

Abschlussbericht des Forschungs-Projektes „Ursachen, Ausbreitungswege und Wechselwirkungen von PE- /PA-Strömen sowie Modellierung von Komponenten“

**Projekt wurde durchgeführt im Rahmen der BMWK-Ausschreibung
„Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare
Energieversorgung“**

Förderkennzeichen: FKZ 03EI6007 A-D

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Laufzeit:

01.07.2019 bis 31.12.2022

Beteiligte Partner:



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT**



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Projektpartner und Autor*innen:

TU Darmstadt (kurz: TU DA) Fachgebiet Leistungselektronik und Antriebsregelung (LEA) Fraunhoferstr. 4 64283 Darmstadt	Prof. Dr.-Ing. Gerd Griepentrog; Andrea Zingariello, M.Sc. Zhaoqing Zhang, M.Sc.	gerd.griepentrog@lea.tu-darmstadt.de +49 6151 16-20580 andrea.zingariello@lea.tu-darmstadt.de +49 6151-16-20596 zhaoqing.zhang@lea.tu-darmstadt.de +49 6151-16-20623
SEW Eurodrive GmbH & Co KG (kurz: SEW) Ernst-Blickle-Str. 42 76646 Bruchsal	Michael Burger, Dipl.-Ing. Thomas Stork, Dipl.-Ing. Benjamin Schuppel, M. Sc.	michael.burger@sew-eurodrive.de +49 7251 75-5510 thomas.stork@sew-eurodrive.de +49 7251 75-5520 benjamin.schuppel@sew-eurodrive.de +49 7251 75-5524
BLOCK Transformatoren- Elektronik GmbH (kurz: Block) Max-Planck-Straße 36-46 27283 Verden	Dr. Dennis Kampen	Dennis.kampen@block.eu
Danfoss (kurz: Danfoss) Carl-Legien-Str. 8 63073 Offenbach	Christian Mieslinger Ralf Merwart Morten Andersen	Christian.Mieslinger@danfoss.com ralf.merwart@danfoss.com morten_andersen@danfoss.com
MAGNETEC GmbH Gesellschaft für Magnet- Technologie (kurz: Magnetec) Industriestr. 7 63505 Langenselbold	Benjamin Kessler	Benjamin.Kessler@magnetec.de
U. I. LAPP GmbH (kurz: LAPP) Schulze-Delitzsch-Str. 25 70565 Stuttgart	Stefan Hilsenbeck, Dipl.-Ing.	stefan.hilsenbeck@lapp.com +49 711 7838-3182

Inhaltverzeichnis:

Inhalt

1	Aufgabenstellung	8
2	Voraussetzungen des Vorhabens	9
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	10
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	10
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
6	Zusammenfassung der Ergebnisse sowie Fortsetzung der Forschungsarbeiten	11
7	Identifikation, Einordnung und Quantifizierung, der Ursachen für PE-/PA Ströme (TU DA)	13
7.1	PE-/PA-Ströme in industriellen Anwendungen	13
7.2	PE-/PA-Strömen im Frequenzumrichter	15
7.2.1	PE-/PA-Ströme des Transformators	15
7.2.2	PE-/PA-Strömen des Gleichrichters	15
7.2.3	PE-/PA-Ströme infolge des Umrichters	16
7.3	PE-/PA -Ströme infolge der kapazitiven Motor-Kopplung	17
7.4	PE-/PA-Ströme infolge Kopplung durch die Leitung	19
8	Durchführung von Feldmessungen zur Bestimmung von PE/PA-Ströme (BLOCK)	21
8.1	Messung 1: Etikettier-Maschine	21
8.2	Messung 2 Vakuumfüllmaschine / Nahrungsmittelindustrie	24
8.3	Messung 3: Stanzmaschine	25
9	Ableitung eines Referenzsystems / Messaufbau zur Darstellung von PE-/PA-Strömen (Danfoss)	27
9.1	Definition des Arbeitspakets Nr. 3	27
9.2	Konzept	27
9.3	Prüfaufbau	28
9.4	Strommessaufbau	29
9.4.1	EPA Leakwatch	29
9.4.2	Oszilloskope mit Stromzange	29
9.4.3	Strommesswandler von Magnetec	30
9.5	Erste Messergebnisse / Optimierungen	30
9.5.1	FU an, Motor aus (keine PWM), kein Trenntrafo	30
9.5.2	FU an, Motor aus (keine PWM), mit Trenn-Trafo	32
9.5.3	Kopplungen zwischen der Primär- und Sekundärseite des Trenn-Trafo	33

9.5.4	Beeinflusst eine aufgerollte Motorleitung die Messergebnisse	33
9.5.5	Messung mit 3 harmonischer Verzerrung am Netz	35
9.6	Referenztestsetup 2.0	36
9.7	Ergebnisse/Erkenntnisse	37
9.7.1	Vergleich der Messungen der PE-/PA -Ströme netzseitig mit 0 Hz Ausgangsfrequenz Ergebnisse von alle Projektteilnehmer.....	37
9.7.2	Vergleich der Messung der PE-/PA-Ströme motorseitig mit 0 Hz Ausgangsfrequenz Ergebnisse von alle Projektteilnehmer.....	38
9.8	Zukunft/Ausblick.....	39
10	Kopplung zwischen benachbarten Leitungen sowie mit Anlagenteilen, Messungen und Optimierung der Leitungsausführung (LAPP).....	40
10.1	Aufbau Motorleitung	40
10.2	Einfluss der Kopplungsarten innerhalb einer Leitung.....	42
10.3	Prototyp	44
10.4	Messkampagne Kapazitäten.....	45
10.5	Messkampagne Induktivitäten	46
10.6	PE-/PA-Ströme - Messaufbau.....	49
10.7	Ergebnisse Messungen PE-/PA-Ströme	51
10.8	Zusammenfassung	52
11	Erstellung von Modellbibliotheken sowie einer Modellierungsumgebung (TU DA).....	54
11.1	Charakterisierung und Modellierung der netzseitigen Komponenten im Zeitbereich	54
11.1.1	3-phasiges Modell	54
11.1.2	Modellierung des Transformators.....	55
11.1.3	Modellierung der Netz-Leitung (ungeschirmte Leitung)	58
11.1.4	Modellierung des EMV Filters.....	59
11.1.5	Modellierung des Gleichrichters	61
11.2	Modellierung des PE-/PA Strom generiert von dem Umrichter bis 150 kHz im Frequenzbereich.....	65
11.2.1	Modellierung des Umrichters.....	66
11.2.2	Modellierung des Motors	68
11.2.3	Modellierung der Leitung	72
11.2.4	Simulation der PE-/PA-Ströme	75
11.3	Ergebnisse.....	77
12	Verbesserung von EMV-Filterschaltungen für Wechselrichter (MAGNETEC).....	78

12.1	Definition Arbeitspaket Nr. 6	78
12.2	Entwurf und Aufbau des Prüfumfelds.....	79
12.3	Messung der PE-/PA-Ströme am Standardfilter	80
12.4	Optimierung des Filters und Messung der PE-/PA-Ströme am modifizierten Filter	81
12.5	EMV Simulation und Messung am modifizierten Filter.....	82
12.6	Weitere Filteroptimierung	83
12.7	Resultate und Ausblick	83
13	Untersuchung von verschiedenen Erdungskonzepten in 24V-Netzen hinsichtlich EMV und Potenzialausgleichströme (SEW).....	85
13.1	Definition des Arbeitspakets Nr. 7.....	85
13.2	Entwurf und Aufbau eines 24 V-Prüfaufbau.....	86
13.2.1	Konzeptentwicklung für den Prüfaufbau	86
13.2.2	Aufbau des Prüfaufbaus	87
13.3	Entwicklung einer Messmethode	88
13.3.1	Störung des Kommunikationsnetzwerks.....	88
13.3.2	Messmethode im Zeit- und Frequenzbereich	88
13.4	Durchführung der Messungen	89
13.4.1	Motorleitungsart.....	89
13.4.2	Potenzialausgleich.....	91
13.4.3	Erdung des 24V-Systems.....	94
13.4.4	Ausgangsdrossel.....	96
13.5	Abgleich mit Wellen- und Leitungstheorie.....	99
13.6	Erstellung der Installationsempfehlungen	101
14	Überführung in die Normungsgremien (TU DA)	102
15	Im Rahmen des Projektes veröffentlichte Ergebnisse	102
16	Widmung	102
17	Literaturverzeichnis	103

Glossar

Schutzleiter (<i>Protective earth</i>) (PE)	Verbindung zum Boden, die dazu bestimmt ist, vor elektrischem Schock im Falle eines Fehlers zu schützen
Potenzialausgleich (PA)	Alle leitfähigen Oberflächen und Teile, die mit einer Person oder einem Tier in Kontakt kommen können, mit dem gleichen elektrischen Potenzial (Spannung) zu verbinden
PE-/PA Ströme	Ströme, die durch Schutzleiter (PE) und Potenzialausgleichsleiter fließen
Gleichtaktspannung (CM-Spannung)	Eine Gleichtaktspannung ist der Mittelwert der drei Umrichter-Außenleiterspannungen gegen Erdpotential
Motorleitung	Spezielle Art von Leitung, die verwendet wird, um Elektromotoren mit Strom zu versorgen. Eine Motorleitung besteht in der Regel aus drei Leistungs-Adern, die für die verschiedenen Außenleiter des Elektromotors benötigt werden und einem Schutzleiter. Über der Verseilung ist meist ein Schirmgeflecht aus Kupferdrähten angebracht.
Leitung	Elektrische Verbindung für den Transport von Energie oder Daten, bestehend aus meist mehreren Leitern oder Adern und einem Mantel für die Verwendung als Geräteanschluss oder die flexible Installation von Maschinen und Anlagen
Kabel	Elektrische Verbindung für den Transport von Energie oder Daten, bestehend aus meist mehreren Adern und einem Mantel, welche meist statisch und in einem Medium verlegt wird (Erde, Wand, unter See).
EMV-Filter	Elektrische Schaltung, die sowohl elektrische Störungen von elektronischen Geräten in das öffentliche Stromversorgungsnetz begrenzt, als auch die elektromagnetische Verträglichkeit gegen Störungen aus dem Stromnetz verbessert, bestehend meist aus Widerständen, Drosseln und Kondensatoren.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AP	Arbeitspaket
CM	Common Mode
DC	Gleichstrom (Direct Current)
DM	Differential Mode
DSO	Digitales Speicher-Oszilloskop
ELMF	Extremely Low Magnetic Field
EMS	Elektromagnetische Störung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
FFT	Fast Fourier Transformation
ZK	Zwischenkreis
FI	Fehlerstrom-Schutzschalter (engl. RCD oder GFCI)
FU	Frequenzumrichter
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
PA	Potenzialausgleichsleiter
PE	Schutzleiter
PE	Polyethylen
PN	Profinet (-Schirm)
PP	Polypropylen
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
PWM	Puls-Weiten-Modulation
RCD	Residual Current Device (vgl. FI)
RCM	Residual Current Monitor (Differenzstrommessgerät)
S	Schirm der Motorleitung
SEW	SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VLT	VLT Automation Drive (Danfoss Umrichter)
2L-WR	Zwei-Level Wechselrichter
3L-WR	Drei-Level Wechselrichter
EP	Erdungspunkt
K	Leitung-Kanal / Leitung-Kanäle
L	(Multifrequenz-) Leiterseil
MDX	MOVIDRIVE-B (SEW Umrichter)
NT	Netzteil
ÖL. CL.	ÖLFLEX CLASSIC (normalkapazitive Motorleitung)
ÖL. SE.	ÖLFLEX SERVO (niederkapazitive Motorleitung)

Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Zur Umsetzung der Klimaschutzziele und der Pläne zur Energieeinsparung ist der Einsatz von leistungselektronischen Systemen unerlässlich. Dies zeigt sich insbesondere im flächendeckenden Einsatz von Frequenzumrichtern zur drehzahlvariablen und damit effizienten Ansteuerung von elektrischen Maschinen für Pumpen, Lüfter, Werkzeugmaschinen und Roboter sowie für den Anschluss von erneuerbaren Energiequellen wie PV-Anlagen oder Windkraftanlagen als auch von elektrischen Speichern.

Als Umrichter werden derzeit vielfach in der Niederspannung Zweilevel-Wechselrichter (2L-WR) eingesetzt, weil diese Geräte das beste Preis-Leistungsverhältnis bieten. 2L-WR haben allerdings die intrinsische Eigenschaft, neben dem eigentlichen Nutzsignal zur Ansteuerung der elektrischen Maschine auch immer ein Gleichtaktsignal mit der PWM-Frequenz von einigen kHz zu erzeugen. Auf der Netzseite des Umrichters werden überwiegend passive Dioden-Gleichrichter eingesetzt, die keine Leistung ins Netz zurückspeisen können. Dioden-Gleichrichter erzeugen ebenfalls Gleichtaktspannungen zwischen Netz und dem DC-Zwischenkreis, die allerdings nur netzfrequent sind (bzw. Oberschwingungen der Netzfrequenz enthalten). Jeder Umrichter – bestehend aus netzseitigem Gleichrichter und maschinenseitigem Wechselrichter - stellt also eine Gleichtaktspannungsquelle dar, die eine Mischung netz- und pulsfrequenter Frequenzanteile enthält.

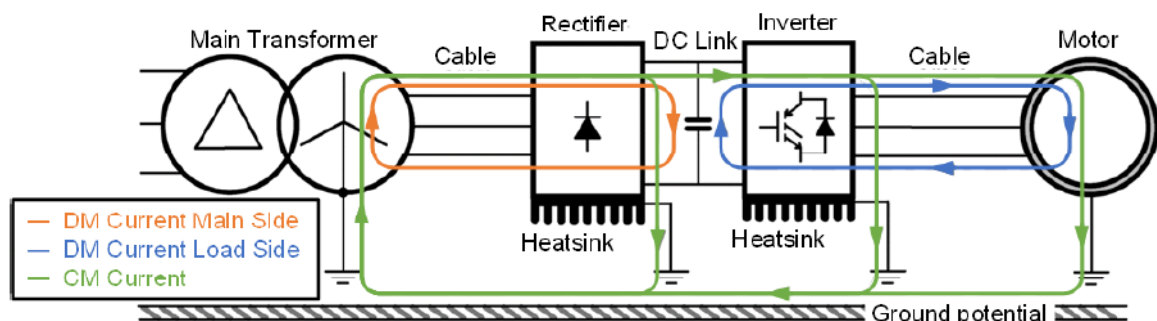


Abbildung 1: Ausbreitungspfade von Gleichtaktströmen in Form von PE-/PA-Strömen [1]

Die Gleichtaktspannungen erzeugen entsprechende Gleichtaktströme, die als Ströme auf PE oder PA-Leitern fließen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Auswirkungen der angeregten PE-/PA-Ströme sind:

- Störung von Kommunikationseinrichtungen
- Erwärmung von Bauelementen in EMV-Filtern
- Störung / Fehlauslösung von Fehlerstromschutzschaltern (RCD's)
- Ströme durch die mechanischen Lager von elektrischen Maschinen und dadurch erhöhter Verschleiß der Wälzlager
- Korrosion

Die Diversität und Unübersichtlichkeit sowohl der Ausbreitungspfade als auch der spektralen Verteilung über einem Frequenzbereich von 150 Hz bis einige 10 kHz macht es bislang

schwierig die Auswirkungen in einer konkreten Anlage abschätzen zu können. So sind die Auswirkungen der PE-/PA-Ströme sowohl beim Design von Anlagen als auch dem Betrieb / der Beseitigung von Fehlern nur schwer einzuschätzen. In der Praxis kommt es immer wieder zu unerwarteten Störungen oder Beeinträchtigungen, die vor Ort nur schwer zu lokalisieren und zu beheben sind.

Das wesentliche Ziel des Projekts PEPA besteht darin, durch Messungen und Simulationsverfahren die Erzeugung von PE/PA-Strömen sowie ihre Ausbreitung und Kopplung systematisch zu beschreiben und Methoden zu entwickeln, um sie gezielt zu beeinflussen und zu reduzieren.

Wesentlich für die Ausbildung von PE/PA-Strömen sind Gleichtaktspannungen und -ströme, die sich über Potenzialausgleichsleitungen, Schirme sowie auch sonstige metallische Strukturen ausbreiten und schließen. Die zu erfassenden Frequenzanteile der PE-/PA-Ströme sind:

- Netzfrequenz und deren Oberschwingungen (bis einige 100 Hz), hervorgerufen durch unsymmetrische Filterschaltungen oder unsymmetrische Netze (Nullkomponente der Spannung), hervorgerufen z.B. durch Diodengleichrichter in Schaltnetzteilen;
- Schaltfrequenz (bis einige 10 kHz), hervorgerufen durch die PWM der beteiligten leistungselektronischen Systeme;
- Hochfrequent (eigentlich einige MHz, aber in diesem Projekt nur bis 150 kHz betrachtet), hervorgerufen durch die Schaltflanken der Leistungshalbleiter;

2 Voraussetzungen des Vorhabens

Die prinzipielle Problematik der durch leistungselektronische Systeme (inkl. deren EMV-Filter) verursachten PE-/PA-Ströme ist den Experten der Leistungselektronik und der Schutztechnik bekannt. Allerdings wurde bisher – im Vergleich zur Bedeutung des Themas – sehr wenig für die Lösung des Problems getan. Bislang gibt es keine systematische Untersuchung der Ursachen, Ausbreitungswege, Bewertung und Erkennung von PE-/PA-Strömen bis 150 kHz. Daher besteht eine erhebliche Sicherheitslücke beim Betrieb von elektrischen Niederspannungsanlagen und es ist zu erwarten, dass der Betrieb von zunehmenden Kommunikationseinrichtungen erheblich durch Störpotenzial beeinträchtigt wird.

In Vorbereitung des Projektes konnte ein Konsortium, bestehend aus Herstellern von Motoren (SEW), Transformatoren und EMV-Filtern (BLOCK), Antriebsumrichtern (Danfoss), EMV-Filtern und magnetischen Kernen (Magnetec) sowie elektrische Leitungen (LAPP) und der Forschungseinrichtung (TU Darmstadt) gebildet werden. Das Ziel des Konsortiums ist es, Verfahren zu entwickeln, die eine kausale und reproduzierbare Lokalisierung der PE-/PA-Ströme ermöglichen. Des Weiteren werden Simulationsmodelle und Berechnungsverfahren bis zu 150 kHz entwickelt und anhand der experimentellen Ergebnisse validiert.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde nach ca. zweijähriger Vorbereitung (inkl. Antragstellung) mit einer Projektlaufzeit von drei Jahren zum 01.08.2019 gestartet. Da zum Ende des Jahres 2020 bereits eine Projektverzögerung absehbar war, wurde eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.12.2022 beantragt und genehmigt.

Das Projekt wurde in 8 verschiedene Arbeitspakete (AP) aufgeteilt und durchgeführt:

- AP1: Identifikation, Einordnung und Quantifizierung der Ursachen für PE-/PA-Ströme (Kap. 7)
- AP2: Durchführung von Feldmessungen zur Bestimmung von PE-Strömen (Kap. 8)
- AP3: Ableitung eines/mehrerer Referenzsystems / Messaufbaus zur Darstellung von PE-/ PA-Strömen (Kap. 9)
- AP4: Kopplung zwischen benachbarten Leitungen sowie mit Anlagenteilen, Messungen und Optimierung der Kabelausführung (Kap. 10)
- AP5: Erstellung von Modellbibliotheken sowie einer Modellierungsumgebung (Kap. 11)
- AP6: Verbesserung von EMV-Filterschaltungen für Wechselrichter (Kap. 12)
- AP7: Untersuchung von verschiedenen Erdungskonzepten in 24V-Netzen hinsichtlich EMV und Potenzialausgleichströmen (Kap. 13)
- AP8: Überführung in die Normungsgremien (Kap. 14)

Im ersten Jahr des Projekts wurden die Ursachen und Ausbreitungspfade von PE-/PA-Strömen systematisch beschrieben und erfasst (→ Kap. 7). Dazu wurden Feldmessungen durchgeführt, um die Beschreibung zu verifizieren (→ Kap. 8). Des Weiteren wurde ein Referenzsystem bestehend aus einem Netztransformator, einem Umrichter sowie einer elektrischen Maschine sowie der zugehörigen Leitungen und Kabel definiert, das vergleichbaren Messungen von PE-/PA-Strömen ermöglicht (→ Kap. 9). Dieses Referenzsystem erlaubt es, verschiedene Messmethoden, Simulationsverfahren und Abhilfemaßnahmen herstellerunabhängig zu vergleichen.

Das Referenzsystem stellt eine wichtige Grundlage für die weiteren Arbeiten im Projekt dar. Mit diesem Referenzsystem ist es möglich, die folgenden Ziele zu erreichen:

- Modellierung der für die PE-/PA-Ströme relevanten Baugruppen jeweils auf der Netzseite (→ siehe Kap. 11.1), und Motorseite (→ siehe Kap. 11.2) vom Umrichter, hierzu Vermessung der Kopplungseffekte von Leitungen jeweils untereinander und mit Erdpotenzial (→ Kap. 10) sowie die Entkopplung von PE-/PA-Strömen auf Kommunikationsleitungen (→ Kap. 13)
- Analyse von Maßnahmen zur Reduzierung von PE-/PA-Strömen; Verbesserung von EMV-Filterschaltungen (→ Kap. 12)
- Bekanntmachung der Ergebnisse in den Normungsgremien (→ Kap.14)

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

In den letzten Jahren werden entsprechend DIN VDE 0100-530 in Netzen mit Wechselrichtern vermehrt RCDs des Typs B eingesetzt, welche Fehlerströme von DC (0 Hz)

bis 100 kHz detektieren und bei Überschreitung eines frequenzabhängigen Gesamt-Effektivwertes des Fehlerstromes (bei 50 Hz: 30 mA Personenschutz, 300 mA Brandschutz) auslösen. Mit Differenzstrommessgeräten (RCM) erfolgt ebenfalls eine Messung und Überwachung von Strömen auf PE-/PA-Leitern an verschiedenen Stellen in der Anlage, um beispielsweise schleichende Isolationsfehler detektieren zu können. Üblicherweise messen RCMs allerdings nur bis zu einer Frequenz von 2...3 kHz, somit keine Ströme bei Frequenzen, wie sie durch heute übliche Schaltfrequenzen von 4 kHz und höher erzeugt werden. Beide Schutzorgane, RCD und RCM, sind nach Stand der Technik nicht in der Lage zwischen Fehlerströmen und betriebsmäßigen Funktionsströmen zu unterscheiden.

Des Weiteren ist mit einem in der Einspeisung einer Anlage installierten RCD auch nicht garantiert, dass in der Anlage keine PE-/PA-Ströme (unbemerkt) zirkulieren, die eine Gefährdung darstellen.

Daneben hat sich bereits ein Markt für PE-/PA-Stromdiagnosegeräte (Bsp. „LEAKWATCH“ der Fa. EPA) und sogar für aktive Kompensation von PE-/PA-Strömen entwickelt („LEAKCOMP“)

Innerhalb der STROMNETZE-Forschungsinitiative der Bunderegierung wurden bzw. werden angrenzende Themen behandelt. Beispielfhaft genannt seien die Projekte:

- „VeNiFre150“ zur Untersuchungen von Netzstörungen im Haushalt bis 150 kHz
- „NetzHarmonie“ zur Untersuchung der Ausbreitung von Oberschwingungen im Netz
- „NEDO“ zur Untersuchung von neuen Schutzkonzepten in stromrichterdominierten Netzen inkl. von Erdschlussströmen
- „DC-INDUSTRIE“ zur Etablierung von DC Netzen im industriellen Umfeld

Im Rahmen des EFRE-Projektes 2001.088 sind in den Jahren 2001 bis 2004 umfangreiche Labor-Messungen der PE-Ströme an Frequenzumrichtern durchgeführt und dokumentiert worden. Des Weiteren wurden „PE-/PA-Stromarme“ Filter sowie eine Kompensationseinheit für 150 Hz-Ströme entwickelt. Diese Untersuchungen sind eher phänomenologischer Natur erlauben daher nur begrenzt systematisierte Rückschlüsse auf andere Anlagenkonfigurationen.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für das Projekt hat die EPA GmbH bei der Bewertung der PE-/PA-Ströme kooperiert. EPA verfügt über verschiedene Geräte zur Abschätzung und Kompensation der PE-PA-Ströme. Zur Reduzierung der PE-/PA-Ströme wurde die PE-/PA Stromkompensation LEAKCOMP HP eingesetzt.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse sowie Fortsetzung der Forschungsarbeiten

In diesem Projekt wurde erstmals ein systematisches Verständnis der PE-/PA-Ströme erzielt. Ein Referenzsystem zur Bewertung des PE-/ PA-Stromes wurde entworfen, aufgebaut und vermessen. Dieses Referenzsystem ermöglicht die Abschätzung der PE-/PA-Ströme in

verschiedenen Umgebungen. Der PE-/PA-Ströme wurden modelliert und die Auswirkungen jeder Komponente wurden getestet.

Es wurde ein Verfahren zur Bewertung der kapazitiven und induktiven Kopplung der Kabel entwickelt. Darüber hinaus wurde die Wirkung verschiedener Topologien von Filtern untersucht. Im Ergebnis des Projektes wurde eine neue niederkapazitive Leitungstopologie entwickelt und getestet.

Der motorseitige PE-/PA-Strom wurde im Frequenzbereich simuliert. Jede relevante Komponente im Referenzsystem wurde modelliert, um den PE-/PA-Strom zu bewerten. Die Simulation kann einfach mit verschiedenen Motoren und Leitungen angepasst werden.

Der netzseitige PE-/PA-Strom wurde im Zeitbereich simuliert. Ein mathematisches Modell zur Bewertung des PE-/PA-Stroms mit unterschiedlichen Oberschwingungen im Netz wurde entwickelt. Zur Reduzierung des PE-/PA-Stroms auf der Netzseite wurde eine neue EMV-Filtertopologie entwickelt.

Es wurden unterschiedliche Erdverbindungen getestet, um zu bewerten, wie sich der PE-/PA-Strom auf benachbarte Systeme auswirkt.

Das folgende Ergebnis wurde in einer Präsentation zusammengefasst, die auf den Normungsgremien K226 und K623 der DKE vorgestellt wurde.

Leider konnten nicht alle erwarteten Ergebnisse erzielt werden. Tatsächlich ist das Referenzsystem nicht in der Lage, die netzseitigen PE/PA-Ströme vollständig von den Oberschwingungen der Netzspannung zu entkoppeln, die an jedem Laborstandort naturgemäß unterschiedlich sind. Eine entsprechende Filterschaltung würde sehr groß ausfallen und ist daher für die praktische Entwicklung unbrauchbar. Allerdings können die Oberschwingungen der Netzspannung bewertet werden und deren Wirkung auf den Referenzaufbau zurückgerechnet werden.

Die 6-monatige kostenneutrale Verlängerung ermöglichte es, das Design und die Simulation einer neuen Filtertopologie abzuschließen und die neue Topologie innerhalb der Simulationsumgebung zu evaluieren.

Folgende wissenschaftlichen Ziele sollten in weiterführenden Projekten verfolgt werden:

- Untersuchung der PE-/PA-Ströme in IT- und TT-Netzen.
 - Der PE-/PA-Strom wurde im Projekt nur in einem TN-Netz untersucht. Die Analyse des Ausbreitungsweges mit IT- und TT-Netz muss durchgeführt werden. Daher muss das Referenzsystem für unterschiedliche Netztopologien erweitert werden.
- Beschreibung des Isolationsfehlers und Beschreibung der Unterschiede zwischen Isolationsfehlern und PE-/PA-Strömen.
 - Die Analyse des Isolationsfehlers muss durchgeführt werden und eine Analyse im Frequenzbereich muss durchgeführt werden, um zu bewerten, ob die Differenz zwischen PE-/PA-Strömen und dem Isolationsfehler quantifiziert werden kann

- Analyse von PE-/PA-Strom mit anderen leistungselektronischen Schaltgeräten
 - Analyse des PE-/PA-Stroms mit aktivem Einspeisenumrichter statt passivem Gleichrichter: Das Frequenzspektrum mit aktivem Einspeisenumrichter ist anders als bei einem passiven Dioden-Gleichrichter und erfordert eine spezifische Untersuchung
 - Analyse von PE-/PA-Strömen mit 3-Level-Wechselrichtertopologien (3L-WR): Die 3L-Topologien müssen modelliert werden, um die PE-/PA-Ströme darzustellen, da diese neuen Topologien relevanter werden.
- Analyse der Ausbreitungswege von PE-/PA-Strömen in einem System mit mehreren Umrichtern und Motoren:
 - In der industriellen Praxis sind meist mehrere Antriebssysteme verbaut und werden parallel betrieben. Die Ausbreitungswege bei mehreren Antriebssystemen sind heterogener, da jedes System ggf. eine andere Impedanz zu Erdpotential aufweist, was zu interferierenden PE/PA-Strömen führen kann mit gegenseitigen Beeinflussungen.
- Bewertung von Hybridleitungen "One-Cable-solutions":
 - Die Analyse des PE-/PA-Stroms innerhalb von Leitungen mit kombinierter Energie- und Datenübertragungselementen muss ebenfalls durchgeführt werden, da sie für industrielle Anwendungen relevant sind.
- Erstellung und Veröffentlichung eines „Application-Guide“ und einer Interpretationshilfe zu PE-/PA-Strömen

Die Ergebnisse der beiden Projekte sollen vereint werden und den Normierungsgremien sowie den Fachgesellschaften präsentiert werden, um die Erkenntnisse der Fachwelt zur Verfügung zu stellen.

Eingehende Darstellung

7 Identifikation, Einordnung und Quantifizierung, der Ursachen für PE-/PA Ströme (TU DA)

7.1 PE-/PA-Ströme in industriellen Anwendungen

Wechselrichter bieten in industriellen Anwendungen eine kosteneffiziente und energieeffiziente Möglichkeit, Gleichstrom in Wechselstrom umzuwandeln. In Produktionsanlagen werden oft viele Wechselrichter gleichzeitig eingesetzt, um eine Vielzahl von Geräten und Anlagen mit Strom zu versorgen.

Wechselrichter haben den Nachteil, dass sie eine Gleichtaktspannung erzeugen, die dazu führen kann, dass ein unbeabsichtigter Strom durch die Schutz Erde und den Potenzialausgleich fließt. Die große Anzahl von Wechselrichtern kann daher aufgrund der Ausbreitung dieses unerwarteten Stromes, der Schutzvorrichtungen auslösen kann, eine gewisse Herausforderung darstellen.

In der Leistungselektronik bezieht sich der PE-/PA Strom auf den Strom, der durch die Potenzialanbindung und Schutzleiteranschlüsse eines elektrischen Systems fließt. Diese Art

von Strom ist das Ergebnis von Asymmetrien in der Spannung oder die Erdpotenzials des Systems, die unerwünschtes elektrisches Rauschen verursachen und etwaige Sicherheitsrisiken darstellen können. Die Potenzialbindung ist die Praxis, alle freiliegenden Metallteile eines elektrischen Systems mit einem gemeinsamen Potenzial zu verbinden, das in der Regel der Schutzleiter ist. Dies geschieht, um elektrische Schockgefahren zu vermeiden und das Potenzial für elektromagnetische Störungen (EMV) zwischen dem System und seiner Umgebung zu begrenzen. Der Schutzleiter ist ein separater Leiter, der an einem einzigen Punkt mit der Erde verbunden ist und einen niederohmigen Pfad für Fehlerströme bereitstellt, die im Falle eines Isolationsfehlers im System fließen. Er ist unerlässlich, um die Sicherheit der Benutzer des Systems zu gewährleisten und Schäden an Geräten zu vermeiden. Wenn jedoch Spannungs- oder Erdpotenzialungleichgewichte im System vorliegen, kann ein PE-/PA-Strom durch die Potenzialbindung und Schutzleiteranschlüsse fließen, was eine Reihe von Problemen verursachen kann, wie z.B. Störungen empfindlicher Geräte, elektromagnetische Verträglichkeitsprobleme und erhöhtes Risiko von elektrischen Schockgefahren. Um den PE-/PA-Strom zu reduzieren, müssen Entwickler und Anlagen-Errichter sicherstellen, dass ihre Systeme ordnungsgemäß geerdet sind, um potenzielle Unterschiede zwischen verschiedenen Teilen des Systems zu reduzieren. Auch können geeignete Abschirm- und Filtertechniken eingesetzt werden, um die Auswirkungen der PE-/PA Strömen zu begrenzen. Darüber hinaus können regelmäßige Tests und Wartungen der Erdungs- und Potenzialausgleichsanschlüsse des Systems dazu beitragen, dass diese im Laufe der Zeit wirksam und sicher bleiben. Die Schwierigkeit, die PE-/PA Strömen im System zu quantifizieren, ist oft eine Herausforderung für das Design der Komponente in einer industriellen Anwendung. Bei der Wartung des Systems können auch Probleme im Zusammenhang mit dem PE-/PA Strom auftreten; die Problemlösung ist oft zeitaufwendig und teuer.

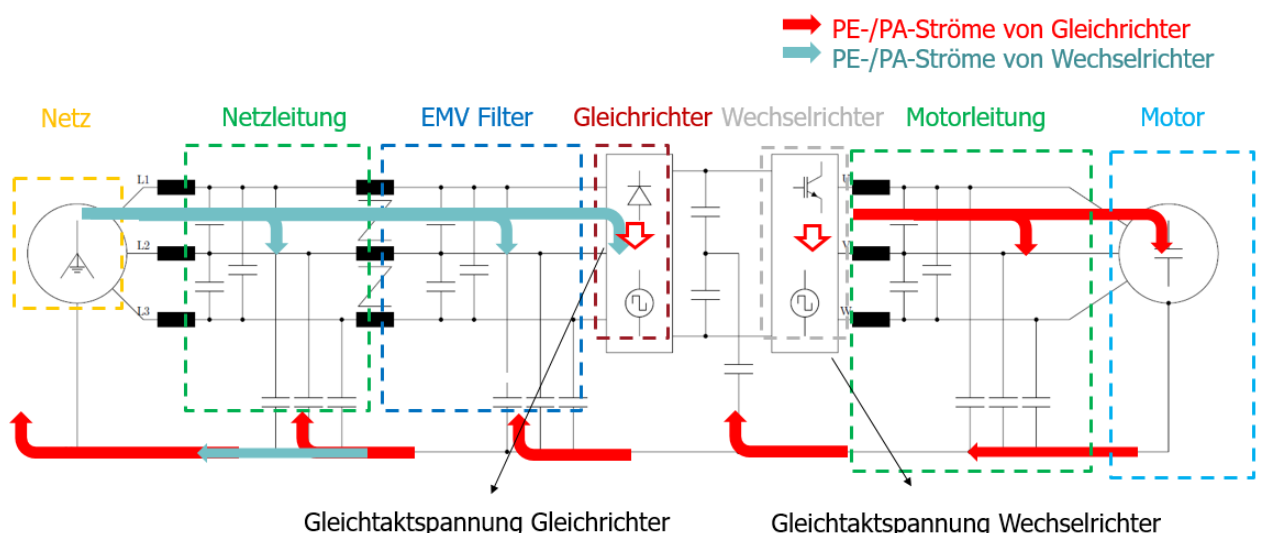


Abbildung 2: Darstellung eines typischen elektrischen Antriebs

Der Frequenzumrichter stellt zwei Gleichtaktspannungsquellen bereit, den netzseitigen Gleichrichter und den motorseitigen Wechselrichter. Die in Summe durch den Frequenzumrichter erzeugte Gleichtaktspannung weist einen weiten Spektralbereich auf und führt in Verbindung mit parasitäre Komponenten im System, aber auch mit absichtlich

verbauten Y-Kondensatoren, zu PE/PA-Strömen. So bilden z.B. die kapazitiven und induktiven Kopplungen der drei Außenleiter der Motorwicklungen und der Motorkabels einen Pfad für PE/PA-Ströme.

Wie erwähnt, erzeugt der Umrichter einen breiten Frequenzbereich an Gleichtaktspannungen:

- Frequenzkomponenten, die der Gleichtaktspannung aufgrund des Gleichrichters und des DC-Zwischenkreises zugeordnet sind (150 Hz, 450 Hz, 750 Hz und die höherwertigen Harmonischen).
- Frequenzkomponenten, die der harmonischen Komponente der Stromversorgung zugeordnet sind (100 Hz, 200 Hz und weiteren Harmonischen).
- Komponenten im Zusammenhang mit der Schaltfrequenz der Leistungselektronik, die durch die PWM-Modulation erzeugt wird (typisch größer als 2 kHz mit zusätzlichen Harmonischen)

7.2 PE-/PA-Strömen im Frequenzumrichter

7.2.1 PE-/PA-Ströme des Transformators

Der Transformator stellt eine galvanische Trennung zwischen der Netzseite und der Lastseite her. Dennoch bildet der Transformator einen Ausbereitungspfad, der durch eine kapazitive Kopplung zwischen Primär- und Sekundärseite dominiert wird. Diese kapazitive Kopplung verhindert, dass PE/PA-Ströme durch Transformatoren unterbunden werden.

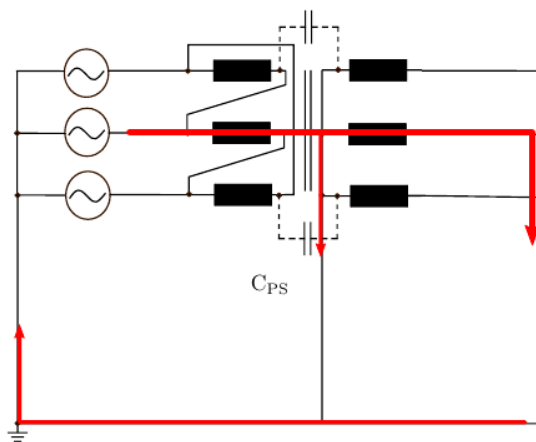


Abbildung 3: Ausbereitungspfad durch Transformer

Daneben besteht eine nennenswerte kapazitive Kopplung zwischen den direkt auf dem Schenkel montierten Unterspannungswicklungen und dem Eisenkreis des Transformators, die aber wegen des meist geerdeten Sternpunktes im TN-C-S-System nicht relevant ist.

7.2.2 PE-/PA-Strömen des Gleichrichters

Der Gleichrichter ist ein nichtlineares System, welches Gleichtaktspannungen auch dann erzeugt, wenn das Netz solche nicht aufweist. Es werden dritte Oberschwingungen und ihr

Vielfache erzeugt. In Abbildung 4 ist dargestellt, dass neben den Oberschwingungen des Netzes (rote Pfeile) dritte Oberschwingungen und deren Vielfache (schwarze Pfeile) durch den Gleichrichter erzeugt werden.

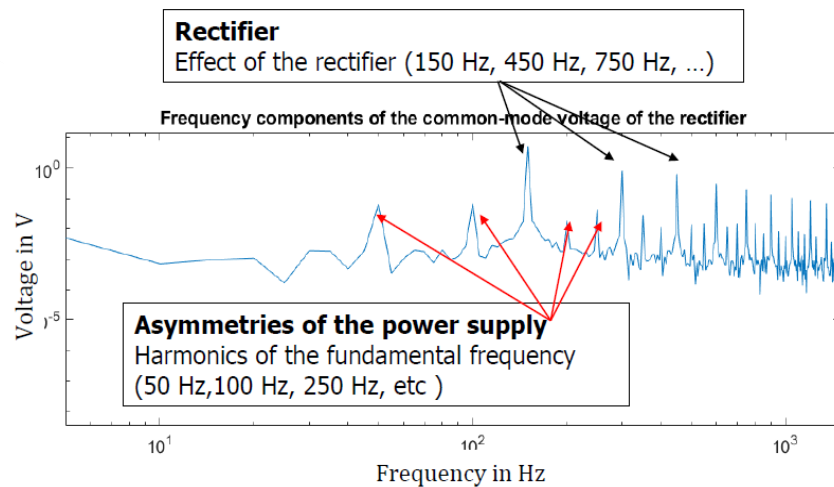


Abbildung 4: Frequenzspektrum der Gleichtaktspannung

PE-/PA-Ströme können aufgrund des kapazitiven Verhaltens über den internen EMV-Filter zurück zum Sternpunkt des Transformators fließen, wie in Abbildung 5 dargestellt.

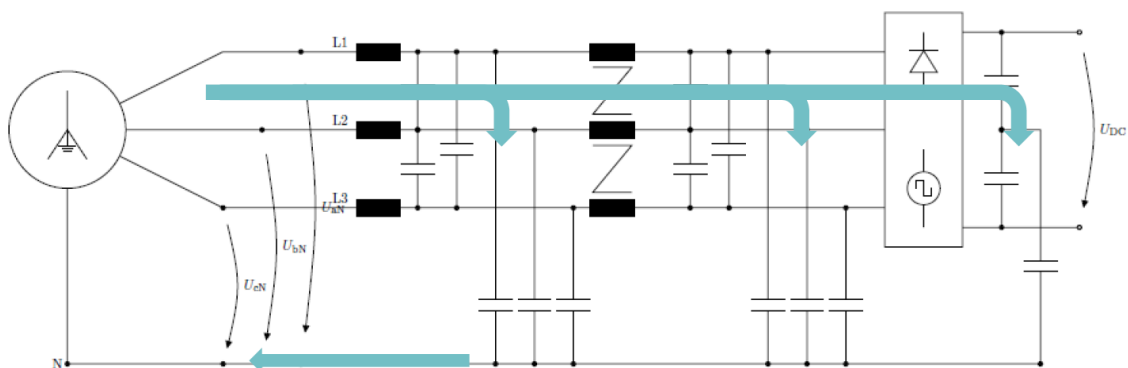


Abbildung 5: Störung und Ausbreitungspfade des PE-/PA Stromes an der Netzseite

7.2.3 PE-/PA-Ströme infolge des Umrichters

Der Umrichter fügt Gleichtaktspannungskomponenten bei der Schaltfrequenz und ihren Oberschwingungen hinzu. Die Gleichtaktspannung wird durch die folgende Gleichung berechnet:

$$U_{cm,inv} = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} \quad (1)$$

U_a , U_b und U_c sind die Spannungen zwischen Phase und Erde.

Das Verhalten der Gleichtaktspannung im Frequenzbereich ist im folgenden Bild bei einer Schaltfrequenz von 5 kHz dargestellt.

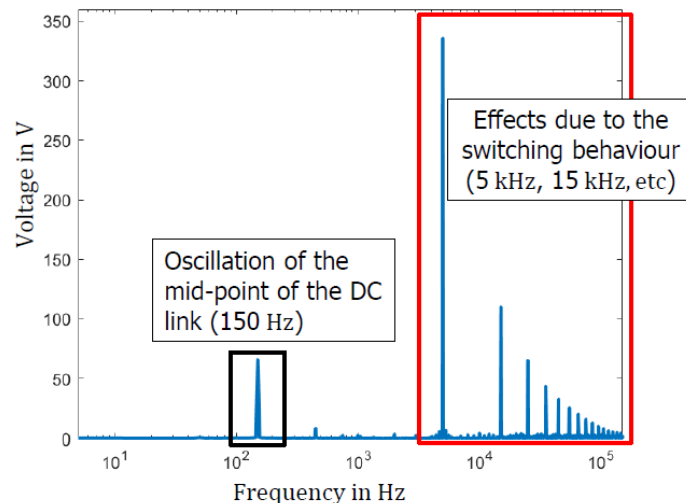


Abbildung 6: Gleichtaktspannung erzeugt von dem Umrichter

7.3 PE-/PA -Ströme infolge der kapazitiven Motor-Kopplung

Mit der Einführung von Wide Bandgap-Leistungshalbleitern haben sich Schaltfrequenz und Spannungssteilheit du/dt erhöht.

Die Gleichtaktspannung des Wechselrichters kann einen Strom erzeugen, der wegen des kapazitiven Verhaltens des Motors nach Erde fließt. Für taktfrequente PE-/PA Ströme ist die Erdkapazität $C_{g1,2,...,n}$ (Kapazität der Wicklungen gegen Statorblech / Gehäuse) des Motors dominant.

