



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Institut für
Vernetzte Energiesysteme

Hochschule Esslingen
University of Applied Sciences

Nah an Mensch und Technik.

CHARAKTERISIERUNG DES
FREQUENZABHÄNGIGEN ÜBERTRAGUNGSVERHALTENS
VON
LEITUNGSNACHBILDUNGEN IM KLEIN- UND
GROSSIGNALBEREICH

Fakultät für Mechatronik - Elektrotechnik
der Hochschule Esslingen

Abschlussarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering

vorgelegt von

Sebastian Unglaube

geboren am 28.06.1994 in Bremen

Matrikel-Nr.: 752055

am 28. Februar 2020

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. H. Foerschner
Zweitprüfer: M. Eng. J. Petznik

Sperrvermerk

Die vorgelegte Bachelorarbeit basiert auf internen, vertraulichen Daten und Informationen des DLR Instituts für Vernetzte Energiesysteme e.V.. In diesen Bericht dürfen Dritte, mit Ausnahme des betreuenden Professors und befugten Mitarbeitern des Prüfungsamtes der Hochschule Esslingen ohne ausdrückliche Zustimmung des Instituts und des Verfassers keine Einsicht nehmen. Eine Vervielfältigung und Veröffentlichung der Bachelorarbeit ohne ausdrückliche Genehmigung – auch auszugsweise – ist nicht erlaubt.

Eidesstaatliche Erklärung

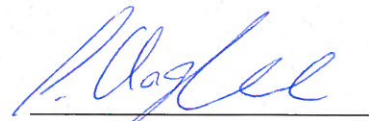
Ich erkläre ehrenwörtlich,

1. dass ich meine Bachelorarbeit selbstständig verfasst und ohne andere als die angegebenen Hilfsmittel verfasst habe.
2. dass ich die Übernahme wörtlicher Zitate aus der Literatur, sowie die Verwendung der Gedanken anderer Autoren an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit gekennzeichnet habe.
3. dass ich die Bachelorarbeit bei keiner anderen Prüfung vorgelegt habe.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Oldenburg, 25.02.2020

Ort, Datum



Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Sperrvermerk	I
Eidesstaatliche Erklärung	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung und Motivation	2
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Methodik	3
2. Grundlagen	4
2.1. Theoretische Grundlagen	4
2.1.1. Lineare Vierpole	4
2.1.2. Leitungstheorie	8
2.1.3. Frequenzganganalyse	14
2.2. Bestimmung der Leitungsimpedanzen	20
2.3. Definition Klein- und Großsignalbereich	24
2.4. Hardwarebeschreibung Leitungsnachbildungen	25
3. Untersuchung der Leitungsnachbildungen	27
3.1. Kleinsignalmessung	27
3.1.1. Frequenzganganalyse	27
3.1.2. Gegenüberstellung des Frequenzverhaltens	34
3.2. Großsignalmessung	35
3.2.1. Bestimmung der Längsimpedanz	36
3.2.1.1. Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz	36
3.2.1.2. Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz	50
3.2.2. Bestimmung der Queradmittanz	61
3.2.3. Vermessung der realen Leitung NAYY-J 4x35mm ² RE	71
3.2.3.1. Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz	72

3.2.3.2.	Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz	75
3.2.3.3.	Bestimmung der Queradmittanz	77
3.2.3.4.	Vergleich NAYY-J 4x35 mm ² - Leitungsnachbildung Typ C .	80
4.	Zusammenfassung & Fazit	82
5.	Ausblick	84
	Literaturverzeichnis	85
Anhang		87
A.	Dokumentation Messtechnik	88
B.	Dokumentation Leitungsnachbildungen	97
C.	Dokumentation Lastwiderstand	114
D.	Dokumentation Regatron 4-Quadrant Netzsimulator	115

Abbildungsverzeichnis

2.1. Berechnung der Kettenmatrix-Vierpolkoeffizienten. Quelle: In Anlehnung an Marti, 2002-2017	4
2.2. Kettenschaltung von zwei Vierpolen. Quelle: In Anlehnung an Marti, 2002-2017	6
2.3. π -Ersatzschaltbild einer Zweidraht-Leitung. Quelle: Gutfleisch, 2016, S. 5.21 .	8
2.4. Längen bezogenes π -Ersatzschaltbild einer Zweidraht-Leitung. Quelle: Gutfleisch, 2016, S. 5.21	10
2.5. Vereinfachtes Längen bezogenes Ersatzschaltbild einer Zweidraht-Leitung. Quelle: Gutfleisch, 2016, S. 5.22	10
2.6. Leitungsnachbildung Typ A - Berechneter Frequenzgang. Quelle: Eigene Darstellung	17
2.7. Leitungsnachbildung Typ B - Berechneter Frequenzgang. Links: Ohne zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Rechts: Mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Quelle: Eigene Darstellung	18
2.8. Leitungsnachbildung Typ C - Berechneter Frequenzgang. Quelle: Eigene Darstellung	19
2.9. Typ A und C - Messaufbau zur Bestimmung der Leitungsimpedanzen. Quelle: Eigene Darstellung	20
2.10. Typ B - Messaufbau zur Bestimmung der Leitungsimpedanzen. Quelle: Eigene Darstellung.	21
2.11. Typ A & B & C - Messaufbau zur einphasigen Bestimmung der Längsimpedanzen. Quelle: Eigene Darstellung.	21
2.12. Typ A & B & C - Messaufbau zur einphasigen Bestimmung der Queradmittanzen. Quelle: Eigene Darstellung	23
2.13. Aufbau der Leitungsnachbildungen Typ A und C. Quelle: Eigene Darstellung	25
2.14. Aufbau der Leitungsnachbildung Typ B. Quelle: Eigene Darstellung.	26
3.1. Leitungsnachbildung Typ A - Gemessener Frequenzgang. Quelle: Eigene Darstellung.	28

3.2. Leitungsnachbildung Typ B - Gemessener Frequenzgang. Links: Ohne zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Rechts: Mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Quelle: Eigene Darstellung.	31
3.3. Leitungsnachbildung Typ C - Gemessener Frequenzgang. Quelle: Eigene Darstellung.	33
3.4. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1-L3 - Verteilung des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	37
3.5. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	40
3.6. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L3 - Verteilung des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	41
3.7. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	44
3.8. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1-L3 - Verteilung des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	45
3.9. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	48
3.10. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	51
3.11. Leitungsnachbildung Typ A Leiter N - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	53
3.12. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	54
3.13. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	56
3.14. Leitungsnachbildung Typ C Leiter N - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	59
3.15. Leitungsnachbildung Typ A - Verteilung der Leiterkapazitäten aller Phasen. Quelle: Eigene Darstellung.	62
3.16. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1-N - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	63
3.17. Leitungsnachbildung Typ B - Verteilung der Leiterkapazität aller Phasen ohne zugeschaltete Zusatzkapazitäten. Quelle: Eigene Darstellung.	64
3.18. Leitungsnachbildung Typ B - Verteilung der Leiterkapazitäten aller Phasen mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Quelle: Eigene Darstellung.	65

3.19. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität ohne zugeschaltete Zusatzkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	66
3.20. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität mit zugeschalteter Zusatzkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	67
3.21. Leitungsnachbildung Typ C - Verteilung des Leiterkapazitäten aller Phasen. Quelle: Eigene Darstellung.	68
3.22. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1-N - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	69
3.23. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE - Verteilung des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität der Phasen L1, L2 und L3. Quelle: Eigene Darstellung. . .	72
3.24. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	73
3.25. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.	76
3.26. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE - Verteilung der Leiterkapazitäten L1-PE, L1-L2 und L1-L3 bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz. Quelle: Eigene Darstellung. 78	
3.27. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	79

Tabellenverzeichnis

2.1. Berechnung der Kettenmatrix-Vierpolkoeffizienten. Quelle: Gutfleisch, 2016, S. 2.5	5
2.2. Spezifikationen der Leitungsbeläge nach Herstellerangaben. Quelle: Boeckhoff, 2018, S. 4-5	16
2.3. Spezifikationen der Leitungsnachbildung TYP A nach Herstellerangaben. Quelle: Boeckhoff, 2018, S. 4	25
2.4. Spezifikationen der Leitungsnachbildung Typ C nach Herstellerangaben. Quelle: Boeckhoff, 2018, S. 5	26
2.5. Spezifikationen der Leitungsnachbildung TYP B nach Herstellerangaben. Quelle: Boeckhoff, 2018, S. 4	26
3.1. Leitungsnachbildung Typ A - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 8 A. Quelle: Eigene Darstellung.	38
3.2. Leitungsnachbildung Typ A - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 8 A. Quelle: Eigene Darstellung.	38
3.3. Leitungsnachbildung Typ A - Verteilung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 15, 5 A. Quelle: Eigene Darstellung.	39
3.4. Leitungsnachbildung Typ A - Verteilung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 15, 5 A. Quelle: Eigene Darstellung.	39
3.5. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.	40
3.6. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	40
3.7. Leitungsnachbildung Typ B - Verteilung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 8 A. Quelle: Eigene Darstellung.	42
3.8. Leitungsnachbildung Typ B - Verteilung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 8 A. Quelle: Eigene Darstellung.	42
3.9. Leitungsnachbildung Typ B - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 15, 5 A. Quelle: Eigene Darstellung.	43

3.10. Leitungsnachbildung Typ B - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 15, 5 A. Quelle: Eigene Darstellung.	43
3.11. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung des Leiterwiderstand. Quelle: Eigene Darstellung.	44
3.12. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	44
3.13. Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 8 A. Quelle: Eigene Darstellung.	46
3.14. Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 8 A. Quelle: Eigene Darstellung.	46
3.15. Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands Phasen L1-L3 bei 15, 5 A. Quelle: Eigene Darstellung.	47
3.16. Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 15, 5 A. Quelle: Eigene Darstellung.	47
3.17. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung des Leiterwiderstand. Quelle: Eigene Darstellung.	48
3.18. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	48
3.19. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstand. Quelle: Eigene Darstellung.	52
3.20. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	52
3.21. Leitungsnachbildung Typ A Leiter N - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstand. Quelle: Eigene Darstellung.	53
3.22. Leitungsnachbildung Typ A Leiter N - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	53
3.23. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.	55
3.24. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	55
3.25. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.	57
3.26. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	57
3.27. Leitungsnachbildung Typ C Leiter N - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.	59

3.28. Leitungsnachbildung Typ C Leiter N - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	59
3.29. Leitungsnachbildung Typ A - Statistische Auswertung aller Leiterkapazitäten bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz. Quelle: Eigene Darstellung.	62
3.30. Leitungsnachbildung Typ A Phase L1-N - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	63
3.31. Leitungsnachbildung Typ B - Statistische Auswertung aller Leiterkapazitäten bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz ohne zugeschaltete Zusatzkapazitäten. Quelle: Eigene Darstellung.	65
3.32. Leitungsnachbildung Typ B - Statistische Auswertung aller Leiterkapazitäten bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Quelle: Eigene Darstellung.	65
3.33. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität ohne zugeschaltete Zusatzkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	66
3.34. Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität mit zugeschalteter Zusatzkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	67
3.35. Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung der Leiterkapazitäten aller Phasen bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz. Quelle: Eigene Darstellung.	68
3.36. Leitungsnachbildung Typ C Phase L1-N - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	69
3.37. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands der Phasen L1, L2 und L3 bei 15, 5 A. Quelle: Eigene Darstellung. . .	73
3.38. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1, L2 und L3 bei 15, 5 A. Quelle: Eigene Darstellung. . . .	73
3.39. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.	74
3.40. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	74
3.41. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE Phase L1 - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.	75
3.42. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.	76
3.43. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE - Statistische Auswertung der Leiterkapazitäten L1-PE, L1-L2, L1-L3 bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz. Quelle: Eigene Darstellung.	77

3.44. Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.	79
3.45. Vergleich der Leitungsparameter der Leitungsnachbildung Typ C mit der Leitung NAYY-J 4x35 mm ² RE. Quelle: Eigene Darstellung.	81

1. Einleitung

Die Verteilnetze in der Mittel- und Niederspannungsebene sind zur wirtschaftlichen und zuverlässigen Versorgung von Abnehmern mit elektrischer Energie ausgelegt (Buchholz & Styczynski, 2019, S. 121).

Eine aktuell zunehmende Änderung der Betriebsbedingungen im Zusammenhang mit den globalen Bestrebungen zur Senkung der CO₂-Emissionen, der Steigerung der Energieeffizienz und dem damit einhergehendem wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien stellen die bestehenden Verteilnetze vor neue Herausforderungen. Die sich daraus ergebenden Herausforderungen entstehen hauptsächlich aufgrund der Integration einer Vielzahl von volatilen und verteilten Erzeugern, welche in die Mittel- und Niederspannungsebene der Verteilnetze einspeisen.

Diese Entwicklung sorgt für eine Verschiebung in der Einspeise-Charakteristik. Ursprünglich ausgehend von der Hierarchie weniger leistungsstarker Erzeuger, welche in die übergeordneten Übertragungsnetze einspeisen, hin zu einer Vielzahl von leistungsmäßig kleineren Erzeugern, welche in die Verteilnetze einspeisen. Diese Verschiebung beschreibt eine Abkehr vom ehemaligen Top-Down-Prinzip hin zu einem Bi-direktionalem Lastflussprinzip.

Zusätzlich werden die Verteilnetze durch die Einbindung leistungsstarker Verbraucher, wie zum Beispiel elektrisch betriebene Fahrzeuge und Wärmepumpen belastet. Die zukünftig angedachten E-Schnelladesäulen mit einer Ladeleistung von mehreren 100 kW werden die momentan realisierten Übertragungskapazitäten an den betreffenden Netzpunkten bei Beibehaltung der aktuellen Systeme schnell übersteigen (Buchholz & Styczynski, 2019, S. 161-162). Die genannten Veränderungen haben hinsichtlich der Versorgungssicherheit und Spannungsqualität einen wesentlichen Einfluss auf die Netzbedingungen und können zu einer temporären Überbeanspruchung der Betriebsmittel und Übertragungskomponenten führen (Buchholz & Styczynski, 2019, S. 162-164).

1.1. Problemstellung und Motivation

Die entstehenden Auswirkungen auf die Übertragungsstrecken im Verteilnetz erfordern eine genaue Kenntnis der Charakteristik von Leitungsstrecken und dessen Verhalten bei verschiedenen Belastungszuständen. Das Netzlabor des DLR Institut für vernetzte Energiesysteme e.V. ermöglicht dafür eine realitätsnahe Erforschung der zukünftigen Verteilnetzarchitekturen.

Auf Grund der im Labor nicht realisierbaren räumlichen Dimension, werden für die Replikation von elektrischen Verteilnetzen in der Mittel- und Niederspannungsebene modulare Nachbildungen von elektrischen Leitungen unterschiedlicher Typen, Querschnitte und Längen eingesetzt. Die Leitungsnachbildungen sind vom Hersteller nach Vorgaben des DLR-VE ausgelegt und besitzen eine spezifische Charakteristik, welche mittels der Widerstands-, Induktivitäts- und Kapazitätsbeläge beschrieben wird. Diese Charakteristik, bezogen auf den Leitungstypen und der nachgebildeten Leitungslänge soll zunächst untersucht und zukünftig mit dem Übertragungsverhalten realer Leitungen verglichen werden.

Darauf aufbauend kann eine Aussage über die Übereinstimmung, oder auch Abweichung zu realen Leitungsnetzen getroffen und in zukünftigen Modellierungen einbezogen werden.

Mit dieser Grundlage ist es möglich in folgenden Versuchen eine wissenschaftlich exakte Untersuchung des Übertragungsverhaltens, sowie diverser Netzstrukturen und Betriebsarten zu realisieren.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Bachelorarbeit ist die Bestimmung des frequenz- und stromabhängigen Übertragungsverhaltens aller drei Typen der Leitungsnachbildungen.

Zur Prognose von Erwartungswerten und der Ermittlung der tatsächlichen Übertragungseigenschaften der Leitungsnachbildungen wird zunächst eine mathematische Berechnung des Amplituden- und Phasengangs an Hand der vom Hersteller angegebenen Sollwerte der Leitungsparameter durchgeführt und anschließend mit dem gemessenen Frequenzgang verglichen.

Der Frage nach der Stromabhängigkeit des Betriebsverhaltens der Leitungsnachbildungen in Form von magnetischen Sättigungserscheinungen der Leiterinduktivitäten, soll in einem vom Bemessungsstrom der Leitungsnachbildungen abhängigen Strombereich von bis zu 75 A untersucht werden.

Als Grundlage einer zukünftigen Bewertung des Übertragungsverhaltens der Leitungsnachbildungen im Vergleich zu den replizierten realen Leitung werden die Leitungsparameter der Längsimpedanz und Queradmittanz messtechnisch bestimmt.

Zusammengefasst ergeben sich damit die folgenden Fragestellungen.

- Sind die Leitungsparameter einer Leitungsnachbildung symmetrisch verteilt und existiert eine Übereinstimmung mit den angegebenen Sollwerten?
- Existiert eine Stromabhängigkeit in Form von Sättigungseffekten bei einer Erhöhung der Strombelastung?
- Wie verhalten sich die Leitungsnachbildungen in Abhängigkeit von der Betriebsfrequenz?

Zusätzlich soll anhand der Vermessung der realen replizierten Leitungen ein direkter Vergleich des Übertragungsverhaltens der Leitungsnachbildungen mit den replizierten Leitungen erfolgen.

1.3. Methodik

Beginnend mit der Definition der Problem- und Fragestellung wird ein theoretischer Rahmen gelegt. Dieser umfasst die komplexe Wechselstromrechnung, die Vierpol- und Leitungstheorie, sowie die Grundlagen der Frequenzganganalyse. Dazu kommen die mathematischen Grundlagen zur Bestimmung einer Übertragungsfunktion durch die Laplace-Transformation des Ein- und Ausgangsignals. Ausgehend von der Theorie folgt die Ausarbeitung einem deduktiven Vorgehen. Nach der Definition der hier genannten quantitativen Forschungsmethoden können die benötigten Daten in Versuchen mit Hilfe von Messungen, oder in Modellierungen und Simulationen in Form von numerischen Daten erhoben und aufbereitet werden.

2. Grundlagen

2.1. Theoretische Grundlagen

2.1.1. Lineare Vierpole

Basierend auf der Vierpol- beziehungsweise Zweitortheorie wird das Betriebsverhalten von, als Zwei-Draht Ersatzschaltbild dargestellten, Leitungsstücken beschrieben. Die Beschreibung der Leitungsstücke mit Hilfe der Vierpol-Kettenmatrizen bietet eine einfach anwendbare Methode zur späteren Verkettung, also der Zusammenschaltung von mehreren Leitungsstücken. Das bedeutet, dass es möglich ist mit der Charakteristik eines bestimmten Längen bezogenen Leitungsstücks oder einer Leitungsnachbildung, eine Beschreibung für mehrere zusammengeschaltete Leitungsstücke oder zusammengeschaltete Leitungsnachbildungen zu geben. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit zur direkten Entnahme der Übertragungsfunktion aus den Koeffizienten der Kettenmatrix.

Im folgenden wird dargestellt wie die Koeffizienten der Kettenmatrix bestimmt werden können und folglich eine Verkettung mehrerer Vierpole, in diesem Fall Längen bezogene Leitungsstücke beschrieben durch deren Leitungsbeläge, durchzuführen ist. Dabei wird in dieser Ausarbeitung lediglich auf die Bestimmung der Koeffizienten der Kettenmatrix eingegangen. Die Bestimmung und Umrechnung der verschiedenen Koeffizienten der unterschiedlichen Matrizenformen zueinander wird nicht durchgeführt, da in dieser Ausarbeitung nur die Kettenmatrix angewandt wird. Die genannte Definition und die folgende Herleitung folgt der von Bosse und Glaab geschilderten Beschreibung von Vierpolen (1994, S. 66-71).

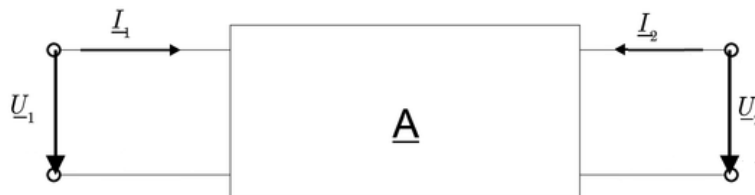


Abbildung 2.1.: Berechnung der Kettenmatrix-Vierpolkoeffizienten.

Quelle: In Anlehnung an Marti, 2002-2017

Die Vierpolgleichungen der Kettenform lauten wie folgt:

$$U_1 = A_{11}U_2 + A_{12}(-I_2) \quad (2.1)$$

$$I_2 = A_{21}U_2 + A_{22}(-I_2) \quad (2.2)$$

mit der Kettenmatrix \underline{A} :

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Die Bestimmung der Vierpolkoeffizienten der Kettenmatrix \underline{A} erfolgt über die in Tabelle 2.1 beschriebene messtechnische oder rechnerische Methodik. Die beschriebenen Spannungen und Ströme sind in der Tabelle 2.1 dargestellt.

Koeffizient	Eingang	Ausgang	Zu messende oder zu berechnende Größen
$\underline{A}_{11} = \frac{U_1}{U_2}$	Einspeisung	Leerlauf	Spannung am Eingang, Spannung am Ausgang
$\underline{A}_{12} = \frac{U_1}{I_2}$	Einspeisung	Kurzschluss	Spannung am Eingang, Strom am Ausgang
$\underline{A}_{21} = \frac{I_1}{U_2}$	Einspeisung	Leerlauf	Spannung am Ausgang, Strom am Eingang
$\underline{A}_{22} = \frac{I_1}{I_2}$	Einspeisung	Kurzschluss	Strom am Eingang, Strom am Ausgang

Tabelle 2.1.: Berechnung der Kettenmatrix-Vierpolkoeffizienten.

Quelle: Gutfleisch, 2016, S. 2.5

Angewandt auf das Ersatzschaltbild in Abbildung 2.5 ergeben sich unter der Vernachlässigung von Δx die folgenden Koeffizienten:

$$\underline{A}_{11} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{I_2=0} = \frac{R' + j\omega L' + \frac{1}{\frac{1}{R'} + j\omega C'}}{\frac{1}{\frac{1}{R'} + j\omega C'}} \quad (2.4)$$

$$= (R' + j\omega L') \cdot \left(\frac{1}{R'} + j\omega C'\right) + 1$$

$$= \Delta Z \cdot \Delta Y + 1$$

$$\underline{A}_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{U_2=0} = R' + j\omega L' \quad (2.5)$$

$$= \Delta Z$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{I_1}{U_2} \Big|_{I_2=0} = \frac{1}{R'} + j\omega C' \quad (2.6)$$

$$= \Delta Y$$

$$\underline{A}_{22} = \frac{I_1}{I_2} \Big|_{U_2=0} = 1 \quad (2.7)$$

Die Vierpolkoeffizienten ergeben in der Kettenmatrix folgende Matrixgleichungen:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (R + j\omega L) \cdot (\frac{1}{R} + j\omega C) + 1 & R + j\omega Z \\ \frac{1}{R} + j\omega C & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ -I_2 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Damit lässt sich nun aus der Kettenmatrix die Übertragungsfunktion bilden. Diesbezüglich wird der Koeffizient \underline{A}_{11} entnommen, daraus der Kehrwert gebildet und $j\omega$ mit s ersetzt. So zu sehen in der Gleichung 2.39, unter der Vernachlässigung des Ableitungsbelags G' beziehungsweise $\frac{1}{R'}$.

Jetzt möchte man aus den vereinfachten infinitesimalen Leitungstücken und zukünftig aus mehreren Leitungsnachbildungen, eine verkettete Leitung bilden. Daher bestimmt man nun die Matrix eines zusammengesetzten Zweitors aus den bekannten Gleichungen der Einzelzweitore. Dieser zusammengesetzte Zweitor ist in der Abbildung 2.2 dargestellt. Dafür wird vorausgesetzt, dass nach der Zusammensetzung der Einzelzweitore die Ströme jedes Klemmenpaares entgegengesetzt gleich groß sind. Der Grund für die Verwendung der Kettenmatrizen wird sich nach der folgenden Herleitung, an Hand der einfachen Multiplikation der Teilzweitor-Matrizen erkennen lassen. Diese Definition, sowie die folgende Durchführung der Vierpolverkettung richtet sich nach der von Bosse und Glaab (1996, S. 84-85) dargelegten Herleitung.

