des Erdstroms ist nicht sinnvoll, da der hier gemessene Strom nicht durch das Motorlager fließt. Daher können die einzelnen Lagerstromarten auch nicht in dieser Messung nachgewiesen werden. Allein die am Lager vorbei übertragene Energie, in Form des Stroms durch den Erdungsring, ist ausschlaggebend.

Für eine genaue Bewertung der durch den Erdungsring abgeleiteten Stromanteile wurde eine Speichenmessung, gleichzeitig zur Messung am Erdungsring, durchgeführt. Der Messaufbau entspricht dabei Abbildung 13. Die Messung wurde fehlerhaft durchgeführt. Es stellte sich der gleiche Messbereichsfehler, wie in Abschnitt 5.6 ein. Im Gegensatz dazu war der eingestellte Messbereich aber so weit von den zu messenden Stromspitzen entfernt, dass eine Addition der Speichen kein verwertbares Ergebnis mehr erbracht hat. Die fehlerhafte Messung ist in Abbildung 32 zu sehen.

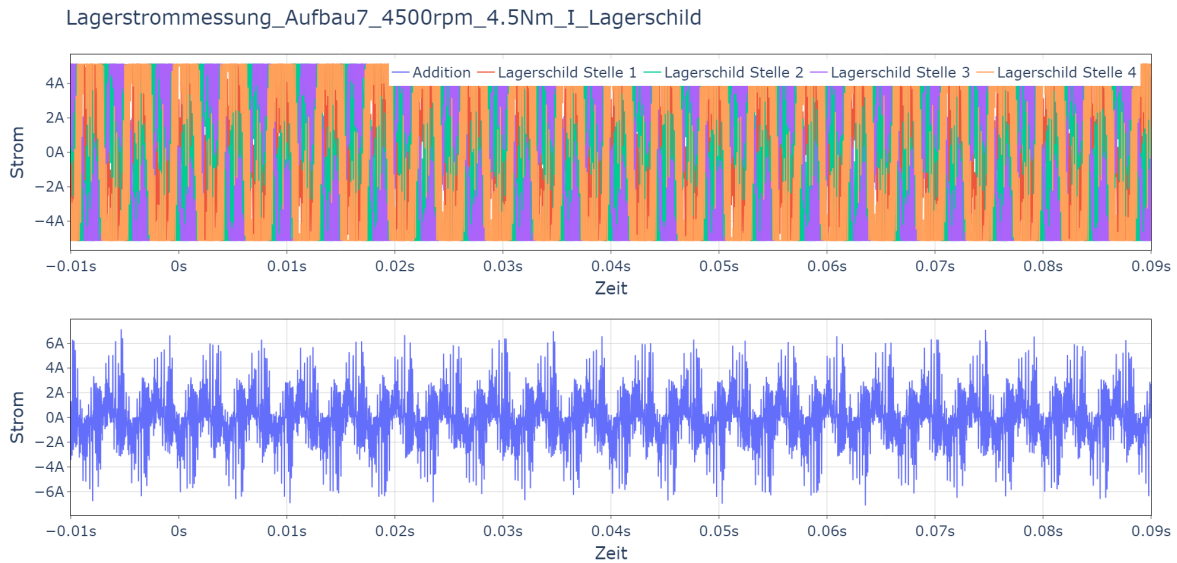


Abbildung 32: Fehlerhafte Messung des Lagerstroms mit der Speichenmessmethode - gleichzeitig zur Erdungsringmessung

Die Funktion des Erdungsringes ist aufgrund dessen allein an den Ergebnissen der Erdungsbürsten-Messung im folgenden Abschnitt (5.8) bewertbar.

5.8 Messung des B-seitigen Lagerstroms mit Erdungsbürsten

Nun wurden die Erdungsbürsten (siehe Tabelle 2) nacheinander an Stelle des Erdungsringes am Lagerschild des Prüflings befestigt. Gleichzeitig wurde die Wellenspannung gemessen. Die Messkonfiguration wurde bereits in Abbildung 12 gezeigt. Im Rahmen des Messprogramms wurde „Aufbau8“ bis „Aufbau10“ verwendet. Die gemessenen Ströme sind in Abbildung 33 dargestellt.

5 MESSUNGEN

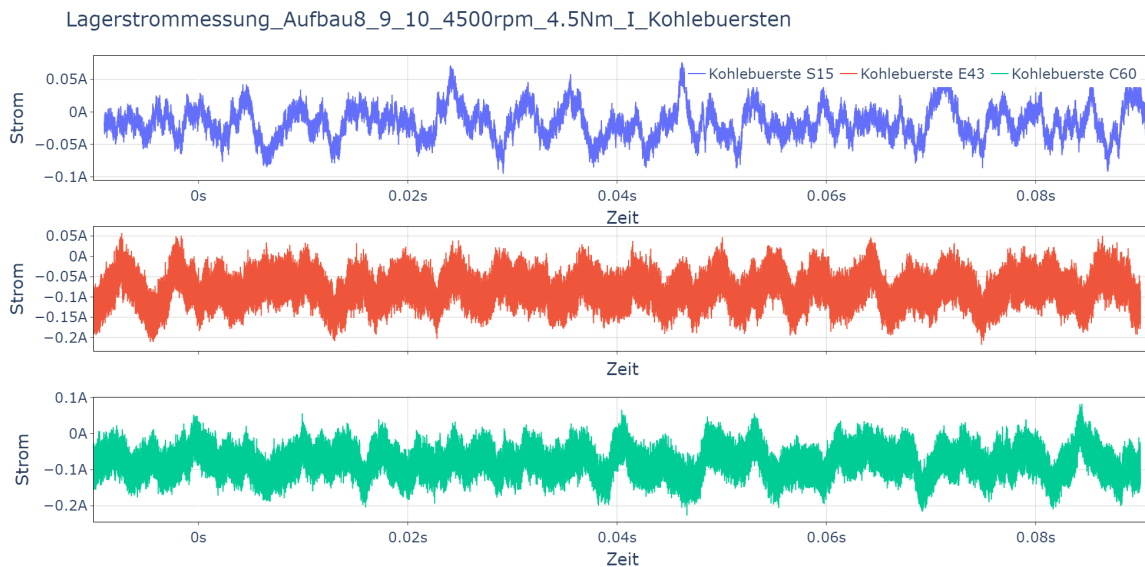


Abbildung 33: Messung des Erdstroms durch die Kohlebürsten - parallel zum Motorlager

Das Frequenzspektrum der Bürstenmessungen ist, wie das des Erdungsringes, nicht relevant für den Vergleich der Lagerschutzmethoden. Es wird daher auch nicht betrachtet.