Des Weiteren existieren schwächere Koppelpfade über den Luftspalt zum Rotor sowie im Weiteren entweder entlang der Motorwelle über Erdungsbürsten oder Getriebe oder über die Wälzlager (Lagerströme!) zurück zu Erdpotenzial. Das System der parasitären Kapazitäten Motors ist im folgenden elektrischen Modell nach Abbildung 7 dargestellt [2]. Die möglichen Strompfade für die Gleichtaktspannung können sich im Frequenzbereich extrem ändern.

Wie in [3] angegeben, kann der mit den Gleichtaktspannungen verbundene Lagerstrom analysiert werden, indem die folgenden fünf Impedanzen betrachtet werden, die in der vorherigen Abbildung 7 dargestellt wurden:

- Statorwicklung zu Statoreisen ($C_{g1,2,...,n}$): Diese Kapazität ist den Wicklungen der Phase und dem normalerweise geerdeten Motorgehäuse zugeordnet.
- Statorwicklung zu Rotoreisen ($C_{r1,2,...,n}$): Kapazität proportional zum Luftspalt zwischen Stator und Rotor.
- Spulenkapazität ($C_{w1,w2}$): Diese Impedanz besteht aus der infinitesimalen Impedanz jeder Spule und kann durch eine Kaskade von Induktivitäten, Widerständen und Kapazitäten dargestellt werden.
- Rotor-Rahmen-Kapazität (C_{sr}): Diese erste Kapazität wird durch die Oberfläche des Rotors und die Oberfläche des Statorrahmens definiert.

- Lagerstromimpedanz (Z_{bearings}): Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, liegt die Lagerimpedanz parallel zur Kapazität C_{sr} . Die Lagerimpedanz ist dem Schmierfilm des Lagers zugeordnet. Wenn der Lagerfilm intakt ist, wirkt er als Kapazität. Sein Verhalten kann auch resistiv sein und ist stark nichtlinear, da sich sein Wert mit der Drehzahl des Motors und der Temperatur des Schmiermaterials ändert [4].

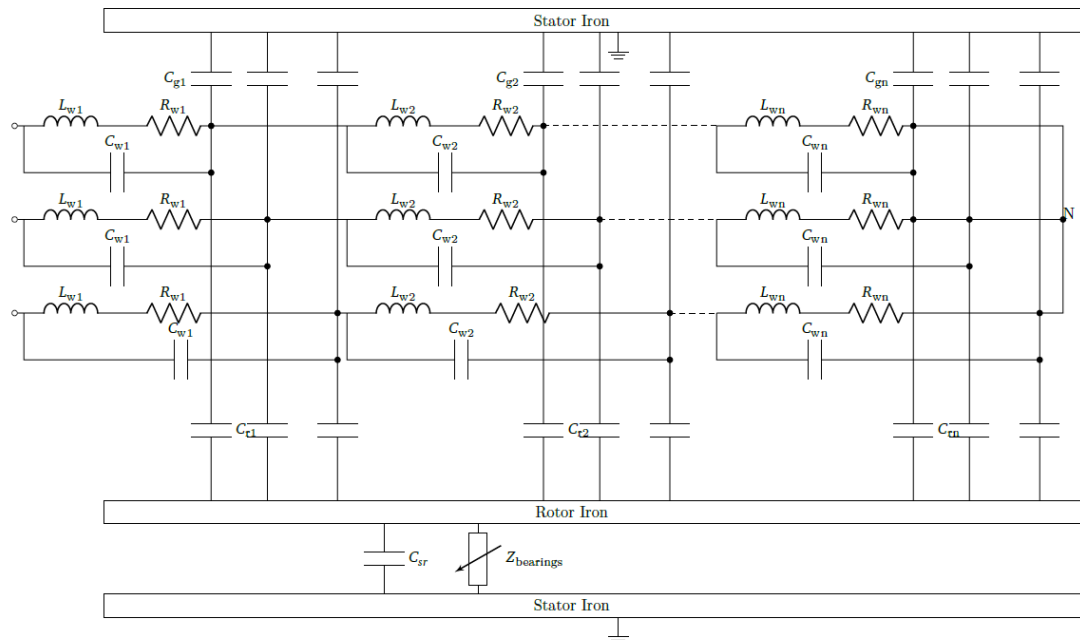


Abbildung 7: Elektrisches Ersatzschaltbild des Motors

Die unterschiedlichen Ströme, die mit einer schnellen Änderung der Gleichtaktspannung im Motor verbunden sind, können nach [3] [4] unterteilt werden. Der PE-/PA Strom am Motor kann danach in zwei Unterkategorien eingeteilt werden:

- Gleichtaktstrom / PE/PA-Strom über die Wälzlager
 - Kapazitiver Lagerstrom infolge Änderung der Lagerspannung. Bei hoher Rotationsgeschwindigkeit des Rotors und bei niedriger Temperatur verhält sich das Lager wie eine Kapazität und der Strom wird bestimmt durch:

$$i_b = C_b \cdot \frac{du}{dt}$$
 - Entladungsströme (Electric Discharge Machining / EDM): Die Spannung des Lagers folgt der Spannung des Stators. Wenn die Spannung am Rotor eine dem Schmierfilm zugeordnete Durchbruchspannung überschreitet, findet ein Entladestrom vom Rotor zur Erde statt.
- Zirkular-Lagerströme
 - Diese Ströme werden durch die induzierte Wellenspannung angeregt und fließen kreisförmig in der elektrischen Maschine und haben daher keinen Einfluss auf die PE/PA-Ströme. Die Frequenz dieser Ströme liegt meist bei höheren Frequenzen [5] [6].

Bei niedrigeren Frequenzen kann der Strom durch die gesamte Wicklung fließen, bei steigender Frequenz fließt der Gleichtaktstrom nur durch wenige Windungen am Beginn

einer Wicklung und wird direkt am Stator abgeleitet. Daher ist bei höheren Frequenzen eine Resonanz der Gleichtaktimpedanz zu sehen.

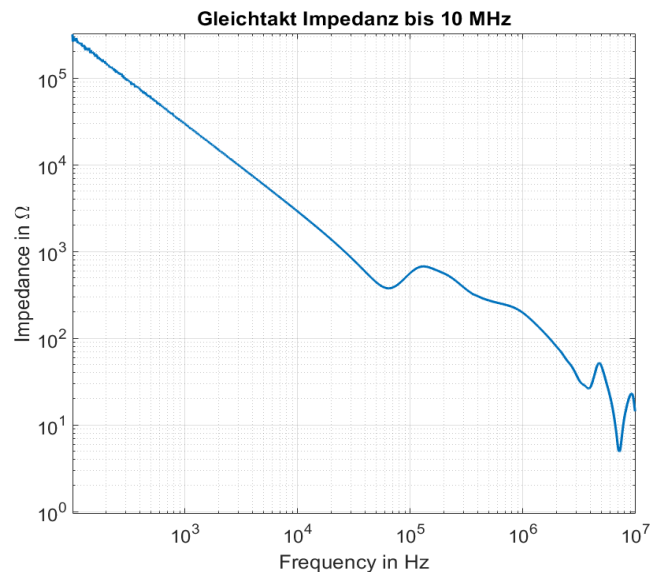


Abbildung 8: Gleichtaktimpedanz des Motors

Dieses Verhalten zeigt sich bei der Messung der Gleichtaktimpedanz des Motors. Tatsächlich ist das Verhalten der Impedanz bei niedriger Frequenz meist kapazitiv, wie in Abbildung 8 zu sehen ist.

7.4 PE-/PA-Ströme infolge Kopplung durch die Leitung

Für die PE-/PA-Ströme spielt die Verbindung zwischen Motor und Umrichter eine relevante Rolle. Tatsächlich wird die Leitungsverbindung zwischen Motor und Umrichter kontinuierlich durch Spannungsumschaltungen stimuliert, die durch eine sehr schnelle Anstiegs- und Abfallzeit und eine hohe Schaltfrequenz gekennzeichnet sind. Daher sind die erzeugten Oberschwingungen selbst bei höherer Frequenz durch einen hohen Amplitudenwert gekennzeichnet. Die unterschiedliche Verbindung zur Erde hat einen großen Einfluss auf die damit verbundene leitungsgebundene Emissionen [4].

Darüber hinaus bietet der Schirm von geschirmten Leitungen einen niederimpedanten und somit zu bevorzugenden Pfad für die leitungsgebundenen PE/PA-Ströme. Der Querschnitt einer geschirmten Leitung ist in Abbildung 9 zu sehen (der Neutraleiter ist in geschirmten Motorkabeln meist nicht vorhanden).

Aus Sicht des PE-/PA-Stroms besteht eine kapazitive Kopplung zwischen den internen Adern sowie dem PE-Leiter einerseits und dem geerdeten Schirm andererseits in Form eines Kapazitätsbelags. Die Erregung des Gleichtakts kann durch den Motor oder durch die parasitären Kapazitäten zwischen der Abschirmung und den Außenleiteradern zur Erde fließen.

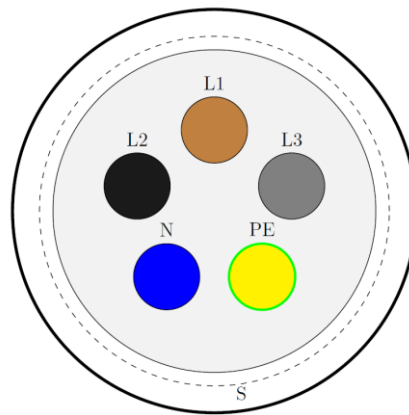


Abbildung 9: Querschnitt der Leitung

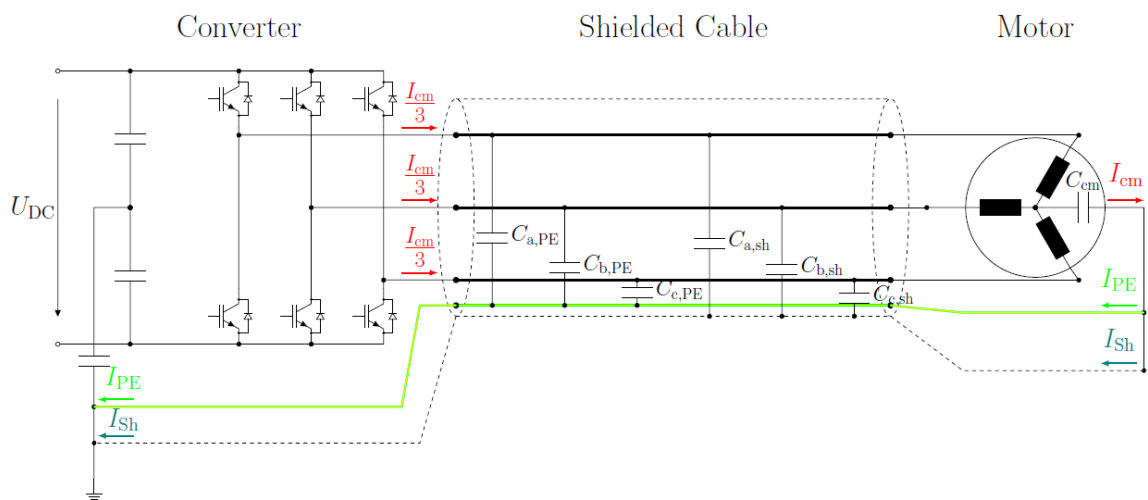


Abbildung 10: Ausbreitungspfade in dem System und parasitären Elementen

Die Leitungslänge erhöht die Kapazitäten, was als niedrigere Impedanz und einen höheren Stromfluss bewirkt. Die zuvor erläuterte Streukapazität der Abschirmung fügt einen Weg für den Gleichtaktstrom hinzu. Die Leitung zwischen Motor und Umrichter besteht normalerweise aus nur vier Adern, da der Neutraleiter aufgrund von der symmetrischen Last am Sternpunkt nicht erforderlich ist. Ein zusätzlicher Pfad wird normalerweise durch den neutralen Sternpunkt gegeben. Der Ausbreitungsweg innerhalb der Leitung ist in Abbildung 10 dargestellt. [4] [6]

8 Durchführung von Feldmessungen zur Bestimmung von PE/PA-Ströme (BLOCK)

Mit den Messungen wurde ein systematischer Überblick über PE-/PA-Ströme in einer kompletten Anlage inkl. deren Ausbreitungswege, Ursachen und Erkennung und Verarbeitung in RCMs und RCDs gewonnen. Die Messungen sind mit Hilfe von Labormesstechnik (breitbandige Stromwandler, DSO) vorgenommen worden. Messungen wurden an mehreren „typischen“ Anlagen vorgenommen.

Beispielhaft sind folgende Anlagen und deren Messungen gezeigt.

8.1 Messung 1: Etikettier-Maschine

Aufgabenstellung:

- Prüfung PE-/PA-Ströme mit zusätzlichem EMI-Filter
- Prüfung der Wirkung eines aktiven PE-/PA-Stromkompensationsgerätes „EPA Leakcomp“

Anforderungen:

- RCD 30 mA → Keine Fehlauslösung im Ein- / Ausschaltmoment
- Leitungsgebundene Störaussendungen EN 55011 Kl. B

Aufbau:

- Ursprungszustand ohne externes EMV-Filter
- 2 Frequenzumrichter: Cy vom Zwischenkreis nicht separat trennbar

Eingesetzte Filter:



Abbildung 11: EPA Leakcomp (Quelle: www.epa.de)



Abbildung 12: BLOCK HFE EMI-Filter

Fotos vom Messaufbau:

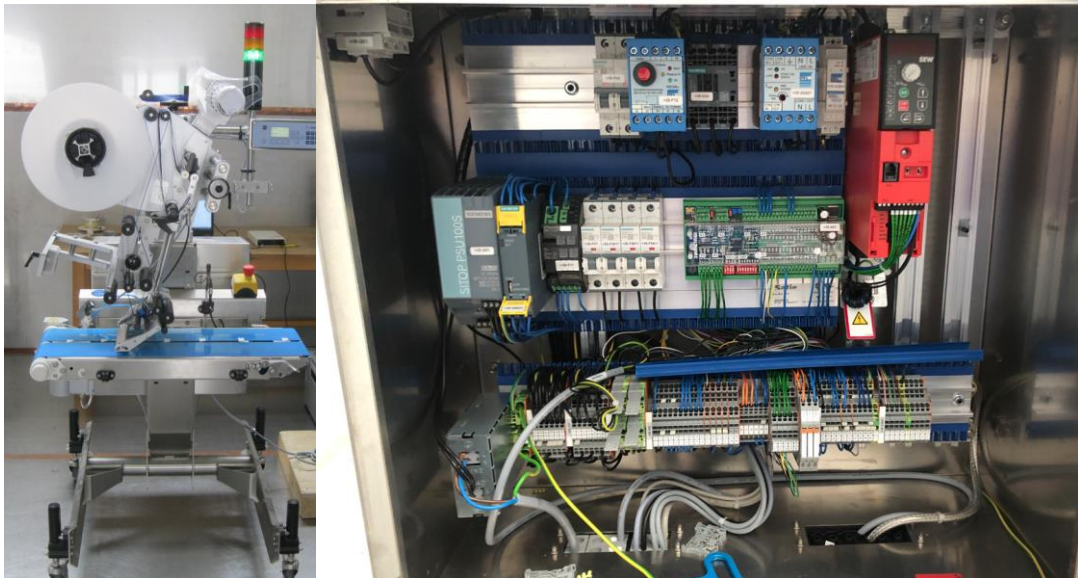


Abbildung 13: Etikettier-Maschine und Schaltschrank

Messung der leitungsgeführten Störaussendung:

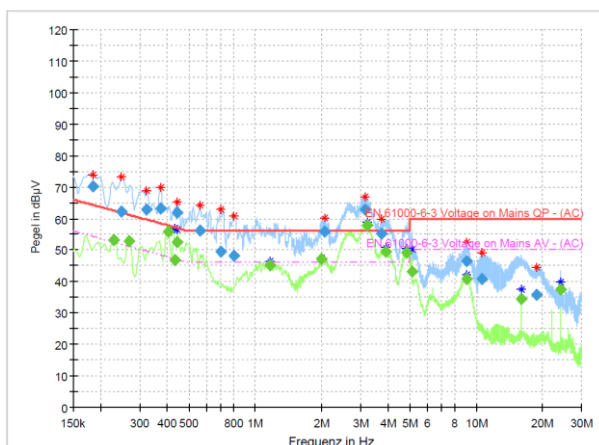


Abbildung 14: Ursprungsmessung

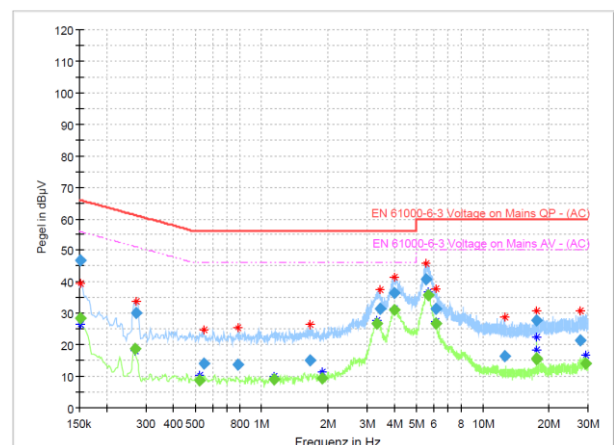


Abbildung 15: Mit EMI-Filter HFE 356-230/6

Fazit: die leitungsgeführte Störaussendung nach EN 55011 Kl. B konnte mit einem externem Funkentstörfilter eingehalten werden.

PE-/PA-Ströme (kontinuierlich):

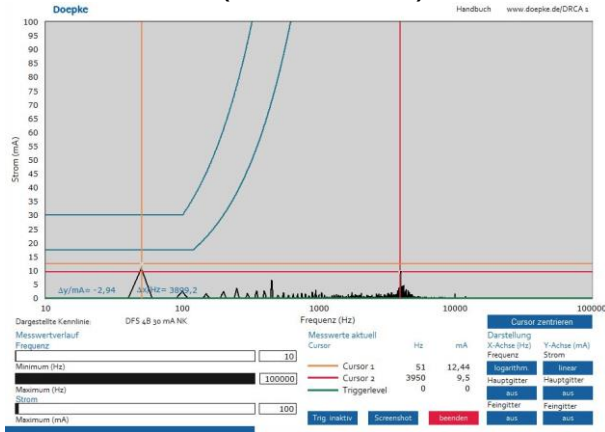


Abbildung 16: Ursprungsmessung



Abbildung 17: Mit EMI-Filter HFE 356-230/6

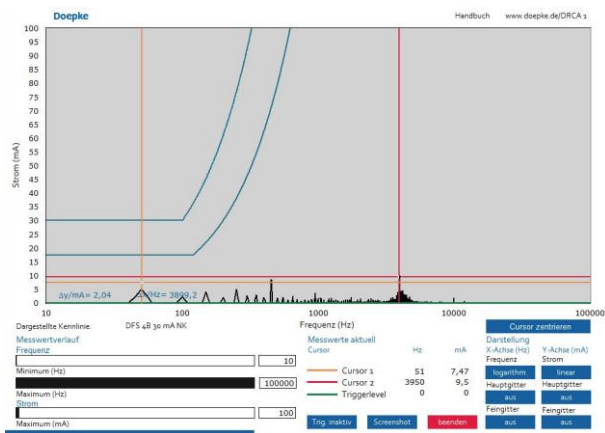


Abbildung 18: Mit EPA Leakcomp

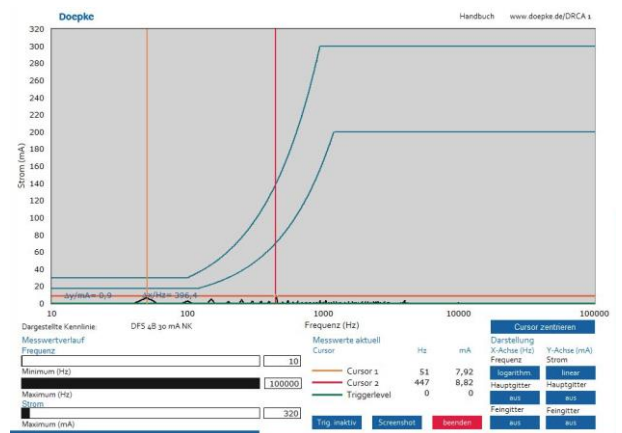


Abbildung 19: Mit EMI-Filter HFE 356-230/6 und EPA Leakcomp

Fazit: ohne Filtermaßnahme zur Reduzierung von PE-/PA-Ströme wird der RCD ausgelöst. Der eingesetzte Funkentstörfilter reduziert die höherfrequenten PE-/PA-Ströme, erhöht jedoch die 50Hz-Komponente. Das aktive PE-/PA Stromkompensationsgerät EPA Leakcomp ermöglicht in Kombination mit dem Funkentstörfilter die beste PE-/PA Stromreduktion. In dieser Kombination war ein sicherer Betrieb am RCD möglich.

PE-/PA-Ströme im Einschaltmoment:

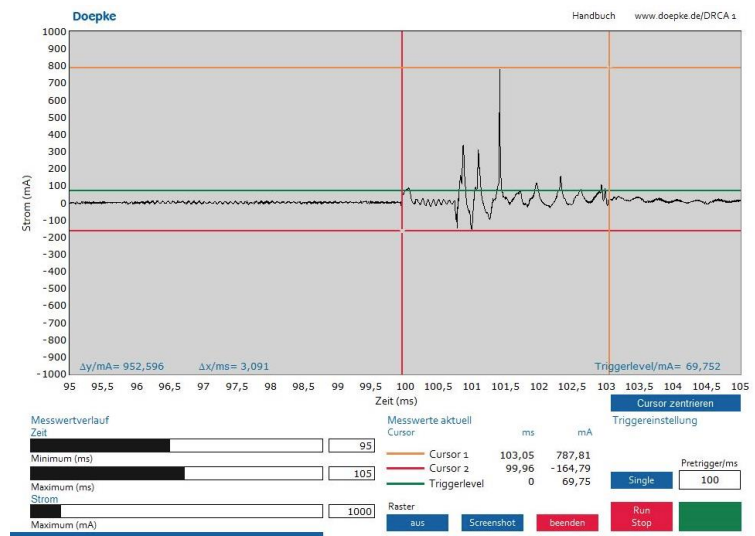


Abbildung 20: Einschaltmoment im Ursprungszustand

Fazit: Der Einschaltmoment war schon im Ursprungszustand unkritisch. Keine Fehlauslösung des vorgeschalteten RCD's 30 mA.

8.2 Messung 2 Vakuumfüllmaschine / Nahrungsmittelindustrie

Problemstellung:

- RCD 30 mA löste aus
 - im Ein-/Ausschaltmoment
 - im Betrieb
- Leitungsgebundene Störaussendungen EN 55011 Kl. B wurden nicht eingehalten

Anforderungen:

- RCD 30mA
- Keine Fehlauslösung im Ein-/Ausschaltmoment
- RMS PE-/PA Strom < 10 mA
- Leitungsgebundene Störaussendungen EN 55011 Kl. B

Aufbau:

- Kein ext. EMV-Filter
- 2 FU's; int. EMV-Filter; Cy EMV-Filter und Cy Zwischenkreis separat trennbar

Foto der Anlage:



Abbildung 21: Vakuumfüllmaschine

Ergebnis:

Es wurden diverse Messungen zu PE-/PA-Ströme und EMV sowie Filtern durchgeführt (nicht näher dargestellt).

Fazit:

- RCD 30 mA ✓ konnte im Ursprungszustand eingehalten werden
- Keine Fehlauslösung im Ein-/Ausschaltmoment ✓ konnte im Ursprungszustand eingehalten werden
- RMS PE-/PA Strom $< 10 \text{ mA}$ → wurde nicht eingehalten.
- Leitungsgebundene Störaussendungen EN 55011 Kl. B ✓ konnte im Ursprungszustand eingehalten werden

8.3 Messung 3: Stanzmaschine

Problem:

- RCD 30 mA löst aus
 - im Ein-/Ausschaltmoment
 - im Betrieb

Anforderungen:

- RCD 30 mA
- Keine Fehlauslösung im Ein-/Ausschaltmoment

Foto vom Messaufbau:



Abbildung 22: UNICORE Stanzmaschine

Ergebnis:

Es wurden diverse Messungen zu PE-/PA-Ströme und EMV sowie Filtern durchgeführt (nicht näher dargestellt).

Fazit:

Die Frequenzen > 450 Hz sowie die Filterresonanzfrequenzen und Taktfrequenzen sind durch eine geeignete Auswahl passiver Filterkomponenten beeinflussbar gewesen. Die 150 Hz-Komponente konnte nur durch Trennung der Zwischenkreisanbindung zur Masse oder durch aktive Kompensation reduziert werden.

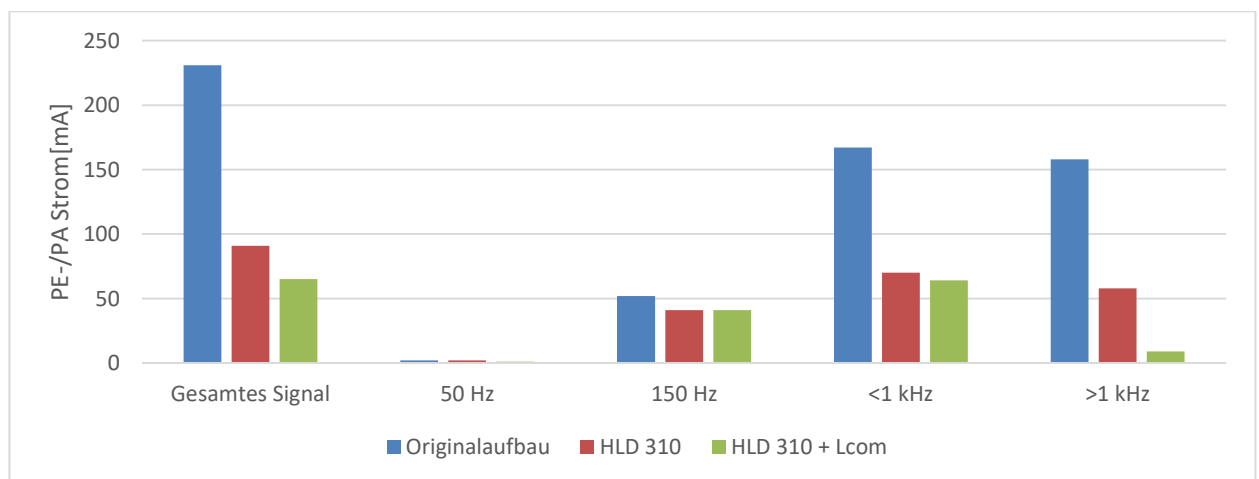


Abbildung 23: Vergleich getestete Konfigurationen (Doepke DRCA1) - Unicore Maschine

Durchgeführte Maßnahme: Umrüsten der Einspeisung auf ortsfesten Anschluss mit zusätzlichem, niederohmigem Schutzerdungsleiter 10 mm² entsprechend DIN EN 61800-5-1; VDE0160-150-1 -> Sicherheitsanforderungen Frequenzumrichter.

9 Ableitung eines Referenzsystems / Messaufbau zur Darstellung von PE-/PA-Strömen (Danfoss)

Kurzfassung

In dem Arbeitspaket wurde ein Prüfaufbau entwickelt, der als Referenzsystem dient, um Maßnahmen zur Reduzierung von PE-/PA-Strömen reproduzierbar beurteilen zu können. Der Prüfaufbau basiert auf dem Konzept reduzierter Pfade und orientiert sich an realen Systemen.

Bei der ersten Version des Prüfaufbaus wurden Einflussfaktoren wie Netzüberschwingungen und Verlegungsart der Motorleitung beurteilt.

Dies hat zu einer optimierten zweiten Version des Referenztestsystems geführt. Dieses Referenztestsystem wurde bei allen Projektpartnern aufgebaut, damit an mehreren Standorten die gleichen Messungen unter gleichen Betriebszuständen durchgeführt werden konnten.

Der Vergleich dieser Messergebnisse zeigte, dass ein großer Einflussfaktor die Überschwingungen der Netzversorgung sind – über den Gleichrichter des Frequenzumrichters werden Gegenaktspannungen des Versorgungsnetzes in Gleichtaktströme auf den PE-Leiter umgewandelt.

Das Referenztestsystem wurde erfolgreich für weitere Untersuchungen in den anderen Arbeitspaketen des Projektes benutzt.

9.1 Definition des Arbeitspakets Nr. 3

„Ableitung eines Referenzsystems zur Darstellung von PE-/ PA-Strömen“

Das AP 3 ist laut Gesamtvorhabens-Beschreibung des PEPA-Projekts wie folgt definiert:

Mit Hilfe eines Referenzsystems sollen Maßnahmen zur Reduzierung von PE-/PA-Strömen reproduzierbar beurteilt werden. Hierzu sollte sich das Referenzsystem möglichst nah an realen Systemen orientieren. Da reale Systeme sehr unterschiedlich in Bezug auf die Ausbreitung von PE-/PA-Strömen sind, da sich Netzimpedanz, Leitungslänge, verwendete Umrichter und elektrische Maschinen stark unterscheiden, ist zu Beginn von AP 3 zunächst auf Basis der Ergebnisse von AP 1 und AP 2 zu entscheiden, ob ein oder mehrere Referenzsysteme für die Nachbildung realer Netze benötigt werden. Soweit möglich, soll das Referenzsystem aus einfach verfügbaren oder für bestehende EMV-Normmessungen bereits vorhandenen Komponenten bestehen um später möglichst vielen Prüforganisationen, Anwendern und Herstellern die Umsetzung zu ermöglichen.

9.2 Konzept

Aufbau mit reduzierten Pfaden: Der Testaufbau wird möglichst simpel gestaltet, um die Anzahl der PE-/PA-Strompfade gering zu halten.

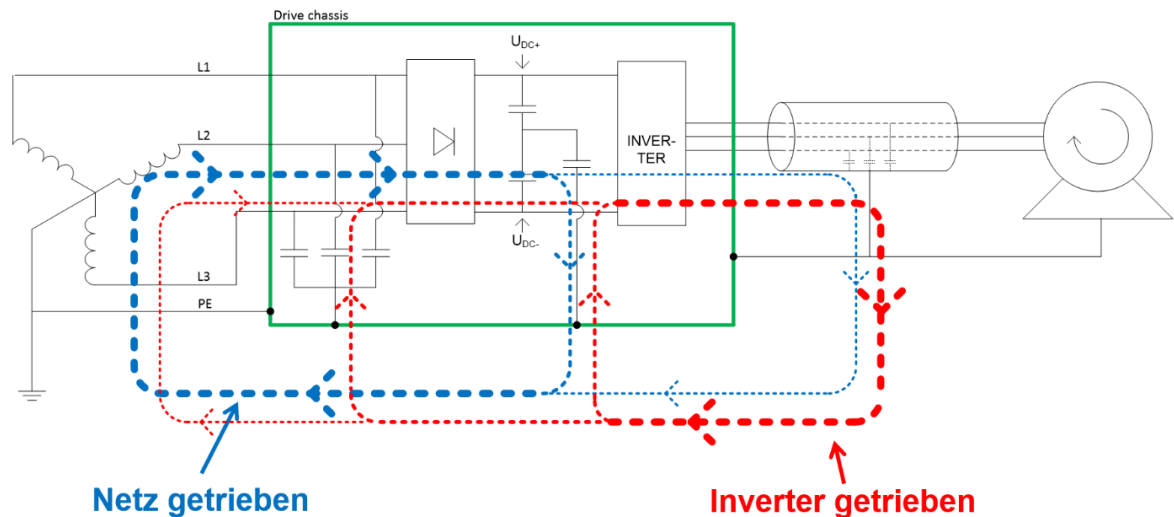


Abbildung 24: PE/PA Strompfade

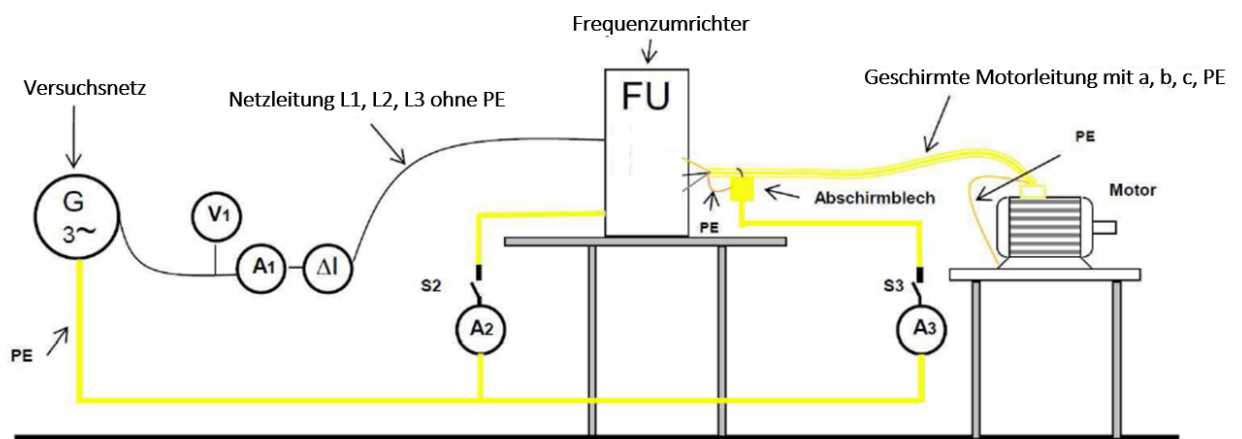


Abbildung 25: Testaufbau mit reduzierten Pfaden.

Note 1: Schleife zwischen A2 und A3 müssen als eine kurze niederimpedante Schleife ausgeführt sein

Note 2: Die Strommessung muss spektral erfolgen (nicht nur Effektivwert)

Note 3: Versuchsnetz muss störungsfrei sein

Note 4: Ausführung der Abschirmblech-Konstruktion ist kritisch. Die PE-/PA-Strommessung besteht in dem Testaufbau aus einer Differenzstrommessung auf der Netzseite (L1, L2, L3) und auf der Motorseite (U, V, W).

Diese Messungen werden zum Vergleich und zur Entwicklung der Simulationsmodelle benutzt.

9.3 Prüfaufbau

Referenz Testaufbau soll möglichst simpel gestaltet sein: Netz (Trenntrafo), Anschlussleitung, FU, geschirmte Motorleitung, Motor.



Abbildung 26: Referenz Testaufbau

9.4 Strommessaufbau

Mehrere EPA Stromwandler wurden mit der EPA LeakWatch getestet und zusätzlich mit einer Kombination aus Oszilloskop und Stromzange verglichen.

9.4.1 EPA Leakwatch

Folgende Messwandler standen zur Verfügung:

Tabelle 1: Messwandler für EPA Leakwatch

LW-MZ-50	LW-SK1400-25	LW-SK1400-60
		
Sehr stöempfindlich. Hochfrequentes einkoppeln von benachbarten Kabeln	Reproduzierbares Ergebnis	Reproduzierbares Ergebnis

9.4.2 Oszilloskope mit Stromzange

Es ist problematisch eine Stromzange zu finden, welche den Durchmesser aller drei Leiter umfasst und gleichzeitig eine hohe Empfindlichkeit für kleine Ströme bietet.



Abbildung 27: Stromzange

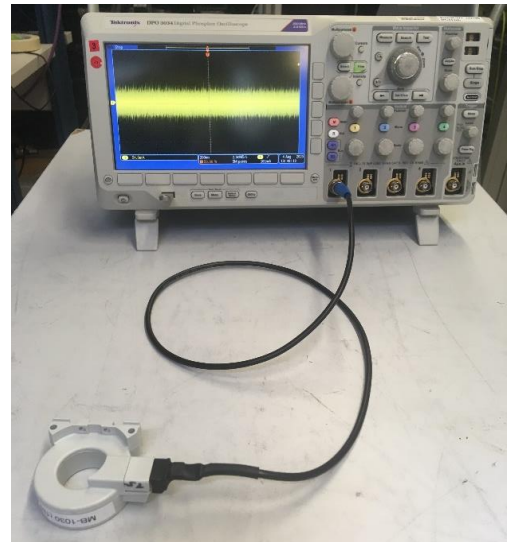


Abbildung 28: Messwandler angeschlossen am Oszilloskop

Für unsere Messungen wurde eine Tektronix TCP0150 150 A Stromzange in der 25 A Einstellung benutzt. Mittels der integrierten FFT-Analyse des Oszilloskops hat diese mit LeakWatch vergleichbare Ergebnisse geliefert.

9.4.3 Strommesswandler von Magnetec

Mehrere Stromwandler wurden von Magnetec bereitgestellt, die direkt mit dem Oszilloskop benutzt werden können.

Motorseitig entstehen Ströme bis zu einem zweistelligen Ampere-Bereich, um die Kapazitäten der Motorleitung umzuladen. Auf der Netzseite fallen die Ströme aber wesentlich geringer aus. Wegen der großen Unterschiede in dem Messbereich zwischen Netz und Motorseite wurden zwei Stromwandler, mit unterschiedlichem Übersetzungsverhältnissen verwendet.

Es wurde eine Version mit 185 mV/A für die netzseitige Messung und eine Version mit 37 mV/A für die motorseitige Messung zur Verfügung gestellt.

9.5 Erste Messergebnisse / Optimierungen

9.5.1 FU an, Motor aus (keine PWM), kein Trenntrafo

Der Strom bei der 3. Harmonischen (150 Hz) mit ~4 mA ist funktionsbedingt und auch so, durch die Filterkondensatoren vom Gleichspannungs-Zwischenkreis zum Ground-Bezug, zu erwarten. Ebenso findet man die anderen sogenannten Tripple-Harmonischen, die 9., 15., 21., ... mit niedrigeren Werten.

Die 27. Oberschwingung (1350 Hz) ist aber überraschenderweise ziemlich groß.

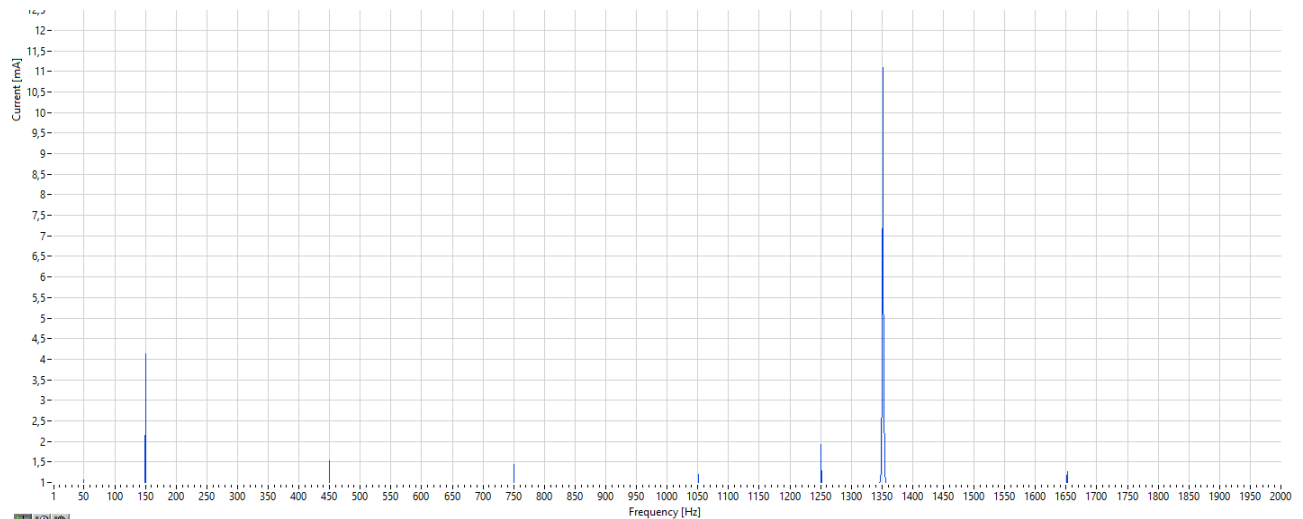


Abbildung 29: Netzseitige Gleichtaktmessung.

Daraufhin wurde die Gleichtakt-Impedanz (Common Mode) des EMV Filters im FU gemessen:

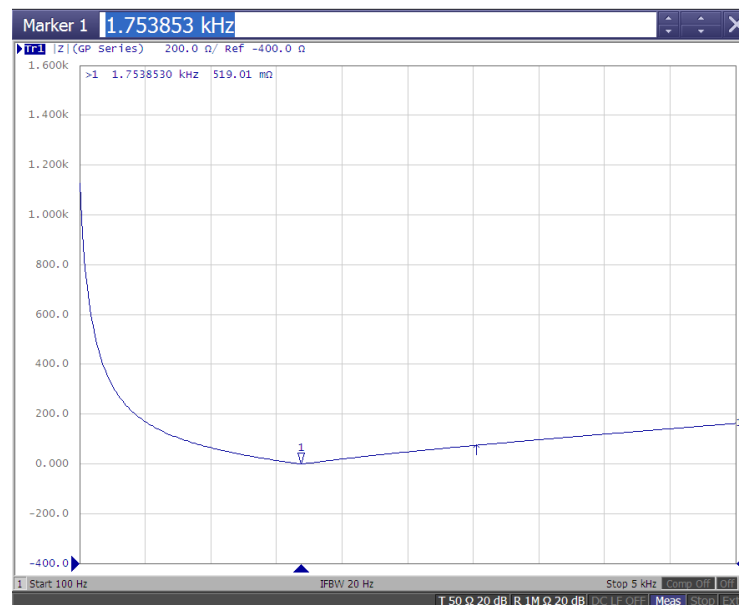


Abbildung 30: Gemessene Gleichtakt-Impedanz (Common Mode) des EMV Filters im FU

Es zeigte sich, dass der FU vom Design her eine Serien-Resonanz um ~ 1753 Hz hat.

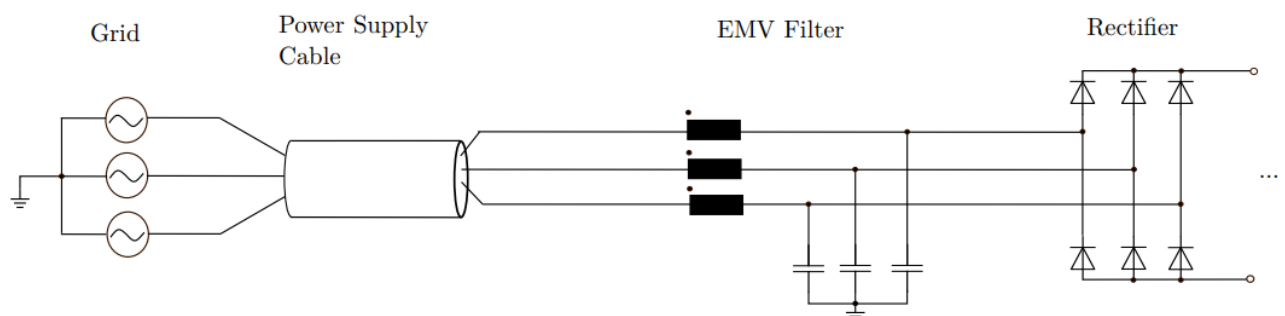


Abbildung 31: Darstellung der EMV-Filter der FU

Mit 5,6 mH und 470 nF ergibt sich eine Serien-Resonanz um ~ 1700 Hz. Die Induktivität der stromkompensierten Drossel hat in dieser Ausführung recht große Toleranzen.

Netzspannungsverzerrungen im Bereich der Resonanz können größere PE-/PA-Ströme, aufgrund des niedrigen Impedanz-Niveaus, produzieren. Eine Spannungsverzerrung am Netz war nicht deutlich messbar.

Aufgrund der Serien-Resonanz hat der EMV Filter eine gemessene Impedanz bei 1350 Hz um die 20 Ohm. Dabei reicht eine Netzspannungsverzerrung von 220 mV um 11 mA Gleichtaktstrom zu erzeugen.