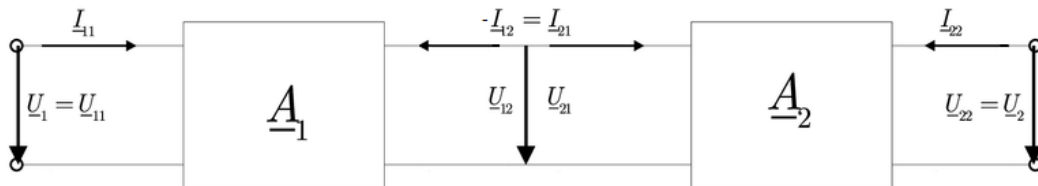


Abbildung 2.2.: Kettenschaltung von zwei Vierpolen.

Quelle: In Anlehnung an Marti, 2002-2017

Für die Abbildung 2.2 gilt:

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{21} \quad (2.9)$$

$$-\underline{I}_{12} = \underline{I}_{21} \quad (2.10)$$

Für das linke Teilzweitor mit der Kettenmatrix \underline{A}_1 gilt:

$$\begin{pmatrix} U'_{11} \\ I'_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U'_{12} \\ -I'_{12} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

und für das rechte Teilzweitor mit der Kettenmatrix \underline{A}_2 gilt:

$$\begin{pmatrix} U''_{21} \\ I''_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A''_{11} & A''_{12} \\ A''_{21} & A''_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U''_{22} \\ -I''_{22} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Damit erhält man mit der in 2.9 und 2.10 gegebenen Beziehung nach dem Zusammenführen (Einsetzen der Kettengleichung U''_{21} in U''_{11} und I''_{21} in I''_{11}) der Gleichungen 2.11 und 2.12 die folgende Kettenmatrix für das Gesamtzweitor A' .

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'_{11} \cdot A''_{11} + A'_{12} \cdot A''_{21} & A'_{11} \cdot A''_{12} + A'_{12} \cdot A''_{22} \\ A'_{21} \cdot A''_{11} + A'_{22} \cdot A''_{21} & A'_{21} \cdot A''_{12} + A'_{22} \cdot A''_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_2 \\ -I_{22} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

beziehungsweise:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ I_{11} \end{pmatrix} = (\underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 = \underline{A}) \begin{pmatrix} U_2 \\ -I_{22} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Dies beweist, dass die Kettenschaltung von zwei Einzelzweitoren der Multiplikation derer Kettenmatrizen entspricht, $\underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 = \underline{A}$.

2.1.2. Leitungstheorie

Zur Beschreibung der Eigenschaften von homogenen Leitungen, wie Sie in der Energietechnik als Leitungen oder Kabel verwendet werden, gebraucht man das in Abbildung 2.3 dargestellte π -Ersatzschaltbild einer Zweidraht-Leitung (Bosse & Glaab, 1996, S. 112).

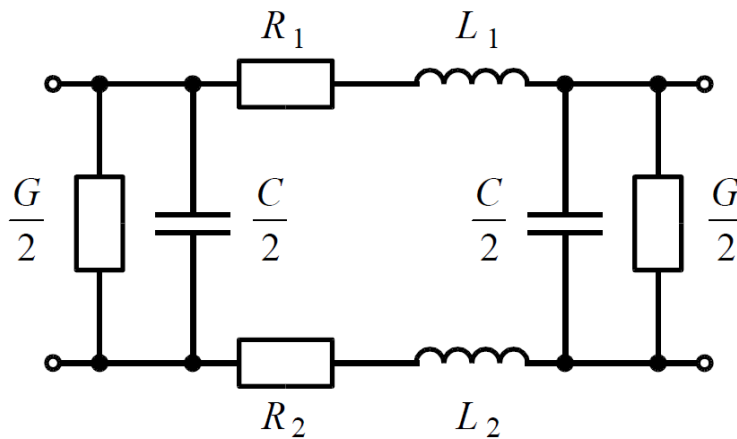


Abbildung 2.3.: π -Ersatzschaltbild einer Zweidraht-Leitung.
Quelle: Gutfleisch, 2016, S. 5.21

In der Praxis ist dies bei vereinfachter Betrachtung ein Vierpol mit weiter eindimensionaler räumlicher Ausdehnung. Aufgrund der räumlichen Ausdehnung eines Leitungssystems, müssten zur Behandlung der elektromagnetischen Vorgänge die allgemeinen Maxwell'schen Gleichungen verwendet werden. Allerdings können diese vermieden werden, indem ein Leitungstück durch eine Verkettung von Vierpolen mit infinitesimaler Länge ersetzt wird. Grundsätzlich handelt es sich bei einem Leitungstück somit um einen Vierpol, dessen räumliche Ausdehnung nicht vernachlässigt werden kann. Jedoch erhält man bei der unendlichen Verkettung von Teilweitoren der Länge $\Delta l \rightarrow 0$, eine ausreichend genaue Beschreibung des Verhaltens der homogenen Leitung (Bosse & Glaab, 1996, S. 112). Sind nur die Spannungen am Ein- und Ausgang der Leitung relevant, können die Widerstände R_1 & R_2 und die Induktivitäten L_1 & L_2 zusammengefasst werden und auf Grund der homogenen Verteilung entlang der Leitung als Längen bezogener Leitungsbelag angegeben werden. Siehe Abbildung 2.4. Die folgende Beschreibung der Leitungstheorie folgt der Herleitung von Gutfleisch (2016, S. 5. 21-5.24). Die Leitungsbeläge L' , R' , C' und G' sind auf eine bestimmte Länge Δx bezogene Größen und berücksichtigen folgende elektrische Eigenschaften von Leitungen (Mietke, o. D.) (Gutfleisch, 2016, S. 5.21):

Induktivitätsbelag L' : Der Induktivitätsbelag setzt sich aus einer inneren und einer äußeren Induktivität zusammen. Der äußere Induktivitätsbelag ist abhängig von der Geometrie des Leiters und den Eigenschaften des verwendeten Leitermaterials. Der äußere Induktivitätsbelag kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$L' = \frac{\mu}{\pi} \ln \frac{2D}{d} \quad (2.15)$$

mit dem Drahtdurchmesser d , dem Drahtabstand D und der Permeabilität μ . Die innere Induktivität beruht auf magnetischen Wechselfeldern im Leiter und kann auf Grund des Skin-Effekts als frequenzabhängig betrachtet werden. Mit steigender Frequenz nimmt die innere Induktivität ab.

Widerstandsbelag R' : Der ohmsche Widerstandsbelag der Leitung ist vom spezifischen Widerstand ρ des Leitermaterials, sowie dem Querschnitt A und der Leiterlänge l abhängig und kann wie folgt beschrieben werden:

$$R' = \rho \frac{l}{A} \quad (2.16)$$

Auf Grund der mit dem Skin-Effekt beschriebenen Stromverdrängung bei steigender Frequenz, ist der ohmsche Widerstand frequenzabhängig und nimmt mit steigender Frequenz zu.

Kapazitätsbelag C' : Der Kapazitätsbelag C' ist von der Geometrie des Leiteraufbaus und der Dielektrizitätskonstante ε des Isoliermaterials abhängig und wird wie folgt beschrieben:

$$C' = \frac{\varepsilon \cdot \pi}{\ln \frac{2D}{d}} \quad (2.17)$$

mit dem Drahtdurchmesser d , dem Drahtabstand D und der Permittivität ε . Dieser Wert ist frequenzunabhängig.

Ableitungsbelag G' : Der Ableitungsbelag G' beschreibt die dielektrischen Verluste bei unvollständiger Isolierung und dem Auftreten von Kriechströmen. Auch Koronaverluste genannt. Der Wert von G' ist frequenzabhängig und kann bei niedrigen Frequenzen vernachlässigt werden.

Da die Werte aller Leitungsbeläge Längen bezogene Größen sind, stellt die folgende Abbildung 2.4 das π -Ersatzschaltbild eines Leitungsstücks der Länge Δx dar.

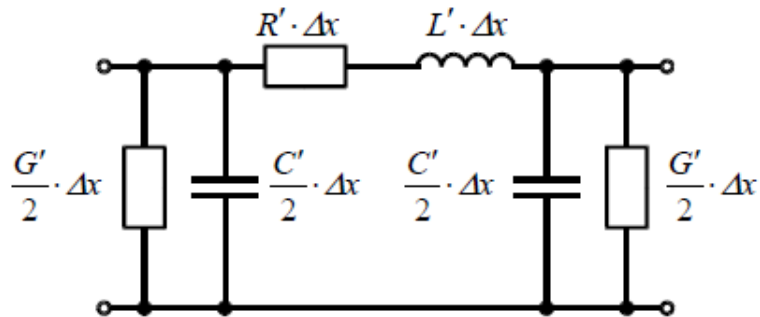


Abbildung 2.4.: Längen bezogenes π -Ersatzschaltbild einer Zweidraht-Leitung.
Quelle: Gutfleisch, 2016, S. 5.21

Werden nun zusätzlich die Kapazitäten C_1 & C_2 , sowie die Leitwerte G_1 & G_2 zusammengefasst, erhält man das in Abbildung 2.5 dargestellte vereinfachte Ersatzschaltbild.

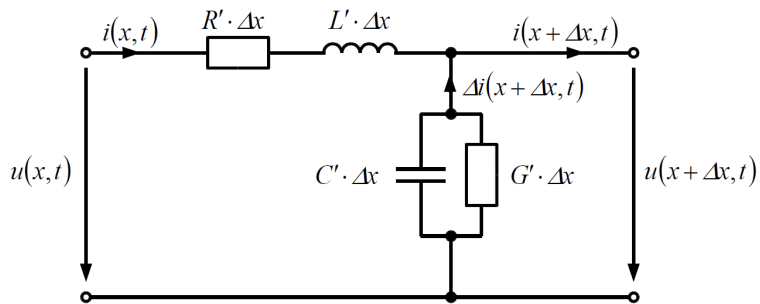


Abbildung 2.5.: Vereinfachtes Längen bezogenes Ersatzschaltbild einer Zweidraht-Leitung.
Quelle: Gutfleisch, 2016, S. 5.22

Anhand dieses Ersatzschaltbildes werden nun die Telegraphen- beziehungsweise Leitungsgleichungen aufgestellt. Die Anwendung der Leitungsgleichungen richtet sich nach dem Auftreten von Welleneffekten und ist in der Regel erst bei Frequenzen oberhalb von 100 kHz relevant. Das heißt bei Annahme einer elektrisch langen Leitung (Gutfleisch, 2016, S. 5.21).

Eine Leitung wird als elektrisch lang angesehen, wenn das folgende Verhältnis zutrifft:

$$l > \lambda/10 \quad (2.18)$$

mit

$$\lambda = c/f \quad (2.19)$$

$$c = 300 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

Diese Annahme betrifft somit nicht das vorhandene System der Leitungsnachbildungen mit einer Betriebsfrequenz von 50 Hz und der Berücksichtigung der Oberschwingungen bis zur 40. Ordnung mit 2000 Hz.

Der Vollständigkeit halber, wird die Herleitung der Leitungsgleichungen nach Gutfleisch (2016, S. 5.22-5.25) im folgenden dennoch durchgeführt.

Zunächst wird mit Hilfe der Kirchhoffschen Maschenregel das Spannungsverhältnis aufgestellt. Dieses ergibt sich aus der Spannung $u(x, t)$ und dem Strom $i(x, t)$ am Eingang, sowie der Spannung $u(x + \Delta x, t)$ am Ausgang.

$$-u(x, t) + R' \cdot \delta x \cdot i(x, t) + L' \cdot \delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + u(x + \delta x, t) = 0 \quad (2.20)$$

Daraus ergibt sich:

$$u(x + \delta x, t) - u(x, t) = \Delta u(x, t) = -R' \cdot \Delta x \cdot i(x, t) - L' \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.21)$$

Dividiert man nun durch Δx und führt $\Delta x \rightarrow 0$ erhält man die erste partielle Differentialgleichung.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u(x, t)}{\Delta x} = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = -R' \cdot i(x, t) - L' \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (2.22)$$

Wendet man die Kirchhoffsche Knotenregel an, erhält man das Stromverhältnis. Dieses ergibt sich aus dem Strom $i(x, t)$ am Eingang, sowie der Spannung $u(x + \Delta x, t)$ und dem Strom $i(x + \Delta x, t)$ am Ausgang.

$$i(x + \delta x, t) - i(x, t) = \Delta i(x, t) = -G' \cdot \Delta x \cdot u(x + \Delta x, t) - C' \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (2.23)$$

Dividiert man nun wieder durch Δx und führt $\Delta x \rightarrow 0$ erhält man die zweite partielle Differentialgleichung.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta i(x, t)}{\Delta x} = \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -G' \cdot u(x, t) - C' \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (2.24)$$

Leitet man die beiden partiellen Differentialgleichungen ab, kann durch die Separation der Variablen eine Lösung für die Differentialgleichungen gefunden werden.

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = -R' \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} - L' \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x \partial t} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} = -R' \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} - L' \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = -G' \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} - C' \cdot \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x \partial t} = -G' \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} - C' \cdot \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.28)$$

Durch Einsetzen erhält man die Leitungsgleichungen in differentieller Form.

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = L' \cdot C' \cdot \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + (R' \cdot C' + G' \cdot L') \cdot \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} + R' \cdot G' \cdot u(x, t) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = L' \cdot C' \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} + (R' \cdot C' + G' \cdot L') \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + R' \cdot G' \cdot i(x, t) \quad (2.30)$$

Zur Lösung der Leitungsgleichungen werden diese nun in den Bildbereich transformiert.

$$\frac{\partial^2 u(x, s)}{\partial x^2} = (L' \cdot s + R') \cdot (C' \cdot s + G') \cdot U(x, s) \quad (2.31)$$

$$= \gamma^2(s) \cdot U(x, s) \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, s)}{\partial x^2} = (L' \cdot s + R') \cdot (C' \cdot s + G') \cdot I(x, s) \quad (2.33)$$

$$= \gamma^2(s) \cdot I(x, s) \quad (2.34)$$

Damit ergibt sich die Fortpflanzungskonstante zu:

$$\gamma(s) = \sqrt{(L' \cdot s + R') \cdot (C' \cdot s + G')} \quad (2.35)$$

$$= \tau' \cdot \sqrt{((s + \delta)^2 - \vartheta^2)} \quad (2.36)$$

mit der Dämpfungskonstante δ , der Verzerrungskonstante ϑ und der Laufzeitkonstante τ .

Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit v gilt:

$$v = \frac{1}{\tau'} = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (2.37)$$

Der Wellenwiderstand ergibt sich nach dem Lösungsansatz für die Ortsabhängigkeit zu:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{L' \cdot s + R'}{C' \cdot s + G'}} \quad (2.38)$$

2.1.3. Frequenzganganalyse

Mit Hilfe der Frequenzganganalyse lässt sich das Systemverhalten eines linearen Systems als Verhältnis der komplexen Ausgangsspannung zur komplexen Eingangsspannung im stationären Betriebszustand und abhängig von der Frequenz f beschreiben (Krichel, Gutfleisch, Lehner, Schmidt und Würslin, 2016, S. 8.13-8.37). Betrachtet wird dabei zum einen der Amplitudengang, welcher den Verlauf des Betrags des Verhältnisses zwischen der Aus- und Eingangsspannung über den Frequenzbereich angibt. Zum anderen wird in einem vom Amplitudengang getrennten Diagramm der Phasengang betrachtet, welcher den Phasenwinkel zwischen der Ausgangs- und der Eingangsspannung über den Frequenzbereich angibt.

Zur manuellen Berechnung des Amplituden- und Phasengangs wird ebenfalls das vereinfachte Ersatzschaltbild aus der Abbildung 2.5 angenommen, da dieses der tatsächlichen Topologie der Leitungsnachbildungen entspricht. Der Ableitungsbelag wird in der Topologie der Leitungsnachbildungen jedoch nicht berücksichtigt. Siehe Abbildung 2.13 und 2.14. Die Werte für die Leitungsparameter der Leitungsnachbildungen werden aus den Angaben des Herstellers entnommen, siehe Anhang B.

Die Berechnung des Amplituden- und Frequenzgangs erfordert die Bestimmung der Übertragungsfunktion als Funktion der Ausgangsspannung zu der Eingangsspannung $\frac{y(t)}{u(t)}$. Dabei wird der Ableitungsbelag außer Betracht gelassen, da dieser nicht vom Hersteller bestimmt ist und als frequenzabhängiger Wert im vorhergesehenen Betriebsbereich von 50 Hz vernachlässigbar geringe Auswirkungen hat. Die Darstellung der Übertragungsfunktion erfolgt mathematisch, als Polynomdarstellung, sowie graphisch als Bode-Diagramm. Zunächst wird in allgemeiner Form die manuelle Berechnung des Bodediagramms aufgezeigt und darauf folgend mit den spezifizierten Angaben der Leitungsnachbildungen gerechnet. Die Nachfolgende Beschreibung der Frequenzganganalyse folgt der Herleitung von Gutfleisch et al. (2016, S. 8.13-8.37).

Aus dem vereinfachten Ersatzschaltbild ergibt sich die Übertragungsfunktion zu:

$$\underline{F}(\omega) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C'}}{2R' + 2j\omega L' + \frac{1}{j\omega C'}} \quad (2.39)$$

$$= \frac{1}{(j\omega)^2 2L'C' + (j\omega)2R'C' + 1} \quad (2.40)$$

Die umgeformte Gleichung überführt man nun in den Bildbereich (s-Bereich), womit man zur Übertragungsfunktion $G(s)$ eines dynamischen Systems kommt. Mit dieser Funktion kann das Übertragungsverhalten in jedem Betriebszustand beschreiben werden.

Im Bildbereich erkennt man deutlich die Übertragungsfunktion eines PT-2 Glieds in allgemeiner Form.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + 2D\frac{s}{\omega_0} + 1} \quad (2.41)$$

$$= \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2DTs + 1} \quad (2.42)$$

Vergleicht man die Koeffizienten, erhält man:

$$T = \sqrt{L'C'} \quad (2.43)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (2.44)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot R' \cdot \sqrt{\frac{C'}{L'}} \quad (2.45)$$

Möchte man die Übertragungsfunktion in ein Bode-Diagramm überführen, benötigt man für den doppel-logarithmisch dargestellten Amplitudengang den logarithmischen Betrag der Funktion $\underline{F}(\omega)$ in dB, welcher über die Frequenzachse aufgetragen wird. Die Darstellung des Phasengangs erfolgt einfach-logarithmisch, indem man den Phasenwinkel über die logarithmisch unterteilte Frequenzachse abbildet.

Der Betrag berechnet sich wie folgt:

$$|\underline{F}(w)| = \sqrt{\operatorname{Re}\{\underline{F}(w)\}^2 + \operatorname{Im}\{\underline{F}(w)\}^2} \quad (2.46)$$

Dazu wird die Übertragungsfunktion durch die konjugiert komplexe Erweiterung mit dem Nenner in einen Real- und einen Imaginärteil aufgetrennt.

$$= \frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2 + (2D(\frac{\omega}{\omega_0}))^2}} \quad (2.47)$$

Die logarithmische Umrechnung in $|_{dB}$ ergibt sich zu:

$$|F(w)|_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(|\underline{F}(w)|) \quad (2.48)$$

Für die Berechnung der Phase ergibt sich die folgende Beziehung:

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{\operatorname{Re}\{\underline{F}(\omega)\}}{\operatorname{Im}\{\underline{F}(\omega)\}}\right) \quad (2.49)$$

Angewandt auf die Leitungsnachbildungen werden der Dokumentation folgende Werte für die Leitungsparameter R , L und C der Leitungsnachbildungen der Typen A, B und C entnommen.

Typ Leitungsnachbildung	R	L	C
Typ A	6,25 mΩ	31 μH	15,5 nF
Typ B	44 mΩ	400 μH	25 nF
Typ C	26,2 mΩ	24 μH	9,4 nF

Tabelle 2.2.: Spezifikationen der Leitungsbeläge nach Herstellerangaben.
Quelle: Boeckhoff, 2018, S. 4-5

Die Werte der Leitungsparameter werden nun in die Gleichungen 2.43, 2.44 und 2.45 eingesetzt und damit die folgende Funktion für die Berechnung des frequenzabhängigen Betrags und der Phase aufgestellt.

$$|F(\omega)|_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2 + (2D(\frac{\omega}{\omega_0}))^2}} \right) \quad (2.50)$$

Ebenfalls eingesetzt in die Gleichung 2.49, ergibt sich die Berechnung des Phasengangs zu:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} \arctan \left(\frac{-2D(\frac{\omega}{\omega_0})}{(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)} \right) & \text{für } \omega < \frac{1}{T} \\ -180^\circ - \arctan \left(\frac{-2D(\frac{\omega}{\omega_0})}{(1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2)} \right) & \text{für } \omega > \frac{1}{T} \end{cases} \quad (2.51)$$

Durchgeführt für alle drei Typen der Leitungsnachbildungen erhält man die folgenden Bode-Diagramme für einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 MHz.

Bei der Betrachtung der Bode-Diagramme sind vor allem die folgenden Merkmale von Interesse:

- Die Resonanzfrequenz f_0 mit dem Betrag der Amplitudenverstärkung
- Die -3 dB Grenzfrequenz f_g
- Der Abfall des Amplitudengangs nach f_g in dB/Dekade
- Die Phasenverschiebung von $0 \rightarrow 180^\circ$ im Resonanzpunkt

Beginnend mit dem Typ A der Leitungsnachbildungen werden nun die spezifischen Merkmale der Frequenzgänge aller drei Typen aufgezeigt.

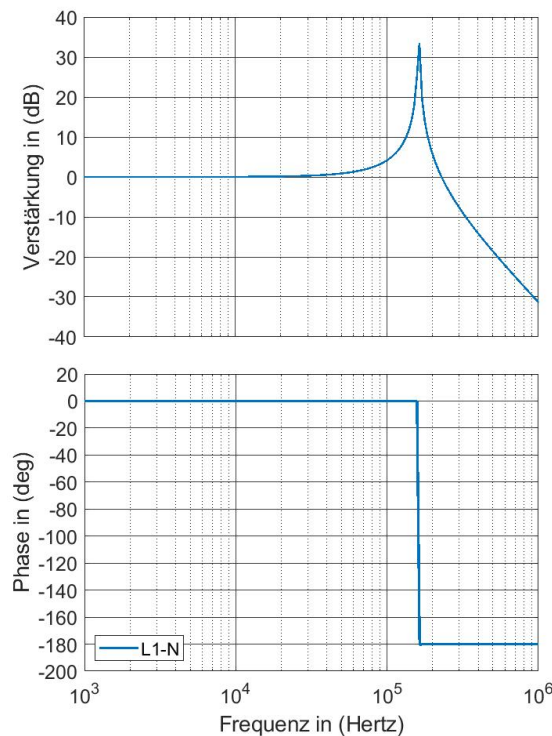


Abbildung 2.6.: Leitungsnachbildung Typ A - Berechneter Frequenzgang.
Quelle: Eigene Darstellung

Wie in Abbildung 2.6 zu erkennen ist, verläuft der Amplitudengang bis zu einer Frequenz von 30 kHz auf der 0 dB Linie. Daraufhin steigt die Amplitudenverstärkung bis auf einen Wert von 33 dB in der Resonanzfrequenz von $f_0 = 170$ kHz an. Die -3 dB Grenzfrequenz f_g liegt bei etwa 240 kHz, mit einer folgenden Steigung von -45 dB/Dekade. Die Phasenverschiebung im Resonanzpunkt beträgt 180° .