Die im Folgenden vorgestellten Berechnungen und Erkenntnisse sind nicht repräsentativ für die Güte der vier verschiedenen Methoden und Materialien. Das liegt an den bekannten Gründen des Rauschanteils der Rogowskispulen, sowie den teilweise ungenau durchgeführten Messungen. Es handelt sich somit um eine Beispielrechnung, deren Ergebnis im Rahmen dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden kann.

Beim Vergleich der drei Kohlematerialien fällt eine Ähnlichkeit der Elektrografit-Bürste (E43) mit der Bronzegrfit-Bürste (C60) auf. Die Kurven besitzen einen ähnlichen Rauschanteil, sowie sehr ähnliche Wertebereiche von -200 mA bis auf 50 mA . Der gemessene Strom geht damit im Vergleich zum Erdungsring noch etwa 100 mA tiefer in den negativen Bereich. Die Erkenntnis spiegelt sich ebenfalls in der Analyse der Effektivwerte der Bürstenströme wider, welche bei beiden Materialien bei ca. 85 mA liegen. Das ist ein Wert, der deutlich über dem des Erdungsringes liegt. Die Effektivwerte wurden nach der gleichen Methode wie in Abschnitt 5.7 für alle drei Bürstenmessungen berechnet. Die Bildschirmaufnahme des Oszilloskops ist in Abbildung 34 zu sehen.

5 MESSUNGEN

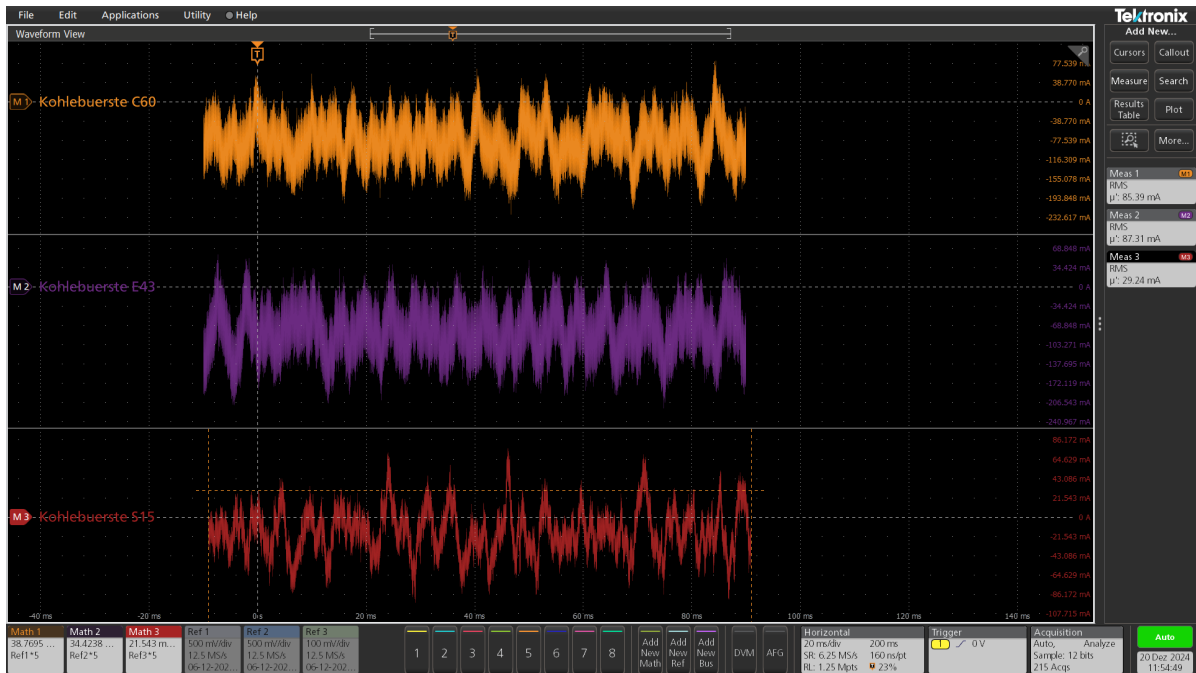


Abbildung 34: Effektivwertberechnung des Erdstroms durch die Erdungsbürsten - parallel zum Motorlager

Betrachtet man nun den Verlauf des Stroms der Naturgraphit-Bürste (S15), stellt man eine Ähnlichkeit zum Verlauf des Stroms durch den Erdungsring fest. Abbildung 35 zeigt beide Verläufe. Die Kurvenformen sind relativ ähnlich. Auch die Effektivwerte sind recht ähnlich. Im Falle der Bürste S15 liegt dieser bei ca. 30 mA und damit nah an dem des Erdungsringes (vgl. Abbildung 31).