9.5.2 FU an, Motor aus (keine PWM), mit Trenn-Trafo

Als Test wurde ein 12,5 kVA Trenn-Trafo mit Dreieck-Stern-Verschaltung (Dy) in Serie mit der Netzversorgung gekoppelt. Diese Kopplungsmethode reduziert (eliminiert) die 3., 9., 15., 21. ... Oberschwingungen.

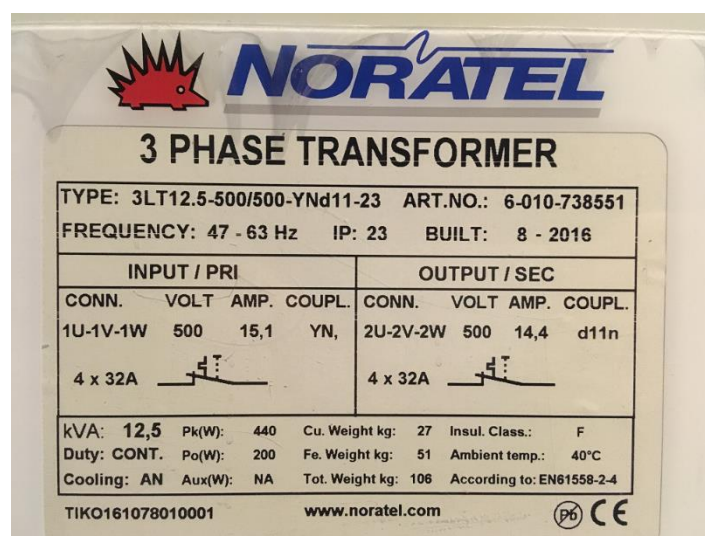


Abbildung 32: Trenn-Trafo Typschild

Der Trafo ist mit der Sekundärwicklung (Dreieck) an die Netzversorgung angeschlossen. Die Primärwicklung (Stern) erzeugt ein potenzialfreies „Labornetz“, wo der FU als einzige Last angeschlossen ist. An der Stern-Seite ist der Mittelpunkt-Leiter mit PE verbunden.

Der netzseitige PE-/PA Strom wurde dann wieder mit dem Trenn-Trafo gemessen: Der PE-/PA Strom um 1350 Hz ist deutlich reduziert.

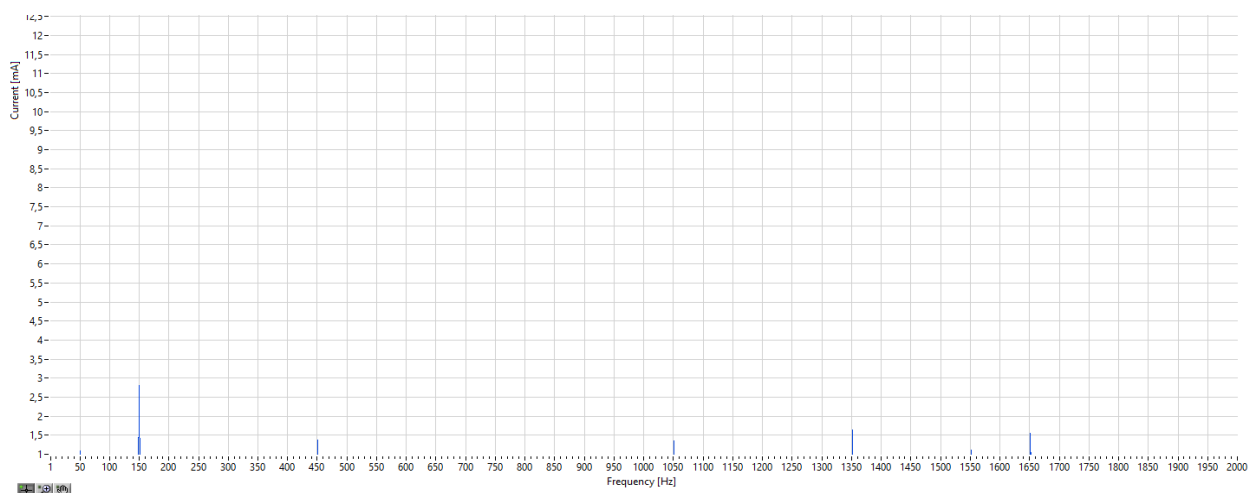


Abbildung 33: Netzseitige PE-/PA Strom gemessen mit Trenn-Trafo zwischen Netz und Testaufbau

9.5.3 Kopplungen zwischen der Primär- und Sekundärseite des Trenn-Trafo

An der Dreieck-Seite des Trenn-Trafo wurde L1, L2, L3 verbunden und an der Stern-Seite L1, L2, L3, N. Zwischen diesen beiden Punkten wurde die Kapazität gemessen.



Abbildung 34: Kopplung zwischen der Primär- und Sekundärseite des Trenn-Trafo. 100 Hz...200 kHz => ~460 pF (etwas höher bei niedrigeren Frequenzen)

Das ergibt eine Impedanz von $Z = 150 \text{ k}\Omega$ @ 1350 Hz, und daher wird der PE-/PA Strom bei dieser Frequenz reduziert, wenn der Trenn-Trafo mit angeschlossen wird.

9.5.4 Beeinflusst eine aufgerollte Motorleitung die Messergebnisse



Abbildung 35: Testaufbau mit Aufgerollt, Abgerollt und Abgerollt + Isoliertes Motorleitung

Es wurde untersucht, ob eine aufgerollte Motorleitung die Messergebnisse beeinflusst.

Wie in Tabelle 2 dargestellt ist der Unterschied sehr gering und innerhalb der Messtoleranz der Stromwandler.

Tabelle 2: Unterschiede der Verlegungsart mit den PE/PA-Ströme an der Netzleitung

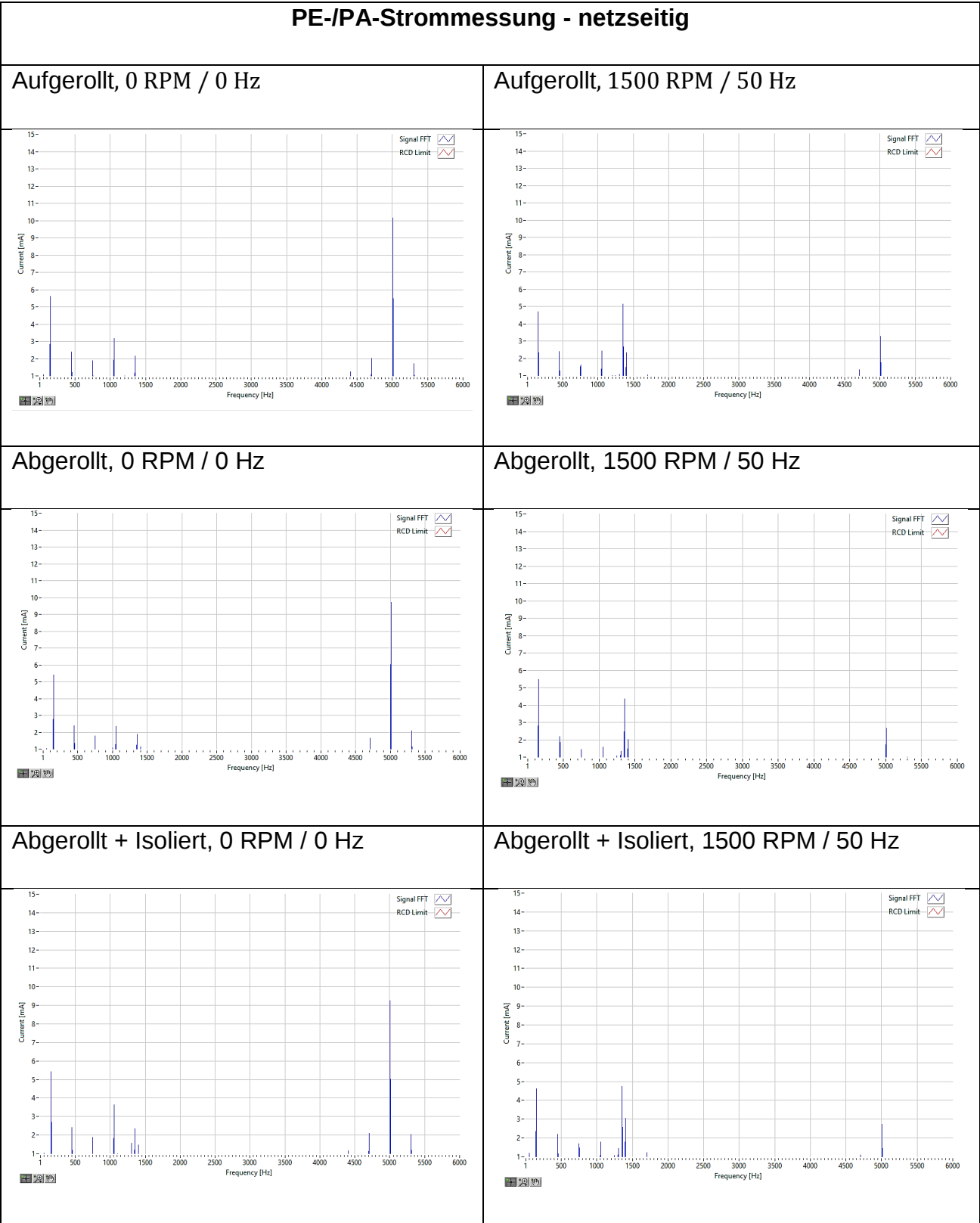
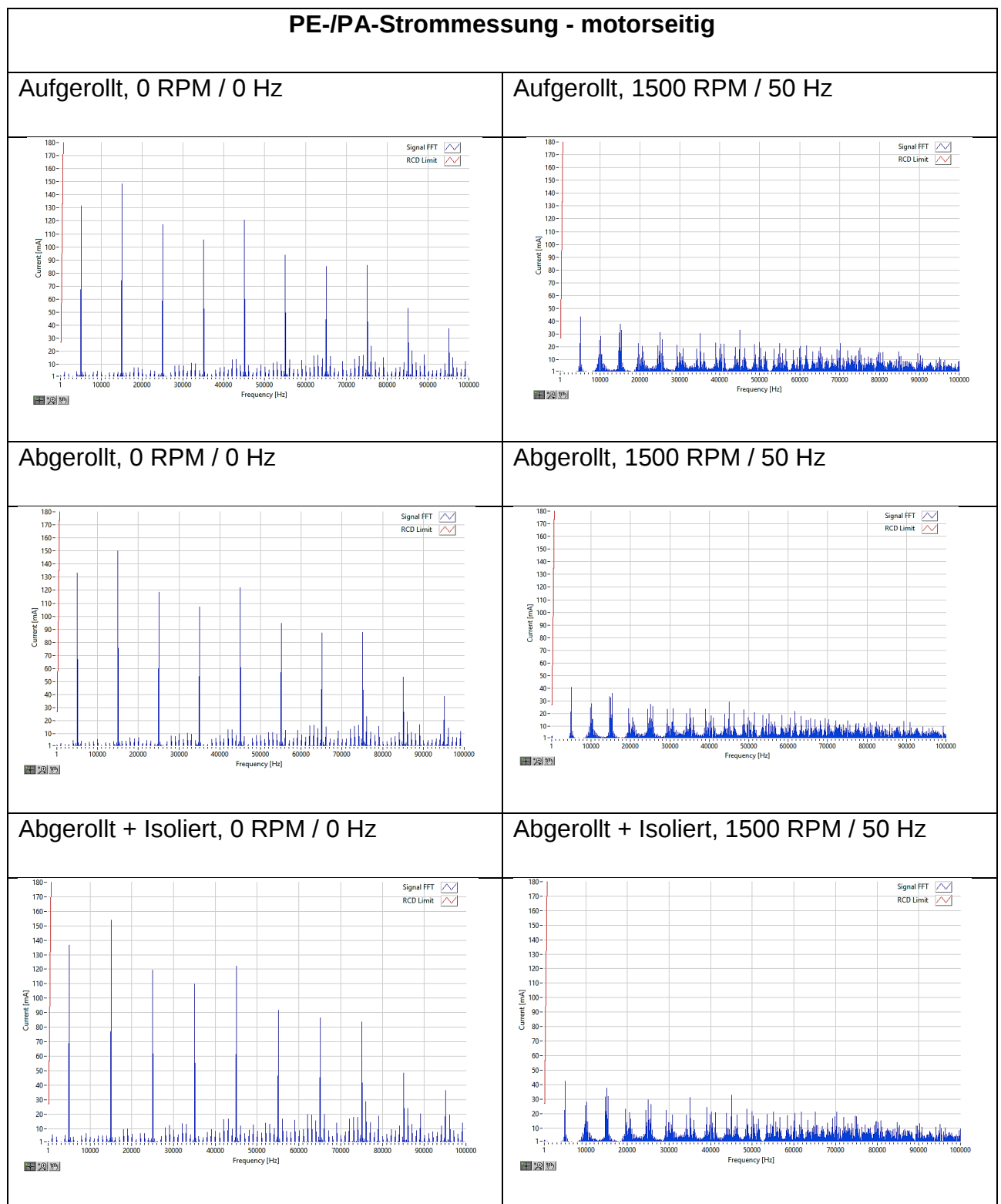


Tabelle 3: Unterschiede der Verlegungsart mit den PE/PA-Strömen an Motorleitung



9.5.5 Messung mit 3 harmonischer Verzerrung am Netz

Um die Effektivität des Transformators bezüglich Unterdrückung der vom Netz kommenden Spannungs-Oberschwingungen zu testen, wurden mehrere Messungen mit harmonischen Verzerrungen am Netz durchgeführt. Diese Verzerrungen würde durch einen Spitzenberger Verstärker als Netznachbildung hergestellt. Der Transformator kann erwartungsgemäß die

Ausbreitung der 3. und 9. Netzüberschwingung unterdrücken, weil die parasitäre Impedanz für diese Frequenzen geringer Frequenz vglw. hoch ist. Interessanterweise ist, dass aufgrund der Dreiecks/Stern Kopplung der Transformator auch einphasige 3. und 9. Harmonische Verzerrungen am Netz gut unterdrückt geworden.



Abbildung 36: Testaufbau angeschlossen am Spitzenberger Netznachbildung



Abbildung 37: 8 kVA, TT3 8-4-4 Transformator von BLOCK

9.6 Referenztestsetup 2.0

Der Referenztestsetup 2.0 besteht aus den folgenden Elementen:

- Frequenzumrichter: FC-302P4K0T5E20H1 von Danfoss
- Trafo: 8 kVA, TT3 8-4-4 von BLOCK
- Netzleitung: ÖLFLEX CLASSIC 110 Black 0,5/1kV, 2,5 mm², 20 m von LAPP
- Geschirmte Motorleitung: ÖLFLEX SERVO 2YSLCY-JB 2,5 mm², 50 m von LAPP
- Asynchron Motor: DRN 112M4 4 kW von SEW



Abbildung 38: Kompletter Aufbau: Referenztestsetup 2.0 montiert an einer Holzplatte

9.7 Ergebnisse/Erkenntnisse

9.7.1 Vergleich der Messungen der PE-/PA -Ströme netzseitig mit 0 Hz Ausgangsfrequenz Ergebnisse von alle Projektteilnehmer

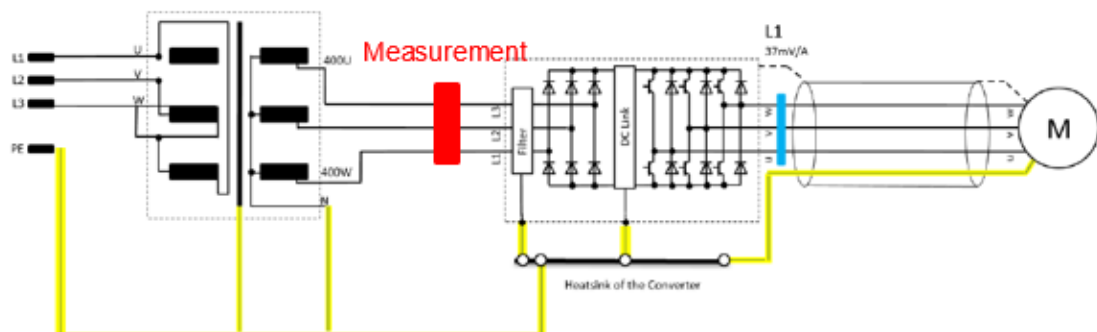


Abbildung 39: PE-/PA-Messung auf der Netzseite

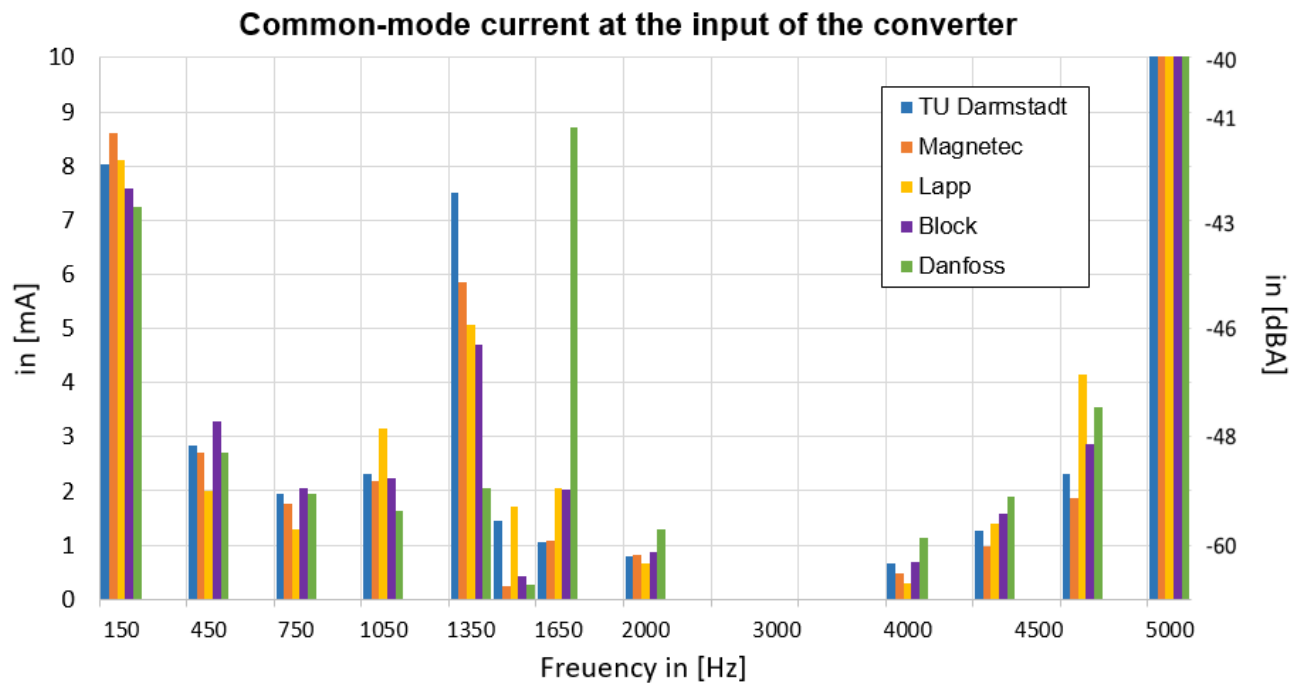


Abbildung 40: Ergebnisse der Messung der PE-/PA Ströme auf der Netzseite

Das selbstgesteckte Ziel, dass die Abweichungen der Messergebnisse bei allen Referenzaufbauten in einem Bereich unter 3 dB bleiben, wurde nicht erreicht. Bei einigen Frequenzen waren die Abweichungen in einem wesentlich höheren Bereich zu finden.

Hauptgrund für diese Abweichung sind Verzerrungen im Netz, die nicht unterdrückt werden können, in Kombination mit der sehr niedrigen Impedanz des internen EMV Filters vom FU im Bereich der Resonanzfrequenz.

9.7.2 Vergleich der Messung der PE-/PA-Ströme motorseitig mit 0 Hz Ausgangsfrequenz Ergebnisse von alle Projektteilnehmer

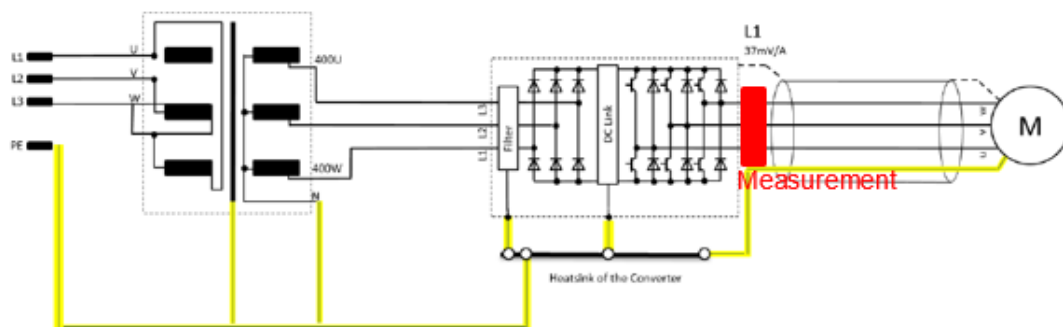


Abbildung 41: PE-/PA-Messung auf der Motorseite

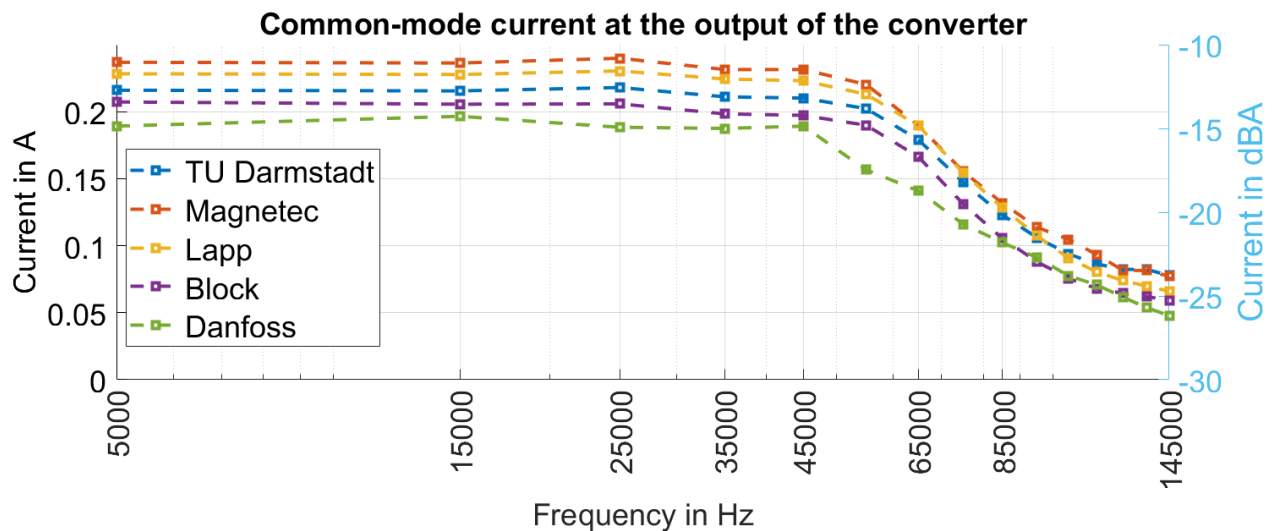


Abbildung 42: Ergebnisse der Messung der PE-/PA Strom auf der Motorseite

Die Messungen der motorseitigen Gleichtaktströme, zwischen den verschiedenen Projektteilnehmern zeigt einen hohen Grad an Reproduzierbarkeit. Der Test zeigt die Ergebnisse bei aktivierten Ausgangsstufen, also mit geschalteter Taktfrequenz und 0 Hz Ausgangsfrequenz. Alle Messungen sind innerhalb des gewünschten Bereiches von 3 dB.

9.8 Zukunft/Ausblick

Eine verbesserte Trennung zwischen Netz und neuem Referenztestsetup ist notwendig, damit Verzerrungen der Netzspannung nicht mehr so einen Einfluss auf die Ergebnisse am Netzeingang des FU haben. Nach unseren aktuellen Erkenntnissen könnte so etwas durch eine Netznachbildung, wie z.B. einen Spitzenberger Verstärker, erreicht werden. Durch die hohen Kosten für eine Netznachbildung ist der Einsatz stark eingeschränkt und muss wirtschaftlich hinterfragt werden.

Eine andere Möglichkeit, eine bessere Entkopplung im höheren Frequenzbereich zu erreichen, wäre, die kapazitive Kopplung über einen Trafo mit einer Schirmwicklung zu reduzieren.

10 Kopplung zwischen benachbarten Leitungen sowie mit Anlagenteilen, Messungen und Optimierung der Leitungsausführung (LAPP)

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, die Kopplungsmechanismen zu erforschen, die leitungsseitig eine unerwünschte Ausbreitung von PE-/PA-Strömen fördern, um dann neue geeignete Leitungskonstruktionen zu entwickeln oder bestehende zu optimieren, damit diese möglichst störungsarm in Stromnetzen betrieben werden können.

Kabel und Leitungen können in Stromnetzen sowohl als Quelle wie auch als Empfänger von elektromagnetischen Störungen fungieren. Diese Störungen können dabei leitungsgeführt, aber auch als elektromagnetische Wellen auftreten. Diese elektromagnetischen Störungen werden auch von PE-/PA-Strömen angeregt. Wesentlich für die Ausbildung von PE/PA-Strömen sind Gleichtaktspannungen und -ströme (engl.: Common Mode, kurz CM), die sich über Potenzialausgleichsleitungen, Schirme sowie auch sonstige metallische Strukturen ausbreiten. Die Ausbreitung der PE-/PA-Ströme hängt dabei auch von der Konstruktion der Leitungen, den eingesetzten Isolationsmaterialien und der verlegten Leitungslänge ab. Diese Untersuchungen sollen an unterschiedlichen Aufbauten elektrischer Leitungen sowie unterschiedlichen Materialien durchgeführt werden. Leitungen und Kabel können durch ihren unsymmetrischen Aufbau DM-Signale (engl.: Differential Mode, kurz DM) in CM-Signale wandeln und damit PE-/PA-Ströme hervorrufen.

10.1 Aufbau Motorleitung

Einfache Anschluss- und Steuerleitungen besitzen typischerweise PVC-isolierte Adern und sind nicht geschirmt. Im Gegensatz dazu sind Motor- oder Servoleitungen kapazitätsoptimiert und besitzen zumindest einen Kupfer-Geflechschirm. Teilweise wird zusätzlich eine Metallbeschichtete Folie unter dem Geflecht angeordnet (längseinflaufend oder spiralisiert), um den Anforderungen an den Kopplungswiderstand Z_T gerecht zu werden. Dieser ist in der Produktnorm für Kabel und Leitungen – Starkstromleitungen mit Nennspannungen bis 450/750V EN 50525-2-51:2011 festgelegt und soll maximal 250 mΩ/m bei 30 MHz betragen. Bei Motor- oder Servoleitungen hat der Schirm hauptsächlich die Aufgabe, mittel- und hochfrequente PE-/PA-Ströme niederimpedant zur Quelle zurückzuführen. Der namensgebenden Aufgabe „Schirmung“, beispielsweise gegen elektrische oder magnetische Felder, kommt bei dieser Anwendung eher eine untergeordnete Bedeutung zu.



Abbildung 43: Motor-/Servoleitungen gemäß der VDE-Bezeichnung 2YSLCY oder 2XSLCY. Klassischer Aufbau (links) und erdsymmetrischer Aufbau mit drei Schutzleiter (rechts).

Die oben erwähnte Kapazitätsreduzierung wird durch den Einsatz von Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) als Isolierwerkstoff erzielt. Die Kapazität einer Leitung (Kapazitätsbeläge, Betriebskapazitäten) wird neben der Geometrie der Aderanordnung hauptsächlich durch die relative Permittivität ε_r bestimmt. PE oder PP besitzen eine relative Permittivität von etwa 2,3; im Gegensatz dazu weist PVC eine hohe relative Permittivität von ungefähr 4 auf. Die Betriebskapazität zwischen zwei Adern C_{12} kann wie folgt berechnet werden:

$$C_{12} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \pi}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{d}{\varnothing}\right)} \left[\frac{F}{m}\right] \quad (2)$$

ε_0 : Permittivität des Vakuums; ε_r : Relative Permittivität; d : Strecke zwischen den Leitmittelpunkten [m]; $\varnothing$: Durchmesser der Leiter [m]

Analog zur Kapazität wird die Betriebsinduktivität von zwei Adern L_{12} durch folgenden Term berechnet:

$$L_{12} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\pi} * \operatorname{arcosh}\left(\frac{d}{\varnothing}\right) \left[\frac{H}{m}\right] \quad (3)$$

μ_0 : Permeabilität des Vakuums; μ_r : Relative Permeabilität

Die Betriebskapazitäten und -Induktivitäten sind Mischgrößen, welche sich aus den jeweiligen C- und L-Netzwerken zusammensetzen. Sie dürfen nicht mit den Leitungsbelägen verwechselt werden. Da sich der Geometrieterm $d/\varnothing$ einmal im Zähler und einmal im Nenner der jeweiligen Formeln befindet, bewirkt beispielsweise eine Optimierung / Verringerung der Induktivität eine Verschlechterung / Erhöhung der Leitungskapazität. Das Schaubild Abbildung 44 verdeutlicht den Zusammenhang.

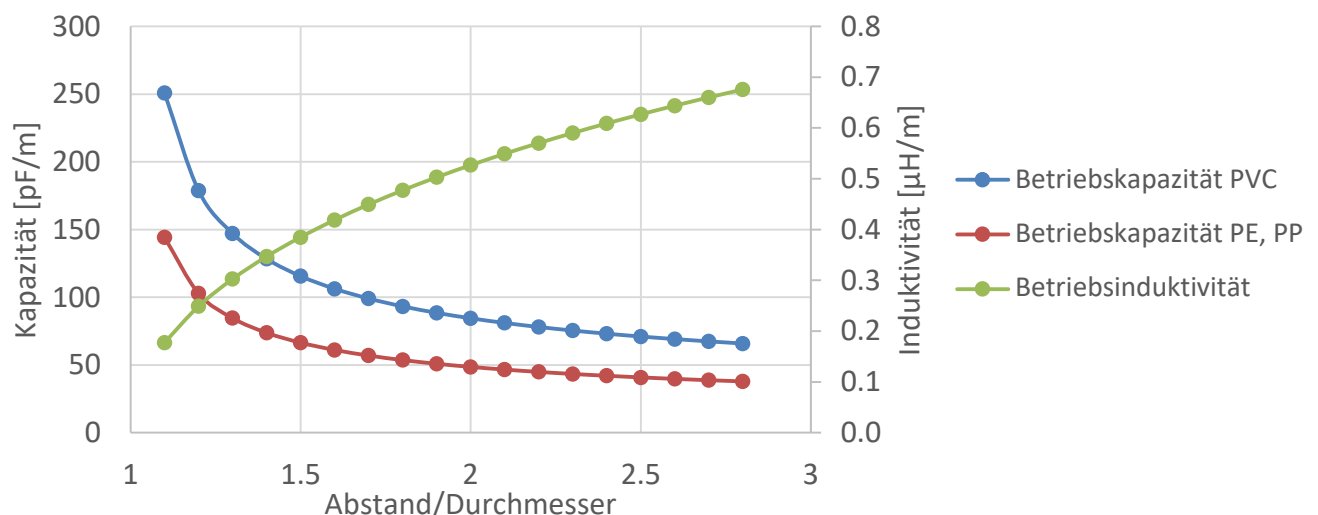


Abbildung 44: Betriebskapazität, -induktivität zweier Adern einer Leitung in Abhängigkeit von der geometrischen Dimensionierung und des Isolierwerkstoffes.

Als Besonderheit sind die erdsymmetrischen Leitungstypen der Familie 2XSLCY / 2YSLCY mit gedritteltem Schutzleiter zu nennen (Abbildung 43). Die aufgeteilten Schutzleiter-Adern werden zwickelfüllend in die Zwischenräume der drei Außenleiteradern eingebracht, was zu

kompakten Querschnitten führt und die Entstehung und Ausbreitung insbesondere von niederfrequenten und induktionsbedingten PE-/PA-Strömen verringern soll.

10.2 Einfluss der Kopplungsarten innerhalb einer Leitung

Um die kabelinternen Kopplungen zu verstehen, ist es hilfreich eine typisch spektrale Verteilung (FFT) von real gemessenen PE-/PA-Strömen heranzuziehen. Abbildung 45 zeigt den am Ausgang eines Frequenzumrichters gemessenen PE-/PA Strom einer 55 kW Pumpe im Lastbetrieb.

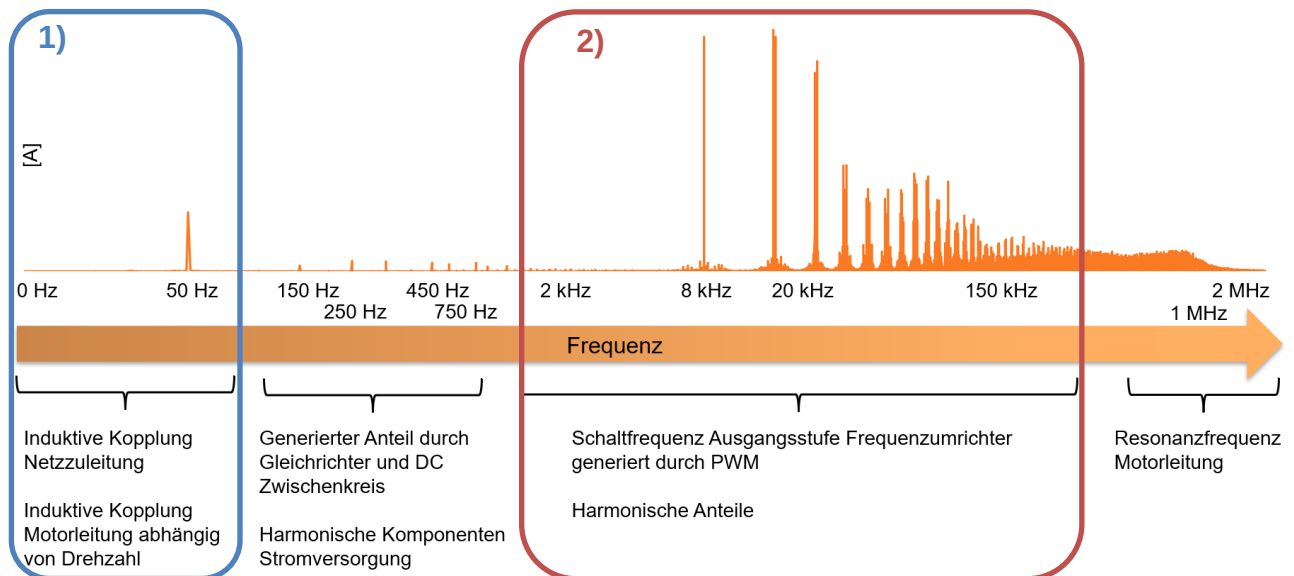


Abbildung 45: Typisch spektrale Verteilung von parasitären Strömen auf PE-/PA-Netz, gemessen an einer 55 kW-Pumpe.

Aus Leitungs-Hersteller Sicht sind vor allem zwei Frequenzbereiche relevant:

- 1) **Niederfrequenter Bereich 0 – 50 Hz.** Um hier die Konstruktion einer elektrischen Leitung zu verbessern, sind Maßnahmen erforderlich, welche sich auf die Symmetrie und/oder auf die magnetische Kopplung (Induktivität) beziehen.
- 2) **Mittelfrequenter Bereich 2 kHz bis 200 kHz,** hier liegt typischerweise die Grundtaktfrequenz eines Frequenzumrichter (2 – 8 kHz); gemäß der Fourier-Theorie bilden sich harmonische Überlagerungen mit steigender Frequenz aus (10 kHz – 200 kHz). Die Höhe der Nadeln wird hauptsächlich durch die elektrische Kopplung innerhalb der Motorleitung - also durch die wirkenden Kapazitäten - bestimmt. Deshalb nutzen Motoranschlussleitungen meist PE oder PP als Aderisolationswerkstoff, um die elektrische Kopplung innerhalb der Leitung zu verringern.

Die Einkopplung von Störströmen in das PE-/PA-Netzwerk findet sowohl am Motor (parasitäre Erdkapazitäten) als auch am Frequenzumrichter selbst (Y-Kondensator, Kühlkörper) statt, hauptsächlich jedoch durch oder innerhalb der Motorleitung.

Besonders bei langen Leitungs-Installationslängen verschiebt sich das Verhältnis zu Ungunsten der Motoranschlussleitung.

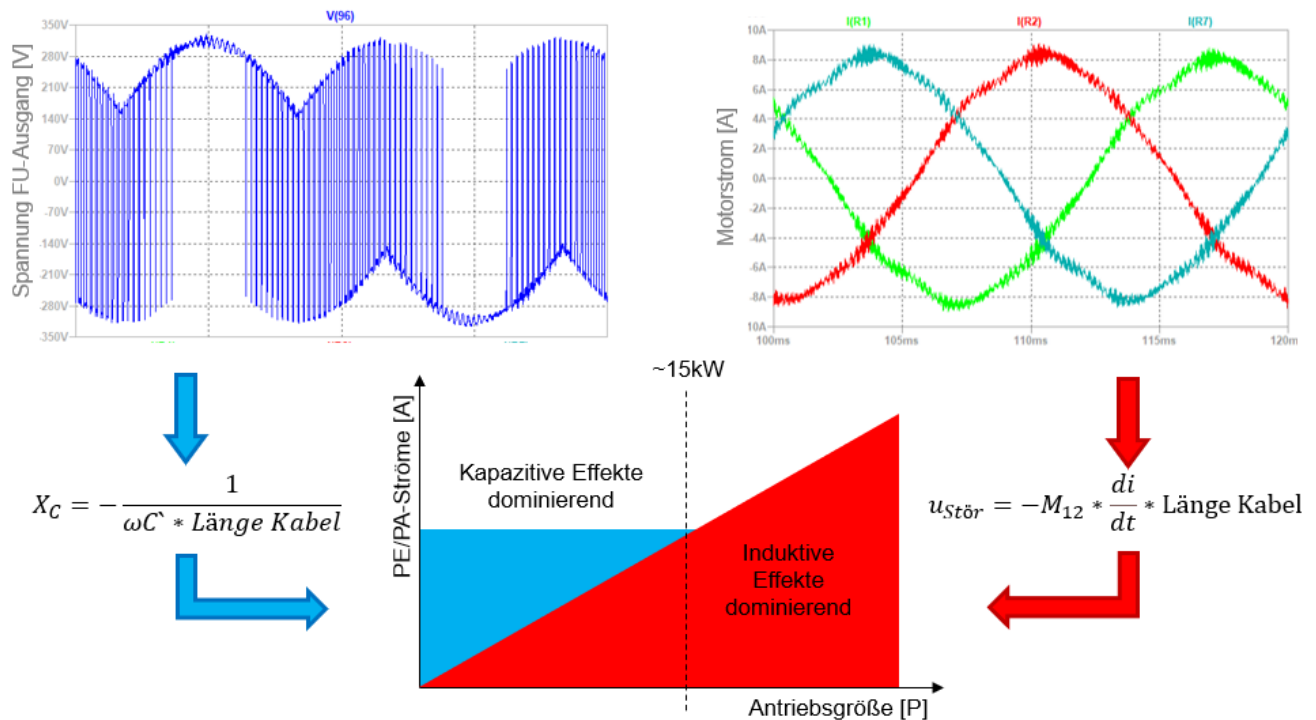


Abbildung 46: Einfluss von elektrischer (kapazitiver) Kopplung (links) und magnetischer (induktiver) Kopplung (rechts) auf die Ausbreitung/Kopplung von PE-/PA-Strömen innerhalb elektrischer Leitungen.

Abbildung 46 verdeutlicht den Zusammenhang: bei kleineren und mittleren Antriebsgrößen dominiert die kapazitive Kopplung (linke Seite), getrieben durch die Pulsweitenmodulation am Ausgang des Frequenzumrichters. Die Zwischenkreisspannung (üblicherweise 565 VDC bei 3x 400 V-Ansteuerung) wird innerhalb wenigen Nanosekunden von Plus auf Minus geschaltet. Diese Sprungantwort oder Dirac-Funktion koppelt über $1/(\omega C)$ innerhalb der Motorleitung auf andere Konstruktionselemente wie benachbarte Außenleiter, Schutzleiter oder Schirmgeflecht. Die Höhe der kapazitiven Kopplung ist in erster Linie abhängig vom Spannungssystem (1x 230 V, 3x 400 V oder 3x 690 V), von der Schaltgeschwindigkeit des Inverters, von den Kapazitätsbelägen und der Länge der Motorleitung. Sie ist jedoch unabhängig vom Außenleiterstrom bzw. der Antriebsgröße.

Dem gegenüber steht die induktive Kopplung (Abbildung 46, rechte Seite), welche erst bei großen Antrieben in den Vordergrund tritt. Das ist damit begründet, dass die induzierte Spannung $u_{\text{Stör}}$, welche wiederum einen PE-/PA-Strom treibt, proportional der Stromänderungsgeschwindigkeit di/dt ist. Da meist die Nenndrehfrequenz des Motors über die Polpaarzahl auf 50 – 60 Hz festgelegt ist, bestimmt somit die Last bzw. der Stromfluss, die Höhe der Einkopplung. Kabelseitig lässt sich diese Größe durch einen symmetrischen Aufbau (Auslöschung / destruktive Interferenz der induzierten Spannungen) oder durch einen reduzierten Anteil der magnetischen Kopplung M_{12} (vor allem CM zu Schutzleiter und/ oder CM zu Schirm) beeinflussen. Die Auswirkung der induktiven Kopplung ist außerdem proportional der Installationslänge der Leitung.

10.3 Prototyp

Da nun die Einflüsse hinsichtlich der Kopplungsart bei verschiedenen wirksamen Frequenzen bekannt waren, konnte ein neues Leitungsdesign (zeroCM®, Abbildung 47) entwickelt, produziert und getestet werden. Statt wie üblicherweise das Problem EMV über die Schirmung zu lösen, wurde das komplette Leitungsdesign neu gedacht. Drei Außenleiterleiter sind nun symmetrisch angeordnet und in einer Innenlage verseilt. Ergänzend wird der Schutzleiter in einer Außenlage mit entgegengesetzter Verseilschlagrichtung um die drei Außenleiterleiter in einem bestimmten Schlaglängenverhältnis verseilt. Die Isolation der Leiter ist kapazitätsoptimiert und besteht aus Polyethylen. Zwischen der Innenlage und der Außenlage befindet sich ein trennendes Vlies.



Abbildung 47: Prototyp ÖLFLEX® SERVO zeroCM 3X2.5 + 1G2.5

Betrachtet man das elektrische Ersatzschaltbild (Abbildung 48) der Leitung, werden die Unterschiede zu herkömmlichen Konstruktionen klar. Sämtliche Kapazitäten sind nun symmetrisch bezüglich der Außenleiterleiter, Schutzleiter und Schirm aufgeteilt. Zudem sind die Kapazitätsbeläge, wie C_{PE} oder C_s stark reduziert, da die Leiter nicht mehr parallel geführt werden, sondern nur noch auf Kreuzungspunkte aufliegen. Die magnetische Kopplungen $Ka2$ und $Ka3$ werden bei drei Außenleiter-Wechselstrom-Ansteuerung zu Null. Dies liegt zum einen an der Symmetrie (destruktive Interferenz von induzierten Spannungen) andererseits an dem klein gewordenen Term M_{12} (Abbildung 46), da durch die gekreuzte Anordnung nur noch wenige magnetische Feldlinien den Schutzleiter schneiden und dort eine Spannung $u_{stör}$ induzieren können.