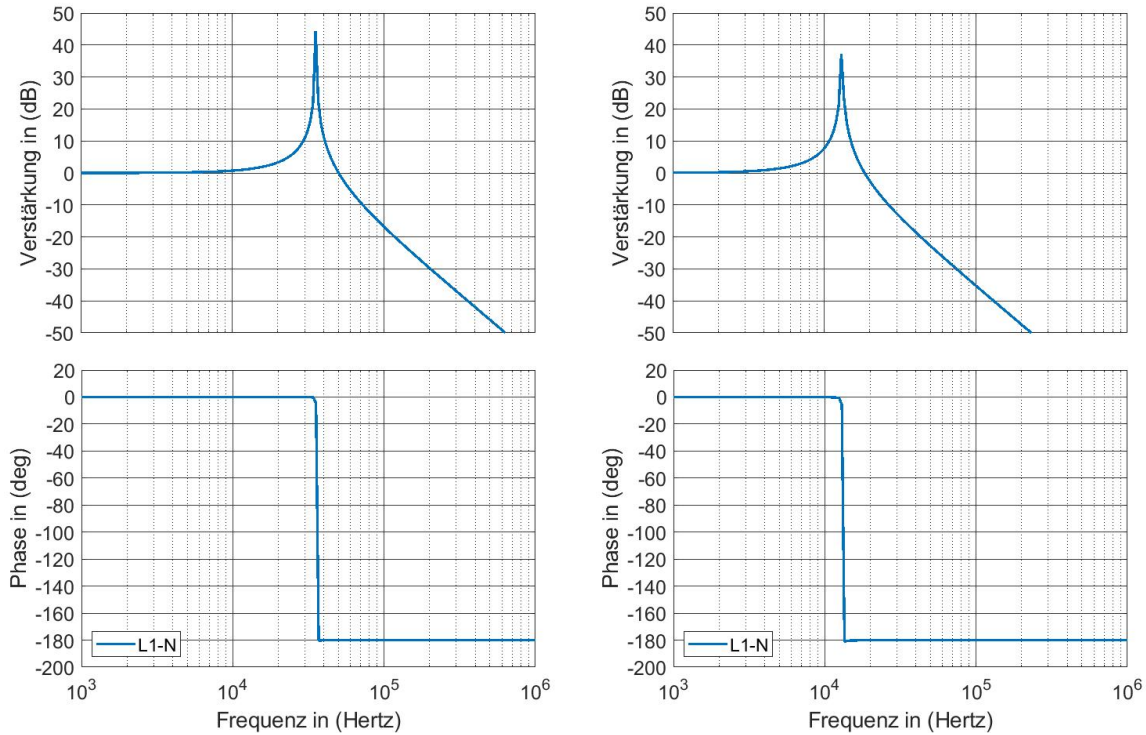


Abbildung 2.7.: Leitungsnachbildung Typ B - Berechneter Frequenzgang.
 Links: Ohne zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Rechts: Mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten.
 Quelle: Eigene Darstellung

In der Abbildung 2.7 folgt nun der berechnete Frequenzgang des Typs B. Zunächst die Betrachtung ohne die zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Aus dem Verlauf geht hervor, dass der Amplitudengang bis zu einer Frequenz von 8 kHz auf der 0 dB Linie verläuft. Daraufhin steigt die Amplitudenverstärkung bis auf einen Wert von 44 dB in der Resonanzfrequenz von $f_0 = 35$ kHz an. Die -3 dB Grenzfrequenz f_g liegt bei etwa 55 kHz, mit einer folgenden Steigung von -42 dB/Dekade. Die Phasenverschiebung im Resonanzpunkt beträgt 180° .

Bei der Zuschaltung der Kapazitäten verschiebt sich der Verlauf des Frequenzganges in die untere Richtung der Frequenzachse. Der Amplitudengang verläuft bis zu einer Frequenz von 3 kHz auf der 0 dB Linie. Daraufhin steigt die Amplitudenverstärkung bis auf einen Wert von 37 dB in der Resonanzfrequenz von $f_0 = 14$ kHz an. Die -3 dB Grenzfrequenz f_g liegt bei etwa 35 kHz, mit einer folgenden Steigung von -42 dB/Dekade. Die Phasenverschiebung im Resonanzpunkt beträgt 180 deg.

Die Erhöhung der Leiterkapazität bedeutet also das Auftreten von frequenzabhängigen Erscheinungen, wie des Resonanzverhaltens, in niedrigeren Frequenzbereichen. Zurückzuführen ist dies auf den Verlauf der Blindwiderstände des induktiven, sowie des kapazitiven Anteils.

Dies wird im Abschnitt 3.1.1 in der messtechnischen Bestimmung der Frequenzgänge nochmals eingehend erläutert.

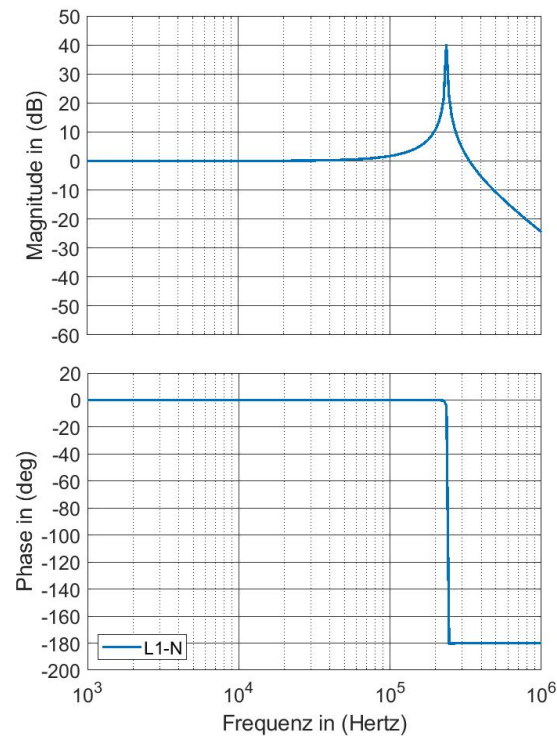


Abbildung 2.8.: Leitungsnachbildung Typ C - Berechneter Frequenzgang.
Quelle: Eigene Darstellung

Abschließend mit dem in der Abbildung 2.8 dargestellten berechneten Frequenzgang des Typs C erkennt man, dass der Amplitudengang bis zu einer Frequenz von 60 kHz auf der 0 dB Linie verläuft. Daraufhin steigt die Amplitudenverstärkung bis auf einen Wert von 40 dB in der Resonanzfrequenz von $f_0 = 240$ kHz an. Die -3 dB Grenzfrequenz f_g liegt bei etwa 350 kHz, mit einer folgenden Steigung von -43 dB/Dekade. Die Phasenverschiebung im Resonanzpunkt beträgt ebenfalls 180° .

2.2. Bestimmung der Leitungsimpedanzen

Die Vermessung der Längsimpedanzen und Queradmittanzen der Leitungsnachbildungen erfolgt im Kleinsignalbereich mit einem im Anhang A beschriebenen Netzwerkanalysator. Im Großsignalbereich erfolgt die drei- und einphasige messtechnische Bestimmung der Leiter Längsspannungen und -ströme mit Hilfe des im Anhang A ebenfalls beschriebenen SIRIUS Leistungsanalysators.

Die Längsimpedanzen, bestehend aus dem Leiterwiderstand R und der Leiterinduktivität L werden bei der dreiphasigen Messung im Großsignalbereich über die in Abbildung 2.9 dargestellte Topologie für die Leitungsnachbildungen Typ A und C als Vierleiter Ausführung und der in Abbildung 2.10 darstellten Topologie für die Leitungsnachbildung Typ B als Dreileiter Ausführung bestimmt. Die Bestimmung der Längsimpedanz bei der einphasigen Messung folgt der Topologie in Abbildung 2.11. Beide Topologien werden mit einer geregelten Spannung von $\hat{U}_1 \cdot e^{i\varphi_{u1}}$, $\hat{U}_2 \cdot e^{-i120^\circ}$ und $\hat{U}_3 \cdot e^{-i240^\circ}$ gespeist und mit einem definierten mehrstufigen Lastwiderstand R_L als Stromquelle belastet. Das Datenblatt des Lastwiderstands (FRIZLEN GMBH U. CO KG, o. D.) ist im Anhang Teil C zu finden.

Messtechnisch werden nun die Teilspannungen

$$\underline{U}_{11} = \hat{U}_{11} \cdot e^{i\varphi_{u1}}, \underline{U}_{22} = \hat{U}_{22} \cdot e^{i\varphi_{u2}}, \underline{U}_{33} = \hat{U}_{33} \cdot e^{i\varphi_{u3}} \text{ und } \underline{U}_N = \hat{U}_N \cdot e^{i\varphi_{uN}}$$

und die Ströme

$$\underline{I}_1 = \hat{I}_1 \cdot e^{i\varphi_{i1}}, \underline{I}_2 = \hat{I}_2 \cdot e^{i\varphi_{i2}}, \underline{I}_3 = \hat{I}_3 \cdot e^{i\varphi_{i3}} \text{ und } \underline{I}_N = \hat{I}_N \cdot e^{i\varphi_{iN}}$$

über die Längsimpedanzen \underline{Z}_{11} , \underline{Z}_{22} , \underline{Z}_{33} und \underline{Z}_N ermittelt (Büttner, 2009, S. 135-140).

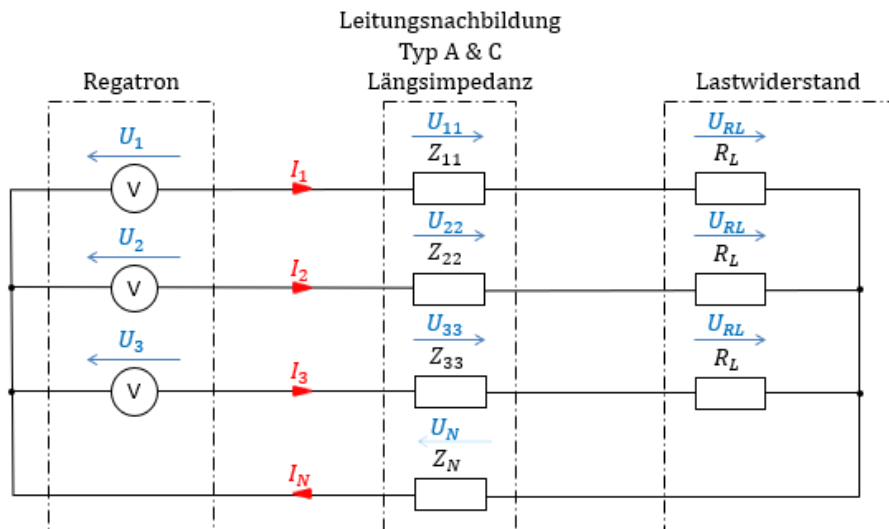


Abbildung 2.9.: Typ A und C - Messaufbau zur Bestimmung der Leitungsimpedanzen.

Quelle: Eigene Darstellung

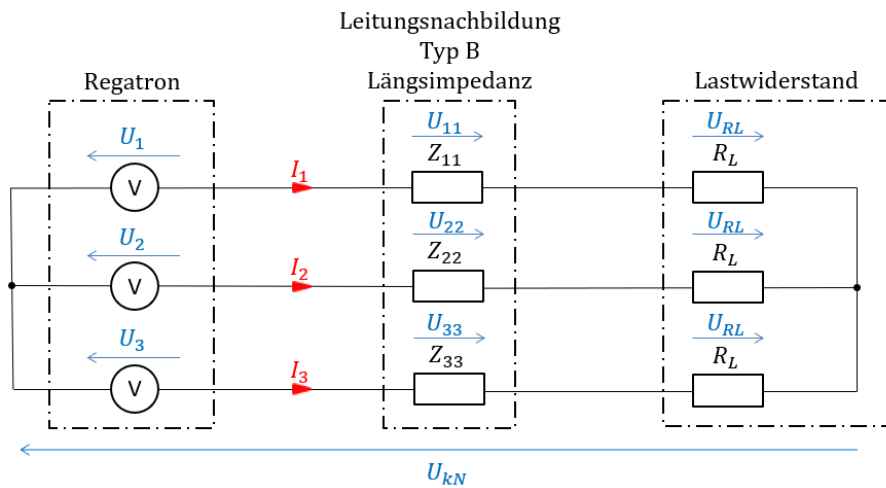


Abbildung 2.10.: Typ B - Messaufbau zur Bestimmung der Leitungsimpedanzen.
Quelle: Eigene Darstellung.

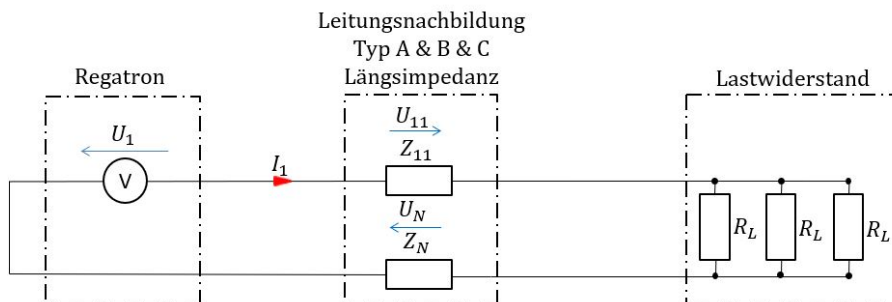


Abbildung 2.11.: Typ A & B & C - Messaufbau zur einphasigen Bestimmung der Längsim-
pedanzen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Mit den Werten für die Spannungen \underline{U}_{11} , \underline{U}_{22} , \underline{U}_{33} , \underline{U}_N und den Strömen \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 , \underline{I}_N werden nun folgendermaßen die Längsimpedanzen bestimmt (Büttner, 2009, S. 32):

$$\underline{Z}_{11} = \frac{\hat{U}_{11}}{\hat{I}_1} \quad (2.52)$$

$$\underline{Z}_{22} = \frac{\hat{U}_{22}}{\hat{I}_2} \quad (2.53)$$

$$\underline{Z}_{33} = \frac{\hat{U}_{33}}{\hat{I}_3} \quad (2.54)$$

$$\underline{Z}_N = \frac{\hat{U}_N}{\hat{I}_N} \quad (2.55)$$

Alternativ kann der Spannungsabfall über die Phasen der Leitungsnachbildungen des Typs B in Abbildung 2.10 auch folgendermaßen bestimmt werden:

$$\underline{U}_{11} = \underline{U}_1 - \underline{U}_{RL1} - \underline{U}_{kN} \quad (2.56)$$

$$\underline{U}_{22} = \underline{U}_2 - \underline{U}_{RL2} - \underline{U}_{kN} \quad (2.57)$$

$$\underline{U}_{33} = \underline{U}_3 - \underline{U}_{RL3} - \underline{U}_{kN} \quad (2.58)$$

Die Berechnung der Längsimpedanzen erfolgt dann gleichermaßen nach den Gleichungen 2.52, 2.53, 2.54 und 2.55.

Zur Berechnung des ohmschen Leiterwiderstandes R und der Leiterinduktivität L benötigt man nun die Phasenbeziehung φ_{11} , φ_{22} , φ_{33} und φ_N zwischen den gemessenen Spannungen und Strömen der einzelnen Phasen.

Mit der bestimmten Phasenverschiebung lässt sich der komplexe Zeiger \underline{Z} in seinen Realteil (Wirkanteil) $Re\{\underline{Z}\}$ und seinen Imaginärteil (Blindanteil) $Im\{\underline{Z}\}$ zerlegen (Büttner, 2009, S. 32).

$$R = \underline{Z} \cdot \cos(\varphi_{ui}) \quad (2.59)$$

$$X_L = \underline{Z} \cdot \sin(\varphi_{ui}) \quad (2.60)$$

$$L = \frac{X_L}{j\omega} \quad (2.61)$$

Die Bestimmung der Queradmittanzen zwischen den Phasen erfolgt für alle drei Typen der Leitungsnachbildungen im einphasigen Aufbau, dargestellt in Abbildung 2.12.

Mit den gemessenen Werten für die Spannung \underline{U}_{1N} über die Kapazität, des kapazitiven Blindstroms \underline{I}_1 und der Phasenverschiebung φ_{ui} zwischen den beiden Größen, kann nun folgendermaßen die Queradmittanz bestimmt werden (Büttner, 2009, S. 32):

$$\underline{Y} = \frac{\hat{I}_1}{\hat{U}_{11}} \quad (2.62)$$

$$G = \underline{Y} \cdot \cos(\varphi_{ui}) \quad (2.63)$$

$$B = \underline{Y} \cdot \sin(-\varphi_{ui}) \quad (2.64)$$

$$C = \frac{B}{j\omega} \quad (2.65)$$

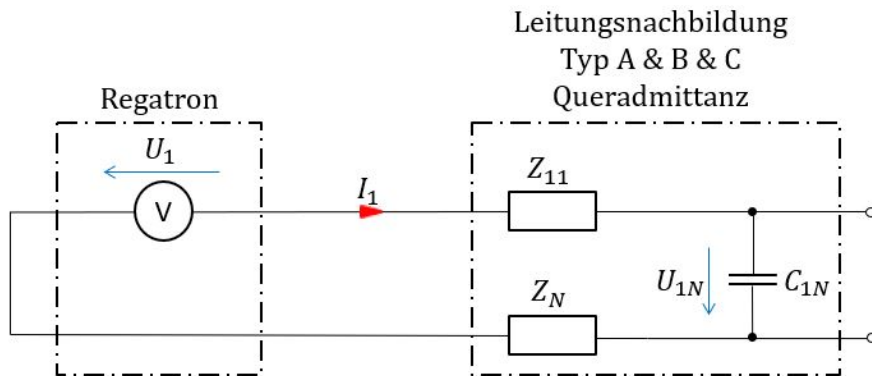


Abbildung 2.12.: Typ A & B & C - Messaufbau zur einphasigen Bestimmung der Queradmittanzen. Quelle: Eigene Darstellung

2.3. Definition Klein- und Großsignalbereich

Die Untersuchung der Leitungsnachbildungen und der realen äquivalenten Leitungen beinhaltet die zur Charakterisierung notwendige Durchführung einer Frequenzganganalyse, sowie darauf folgend die messtechnische Bestimmung der Längsimpedanzen und Queradmittanzen. Dabei soll festgestellt werden, ob die resultierenden Ergebnisse der beiden Verfahren abhängig von der Anwendung eines Groß- oder Kleinsignals sind.

Für den Zusammenhang der folgenden Ausarbeitung werden nun die Begriffe des Klein- und Großsignals, bezogen auf die gemessenen Betriebssignale der Leitungsnachbildungen und Leitungen, definiert. Für den Klein- und Großsignalbereich besteht wegen der sehr kleinen Dimension der Messgrößen ein hoher Anspruch an die Spannungsqualität der Quellen. Besonders wichtig sind hier ein niedriger THD-Wert und das nicht Vorhandensein einer voreingestellten Phasenverschiebung zwischen der Leiterspannung U_{LN} und dem Leiterstrom I_L .

Kleinsignalbereich

Die Messung des Frequenzgangs erfolgt im Kleinsignalbereich und richtet sich nach den Messgerät-Spezifikationen (Omron, 2019) des BODE-100 Netzwerkanalysators (siehe Anhang Teil A). Das Kleinsignal besitzt den folgenden Signalbereich.

Quellspannung	U_{L-Neff} :	14 mV...2 V
Frequenzbereich	f :	1...1 MHz

Großsignalbereich

Die Spezifizierung des Großsignalbereichs richtet sich zum einen nach dem Betriebsverhalten der Spannungsquelle und zum anderen nach dem maximalen Nennstrom der Leitungsnachbildungen. Der Spannungsbereich von 230 V AC ist der Nennbereich der Spannungsquelle und der Leitungsnachbildung. In diesem Bereich ist die Spannungsqualität der Quelle hinsichtlich des THD-Werts mit 0.23 % am höchsten (Regatron AG, 2019), siehe Anhang Teil D. Der Frequenzbereich der Spannungsquelle liegt im Bereich von 50 Hz bis 400 Hz. Der Nennstrom pro Strang der Leitungsnachbildungen beträgt 75 A. Die messtechnische Bestimmung der Leitungsparameter erfolgt mit dem SIRIUS Leistungsanalysator (Dewesoft GmbH, 2019). Dessen Spezifikationen sind dem Anhang Teil A zu entnehmen.

Quellspannung	$U_{L1-Neff} - U_{L3-Neff}$:	230 VAC
Lastbereich	$I_{L1eff} - I_{L3eff}$:	0, 5...75 A
Frequenzbereich	f :	50...100...200...400 Hz

2.4. Hardwarebeschreibung Leitungsnachbildungen

Bei den eingesetzten Leitungsnachbildungen A, B und C handelt es sich um Replikationen von elektrischen Leitungen unterschiedlichen Typs, Querschnitts und abhängig von der Verkettung der Module unterschiedlicher Längen. Die Leitungsnachbildungen bestehen im wesentlichen aus der Zusammenschaltung eines ohmschen Widerstandes R , eines induktiven Blindwiderstands X_L und einer Kapazität C , deren Bemessungen den Längen bezogenen Leitungsbelägen R' , L' und C' spezifischer Leitungen angepasst sind. Die folgenden Angaben beruhen auf der technischen Dokumentation der Leitungsnachbildungen (Boeckhoff, 2018) und sind im Anhang B zu finden.

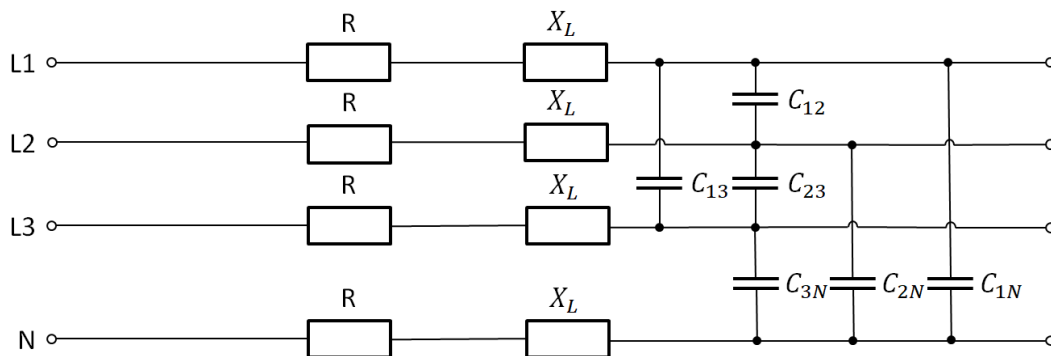


Abbildung 2.13.: Aufbau der Leitungsnachbildungen Typ A und C.
Quelle: Eigene Darstellung

Die Abbildung 2.13 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Leitungsnachbildungen der Typen A und C. Beide Typen sind als vier-Leiter Modul mit den Phasen L1-L3 und N ausgelegt. Der Typ A soll den elektrischen Eigenschaften eines NAYY-J 4x240 mm² Kabels entsprechen und besitzt die in Tabelle 2.3 vom Hersteller angegebenen Spezifikationen.

Betriebsspannung	400/230	V AC
Nennstrom je Strang	75	A
Widerstandswert je Strang	6,25	mΩ ±10 %
Induktivität je Strang	31	μH ±10 %
Kapazität je Strang	15,5	nF ±10 %

Tabelle 2.3.: Spezifikationen der Leitungsnachbildung TYP A nach Herstellerangaben.
Quelle: Boeckhoff, 2018, S. 4

Der Typ C soll den elektrischen Eigenschaften eines NAYY-J 4x35 mm² Kabels entsprechen und besitzt die in Tabelle 2.4 vom Hersteller angegebenen Spezifikationen.

Betriebsspannung	400/230	V AC
Nennstrom je Strang	75	A
Widerstandswert je Strang	26,2	mΩ ±10 %
Induktivität je Strang	24	μH ±10 %
Kapazität je Strang	9,4	nF ±10 %

Tabelle 2.4.: Spezifikationen der Leitungsnachbildung Typ C nach Herstellerangaben.
Quelle: Boeckhoff, 2018, S. 5

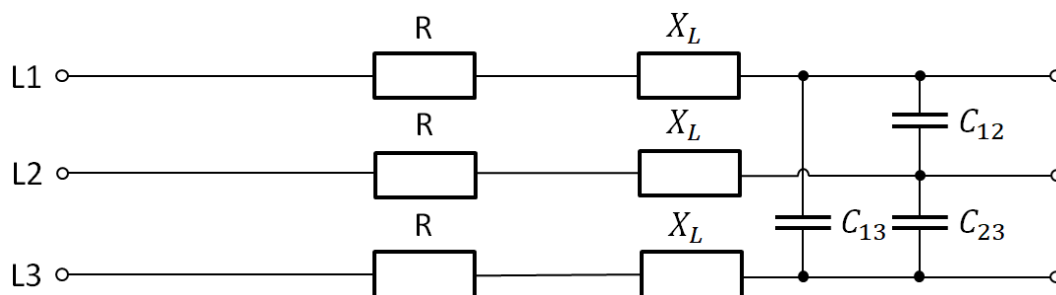


Abbildung 2.14.: Aufbau der Leitungsnachbildung Typ B.
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Abbildung 2.14 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Leitungsnachbildungen des Typs B. Der Typ B ist als drei-Leiter Modul mit den Phasen L1-L3 ausgelegt und soll den elektrischen Eigenschaften einer N2XSEY-20kV 3x240 mm² Leitung entsprechen. Dieser Typ besitzt die in Tabelle 2.5 vom Hersteller angegebenen Spezifikationen:

Betriebsspannung	400	V AC
Nennstrom je Strang	75	A
Widerstandswert je Strang	44	mΩ ±10 %
Induktivität je Strang	400	μH ±10 %
Kapazität je Strang	25	nF ±10 %
Zuschaltbare Kapazität je Strang	161	nF ±10 %

Tabelle 2.5.: Spezifikationen der Leitungsnachbildung TYP B nach Herstellerangaben.
Quelle: Boeckhoff, 2018, S. 4

3. Untersuchung der Leitungsnachbildungen

3.1. Kleinsignalmessung

3.1.1. Frequenzganganalyse

Die messtechnisch aufgenommenen Frequenzgänge der drei Leitungsnachbildungen des Typs A, B und C sind in den Abbildungen 3.1, 3.2 und 3.3 einfach-logarithmisch dargestellt. Ausgehend vom berechneten Frequenzgang mittels des vereinfachten Ersatzschaltbildes im Abschnitt 2.1.3 ist auch bei dem gemessenen Frequenzgang die Tiefpasscharakteristik zu erkennen. Anhand der Aufnahme des Frequenzgangs können Aussagen zum hochfrequenten Verhalten der Leitungsnachbildungen, der Symmetrie der Leitungsparameter der einzelnen Phasen einer Leitungsnachbildung untereinander, sowie des Frequenzverhaltens bei unterschiedlichem Leitungstyp und Querschnitt getroffen werden. Betrachtet wird im folgenden ein Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 MHz.