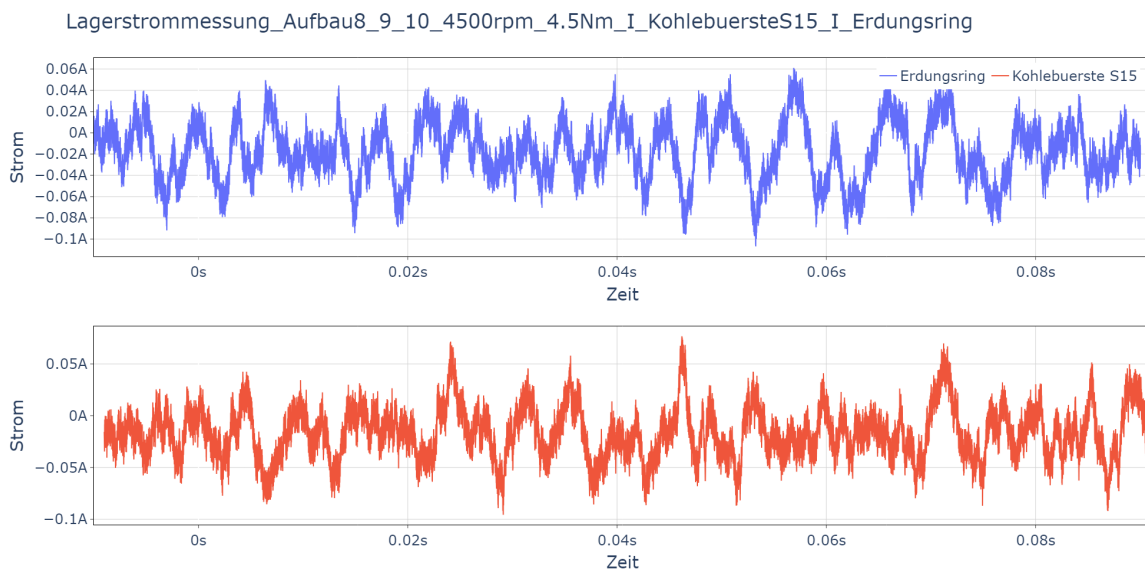


Abbildung 35: Messung des Erdstroms durch Erdungsring und Kohlebürste S15

5 MESSUNGEN

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse und insbesondere der Kurvenform der am Lager vorbei geleiteten Ströme, können alle vier Wellenerdungsmethoden in zwei Gruppen eingeteilt werden. Beide Gruppen sind in Tabelle 4 zu sehen.

Wert	Formelz.	Gruppe 1 Erdungsbürsten E43 und C60	Gruppe 2 Erdungsbürste S15 und Erdungsring
Effektivwert	I_{eff}	$\approx 85 \text{ mA}$	$\approx 30 \text{ mA}$
Strom Wertebereich	I_{pp}	$-200 \text{ mA} < I < 50 \text{ mA}$	$-100 \text{ mA} < I < 75 \text{ mA}$
Aufbau	/	Aufbau8 und Aufbau9	Aufbau7 und Aufbau10

Tabelle 4: Einteilung der Wellenerdungsmethoden in zwei Gruppen (Messwerte für bessere Vergleichbarkeit auf 5 mA gerundet (siehe Abschnitt 5.8))

Die beiden so gewonnen Effektivwerte können nun mit den entsprechenden Effektivwerten der Wellenspannung verglichen werden. Im Falle des Erdungsringes kann nur auf den Effektivwert der Wellenspannung zu Bürste S15 zurückgegriffen werden. Aufgrund der hohen Vergleichbarkeit der Ströme in Gruppe 2 kann zumindest eine Abgrenzung des Erdungsringes zu den Erdungsbürsten in Gruppe 1 vorgenommen werden. Ein genauer Vergleich von Bürste S15 zum Verhalten des Erdungsringes ist nicht möglich.

Alle bekannten Effektivwerte sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Darin sind ebenso die Effektivwerte der in „Aufbau3“ aufgenommenen Wellenspannung, sowie des Lagerstroms aus „Aufbau3“ (inkorrekte Messung, Effektivwert gerundet) dargestellt. Der Effektivwert der Wellenspannung wurde bereits in Abschnitt 5.5 berechnet. Die noch nicht dargestellten Effektivwerte sind in Abbildung 36 berechnet worden.

Zusätzlich zu den Effektivwerten sind die nach Formel 18 und 19 [13] berechneten Scheinleistungen in Tabelle 5 angegeben.

$$S_{eff} = U_{eff} \cdot I_{eff} \quad (18)$$

$$S_{eff \rightarrow \text{Lager}} = S_{eff \rightarrow \text{gesamt}} - S_{eff \rightarrow \text{abgeleitet}} \quad (19)$$

5 MESSUNGEN

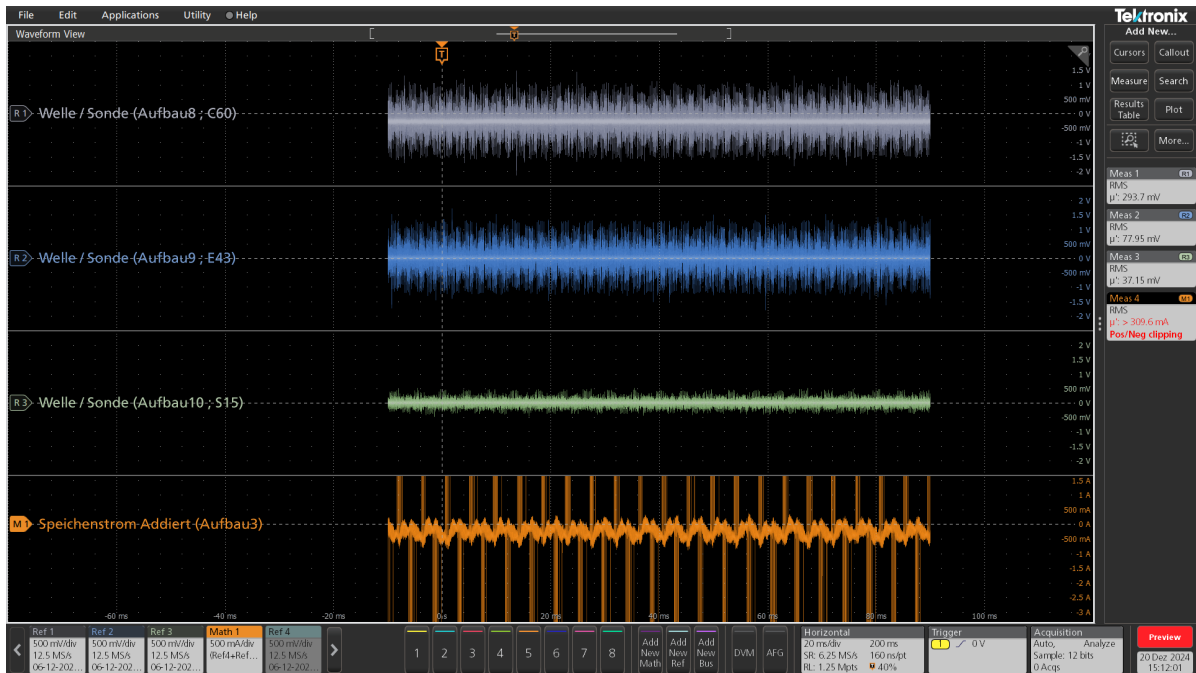


Abbildung 36: Effektivwertberechnung des Lagerstroms ohne Ableitung („Aufbau3“), sowie der drei Wellenspannungen bei Ableitung mit den Erdungsbürsten („Aufbau8“ bis „Aufbau10“)