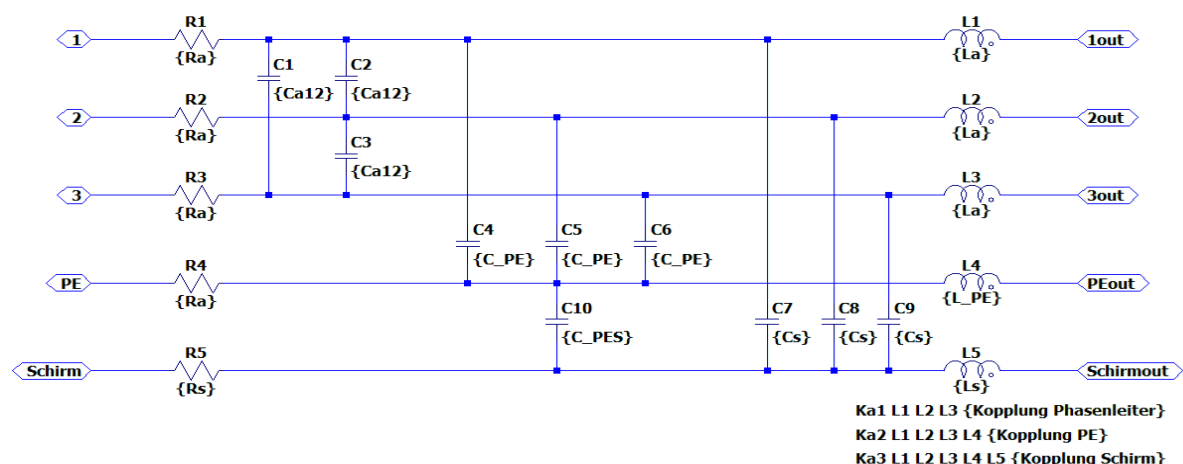


Abbildung 48: Ersatzschaltbild Prototyp ÖLFLEX® SERVO zeroCM 3X2.5 + 1G2.5 (LTspice).

10.4 Messkampagne Kapazitäten

Wie in Kapitel 10.2 beschrieben, ist die bauartbedingte elektrische Kopplung innerhalb einer Leitung ausschließlich abhängig von den Leitungskapazitäten (Kapazitätsbeläge und Betriebskapazitäten). Diese wurden im Rahmen des Projekts für diverse Leitungstypen mit Hilfe einer LCR-Brücke (Agilent E4980A 20 Hz ... 2 MHz) bestimmt.

Tabelle 4: Messwerten von Betriebskapazitäten und Kapazitätsbelägen der untersuchten Motorleitungen.

[pF/m] @ 1 kHz	PVC-Standard- leitung, geschirmt	Kapazitäts- optimierte Motorleitung	Kapazitäts- optimierte Motorleitung mit dickeren Wandstärken	Kapazitäts- optimierte Motorleitung, erdsymmetrisch mit drei Schutzleitern	Prototyp, neues symmetrisches Konzept mit reduzierter elektromagnetischer Kopplung
	ÖLFLEX® CLASSIC 115CY 4G2.5	ÖLFLEX® SERVO 2YSLCY-JB BK 4G2.5	ÖLFLEX® VFD 2XL 4G2.5	ÖLFLEX® SERVO 2YSLCY-JB 3X2.5+3G0.5	ÖLFLEX® SERVO zeroCM 3X2.5+1G2.5
Betriebskapazität Ader-Ader $C_{A/A}$	127	75,6	64,7	73,3	60,2
Betriebskapazität Ader-Schirm $C_{A/S}$	224	134,6	120,3	136,7	104,4
Kapazitätsbelag Ader-Ader $C'_{A/A}$	44 4,8 44	16,8 3,4 18,3	13,9 2,7 13,9	14,8 15,1 15,3	20,6 20,4 20,6
Kapazitätsbelag Ader-PE $C'_{A/PE}$	45 3,9 46,5	17,2 3,7 18,3	13,9 2,7 13,9	30 30,2 31,1	7,3 7,3 7,2
Kapazitätsbelag PE-Schirm $C'_{PE/S}$	120,5	100,6	93,3	223,1	90,8
Kapazitätsbelag Ader-Schirm $C'_{A/S}$	123,5 123,5 123,4	95,2 96,2 98,7	93,3 93,2 93,3	76,7 75,3 73,5	56 54,8 56

Kernaussagen:

- Wird statt PVC, PE oder PP als Isolierwerkstoff verwendet, reduzieren sich die internen Kapazitätsbeläge um ca. Faktor 2.
- Größere Isolierwandstärken verringern ferner die Kapazitäten und wirken sich positiv auf die elektrische Kopplung innerhalb von Leitungen aus.
- Bei den vieradrigen Standard-Aufbauten (4G2.5) sind die Kapazitäten unsymmetrisch innerhalb der Leitung verteilt. Dies ist der Geometrie geschuldet, da sich diagonal gegenüberliegende Leiter L1 und L3 oder L1 und PE weiter auseinanderstehen.
- Erdsymmetrische Motorleitungen mit drei Schutzleitern verbessern durch ihre Symmetrie zwar die magnetische Kopplung, verschlechtern jedoch die elektrische Kopplung, weil aufgrund der höheren Leiteranzahl größere Kapazitäten wirken.
- Beim Prototyp zeroCM reduzieren sich die für die Einkopplung von PE-/PA-Strömen verantwortlichen Kapazitätsbeläge $C'_{A/PE}$ oder $C'_{A/S}$ um Faktor 2. Das ist dadurch begründet, da die Leiter nur noch an den Kreuzungsstellen aufliegen. Sinngemäß wird durch die Leiterkreuzung die wirksame Fläche eines Plattenkondensators verkleinert. Die Kapazitäten der zeroCM-Leitung sind zudem symmetrisch verteilt.

Tabelle 5: Gegenüberstellung verschiedener Leitungskonstruktionen und deren für die Ausbreitung von PE-PA-Strömen verantwortlichen Kapazitäten.

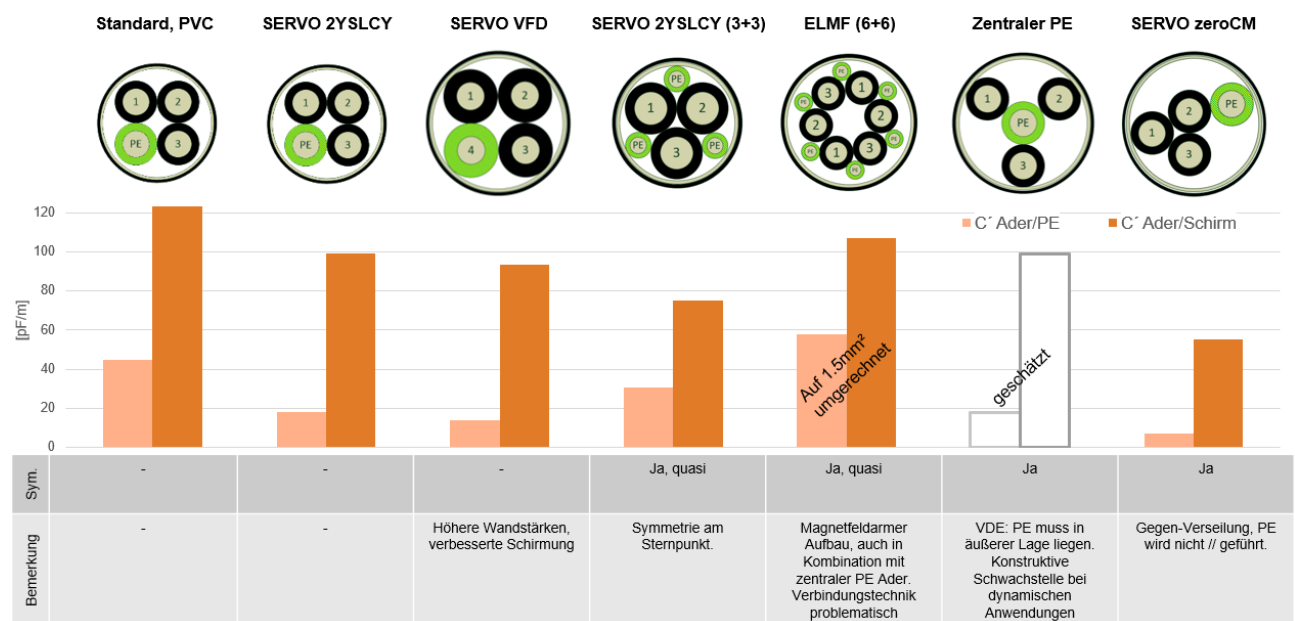


Tabelle 5 zeigt eine Übersicht diverser Leitungskonstruktionen und die Gegenüberstellung der für die Ausbreitung von PE-/PA-Strömen verantwortlichen Kapazitätsbeläge $C'_{\text{A/PE}}$ und $C'_{\text{A/S}}$. Neben den Standardtypen sind weitere, symmetrische und magnetfeldarme Konstruktionen aufgeführt. ELMF (= Extremely Low Magnetic Field) beschreibt eine Konstruktion mit aufgeteilten Außenleiter, welche sich diagonal gegenüberstehen. So heben sich die magnetischen Feldlinien innerhalb der Leitung auf. Als weitere Folge können die einzelnen Leiter kleiner (hier: 1,5 mm²) dimensioniert werden, da sich die Außenleiterströme auf mehr Leiter aufteilen.

Denkbar wäre auch eine Konstruktion mit zentralem Schutzleiter. Hierbei ist zu beachten, dass die Konstruktion zwar symmetrisch (Verbesserung der induktiven Kopplung), aber möglicherweise höhere Kapazitätsbeläge aufweisen würde, was zu einer Verschlechterung der elektrischen Kopplung führen würde. Zudem problematisch: ein zentral geführtes Element ist immer eine potenzielle Schwachstelle bezüglich Bruchdehnung, was bei einem sicherheitsrelevanten Bauteil (= Protected Earth) in Verbindung mit dynamisch bewegten Leitungen (mechanischer Stress) nachteilig wäre.

10.5 Messkampagne Induktivitäten

Die niederfrequente, magnetische Kopplung (siehe Abbildung 45, Bereich 1 oder Abbildung 46, rechte Seite) ergibt sich hauptsächlich aus der wirksamen induktiven Kopplung M_{12} und der Symmetrie bzw. Unsymmetrie der Leitung. Sind beispielsweise die wirksamen Induktivitäten symmetrisch verteilt, heben sich die induzierten Spannungen $u_{\text{Stör}}$ aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkung (destruktive Interferenz) bei der Grundfrequenz von bspw. 50 oder 60 Hz auf.

$$u_{\text{Stör}} = -M_{12} \cdot \frac{di}{dt} \cdot l \quad (4)$$

$u_{\text{Stör}}$: induzierte Spannung [V]; M_{12} : magnetische Kopplung [H]; l : Leitungslänge [m].

Da die wirksamen Induktivitäten aufgrund der nötigen Testbeschaltung und fehlender Referenz schwer bestimmbar sind und gleichzeitig der Einfluss bzw. Wechselwirkung bezüglich des Dreiphasen-Wechselstromsystems betrachtet werden müssen, wurde ein alternativer Aufbau zur Messanordnung mit der LCR-Brücke gewählt (Abbildung 49).

Die zu prüfenden Leitungen (50 m Länge) wurden an einem Drehstromnetz (3x 400 V) angeschlossen und der effektive Strom je Außenleiter mittels eines Messgeräts überwacht. Durch die Verwendung einer rein Ohm'schen Last (30 kW; FRIZLEN BW82), wurde jeder Außenleiter mit 20 A in Sternschaltung belastet. Am Ende des Prüflings wurde die induzierte Spannung des nicht angeschlossenen Schutzleiters gegen den Leitungsschirm (Abbildung 49, links) oder den durch die induzierte Spannung bedingte Stromfluss durch den Schutzleiter bei kurzgeschlossenem Leiter (Abbildung 49, rechts) gemessen.

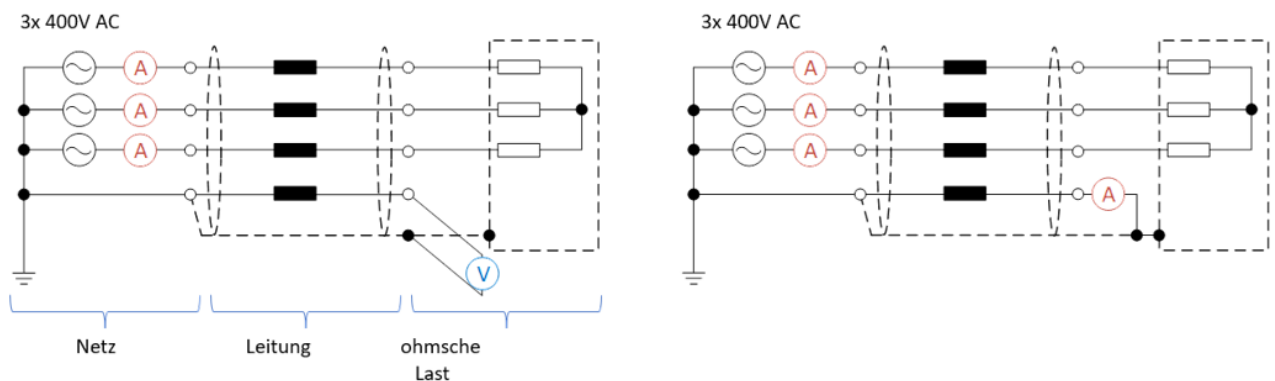


Abbildung 49: Messaufbau zur Bestimmung der magnetischen Kopplung. Links: Messen der induzierten Spannung am offenen Ende. Rechts: Messung des getriebenen Stroms an der kurzgeschlossenen Leiterschleife.

Kernaussagen:

- Bei allen üblichen Leitungskonstruktionen für Dreiphasen-Wechselstrom (bspw. 4G2.5) wird der Schutzleiter-Ader eine Spannung induziert. Diese Spannung ist proportional der Last und der Leitungslänge. Ist der Schutzleiter mit weiteren Anlagenteilen verbunden, treibt die induzierte Spannung einen Ringstrom.
- Erdsymmetrische Motorleitungen mit drei Schutzleitern, wie die ÖLFLEX® SERVO 2YSLCY 3X2.5+3G0.5 werden an den Anschlusspunkten symmetrisch, weil sich die induzierten Spannungen an den Sternpunkten aufheben. Zwingend notwendig ist das beidseitige Anschließen aller (drei) Schutzleiter.
- Der Prototyp ÖLFLEX® SERVO zeroCM 3X2.5+1G2.5 weist sogar innerhalb und entlang der Leitung vollsymmetrisches Verhalten auf. Der Schutzleiter nimmt entlang der Leitung immer eine andere, jedoch wiederkehrende Position um das Bündel der Außenleiter ein (Symmetrie), somit erfahren potenziell induzierte Spannungen sofort eine Auslöschung. Zudem wird der Term magnetische Kopplung M_{12} reduziert, da die Adern nicht parallel, sondern zueinander in einem Kreuzungswinkel angeordnet sind.

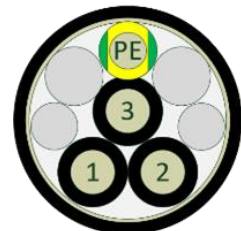
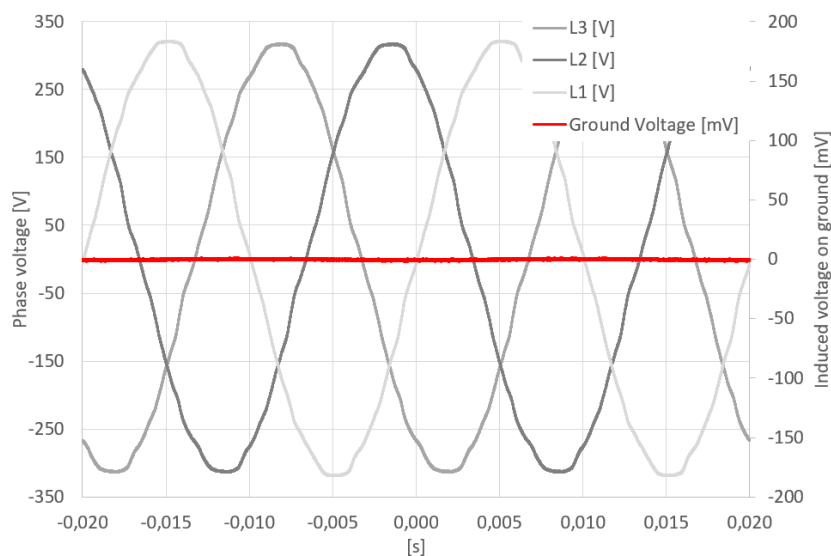
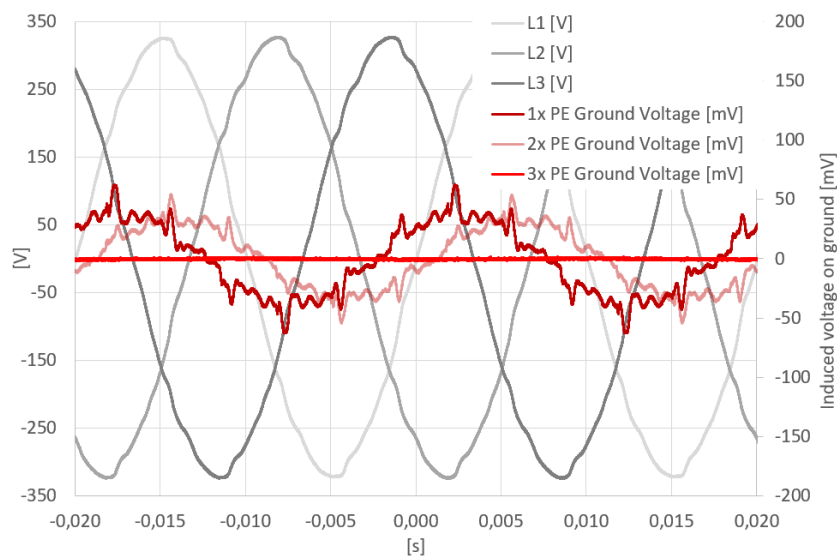
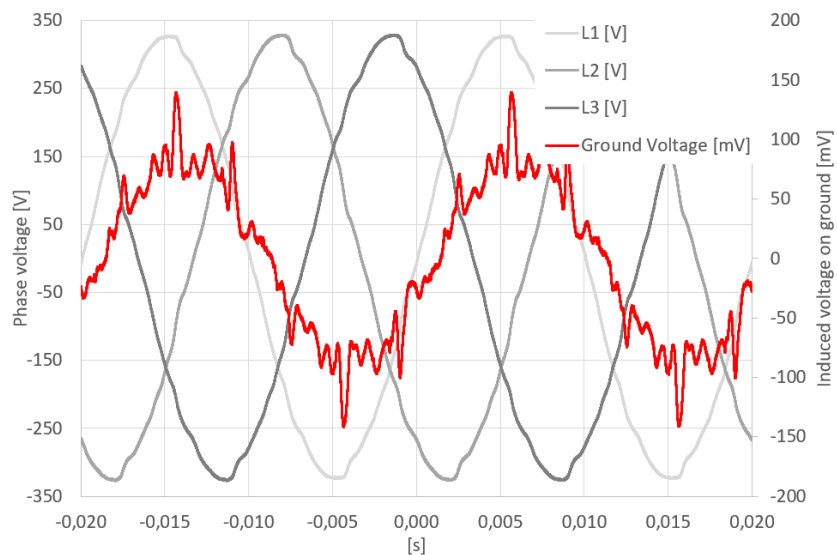


Abbildung 50: Induzierte Spannung auf dem Schutzleiter infolge 3x 400 V, 20 A Last und 50 m Leitungslänge. Oben: ÖLFLEX® SERVO 2YSLCY 4G2.5 Mitte: ÖLFLEX® SERVO 2YSLCY 3X2.5+3G0.5 Unten: ÖLFLEX® SERVO zeroCM 3X2.5+1G2.5

10.6 PE-/PA-Ströme - Messaufbau

Im Arbeitspaket 3 wurde gemeinschaftlich an der Ausarbeitung eines Referenzaufbaus geforscht, um Projektpartner-übergreifend identische Messergebnisse mit kleiner Varianz zu erhalten. Nach erfolgter Bewertung und Einhaltung der gesetzten Ziele hinsichtlich der zulässigen Abweichung und dedizierte Pfade für PE-/PA-Ströme, wurde der Referenzaufbau ergänzt, um die selbst gestellten Anforderungen hinsichtlich Arbeitspaket 4 besser gerecht zu werden.

Abbildung 51 zeigt das Verdrahtungsschema der für AP4 verwendete und angepasste Referenzaufbau. Der Aufbau soll ein Abbild einer typischen Industrieumgebung widerspiegeln. Die Anordnung der Komponenten sind deshalb eingeteilt in Steuerungsseite (typischerweise Schaltschrank), Feld und 50 m Kabeltrasse. Durch Mitführen verschiedener Leitungen oder durch das Anschließen zusätzlicher Potenzialausgleichsleitungen oder Miteinbeziehen des Blech-Kabelkanals (OBO) konnten verschiedene Pfade für PE-/PA-Ströme bereitgestellt, erzwungen und untersucht werden.

Weiterhin wurden verschiedene Leitungstypen sowie der Prototyp ÖLFLEX® SERVO zeroCM hinsichtlich der Ausbildung von PE-/PA-Strömen untersucht. Gemessen wurde am Ausgang des Inverters mit den von der Firma Magnetec bereitgestellten Stromwandlern.

- Differenzstrommessung am Umrichter Ausgang (Phase U, V, W); gemäß Stromwandler / Position L2. Ohne zusätzlichen Potenzialausgleichsleitung 1G10.
- Leitungslänge 50 m, 40 Hz Drehfrequenz.
- Beidseitige 360°-Anbindung des Geflecht-Schirmes. Verwendung Ableitblech am Frequenzumrichter sowie EMV-Metallverschraubung am Motorklemmbrett (SKINTOP® MS-M BRUSH)
- Nullmessung (mit direktem Anschluss des Motors an den Umrichter) wurde allen Messwerten in Abzug gebracht, um nur den Einfluss der Leitung auf PE-/PA-Ströme darzustellen (*Mean RMS -224 mA* und *Mean PEAK -6,0 A*)

Die Einstellungen am Oszilloskop (Tabelle 6) wurden von den gemeinschaftlichen Festlegungen aus AP3 zuerst übernommen, in der weiteren Bearbeitung von AP4 jedoch angepasst bzw. verfeinert. Wichtig erschien, neben den .csv-Datensätzen, welche jeweils die FFT von Antriebs- und Netzseite darstellten, weitere Bewertungsgrößen zu generieren, welche ein schnelles und unkompliziertes Vergleichen der Einstellungen, Erdungsmaßnahmen oder verschiedene Motorleitungen zuließ.

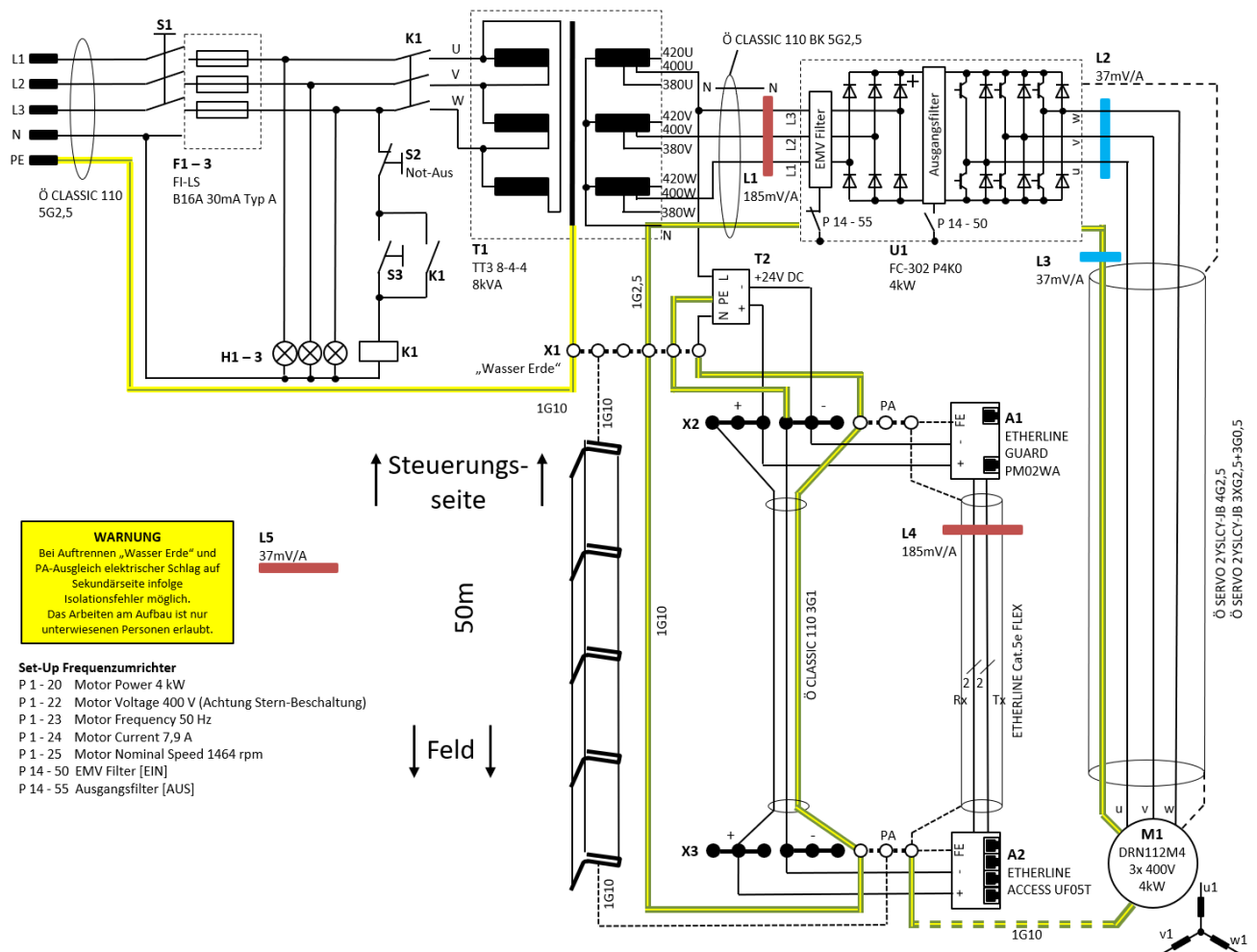


Abbildung 51: Adaptierter Referenzaufbau.

Tabelle 6: Einstellungen und Messvorschrift Oszilloskop

Keysight Infiniium S-Series DSOS104A 1GHz 20GSamples/s und 10-Bit ADC		
Messgröße(n)	Bedeutung	Setting
Zeitbereich, csv.-Werte	AP3	200 ms Beobachtungszeit, 10 MSamples/s, 2 Mpts./s
FFT von Motor- und Netzseite	AP3	0-150 kHz 30 kpts., Hanning, RBW = 7,5 Hz, Detektor = Normal
FFT Motorseite Peak	Einfache Vergleichs- & Bewertungsgröße (= spektrale Hüllkurve)	0-2 MHz, 400 pts., Hanning, RBW = 7,5 kHz, Detektor = pos. Peak
Zeitbereich, Mean RMS Motorseite	Einfache Vergleichs- & Bewertungsgröße (= statistische Auswertung)	200 ms Beobachtungszeit, 10 MSamples/s, 20 MHz Bandbreitenbegrenzung (HW), RMS, Mittelwertbildung nach 1min.
Zeitbereich, Mean Amplitude Motorseite	Einfache Vergleichs- & Bewertungsgröße (= statistische Auswertung)	200 ms Beobachtungszeit, 10 MSamples/s, 20 MHz Bandbreitenbegrenzung (HW), Amplitude, Mittelwertbildung nach 1min.

10.7 Ergebnisse Messungen PE-/PA-Ströme

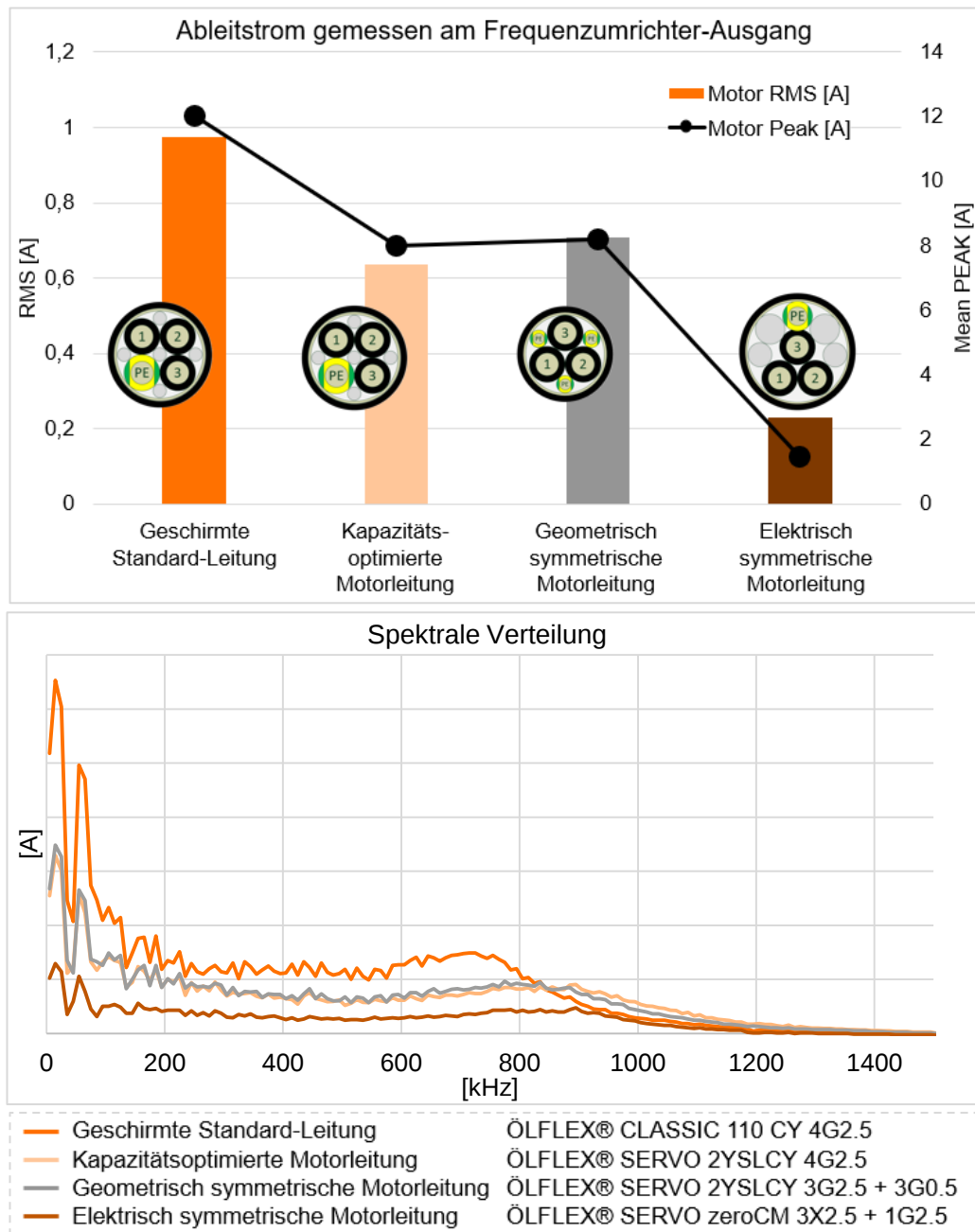


Abbildung 52: Messergebnisse PE-/PA-Ströme am Umrichter-Ausgang mit diversen Leitungstypen.

Kernaussagen:

- Kapazitätsoptimierte Motorleitungen, wie vom Typ 2YSLCY 4G2.5, reduzieren die Entstehung und Ausbreitung von PE-/PA-Strömen um ca. 30% im Vergleich zu einer Standardleitung. Hauptgrund ist die reduzierte elektrische Kopplung (geringere Betriebskapazitäten sowie Kapazitätsbeläge infolge Aderisolation mittels Polyethylen oder Polypropylen).
- Die erdsymmetrische Version der 2YSLCY schneidet in diesem Vergleich schlechter ab als zu Beginn erwartet. Zwar wird durch die quasi-symmetrische Anordnung mit den drei Schutzleitern die magnetische Kopplung verhindert (induzierte Spannungen löschen sich an den Sternpunkten gegenseitig auf), jedoch erhöht sich die elektrische

Verkopplung der Leiter durch die Erhöhung der Kapazitätsbeläge (insbesondere $C'_{\text{Ader/PE}}$), sodass sich insgesamt die Performance gegenüber der vieradrigen 2YSLCY-Version sogar verschlechtert.

- Der Prototyp ÖLFLEX® SERVO zeroCM senkt den kableseitigen Einfluss auf die PE-/PA-Ströme um 80% bezogen auf die PVC-Standardleitung oder um 60% bezogen auf die bereits optimierten Kabeltypen aus der 2YSLCY-Familie.

10.8 Zusammenfassung

- Die Motorleitung ist zwar nicht die Ursache von PE-/PA-Strömen, sie ist jedoch der Ort, wo sowohl die aus der Ansteuerung prinzipbedingten CM-Spannungen als auch induktionsbedingte Spannungsanteile signifikant in das Erd-/Potenzialausgleich-System überkoppeln und parasitäre Störströme verursachen. Das gilt vor allem bei großen Installationslängen.
- Da es viele Möglichkeiten gibt, durch welche Verbindungsart ein Motor mit einem Frequenzumrichter betrieben werden kann, drängt sich die Frage auf, wie sich diverse Leitungstypen klassifizieren lassen. Abbildung 53 gibt eine klare Empfehlung diverser Leitungen hinsichtlich ihrer EMV-Performance innerhalb eines Antriebsstrangs.

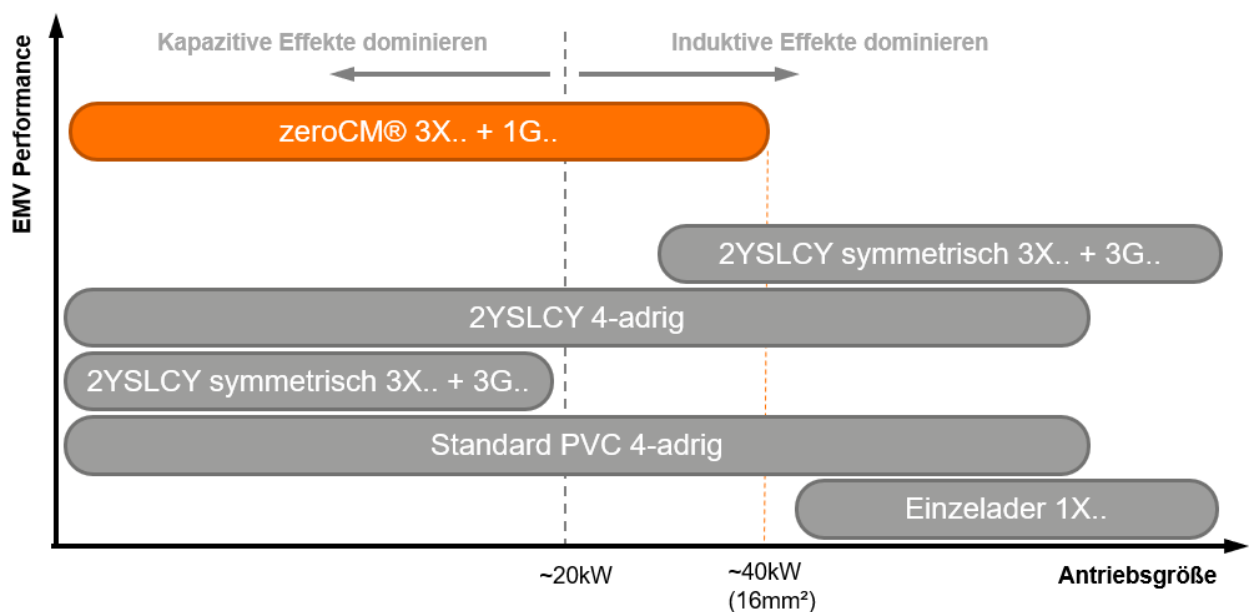


Abbildung 53: Qualitative Beurteilung diverser Leitungskonstruktionen hinsichtlich ihrer EMV-Performance.

- Standard-Leitungen mit PVC-isolierten Leiter werden oft aufgrund ihres günstigen Preises eingesetzt. Wegen ihrer vergleichsweise hohen Kapazitäten ist vom Einsatz als Motorleitung in Verbindung mit Frequenzumrichtern dringend abzuraten.
- Kapazitätsoptimierte Motorleitungen wie Varianten aus der 2YSLCY-Familie senken die elektrische Kopplung.
- Erdsymmetrische Leitungen mit gedritteltem Schutzleiter erweisen sich erst bei großen Anschlussleistungen / Antriebsgrößen als vorteilhaft (magnetische Kopplung / induktives Verhalten). Bei kleinen und mittleren Antrieben bewirken die erhöhten Kapazitätsbeläge eine Verschlechterung im Vergleich zu den vieradrigen Typen.

- Das neuartige Verseilkonzept des Prototyps ÖLFLEX® SERVO zeroCM eliminiert die magnetische Kopplung innerhalb der Leitung und reduziert die elektrische Kopplung auf ein Minimum. Zusammengefasst können so die rein leitungsbasierten Anteile der PE-/PA-Ströme sowohl am Ausgang des Umrichters als auch im Systemumfeld (bspw. parallele Datenleitung) um bis zu 80% reduziert werden (im Vergleich zur Standard-Leitung, je nach Installationslänge und Antriebsgröße). Weitere vorteilhafte Eigenschaften sind die verringerten Umladeströme, welche Ausgangsstufen von Umrichter (IGBT) weniger stark belasten. Daraus folgen verringerte Emissionswerte bezüglich der leitungsgeführten Störaussendung (gemäß EN 61800-3) oder die Möglichkeit längere Leitungslängen bei gleicher EMV-Konformität verlegen zu können. Bei langen Leitungslängen und hoher Ampere-Last sorgt die spezielle Verseilung dafür, dass sich auf dem Erdpotenzial entlang der Leitung keine Spannungspegel aufbauen / bzw. induziert werden. Dieser Effekt ist unabhängig von der Anwendung / dem Betrieb mittels Frequenzumrichtern, jedoch vor allem dort vorteilhaft, wo beispielsweise analoge Sensorik eingesetzt wird.
- Die der Vollständigkeit halber erwähnte Einzelader-Verdrahtung, welche teilweise bei sehr großen Anschlussleistungen zum Einsatz kommt, wurde innerhalb des Forschungsprojekts nicht bewertet. Da die Adern jedoch keine feste geometrische Beziehung zueinander aufweisen, ist zu erwarten, dass die induktionsbedingten PE-/PA-Ströme sehr groß werden. Aus elektrischer Sicht ist von der Verwendung eher abzuraten.
- Generell sollte das Schirmgeflecht der Motorleitung großflächig und niederimpedant an die Komponenten angebunden werden. Dadurch stellt das Schirmgeflecht einen bevorzugten und dedizierten Pfad für PE-/PA-Störströme dar. Durch diese Maßnahme wird vermieden, dass die Störströme durch das Erdungs- und Potenzialausgleichsnetzwerk innerhalb Maschinen und Anlagen vagabundieren und ggfs. Schäden oder Störungen hervorrufen.

11 Erstellung von Modellbibliotheken sowie einer Modellierungsumgebung (TU DA)

Kurzfassung

Ziel dieses Arbeitspakets ist es, alle wesentliche Komponente in dem Referenzaufbau zu modellieren und die essenziellen Effekte für die Ausbreitung der PE-/PA-Ströme zu identifizieren. Alle modellierten Komponenten sind:

- CM-Störquellen (Gleichrichter und Wechselrichter)
- Trenntrafo
- EMV-Filter
- Elektrische Maschinen
- Leitungen (mit und ohne Schirm)

Für die netzseitigen Probleme wurde ein 3-Phasen-Modell implementiert, um die Nichtlinearität des Magnetmaterials und des Gleichrichters genauer untersuchen zu können. Für die motorseitigen Probleme wurde ein 1-Phase-CM-Modell verwendet, um eine exakte Simulation im höheren Frequenzbereich zu ermöglichen. Alle Modelle wurden validiert, indem die Modelle den Referenzaufbau nachbildeten und die Simulationsergebnissen mit den Messergebnissen bei dem Referenzaufbau verglichen wurden.

Die in diesem Arbeitspaket erstellte Modellbibliothek wurde für weitere Untersuchungen in anderen Arbeitspaketen verwendet.

11.1 Charakterisierung und Modellierung der netzseitigen Komponenten im Zeitbereich

11.1.1 3-phasiges Modell

Um die folgenden netzseitigen Probleme genauer zu analysieren, wurde ein 3-Phasen-Modell auf der Netzseite in PLECS implementiert:

- Wirkung von Oberschwingungen
- die gemessene Verschiebung des Resonanzpunktes von 1,65 kHz auf 1,35 kHz.

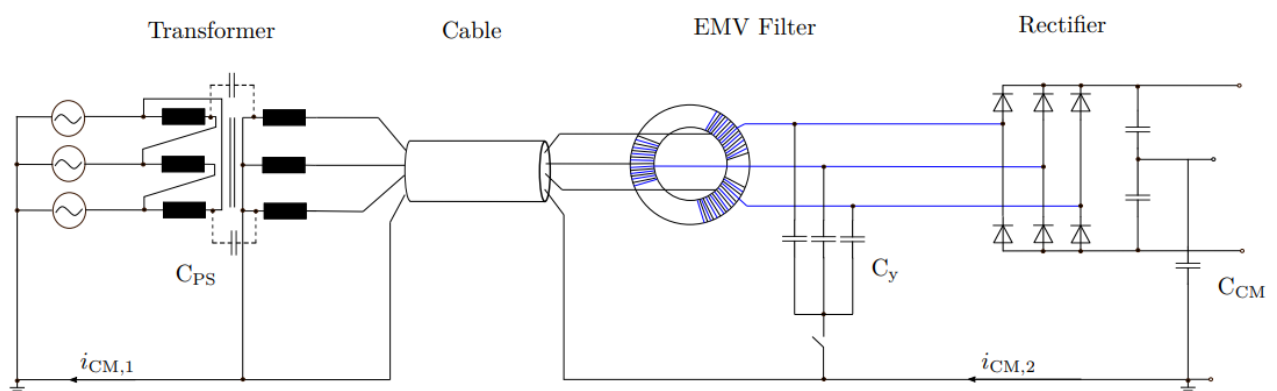


Abbildung 54: Gesamte Struktur des netzseitigen Modells

11.1.2 Modellierung des Transformators

Zunächst werden die Einflüsse des Transformators auf CM-Ströme unter Verwendung des auf Permeanz-Kapazitäts-Analogie basierenden Transformatormodells analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. In diesem Kapitel wird nur das für CM wichtige Äquivalente Kapazitätsmodell vorgestellt. Das gesamte Modell inkl. Kern-Modell ist in [7] beschrieben.

Tabelle 7: Analyse der Einflüsse von Transformer auf CM

CM – Wirkung	CM – evtl. vernachlässigbarer Effekt (abhängig von der Schaltgruppe)	CM – keine Wirkung
Kondensator zwischen Primär- und Sekundärseite	- Kondensator zwischen Phase und Erde - Streuinduktivität	- Sättigung - Hysterese - Wirbelstrom

Abbildung 55 zeigt den Aufbau eines Transformators mit Wicklungen und parasitären Kapazitäten. Vier Schichten werden für eine Phase gezeichnet, um die Kapazitätsverteilung zwischen den Wicklungen darzustellen. Die inneren Schichten L_{P1} und L_{P2} sind die primären Wicklungsschichten und die äußeren Schichten L_{S1} und L_{S2} sind die sekundären Wicklungsschichten. Aufgrund der Spulenkörper und Isolierung sind die Wicklungs-zu-Kern-Kapazitäten normalerweise viel kleiner als die Wicklungs-zu-Wicklungs-Kapazitäten [8]. Für den uns interessierenden Frequenzbereich können die parasitären Kapazitäten als Lumped Parameters angenommen werden. In dieser Arbeit werden fünf signifikante Kapazitäten wie folgt definiert, und das äquivalente Kapazitätsmodell ist in Abbildung 56 dargestellt.