Leitungsnachbildung Typ A

Der Vergleich vom gemessenen Frequenzgang in Abbildung 3.1 des Typs A mit dem berechneten Frequenzgang in der Abbildung 2.6 zeigt eine Abweichung des relativen Verlaufs zur Frequenzachse, sowie des Betrags der Amplitudenverstärkung der Leitungsnachbildung im Resonanzpunkt. Gleichzeitig erkennt man eine deutliche Symmetrie der gemessenen Frequenzgänge aller betrachteten Phasen zueinander, was auf eine hohe Übereinstimmung der Leitungsparameter der verschiedenen Phasen der Leitungsnachbildung hinweist. Die Phase L1 allerdings zeigt in einem Frequenzbereich von 70 kHz bis 140 kHz eine Abweichung auf, dessen Maximum im Resonanzpunkt liegt und bei der Frequenzbetrachtung, sowie der Amplitudenverstärkung circa 3 % beträgt. Diese Abweichung wird bei der Bestimmung der Leiterimpedanzen im Abschnitt 3.2.1 deutlich sichtbar. Bei der Betrachtung der spezifischen Merkmale des gemessenen Frequenzgangs des Typs A verläuft der Betrag der Übertragungsfunktion bis circa 20 kHz auf der 0 dB Linie. Es tritt eine Resonanzüberhöhung bei $f_0 = 205$ kHz auf, mit einer Amplitudenverstärkung von 12 dB und einer Phasenverschiebung des Ausgangssignals zum Eingangssignal von 161° . Die -3 dB Grenzfrequenz liegt bei 334 kHz, woraufhin die Amplitudenverstärkung der Ausgangsspannung mit etwa -47 dB/Dekade bis auf -30 dB im betrachteten Frequenzbereich von 1 MHz abfällt.

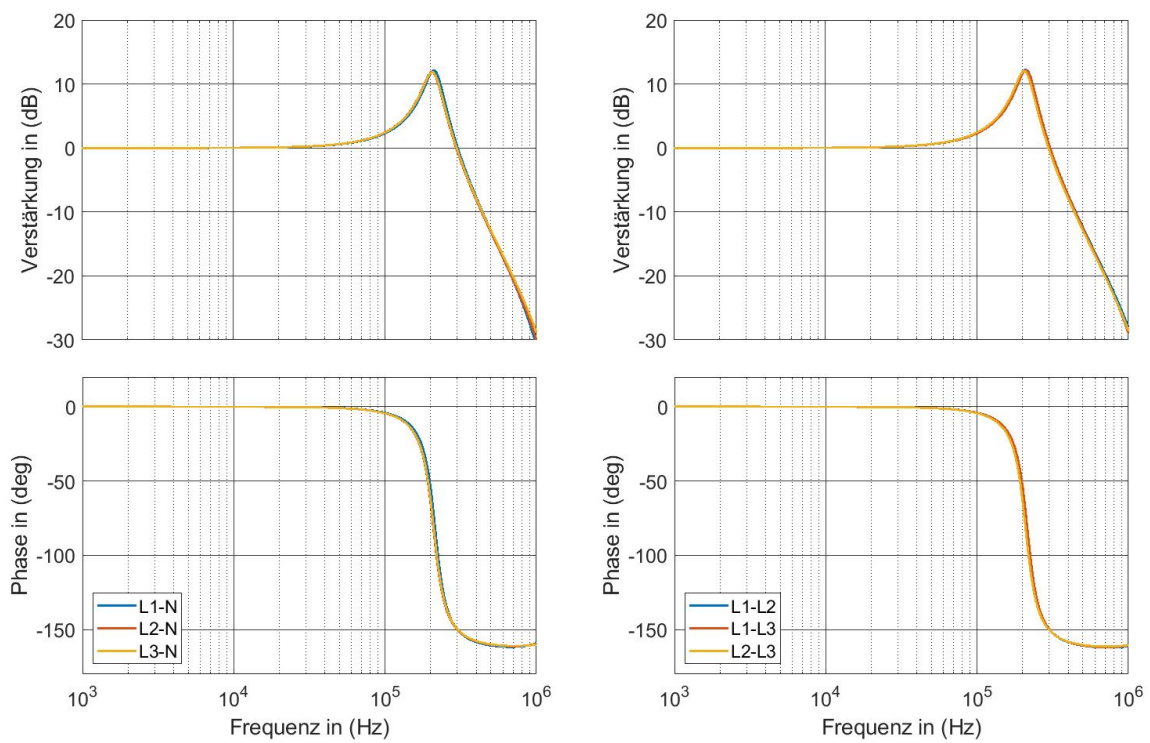


Abbildung 3.1.: Leitungsnachbildung Typ A - Gemessener Frequenzgang.
Quelle: Eigene Darstellung.

Es ergibt sich im gemessenen Frequenzgang im Vergleich zum berechneten Frequenzgang eine relativ zur Frequenzachse betrachtet, positive Verschiebung des Amplituden- und Phasengangs. Darüber hinaus eine geringere Amplitudenverstärkung, sowie ein steilerer Spannungsabfall nach der Grenzfrequenz und eine geringere Phasenverschiebung. Die Verschiebung im Frequenzbereich kann mit der im folgenden Abschnitt 3.2.1 sichtbaren Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität erklärt werden. Die in Abbildung 3.5 erkennbare Verringerung der Leiterinduktivität bei steigender Frequenz verursacht eine relativ zur Frequenzachse positive Verschiebung des Phasen- und Amplitudengangs. Die außerdem in Abbildung 3.5 erkennbare positive Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands verursacht eine geringere Amplitudenverstärkung im Resonanzpunkt und zum anderen verringert sich die Phasenverschiebung mit steigendem Wirkwiderstand.

Der ausschließliche Einfluss des Wirkwiderstands im Resonanzpunkt kommt daher, dass im Resonanzpunkt für die Impedanz $Z = R + R_L + jX_L + R_C + jX_C$ des Reihenschwingkreises laut Büttner (2009, S. 103-106) gilt:

$$\operatorname{Im}\{Z\} = 0 \tag{3.1}$$

mit

$$X_L + X_C = 0$$

Es wirkt also nur noch der ohmsche Leiterwiderstand. Erhöht sich dieser Wirkwiderstand mit steigender Frequenz, sinkt damit die Amplitudenverstärkung im Resonanzpunkt. Diese Beziehung wird auch in der folgenden Betrachtung der Leitungsnachbildungen Typ B und C aufgegriffen.

Leitungsnachbildung Typ B

Die Aufnahme des Frequenzgangs für die Leitungsnachbildung des Typs B ist in Abbildung 3.2 auf der linken Seite ohne zugeschaltete Kapazitäten und auf der rechten Seite mit der Zuschaltung der zusätzlichen Kapazitäten von $161 \mu\text{H}$ parallel zu jeder Leiterkapazität dargestellt. Auch in diesem Fall weist der gemessene Frequenzgang des Typs B im Vergleich zum berechneten Frequenzgang in Abbildung 2.7 für beide Fälle eine starke Abweichung des relativen Verlaufs zur Frequenzachse, des Betrags der Amplitudenverstärkung im Resonanzpunkt, sowie der Phasenverschiebung auf. Deutlich wird auch wieder die Symmetrie zwischen den einzelnen Leitern.

Beginnend mit der Messung ohne die zugeschalteten Leiterkapazitäten ergibt sich eine maximale Abweichung der gemessenen Phasen im Resonanzpunkt von 5 % bei der Amplitudenverstärkung und 3 % bei der Resonanzfrequenz. Bei der Betrachtung der spezifischen Merkmale verläuft der Betrag der Übertragungsfunktion bis circa 5 kHz auf der 0 dB Linie. Es tritt eine Resonanzüberhöhung bei $f_0 = 49 \text{ kHz}$ auf, mit einer Amplitudenverstärkung von 9 dB und einer Phasenverschiebung des Ausgangssignals zum Eingangssignal von 145° . Die -3 dB Grenzfrequenz liegt bei 84 kHz, woraufhin die Amplitudenverstärkung der Ausgangsspannung mit etwa -40 dB/Dekade bis auf -53 dB im betrachteten Frequenzbereich von 1 MHz abfällt. Betrachtet man nun die Leitungsnachbildung mit den zusätzlich zugeschalteten Kapazitäten, ergibt sich eine maximale Abweichung zwischen den gemessenen Phasen im Resonanzpunkt von 4 % bei der Phasenverschiebung und 3.5 % bei der Amplitudenverstärkung. Auch diese Abweichung wird in beiden Fällen bei der Betrachtung der Bestimmung der Leiterimpedanzen im Abschnitt 3.2.1.1 sichtbar durch eine Abweichung der Leitungsparameter zueinander. Bei der Betrachtung der spezifischen Merkmale mit zugeschalteten Kapazitäten, verläuft der Betrag der Übertragungsfunktion bis circa 2 kHz auf der 0 dB Linie. Es tritt eine Resonanzüberhöhung bei $f_0 = 17 \text{ kHz}$ auf, mit einer Amplitudenverstärkung von 13 dB und einer Phasenverschiebung des Ausgangssignals zum Eingangssignal von 155° . Die -3 dB Grenzfrequenz liegt bei 27 kHz, woraufhin die Amplitudenverstärkung der Ausgangsspannung mit etwa -43 dB/Dekade abfällt. Bei 300 kHz befindet sich nun ein weiterer Resonanzpunkt, nach dem die Amplitudenverstärkung wieder ansteigt. Dies gilt ebenfalls für die Phasenverschiebung, welche bis 1 MHz auf über 0° ansteigt.

Es ergibt sich für beide betrachteten Fälle im Vergleich zum berechneten Frequenzgang eine, relativ zur Frequenzachse betrachtet, positive Verschiebung des Amplituden- und Phasengangs. Darüber hinaus zeigt sich eine geringere Amplitudenverstärkung, ein steilerer Abfall der Amplitudenverstärkung nach der Grenzfrequenz und eine geringere Phasenverschiebung. Diese Abweichungen hängen ebenfalls mit der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität zusammen.

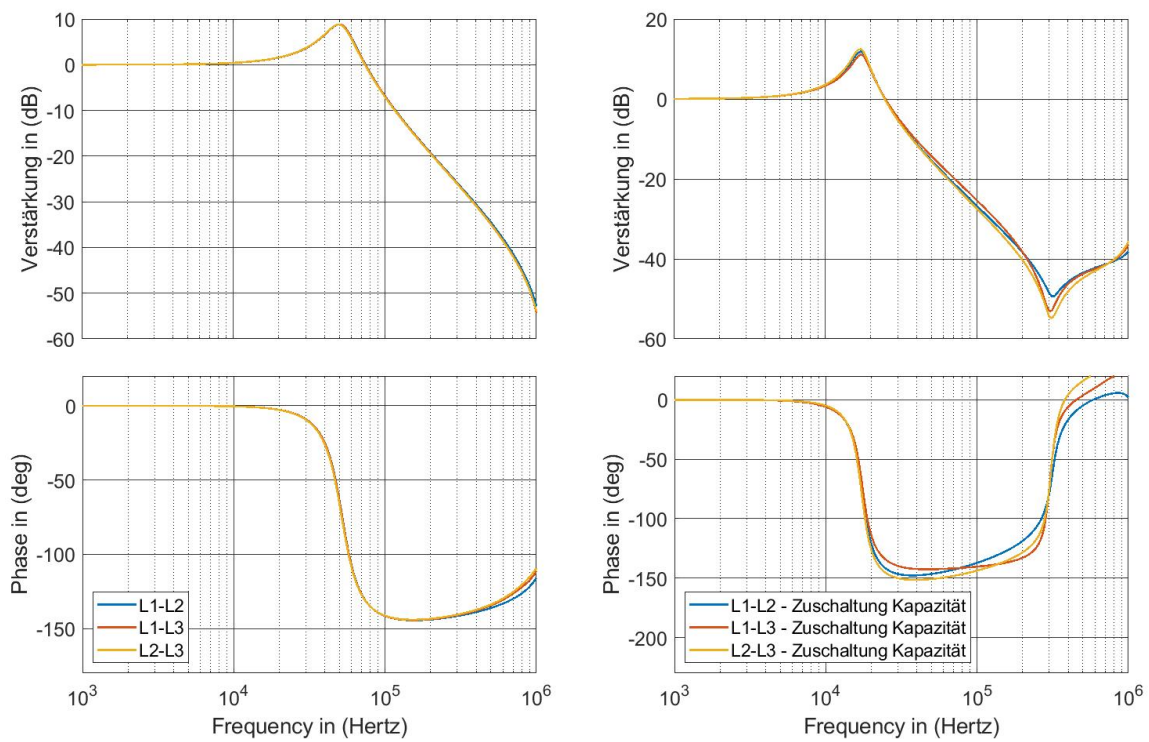


Abbildung 3.2.: Leitungsnachbildung Typ B - Gemessener Frequenzgang.
 Links: Ohne zugeschalteten Zusatzkapazitäten. Rechts: Mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten.
 Quelle: Eigene Darstellung.

Leitungsnachbildung Typ C

Die Abbildung 3.3 stellt den gemessenen Frequenzgang der Leitungsnachbildung Typ C dar. Der Vergleich zum berechneten Frequenzgang in Abbildung 2.8 zeigt wieder eine Abweichung des relativen Verlaufs zur Frequenzachse, des Betrags der Amplitudenverstärkung im Resonanzpunkt, sowie der Phasenverschiebung im Resonanzpunkt. Eine deutliche Symmetrie zwischen den einzelnen Phasen ist auch bei dem Typ C zu erkennen. Die maximale Abweichung im Resonanzpunkt beträgt bei der Amplitudenverstärkung 4 % und bei der Phasenverschiebung weniger als 1 %. Sichtbar wird diese Abweichung wieder bei der Bestimmung der Leitungsparameter im Abschnitt 3.2.1.1. Bei der Betrachtung der spezifischen Merkmale des gemessenen Frequenzgangs des Typs C verläuft der Betrag der Übertragungsfunktion bis circa 26 kHz auf der 0 dB Linie. Es tritt eine Resonanzüberhöhung bei $f_0 = 246$ kHz auf, mit einer Amplitudenverstärkung von 29 dB und einer Phasenverschiebung des Ausgangssignals zum Eingangssignal von 178° . Die -3 dB Grenzfrequenz liegt bei 380 kHz, woraufhin die Amplitudenverstärkung der Ausgangsspannung mit etwa -47 dB/Dekade bis auf -27 dB im betrachteten Frequenzbereich von 1 MHz abfällt.

Auch in diesem Fall ergibt sich wie bei den zuvor betrachteten Typen A und B im gemessenen Frequenzgang im Vergleich zum berechneten Frequenzgang eine relativ zur Frequenzachse betrachtet, positive Verschiebung des Amplituden- und Phasengangs, darüber hinaus eine geringere Amplitudenverstärkung, sowie ein steilerer Spannungsabfall nach der Grenzfrequenz und eine geringere Phasenverschiebung. Dabei ist die positive Verschiebung zur Frequenzachse, die Abweichung des Betrags der Amplitudenverstärkung, wie auch die Abweichung in der Phasenverschiebung bei der Messung des Typs C im Vergleich zum berechneten Frequenzgang nur sehr gering. Dies ist mit der, wie in Abbildung 3.9 zu erkennen, anteilig weitaus geringeren Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstand und der Leiterinduktivität zu erklären.

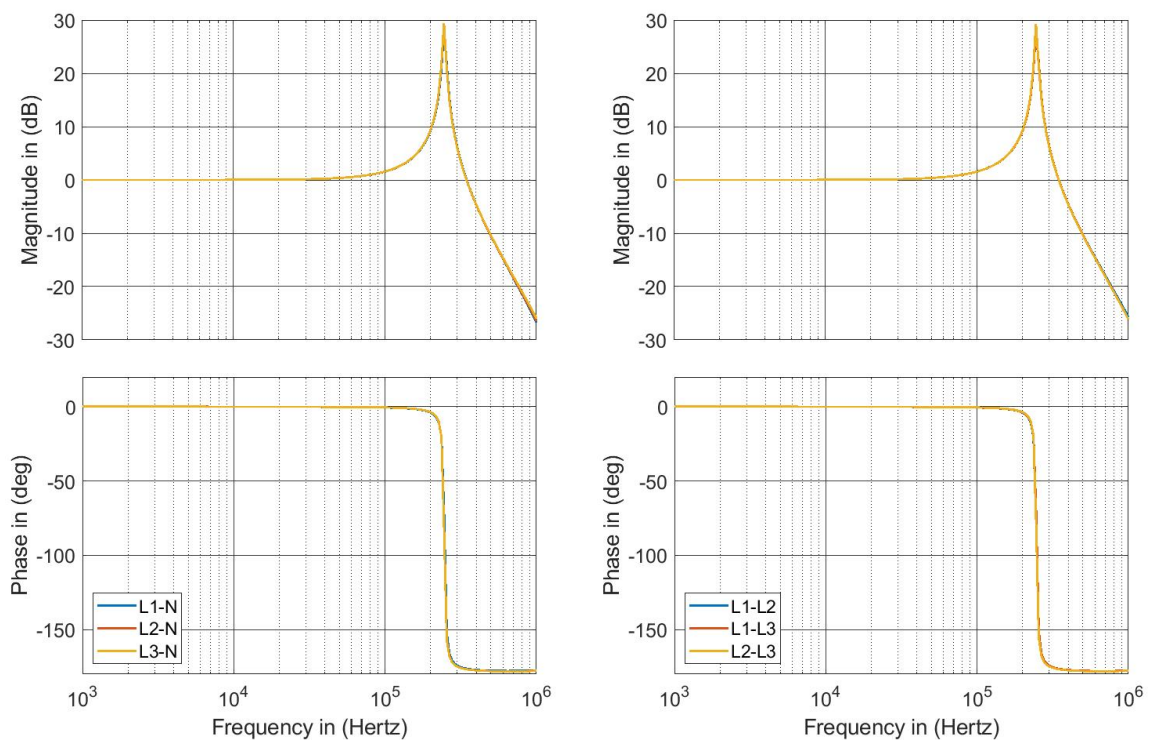


Abbildung 3.3.: Leitungsnachbildung Typ C - Gemessener Frequenzgang.
Quelle: Eigene Darstellung.

3.1.2. Gegenüberstellung des Frequenzverhaltens

Nach der Betrachtung aller gemessenen Frequenzgänge der Typen A, B und C erkennt man eine deutliche Abweichung der Typen A und B zu den berechneten Frequenzgängen.

Der gemessene Frequenzgang des Typs A besitzt eine Abweichung der Resonanzfrequenz von 17 %, mit einer Abweichung der Amplitudenverstärkung von -64 % und der Phasenverschiebung von 11 %.

Der gemessene Frequenzgang des Typs B weist bei nicht zugeschalteten Kapazitäten eine Abweichung der Resonanzfrequenz von 40 %, der Amplitudenerhöhung im Resonanzpunkt von -80 % und der Phasenverschiebung von 19 % auf. Die Abweichung mit zugeschalteten Kapazitäten beträgt bei der Resonanzfrequenz 21 %, der Amplitudenverstärkung im Resonanzpunkt -65 % und der Phasenverschiebung 14 %.

Der gemessene Frequenzgang des Typs C besitzt eine Abweichung der Resonanzfrequenz von lediglich 2,5 %, mit einer Abweichung der Amplitudenverstärkung von 27,5 % und der Phasenverschiebung von 1 %. Diese Abweichungen stehen deutlich mit der Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität im Zusammenhang, woraufhin in Abschnitt 3.2.1.1 eingegangen wird. Insgesamt ist beim Vergleich der Typen A und C, also den Leitungsnachbildungen gleichen Leitungstyps, aber unterschiedlichen Querschnitts festzustellen, dass bei der Verkleinerung des Querschnitts (von Typ A zu Typ C) und somit der Erhöhung des Leiterwiderstands und der Verringerung der Leiterinduktivität und Kapazität die Resonanzerscheinungen erst in einem höheren Frequenzbereich auftreten und eine erhöhte Amplitudenverstärkung zur Folge haben. Bei dem Vergleich der Amplitudenverstärkung ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Typ A eine weitaus stärkere Frequenzabhängigkeit der Längsimpedanz besitzt als der Typ C. Dies kann zu einer fehlerhaften Aussage über die Amplitudenverstärkung führen und sollte mit realen Leitungen untersucht werden, da ein höherer Leiterwiderstand, wie dieser bei einem geringeren Querschnitt vorliegt, eine geringere Amplitudenverstärkung zur Folge haben sollte.

Vergleicht man die Typen A und C nun mit dem Typ B der Leitungsnachbildungen, welcher eine vielfach höhere Längsimpedanz und Queradmittanz aufweist, erkennt man eine weitere Verschiebung der Resonanzeffekte in den unteren Frequenzbereich, mit einer geringeren Amplitudenverstärkung im Resonanzpunkt. Werden die zusätzlichen Kapazitäten dazugeschaltet verschiebt sich der Resonanzbereich weiter in den unteren Frequenzbereich. Schließt man von diesem Verhalten auf das eines realen Kabels, bedeutet eine Erhöhung des Leiterquerschnitts, das, relativ zum Frequenzbereich betrachtet, frühere Auftreten von Resonanzeffekten mit einer höheren Amplitudenverstärkung.

3.2. Großsignalmessung

Die Vermessung der Leitungsnachbildungen im Großsignalbereich dient zum Einen der Bestimmung der Leitungsparameter der Längsimpedanzen in Abhängigkeit von der Stromstärke. Dabei wird das Verhalten der mit Kernmaterial bestückten Leiterinduktivitäten auf das Auftreten von Sättigungserscheinungen untersucht. Aus diesem Grund sollen die Leitungsnachbildungen nach Möglichkeit bis an den maximalen Bemessungsstrom von 75 A belastet werden. Da dieser maximale Bemessungsstrom im dreiphasigen Aufbau auf Grund des Lastbereichs des Lastwiderstands nicht erreicht werden kann, wird zusätzlich eine einphasige Belastungsmessung mit den parallelgeschalteten Windungen des Lastwiderstands durchgeführt. Siehe Abbildung 2.11. Somit ist eine Belastung von bis zu 65 A möglich. Zur späteren Untersuchung des geometrischen Einflusses auf die Koppelinduktivitäten und dem Vergleich mit realen Leitungen, wird die dreiphasige Messung dennoch durchgeführt.

Zum Anderen werden die Längsimpedanzen und Queradmittanzen im Großsignalbereich hinsichtlich deren Frequenzverhaltens untersucht, wobei die in der Definition des Großsignalbereichs genannten Frequenzpunkte betrachtet werden. Das Frequenzverhalten wird sowohl im dreiphasigen Aufbau zur Untersuchung der Längsimpedanzen, sowie im einphasigen Aufbau zur Untersuchung der Queradmittanzen untersucht.