Lagerschutz	Gruppe	Aufbau	U_{eff}	I_{eff}	$S_{eff} \rightarrow abgeleitet$	$S_{eff} \rightarrow gesamt$	$S_{eff} \rightarrow Lager$
ungeschützt	/	Aufbau3	2.3 V	≈ 0.3 A	0 VA	0.69 VA	0.69 VA
Erdungsring	Gruppe 2	Aufbau7	(≈ 0.04 V)	0.032 A	(0.0013 VA)		(0.6887 VA)
Bürste C60	Gruppe 1	Aufbau8	0.3 V	0.085 A	0.026 VA		0.664 VA
Bürste E43	Gruppe 1	Aufbau9	0.078 V	0.087 A	0.0068 VA		0.6832 VA
Bürste S15	Gruppe 2	Aufbau10	0.037 V	0.029 A	0.0011 VA		0.6889 VA

Tabelle 5: Zusammenfassung der berechneten Effektivwerte und Scheinleistungen mit und ohne Ableitung des Lagerstroms

Vergleicht man die in Tabelle 5 angegebenen Werte der durch das Lager fließenden Ströme, fällt eine recht große Ähnlichkeit aller vier Methoden auf. Keine der Methoden bewirkt eine nennenswerte Abnahme der durch das Lager fließenden Scheinleistung. Wie schon beschrieben sind die hier berechneten Ergebnisse aufgrund der bekannten Problematiken nicht verwertbar. Laut Tabelle 5 bewirkt zwar die Bürste C60 die geringste im Lager wirksame Leistung. Dieses Ergebnis liegt allerdings sehr nah an den übrigen Werten und ist damit keinesfalls aussagekräftig.

Betrachtet man Abbildung A3 im Anhang, so stellt man fest, dass im Zuge der Messungen an den Wellenerdungsmethoden, parallel Speichenmessungen durchgeführt wurden. Die bei allen vier Messungen aufgenommenen Speichenströme sind sowohl

verrauscht, als auch mit falschem Messbereich aufgenommen worden und daher nicht für eine Analyse geeignet.

5.9 Messung des Erdstroms

Im Zuge aller beschriebenen Messungen wurde der Erdstrom auf der FE-Erdleitung des Prüflingsmotors aufgenommen. Eine direkte Relevanz bietet der Erdstrom im Rahmen dieser Untersuchungen nicht. Bei Messung eines zirkulierenden Lagerstroms stellt er allerdings ein wichtiges Instrument zur Identifikation dieser Ströme dar (vgl. Abschnitt 2.3.6).

Die Erdströme der Aufbauten „Aufbau3“ (ohne Lagerschutz), sowie „-7“ bis „-10“ (mit Lagerschutz) sind in Abbildung 37 dargestellt. Die Frequenzspektren finden sich in Abbildung 38. Alle fünf Spektren sind hier der Übersichtlichkeit halber übereinander gelegt, da sie nur geringe Unterschiede zueinander aufweisen.

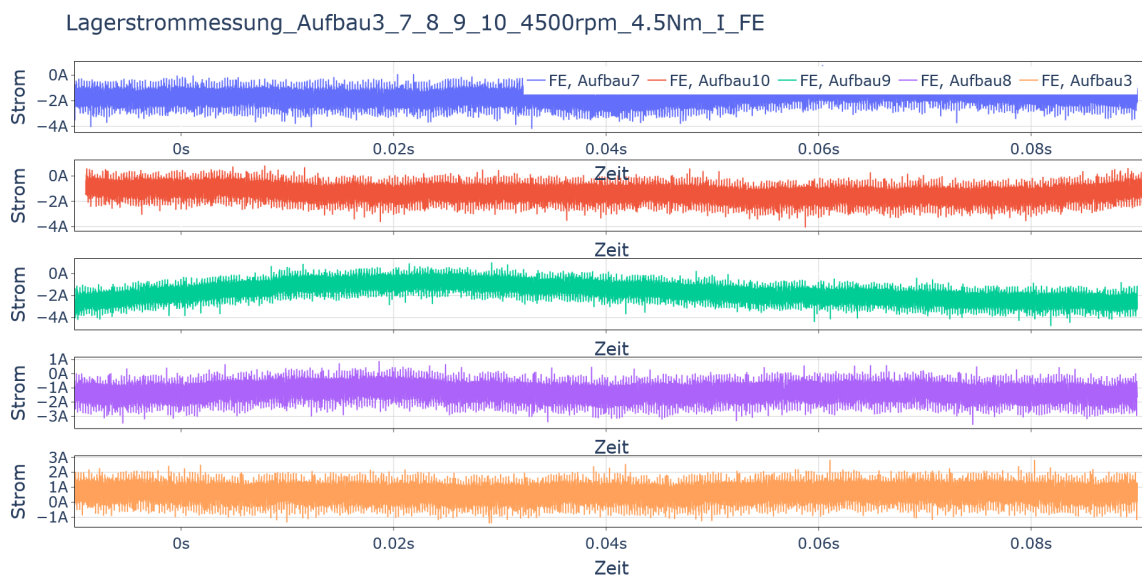


Abbildung 37: Messung des Erdstroms auf dem Potenzial FE - mit und ohne Ableitung des Lagerstroms

In Abbildung 37 sind relativ gleichförmige Verläufe zu sehen, welche sich untereinander deutlich ähneln. Es fällt jedoch auf, dass der Erdstrom ohne Ableitung des Lagerstroms im positiven Bereich liegt, während die Erdströme bei Ableitung des Lagerstroms im negativen Bereich liegen.

Da auf der Stromzange keine bevorzugte Einbaurichtung gekennzeichnet ist, kann dieser Effekt nicht genauer verifiziert werden. Eine in „Aufbau3“ umgekehrt eingebaute Stromzange ist allerdings wahrscheinlich.