- C_{PS} : stellt die Summe der Kapazitäten zwischen Primär- und Sekundärwicklung dar (L_{P2} und L_{S1}). Es wird normalerweise zu gleichen Teilen in C_{PS+} und C_{PS-} unterteilt.
- C_{PN} , C_{SN} : stellt die Summe der Kapazitäten zwischen der Primärseite und dem Kern bzw. der Sekundärseite und dem Kern dar.
- C_{P12} , C_{S12} : stellt die Summe der Kapazitäten zwischen verschiedenen Primär- und Sekundärwicklungen (L_{P1} und L_{P2} , L_{S1} und L_{S2}) dar.

Da die parasitären Kapazitäten nicht direkt gemessen werden können, wurden die fünf definierten Kapazitäten anhand von fünf Messungen indirekt gemessen und umgerechnet. Während dieser Messungen werden die Wicklungen sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärseite für jede Phase kurzgeschlossen, wie in Abbildung 57 (a) gezeigt [9]. Neben der Erdung gibt es nun insgesamt 6 Ports (P_1 , P_2 , P_3 und S_1 , S_2 , S_3). Die Messung wurde zwischen Port A und Port B mit einem Vektornetzwerkanalysator (VNA) durchgeführt. Das äquivalente Ersatzschaltbild von M1 ist in Abbildung 57 (b) dargestellt. Die frequenzabhängige Kapazität lässt sich aus der gemessenen Impedanz berechnen nach:

$$C(f) = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot \Im m(Z)} \quad (5)$$

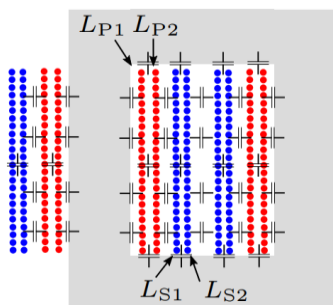


Abbildung 55: Parasitäre Wicklungskapazitäten im Transformator (Halbfenster)

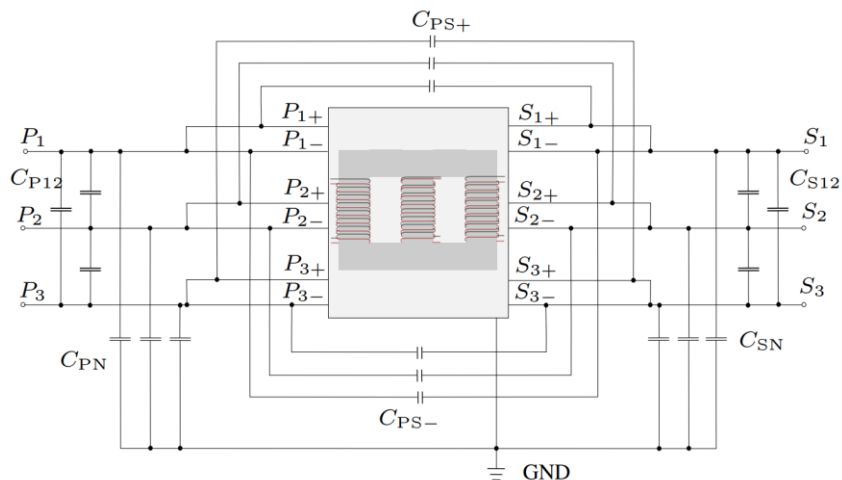
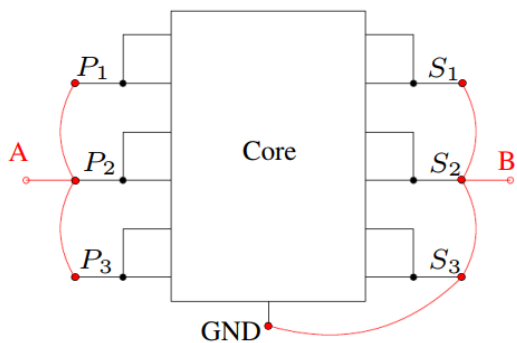
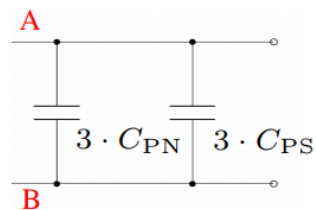


Abbildung 56: Äquivalentes Kapazitätsmodell des Transformators



(a). Messung 1

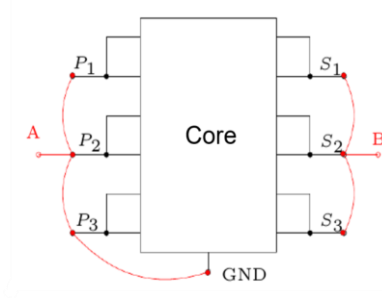


(b). Ersatzschaltbild der Messung 1

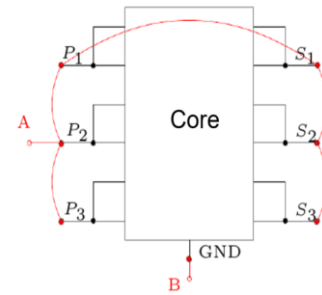
Abbildung 57: Indirekte Messung der parasitären Kapazität 1

Die Verbindung der anderen vier Messungen ist in Abbildung 58 dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Kapazitäten für jede der obigen Messungen ist wie in (6) dargestellt:

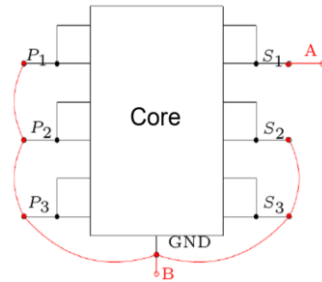
$$\begin{aligned} C_{M1} &= 3 \cdot (C_{PN} + C_{PS}) \\ C_{M2} &= 3 \cdot (C_{SN} + C_{PS}) \\ C_{M3} &= 3 \cdot (C_{SN} + C_{PN}) \\ C_{M4} &= 2 \cdot C_{P12} + (C_{PN} + C_{PS}) \\ C_{M5} &= 2 \cdot C_{S12} + (C_{SN} + C_{PS}) \end{aligned} \quad (6)$$



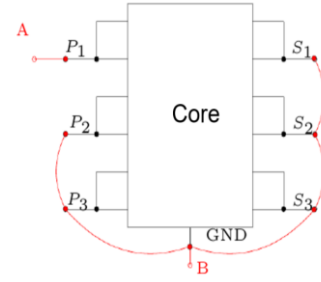
(a) Messung 2



(b) Messung 3



(c) Messung 4



(d) Messung 5

Abbildung 58: Indirekte Messung der parasitären Kapazität 2

Tabelle 8: Die Ergebnisse der gemessenen und umgerechneten Kapazitäten

Gemessene Kapazitäten [nF]		Umgerechnete Kapazitäten [nF]	
C_{M1}	3.16	C_{PS+}, C_{PS-}	0.385
C_{M2}	2.5	C_{PN}	0.27
C_{M3}	0.85	C_{SN}	0.05
C_{M4}	1.22	C_{P12}	0.083
C_{M5}	0.87	C_{S12}	0.018

Alle gemessenen Werte und umgerechneten Kapazitäten sind in der Tabelle dargestellt. Die gemessenen Kapazitätswerte sind in dem stationären Bereich der Messkurven im Frequenzbereich von etwa 10 kHz entnommen. Um die Zuverlässigkeit des erhaltenen Kapazitätsmodells zu verifizieren, werden die Messergebnisse mit dem PLECS-Modell verglichen, ein Beispiel siehe Abbildung 59. Zusätzlich wurden die Wicklungswiderstände mit zwei DC-Messungen ermittelt: $R_{pri} = 0.37 \Omega$, $R_{sec} = 0.16 \Omega$.

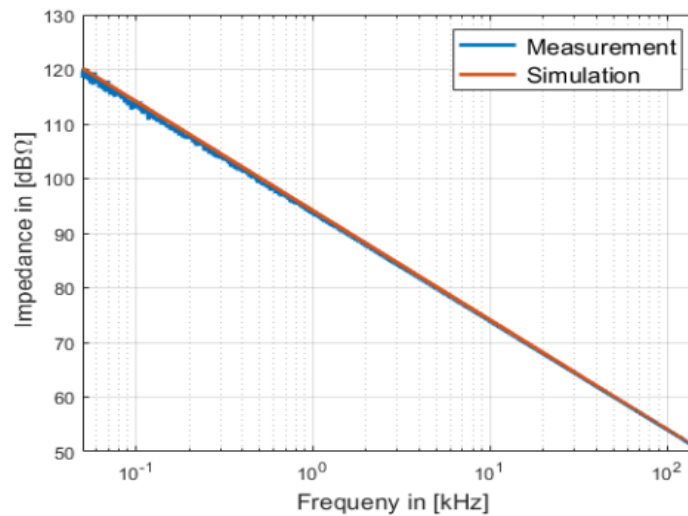


Abbildung 59: Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnis für Messung 1

Tabelle 9: Die Ergebnisse des Oberschwingungsverhaltens

Oberschwingungen auf der Primärseite	Oberschwingungen auf der Sekundärseite	Oberschwingungen in CM-Spannungen/-Ströme
Nullsystem (3, 9, 15, ..., 6n - 3)	-	3, 9, 15, ..., 6n - 3
Gegensystem (, 11, 17, ..., 6n - 1)	5, 11, 17, ..., 6n - 1	vernachlässigbar
Mitsystem (7, 13, 19, ..., 6n + 1)	7, 13, 19, ..., 6n + 1	vernachlässigbar

Die Wicklungskapazitäten, insbesondere die Kapazität zwischen Primär- und Sekundärseite (C_{PS}), dominieren den CM-Strom im niederfrequenten Bereich. Der CM-Strom kann nach Gl. (7) berechnet werden: (für die analysierte Schaltgruppe Dy5)

$$i_{CM,1} = 3 \cdot U_n \cdot (C_{PS} + C_{PN}) \cdot 2\pi f_N \cdot n \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_N \cdot t) \quad n = 3, 9, 15 \dots \quad (7)$$

f_N ist die Netzfrequenz, n ist die Ordnung der Oberschwingung und U_n ist die Amplitude der n Oberschwingung.

11.1.3 Modellierung der Netz-Leitung (ungeschirmte Leitung)

Auf der Netzseite werden eine 20 m lange, ungeschirmte 2.5 mm² Leitung verwendet. In dem uns interessierenden niedrigen Frequenzbereich kann das Lumped Γ -Modell zum Einsatz kommen. Die Parameter des Leitungen-modells werden durch das FEMM-Modell (Abbildung 60) identifiziert.

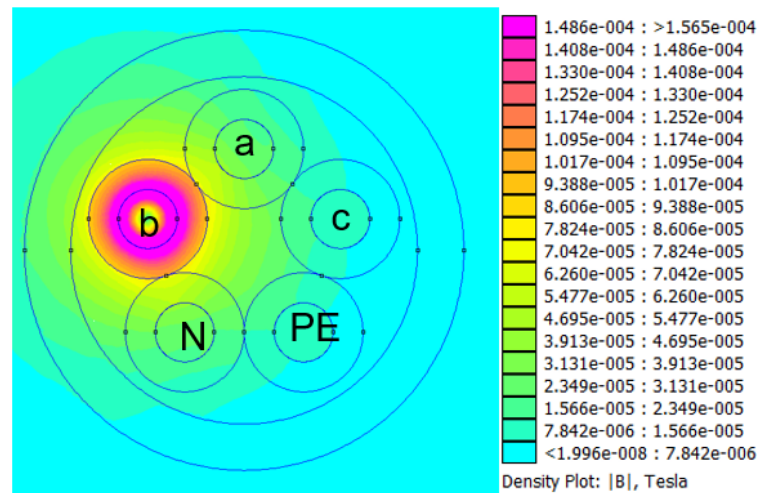


Abbildung 60: Querschnitt der Netz-Leitung/ FEM Modell bei 5 kHz in FEMM

Das Γ -Modell und die abgeleiteten Parameter sind in Abbildung 61 und Tabelle 10 gezeigt. C_{11} und M_{11} sind jeweils die kapazitive/magnetische Kopplung zwischen Ader a und b, was gleich der kapazitiven/magnetischen Kopplung zwischen Ader a und c bzw. zwischen Ader c und PE. C_{12} und M_{12} sind jeweils die kapazitiven/magnetische Kopplung zwischen Ader a und c, bzw. die kapazitive/magnetische Kopplung zwischen Ader b und c, a und PE, b und PE.

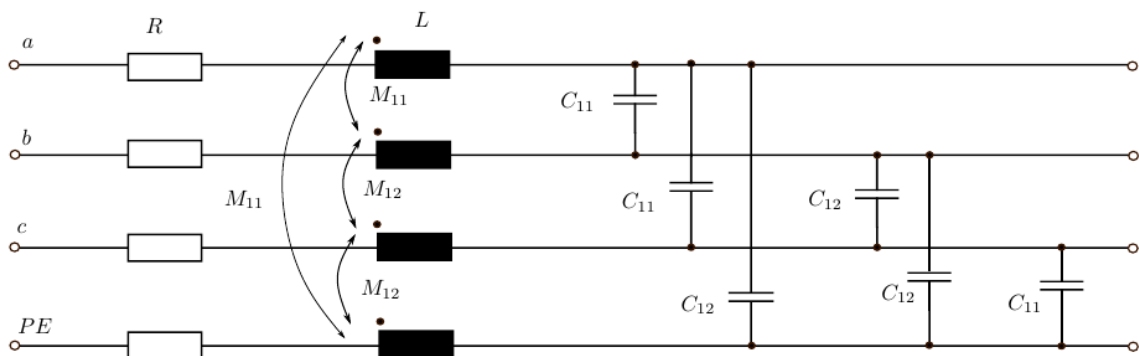


Abbildung 61: Lumped Γ -Modell in PLECS

Tabelle 10: Parameters des Lumped Leitung-Modells

Widerstand [Ω]		Induktivitätsbelag [nH/m]		Kapazitätsbelag [pF/m]	
R	0,2	L	348	C_{11}	62
		M_{11}	76 (22%)	C_{12}	7,8
		M_{12}	35 (10%)		

11.1.4 Modellierung des EMV Filters

Die beobachtete Verschiebung des Resonanzpunktes von 1.65 kHz auf 1.35 kHz ist auf die unterschiedlichen PE-/PA-Ströme und die nichtlineare Magnetisierung des Kernmaterials zurückzuführen. Das Modell für die angewendeten EMV Filter bzw. das magnetische Modell für den Kern ist in Abbildung 62 gezeigt.

$$L_{EMV}$$

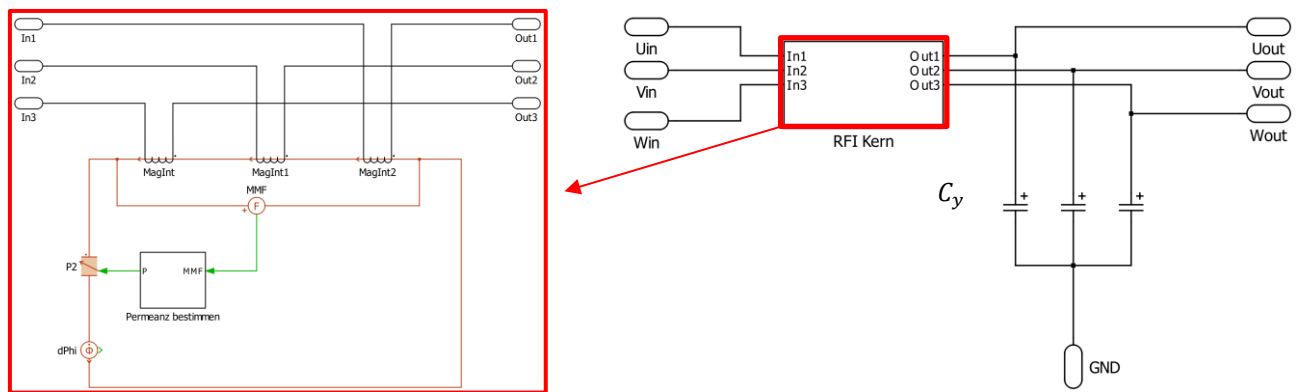
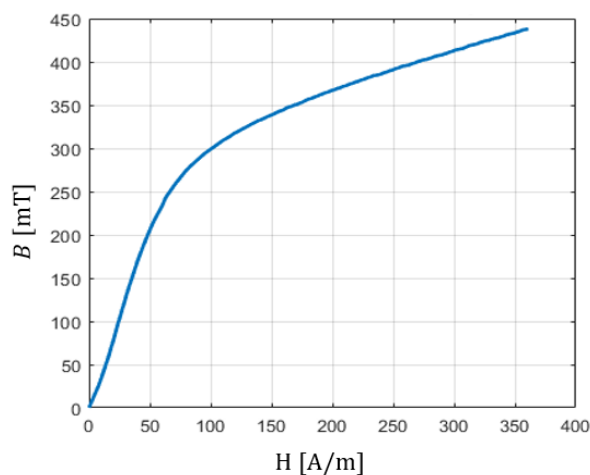
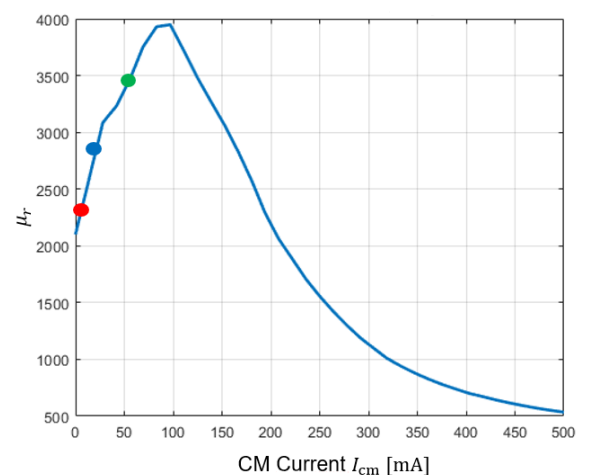


Abbildung 62: EMV Filter Modell in PLECS



(a) Gemessener Hysteresis-Schleife



(b) Gemessene Amplitude-Permeabilität in Abhängigkeit vom Strom

Abbildung 63: Messergebnisse für K2006

Die X-Induktivitäten (L_{EMV}) variieren mit den Lastzuständen aufgrund unterschiedlicher Ströme und nichtlinearer Magnetisierung. Diese Induktivität wurde durch Messungen bestimmt. Die Messergebnisse der Magnetisierung-Schleife bzw. der Amplituden-Permeabilität vom Kernmaterial K2006 sind in Abbildung 63 dargestellt.

Tabelle 11: Parameter des Simulationsmodells

	CM Strom	Permeabilität	Induktivität L_{EMV}
Standby	15 mA	2200 (rot)	5.6 mH
0 Hz	60 mA	3383 (grün)	8.8 mH
40 Hz	27 mA	2850 (blau)	7.5 mH

Die Werte der X-Induktivitäten L_{EMV} für die drei analysierten Betriebspunkte sind in Tabelle 11 aufgelistet ($C_y = 470$ nF). Die Simulationsergebnisse werden mit Messungen abgeglichen,

wie in Abbildung 64 gezeigt. Es ist zu sehen, dass die Simulationen mit den Messergebnissen übereingestimmt haben.

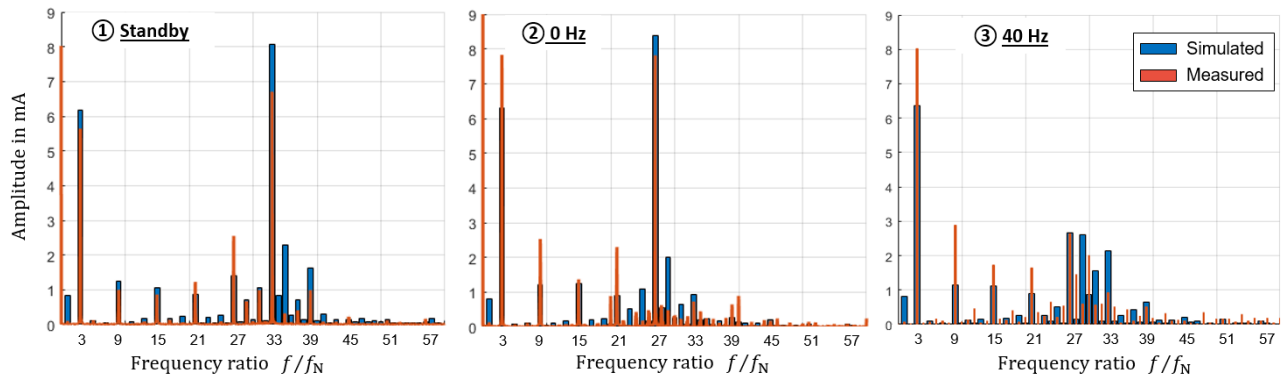


Abbildung 64: Vergleich der CM-Ströme zwischen Simulation und Messung

11.1.5 Modellierung des Gleichrichters

11.1.5.1 Simulationsmodell des Gleichrichters

Bisher wird das Gleichrichter-modell vom Simulationstool PLECS verwendet, wie in Abbildung 65 gezeigt.

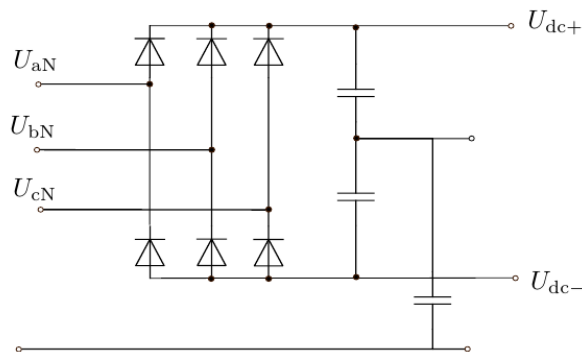


Abbildung 65: Gleichrichter-Modell im Zeitbereich in PLECS

Im Zeitbereich lassen sich die CM- und DM-Spannung (ZK-Spannung) nach Gl. (8) und (9) numerisch berechnen [10] :

$$U_{DC} = U_{DC+} - U_{DC-} \quad (8)$$

$$U_{CM} = \frac{U_{DC+} + U_{DC-}}{2} \quad (9)$$

U_{DC+} , U_{DC-} sind die positive und negative ZK-Spannung und können bestimmt werden nach:

$$U_{DC+} = \max(U_{aN}, U_{bN}, U_{cN}) \quad (10)$$

$$U_{DC-} = \min(U_{aN}, U_{bN}, U_{cN}) \quad (11)$$

U_{aN} , U_{bN} , U_{cN} sind die Außenleiterspannungen.

In beiden positiven und negativen Zwischenkreisspannungen existieren Oberschwingungen von Vielfachen von 3 (3, 6, 9, ..., 3n). Die ZK-Spannung, oder die DM-Spannung des Dioden-

Gleichrichters, besteht aus 6 Impulsen über jede Periode, wobei einer von jeder Phase in jeder Halbperiode (6, 12, 18, ..., 6n) erzeugt wird. Die an der ZK-Kapazität auftretende CM-Spannung enthält jedes Nullsystem von Harmonischen (3, 9, 15 ..., 6n - 3). Es ist ersichtlich, dass der Gleichrichter ein nichtlineares System für die CM/DM-Spannungen ist, das nicht durch die herkömmliche Superposition analysiert werden kann. Dennoch soll das nichtlineare System mithilfe der Fourier-Analyse nachfolgend analysiert werden.

11.1.5.2 Vorgeschlagenes mathematisches Modell des Gleichrichters

Nach der Fourier-Analyse können die positiven und negativen ZK-Spannungen dargestellt werden als:

$$u_{dc,p,k}(t) = c_{p,0} + \sum_k c_{p,k} \cdot e^{jk\omega t} \quad (12)$$

$$u_{dc,n,k}(t) = c_{n,0} + \sum_k c_{n,k} \cdot e^{jk\omega t} \quad (13)$$

$c_{p,0}$ und $c_{p,k}$ sind jeweils der DC-Anteil und AC-Anteil der komplexe Fourier Koeffizienten.

Der AC-Anteil der komplexen Fourier-Koeffizienten von $u_{dc,p,k}(t)$ und $u_{dc,n,k}(t)$ werden als Matrix $\mathbf{C}_p$ und $\mathbf{C}_n$ definiert:

$$\mathbf{C}_p^T = [c_{p,3} \quad c_{p,6} \quad c_{p,9} \quad \dots \quad c_{p,k}] \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_n^T = [c_{n,3} \quad c_{n,6} \quad c_{n,9} \quad \dots \quad c_{n,k}] \quad (15)$$

Die dreiphasige Netzspannung kann als Fourier-Reihe in spektraler Darstellung geschrieben werden:

$$u_m(m, v) = \sum_v \sqrt{2} U_{N,v} \cdot \cos \left\{ v \cdot \left[2\pi f_N \cdot t + (m-1) \cdot \frac{2\pi}{3} \right] - \varphi_v \right\} \quad (16)$$

v ist die Ordnung der Oberschwingung und $v = 1, 3, 5, \dots$ und $U_{N,v}$ ist der Effektivwert. f_N ist 50 Hz und φ_v ist der Anfangswinkel der Grund- und Oberschwingungen. $m = 1, 2, 3$ sind jeweils für Phase a, b und c.

Die Fourier-Koeffizienten der Eingangsspannung (Phase a) wird als Matrix $\mathbf{U}$ definiert:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \frac{U_1}{U_1} \\ \frac{U_1}{U_1} \\ \vdots \\ \frac{U_1}{U_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{N,1} \cdot e^{-j\varphi_1} \\ U_{N,3} \cdot e^{-j3\varphi_3} \\ \vdots \\ U_{N,v} \cdot e^{-jv\varphi_v} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$\mathbf{U}$ ist die Fourier-Koeffizienten-Matrix. Der Effektivwert und der Anfangswinkel der Grund- und Oberschwingungen bis zu v ($v = 1, 3, 5, \dots$) werden angegeben.

- **Berechnung des DC Anteils der Fourier-Koeffizienten-Matrix:**

Sowohl $c_{p,0}$ als auch $c_{n,0}$ können nach die Fourier Analyse Definition bestimmt werden:

$$c_{p,0} = -c_{n,0} = c_{n,0,1} \cdot \sqrt{2}U_{N,1} + c_{p,0,v} \cdot \sqrt{2}U_{N,v} \cdot \cos(v \cdot \Delta\varphi_v) \quad (18)$$

Wobei $\Delta\varphi_v = \varphi_1 - \varphi_v$ nur das Mit- und Gegensystem der Harmonischen der Gleichspannung ändert, sind die Ergebnisse in Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Die Ergebnisse der Koeffizienten des DC-Anteils

Input	$c_{p,0,v}$	$c_{n,0,v}$
Fundamental ($v = 1$)	$\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2\pi}$	$-\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2\pi}$
Nullsystem ($v = 6n - 3$)	-	-
Gegensystem ($v = 6n - 1$)	$\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2\pi} \cdot \cos(\frac{v+1}{6} \cdot \pi)$	$-\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2\pi} \cdot \cos(\frac{v+1}{6} \cdot \pi)$
Mitsystem ($v = 6n + 1$)	$\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2\pi} \cdot \cos(\frac{v-1}{6} \cdot \pi)$	$-\frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2\pi} \cdot \cos(\frac{v-1}{6} \cdot \pi)$

- **Berechnung des AC Anteils der Fourier-Koeffizienten-Matrix:**

Zur Bestimmung der Fourier-Koeffizienten-Matrizen C_p und C_n werden zwei Hilfsmatrizen $A(\alpha_{k,v})$ und $B(\beta_{k,v})$ jeweils für positive bzw. negative ZK-Spannungen definiert, die die Kopplung zwischen der Eingangsspannung (Außenleiterspannungen) und den beiden ZK-Spannungen darstellen. Der Index von $\alpha_{k,v}$ und $\beta_{k,v}$ stellt die k - Oberschwingungskomponente in ZK-Spannungen dar, die durch die v - Oberschwingungskomponente in Außenleiterspannungen verursacht werden.

$$A(\alpha_{k,v}) = C_p \cdot U^{-1} \quad (19)$$

$$B(\beta_{k,v}) = C_n \cdot U^{-1} \quad (20)$$

Wie in Abbildung 66 gezeigt, wenn die Eingangsspannung rein sinusförmig ist und das Intervall zwischen zwei Kommutierungen 120° beträgt, kann die Fourier-Analyse für jedes Intervall verwendet werden. Die Nullsystemharmonischen bewirken nur eine Anhebung der drei Außenleiterspannungen, die Kreuzungspunkte von Kommutierungsvorgängen ändern sich nicht. Wenn Mit- oder Gegensystem vorhanden sind, können sich die Kreuzungspunkte je nach Winkel der Eingangsharmonischen verschieben, und es ist nicht möglich, die Beziehung zwischen ihnen analytisch zu bestimmen. Für die folgende Fourier-Analyse wird angenommen, dass die Kreuzungspunkte unverändert bleiben, d. h. die Fourier-Analyse kann immer auf dem 120° -Intervall durchgeführt werden.

Nach der Fourier-Analyse kann die Matrix der komplexen Fourier-Koeffizienten Matrizen C_p und C_n als Gl. (21) und Gl. (22). Die Koeffizienten in der ersten Spalte (①) werden durch die Grundwelle der Eingangsspannung verursacht, während die Spalten (②) bis (④) durch das Null-, Gegen- und Mitsystem der vorhandenen Harmonischen in der Eingangsspannung verursacht werden. Die Ergebnisse der Koeffizienten $\alpha_{k,v}$, $\beta_{k,v}$ werden nach Gl. (7)-(9), die Ergebnisse sind in

Tabelle 13 aufgelistet.

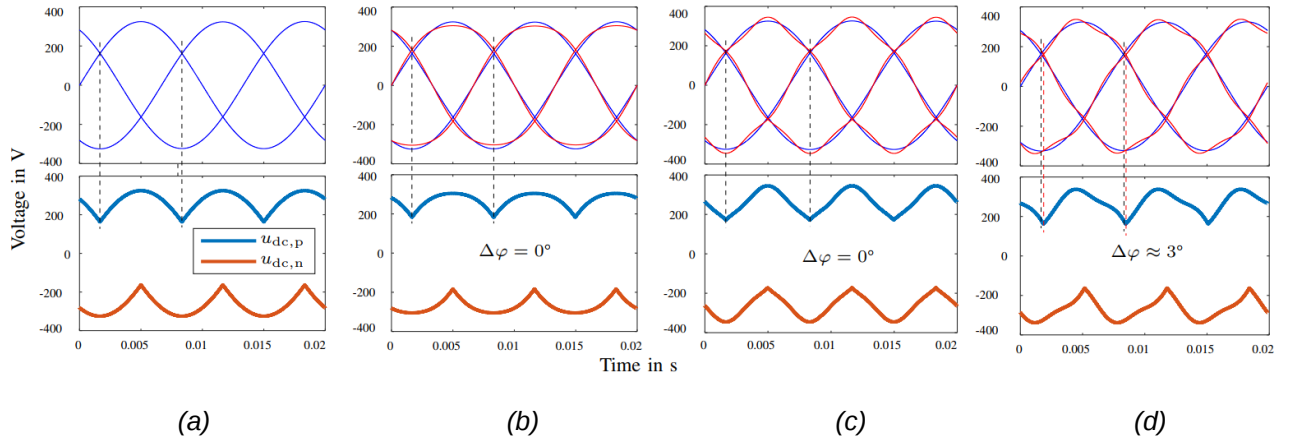


Abbildung 66: Zusammenhang zwischen Außenleiterspannungen und ZK-Spannungen ((a) Idealfall; (b) inkl. 3. Oberschwingung; (c)(d) inkl. 5. Oberschwingung)

$$\mathbf{C}_p = \begin{bmatrix} c_{p,3} \\ c_{p,6} \\ c_{p,9} \\ \vdots \\ c_{p,3n} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \alpha_{3,1} & \dots & \alpha_{3,6n-3} & \alpha_{3,6n-1} & \alpha_{3,6n+1} \\ \alpha_{6,1} & \dots & \alpha_{6,6n-3} & \alpha_{6,6n-1} & \alpha_{6,6n+1} \\ \alpha_{9,1} & \dots & \alpha_{9,6n-3} & \alpha_{9,6n-1} & \alpha_{9,6n+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{3n,1} & \dots & \alpha_{3n,6n-3} & \alpha_{3n,6n-1} & \alpha_{3n,6n+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{U_1}{U_1} \\ \frac{U_1}{U_1} \\ \vdots \\ \frac{U_1}{U_1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{C}_n = \begin{bmatrix} c_{n,3} \\ c_{n,6} \\ c_{n,9} \\ \vdots \\ c_{n,3n} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \beta_{3,1} & \dots & \beta_{3,6n-3} & \beta_{3,6n-1} & \beta_{3,6n+1} \\ \beta_{6,1} & \dots & \beta_{6,6n-3} & \beta_{6,6n-1} & \beta_{6,6n+1} \\ \beta_{9,1} & \dots & \beta_{9,6n-3} & \beta_{9,6n-1} & \beta_{9,6n+1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{3n,1} & \dots & \beta_{3n,6n-3} & \beta_{3n,6n-1} & \beta_{3n,6n+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{U_1}{U_1} \\ \frac{U_1}{U_1} \\ \vdots \\ \frac{U_1}{U_1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Tabelle 13: Die Ergebnisse der Koeffizienten des AC-Anteils

Input	$\alpha_{p,0,v}$	$\beta_{n,0,v}$
Fundamental ($v = 1$)	$-\frac{1}{2} \cdot \cos(k\pi) \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi(k^2 - 1)}$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi(k^2 - 1)}$
Zero-sequence ($v = 6n - 3$)	$\frac{1}{2} \cdot \cos(\frac{v+3}{6} \cdot \pi)$	$\frac{1}{2} \cdot \cos(\frac{v+3}{6} \cdot \pi)$
Neg.- sequence ($v = 6n - 1$)	$-\frac{1}{2} \cdot \cos(\frac{v+1}{6} \cdot \pi) \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot v}{\pi(k^2 - v^2)}$	$\frac{1}{2} \cdot \cos(\frac{v+1}{6} \cdot \pi) \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot v}{\pi(k^2 - v^2)}$
Pos.-sequence ($v = 6n + 1$)	$-\frac{1}{2} \cdot \cos(\frac{v-1}{6} \cdot \pi) \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot v}{\pi(k^2 - v^2)}$	$-\frac{1}{2} \cdot \cos(\frac{v-1}{6} \cdot \pi) \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot v}{\pi(k^2 - v^2)}$

Es ist zu erkennen, dass die geradzahigen OS in den beiden ZK-Spannungen immer gegenphasig sind und nur durch Subtraktion in der DM-Spannung erhalten bleiben, während die ungeradzahigen Anteile in den ZK-Spannungen gleichphasig sind und nur verbleiben in der CM-Spannung durch Addition. Folglich enthält die CM-Spannung ungeradzahige Oberschwingungen der ZK-Spannung, also 3, 9, 15, ..., $6n - 3$. Neben den DC-Anteilen

enthält die DM-Spannung geradzahlige Oberschwingungen, also $6, 12, 18, \dots, 6n$. Dieses Ergebnis stimmt mit den Simulationsergebnissen im Zeitbereich (in vorherigen Abschnitt) überein. Daher kann die Kopplungsmatrix ($\mathbf{\Lambda}$ und $\mathbf{D}$) zwischen der CM-/DM-Spannung und der Eingangsphasenspannung als Gl. (23) abgeleitet werden.

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_3 \\ \lambda_9 \\ \vdots \\ \lambda_{6n-3} \end{bmatrix} = \frac{c_p + c_n}{2}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_6 \\ d_{12} \\ \vdots \\ d_{6n} \end{bmatrix} = c_p - c_n \quad (23)$$

Die Koeffizienten λ_{6n-3} und d_{6n} sind der Mittelwert und der Differenzwert von bzw.

Der durch den DC-Zwischenkreis fließende CM-Strom kann als Gl. (26) dargestellt werden:

$$i_{CM,2} = \sum_3^{2k-1} k \cdot 2\pi f_N \cdot C_{CM} \cdot U_{CM,k} \quad (24)$$

C_{CM} ist die Kapazität zwischen dem DC-Link-Mittelpunkt und Erde.

Die Ergebnisse der Simulation, Messungen und der vorgeschlagenen Berechnung sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14: Die Ergebnisse der Simulation, Messungen und der vorgeschlagenen Berechnung

CM Spannung in V			
Frequenz [Hz]	Messung	Simulation	Berechnung
150	66.7	68.1	68.1
450	8.6	8.9	8.55
750	2.65	2.27	2.3
1050	1.27	1.37	1.37
1350	0.86	0.81	0.81
1650	0.44	0.54	0.54
1950	0.37	0.39	0.39

11.2 Modellierung des PE-/PA Strom generiert von dem Umrichter bis 150 kHz im Frequenzbereich

Das Schaltverhalten des Wechselrichters erzeugt eine unerwünschte Gleichtaktspannung im Sinne von Gleichung (1). Diese Gleichtaktspannung stellt die Spannung des Sternpunkts des Systems gegenüber Erde dar. Die Gleichtaktspannung koppelt über die parasitären Kapazitäten und induktiven Komponenten des Systems in das System ein und lässt einen Strom durch Schirm und PE zur Erde fließen. Dieser Strom wird in diesem Aufsatz als PE-/PA-Strom definiert. Die PE-/PA-Ströme können durch jedes mit Erde verbundene Bauteil

fließen. Um sein Verhalten zu analysieren, ist daher eine Modellierung des gesamten Systems erforderlich.

Die Analyse des Bezugssystems erfolgt motorseitig im Frequenzbereich. Es ist notwendig, den Motor, die Leitung und den Umrichter in einem Frequenzbereich bis 150 kHz darzustellen.

11.2.1 Modellierung des Umrichters

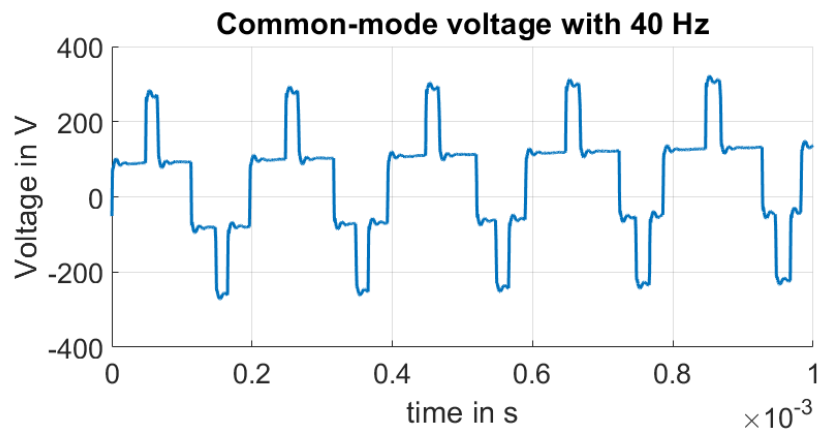


Abbildung 67: Gleichtaktspannung des Umrichters

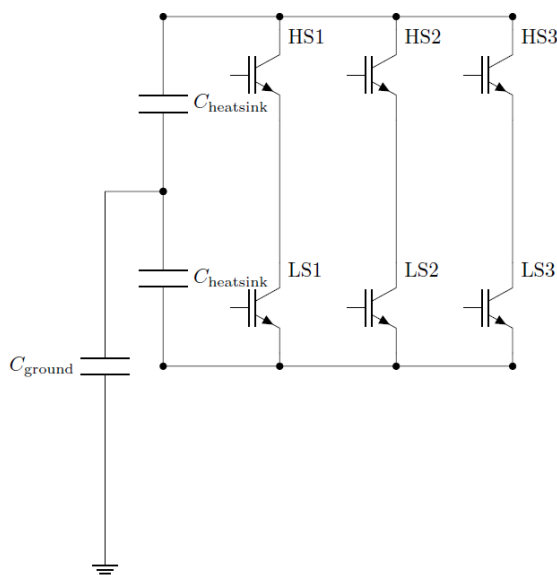


Abbildung 68: Kapazität des Zwischenkreises

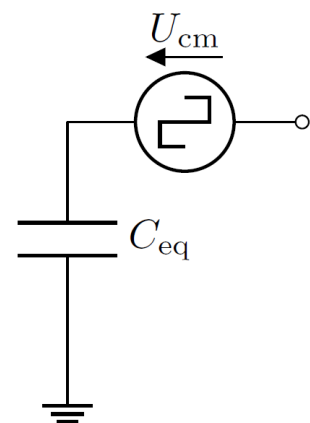


Abbildung 69: Gleichtaktäquivalent des Systems

Der für das Projekt in der Referenz verwendete Konverter wird von Danfoss bereitgestellt. Ein Beispiel für die Gleichtaktspannung des Wechselrichters ist in Abbildung 67 dargestellt. Die Danfoss-Modulationstechnik basiert auf einem SVPWM, der mit IGBTs mit antiparallelen Dioden verwendet wird. Um die Gleichtaktspannung zu simulieren, reicht es

aus, die erforderliche Modulationstechnik und den Zwischenkreisspannungspegel zu verwenden.

In Bezug auf die PE-/PA-Ströme spielt die Kapazität zwischen dem Mittelpunkt des Zwischenkreises und der Erde eine Rolle. Der für den Aufbau verwendete Umrichter hat zwischen Sternpunkt und Erde eine Kapazität wie in Abbildung 68. Daher muss die Kapazität C_{ground} hinzugefügt werden, da diese Kapazität der Hauptpfad für den PE-/PA Strom ist. Das Ersatzschaltbild ist im Falle eines Gleichtaktäquivalents das folgende in Abbildung 69.

Der Wert der Kapazität ist durch die folgende Gleichung gegeben.

$$C_{\text{eq}} = C_{\text{ground}} \parallel 2C_{\text{heatsink}} \quad (25)$$

Die Kapazität gegen Erde ist in der Regel deutlich kleiner als die Kühlkörperkapazität. Daher kann in erster Näherung nur die Erdkapazität betrachtet werden.

Die Gleichtaktspannungsquelle wird durch Verwendung einer klassischen Raumzeigermodulation erhalten. Um die Genauigkeit bei höheren Frequenzen über 500 kHz zu erhöhen, müssen Anstiegs- und Abfallzeiten berücksichtigt werden. Bis 150 kHz wird das Spektrum der Gleichtaktspannung hauptsächlich von der erforderlichen Ausgangsfrequenz sowie der Schaltfrequenz beeinflusst. Das dem Danfoss-Wandler zugeordnete Spektrum der Gleichtaktspannung ist in Abbildung 70 und Abbildung 71 im Zeitbereich und in Abb. Abbildung 72 und Abbildung 73 im Frequenzbereich dargestellt.

Im Zeitbereich ist zu sehen, dass die Gleichtaktspannung während ihres Betriebs von $+\frac{U_{\text{DC}}}{2}$ auf $-\frac{U_{\text{DC}}}{2}$ springt. Bei höherer Drehzahl des Motors springt die Gleichtaktspannung beim Schalten von $+\frac{U_{\text{DC}}}{2}$ auf $-\frac{U_{\text{DC}}}{6}$. Daher ist eine höhere Amplitude für die erste Harmonische zu erwarten. Die höhere Rotationsgeschwindigkeit hat eine niedrigere Gleichtaktspannung.