3.2.1. Bestimmung der Längsimpedanz

3.2.1.1. Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz

Im folgenden Abschnitt der dreiphasigen Bestimmung der Längsimpedanzen, wird zunächst die Längsimpedanz jeder einzelnen Phase einer Leitungsnachbildung bei 50 Hz in einer Kastengraphik statistisch hinsichtlich deren Verteilung visualisiert. Gleichzeitig wird so die Abweichung der Leitungsparameter der drei Phasen einer Leitungsnachbildung zueinander dargestellt. Daraufhin folgt die Untersuchung der Frequenz- und Stromabhängigkeit der Längsimpedanzen exemplarisch an der Phase L1 jeden Typs der Leitungsnachbildungen.

Die genannte Kastengraphik, wie zu sehen in Abbildung 3.4, 3.6 und 3.8 ist so aufgebaut, dass Sie die numerisch geordneten Messwerte als ein unteres Quartil und ein oberes Quartil in Form einer Box darstellt. Die Box entspricht den mittleren 50 % der Daten. Der waagerechte Mittelstrich beschreibt dabei das Median der gesamten Messreihe. Die beiden Linien welche das Rechteck verlängern stellen den minimalen und den maximalen Wert der Messreihe dar.

Die anschließenden Diagramme zur Veranschaulichung der Frequenz- und Stromabhängigkeit stellen jeweils die Mittelwerte einer Messreihe und eines Lastpunktes als Punkt dar. Die schwarze gestrichelte Linie gibt den vom Hersteller in der Dokumentation der Leitungsnachbildungen angegebenen Sollwert des Leitungsparameters an. Mit dem grau hinterlegten Bereich wird der ebenfalls vom Hersteller angegebene Toleranzbereich von $\pm 10\%$ dargestellt. Der Messaufbau zur dreiphasigen Bestimmung der Längsimpedanz für den Typ A und C ist in der Abbildung 2.9 und für den Typ B in der Abbildung 2.10 dargestellt.

Leitungsnachbildung Typ A

Beginnend mit der Leitungsnachbildung Typ A ist in der Abbildung 3.4 eine deutliche Abweichung der Längsimpedanz der drei Phasen L1, L2 und L3 zueinander und zum vom Hersteller angegebenen Sollwert von $6,25 \text{ m}\Omega$ für den Leiterwiderstand und $31 \mu\text{H}$ für die Leiterinduktivität zu erkennen. Bei einer Belastung von 8 A ist die Verteilung der Messreihen, wie in den Tabellen 3.1 und 3.2 zu erkennen, noch sehr hoch.

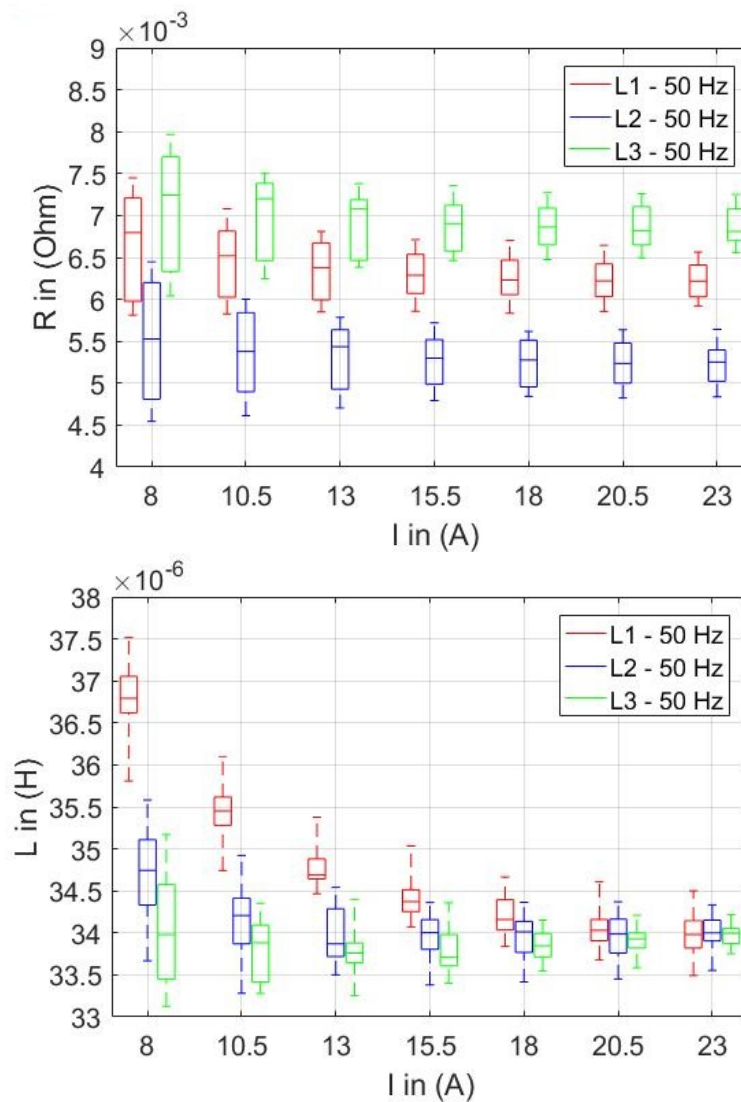


Abbildung 3.4.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1-L3 - Verteilung des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität.
Quelle: Eigene Darstellung.

In der folgenden Tabelle 3.1 und 3.2 sind nun der Median, der Mittelwert, das Maximum, das Minimum, die Standardabweichung und die Abweichung des Mittelwerts zum Sollwert für die Messreihen aller drei Phasen bei einer Belastung von 8 A angegeben.

	L1	L2	L3
Median	6,8 mΩ	5,5 mΩ	7,2 mΩ
Mittelwert	6,7 mΩ	5,5 mΩ	7,1 mΩ
Minimum	5,8 mΩ	4,5 mΩ	6 mΩ
Maximum	7,4 mΩ	6,4 mΩ	8 mΩ
Standardabweichung	0,58 mΩ	0,69 mΩ	0,68 mΩ
Abweichung zum Sollwert	7 %	-12 %	14 %

Tabelle 3.1.: Leitungsnachbildung Typ A - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 8 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

	L1	L2	L3
Median	36,8 μH	34,7 μH	34 μH
Mittelwert	36,8 μH	34,7 μH	34 μH
Minimum	35,8 μH	33,7 μH	33,1 μH
Maximum	37,5 μH	35,6 μH	35,2 μH
Standardabweichung	0,41 μH	0,53 μH	0,62 μH
Abweichung zum Sollwert	19 %	12 %	10 %

Tabelle 3.2.: Leitungsnachbildung Typ A - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 8 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

Betrachtet man einen höheren Lastpunkt ab 15,5 A, verringert sich die Verteilung der Messwerte und die Mediane der folgenden Lastpunkte konvergieren gegen einen konstanten Wert. Dargestellt in Tabelle 3.3 und 3.4.

	L1	L2	L3
Median	6,3 mΩ	5,3 mΩ	6,9 mΩ
Mittelwert	6,3 mΩ	5,3 mΩ	6,9 mΩ
Minimum	5,9 mΩ	4,8 mΩ	6,5 mΩ
Maximum	6,7 mΩ	5,7 mΩ	7,4 mΩ
Standardabweichung	0,26 mΩ	0,28 mΩ	0,28 mΩ
Abweichung zum Sollwert	1 %	-16 %	10 %

Tabelle 3.3.: Leitungsnachbildung Typ A - Verteilung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 15,5 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

	L1	L2	L3
Median	34,4 μH	34 μH	33,8 μH
Mittelwert	34,4 μH	34 μH	33,8 μH
Minimum	34, μH	33,4 μH	33,4 μH
Maximum	35 μH	34,4 μH	34,4 μH
Standardabweichung	0,24 μH	0,24 μH	0,24 μH
Abweichung zum Sollwert	11 %	10 %	9 %

Tabelle 3.4.: Leitungsnachbildung Typ A - Verteilung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 15,5 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

Nach der statistischen Darlegung der Abweichungen der Längsimpedanzen der drei Phasen L1, L2 und L3 bei 50 Hz, kann nun die Frequenz- und Stromabhängigkeit der Längsimpedanz untersucht werden. Dazu wird die Phase L1 in einem Strombereich von 8 A bis 23 A in den Frequenzpunkten 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz untersucht.

Im linken Diagramm der Abbildung 3.5 ist der Leiterwiderstand über den Stromverlauf mit den farblich gekennzeichneten Frequenzpunkten zu erkennen. Die erste Aussage die sich über das Verhalten des Leiterwiderstands treffen lässt ist, dass der Leiterwiderstand aller Frequenzpunkte über den Strombereich betrachtet einen konstanten Wert beibehält. Es ist also keine Stromabhängigkeit des Leiterwiderstands zu erkennen. Die zweite Aussage betrifft die Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands. Bei einer Frequenz von 50 Hz verläuft der Leiterwiderstand annähernd an der Sollwertlinie von 6,25 mΩ. Mit steigender Frequenz erhöht sich der Leiterwiderstand und befindet sich ab 100 Hz außerhalb des 10 % Toleranzbereichs, mit einem Anstieg bis auf 8,9 mΩ bei 400 Hz. Es besteht also eine deutliche Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands. Die einzelnen Widerstandswerte sind in der Tabelle 3.5 verdeutlicht.

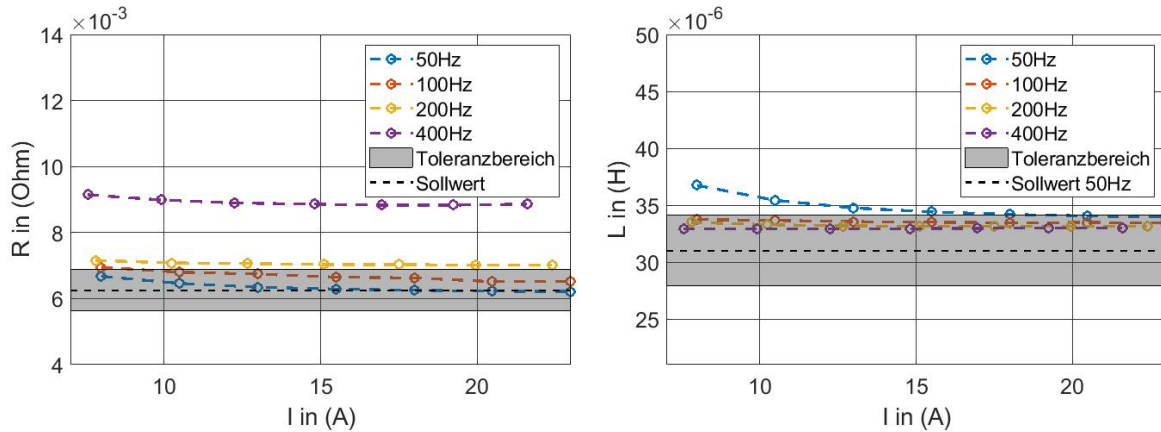


Abbildung 3.5.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.

Im rechten Diagramm der Abbildung 3.5 ist die Leiterinduktivität über den Strombereich zu erkennen. Die erste Aussage die sich über das Verhalten der Leiterinduktivität treffen lässt ist, dass ebenfalls die Leiterinduktivität aller Frequenzpunkte über den Strombereich betrachtet einen konstanten Wert beibehält. Es ist also ebenfalls bei der Leiterinduktivität keine Stromabhängigkeit zu erkennen. Die zweite Aussage betrifft die Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität. Bei einer Frequenz von 50 Hz verläuft die Leiterinduktivität mit $34,8 \mu\text{H}$ annähernd 11 % oberhalb der Sollwertlinie von $31 \mu\text{H}$. Mit steigender Frequenz verringert sich die Leiterinduktivität leicht und befindet sich bei einer Frequenz von 400 Hz mit $33 \mu\text{H}$ circa 6 % oberhalb der Sollwertlinie. Es besteht also eine Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität. Die einzelnen Induktivitätswerte sind nochmals in der Tabelle 3.6 verdeutlicht.

Sollwert	$R = 6,25 \text{ m}\Omega \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{R} = 6,4 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 6,7 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 7,1 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 8,9 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.5.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$L = 31 \mu\text{H} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{L} = 34,8 \mu\text{H}$
100 Hz	$\bar{L} = 33,6 \mu\text{H}$
200 Hz	$\bar{L} = 33,2 \mu\text{H}$
400 Hz	$\bar{L} = 33 \mu\text{H}$

Tabelle 3.6.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.

Leitungsnachbildung Typ B

Auch bei der Leitungsnachbildung Typ B ist in der Abbildung 3.4 eine Abweichung der Längsimpedanz der drei Phasen L1, L2 und L3 zueinander und zum vom Hersteller angegebenen Sollwert von $44 \text{ m}\Omega$ für den Leiterwiderstand und $400 \text{ }\mu\text{H}$ für die Leiterinduktivität zu erkennen. Bei einer Belastung von 8 A ist die Verteilung der Messreihen ebenfalls höher als im oberen Lastbereich.

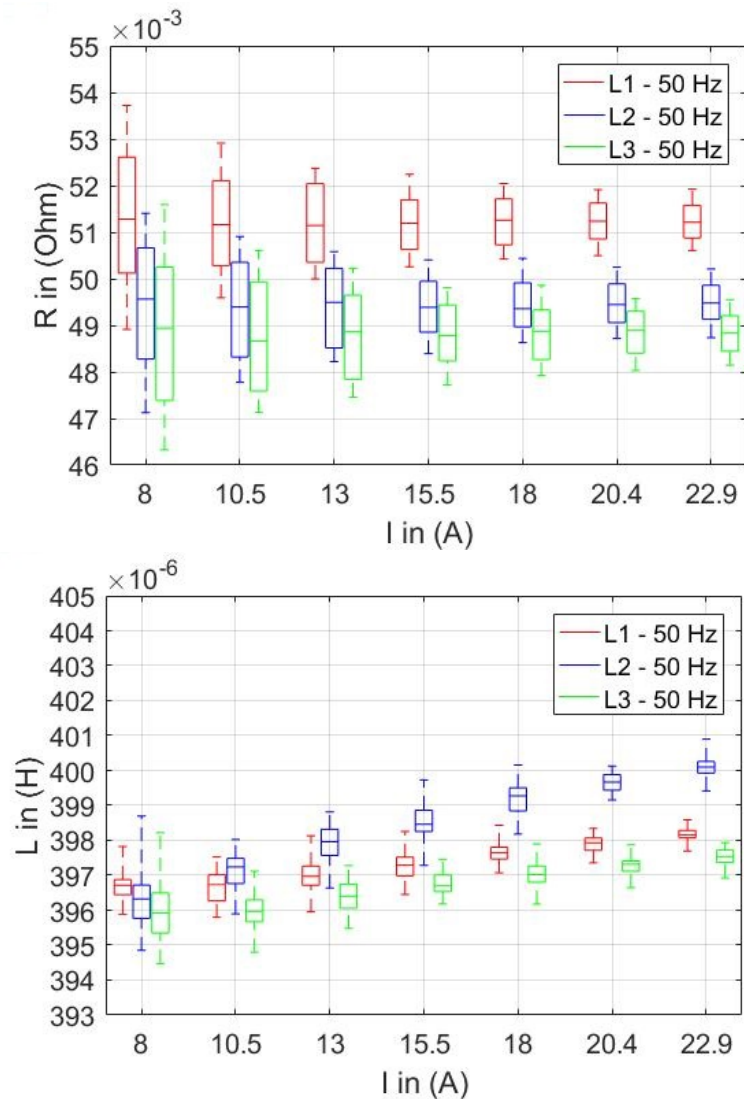


Abbildung 3.6.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L3 - Verteilung des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität.

Quelle: Eigene Darstellung.

In den folgenden Tabellen 3.7 und 3.8 sind der Median, der Mittelwert, das Maximum, das Minimum, die Standardabweichung und die Abweichung des Mittelwerts zum Sollwert für die Messreihen aller drei Phasen bei einer Belastung von 8 A angegeben.

	L1	L2	L3
Median	51,3 mΩ	49,6 mΩ	48,9 mΩ
Mittelwert	51,3 mΩ	49,4 mΩ	48,9 mΩ
Minimum	48,9 mΩ	47,1 mΩ	46,3 mΩ
Maximum	53,7 mΩ	51,4 mΩ	51,6 mΩ
Maximum	53,7 mΩ	51,4 mΩ	51,6 mΩ
Standardabweichung	1,4 mΩ	1,3 mΩ	1,6 mΩ
Abweichung zum Sollwert	17 %	12 %	11 %

Tabelle 3.7.: Leitungsnachbildung Typ B - Verteilung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 8 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

	L1	L2	L3
Median	396,7 μH	396,3 μH	395,9 μH
Mittelwert	396,7 μH	396,3 μH	396 μH
Minimum	395,9 μH	394,8 μH	394,5 μH
Maximum	397,8 μH	398,7 μH	398,2 μH
Standardabweichung	0,44 μH	0,77 μH	0,87 μH
Abweichung zum Sollwert	< -1 %	< -1 %	< -1 %

Tabelle 3.8.: Leitungsnachbildung Typ B - Verteilung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 8 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

Betrachtet man wieder einen höheren Lastpunkt ab 15,5 A, verringert sich die Verteilung der Messwerte und außerdem konvergieren auch hier die Mediane der verschiedenen Lastpunkte gegen einen konstanten Wert. Dargestellt in den Tabellen 3.9 und 3.10.

	L1	L2	L3
Median	51,2 mΩ	49,4 mΩ	48,8 mΩ
Mittelwert	51,2 mΩ	49,4 mΩ	48,8 mΩ
Minimum	50,3 mΩ	48,4 mΩ	47,7 mΩ
Maximum	52,2 mΩ	50,4 mΩ	49,8 mΩ
Standardabweichung	0,62 mΩ	0,6 mΩ	0,68 mΩ
Abweichung zum Sollwert	16 %	12 %	11 %

Tabelle 3.9.: Leitungsnachbildung Typ B - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 15,5 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

	L1	L2	L3
Median	397,3 μH	398,5 μH	396,7 μH
Mittelwert	397,3 μH	398,6 μH	396,7 μH
Minimum	396,5 μH	397,3 μH	396,2 μH
Maximum	398,3 μH	399,7 μH	397,5 μH
Standardabweichung	0,39 μH	0,49 μH	0,32 μH
Abweichung zum Sollwert	< -1 %	< -1 %	< -1 %

Tabelle 3.10.: Leitungsnachbildung Typ B - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 15,5 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

Mit der abgeschlossenen statistischen Auswertung der Längsimpedanzen bei 50 Hz, wird nun erneut die Frequenz- und Stromabhängigkeit der Längsimpedanz der Phase L1 in einem Strombereich von 8 A bis 23 A und den Frequenzpunkten 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz untersucht.

Im linken Diagramm der Abbildung 3.7 ist der Leiterwiderstand über den Stromverlauf mit farblich gekennzeichneten Frequenzpunkten dargestellt. Zu aller erst lässt sich erkennen, dass der Leiterwiderstand aller Frequenzpunkte über den Strombereich betrachtet einen konstanten Wert beibehält. Es tritt also keine Stromabhängigkeit des Leiterwiderstands auf.

Die Betrachtung des Frequenzverhaltens zeigt, dass bei einer Frequenz von 50 Hz der Leiterwiderstand mit einem Wert von 51,2 mΩ etwa 14 % oberhalb des Sollwerts von 44 mΩ verläuft. Mit steigender Frequenz erhöht sich der Leiterwiderstand, mit einem Anstieg bis auf 76,5 mΩ bei 400 Hz, und befindet sich damit 42 % oberhalb des Sollwerts. Es besteht also eine deutliche Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands. Die Widerstandswerte für alle vier Frequenzpunkte sind in der Tabelle 3.11 verdeutlicht.

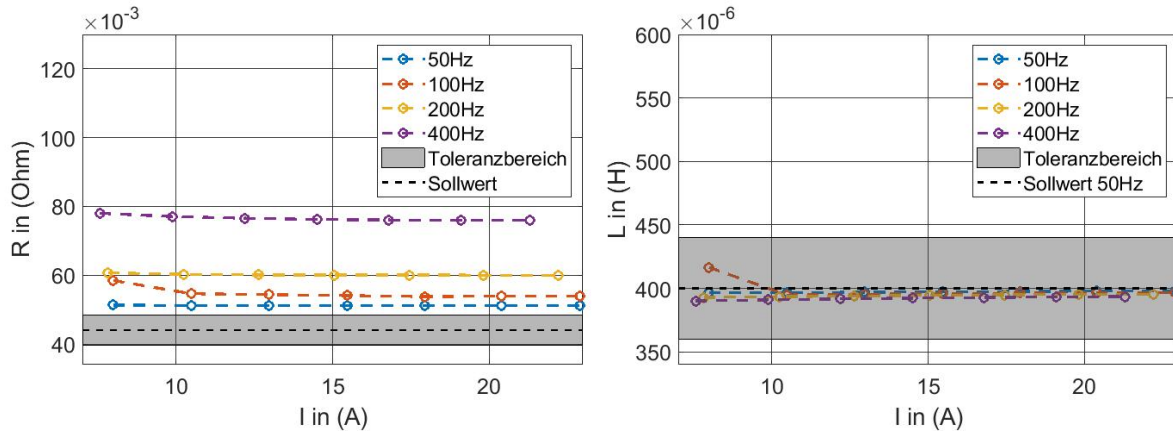


Abbildung 3.7.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.

Im rechten Diagramm der Abbildung 3.7 ist die Leiterinduktivität über den Stromverlauf dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Leiterinduktivität aller Frequenzpunkte über den Strombereich betrachtet einen konstanten Wert beibehält. Es ist also ebenfalls bei der Leiterinduktivität des Typs B keine Stromabhängigkeit zu erkennen.

Das Frequenzverhalten betreffend ist zu erkennen, dass bei einer Frequenz von 50 Hz die Leiterinduktivität mit $397,5 \mu\text{H}$ etwa $0,5\%$ unterhalb der Sollwertlinie von $400 \mu\text{H}$ verläuft. Mit steigender Frequenz verringert sich die Leiterinduktivität leicht und befindet sich bei einer Frequenz von 400 Hz mit $392 \mu\text{H}$ circa 2% unterhalb der Sollwertlinie. Es besteht also auch hier eine leichte Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität. Die einzelnen Induktivitätswerte sind nochmals in der Tabelle 3.12 verdeutlicht.

Sollwert	$R = 44 \text{ m}\Omega \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{R} = 51,2 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 54,2 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 60,2 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 76,5 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.11.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung des Leiterwiderstand. Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$L = 400 \mu\text{H} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{L} = 397,5 \mu\text{H}$
100 Hz	$\bar{L} = 396 \mu\text{H}$
200 Hz	$\bar{L} = 394,4 \mu\text{H}$
400 Hz	$\bar{L} = 392,2 \mu\text{H}$

Tabelle 3.12.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.

Leitungsnachbildung Typ C

Bei der Leitungsnachbildung Typ C ist in der Abbildung 3.8 ebenfalls eine Abweichung der Leiterimpedanz der drei Phasen L1, L2 und L3 zueinander und zum vom Hersteller angegebenen Sollwert von $26,2 \text{ m}\Omega$ für den Leiterwiderstand und $24 \text{ }\mu\text{H}$ für die Leiterinduktivität zu erkennen. Bei einer Belastung von 8 A ist, erkennbar an der geringen Ausdehnung der Kastengraphik, die Verteilung der Messreihen in diesem Fall für beide Leiterkonstanten sehr gering.