5 MESSUNGEN

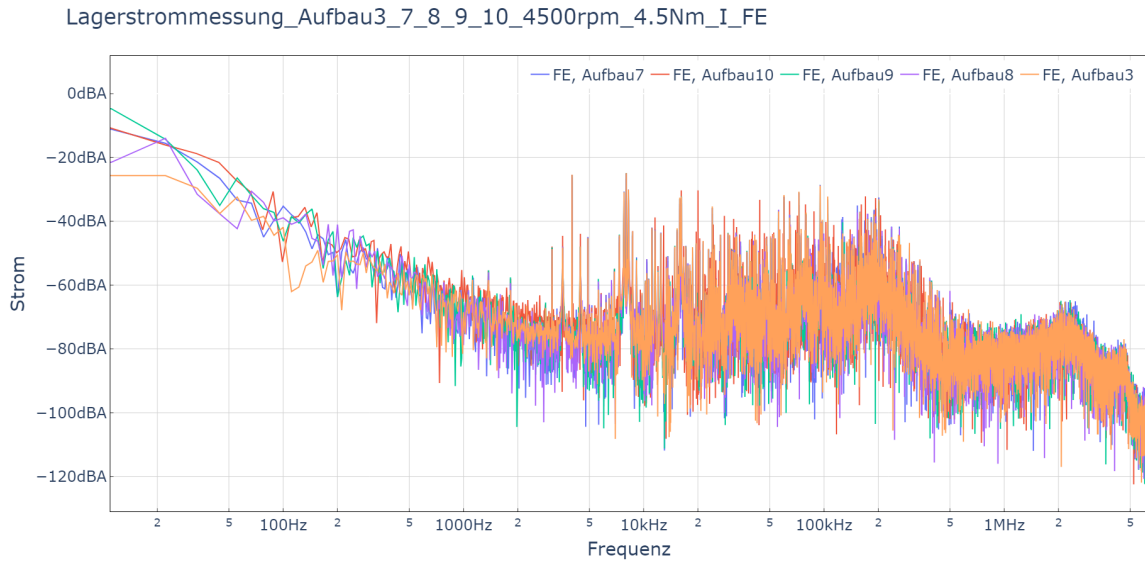


Abbildung 38: Frequenzspektrum des Erdstroms auf dem Potenzial FE - mit und ohne Ableitung des Lagerstroms

Das Frequenzspektrum zeigt die im Kilohertz-Bereich erwarteten Schaltfrequenzen. Bei Frequenzen weit unterhalb des Kilohertz-Bereiches steigt die Eigendämpfung der Stromzange stark an. Die Dämpfungseigenschaften der Stromzange werden zwar vom Auswerteprogramm umgerechnet, stark gedämpft aufgenommene Werte sind dennoch nicht verlässlich. Abbildung 39 zeigt das Frequenzspektrum der Transferimpedanz der Stromzange, auf dessen Basis Messwerte vom Auswerteprogramm umgerechnet werden. Unterhalb des Kilohertz-Bereiches sinkt die logarithmische Transferimpedanz Z_T der Stromzange von $-20 \text{ dB}\Omega$ an linear ab. Das führt nach Formel 21 [7] zu einer stetigen Verstärkung des gemessenen Stroms $I_{\text{mess-umgerechnet}}$ mit fallender Frequenz unterhalb von 1 kHz.

$$I_{\text{mess-umgerechnet}} = \frac{U_{\text{mess}}}{Z_T} \quad (20)$$

$$\curvearrowright 20 \cdot \log_{10} (I_{\text{mess-umgerechnet}}) = 20 \cdot \log_{10} (U_{\text{mess}}) - 20 \cdot \log_{10} (Z_T) \quad (21)$$