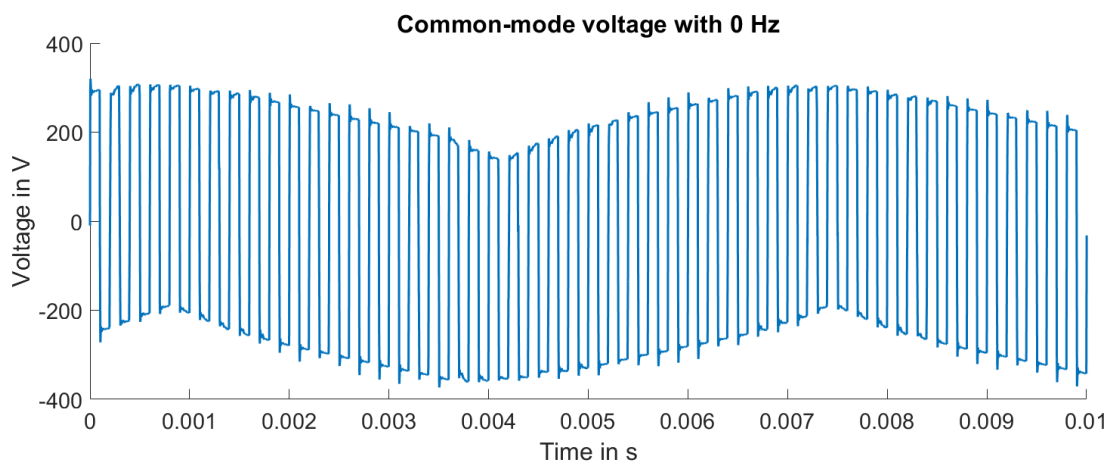


Abbildung 70: Gleichtaktspannung mit 0 Hz Drehzahl

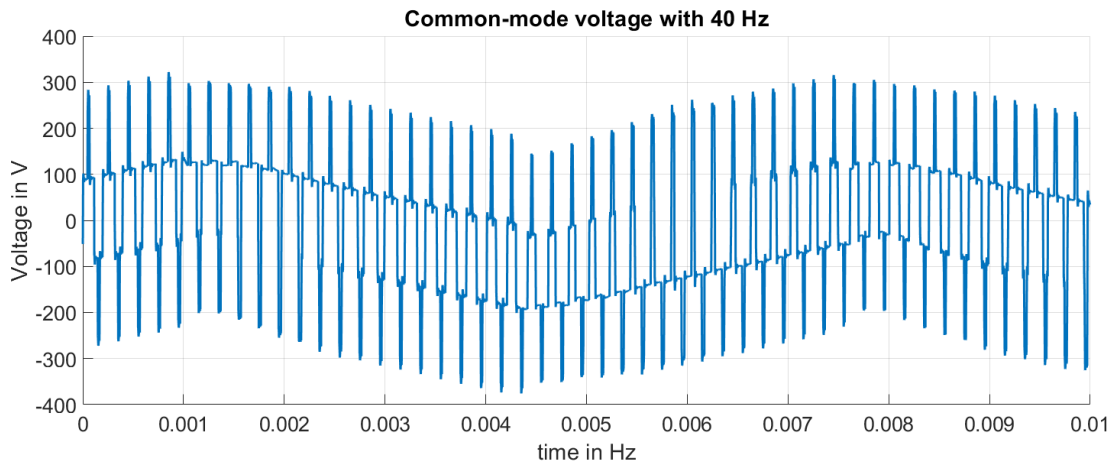


Abbildung 71: Gleichtaktspannung mit 40 Hz Drehzahl

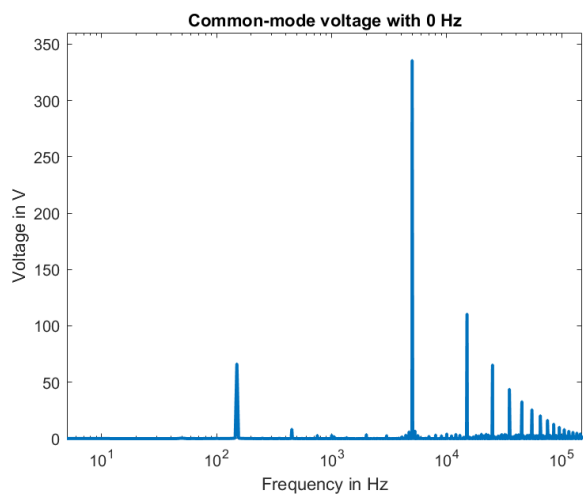


Abbildung 72: Fourier-Transformation der Ausgangsspannung mit 0 Hz Drehzahl

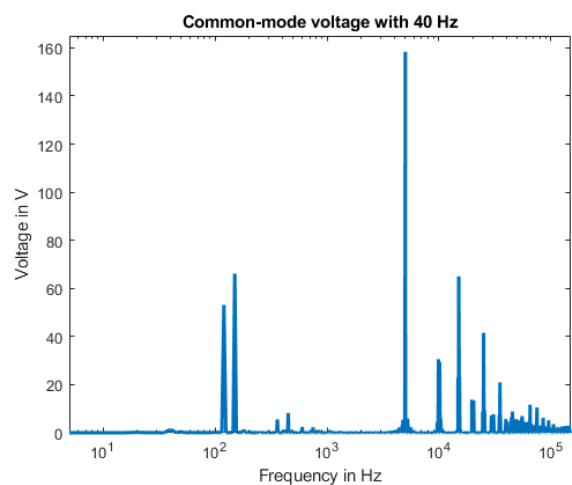


Abbildung 73: Fourier-Transformation der Ausgangsspannung mit 40 Hz Drehzahl

11.2.2 Modellierung des Motors

Viele verschiedene Modelle stehen zur Verfügung, da der Motor eine der relevantesten Ausbreitungspfade für PE-/PA- Strömen ist. In der Darstellung wird der Motor vereinfacht durch eine Gleichtakt-äquivalente Schaltung. Die kapazitiven Pfade des Motors sind die folgenden:

1. Stator Wicklungen zu Gehäuse
2. Stator Wicklungen zu Rotor
3. Rotor zu Gehäuse
4. Lager Kapazitäten

Die Analyse des Motors wurde durchgeführt, indem ein Verhaltensmodell des Motors im Frequenzbereich von 150 Hz bis 150 kHz entwickelt wurde.

Zur Entwicklung des Gleichtaktmodells des Motors sind Messungen des Gleichtaktmodells und des Gegentaktmodells erforderlich, wie in [11] erläutert. Die Messung der

Gleichtaktimpedanz erfolgt durch Kurzschließen der drei Außenleiter und Messung der Impedanz mit einem Netzwerkanalysator wie in Abbildung 74. Die Messung der Gegentaktimpedanz erfolgt, indem zwei Außenleiter kurzgeschlossen und zwischen ihnen und der dritten gemessen wird, wie in Abbildung 75 gezeigt.

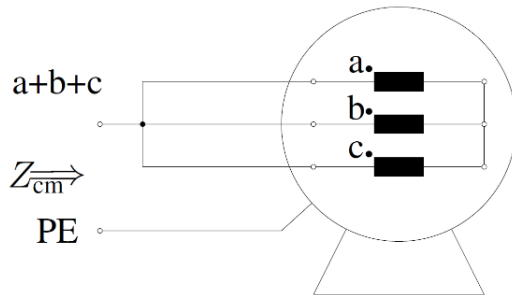


Abbildung 74: Messung der Gleichtaktimpedanz des Motors

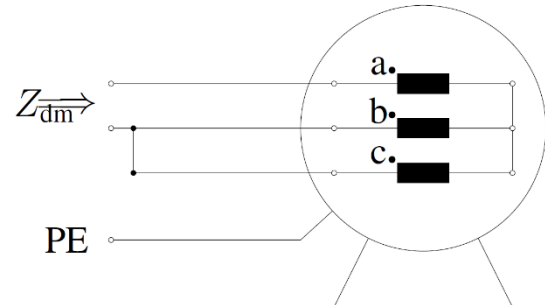


Abbildung 75: Messung der Gegentaktimpedanz des Motors

Die gemessenen resultierenden Gleich- und Gegentaktimpedanzen sind in Abbildung 76 dargestellt. Das zur Darstellung der Gleichtaktimpedanz verwendete Ersatzschaltbild ist in Abbildung 77. Die Formeln zur Ableitung der Parameters für die Ersatzschaltung sind in den folgenden Gleichungen gezeigt (26)-(36).

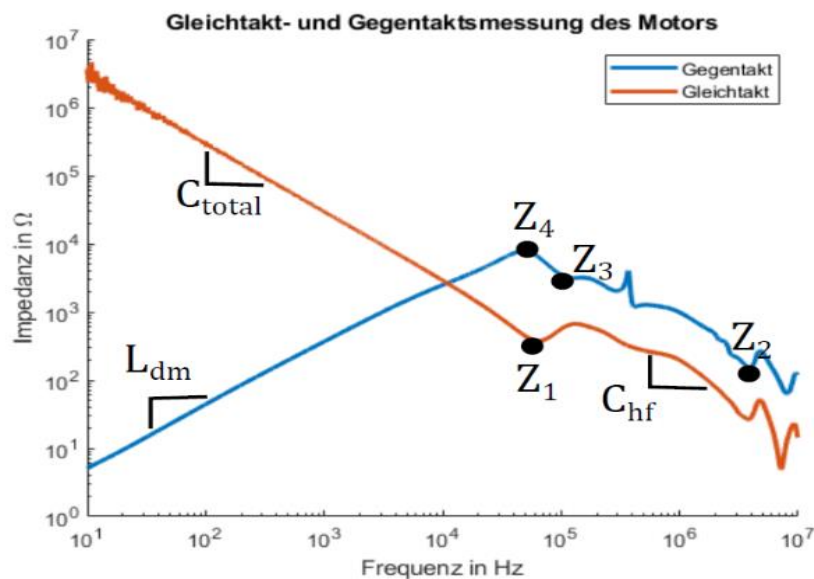


Abbildung 76. Darstellung der Gleichtakt- und Gegentaktimpedanz des Motors

$$C_{g1} = \frac{1}{3} C_{HF} \quad (26)$$

$$C_{g2} = \frac{1}{3} (C_{total} - C_{HF}) \quad (27)$$

$$R_{g1} = \frac{2}{3} Z_3 \quad (28)$$

$$R_{g2} = 3Z_1 \quad (29)$$

$$R_e = \frac{2}{3} Z_4 \quad (30)$$

$$R_e = \frac{2}{3} Z_4 \quad (31)$$

$$C_t = \frac{1}{10} (C_{g1} + C_{g2}) \quad (32)$$

$$L_t = \frac{1}{4\pi^2 C_t f_2^2} \quad (33)$$

$$R_t = Z_2 \quad (34)$$

$$L_c = \frac{1}{4\pi^2 C_{g1} f_3^2} \quad (35)$$

$$L_{CM} = \frac{1}{12\pi^2 C_{g2} f_1^2} \quad (36)$$

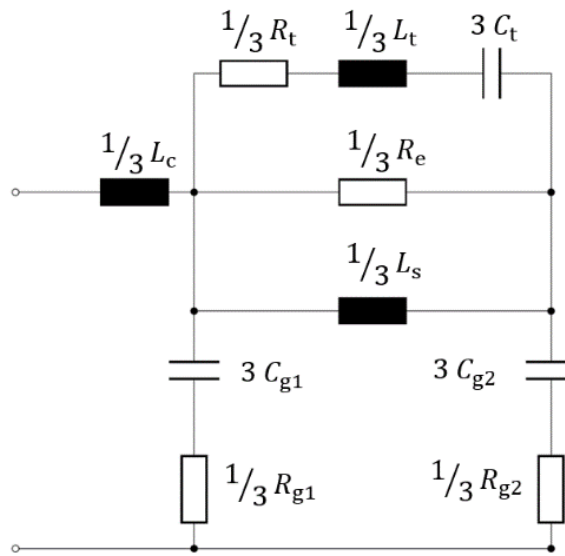


Abbildung 77. Äquivalente Gleichtakt-Ersatzschaltung des Motors

Der Vorteil dieses Ersatzschaltbildes besteht darin, dass jedem Bauteil eine physikalische Bedeutung im Motor zugewiesen werden kann [11]. Die Kapazitäten C_{g1} und C_{g2} sind den Kapazitäten zwischen den Außenleitern und Erde und dem Neutraleiter und Erde zugeordnet. Die zugeordneten Widerstände sind dem Skin- und Proximity-Effekt-Widerständen zugeordnet. Die Hauptinduktivität L_s repräsentiert die Streuinduktivität der Statorwicklung. Der Widerstand R_e repräsentiert hochfrequente Wirbelstromverluste. Der dritte parallele Zweig basierend auf R_t , L_t und C_t wird für die Modellierung der Gegentaktimpedanz in für den hochfrequenten Bereich benötigt. Dieser Zweig kann daher bei der Analyse für die PE-/PA-Ströme weggelassen werden. L_c ist der Statorstreuinduktivität zugeordnet und erst ab 150 kHz relevant.

Die Impedanz L_s wird modifiziert, um das frequenzabhängige induktive Verhalten darstellen zu können. Diese Art der Modifikation ist nur notwendig, wenn das Ziel darin besteht, auch Gegentaktsignale darzustellen.

Das Ersatzschaltbild für die Motorinduktivität L_{DM} ist in Abbildung 78 dargestellt.

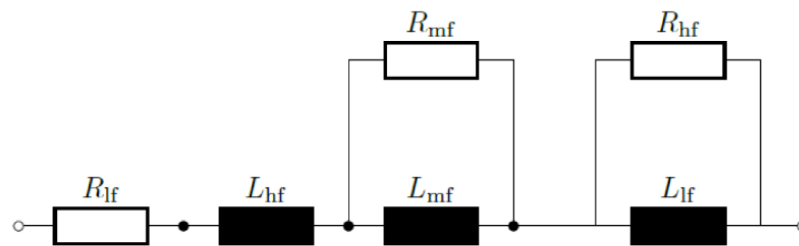


Abbildung 78. Äquivalente Schaltung der Induktivität des Motors

Tabelle 15: Werte des Ersatzschaltbildes des Motors

L_c [nH]	R_e [k Ω]	C_{g2} [nF]	R_{g2} [k Ω]	R_{g1} [Ω]	C_{g1} [nF]	R_t [k Ω]	L_t [mH]	C_t [nF]
770.24	5.19	1.28	1.14	41.84	0.513	3.16	9.8	1.76

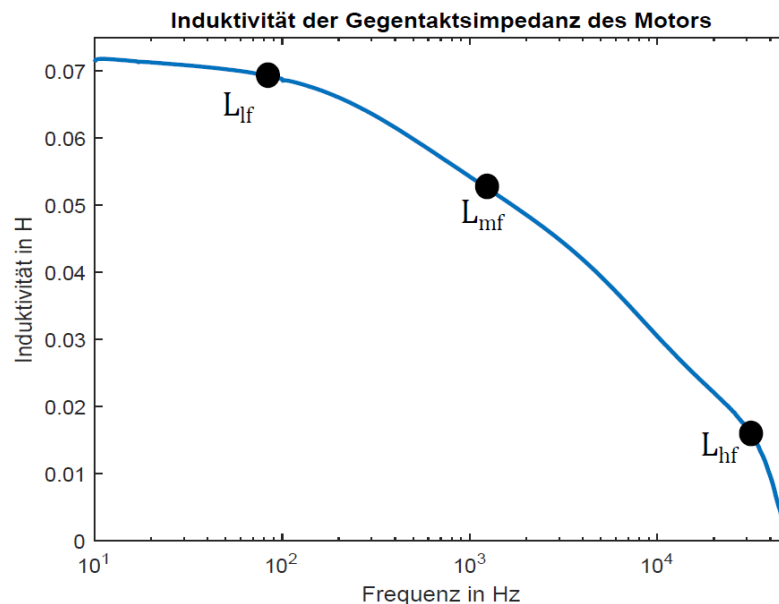


Abbildung 79: Induktivität der Gegenimpedanz des Motors

Die Werte für das Ersatzschaltbild in Abbildung 78 können bestimmt werden, indem drei Punkte der gemessenen differentiellen Induktivität verwendet werden, wie in Abbildung 79 gezeigt. Die Ergebnisse des Gegentaktsäquivalents sind in der folgenden Abbildung 80 dargestellt.

Tabelle 16: Parameters der Induktivität des Motors

$R_{lf} [\Omega]$	$R_{mf} [\Omega]$	$R_{hf} [\Omega]$	$L_{lf} [\text{mH}]$	$L_{mf} [\text{mH}]$	$L_{hf} [\text{mH}]$
2.39	5.36	6.11	56.4	14.6	0.12

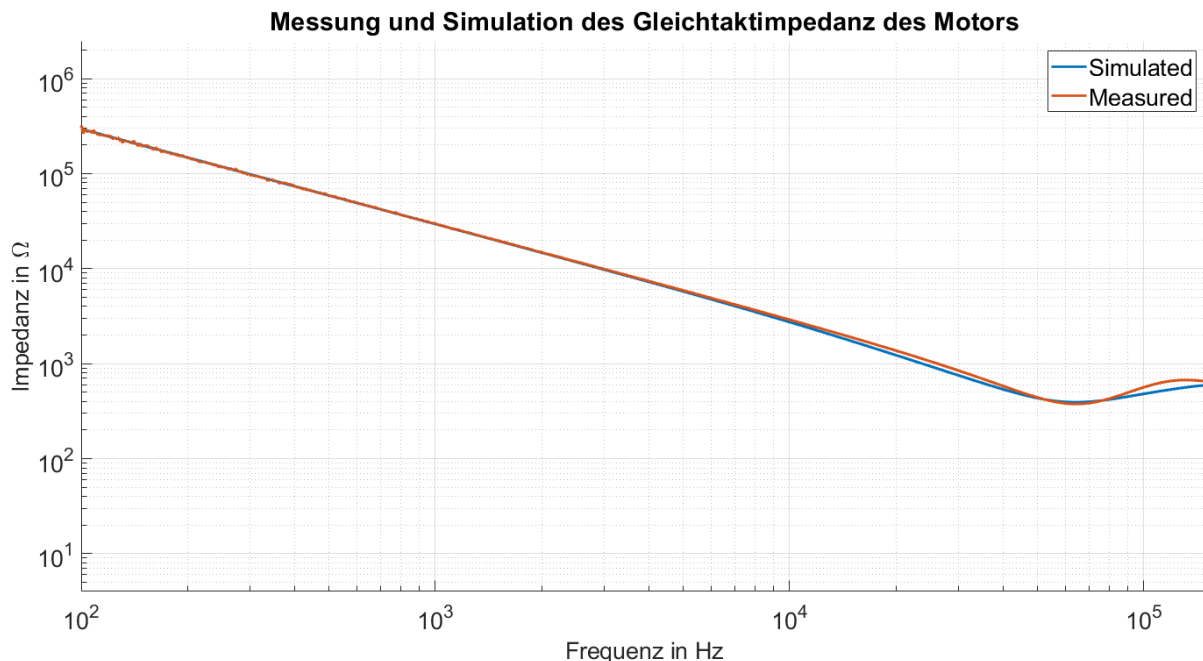


Abbildung 80: Beschreibung der Impedanz des Motors mit den Modell sowie gemessener Verlauf

11.2.3 Modellierung der Leitung

Durch die Länge der genutzten Leitungen werden die PE-/PA-Ströme beeinflusst. Daher ist es wichtig, die relevanten Eigenschaften der Leitungen zu definieren, die sich auf die PE-/PA-Ströme auswirken. In Abbildung 81 ist der Querschnitt einer typischen geschirmten Leitung dargestellt.

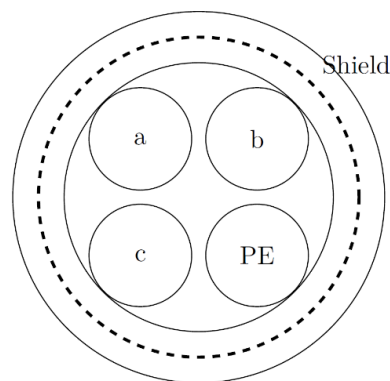


Abbildung 81: Querschnitt der Leitung

Normalerweise ist auf der Motorseite eine abgeschirmte Leitung erforderlich, um sicherzustellen, dass die Verwendung des Motors keine EMV-Probleme bei höheren

Frequenzen verursacht. Die Verwendung der geschirmten Leitung bietet gleichzeitig zusätzliche Ausbreitungswege. Daher ist es notwendig, die Impedanz der Leitung für das Gleichtaktsystem darzustellen. Die Darstellung der Leitung kann als Übertragungsleitung erfolgen, wenn nur die drei Außenleiter sowie PE und Schirm betrachtet werden. Der PE-Leiter und der Schirm stellen einen Weg für den Rückfluss der PE-/PA-Ströme bereit, daher können PE und Schirm in erster Näherung als kurzgeschlossen betrachtet werden, was allerdings über 150 kHz nicht mehr der Fall ist.

Die Übertragungsleitung wird dann durch die Gleichtaktimpedanz der drei Außenleiter und PE und Schirm als Rückweg dargestellt. Die Länge der Leitung beträgt 50 Meter. Ziel des Projektes ist es, den Gleichtaktstrom bis 150 kHz darzustellen. Daher ist eine konzentrierte Elementdarstellung ausreichend, weil die Wellenlänge der Signale deutlich (Faktor 10) über der Länge der Leitungen liegt:

$$\lambda_{\max} = \frac{v_c}{f_{\max}} = \frac{200 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{150 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = 1330 \text{ m} \quad (37)$$

$$l_{\text{cable}} < \frac{\lambda_{\max}}{10} \quad (38)$$

Das äquivalente π -Modell der Leitung ist in Abbildung 82 dargestellt.

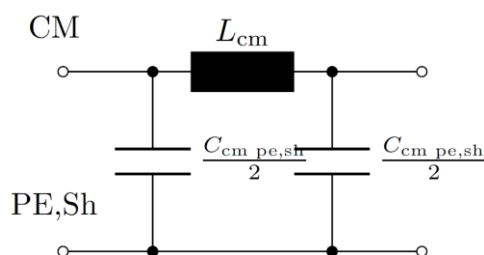


Abbildung 82: Äquivalente Modell der Leitung

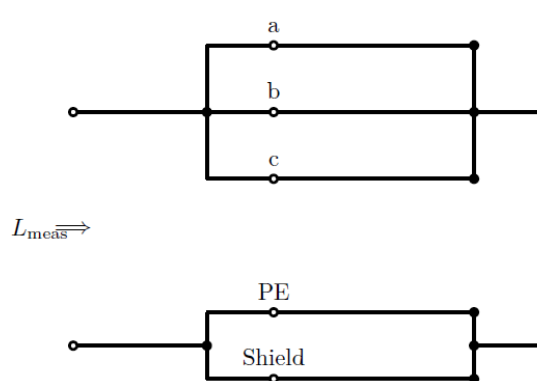


Abbildung 83: Messung des CM- Induktivitätsbelag der Leitung

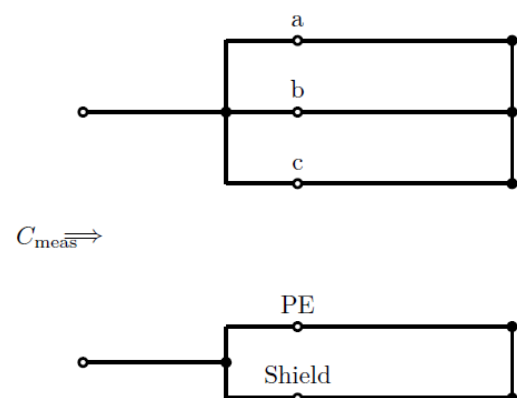


Abbildung 84: Messung des CM- Kapazitätsbelag der Leitung

Die Übertragungsleitung wird durch eine Induktivität dargestellt, die die induktive Kopplung zwischen den drei Außenleiter und PE und Schirm darstellt, und durch zwei Kapazitäten, die die kapazitive Kopplung darstellen.

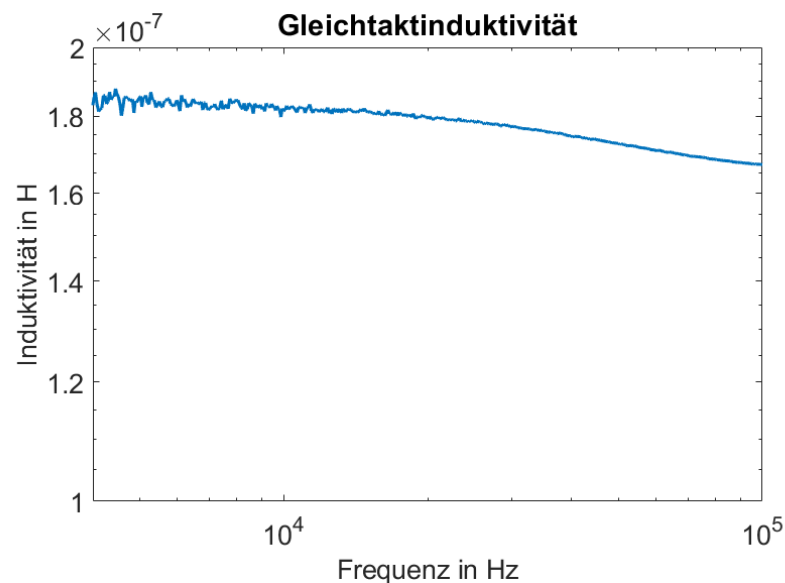


Abbildung 85: Gemessener Induktivitätsbelag der Leitung

Die Messung der induktiven Anteile erfolgt durch Kurzschließen der drei Außenleiter sowie des PE-Leiters und des Schirms. Anschließend werden die beiden Enden, wie in Abbildung 83 dargestellt, kurzgeschlossen und die Messung mit einem Netzwerkanalysator durchgeführt. Dieser Wert für die Induktivität gilt nur, wenn der Stromrückweg aus Schirm und PE besteht. Der Wert der Induktivität ist in Abbildung 85 dargestellt.

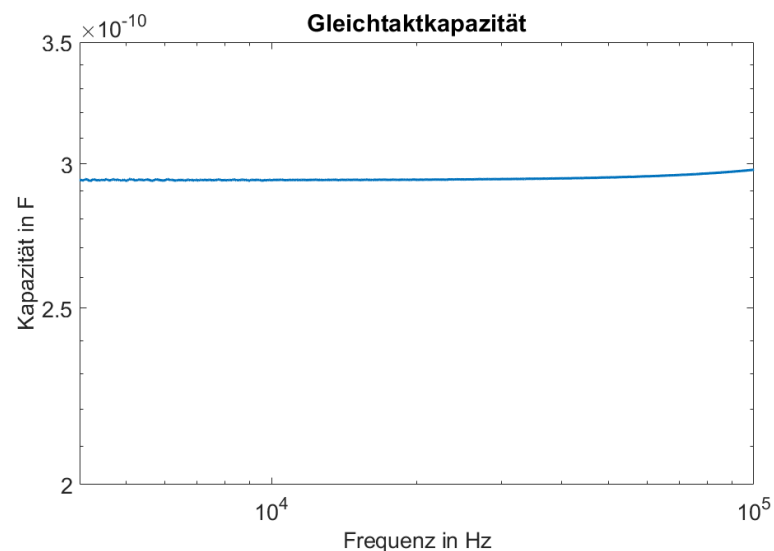


Abbildung 86: Gemessene Gleichtaktkapazität

Man kann durch die Messung in Abbildung 84 die Kapazität erhalten. Die gemessenen Werte der Gleichtakt-Kapazität sind in Abbildung 86 dargestellt.

Die Werte des π -Modells für die 50 Meter Leitung sind in der folgenden Tabelle angegeben.

Tabelle 17: Werte der Induktivität und der Kapazität der Leitung

$L_{cm} \left[\frac{nH}{m} \right]$	$C_{cm,pe,sh} \left[\frac{pF}{m} \right]$
177.8	294

11.2.4 Simulation der PE-/PA-Ströme

Das Ersatzschaltbild des Gesamtsystems ist in Abbildung 87 gezeigt.

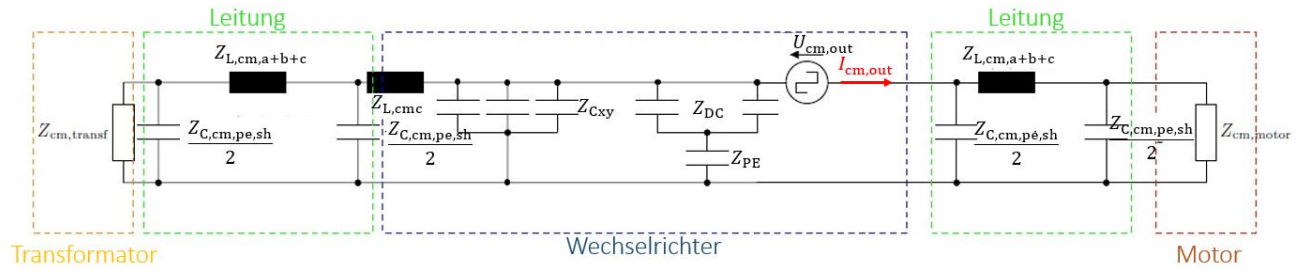


Abbildung 87: Gleichtaktäquivalente Schaltung des Systems

Die Komponenten der Leitungsmodelle sind linear, so dass diese kombiniert werden können, um den Gleichtaktstrom im System zu bewerten. Das Gesamtsystem wird durch die entsprechenden Impedanzen dargestellt. Der PE-/PA-Strom am Ausgang des Wechselrichters ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$I_{cm,out} = \frac{U_{cm,inv}}{Z_{motor,cable} + Z_{TT,cable}} \quad (39)$$

Hierbei ist $Z_{motor,cable}$ der Eingangswiderstand der Motorleitung sowie dem am Ende angeschlossenen Motor und $Z_{TT,cable}$ der Eingangswiderstand auf der DC-Seite in Richtung Trenntransformator. Die Motorleitungsimpedanz $Z_{motor,cable}$ wird durch die folgende Gleichung dargestellt (40):

$$Z_{motor,cable} = \left[Z_{cm,motor} \parallel \left(\frac{Z_{C,cm,pe,sh}}{2} \right) + Z_{L,cm,a+b+c} \right] \parallel \left(\frac{Z_{C,cm,pe,sh}}{2} \right) \quad (40)$$

Die Impedanz der Impedanz $Z_{TT,cable}$ besteht aus dem Zwischenkreiskondensator parallel zum EMV-Filter sowie parallel zu der Leitung mit dem am Ende angeschlossenen Transformator.

$$Z_{TT,cable} = \left\{ \left[Z_{cm,motor} \parallel \left(\frac{Z_{C,cm,pe,sh}}{2} \right) + Z_{L,cm,a+b+c} \right] \parallel \left(\frac{Z_{C,cm,pe,sh}}{2} \right) + Z_{L,cm,c} \right\} \parallel \left\{ \frac{Z_{C,xy}}{3} \parallel \left[\frac{Z_{DC}}{2} + Z_{PE} \right] \right\} \quad (41)$$

Diese Analyse liefert in gute Ergebnisse des Gleichtaktstroms bis 150 kHz. Das Ergebnis für das 0-Hz-Ausgangssignal des Konverters ist in Abbildung 88 dargestellt (Die Simulation wird dargestellt, indem nur die Hüllkurve der Gleichtaktströme verwendet wird mit den Oberschwingungen der Schaltfrequenz.)

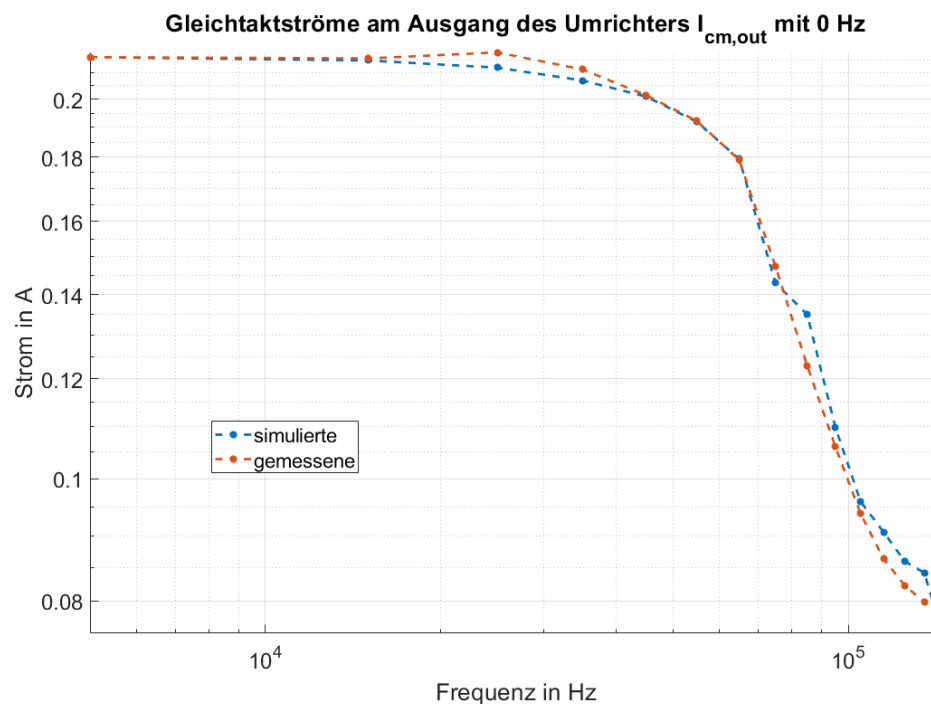


Abbildung 88: Ergebnisse der Simulation der PE-/PA Ströme verglichen mit den gemessenen Strömen mit 0 Hz als Drehzahl

Das gleiche Verfahren wurde mit 40 Hz Ausgangsfrequenz in Abbildung 89 durchgeführt, um die Simulation zu validieren.

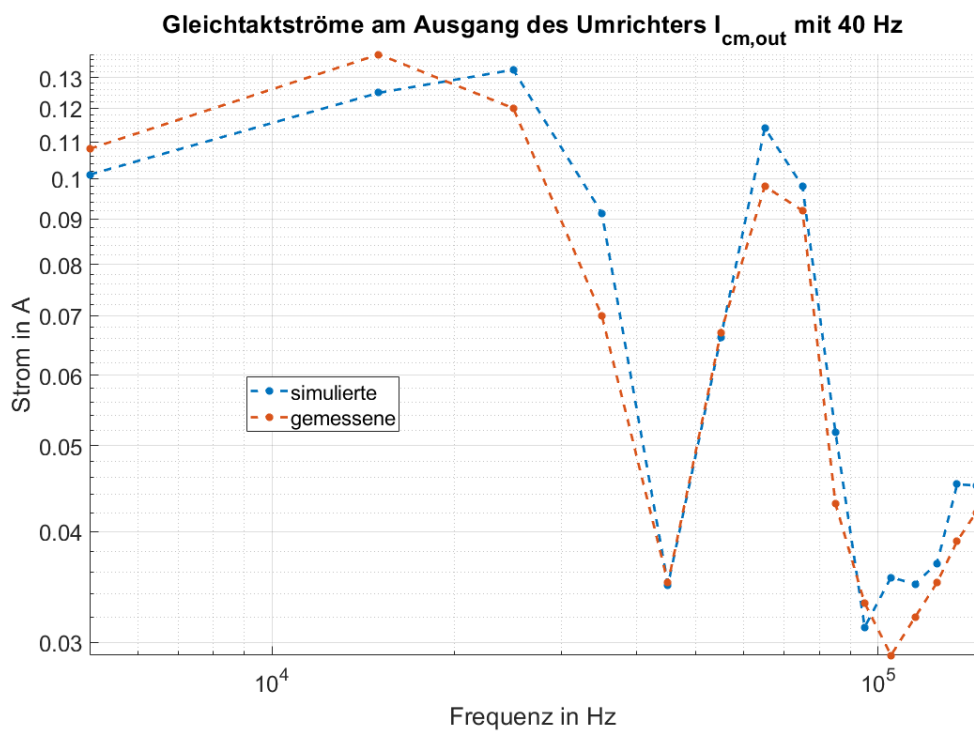


Abbildung 89: Ergebnisse der Simulation der PE-/PA Ströme verglichen mit den gemessenen Strömen mit 40 Hz als Drehzahl

11.3 Ergebnisse

Das Modell des Aufbaus wurde im Frequenzbereich nach den beiden Gleichtaktquellen „Gleichrichter“ und „Wechselrichter“ unterteilt, die separat betrachtet werden können. Tatsächlich erzeugt die Wirkung des Gleichrichters PE-/PA-Ströme bei Frequenzen, die der Grundschiwingung der Netzfrequenz von 50 Hz zugeordnet sind, während der Wechselrichter PE-/PA-Ströme erzeugt, die der Schaltfrequenz zugeordnet sind. Die Simulation des PE-/PA-Stroms auf der Wechselrichterseite erfolgt bis 150 kHz, wie in Abbildung 88 und Abbildung 89 zu sehen ist.

Der dem Gleichrichter zugeordnete PE-/PA-Strom wird ebenfalls simuliert und die verschiedenen Oberschwingungen und ihre Auswirkung auf den PE-/PA-Strom analysiert, wie in Abbildung 64 zu sehen ist.

12 Verbesserung von EMV-Filterschaltungen für Wechselrichter (MAGNETEC)

Kurzfassung

Ziel ist es in diesem Arbeitspaket die in AP3 gemessenen PE-/PA Strömen mit einem geeigneten EMV Filter zu reduzieren. Dabei soll zunächst ein Standardfilter als Bezugswert verwendet werden, um anschließend Verbesserungen am Filter vorzunehmen, um diesen zu optimieren.

Das Konzept zur Filter-Optimierung beinhaltet die Änderung der Gleichtakt Induktivität zur Erhöhung der Einfügedämpfung mit gleichzeitiger Veränderung der Cy Kapazität in Richtung Erdung.

Der Level der EMV-Entstörung soll dabei nicht verschlechtert werden.

12.1 Definition Arbeitspaket Nr. 6

„Verbesserung von EMV-Filterschaltungen für Wechselrichter“

Das Arbeitspaket (AP) Nr.6 ist laut Gesamtvorhabens-Beschreibung des PEPA-Projekts wie folgt definiert:

Innerhalb dieses APs werden Verfahren der systematischen EMV-Filterauslegung in die Praxis überführt und damit bzgl. PE-Strom verbesserte Filter entworfen und erprobt. Dies erfolgt beispielsweise durch die Erhöhung der CM-Insertion Losses mittels Verbesserung / Modifikation der CM-Choke mit Hilfe von Zusatzbeschaltungen zur Kompensation parasitärer Elemente (z. B. einer EPC-Kompensation der CM-Choke), Einsatz anderer Magnetmaterialien oder Änderungen in der Topologie (Filter höherer Ordnung). Diese verbesserten EMV-Filter werden im Referenzaufbau mit herkömmlichen EMV-Filtern verglichen.

Der mechanische und elektrische Aufbau des in AP3 näher beschriebenen Referenzsystems wird zur weiteren Untersuchung von PE-/PA-Ströme in Antriebssystemen zur Filterweiterentwicklung genutzt. Alle Untersuchungen werden mit verschiedenen Motorleitungslängen mit geschirmten und ungeschirmten Leitungen durchgeführt. Der Prüfaufbau wird EMV-gerecht ausgeführt; eine Kontrollmessung der Einhaltung der leitungsgebundenen EMV-Grenzwerte erfolgt mit einem EMV-Messempfänger.

Um den Aufbau mit einer hohen Netzneutralität messen zu können, kommen verschiedene Netznachbildungen und Koppelnetzwerke zum Einsatz.

12.2 Entwurf und Aufbau des Prüfumfelds

Gesamtaufbau:

Als Prüfumfeld wird der mechanische und elektrische Aufbau wie in AP1 und AP3 beschrieben verwendet (Abbildung 1). Er besteht weitgehend aus einem ans Netz angeschlossenen Trenntransformator um ein möglichst einheitliche Ausgangssituation unter den Teilnehmern zu schaffen, einem Frequenzumrichter und einem Asynchronmotor.

Um die PE-/PA-Ströme auf PE zu reduzieren, wird in Richtung Netz vor den Eingang des Frequenzumrichters das EMV Filter positioniert, welches in diesem AP optimiert werden soll.

EMV-Filter:

Als Ausgangspunkt für das AP6 wird ein EMV-Filter der Firma Block verwendet, welcher standardmäßig für diese Leistungsklasse und Aufbau verwendet werden kann. Es handelt sich um das Filter mit der Bezeichnung: HLD110 – 500/16 welches in Abbildung 90 zu sehen ist.

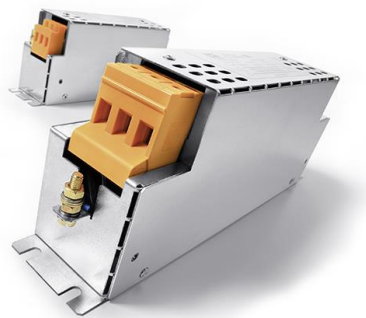


Abbildung 90 EMV Filter HLD110-500/16 Firma Block [Datenblatt Filter]

Als Standard PE-/PA Strom bemessen auf die max. zulässige Eingangsspannungsschwankung nach IEC $38 \pm 10 \%$ wird im Datenblatt der Wert 21mA angegeben. Bei gleichbleibendem Dämpfungsverhalten soll der am Aufbau gemessene PE-/PA Strom durch Modifikationen am Filter noch unterschritten werden. Das EMV-Filter besteht als zwei-stufiger Filter aus den Komponenten: CLCL wie in Abbildung 91 zu sehen ist:

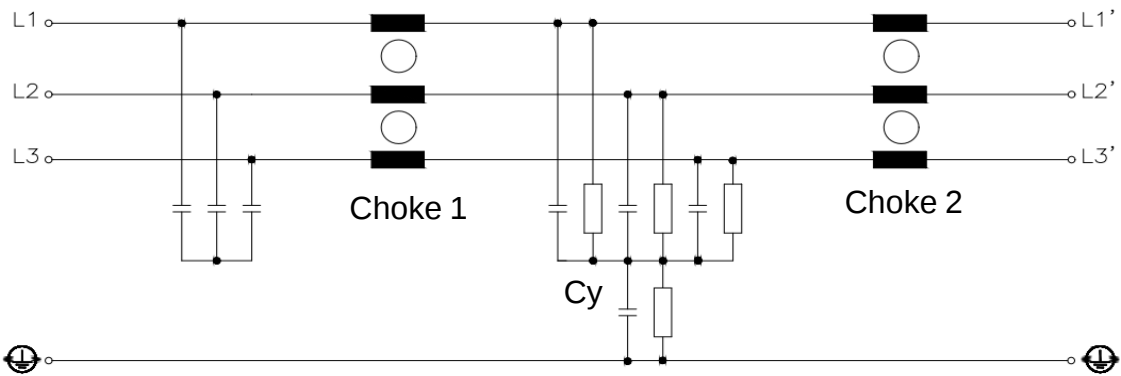


Abbildung 91 Schaltbild EMV Filter [Datenblatt EMV Filter]

Zur Optimierung des EMV-Filters sollen zunächst Änderungen an Choke 1 und dem Cy Kondensator durchgeführt werden. Choke 2 und die Cx Kondensatoren bleiben unverändert.

12.3 Messung der PE-/PA-Ströme am Standardfilter

Als Referenzmessungen wurden mit den Magnetec Messwandlern am Netzeingang des Filters die Common-Mode-Ströme gemessen. Verwendet wurde hierbei ein Rohde und Schwarz Oszilloskop RTO 2014 mit folgenden Einstellungen:

Tabelle 18: Einstellung Oszilloskop RTO 2014

Aufnahmelänge	200 ms
Abtastrate	500 MHz
FFT Methode	Rectangular
ResBW (Bandbreite der FFT)	5 Hz

Zunächst wurde eine Messung ohne Filter durchgeführt, um diese mit der Messung mit Filter zu vergleichen. Die Messparameter wurden wie in AP3 beschrieben eingestellt (Tabelle 19).