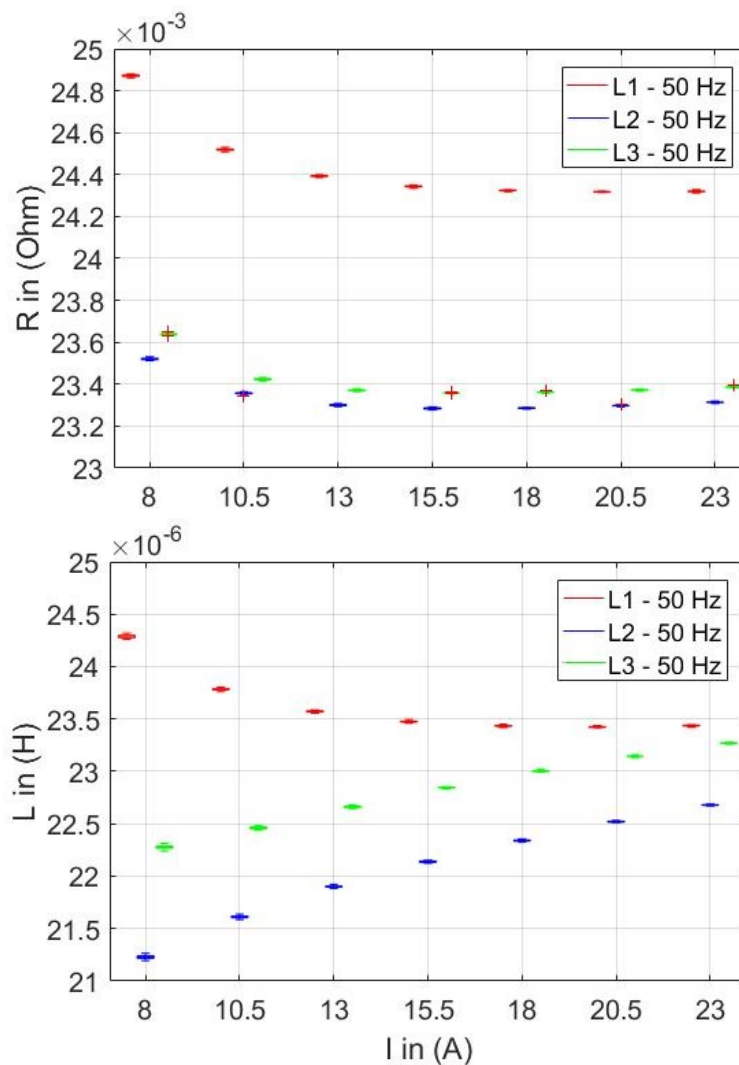


Abbildung 3.8.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1-L3 - Verteilung des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität.
Quelle: Eigene Darstellung.

In den folgenden Tabellen 3.13 und 3.14 sind wieder der Median, der Mittelwert, das Maximum, das Minimum, die Standardabweichung und die Abweichung des Mittelwerts zum Sollwert für die Messreihen aller drei Phasen bei einer Belastung von 8 A angegeben.

	L1	L2	L3
Median	24,87 mΩ	23,52 mΩ	23,64 mΩ
Mittelwert	24,87 mΩ	23,52 mΩ	23,64 mΩ
Minimum	24,86 mΩ	23,51 mΩ	23,63 mΩ
Maximum	24,88 mΩ	23,53 mΩ	23,65 mΩ
Standardabweichung	4,7 μΩ	5,1 μΩ	4,6 μΩ
Abweichung zum Sollwert	-5 %	-10 %	-10 %

Tabelle 3.13.: Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands der Phasen L1-L3 bei 8 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

	L1	L2	L3
Median	24,28 μH	21,23 μH	22,28 μH
Mittelwert	24,29 μH	21,23 μH	22,28 μH
Minimum	24,26 μH	21,19 μH	22,24 μH
Maximum	24,32 μH	21,27 μH	22,31 μH
Standardabweichung	0,15 nH	0,16 nH	0,16 nH
Abweichung zum Sollwert	1 %	-11 %	-7 %

Tabelle 3.14.: Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 8 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

Betrachtet man einen höheren Lastpunkt ab 15,5 A bleibt die Verteilung gering, jedoch konvergieren die Mediane der verschiedenen Lastpunkte gegen einen konstanten Wert. Dargestellt in den Tabellen 3.15 und 3.16.

	L1	L2	L3
Median	24,34 mΩ	23,28 mΩ	23,36 mΩ
Mittelwert	24,34 mΩ	23,28 mΩ	23,36 mΩ
Minimum	24,33 mΩ	23,27 mΩ	23,35 mΩ
Maximum	24,35 mΩ	23,27 mΩ	23,37 mΩ
Standardabweichung	3,6 μΩ	3,4 μΩ	2,2 μΩ
Abweichung zum Sollwert	-7 %	-11 %	-11 %

Tabelle 3.15.: Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands Phasen L1-L3 bei 15,5 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

	L1	L2	L3
Median	23,47 μH	22,14 μH	22,84 μH
Mittelwert	23,47 μH	22,14 μH	22,84 μH
Minimum	23,46 μH	22,13 μH	22,83 μH
Maximum	23,5 μH	22,15 μH	22,85 μH
Standardabweichung	7,4 nH	7,9 nH	6,2 nH
Abweichung zum Sollwert	-2 %	-8 %	-5 %

Tabelle 3.16.: Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1-L3 bei 15,5 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

Mit der abgeschlossenen statistischen Auswertung der Längsimpedanzen bei 50 Hz, wird nun erneut die Frequenz- und Stromabhängigkeit der Leiterkonstanten der Längsimpedanz L1 in einem Strombereich von 8 A bis 23 A und den Frequenzpunkten 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz untersucht.

Im linken Diagramm der Abbildung 3.9 ist der Leiterwiderstand über den Stromverlauf mit farblich gekennzeichneten Frequenzpunkten dargestellt. Zu aller erst lässt sich erkennen, dass der Leiterwiderstand aller Frequenzpunkte über den Strombereich betrachtet einen konstanten Wert beibehält. Es tritt also keine Stromabhängigkeit des Leiterwiderstands ein.

Im Hinblick auf das Frequenzverhalten wird sichtbar, dass bei einer Frequenz von 50 Hz der Leiterwiderstand mit einem Wert von 24,4 mΩ circa 7 % unterhalb des Sollwerts von 26,2 mΩ verläuft. Mit steigender Frequenz erhöht sich der Leiterwiderstand auf 25,7 mΩ bei 400 Hz und verläuft damit 2 % unterhalb des Sollwerts. Es besteht also eine Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands. Die Widerstandswerte für alle vier Frequenzpunkte sind in der Tabelle 3.17 dargestellt.

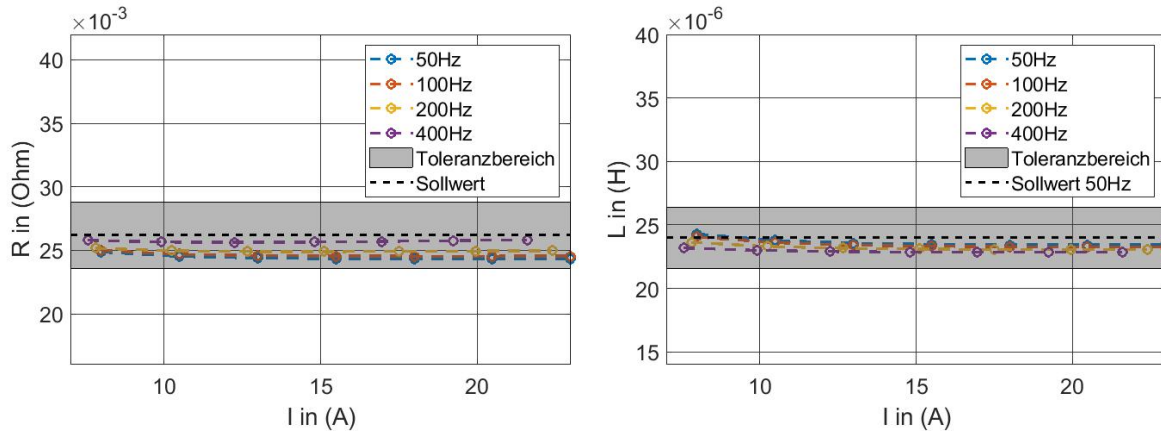


Abbildung 3.9.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.

Im rechten Diagramm der Abbildung 3.9 ist die Leiterinduktivität über den Stromverlauf dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Leiterinduktivität aller Frequenzpunkte über den Strombereich betrachtet einen konstanten Wert beibehält. Es ist also ebenfalls bei der Leiterinduktivität des Typs C keine Stromabhängigkeit zu erkennen.

Das Frequenzverhalten betreffend ist zu erkennen, dass bei einer Frequenz von 50 Hz die Leiterinduktivität mit $23,6 \mu\text{H}$ annähernd 2 % unterhalb der Sollwertlinie von $24 \mu\text{H}$ verläuft. Mit steigender Frequenz verringert sich die Leiterinduktivität leicht und befindet sich bei einer Frequenz von 400 Hz mit $22,9 \mu\text{H}$ circa 5 % unterhalb der Sollwertlinie. Es besteht also eine leichte Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität. Die einzelnen Induktivitätswerte sind nochmals in der Tabelle 3.18 dargestellt.

Sollwert	$R = 26,2 \text{ m}\Omega \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{R} = 24,4 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 24,6 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 25 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 25,7 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.17.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung des Leiterwiderstand. Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$L = 24 \mu\text{H} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{L} = 23,6 \mu\text{H}$
100 Hz	$\bar{L} = 23,5 \mu\text{H}$
200 Hz	$\bar{L} = 23,2 \mu\text{H}$
400 Hz	$\bar{L} = 22,9 \mu\text{H}$

Tabelle 3.18.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.

Zum Zwecke einer zusammenfassenden Darstellung der Ergebnisse der dreiphasigen Bestimmung der Längsimpedanzen folgt eine kurze Betrachtung und Bewertung der untersuchten Fragestellung aus der Zielsetzung.

In Hinsicht auf eine auftretende Stromabhängigkeit bei der Erhöhung des Laststroms kann diese in Form von Sättigungseffekten im betrachteten Lastbereich von 8 A bis 23 A für keine der drei Leitungsnachbildungen erkannt werden.

Das Frequenzverhalten betreffend ist eine hohe Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstandes und eine geringere Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität bei den Typen A und B der Leitungsnachbildungen zu erkennen. Bei dem Typ C der Leitungsnachbildung fällt die Frequenzabhängigkeit deutlich geringer aus.

Die Dimension der Leiterwiderstandserhöhung der Leitungsnachbildungen der Typen A und B ist allerdings nicht mit dem verringerten Wert der Eindringtiefe, verursacht durch den Skin-Effekt zu erklären. Dazu eine kurze Überschlagung des zu erwartenden Werts der Standardeindringtiefe δ („Skin Effekt“, o. D.):

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (3.2)$$

mit

$$\rho = 2,65 \cdot 10^{-2} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r = 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 2,2 \cdot 10^{-5}) \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

ergibt für eine Frequenz von 50 Hz eine Eindringtiefe von 11,57 mm und für eine Frequenz von 400 Hz eine Eindringtiefe von 4,1 mm. Da die interne Verdrahtung der Leitungsnachbildungen mit einer 16 mm² Leitung des Radius 2,25 mm ausgelegt ist, sollte der Skin Effekt im betrachteten Frequenzbereich von 400 Hz keine Auswirkungen zeigen.

3.2.1.2. Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz

Im Hinblick auf den begrenzten Strombelastungsbereich von 23 A im dreiphasigen Messaufbau, wird im Folgenden die Phase L1 für jeden Typ der Leitungsnachbildungen im erhöhten Strombereich nach dem in Abbildung 2.11 dargestellten einphasigen Messaufbau untersucht. Somit kann nun durch die Parallelschaltung der Lastwiderstandswindungen ein Strombelastungsbereich von 65 A erreicht werden. Über diesen Strombereich werden der Leiterwiderstand und die Leiterinduktivität hinsichtlich der Frequenz- und Stromabhängigkeit untersucht. Es werden wie bei der dreiphasigen Messung die Frequenzpunkte von 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz betrachtet. Dabei gilt ein besonderes Interesse dem möglichen Auftreten von Sättigungseffekten im oberen Strombereich.

Gleichzeitig kann mit dem einphasigen Messaufbau die Längsimpedanz des Neutralleiters bestimmt werden. Dies war wegen der Aufhebung der drei Summenströme der Außenleiter L1, L2 und L3 im Sternpunkt, im dreiphasigen Messaufbau nicht möglich.

Leitungsnachbildung Typ A

Beginnend mit der Leitungsnachbildung des Typs A ist in der Abbildung 3.11 der Verlauf des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität über den Strombereich von 14,5 A bis 65 A mit den farblich gekennzeichneten Frequenzpunkten dargestellt.

Dem linken Diagramm zum Verlauf des Leiterwiderstands ist zu entnehmen, dass auch bei der höheren Strombelastung der Leiterwiderstand aller Frequenzpunkte einen konstanten Wert beibehält. Es existiert also keine Stromabhängigkeit des Leiterwiderstands. Der leichte Anstieg im oberen Lastbereich ist auf eine Abnahme der Spannungsqualität der Spannungsquelle zurückzuführen, was zu einer fehlerhaften Bestimmung der Phasenverschiebung φ_{ui} führt und somit auch zu einer Abweichung bei der Berechnung der Leiterkonstanten.

Allerdings deutlich zu erkennen ist auch im zweiphasigen Messaufbau die hohe Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands. Bei einer Frequenz von 50 Hz verläuft der Leiterwiderstand mit 6,5 mΩ annähernd 4 % oberhalb der Sollwertlinie von 6,25 mΩ. Mit steigender Frequenz erhöht sich der Leiterwiderstand, mit einem Anstieg bis auf 10,9 mΩ, und befindet sich bei 400 Hz etwa 43 % oberhalb des Sollwerts. Dabei ist eine Differenz zu den bestimmten Leiterwiderständen in der dreiphasigen Messung festzustellen. Die Differenz der Leiterwiderstände aus dem einphasigen Messaufbau im Vergleich zum dreiphasigen Messaufbau kann nicht auf eine lastbedingte Erhöhung der Leitertemperatur zurückgeführt werden, da ansonsten ein konstanter Anstieg über den Lastbereich zu erkennen sein müsste. Die Differenz kann mit einer Messungenauigkeit verursacht durch die Veränderung des Messaufbaus begründet werden. Zur Veranschaulichung sind die Werte des Leiterwiderstands nochmals in der Tabelle 3.19 dargestellt.

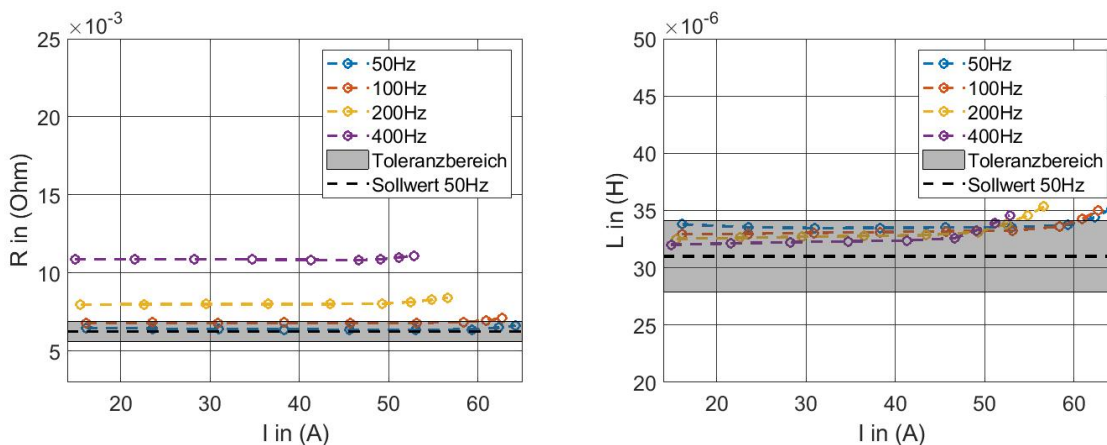


Abbildung 3.10.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz.

Quelle: Eigene Darstellung.

Dem rechten Diagramm zum Verlauf der Leiterinduktivität ist zu entnehmen, dass auch bei der höheren Strombelastung die Leiterinduktivität aller Frequenzpunkte einen konstanten Wert beibehält. Es existiert also auch im hohen Lastbereich bis 65 A keine Stromabhängigkeit der Leiterinduktivität in Form von Sättigungseffekten. Bei dem Erreichen der Sättigungsmagnetisierung wäre ein deutlicher Abfall der Leiterinduktivität zu erkennen. Der Anstieg im oberen Lastbereich ist wie auch bei der Erhöhung des Leiterwiderstands auf die Spannungsqualität der Spannungsquelle zurückzuführen.

Erkennbar wird auch im zweiphasigen Messaufbau die leichte Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität. Bei einer Frequenz von 50 Hz verläuft die Leiterinduktivität mit $34 \mu\text{H}$ circa 9 % oberhalb des Sollwerts. Bis 400 Hz sinkt die Leiterinduktivität mit einem Wert von $32,7 \mu\text{H}$ auf 5 % oberhalb des Sollwerts ab. Die Differenz zur zweiphasigen Messung ist bei der Leiterinduktivität sehr gering. Zur Verdeutlichung sind die Werte der Leiterinduktivität in der Tabelle 3.20 dargestellt.

Sollwert	$R = 6,25 \text{ m}\Omega \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{R} = 6,5 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 6,9 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 8,1 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 10,9 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.19.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstand.

Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$L = 31 \mu\text{H} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{L} = 34 \mu\text{H}$
100 Hz	$\bar{L} = 33,5 \mu\text{H}$
200 Hz	$\bar{L} = 33,3 \mu\text{H}$
400 Hz	$\bar{L} = 32,7 \mu\text{H}$

Tabelle 3.20.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität.

Quelle: Eigene Darstellung.

Nachfolgend zur Untersuchung auf eine Stromabhängigkeit im einphasigen Messaufbau wird zur Vervollständigung der Charakterisierung die Längsimpedanz des Neutralleiters des Typs A bestimmt.

In der folgenden Abbildung 3.11 ist das frequenz- und stromabhängige Verhalten des Neutralleiters zu erkennen, wobei eine hohe Übereinstimmung mit dem Verlauf der Phase L1 sichtbar wird. Da das frequenz- und stromabhängige Verhalten schon an der Phase L1 untersucht wurde, wird darauf nicht weiter eingegangen. Die Werte des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität werden in den Tabellen 3.21 und 3.22 dargestellt und verdeutlichen die hohe Übereinstimmung des Übertragungsverhaltens des Leiters N zu der Phase L1.

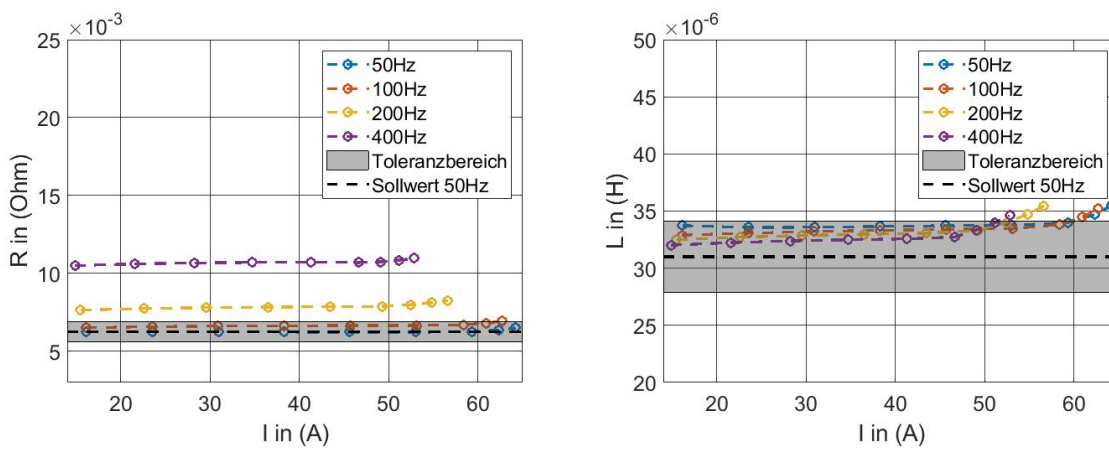


Abbildung 3.11.: Leitungsnachbildung Typ A Leiter N - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$R = 6,25 \text{ m}\Omega \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{R} = 6,3 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 6,9 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 7,9 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 10,7 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.21.: Leitungsnachbildung Typ A Leiter N - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$L = 31 \text{ }\mu\text{H} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{L} = 34 \text{ }\mu\text{H}$
100 Hz	$\bar{L} = 33,6 \text{ }\mu\text{H}$
200 Hz	$\bar{L} = 33,5 \text{ }\mu\text{H}$
400 Hz	$\bar{L} = 32,9 \text{ }\mu\text{H}$

Tabelle 3.22.: Leitungsnachbildung Typ A Leiter N - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.

Leitungsnachbildung Typ B

In der Abbildung 3.12 ist nun der Verlauf des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität der Leitungsnachbildung Typ B dargestellt.

Dem linken Diagramm zum Verlauf des Leiterwiderstands ist zu entnehmen, dass auch bei der höheren Strombelastung der Leiterwiderstand in den Frequenzpunkten 50 Hz und 100 Hz einen konstanten Wert beibehält. Es existiert also keine Stromabhängigkeit des Leiterwiderstands. Der starke Abfall des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität in den Frequenzpunkten 200 Hz und 400 Hz ist auf einen Einbruch der Quellspannung und der damit einhergehenden Abnahme der Spannungsqualität zurückzuführen. Dies stellt keine Stromabhängigkeit der Leitungsparameter dar. Aufgrund der nicht zu verwertenden Messergebnisse in den Frequenzpunkten 200 Hz und 400 Hz werden im folgenden ausschließlich die Frequenzpunkte 50 Hz und 100 Hz betrachtet.

Dort ist deutlich zu erkennen, dass auch im zweiphasigen Messaufbau die hohe Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands auftritt. Bei einer Frequenz von 50 Hz verläuft der Leiterwiderstand mit $47,9 \text{ m}\Omega$ circa 9 % oberhalb des Sollwerts von $44 \text{ m}\Omega$. Mit steigender Frequenz erhöht sich der Leiterwiderstand auf $50,2 \text{ m}\Omega$ bei 400 Hz. Dabei ist eine Differenz zu den bestimmten Leiterwiderständen in der dreiphasigen Messung festzustellen, welche auf eine Veränderung des Messaufbaus zurückzuführen ist. Zur Verdeutlichung sind die Werte des Leiterwiderstands in der Tabelle 3.23 dargestellt.

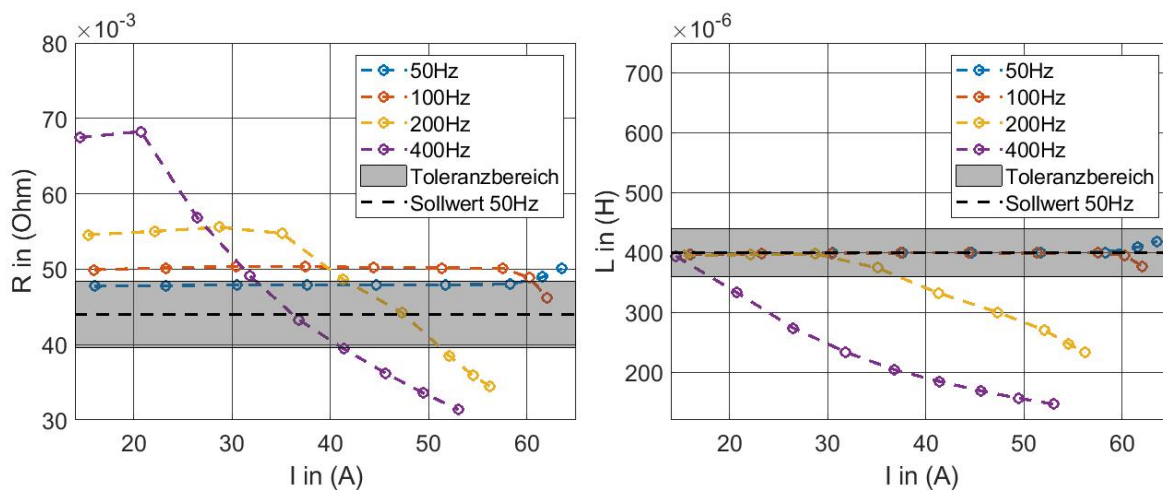


Abbildung 3.12.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz.

Quelle: Eigene Darstellung.

Dem rechten Diagramm zum Verlauf der Leiterinduktivität ist zu entnehmen, dass auch bei der höheren Strombelastung die Leiterinduktivität aller Frequenzpunkte einen konstanten Wert beibehält. Es existiert also auch im hohen Lastbereich bis 65 A keine Stromabhängigkeit der Leiterinduktivität des Typs B in Form von Sättigungseffekten. Der Anstieg im oberen Lastbereich, sowie das Verhalten in den Frequenzpunkten 200 Hz und 400 Hz ist wie zuvor beschrieben auf die Spannungsqualität der Spannungsquelle zurückzuführen. Im zweiphasigen Messaufbau ist keine eindeutige Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität festzustellen. Bei einer Frequenz von 50 Hz verläuft die Leiterinduktivität mit $398,9 \mu\text{H}$ etwa 1 % unterhalb des Sollwerts von $400 \mu\text{H}$ und sinkt bis 100 Hz auf einen Wert von $398,4 \mu\text{H}$ ab. Die Differenz zur zweiphasigen Messung ist bei der Leiterinduktivität sehr gering. Zur Verdeutlichung sind die Werte der Leiterinduktivität in der Tabelle 3.24 dargestellt.