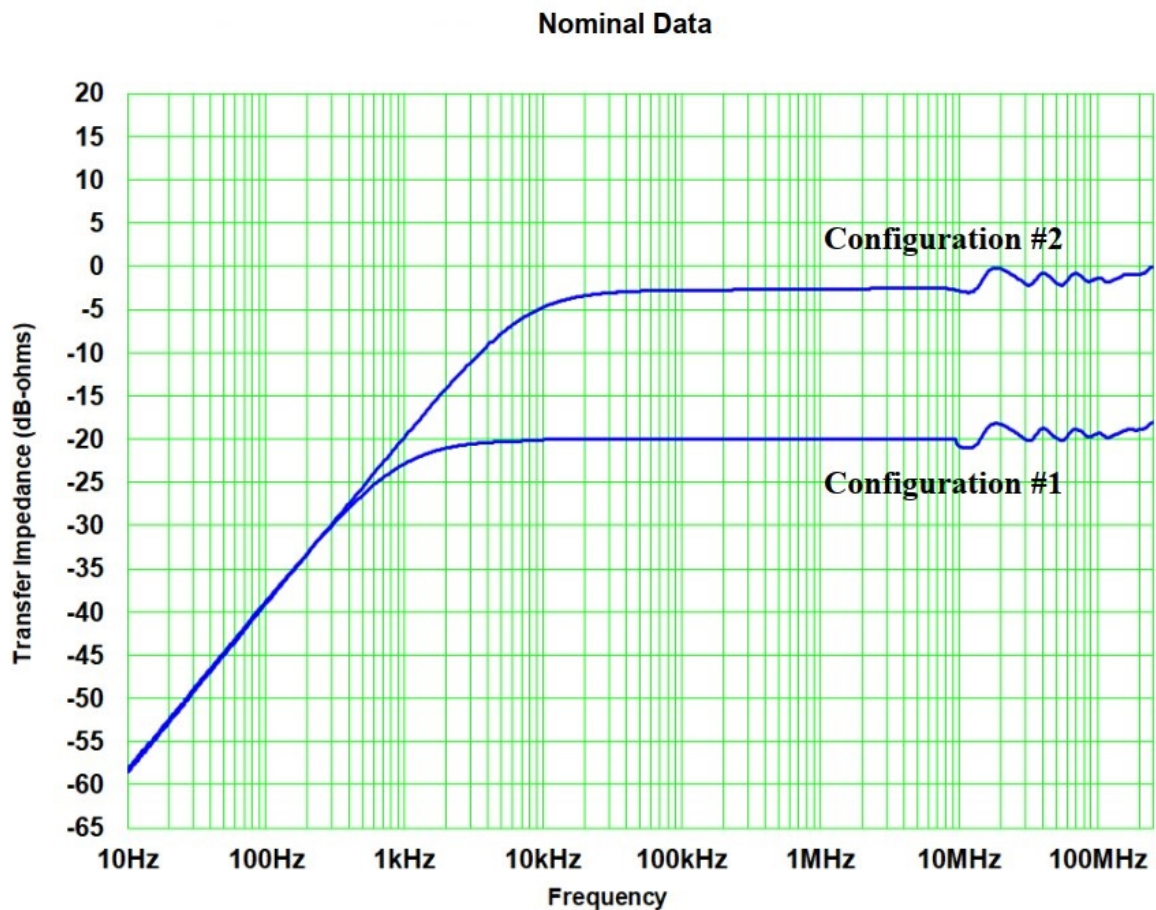


Abbildung 39: Transferimpedanz der verwendeten Stromzange (verwendet in Configuration 2 - Ausschnitt aus dem Datenblatt [4])

Mit steigender Verstärkung der gemessenen Werte wird auch das aufgenommene Rauschen zunehmend verstärkt, was zu einem immer unzuverlässigeren Ergebnis der Messung führt. Daher können die Auswirkungen von Netzfrequenz und Drehfeldfrequenz auch nicht sicher messtechnisch erfasst werden.

6 Ausblick und Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Auftreten von Lagerströmen an einer bestimmten Umrichter-gespeisten elektrischen Maschine untersucht. Nach Betrachtung der im Motor auftretenden parasitären Effekte und Ströme wurden diese durch Messungen praktisch erforscht.

Im Rahmen dieser Messungen wurden systemische sowie Fehler in der Ausführung der Messungen offenbar, sodass im Ergebnis keine klare Aussage zur Funktion der vorgestellten Ableitungsmethoden gegeben werden kann.

Es konnten jedoch wichtige Aussagen über die in Motor und Umrichter parasitär auftretenden Spannungen getroffen werden. Die Berechnung der BVR gibt in diesem Rahmen wichtige Anhaltspunkte für die Bewertung des Gefährdungspotenzials dieser Maschine durch Lagerströme.

Aufgrund der als gesichert annehmbaren Ergebnisse kann daher auf ein eher niedriges Risiko der Lagerschädigung geschlossen werden. In die Bewertung fließt neben der BVR, der homogene Aufbau von Ständer und Läufer sowie die beidseitig isoliert ausgeführten Motorlager der Maschine ein. Darüber hinaus liegt die Schaltfrequenz des Maschinenstromrichters ($f_s = 4 \text{ kHz}$) im niedrigen Kilohertz-Bereich, was sich ebenfalls positiv auf die Höhe der Wellenspannung auswirkt. [6]

Verbesserungspotenzial bietet der untersuchte Prüfstandsaufbau sicherlich im Bereich der Schaltfrequenz des Eingangsstromrichters ($f_s = 8 \text{ kHz}$), welche sich auf Werkseinstellung [10] befindet und, je nach Phasenlage, eine positiv verstärkende Interferenz zur zweiten Harmonischen der Maschinenstromrichter-Schaltfrequenz erzeugen kann.

6.1 Schwächen des verwendeten Messaufbaus

Das verwendete Messprinzip zur Untersuchung des Lagerstromes bietet ein großes Verbesserungspotenzial. Um die sehr feinen Spitzen eines EDM-Stromes sicher messen zu können, ist sowohl eine feine Quantisierung des Oszilloskops als auch eine sehr impedanzarme Messung wichtig. Insbesondere große induktive sowie kapazitive Anteile können zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen. Die Messung in den speziell angelegten Speichen des Lagerschildes birgt an dieser Stelle gewisse Risiken. Zum einen potenziert sich die Fehlerwahrscheinlichkeit bei Nutzung von vier Messwertaufnehmern im Vergleich zu einem einzigen. Zum anderen bietet die große Fläche des Lagerschildes eine hohe Anfälligkeit für die Verunreinigung der Messung durch gestrahlte Emissionen aus dem Inneren des Motors. Das liegt an der parasitären

Kapazität zwischen Lagerschild und Motorwicklung, sowie der parasitären Kapazität zwischen Lagerschild und Läufer, welche Anteile der in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Kapazitäten C_{sf} und C_{rf} sind. Über diesen Fehlerpfad können die im Motor wirksamen Schwingungen auf die Lagerstrommessung übergehen und mit den korrespondierenden, im Lagerstrom wirksamen Frequenzanteilen interferieren. Für eine rechtzeitige Identifizierung von Störsignalen wird daher eine vorab durchgeführte „Nullmessung“ bei ausgeschalteten Motorprüfstand empfohlen.

Eine weitere Störquelle sind die hier verwendeten Rogowskispulen. Diese haben sich als besonders anfällig für elektromagnetische Strahlung nahe der Messung (nachgewiesen in Abbildung 29) erwiesen und bieten zudem keine gute Genauigkeit bei der Aufnahme geringer Stromwerte (siehe Tabelle 2).

Zusätzlich zu den besprochenen Risiken bei Verwendung der Rogowskispulen und dem Prinzip der Speichenmessung besteht ein Risiko im Messaufbau der hier genutzten Wellenerdungsmethoden. Die für Erdungsring und Bürsten verwendeten Erdleitungen waren relativ lang und können im Rahmen der Messungen zu parasitären, die Messung verfälschenden Effekte geführt haben. Für weitergehende Messungen wird daher die Verwendung kürzerer, aus sogenanntem „Hochfrequenz (HF)-Masseband“ bestehender Erdungsleitungen empfohlen.