Tabelle 19: Messparameter am Aufbau

Motorgeschwindigkeit	40 Hz
Taktfrequenz	5 kHz
Interner EMV-Filter	aktiviert

Messung ohne Filter:

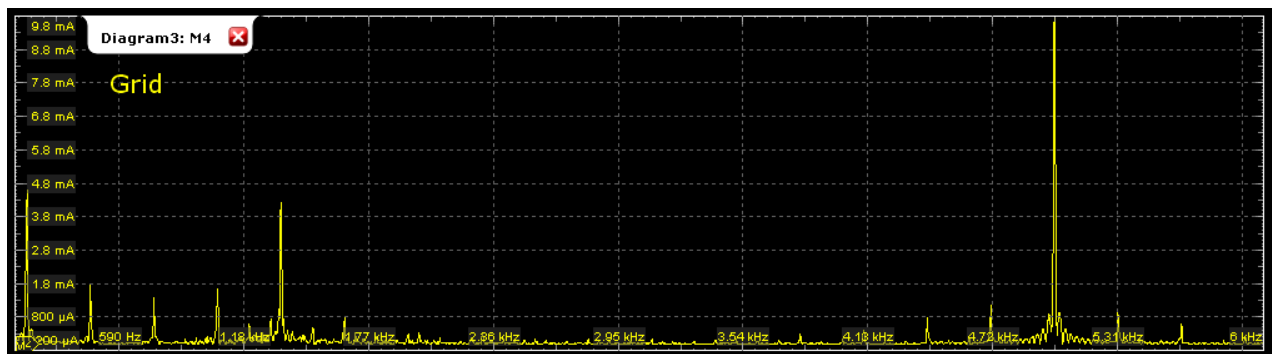


Abbildung 92 Referenzmessung CM-Ströme an FU Eingang

Messung mit Standardfilter

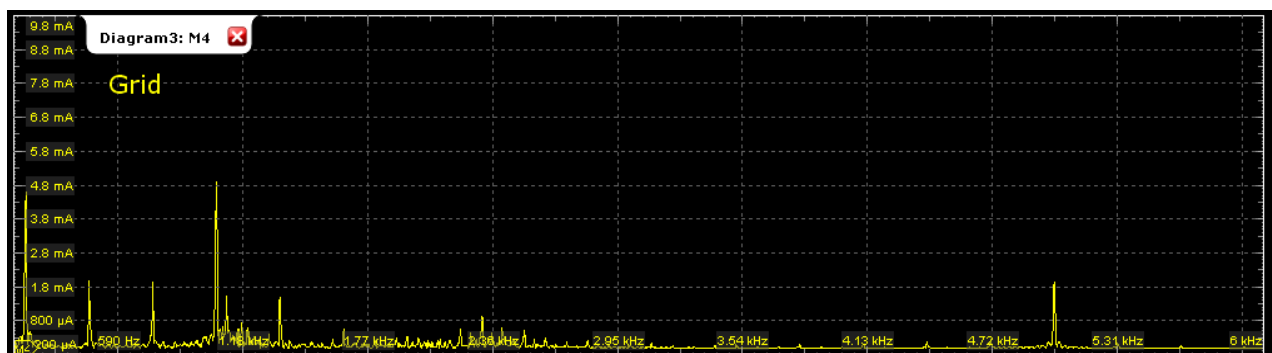


Abbildung 93 Referenzmessung CM-Ströme an Standard HLD Filter Eingang

Wie in Abbildung 92 und Abbildung 93 zu sehen ist verringert das Standardfilter besonders die Störung an der Taktfrequenz bei 5 kHz. Die Störungen in dem unteren Frequenzbereich werden jedoch kaum bedämpft. An dieser Stelle sollen die Modifikationen am Filter effektiv werden.

12.4 Optimierung des Filters und Messung der PE-/PA-Ströme am modifizierten Filter

Um die Einfügedämpfung der Drossel im Filter zu erhöhen, wird der Drossel-Kern durch einen nanokristallinen Kern mit höherer Permeabilität ersetzt. In folgender Tabelle sind die beiden Kerne und Drosseln verglichen, wobei die Geometrischen Abmessungen gleich sind.

Tabelle 20: Vergleich des Standard Kerns mit Nanokristallinem Kern

Standard Kern		Nanokristalliner Kern	
Induktivität	10 µH bei 10 kHz	Induktivität	35 µH bei 10 kHz
Standard Drossel		Modifizierte Drossel	
Induktivität	2.2 mH bei 10 kHz	Induktivität	9 mH bei 10 kHz

12.5 EMV Simulation und Messung am modifizierten Filter

Um eine verbesserte Dämpfung der CM-Störungen zu erzielen, wurde das in AP5 vorgestellte 3-phasige PLECS Modell verwendet. Der CY-Kondensator wurde schrittweise zur PE-Leitung verringert auf bis zu 680 nF (original 3.3 μ F), was jedoch dazu führte, dass an einer niedrigeren Frequenz bei ca. 1 kHz sich ein höherer Peak ergab. Dies ist auf Resonanzen in die beiden Filter (Interner EMV-Filter und modifizierter Filter) zurückzuführen.

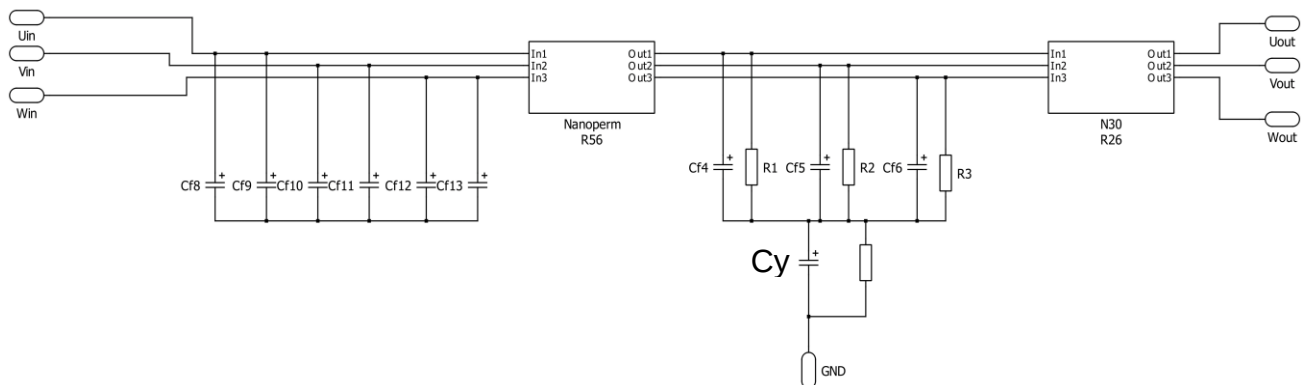


Abbildung 94 Modell des modifizierten Filters in PLECS

Durch die Modifikation des Filters ergab sich folgende Simulation und Messung am Filter Eingang:

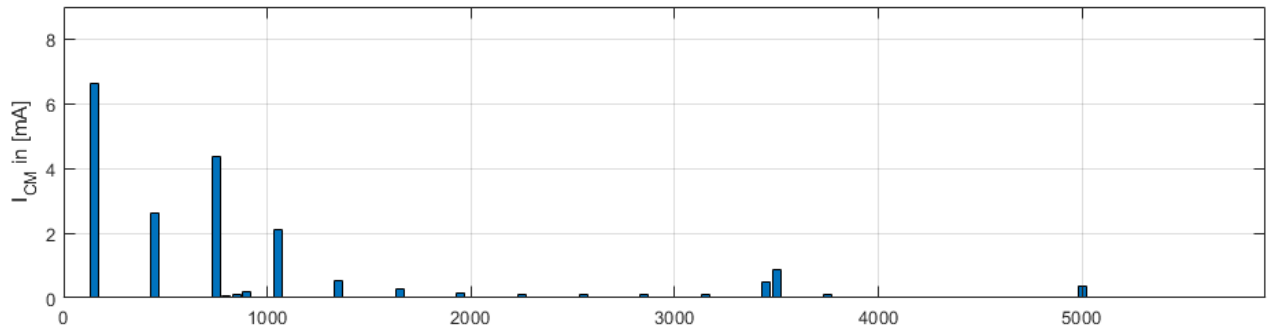


Abbildung 95 CM-Simulation am Filtereingang mit mod. Filter

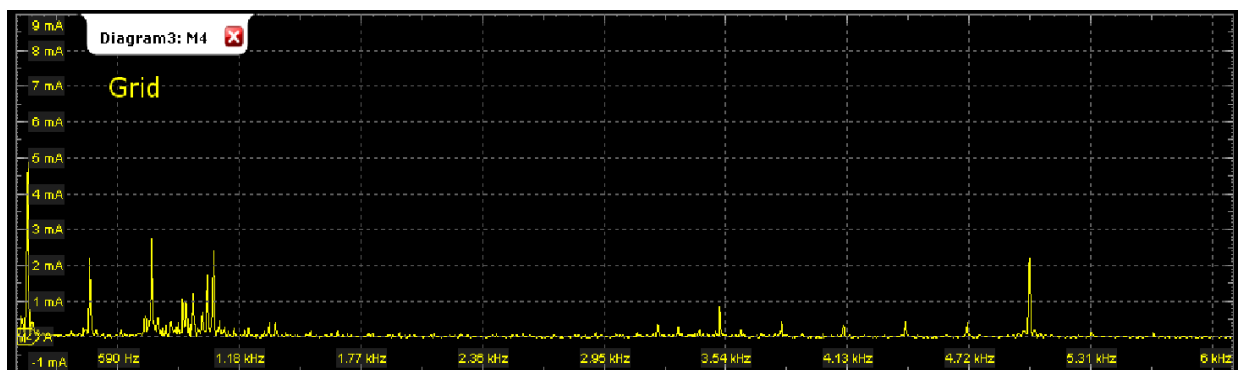


Abbildung 96 CM-Messung am Filtereingang mit mod. Filter

Generell wurden im Vergleich zum Originalfilter zwar einige Spitzen reduziert, dennoch gilt es im Frequenzbereich bis 1 kHz die Störungen noch weiter zu reduzieren.

12.6 Weitere Filteroptimierung

Um eine verbesserte Dämpfung der CM-Störungen zu erzielen, wurde ein Konzept mit Hilfe vom vorgestellten 3-phasige PLECS Modell entwickelt, welches im Bereich des CY-Kondensators eine Längsinduktivität vorsieht. Dies ist in nachfolgender Abbildung exemplarisch dargestellt. In verschiedenen Iterationsschritten durch Hilfe im Bereich Simulation durch TU Darmstadt, wurden die Werte für CY und LY variiert und getestet.

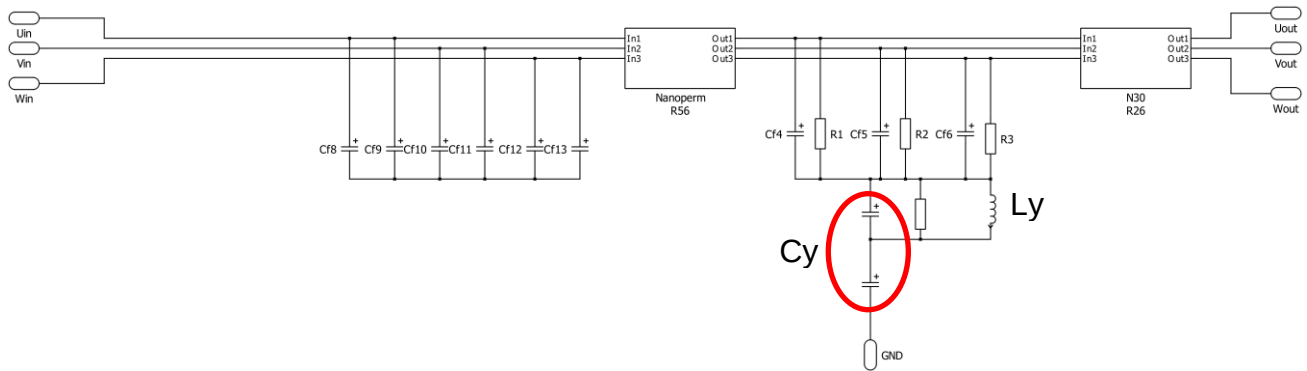


Abbildung 97 Einbringen einer LY Induktivität in das modifizierte Filter

Mit den Werten $L_y = 5,8 \text{ mH}$ und $C_y = 3,3 \text{ }\mu\text{F}$ konnte ein vorläufiges Optimum erzielt werden. Der $C_x = 3,3 \text{ }\mu\text{F}$ Kondensator wurde dabei unverändert gelassen. Die Messung dazu ist in nachfolgendem Abschnitt zu sehen.

12.7 Resultate und Ausblick

Durch Einbringen der oben genannten Modifikationen konnte ein vorläufiges Endergebnis erreicht werden, welches in folgender Abbildung zu sehen ist:

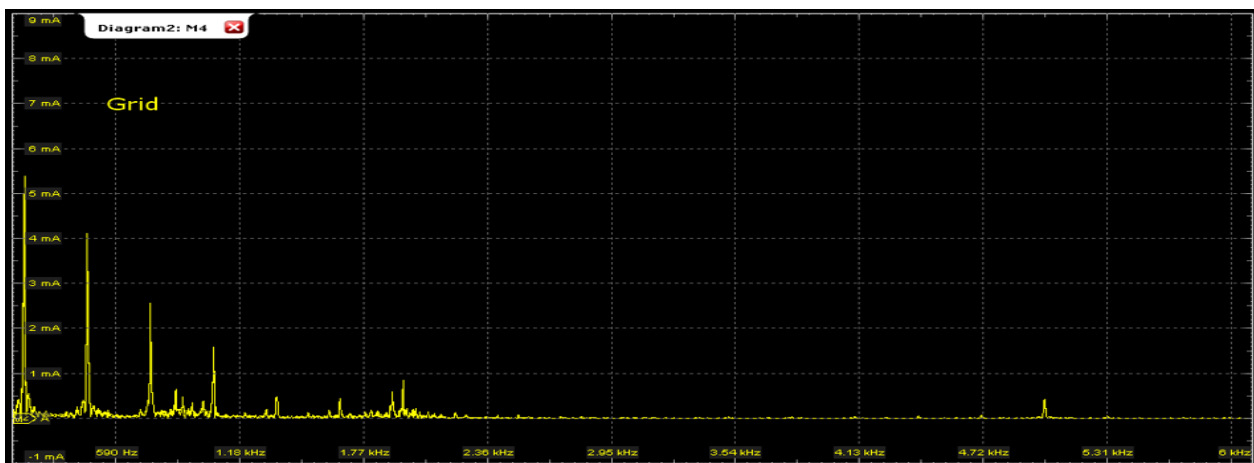


Abbildung 98 CM-Messung am Filtereingang mit modifiziertem Filter

Hierbei ist zu beachten, dass speziell die Spitze bei 5 kHz Schaltfrequenz deutlich reduziert wurde.

Bezogen auf einen RMS-Wert der PE-/PA-Ströme konnte einer Reduzierung von 13,5 Arms auf 9,7 Arms erzielt werden, was eine Reduktion um 28% entspricht.

Anmerkung:

Die bisherigen Messungen wurden alle am Referenzaufbau durchgeführt welcher von einem vorgeschaltetem Trenntransformator ausgeht, um die Aufbauten bei den Projektpartnern zu vereinheitlichen. Im vorliegenden AP6 wurden zusätzlich auch Versuche ohne Trenntransformator bei den Projektpartnern: Block, Magnetec und TU Darmstadt durchgeführt, um das modifizierte Filter auch unter realen Bedingungen zu testen.

Es zeigte sich, dass es sehr häufig im Einschaltvorgang des Aufbaus zum Auslösen des FIs kam, was auf Ströme zurückzuführen ist, welche durch Unsymmetrien zwischen den Außenleitern der Netzleitung entstehen können. Diese fließen über die neu eingebrachte Ly-Induktivität auf PE ab. Die ersten Ansätze sehen hier ein Verzögerungs-Relais vor, welches die Ly-Induktivität erst nach ein paar Millisekunden zuschaltet, wenn von einer Symmetrie zwischen den 3 Außenleitern der Zuleitung ausgegangen werden kann.

Dieses Konzept muss im Verlauf des Nachfolge-Projektes noch genauer untersucht werden, welches sich im Rahmen der Erweiterungen des Referenzaufbaus gut eingliedern lässt. Aus diesem Grund kann aus aktueller Sicht noch kein marktreifes Produkt aus dem Vorhaben PEPA entstehen, was die wirtschaftlichen Erfolge verzögern wird.

13 Untersuchung von verschiedenen Erdungskonzepten in 24V-Netzen hinsichtlich EMV und Potenzialausgleichströme (SEW)

Kurzfassung

Das Ziel dieses Arbeitspakets Nr. 7 ist es, einen Prüfstand und eine Messmethode zu entwickeln, um verschiedene Installationsvarianten in einem industriellen Umfeld zu prüfen. Der erweiterte Prüfstand basiert auf Vorgaben aus Arbeitspaket Nr. 3 des PEPA-Projekts. Untersucht werden die Auswirkungen der PE-/PA-Ströme eines Frequenzumrichters auf eine Profinet-Kommunikation und auf das 24 V Versorgungsnetz. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den Erdungsverhältnissen und dem Potenzialausgleich.

Zuerst wird der erweiterte Prüfstand erklärt unter Einbezug der Vorgaben aus dem PEPA-Projekt. Im Anschluss werden die Untersuchungen und Messungen mit der Messmethode und den jeweiligen Ergebnissen beschrieben. Der vierte Abschnitt beinhaltet Abgleiche zwischen den Ergebnissen und den begleitenden theoretischen Berechnungen. Abschließend werden Installationsempfehlungen für die Praxis gegeben, die sich auf die Ergebnisse der Untersuchungen stützen.

Bisherige Empfehlungen, wie eine beidseitige und flächige Motorschirmauflage und ein hochfrequenztauglicher Potenzialausgleich durch leitfähige Anlagenteile, werden durch diese Untersuchungen bestätigt. Ebenso wird die Aussage, die 24 V-Masse im Schaltschrank zu erden und ich Feld nicht, bekräftigt.

13.1 Definition des Arbeitspakets Nr. 7

„Untersuchung von Erdungskonzepten in 24 V-Netzen hinsichtlich Elektromagnetischer Verträglichkeit und Potenzialausgleichströmen“

Das Arbeitspaket (AP) Nr.7 ist laut Gesamtvorhabens-Beschreibung des PEPA-Projekts wie folgt definiert:

Innerhalb dieses AP wird systematisch die Ausbreitung der Gleichtaktströme über die 24 V-Versorgung und Kommunikationsleitungen untersucht. Im Hinblick auf die große und zunehmend steigende Verbreitung der Antriebselektronik wird diese als Störstromquelle unter Beachtung der gängigen Installationshinweise eingesetzt.

Mit den Erkenntnissen aus den AP's 2 und 3 wird ein mechanischer und elektrischer Referenzaufbau für das 24V-System erstellt. In diesem Aufbau wird der Einfluss der unterschiedlichen Erdungs- und Masse-Konzepte auf die Führung der Potenzialausgleichsströme und die Störbeeinflussung der Teilnehmer ermittelt. Ein zusätzliches Augenmerk soll der Rückwirkung dieser Varianten auf die Anwendung der Schutzmaßnahme Schutzerdung gelten, da sich hier in der Praxis oftmals zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) komplexere Anforderungen ergeben.

Ziel der Arbeit ist es Installationsempfehlungen für Applikationen mit zentraler und dezentraler Antriebselektronik zu erarbeiten. In diese Empfehlungen fließen zum einen die interpretierten Messergebnisse ein unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen und zum anderen praktische Erwägungen basierend auf Erfahrungen aus der Praxis. Die Installationsempfehlungen sollen für die jeweilige Situation unter besonderer Berücksichtigung der Besonderheiten der elektrischen Antriebstechnik, das optimale Erdungs- bzw. Potenzialausgleichskonzept ermöglichen.

13.2 Entwurf und Aufbau eines 24 V-Prüfaufbau

13.2.1 Konzeptentwicklung für den Prüfaufbau

Der Prüfaufbau soll als Nachbildung eines industriellen Umfelds dienen und aus Komponenten der Automatisierungstechnik bestehen. Grob kann der Aufbau in das Antriebssystem und das Kommunikationsnetzwerk unterteilt werden. Das Antriebssystem besteht, in Anlehnung an den Referenzaufbau aus Arbeitspaket 3, aus einem Asynchronmotor, der mit einem Frequenzumrichter betrieben wird. Das hinzugefügte Kommunikationsnetzwerk besteht aus einem Profinet-Netzwerk und einem 24 V-Netz. Aus Sicht der EMV stellt das Antriebssystem die Störquelle und das Kommunikationsnetz die Störsenke dar, wobei ein kompakt angeordneter Kabelkanal mit einer Gesamtlänge von 100 m als Kopplungspfad fungiert. Am Referenzaufbau sollen verschiedene Installationsbedingungen variiert werden können die vor allem die Erdungsverhältnisse und den Potenzialausgleich betreffen. Untersucht werden dann die Auswirkungen der PE-/PA-Ströme vom Frequenzumrichter auf das Kommunikationsnetzwerk. Im nachfolgenden Schema wird der Referenzaufbau mit allen Komponenten und deren Verdrahtung dargestellt.

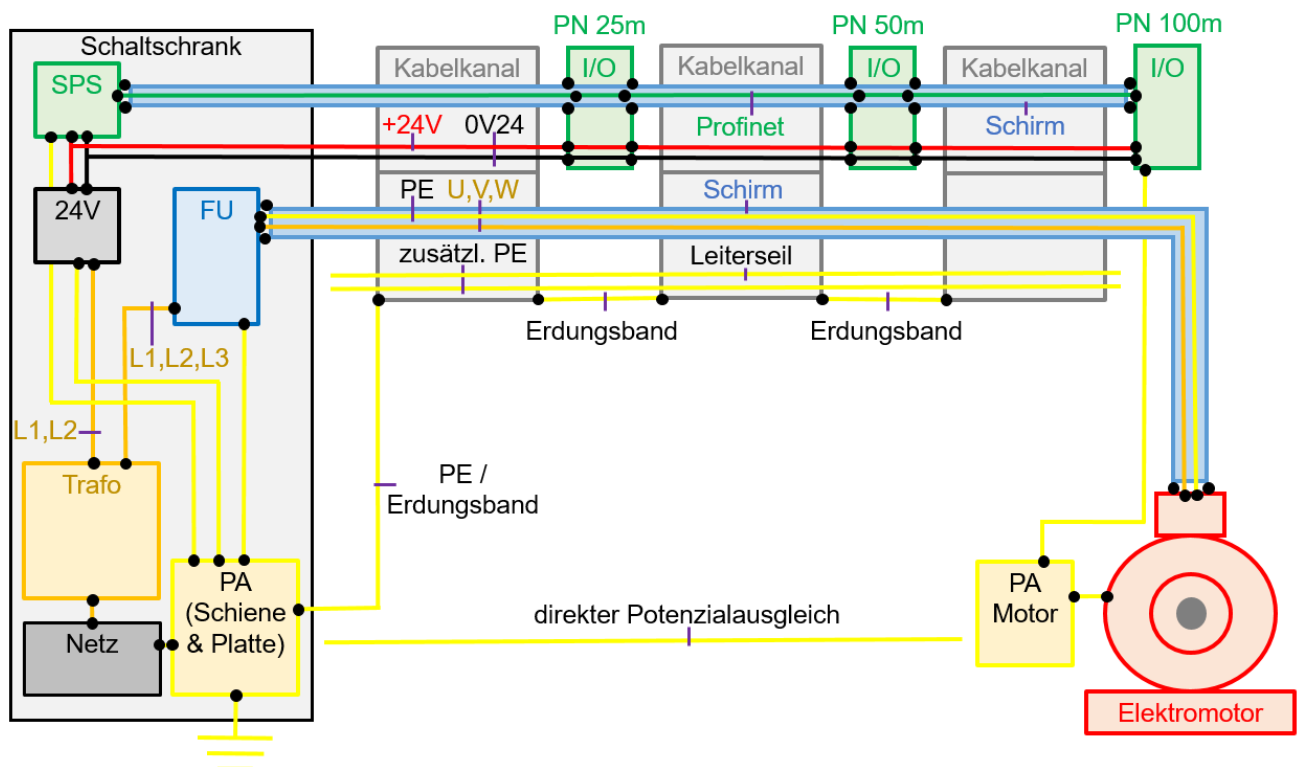


Abbildung 99: Verdrahtungsschema des Referenzaufbaus

13.2.2 Aufbau des Prüfaufbaus

Der Prüfaufbau befindet sich im Testcenter der Firma SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG (SEW). Räumlich kann der Referenzaufbau in zwei Teile gegliedert werden, den Bereich im Schaltschrank und den Bereich außerhalb des Schaltschranks, bestehend aus der Leitungsstrecke im Kabelkanal und dem Motor. In Abbildung 97 ist diese räumliche Unterteilung durch die gestrichelte rote Linie gekennzeichnet. Im Schaltschrank befinden sich der Netzanschluss, der Trenntransformator, der Frequenzumrichter, das 24 V-TrafoNetzteil und die Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Die SPS stellt den Master im Profinet-Netzwerk dar und steuert den Datenverkehr auf dem Bus. Im Feld befinden sich der Asynchronmotor und drei digitale Ausgabe-Baugruppen als Teilnehmer bzw. Slaves im Profinet-Netzwerk. Der Motor wird über eine Motorleitung am Frequenzumrichter angeschlossen. Die Motorleitung kann dabei eine Länge von bis zu 100 m aufweisen. Diese 100 m Motorleitung sind in mäanderförmig angeordneten Leitungs-Kanälen aus Stahlblech verlegt, die flächig und leitfähig miteinander verbunden sind. Die einzelnen Leitungs-Kanäle sind dabei auf Holzgestellen montiert. Auf den insgesamt vier Gestellen können Leitungen mit bis zu 112 m Länge verlegt werden.

Die am Profinet betriebenen I/O-Baugruppen der SPS sind entlang der Leitungsstrecke verteilt und befinden sich im Verlauf der Leitungen in 25 m, 50 m und 100 m Entfernung zum Schaltschrank. Die Geräte sind über eine Profinet-Leitung und eine 24 V-Versorgungsleitung in Linientopologie miteinander verbunden. Die Profinet-Leitung und die 24 V-Leitung sind ebenfalls mäanderförmig in den Leitung-Kanälen verlegt. Die folgende Abbildung zeigt den erweiterten Referenzaufbau im vollständig aufgebauten Zustand.

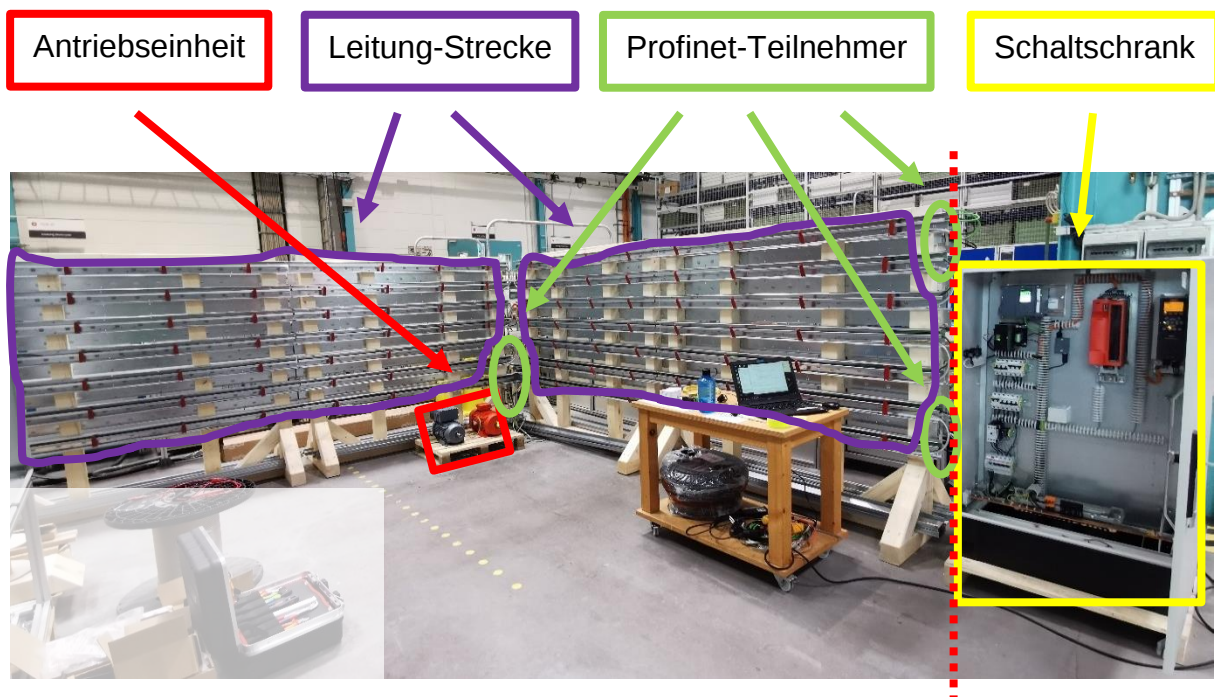


Abbildung 100: Referenzaufbau im Testcenter bei SEW

13.3 Entwicklung einer Messmethode

13.3.1 Störung des Kommunikationsnetzwerks

Ein Aspekt der Untersuchungen am erweiterten Referenzsystem bei SEW ist die Erzeugung einer Störung des Profinet-Netzwerks. Diese Störung soll durch die PE-/PA-Ströme der Antriebseinheit verursacht werden und sich dadurch äußern, dass Bit- bzw. Telegrammfehler in der Übertragung auftreten oder, dass die Kommunikation ganz zum Erliegen kommt.

Zur Erzeugung dieser Profinet-Störung werden die EMV-Bedingungen bei der Installation der Antriebseinheit und im Profinet-Netzwerk gezielt verschlechtert.

Obwohl durch diese Maßnahmen erhebliche Schirmströme von 7.4 A (Spitze) und 1.5 A (Effektiv) auf der Profinet-Leitung erzeugt werden konnten, sind keinerlei Fehler oder Beeinträchtigungen in der Kommunikation aufgetreten. Daher wurde eine Methode entwickelt, das Beeinflussungsrisiko für die Profinet-Kommunikation durch die PE-/PA-Ströme messtechnisch zu bewerten..

13.3.2 Messmethode im Zeit- und Frequenzbereich

Eine geeignete Messmethode wird entwickelt, die eine Betrachtung im Zeit- und Frequenzbereich enthält und stabile, quantitativ vergleichbare Messwerte liefert.

Zeitbereich:

Im Zeitbereich werden die PE-/PA-Ströme statistisch ausgewertet. Zum einen wird die mittlere Amplitude des einzelnen Pulses bestimmt und zum anderen der mittlere Effektivwert des gesamten PE-/PA Strom. Das digitale Oszilloskop (Oszi) bestimmt mithilfe von mathematischen Funktionen automatisch diese beiden Größen. In eine Messung fließen insgesamt 1000 Messwerte ein, da die Ergebnisse sich bei dieser Anzahl bis zur dritten signifikanten Stelle stabilisieren.

Die Amplitude und der Effektivwert sind zwei charakteristische Größen die nicht nur eindeutig mittels Oszi bestimmbar sind, sondern auch das Störpotenzial der Störgröße repräsentieren.

Frequenzbereich:

Der PE-/PA Strom wird im zweiten Schritt im Frequenzbereich betrachtet. Dieser gibt Aufschluss über die Form des PE-/PA Strompulses und man kann die Störpegel bei bestimmten Frequenzen definieren. Das Oszi bildet durch die entsprechende Funktion die „Fast Fourier Transformation“ (FFT) des Zeitsignals des PE-/PA Stromes. Diese Transformation in den Frequenzbereich liefert als erste Funktion das Amplitudenspektrum. Dieses ist für die Beurteilung des Störpotenzial entscheidend, da es die Amplitude über dem Frequenzbereich darstellt. Als zweite Funktion liefert das Oszi das sogenannte „max-hold“ Spektrum. Dieses Spektrum stellt die maximal auftretenden Pegel über der Frequenz dar und beinhaltet, wie die Statistik im Zeitbereich, 1000 Messwerte.

Einstellungen Oszilloskop:

Folgende Einstellungen werden für die Messmethode im Oszi eingestellt:

- Bandbreite: 20 MHz (orientiert sich an der Bandbreite der Stromwandler)
- Abtastrate: 50 MSa/s (nach dem Shannon-Nyquist-Kriterium)
- Zeitspanne: 250 μ s (wird auf den Kehrwehrt der Taktfrequenz gelegt)

Wiederholgenauigkeit:

Die Wiederholgenauigkeit beschreibt hier die Genauigkeit der Messergebnisse bei wiederholter Messung und beträgt bei den verschiedenen Messgrößen:

- PE-/PA Strom (Amplitude): 98% (2% Abweichung)
- PE-/PA Strom (Effektivwert): 95% (5% Abweichung)
- Common-Mode-Spannung (Amplitude): 96% (4% Abweichung)
- Common-Mode-Spannung (Effektivwert): 94% (6% Abweichung)

13.4 Durchführung der Messungen

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Messreihen dargestellt. Bei jeder Messreihe wird ein Parameter des Prüfaufbaus variiert und alle weiteren Parameter bleiben unverändert.

13.4.1 Motorleitungsart

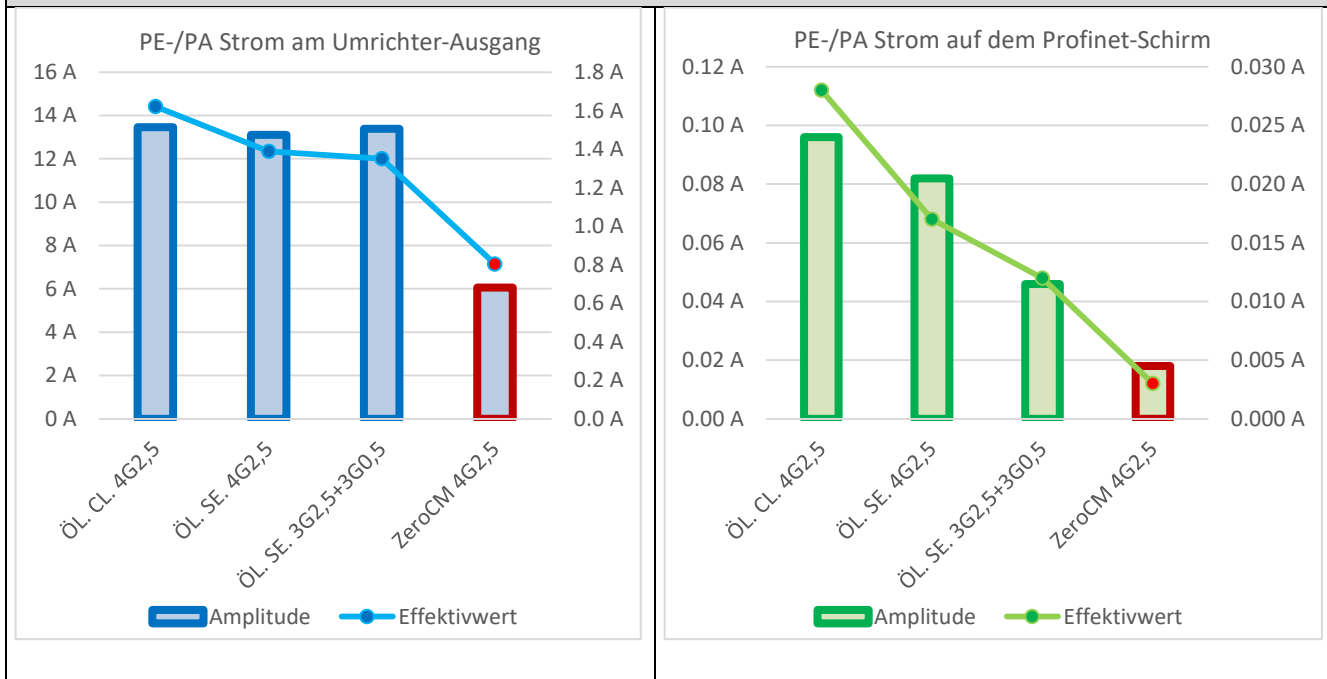
Im Rahmen dieser Messreihe werden die PE-/PA-Ströme bei verschiedenen Motorleitungen untersucht. Hierbei kommen folgende Leitungen mit je 100 m Länge zum Einsatz:

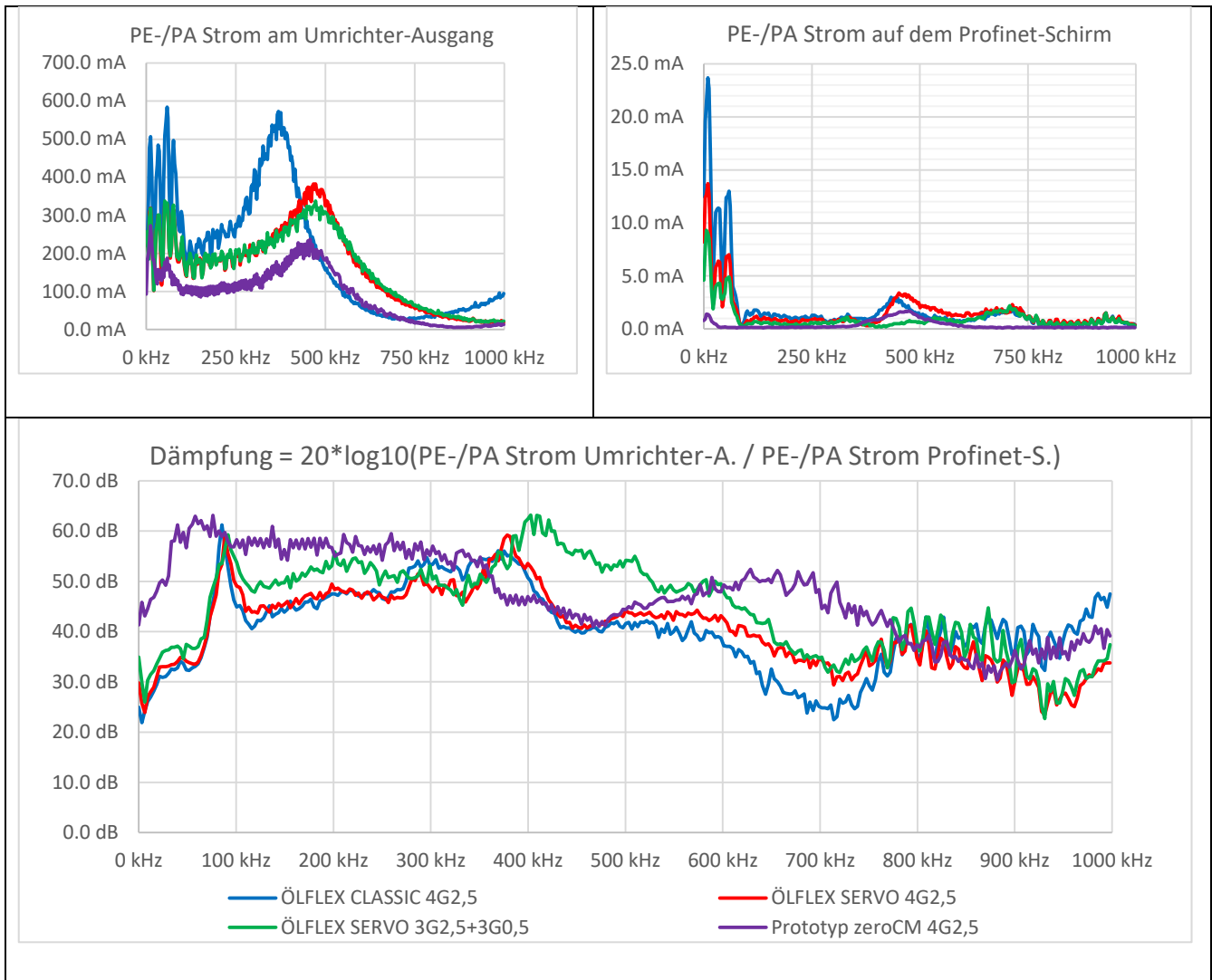
- ÖLFLEX CLASSIC 110 CY 4G2,5 (Industriestandard) (ÖL. CL. 4G2,5)
- ÖLFLEX SERVO 2YSLCY-JB 4G2,5 (Kapazitätsoptimiert) (ÖL. SE. 4G2,5)
- ÖLFLEX SERVO 2YSLCY-JB 3G2,5+3G0,5 (symmetrisch) (ÖL. SE. 3G2,5+3G0,5)
- Prototyp zeroCM 4G2,5 (PE-/PA Stromarm) (Zero CM 4G2,5)

Die ersten beiden Ergebnisdiagramme zeigen die Amplitude der PE-/PA-Ströme als Balken mit der Skala an der linken Seite und den Effektivwert der PE-/PA-Ströme als Punkte mit der rechten Skala. Die nachfolgenden Diagramme zeigen die PE-/PA-Ströme im Frequenzspektrum bis 1 MHz.