Sollwert	$R = 44 \text{ m}\Omega \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{R} = 47,9 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 50,2 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.23.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands.

Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$L = 400 \mu\text{H} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{L} = 398,9 \mu\text{H}$
100 Hz	$\bar{L} = 398,4 \mu\text{H}$

Tabelle 3.24.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität.

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Leitungsnachbildung Typ B stellt eine dreiphasige Leitung ohne Neutralleiter dar, weshalb keine Betrachtung des Neutralleiters folgt.

Leitungsnachbildung Typ C

Abschließend mit der zweiphasigen Bestimmung der Längsimpedanz der Leitungsnachbildung Typ C, ist der Verlauf des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität in der Abbildung 3.13 dargestellt.

Dem linken Diagramm zum Verlauf des Leiterwiderstands ist zu entnehmen, dass bei der höheren Strombelastung der Leiterwiderstand der Frequenzpunkte 50 Hz und 100 Hz einen konstanten Wert beibehält. Es existiert also keine Stromabhängigkeit des Leiterwiderstands in diesen beiden Frequenzpunkten. Der Leiterwiderstand der Frequenzpunkte 200 Hz und 400 Hz weist allerdings einen leichten Anstieg über den Strombereich auf. Diese Widerstandserhöhung kann mit einer Erhöhung der Leitertemperatur, auf Grund des höheren Blindstroms bei einer ansteigenden Frequenz begründet werden. Zur sicheren Annahme muss dazu allerdings das Temperaturverhalten genauer untersucht werden. Eine erste Berechnung nach der unten stehenden Gleichung 3.2 unterstützt die Möglichkeit des Temperatureinflusses. Der leichte Anstieg im oberen Lastbereich ist wie bei der Leitungsnachbildung Typ A wieder auf eine Abnahme der Spannungsqualität zurückzuführen.

Außerdem zu erkennen ist im zweiphasigen Messaufbau die Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands, welche im oberen Lastbereich etwas höher ausfällt als bei der dreiphasigen Bestimmung des Leiterwiderstands. Bei einer Frequenz von 50 Hz verläuft der Leiterwiderstand mit 24,6 mΩ etwa 6 % unterhalb der Sollwertlinie von 26,2 mΩ. Mit steigender Frequenz erhöht sich der Leiterwiderstand um 2 % auf 26,7 mΩ bei 400 Hz. Dabei ist vor allem in den Frequenzpunkten von 200 Hz und 400 Hz eine Differenz zu den bestimmten Leiterwiderständen in der dreiphasigen Messung festzustellen. Zur Verdeutlichung sind die Werte des Leiterwiderstands in der Tabelle 3.25 dargestellt.

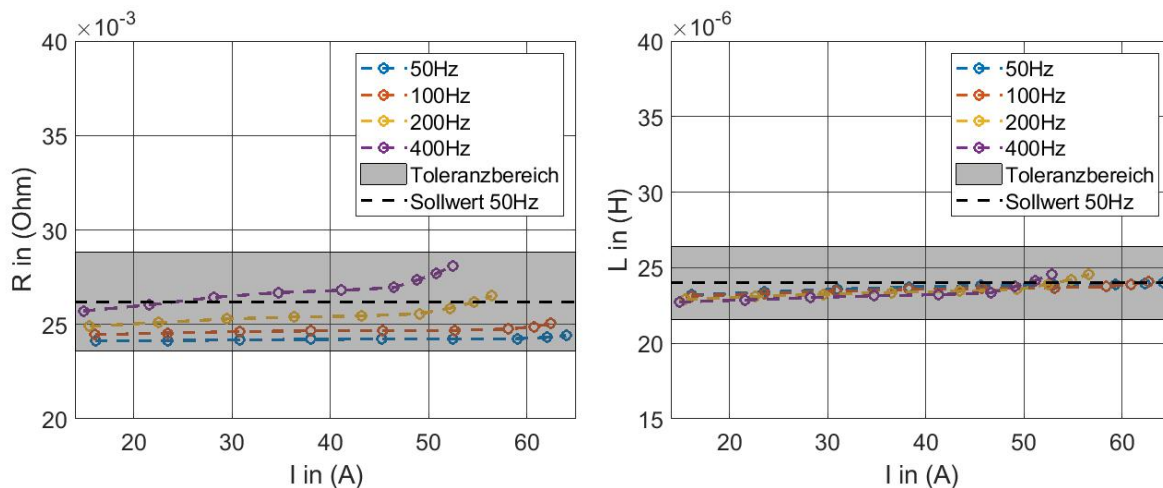


Abbildung 3.13.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.

Dem rechten Diagramm zum Verlauf der Leiterinduktivität ist zu entnehmen, dass auch bei der höheren Strombelastung die Leiterinduktivität aller Frequenzpunkte einen konstanten Wert beibehält. Es existiert also auch im hohen Lastbereich von 65 A keine Stromabhängigkeit der Leiterinduktivität in Form von Sättigungseffekten. Der Anstieg im oberen Lastbereich ist ebenfalls auf die Spannungsqualität der Spannungsquelle zurückzuführen. Erkennbar wird im zweiphasigen Messaufbau eine sehr leichte Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität. Bei einer Frequenz von 50 Hz verläuft die Leiterinduktivität mit $23,5 \mu\text{H}$ circa 2 % unterhalb der Sollwertlinie von $24 \mu\text{H}$ und sinkt bis 400 Hz um 1 % auf einen Wert von $23,2 \mu\text{H}$ ab. Die Differenz zur zweiphasigen Messung ist bei der Leiterinduktivität des Typs C ebenfalls sehr gering. Zur Verdeutlichung sind die Werte der Leiterinduktivität in der Tabelle 3.26 dargestellt.

Sollwert	$R = 26,2 \text{ m}\Omega \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{R} = 24,6 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 24,7 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 25,5 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 26,7 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.25.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands.

Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$L = 24 \mu\text{H} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{L} = 23,5 \mu\text{H}$
100 Hz	$\bar{L} = 23,4 \mu\text{H}$
200 Hz	$\bar{L} = 23,3 \mu\text{H}$
400 Hz	$\bar{L} = 23,2 \mu\text{H}$

Tabelle 3.26.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität.

Quelle: Eigene Darstellung.

Wie zuvor erwähnt folgt eine veranschlagende Berechnung der Temperaturabhängigkeit nach Büttner (2009, S. 94) bei einer Temperaturdifferenz von 10 K.

$$R_T = R_{T_0} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta\vartheta)) \quad (3.3)$$

mit

$$\alpha = 3,77 \frac{1}{10^3 \cdot \text{K}}$$

$$\vartheta = 10 \text{ K}$$

$$R_{T_0} = 26,2 \text{ m}\Omega \text{ bei } 20^\circ\text{C}$$

$$R_T = 27,18 \text{ m}\Omega \text{ bei } 30^\circ\text{C}$$

Damit ergibt sich eine Erhöhung des Leiterwiderstands um $988 \mu\Omega$.

In der folgenden Abbildung 3.11 ist das frequenz- und stromabhängige Verhalten des Neutralleiters zu erkennen. Es ist eine sehr hohe Übereinstimmung mit dem Verlauf der Phase L1 sichtbar. Da das frequenz- und stromabhängige Verhalten schon an der Phase L1 untersucht wurde, wird wie bei der Leitungsnachbildung Typ A nicht weiter darauf eingegangen. Die Werte des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität werden in den Tabellen 3.27 und 3.28 dargestellt und verdeutlichen die hohe Übereinstimmung des Betriebsverhaltens des Leiters N zu der Phase L1.

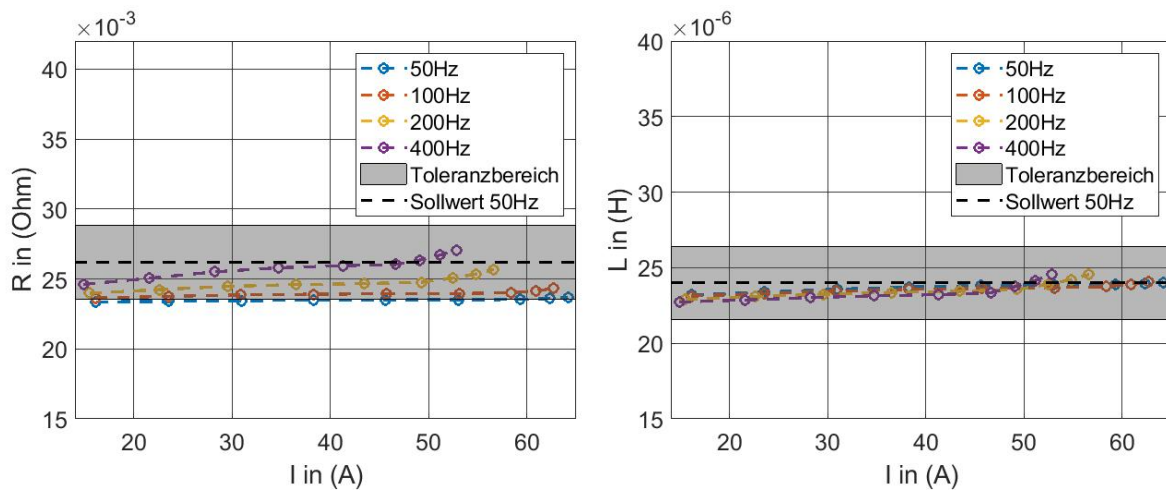


Abbildung 3.14.: Leitungsnachbildung Typ C Leiter N - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz. Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$R = 26,2 \text{ m}\Omega \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{R} = 23,5 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 23,9 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 24,7 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 25,7 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.27.: Leitungsnachbildung Typ C Leiter N - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands. Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$L = 24 \text{ }\mu\text{H} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{L} = 23,7 \text{ }\mu\text{H}$
100 Hz	$\bar{L} = 33,6 \text{ }\mu\text{H}$
200 Hz	$\bar{L} = 23,5 \text{ }\mu\text{H}$
400 Hz	$\bar{L} = 23,3 \text{ }\mu\text{H}$

Tabelle 3.28.: Leitungsnachbildung Typ C Leiter N - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität. Quelle: Eigene Darstellung.

Zusammenfassend wird der Abschnitt der einphasigen Bestimmung der Längsimpedanzen mit einem Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse in Bezug auf die Kernelemente der Kapitel bezogenen Fragestellung abgeschlossen.

Zum Punkt der Stromabhängigkeit kann gesagt werden, dass bei allen drei Typen der Leitungsnachbildungen bis zu einem Strombereich von 65 A keine Sättigungseffekte, erkennbar an der Abnahme der Leiterinduktivität über den Stromwert, auftritt. Allerdings konnte auf Grund des verwendeten Lastwiderstands der Bemessungsstrom von 75 A nicht erreicht werden.

Der Einfluss einer Koppelinduktivität kann ebenfalls nicht festgestellt werden. Trotz des unsymmetrischen Aufbaus der Leitungsnachbildungen kann keine Veränderung der Leiterinduktivität zwischen des dreiphasigen und des zweiphasigen Messaufbaus erkannt werden, welche auf den Einfluss einer Gegeninduktion zurückzuführen ist.

Zuletzt konnte die Längsimpedanz des Neutralleiters der Leitungsnachbildung Typ A und Typ C mit einer sehr geringen Abweichung zu den Phasenimpedanzen bestimmt und somit die Charakterisierung der Längsimpedanzen erfolgreich abgeschlossen werden.

3.2.2. Bestimmung der Queradmittanz

Im Anschluss an die frequenz- und stromabhängige Bestimmung der Längsimpedanz folgt, zur Komplettierung der Charakterisierung des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens der Leitungsnachbildungen im Klein- und Großsignalbereich, die Bestimmung des frequenzabhängigen Verhaltens der Queradmittanzen aller drei Leitungsnachbildungen im Großsignalbereich. Die Queradmittanz setzt sich in diesem Fall nur aus einer Kapazität zusammen. Die Berücksichtigung des Ableitungsbelags ist dabei vom Hersteller nicht vorgesehen und daher auch kein Teil dieser Ausarbeitung.

Die Leiterkapazitäten werden für alle drei Typen der Leitungsnachbildungen anhand des in Abbildung 2.12 dargestellten Messaufbaus bestimmt. Untersucht werden wieder die Frequenzpunkte von 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz. Auf Grund der Leerlaufschaltung stellt sich der Leiterstrom über den kapazitiven Blindstrom ein, weshalb die Kapazitätswerte jeweils über die Frequenzachse aufgetragen werden und nicht über einen variablen Strombereich.

Zu aller Erst werden die Leiterkapazitäten wie im Abschnitt 3.2.1.1 beschreiben, innerhalb einer Kastengraphik statistisch visualisiert und die Abweichungen aller Leiterkapazitäten zueinander dargestellt. Anschließend wird eine mögliche Frequenzabhängigkeit exemplarisch an einer Leiterkapazität untersucht. Dabei stellt jeder Messwert den Mittelwert einer Messreihe und eines Frequenzpunkts dar. Im Diagramm wird ebenso wie im Abschnitt 3.2.1.1 der vom Hersteller angegebene Kapazitätswert mit einer schwarz gestrichelten Linie dargestellt. Der grau hinterlegte Bereich markiert den angegebenen Toleranzbereich von $\pm 10\%$.

Leitungsnachbildung Typ A

Beginnend mit der Leitungsnachbildung Typ A ist in der Abbildung 3.29 zu erkennen, dass kaum eine Abweichung der sechs Leiterkapazitäten L1-N, L2-N, L3-N, L1-L2, L1-L3 und L2-L3 zueinander besteht. Die Abweichung zum vom Hersteller angegeben Sollwert von 15,5 nF ist mit 2 % bis 3 % ebenfalls gering. Die Verteilung der Messwerte nimmt mit steigender Frequenz ab.

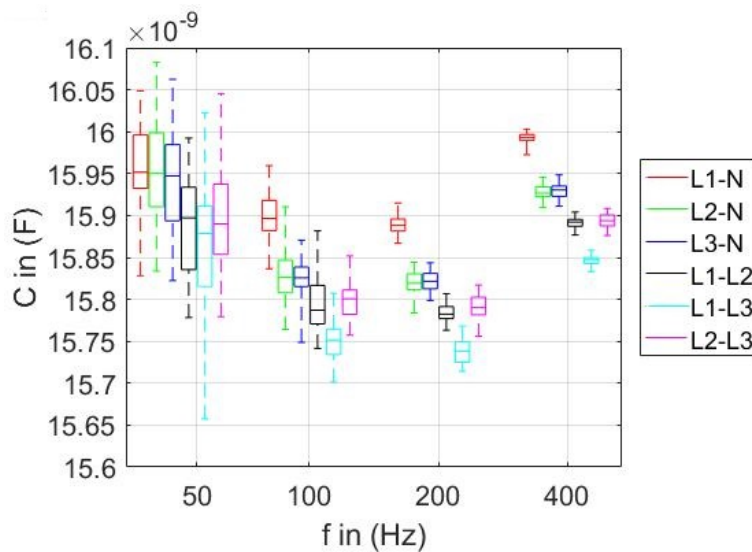


Abbildung 3.15.: Leitungsnachbildung Typ A - Verteilung der Leiterkapazitäten aller Phasen. Quelle: Eigene Darstellung.

In der folgenden Tabelle 3.29 sind nun der Median, der Mittelwert, das Maximum, das Minimum, die Standardabweichung und die Abweichung des Mittelwerts zum Sollwert von 15,5 nF für alle sechs Leiterkapazitäten bei der Betriebsfrequenz von 50 Hz dargestellt. Die geringe Abweichung der Leiterkapazitäten zueinander, sowie die geringe Abweichung zum Sollwert werden besonders deutlich.

	L1-N	L2-N	L3-N	L1-L2	L1-L3	L2-L3
Median	16 nF	16 nF	15,9 nF	15,9 nF	15,9 nF	15,9 nF
Mittelwert	16 nF	16 nF	15,9 nF	15,9 nF	15,9 nF	15,9 nF
Minimum	15,8 nF	15,8 nF	15,8 nF	15,8 nF	15,7 nF	15,7 nF
Maximum	16,1 nF	16,2 nF	16,1 nF	16 nF	16 nF	16,1 nF
Standardabweichung	47 pF	65 pF	58 pF	62 pF	73 pF	63 pF
Abweichung zum Sollwert	3 %	3,1 %	2,9 %	2,6 %	2,3 %	2,5 %

Tabelle 3.29.: Leitungsnachbildung Typ A - Statistische Auswertung aller Leiterkapazitäten bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz. Quelle: Eigene Darstellung.

Nach der statistischen Betrachtung der Queradmittanzen aller Phasen, kann diese nun auf eine Frequenzabhängigkeit untersucht werden. Dazu wird die Kapazität zwischen der Phase L1-N betrachtet.

In der Abbildung 3.16 ist die Leiterkapazität über die farblich gekennzeichneten Frequenzpunkte aufgetragen. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Leiterkapazität keine Frequenzabhängigkeit aufweist und über alle Frequenzpunkte hinweg annähernd 3 % oberhalb der Sollwertlinie von 15,5 nF verläuft. Dies wird in der Tabelle 3.30 nochmals verdeutlicht.

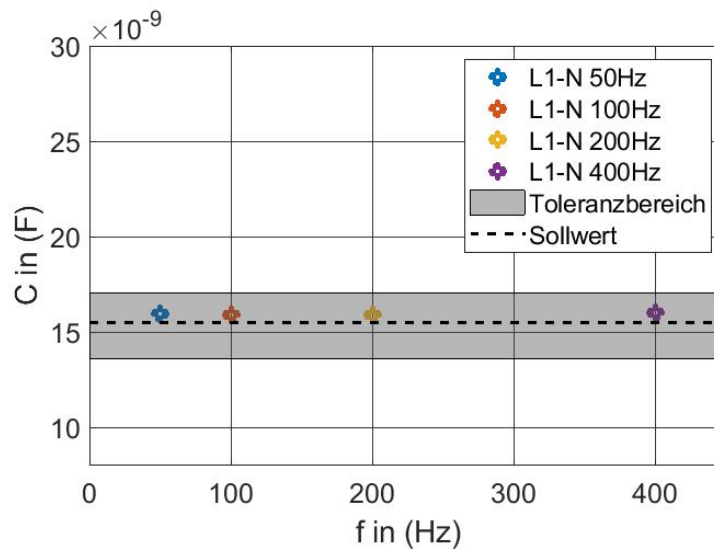


Abbildung 3.16.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1-N - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$C = 15,5 \text{ nF} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{C} = 16 \text{ nF}$
100 Hz	$\bar{C} = 15,9 \text{ nF}$
200 Hz	$\bar{C} = 15,9 \text{ nF}$
400 Hz	$\bar{C} = 16 \text{ nF}$

Tabelle 3.30.: Leitungsnachbildung Typ A Phase L1-N - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität. Quelle: Eigene Darstellung.

Leitungsnachbildung Typ B

Die statistische Visualisierung der Leiterkapazitäten der Leitungsnachbildung Typ B in den Abbildungen 3.17 und 3.18 zeigt für beide Schaltzustände der Zusatzkapazitäten eine sehr geringe Abweichung der Leiterkapazitäten L1-L2, L1-L3 und L2-L3 untereinander auf. Die Abweichungen der Leiterkapazitäten zum angegebenen Sollwert sind allerdings für beide Fälle sehr hoch. Ohne die zugeschalteten Zusatzkapazitäten beträgt die Abweichung zum Sollwert von 25 nF circa 28 %. Mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten beträgt die Abweichung zum Sollwert von 186 nF circa 29 %. Ebenfalls für den Typ B der Leitungsnachbildungen ist bei einer Zunahme der Frequenz eine Verringerung der Verteilung der Messwerte zu erkennen.

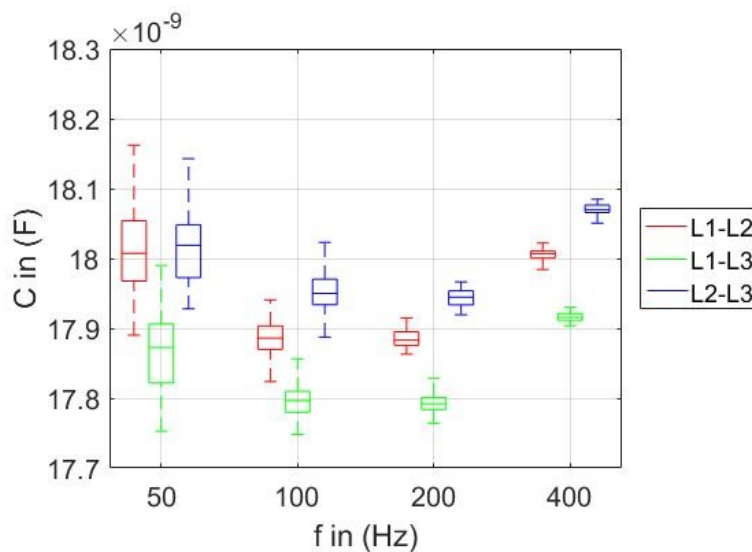


Abbildung 3.17.: Leitungsnachbildung Typ B - Verteilung der Leiterkapazität aller Phasen ohne zugeschaltete Zusatzkapazitäten.

Quelle: Eigene Darstellung.

In den folgenden Tabellen 3.31 und 3.32 sind der Median, der Mittelwert, das Maximum, das Minimum, die Standardabweichung und die Abweichung des Mittelwerts zum Sollwert von 25 nF und 186 nF mit zugeschalteten Kapazitäten für alle drei Leiterkapazitäten bei der Betriebsfrequenz von 50 Hz dargelegt.

	L1-L2	L1-L3	L2-L3
Median	18 nF	17,9 nF	18 nF
Mittelwert	18 nF	17,9 nF	18 nF
Minimum	17,8 nF	17,8 nF	17,9 nF
Maximum	18,2 nF	18 nF	18,1 nF
Standardabweichung	66 pF	59 pF	61 pF
Abweichung zum Sollwert	28 %	28,5 %	28 %

Tabelle 3.31.: Leitungsnachbildung Typ B - Statistische Auswertung aller Leiterkapazitäten bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz ohne zugeschaltete Zusatzkapazitäten.
Quelle: Eigene Darstellung.

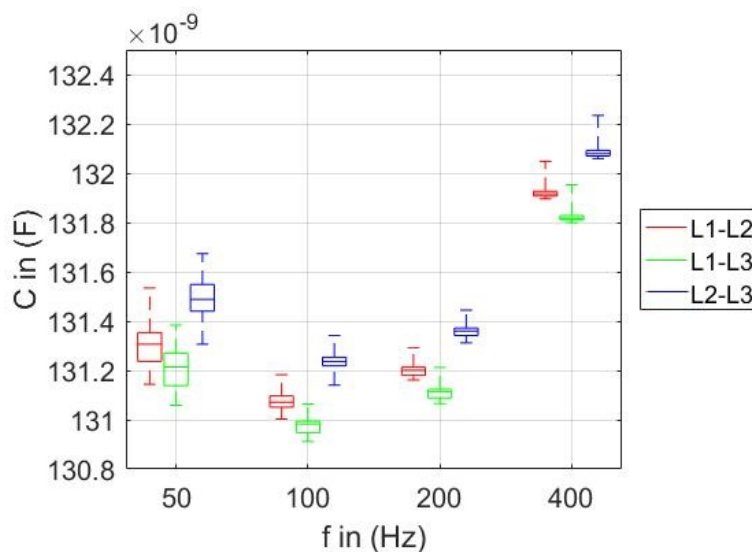


Abbildung 3.18.: Leitungsnachbildung Typ B - Verteilung der Leiterkapazitäten aller Phasen mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten.
Quelle: Eigene Darstellung.

	L1-L2	L1-L3	L2-L3
Median	131,3 nF	131,2 nF	131,5 nF
Mittelwert	131,3 nF	131,2 nF	131,5 nF
Minimum	131,1 nF	131,1 nF	131,3 nF
Maximum	131,5 nF	131,4 nF	131,7 nF
Standardabweichung	68 pF	75 pF	92 pF
Abweichung zum Sollwert	29 %	29,5 %	29,3 %

Tabelle 3.32.: Leitungsnachbildung Typ B - Statistische Auswertung aller Leiterkapazitäten bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz mit zugeschalteten Zusatzkapazitäten.
Quelle: Eigene Darstellung.