6.2 Ausblick auf alternative Messmethoden

Hausberg, auf den sich ein großer Teil der in dieser Arbeit verwendeten Theorie bezieht, beschreibt in seinem Buch eine spezielle Methode zur Messung von Lagerströmen. [6]

Demzufolge wird anstelle des direkt durch das Lager abgeleiteten Stroms (wie bei der Speichenmessung), ein „äußerer Lagerstrom“ gemessen. Für die Messung ist die Verwendung eines isolierten Lagers notwendig, welches mit einem Gewindestift im Lageraußenring versehen wird. Zusätzlich wird ein Gewindestift im Lagerschild, nah am ersten Gewindestift, angebracht. Über die Stifte kann nun eine induktivitätsarme, kurze Leiterschleife gezogen werden. Hausberg empfiehlt hier die Nutzung des Schirmgeflechts aus einem BNC-Kabel. In der Leiterschleife wird der „äußere Lagerstrom“ nun über eine Stromzange gemessen. Die verwendete Stromzange muss neben einer ausreichend hohen Grenzfrequenz über eine hohe Empfindlichkeit im unteren Milliampere-Bereich verfügen und eine geringe Abhängigkeit von gestrahlten Emissionen aufweisen. Für die Messung muss nach Hausberg zusätzlich der Schmierspalt des Lagers überbrückt werden. Dazu wird das Wellenpotenzial mit einer Wellenerdungsbürste (oder Erdungsring) abgenommen und mithilfe einer Masseleitung direkt auf den Gewindestift des Lageraußenrings gelegt. Für eine Messung der zirkulieren-

den Lagerströme muss der beschriebene Aufbau an beiden Motorlagern integriert werden.

Im Vorfeld dieser Arbeit wurden die von Hausberg beschriebenen Methoden zugunsten der Speichenmessmethode verworfen, da dieser Messaufbau in der Kürze des Bearbeitungszeitraumes dieser Arbeit nicht durchführbar gewesen ist. Für eine weitergehende Untersuchung von Lagerströmen an diesem Prüfstand wird eine Nutzung der Hausberg'schen Methode jedoch angeraten.

Zusätzlich zur direkten Messung von Lagerströmen kann eine genauere Kenntnis der parasitären Kapazitäten des Prüflingsmotors hilfreich für die Bewertung, beispielsweise der BVR sein. Eine ausführliche Beschreibung für eine Durchführung dieser Messungen bietet Hausberg in seinem Bericht unter Kapitel 4.3 (siehe Quelle [6]). Ein baugleicher Motor, der für diese Messungen in seine Bestandteile zerlegt werden sollte, wurde durch das DLR bestellt. Die Kapazitätsmessung konnte jedoch aus Gründen des zeitlichen Aufwandes jener Messungen nicht mehr in vorliegende Arbeit aufgenommen werden.

6.3 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden wichtige Kenntnisse über die Existenz, Relevanz und den Nachweis von Lagerströmen erlangt. Das hier zusammengetragene Wissen soll im Rahmen eines Forschungsprojektes des DLR im Anschluss an diese Arbeit genutzt und weiter vertieft werden. Dabei können Fragestellungen wie die Betrachtung von Lagerströmen bei Beschleunigungsmanövern und ein Verhalten der Gleichakteigenschaften im Fehlerfall eingehend untersucht werden.

Der Erfolg der Arbeit liegt daher in der Vorbereitung dieses Forschungsprojektes und kann trotz unzureichender Messergebnisse im Rahmen der Aufgabenstellung als erzielt gelten.

Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] *Aegis Lagerschutz Handbuch*. https://www.hsa.de/wp-content/uploads/2021/10/HSA_AEGIS_Lagerschutz_Handbuch_V3_9_Stand_10_2021.pdf. Datenblatt. (besucht am 22.12.2024). 2019.
- [2] Andreas Binder. *Elektrische Maschinen und Antriebe*. 1. Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 978-3-540-71849-9.
- [3] Peter F. Brosch. *Moderne Stromrichterantriebe*. 5. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2008. ISBN: 978-3-8343-3109-0.
- [4] *Fisher Custom communications F-210930-1005-1 Stromzange Datenblatt*. <https://www.fischercc.com/products/5223/>. Datenblatt. (besucht am 22.12.2024). 2024.
- [5] Gerhard Fischerauer Hans-Rolf Tränkler. *Das Ingenieurwissen: Messtechnik*. 1. Auflage. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. ISBN: 978-3-662-44030-8.
- [6] Volkmar Hausberg. "Elektrische Lagerbeanspruchung umrichter gespeister Induktionsmaschinen". In: *Fortschritt-Berichte VDI 21.324* (2002).
- [7] Hubert König. *Das Große Tafelwerk - Formelsammlung für die Sekundarstufen I und II*. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen Verlag, 1999. ISBN: 978-3-060-20760-2.
- [8] *P.E.M CWT-Mini 50HF/015 Rogowskispule Datenblatt*. http://www.pemuk.com/Userfiles/cwtmini50hf/CWT_Mini50HF_DS_Feb_2020.pdf. Datenblatt. (besucht am 18.12.2024). 2020.
- [9] Bastian Rückert. *Direkte Leistungsregelung von Doppeltgespeisten Asynchron-Generatoren mit optimaler Gleichtaktspannungsführung zur Minimierung von Lagerströmen*. 1. Auflage. Aachen: Shaker Verlag, 2014. ISBN: 978-3-8440-2655-9.
- [10] *Siemens Sinamics S120/S150 Listenhandbuch*. <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109739998/sinamics-s120-s150?dti=0&lc=de-DE>. Datenblatt. (besucht am 18.11.2024). 2020.
- [11] *Tektronix MSO68B Oszilloskop Datenblatt*. <https://www.tek.com/de/datasheet/6series-b-mso-mixed-signal-oscilloscope-datasheet>. Datenblatt. (besucht am 22.12.2024). 2021.

- [12] *Textronix THDP0200 Spannungstastkopf Datenblatt*. <https://download.tek.com/datasheet/TMDP-P5200Datasheet-51W1119516.pdf>. **Datenblatt**. (besucht am 22.12.2024). 2024.
- [13] Dieter Schwarzenau Thomas Harriehausen. *Moeller Grundlagen der Elektrotechnik*. 23. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013. ISBN: 978-3-8348-1785-3.
- [14] H.O. Seinsch V. Hausberg. "Wellenspannungen und zirkulierende Lagerströme bei umrichter gespeisten Induktionsmaschinen". In: *Electrical Engineering* 82 (2000), S. 313–326.
- [15] Uwe Maschmayer - Hans Peter - Bernhard Roters - Gerhard Wesker. *Energietechnische Formeln*. 11. Auflage. Troisdorf: Bildungsvlag EINS, 2007. ISBN: 978-3-8237-0621-2.