Parameter:		Interpretation:
Umrichter	VLT Automation Drive 4 kW	➤ Der PE-/PA-Strom am Umrichter-Ausgang unterscheidet sich nur gering zwischen den handelsüblichen Leitungsarten. Die Prototypleitung reduziert die Ströme auf etwa die Hälfte. ➤ Der PE-/PA Strom auf dem Profinet-Schirm ist bei der Prototypleitung deutlich geringer als bei der symmetrischen Leitung. ➤ Die ÖLFLEX CLASSIC weist im Ausgangs-Spektrum höhere Pegel und eine niedrigere Leitung-Resonanzfrequenz als die ÖLFLEX SERVO auf. ➤ Im Spektrum der Profinet-Ströme weist ebenfalls der Prototyp die geringsten Pegel auf. ➤ Die Dämpfung ist beim PÖLFLEX SERVO 3G+3G etwas höher als bei den anderen beiden Leitungen.
Taktfrequenz	4 kHz	
Motorleitung	• ÖL. CL. 4G2,5 • ÖL. SE. 4G2,5 • ÖL. SE. 3G2,5+3G0,5 • Zero CM 4G2,5	
Leitungslänge	100 m	
Potenzialausgleich	Profinet-Schirm (PN) + Motor-PE (PE) + Motor-Schirm (S) → (PN+PE+S)	
Drehzahl	20 Hz (1200 Upm)	

Ergebnisse:



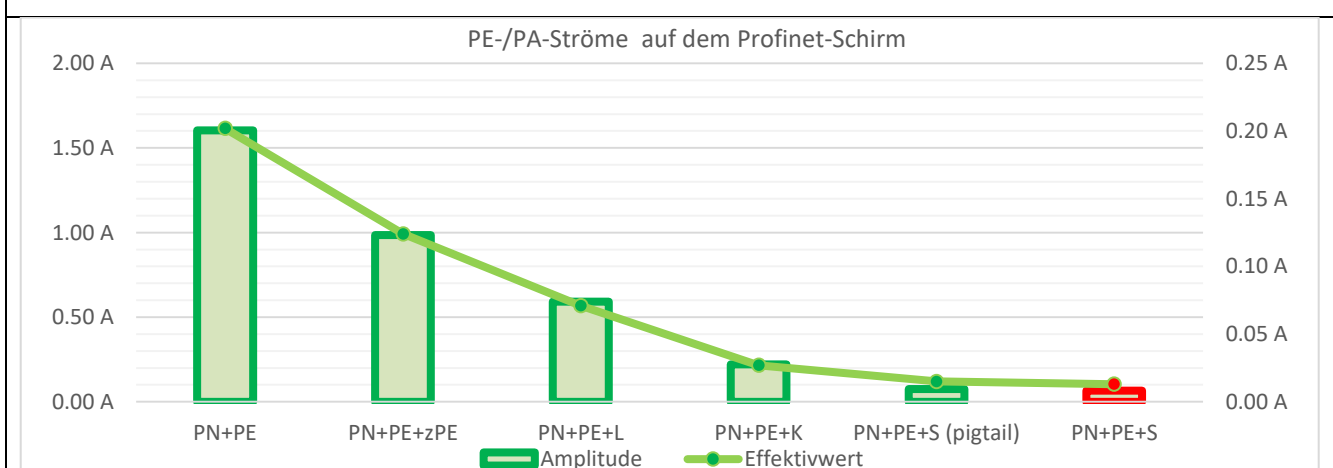
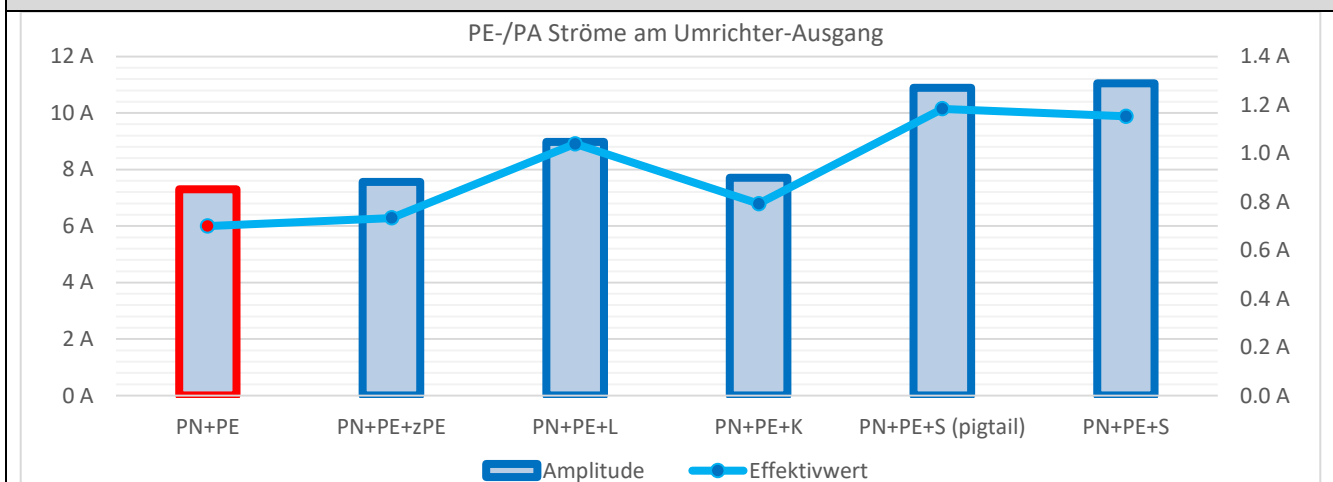


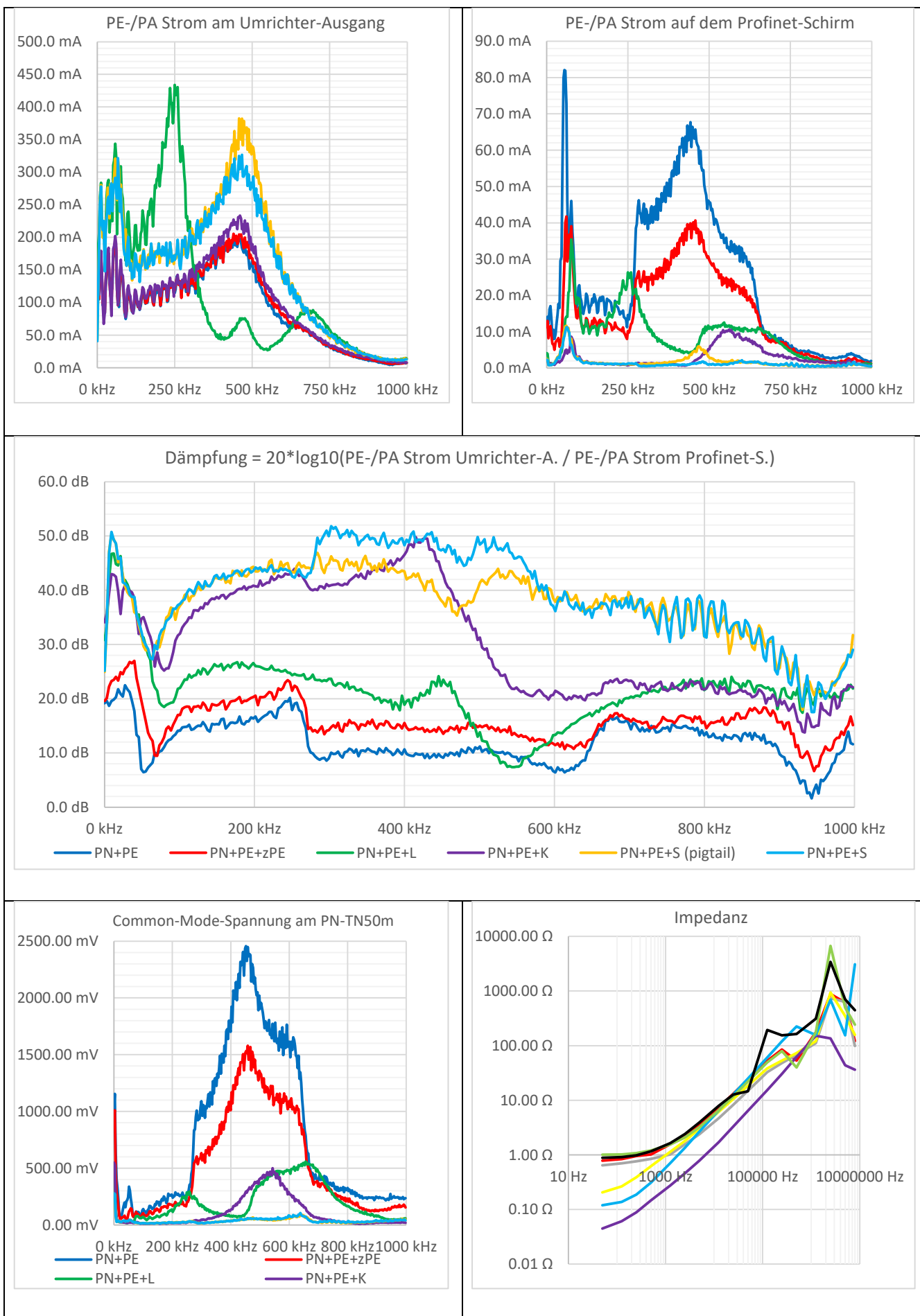
13.4.2 Potenzialausgleich

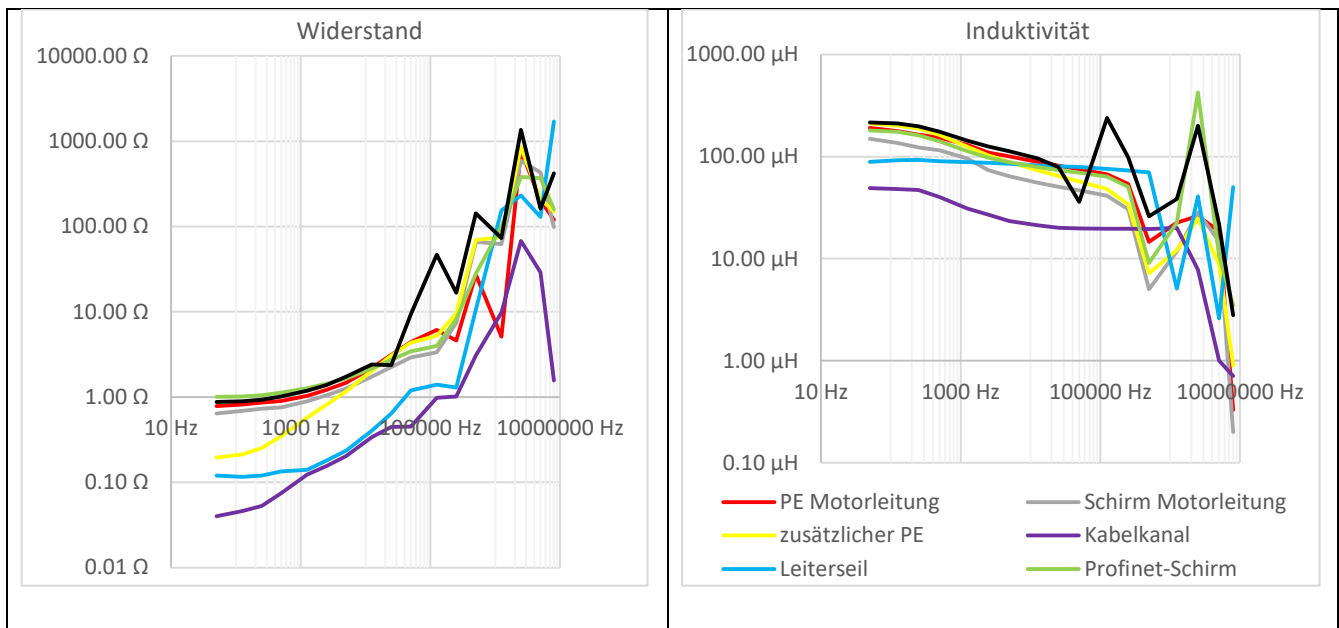
Die Gestaltung des Potenzialausgleichs bestimmt, über welche Pfade die PE-/PA-Ströme zurück zur Quelle, dem Wechselrichter fließen. In diesem Kapitel werden deshalb verschiedene Konstellationen des Potenzialausgleichs untersucht. Bei der Ausgangskonstellation besteht der Potenzialausgleich aus dem Schutzleiter in der Motorleitung und dem Schirm der Profinet-Leitung (PN + PE). In den folgenden Varianten wird diese Standardkonstellation um jeweils einen weiteren leitfähigen Pfad ergänzt.

Parameter:		Interpretation:
Umrichter	VLT Automation Drive 4 kW	➤ Motorschirm und Leitung-Kanal stellen die leitfähigsten Pfade im Potenzialausgleich dar und reduzieren die Profinet-Schirmströme aber erhöhen gleichzeitig die PE-/PA-Ströme am Umrichter-Ausgang. Ebenso leiten diese Pfade am besten die hochfrequenten Störstromanteile ab. ➤ Das Einbinden der leitfähigen Anlagenteile (Leitung-Kanäle) in den HF-Potenzialausgleich der Anlage weist eine deutlich höhere Dämpfung auf, als die Erdung mittels Leiterseil. ➤ Die flächige Auflage des Schirms der Motorleitung weist die höchste Dämpfung auf.
Taktfrequenz	4 kHz	
Motorleitung	ÖLFEX SERVO 2YSLCY-JB 4G2,5mm ²	
Leitungslänge	100 m	
Potenzialausgleich	• (PN+PE) • + zusätzlicher PE (zPE) • + Leiterseil (L) • + Leitung-Kanal (K) • + Schirm „pigtail“ (S (pigtail)) • + Schirm flächig aufgelegt (S)	
Drehzahl	20 Hz (1200 Upm)	

Ergebnisse:







13.4.3 Erdung des 24V-Systems

Diese Untersuchung befasst sich mit drei unterschiedlichen Erdungskonstellationen der 24V-Versorgung.

- Erdung der 24 V-Masse direkt am Netzteil im Schaltschrank (Erdung NT)
- Erdung der 24 V-Masse am Netzteil (zentral) und im Feld (dezentral) am letzten Profinet-Teilnehmer (Erdung NT & PN-TN 100 m)
- Erdung der 24 V-Masse am Netzteil und am Umrichter (zentral) im Schaltschrank (Erdung NT & FU)

In allen Fällen werden neben den bereits bekannten Störgrößen auch Gleichströme bei belasteter 24 V-Versorgung im Feld und im Schaltschrank untersucht.

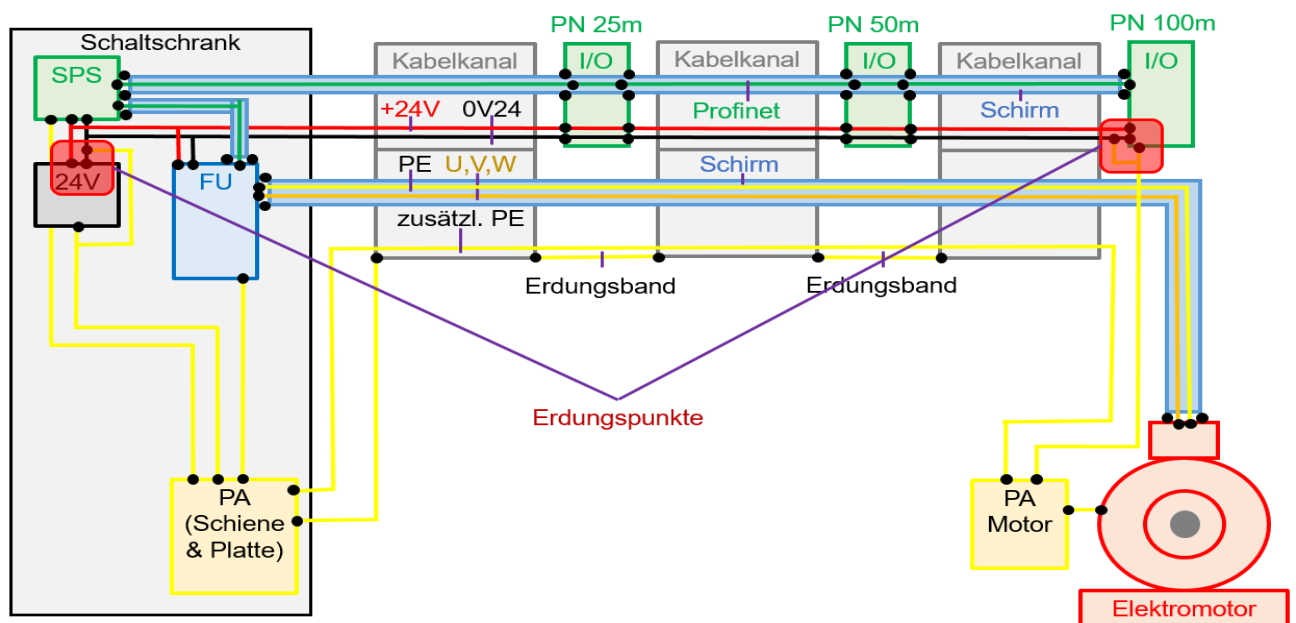


Abbildung 101: Verdrahtungsplan für den 2. Fall der 24V-Untersuchung

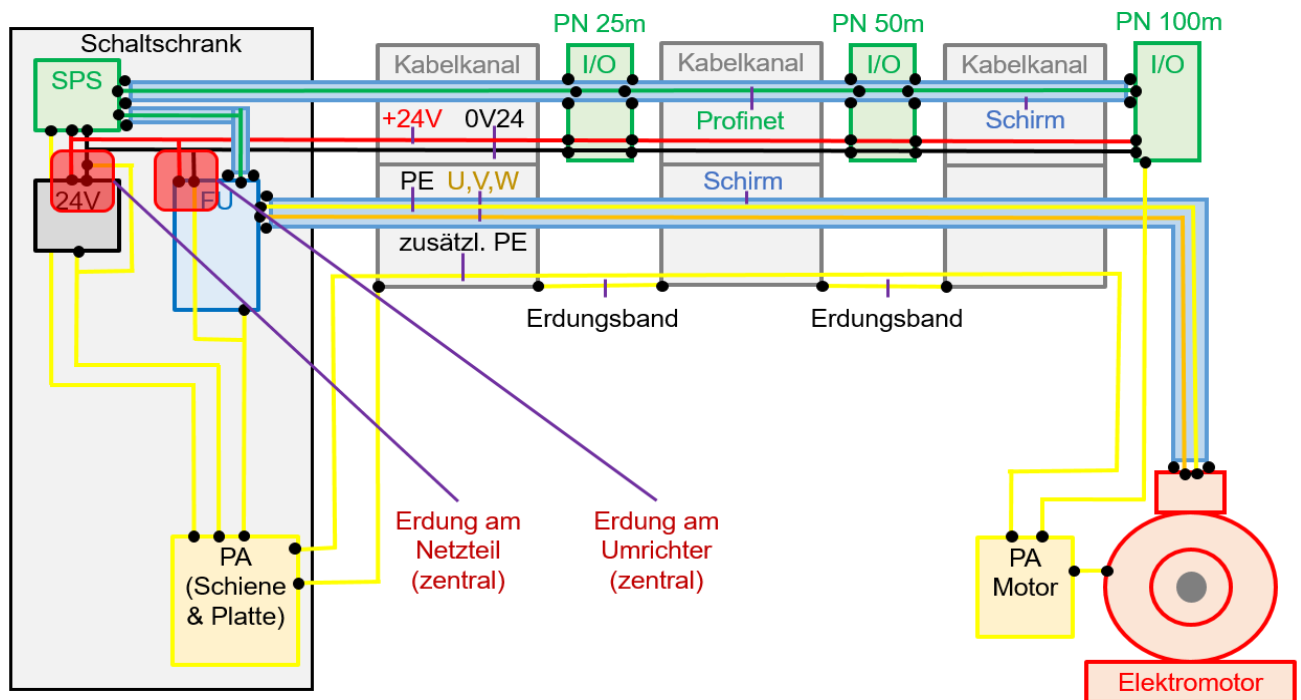
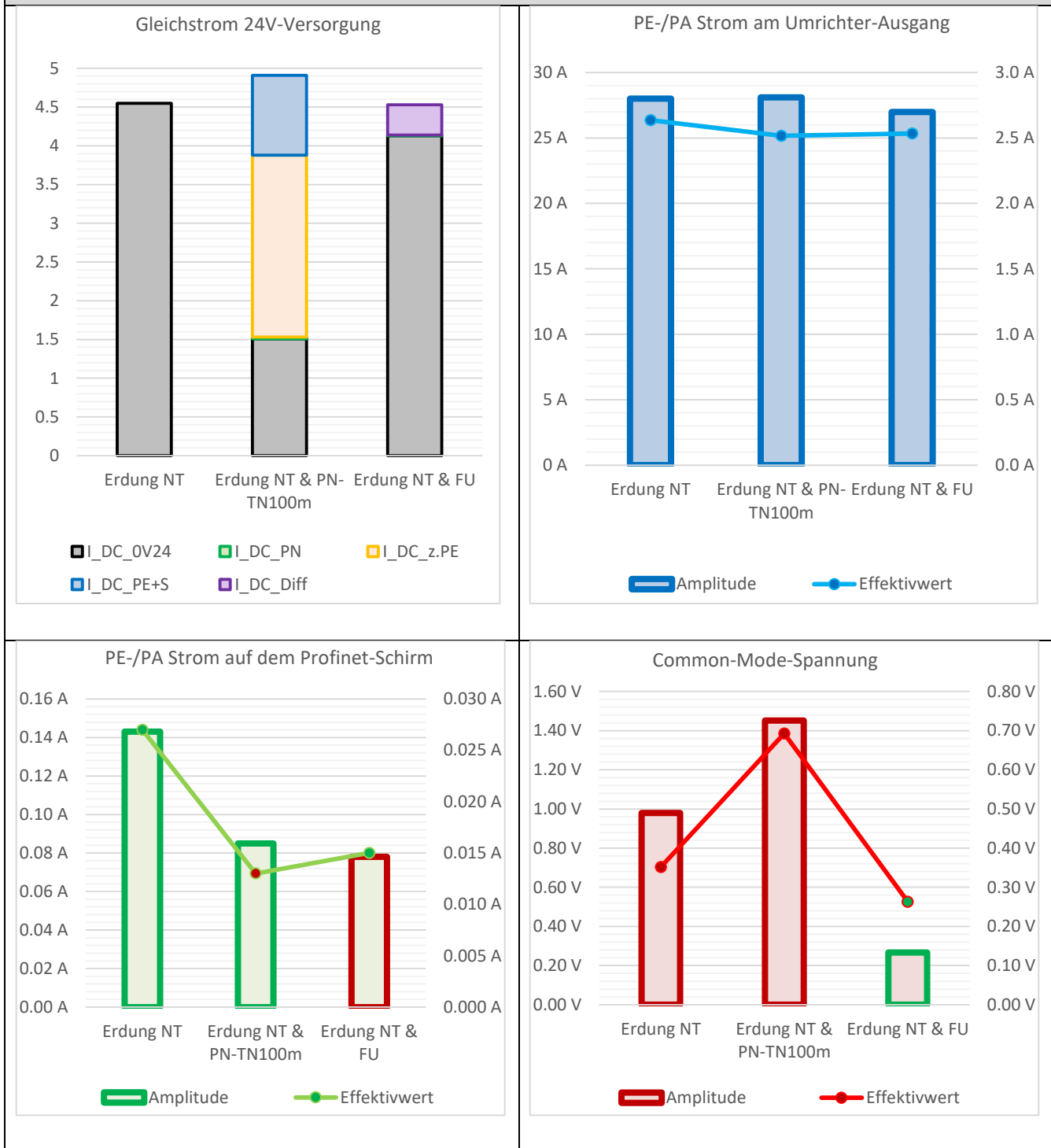


Abbildung 102: Verdrahtungsplan für den 3. Fall der 24V-Untersuchung

Parameter:		Interpretation:
Umrichter	MDX MOVIDRIVE-B 4 kW	➤ Der Rückstrom der 24 V-Versorgung fließt im ersten Fall nur über die 24 V-Masse zurück und beim zweiten Fall über alle weiteren Pfade aus dem Feld. Im dritten Fall fließt lediglich ein geringer Anteil des Rückstroms von der SPS und dem Umrichter auf alternativen Wegen zur Quelle. ➤ Die PE-/PA-Ströme am Umrichter-Ausgang lassen sich durch die verschiedenen 24 V-Erdungsmaßnahmen kaum beeinflussen. ➤ Die PE-/PA-Ströme auf dem Profinet-Schirm sind geringer, wenn die 24 V-Masse mehrere Erdungspunkte aufweist. ➤ Die Common-Mode-Spannung am Umrichter wird minimiert, wenn die 24 V-Masse am Netzteil und am Umrichter geerdet ist.
Taktfrequenz	4 kHz	
Motorleitung	ÖLFEX CLASSIC 110CY 4G2,5mm ²	
Leitungslänge	100 m	
Potenzialausgleich	Profinet-Schirm (PN) + Motor-PE (PE) + Motor-Schirm (S) → (PN+PE+S)	
24V Erdung	• Erdung Netzteil • Erdung Netzteil und PN-TN 100m • Erdung Netzteil und Umrichter	
Drehzahl	20 Hz (1200 Upm)	

Ergebnisse:



13.4.4 Ausgangsdrossel

Der Einsatz einer Ausgangsdrossel ist in der Industrie eine gängige Praxis um möglich kostengünstig die vom Umrichter erzeugten PE-/PA Ströme zu reduzieren. Deshalb wird in diesem Abschnitt der Einsatz eine Ausgangsdrossel im Referenzaufbau genauer untersucht. Als Drossel kommt ein Kern der Firma Magnetec zum Einsatz aus der Reihe der Nanoperm-Kerne. Die Drossel hat eine optimale Windungszahl von $n = 8$, was messtechnisch ermittelt wurde.

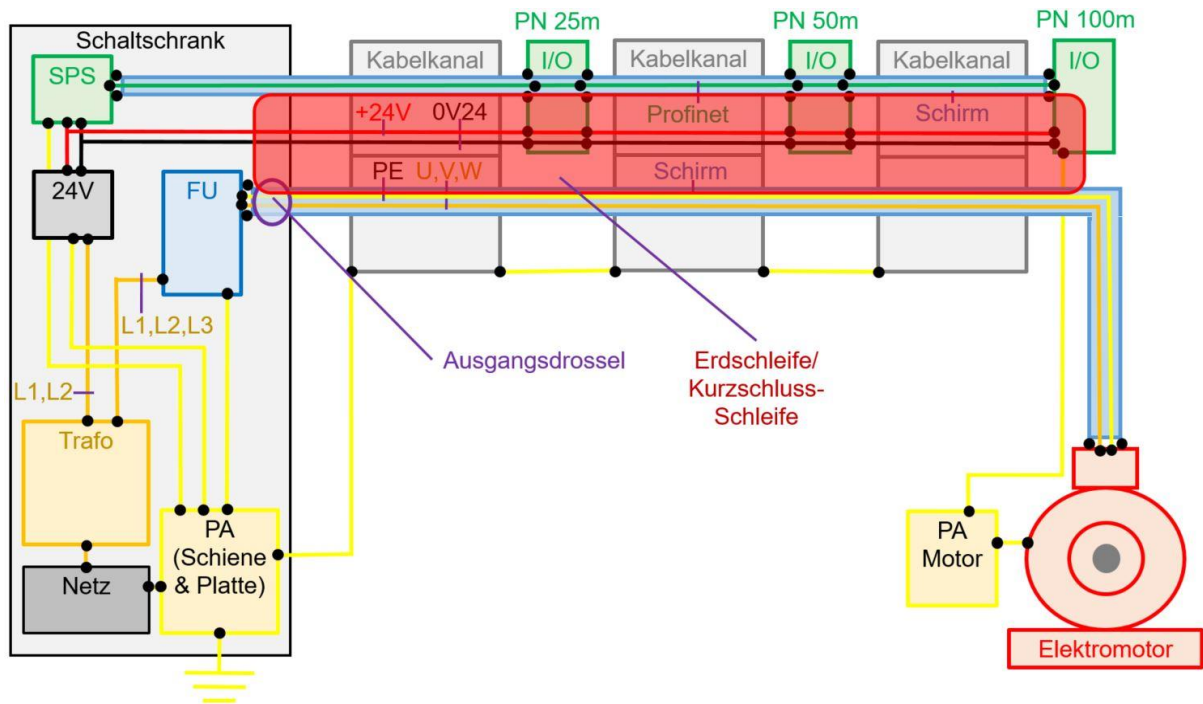
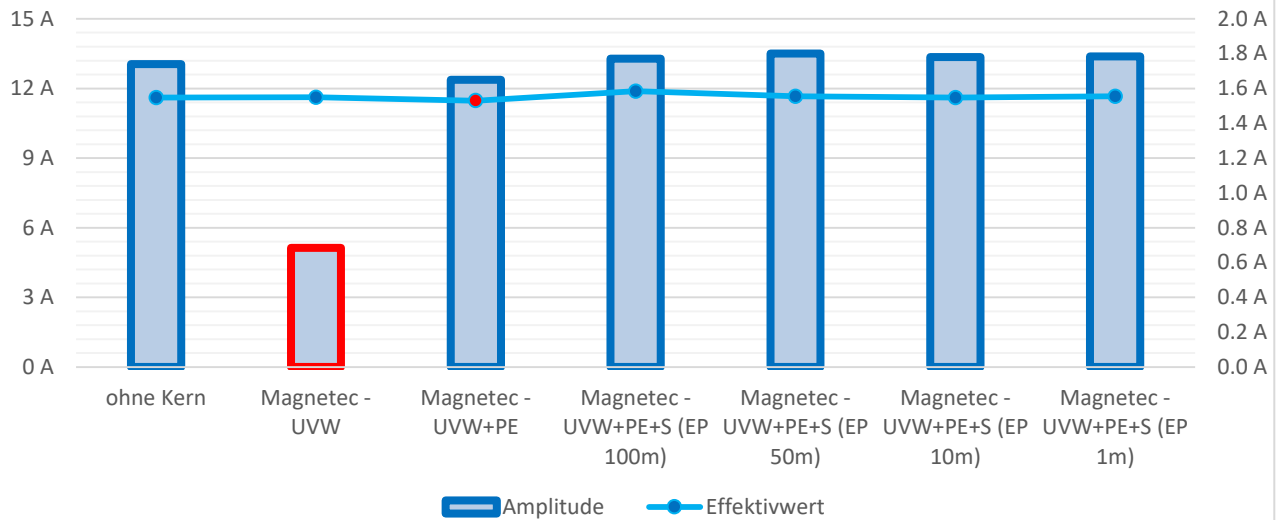


Abbildung 103: Verdrahtungsplan mit Drossel und Kurzschlusschleife

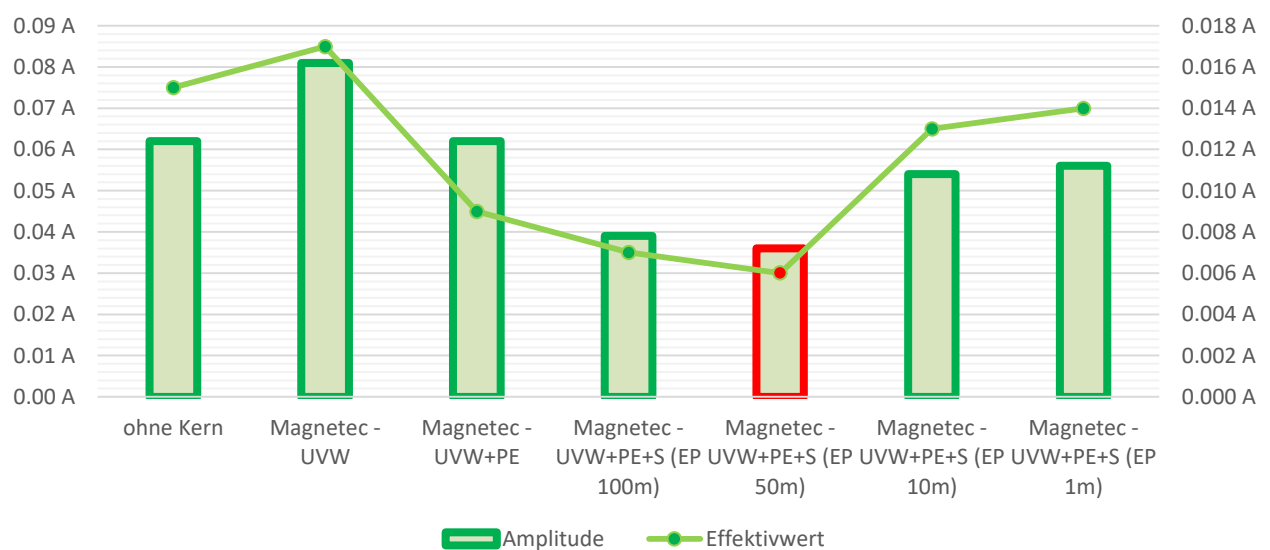
Parameter:		Interpretation:
Umrichter	VLT Automation Drive 4 kW	➤ Drossel als (UVW) reduziert die Amplitude der PE-/PA-Ströme am Umrichter-Ausgang um mehr als die Hälfte bei unverändertem Effektivwert ➤ Die PE-/PA-Ströme auf dem Profinet-Schirm werden um etwa die Hälfte reduziert, sobald die komplette Motorleitung um den Kern gewickelt wird (UVW+PE+S). Bedingung ist, dass die Kurzschlusschleife sehr groß ist (EP 100 m oder EP 50 m). ➤ Eine Verschaltung des Kerns über den drei Außenleitern (UVW) reduziert die hochfrequenten Anteile im Spektrum der PE-/PA-Ströme am Umrichter-Ausgang deutlich. ➤ Im Dämpfungsspektrum weist diese Verschaltungsart mit einer großen Erdschleife (EP 100 m bzw. EP 50 m) die höchste Dämpfung bis ca. 800 kHz auf.
Taktfrequenz	4 kHz	
Motorleitung	ÖLFEX CLASSIC 110CY 4G2,5mm ²	
Leitungslänge	100 m	
Potenzialausgleich	Profinet-Schirm (PN) + Motor-PE (PE) + Motor-Schirm (S) → (PN+PE+S)	
Drehzahl	20 Hz (1200 Upm)	
Drossel	• Keine • UVW • UVW+PE • UVW+PE+S (EP 100m) • UVW+PE+S (EP 50m) • UVW+PE+S (EP 10m) • UVW+PE+S (EP 1m)	

Ergebnisse:

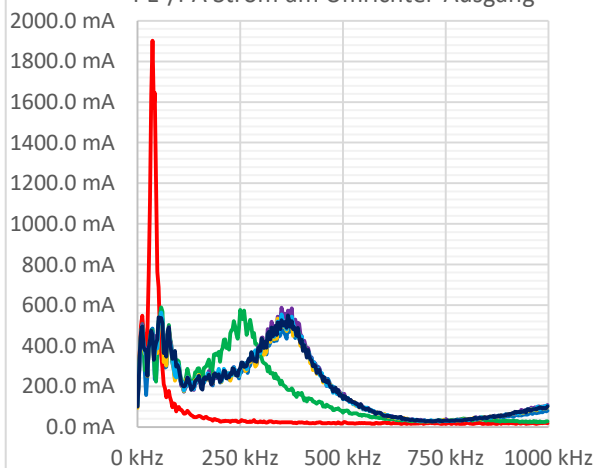
PE-/PA Strom am Umrichter-Ausgang



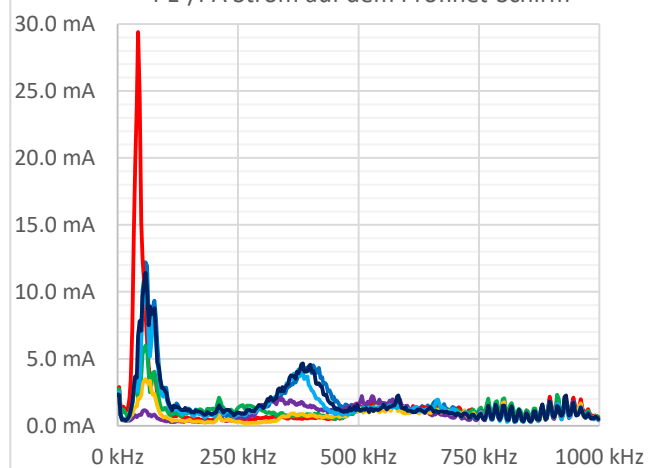
PE-/PA Strom auf dem Profinet-Schirm

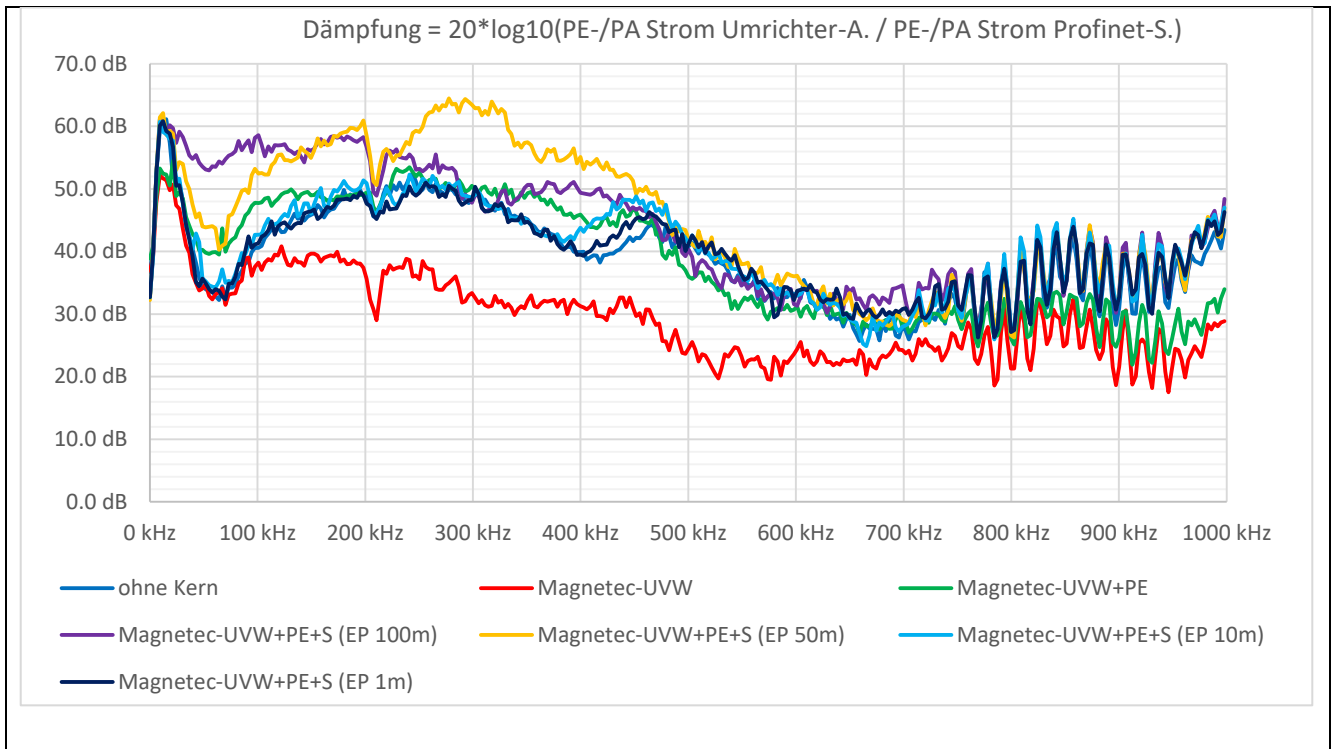


PE-/PA Strom am Umrichter-Ausgang



PE-/PA Strom auf dem Profinet-Schirm





13.5 Abgleich mit Wellen- und Leitungstheorie

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen Theorie und Messung hergestellt. Die Amplitude der ausgangsseitigen PE-/PA Ströme ist vor allem von der Common-Mode-Spannung am Umrichter-Ausgang und dem Wellenwiderstand der Motorleitung abhängig, der aus den Leitungsbelägen berechnet werden kann.

Formeln:

Wellenwiderstand:

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (42)$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (43)$$

Tabelle 21: Messwerte und berechnete Größen

Leitungsbeläge	ÖL. CL. 4G2,5	ÖL. SE. 4G2,5	ÖL. SE. 3G2,5+3G0,5	Prototyp zeroCM
Kapazitätsbelag	247.8 pF/m	121.3 pF/m	126.4 pF/m	94.5 pF/m
Induktivitätsbelag	368.4 nH/m	372.1 nH/m	338.0 nH/m	431.6 nH/m

Tabelle 22: Messwerte und berechnete Größen

Leitungsparameter	ÖL. CL. 4G2,5	ÖL. SE. 4G2,5	ÖL. SE. 3G2,5+3G0,5	Prototyp zeroCM
Wellenwiderstand	38.56 Ω	55.39 Ω	51.71 Ω	67.58 Ω
Ausbreitungs- Geschwindigkeit	104662 km/s	148847 km/s	152992 km/s	156583 km/s
2*Laufzeit (100 m)	1.911 μ s	1.344 μ s	1.307 μ s	1.277 μ s

Überprüfung der Theorie:



Abbildung 104: Oszi-Bild der Messung zur Überprüfung der Leitungstheorie

Tabelle 23: Messwerte und berechnete Größen

Messung	ÖL. CL. 4G2,5	ÖL. SE. 4G2,5	ÖL. SE. 3G2,5+3G0,5	Prototyp zeroCM
Spannungsampl.	650.2 V	647.0 V	659.9 V	651.6 V
Stromamplitude	16.306 A	15.252 A	15.247 A	10.26 A
Wellenwiderstand	39.875 Ω (+3.41%)	42.421 Ω (-23.41%)	43.281 Ω (-16.3%)	63.509 Ω (-6,02%)
2* Laufzeit (100 m)	1.663 μ s (-12.98%)	1.205 μ s (-10.34%)	1,182 μ s (-9.56%)	1.244 μ s (-4.15%)

Die berechneten und gemessenen Ergebnisse liegen in Bereichen gleicher Größenordnung mit Abweichungen kleiner 25 %. Somit können zu erwartende Stromspitzen aus den Kabeleigenschaften rechnerisch bestimmt werden.

13.6 Erstellung der Installationsempfehlungen

Die Empfehlungen werden jeweils von den Optima der Messergebnisse abgeleitet. Die Reihenfolge der Empfehlungen stellt dabei keine Wertigkeit dar.

- I. Motorleitungen sollen auf die nötige Länge reduziert werden → geringerer Effektivwert.
- II. Der Potenzialausgleich soll so niederimpedant wie möglich sein → Einbindung von leitfähigen Anlagenteilen / Leitung-Kanälen.
- III. Der Schirm der Motorleitung soll beidseitig und flächig aufgelegt werden → höchste Dämpfung der Störgröße.
- IV. Die Verwendung einer niederkapazitiven (und symmetrischen) Motorleitung wird empfohlen → reduziert Störgröße in Senke.
- V. Eine Ausgangsdrossel reduziert HF-Anteile im Störsignal bzw. reduziert die Störgröße in der Senke.
- VI. Die Taktfrequenz des Frequenzumrichters soll möglichst niedrig sein, um die Effektivwerte der Störgrößen, die Pulshäufigkeit und dadurch das Störvermögen zu reduzieren.
- VII. Ein 0 Hz- Betrieb (Haltebetrieb) des Motors soll möglichst vermieden werden (bzw. der Motor mit einer Bremse gehalten werden), da die Amplitude und der Effektivwerte der PE-/PA-Ströme bei 0 Hz ein Maximum aufweisen.

14 Überführung in die Normungsgremien (TU DA)

Die bisher erworbenen Ergebnisse wurden bereits zusammengefasst und in den Nominierungsgremien K226 sowie K623 der DKE präsentiert. Weitere Vorstellungen sind in Planung.

15 Im Rahmen des Projektes veröffentlichte Ergebnisse

Während der Laufzeit des PEPA-Projekts wurden folgende wissenschaftliche Arbeiten auf Konferenzen mit Review veröffentlicht:

- A. Zingariello and G. Griepentrog, "Evaluation and simulation of the leakage current in industrial applications," *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia)*, Singapore, Singapore, 2021, pp. 1692-1697, doi: 10.1109/ECCE-Asia49820.2021.9479395.
- A. Zingariello, Z. Zhang and G. Griepentrog, "Analysis of leakage current paths in the power cable and reduction of shield common-mode current through common-mode choke," *2022 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Shanghai, China, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIT48603.2022.1000279
- A. Zingariello, V. Karakasli and G. Griepentrog, "Common Mode and Differential Mode Prediction in a Drive System with Transmission-Line Theory," *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Raleigh, NC, USA, 2021, pp. 407-412, doi: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559195.
- Z. Zhang, G. Griepentrog, M. Owzareck and M. Heuermann, "Investigation of Harmonic and Global Loss of Three-Phase Transformer based on a Permeance Capacitance Analogy Model," *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON49645.2022.9968675.

16 Widmung

Malte Heuermann (†10.11.2022)

In Erinnerung an einen tollen Projekt-Kollegen & Freund.

17 Literaturverzeichnis

- [1] M. Cacciato, A. Consoli, G. Scarcella, S. De Caro and A. Testa, "High frequency modeling of DC/AC converters," 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Germany, 2005, pp. 10 pp.-P.10, doi: 10.1109/EPE.2005.219677.
- [2] M. Cacciato, A. Consoli, G. Scarcella and A. Testa, "Reduction of common-mode currents in PWM inverter motor drives," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 2, pp. 469-476, March-April 1999, doi: 10.1109/28.753643.
- [3] A. Muetze and A. Binder, "Practical Rules for Assessment of Inverter-Induced Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors up to 500 kW," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, no. 3, pp. 1614-1622, June 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.894698.
- [4] D. Busse, J. Erdman, R. J. Kerkman, D. Schlegel and G. Skibinski, "Bearing currents and their relationship to PWM drives," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 12, no. 2, pp. 243-252, March 1997, doi: 10.1109/63.558735.
- [5] Akagi, "Influence of high dv/dt switching on a motor drive system: a practical solution to EMI issues," 2004 Proceedings of the 16th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, Kitakyushu, Japan, 2004, pp. 139-142, doi: 10.1109/WCT.2004.239866.
- [6] G. L. Skibinski, R. J. Kerkman and D. Schlegel, "EMI emissions of modern PWM AC drives," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 5, no. 6, pp. 47-80, Nov.-Dec. 1999, doi: 10.1109/2943.798337.
- [7] Z. Zhang, G. Griepentrog, M. Owzareck and M. Heuermann, "Investigation of Harmonic and Global Loss of Three-Phase Transformer based on a Permeance Capacitance Analogy Model," IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Brussels, Belgium, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON49645.2022.9968675.
- [8] Fu, Kaining & Chen, Wei & Lin, Subin.. A General Transformer Evaluation Method for Common-Mode Noise Behavior. Energies. 12. 1984. doi: 10.3390/en12101984.
- [9] P. Imris and M. Lehtonen, "Modelling of a voltage transformer for transients," 2005 IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, Russia, 2005, pp. 1-5, doi: 10.1109/PTC.2005.4524404.
- [10] W. Shen, F. Wang, D. Boroyevich and Y. Liu, "Definition and acquisition of CM and DM EMI noise for general-purpose adjustable speed motor drives," 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), Aachen, Germany, 2004, pp. 1028-1033 Vol.2, doi: 10.1109/PESC.2004.1355562..
- [11] M. S. Toulabi, L. Wang, L. Bieber, S. Filizadeh and J. Jatskevich, "A Universal High-Frequency Induction Machine Model and Characterization Method for Arbitrary Stator Winding Connections," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 34, no. 3, pp. 1164-1177, Sept. 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2891349.