Anhang

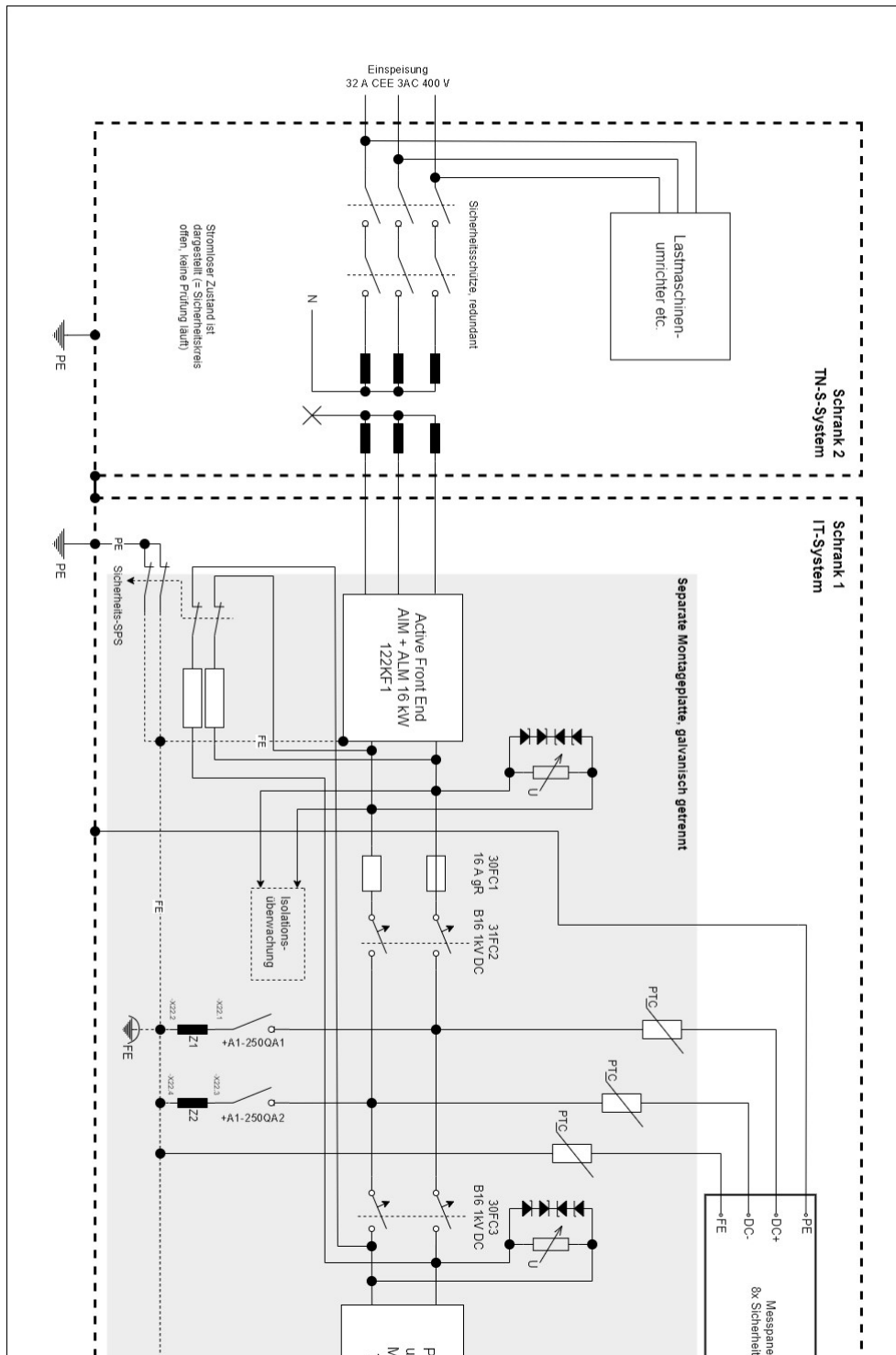


Abbildung A1: Vereinfachter Schaltplan des Motorprüfstandes im DLR - Teil 1 (Quelle: DLR, Braunschweig)

Aufbau1	Kanal Messmittel Messstelle	CH1 Spannung 1500 DC+ / FE	CH2 Spannung 1500 DC- / FE	CH3 Stromzange FE	CH4 Rogowski 015 DC+	CH5 Rogowski 015 DC-	CH6	CH7	CH8
Aufbau2	Kanal Messmittel Messstelle	CH1 Stromzange FE	CH2 Spannung 1500 U / SP	CH3 Spannung 1500 V / SP	CH4 Spannung 1500 W / SP	CH5	CH6	CH7	CH8
Aufbau3	Kanal Messmittel Messstelle	CH1 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 1	CH2 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 2	CH3 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 3	CH4 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 4	CH5 Stromzange FE	CH6	CH7	CH8 Wellenspannungssonde Welle / Sonde
Aufbau7	Kanal Messmittel Messstelle	CH1 Rogowski 015 Erdungsring	CH2 Stromzange FE	CH3	CH4 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 1	CH5 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 2	CH6 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 3	CH7 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 4	CH8
Aufbau8	Kanal Messmittel Messstelle	CH1 Rogowski 015 Kohleburste C60	CH2 Stromzange FE	CH3	CH4 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 1	CH5 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 2	CH6 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 3	CH7 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 4	CH8 Wellenspannungssonde Welle / Sonde
Aufbau9	Kanal Messmittel Messstelle	CH1 Rogowski 015 Kohleburste E43	CH2 Stromzange FE	CH3	CH4 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 1	CH5 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 2	CH6 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 3	CH7 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 4	CH8 Wellenspannungssonde Welle / Sonde
Aufbau10	Kanal Messmittel Messstelle	CH1 Rogowski 015 Kohleburste S15	CH2 Stromzange FE	CH3	CH4 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 1	CH5 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 2	CH6 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 3	CH7 Rogowski 015 Lagerschild Stelle 4	CH8 Wellenspannungssonde Welle / Sonde

Abbildung A3: Aufbauplan der Messungen