Anschließend an die statistische Auswertung der Leiterkapazitäten für die beiden Schaltzustände der Zusatzkapazitäten folgt nun für beide Fälle die Betrachtung des Frequenzverhaltens der Leiterkapazitäten. Zu erkennen ist in den Abbildungen 3.19 und 3.20 die Leiterkapazität zwischen den Phasen L1-L2 über die farblich gekennzeichneten Frequenzpunkte. Für beide Schaltfälle der Zusatzkapazitäten ist keine Frequenzabhängigkeit zu erkennen. Aus den beiden Abbildungen geht jedoch besonders die hohe Abweichung zum angegebenen Sollwert hervor. Dies wird in den Tabellen 3.33 und 3.34 nochmals verdeutlicht.

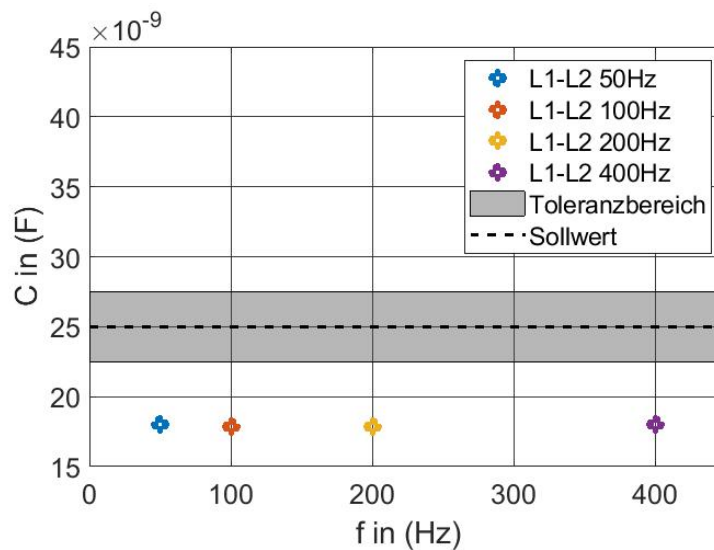


Abbildung 3.19.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität ohne zugeschaltete Zusatzkapazität.
Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$C = 25 \text{ nF} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{C} = 18 \text{ nF}$
100 Hz	$\bar{C} = 17,9 \text{ nF}$
200 Hz	$\bar{C} = 17,9 \text{ nF}$
400 Hz	$\bar{C} = 18 \text{ nF}$

Tabelle 3.33.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität ohne zugeschaltete Zusatzkapazität.
Quelle: Eigene Darstellung.

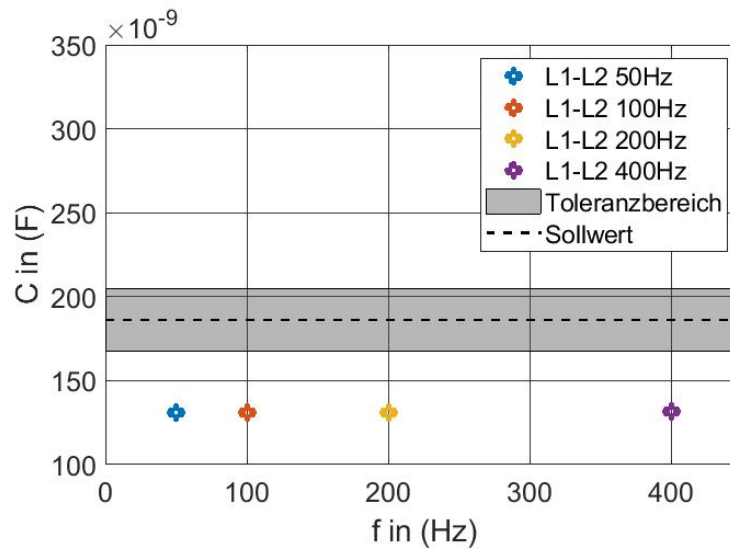


Abbildung 3.20.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität mit zugeschalteter Zusatzkapazität.
Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$C = 186 \text{ nF} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{C} = 131,1 \text{ nF}$
100 Hz	$\bar{C} = 131,1 \text{ nF}$
200 HZ	$\bar{C} = 131,2 \text{ nF}$
400 Hz	$\bar{C} = 132 \text{ nF}$

Tabelle 3.34.: Leitungsnachbildung Typ B Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität mit zugeschalteter Zusatzkapazität.
Quelle: Eigene Darstellung.

Leitungsnachbildung Typ C

Bei der Leitungsnachbildung Typ C zeigt die statistische Visualisierung in der Abbildung 3.21 mit maximal 4 % ebenfalls nur eine leichte Abweichung der Leiterkapazitäten zueinander. Es ist jedoch mit 8 % bis 12 % eine relativ hohe Abweichung zum vom Hersteller angegeben Sollwert von 9,4 nF zu erkennen.

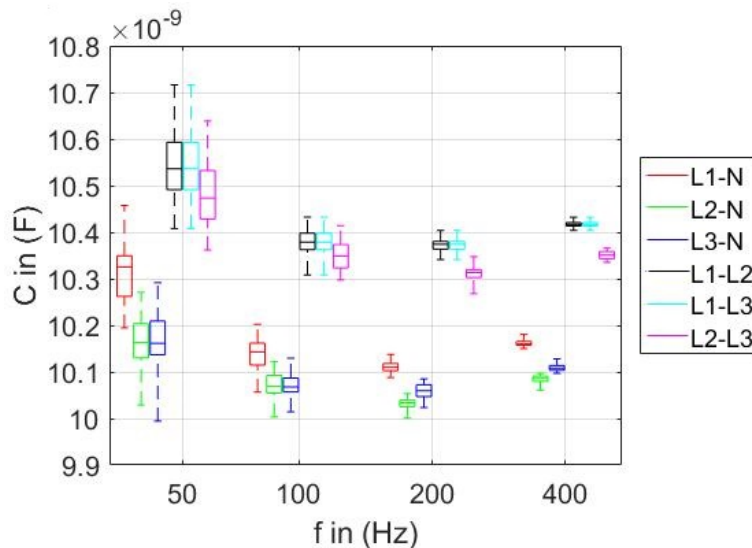


Abbildung 3.21.: Leitungsnachbildung Typ C - Verteilung des Leiterkapazitäten aller Phasen.

Quelle: Eigene Darstellung.

In der folgenden Tabelle 3.35 sind nochmals der Median, der Mittelwert, das Maximum, das Minimum, die Standardabweichung und die Abweichung des Mittelwerts zum Sollwert von 9,4 nF für alle sechs Leiterkapazitäten bei der Betriebsfrequenz von 50 Hz dargestellt.

	L1-N	L2-N	L3-N	L1-L2	L1-L3	L2-L3
Median	10,3 nF	10,2 nF	10,2 nF	10,6 nF	10,6 nF	10,5 nF
Mittelwert	10,3 nF	10,2 nF	10,2 nF	10,6 nF	10,6 nF	10,5 nF
Minimum	10,1 nF	10 nF	10 nF	10,4 nF	10,4 nF	10,3 nF
Maximum	10,5 nF	10,3 nF	10,3 nF	10,7 nF	10,7 nF	10,6 nF
Standardabweichung	65 pF	54 pF	57 pF	71 pF	71 pF	67 pF
Abweichung zum Sollwert	9,4 %	8,1 %	8,2 %	12 %	12 %	11 %

Tabelle 3.35.: Leitungsnachbildung Typ C - Statistische Auswertung der Leiterkapazitäten aller Phasen bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz.

Quelle: Eigene Darstellung.

Mit der abgeschlossenen statistischen Betrachtung der Leiterkapazitäten wird nun die Leiterkapazität der Phase L1-N auf eine Frequenzabhängigkeit untersucht. In der Abbildung 3.22 ist die Leiterkapazität über die farblich gekennzeichneten Frequenzpunkte aufgetragen. Aus der Abbildung 3.22 geht hervor, dass auch die Leiterkapazität des Typs C keine Frequenzabhängigkeit aufweist und über alle Frequenzpunkte hinweg annähernd 9 % oberhalb der Sollwertlinie von 9,4 nF verläuft. Dies wird in der Tabelle 3.36 nochmals verdeutlicht.

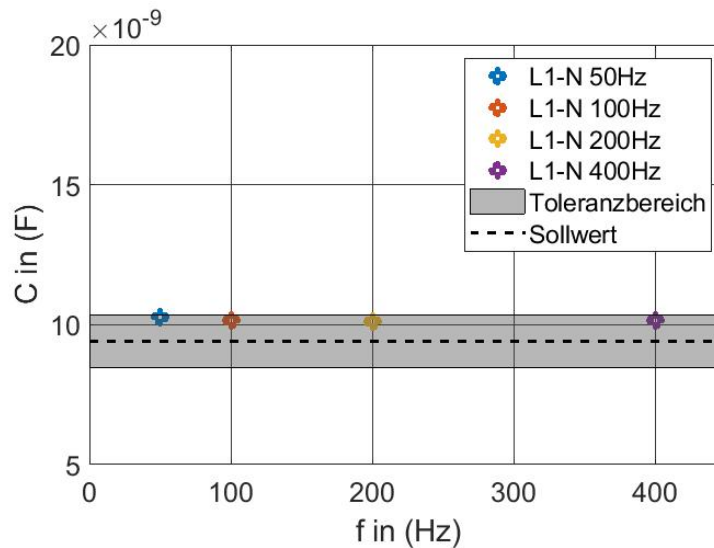


Abbildung 3.22.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1-N - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität.
Quelle: Eigene Darstellung.

Sollwert	$C = 9,4 \text{ nF} \pm 10 \%$
50 Hz	$\bar{C} = 10,3 \text{ nF}$
100 Hz	$\bar{C} = 10,2 \text{ nF}$
200 Hz	$\bar{C} = 10,1 \text{ nF}$
400 Hz	$\bar{C} = 10,2 \text{ nF}$

Tabelle 3.36.: Leitungsnachbildung Typ C Phase L1-N - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität.
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse der Untersuchung der Queradmittanzen aller drei Leitungsnachbildungen werden nun der Übersicht halber zusammenfassend dargestellt.

Der Vergleich der gemessenen Leiterkapazitäten zu dem vom Hersteller angegebenen Sollwert zeigt für den Typ A der Leitungsnachbildungen eine hohe Übereinstimmung. Die Leitungsnachbildung Typ C weist mit Abweichungen von bis zu 12 % Werte außerhalb des Toleranzbereichs von ± 10 % auf. Eine sehr hohe Abweichung mit bis zu 29 % tritt bei der Leitungsnachbildung des Typs B auf.

Betrachtet man allerdings die Abweichungen der Leiterkapazitäten der einzelnen Phasen der verschiedenen Leitungsnachbildungen untereinander, dargelegt in der statistischen Betrachtung der Leiterkapazitäten, besteht für alle drei Typen nur eine sehr geringe Abweichung. Daraus lässt sich schließen, dass durch die Verwendung von festen Bauelementen als Leiterkapazitäten kein geometrischer Einfluss durch die Anordnungen der Phasen auf die Leiterkapazitäten wirkt. Dieser geometrische Einfluss wäre im Falle einer unsymmetrischen Leiteranordnung bei einem realen Kabel sehr wohl zu erkennen.

Hinsichtlich der Frequenzabhängigkeit der Leiterkapazitäten, ist diese wie im Abschnitt 2.1.2 vorab angedeutet, erwartungsgemäß bei allen drei Typen der Leitungsnachbildungen nicht aufgetreten.

3.2.3. Vermessung der realen Leitung NAYY-J 4x35mm² RE

Die bisher dargelegten Ergebnisse bilden die frequenzabhängige Charakterisierung der Leitungsnachbildungen im Klein- und Großsignalbereich.

Um eine Eindeutige Bewertung der Realitätsnähe des Übertragungsverhaltens der Leitungsnachbildungen bewerten zu können, bedarf es der Untersuchung einer realen Leitung nach der selben zuvor durchgeführten Vorgehensweise. Diese Ergebnisse können dann miteinander Verglichen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher zusätzlich der Leitungstyp NAYY-J 4x35 mm² RE mit einer Leitungslänge von 20 m im Großsignalbereich untersucht und anschließend mit der äquivalenten Leitungsnachbildung des Typs C verglichen.

Diesbezüglich wird in diesem Abschnitt die Leitung zunächst im dreiphasigen Messaufbau nach Abbildung 2.9 vermessen, die Messergebnisse in einer Kastengraphik visualisiert und hinsichtlich einer Abweichung der Leitungsparameter der drei Phasen zueinander dargestellt. Im Anschluss daran folgt anhand der Phase L1 der Leitung die Untersuchung der Längsimpedanz auf eine Frequenz- und Stromabhängigkeit im drei- und einphasigen Aufbau.

Nachfolgend werden die Leiterkapazitäten bestimmt, deren Verteilung in einer Kastengraphik dargestellt und diese ebenfalls auf eine Frequenzabhängigkeit untersucht.

Abschließend können mit den bestimmten Werten für die Längsimpedanz und Queradmittanz die Längen bezogenen Leitungsbeläge errechnet und auf eine Länge von 50 m übertragen werden. In dieser Form lässt sich dann die reale Leitung direkt mit der Leitungsnachbildung des Typs C vergleichen.

3.2.3.1. Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz

In der Abbildung 3.23 ist eine leichte Abweichung des Leiterwiderstands der Phase L2 zu den Phase L1 und L3 von annähernd 4 % zu erkennen. Eine deutliche Abweichung von circa 36 % weist die Leiterinduktivität der Phase L1 zu den Phase L2 und L3 auf. Die Verteilung der Messwerte nimmt bei beiden Leitungsparametern im höheren Lastbereich ab. In den Tabellen 3.37 und 3.38 sind die Abweichungen und die Verteilung nochmals für den mittleren Lastpunkt von 15,4 A dargestellt.

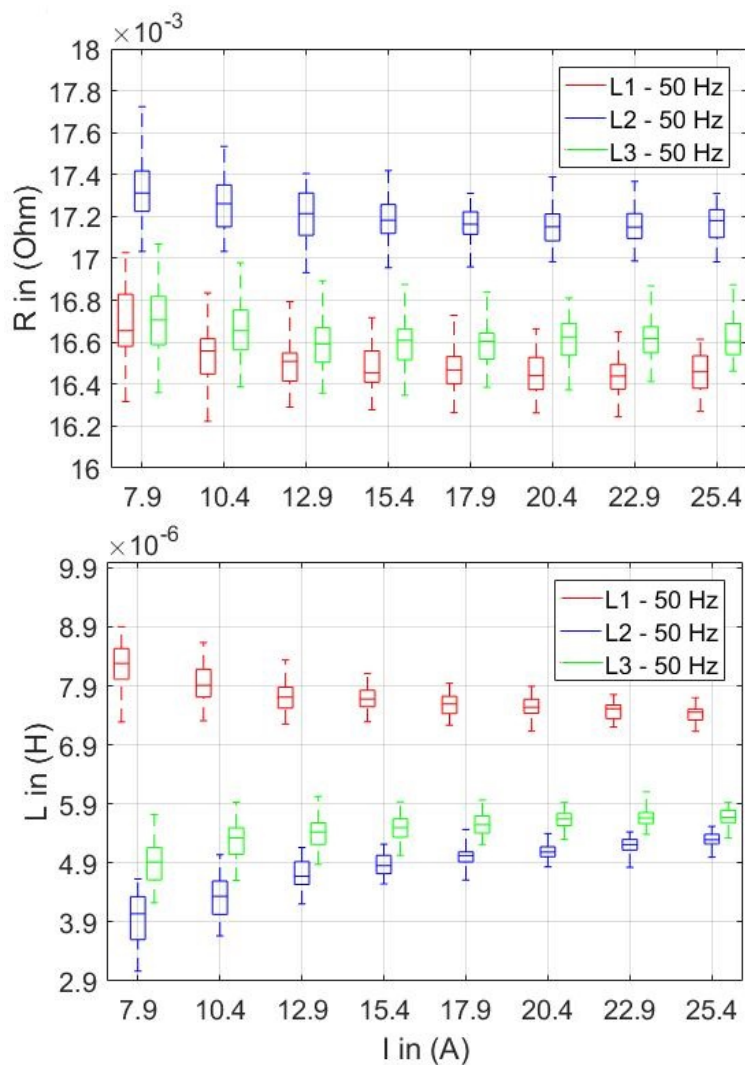


Abbildung 3.23.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE - Verteilung des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität der Phasen L1, L2 und L3.
Quelle: Eigene Darstellung.

	L1	L2	L3
Median	16,5 mΩ	17,2 mΩ	16,6 mΩ
Mittelwert	16,5 mΩ	17,2 mΩ	16,6 mΩ
Minimum	16,3 mΩ	17 mΩ	16,3 mΩ
Maximum	16,7 mΩ	17,4 mΩ	16,9 mΩ
Standardabweichung	111 μΩ	111 μΩ	113 μΩ

Tabelle 3.37.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE - Statistische Auswertung des Leiterwiderstands der Phasen L1, L2 und L3 bei 15,5 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

	L1	L2	L3
Median	7,7 μH	4,9 μH	5,5 μH
Mittelwert	7,7 μH	4,9 μH	5,5 μH
Minimum	7,3 μH	4,5 μH	5 μH
Maximum	8,1 μH	5,2 μH	5,9 μH
Standardabweichung	0,2 μH	0,2 μH	0,2 μH

Tabelle 3.38.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE - Statistische Auswertung der Leiterinduktivität der Phasen L1, L2 und L3 bei 15,5 A.

Quelle: Eigene Darstellung.

Nach der statistischen Betrachtung der Längsimpedanzen wird nun die Frequenz- und Stromabhängigkeit der Längsimpedanz untersucht. Dazu ist in der Abbildung 3.24 die Längsimpedanz der Phase L1 in einem Strombereich von 8 A bis 23 A über die Frequenzpunkte 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz dargestellt.

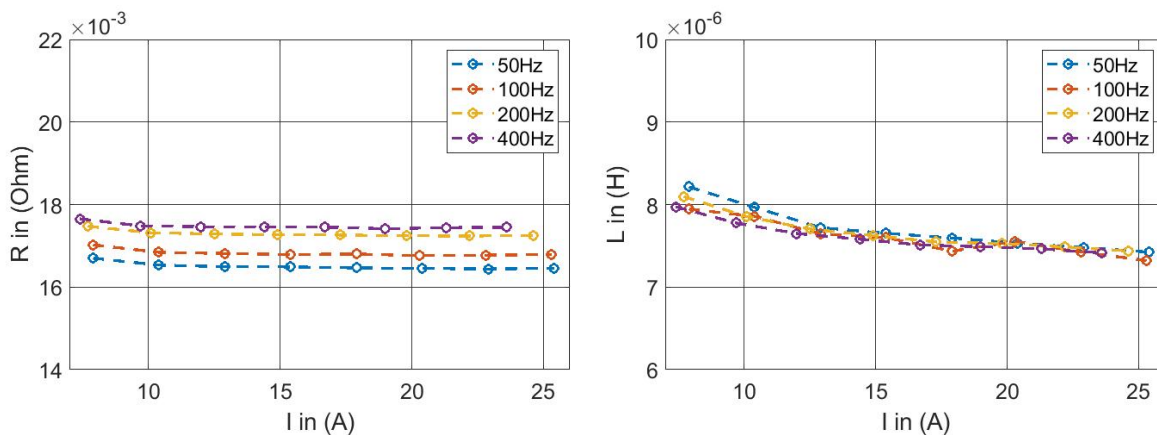


Abbildung 3.24.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Längsimpedanz.

Quelle: Eigene Darstellung.

Im linken Diagramm der Abbildung 3.24 ist zunächst zu erkennen, dass der Leiterwiderstand aller Frequenzpunkte über den Strombereich einen konstanten Wert beibehält. Es ist also keine Stromabhängigkeit des Leiterwiderstands ersichtlich.

Die Abbildung zeigt allerdings ebenfalls bei der realen Leitung eine leichte Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands auf. Bei einer Frequenz von 50 Hz beträgt der Leiterwiderstand circa 16,5 mΩ. Dieser steigt bis 400 Hz um etwa 6 % bis auf 17,5 mΩ an. Die Widerstandswerte sind in der Tabelle 3.39 nochmals dargestellt.

Frequenz f	Leiterwiderstand R
50 Hz	$\bar{R} = 16,5 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 16,8 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 17,3 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 17,5 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.39.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung des Leiterwiderstands.

Quelle: Eigene Darstellung.

Im rechten Diagramm ist die Leiterinduktivität über den Stromverlauf dargestellt. Im Gegensatz zu den Leitungsnachbildungen ist hier keine eindeutige Abnahme der Leiterinduktivität bei steigender Frequenz zu erkennen. Es existiert also keine Frequenzabhängigkeit der Leiterinduktivität im betrachteten Frequenzbereich von 50 Hz bis 400 Hz.

Sichtbar wird allerdings eine leichte Abnahme der Leiterinduktivität über den Strombereich. Bei einem Strom von 8 A und einer Frequenz von 50 Hz beträgt die Leiterinduktivität 8,2 μH und fällt bis 25,5 A um 10 % auf einen Wert von 7,4 μH ab. Diese Abnahme tritt bei allen Frequenzpunkten auf. Zur Verdeutlichung ist in der Tabelle 3.40 nochmals die Leiterinduktivität über den Strom bei 50 Hz dargestellt.

Strom I	Leiterinduktivität L
7.9 A	$L = 8,2 \text{ }\mu\text{H}$
10.4 A	$L = 8 \text{ }\mu\text{H}$
12.9 A	$L = 7,7 \text{ }\mu\text{H}$
15.4 A	$L = 7,7 \text{ }\mu\text{H}$
17.9 A	$L = 7,6 \text{ }\mu\text{H}$
20.4 A	$L = 7,5 \text{ }\mu\text{H}$
22.9 A	$L = 7,5 \text{ }\mu\text{H}$
25.4 A	$L = 7,4 \text{ }\mu\text{H}$

Tabelle 3.40.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE Phase L1 - Dreiphasige Bestimmung der Leiterinduktivität.

Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.3.2. Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz

Zur Untersuchung des stromabhängigen Verhaltens der Längsimpedanz in einem höheren Strombereich von bis zu 64 A, wird die Leitung als nächstes im einphasigen Messaufbau nach der Abbildung 2.11 vermessen.

In der Abbildung 3.25 ist der Leiterwiderstand und die Leiterinduktivität der Phase L1 über den Strombereich von 16 A bis 64 A mit den farblich gekennzeichneten Frequenzpunkten 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz dargestellt.

Der Verlauf des Leiterwiderstands im linken Diagramm zeigt einen konstanten Verlauf des Leiterwiderstands relativ zum Strombereich bei den Frequenzen von 50 Hz und 100 Hz. Bei den Frequenzpunkten von 200 Hz und 400 Hz steigt der Leiterwiderstand im oberen Laststrombereich an. Dies ist allerdings nicht auf eine Stromabhängigkeit des Leiterwiderstands zurück zu führen, sondern wie im Abschnit 3.2.1.2 bereits beschrieben, auf die Abnahme der Spannungsqualität der Quellspannung bei erhöhter Frequenz. Hinsichtlich des Frequenzverhaltens ist ein leichter Anstieg des Leiterwiderstands zu erkennen. Allerdings weist dieser wie in Tabelle 3.41 dargestellt, eine etwas geringere Zunahme als bei der dreiphasigen Bestimmung des Leiterwiderstands auf.

Der Verlauf der Leiterinduktivität im rechten Diagramm zeigt eine deutliche Abweichung im einphasigen Messaufbau im Vergleich zur Bestimmung im dreiphasigen Messaufbau auf. Mit einer Abweichung des Induktivitätswerts von bis zu 28 %. Die Abnahme der Induktivität über einen zunehmenden Strom wird auch bei der einphasigen Messung sichtbar und ist nochmals in der Tabelle 3.42 dargestellt. Die Frequenzabhängigkeit ist wie bei dem dreiphasigen Messaufbau nicht eindeutig über den gesamten Lastbereich zu erkennen und sollte wegen der hohen Abweichung zwischen den Messaufbauten erneut untersucht werden.

Frequenz f	Leiterwiderstand R
50 Hz	$\bar{R} = 16,1 \text{ m}\Omega$
100 Hz	$\bar{R} = 16,1 \text{ m}\Omega$
200 Hz	$\bar{R} = 16,3 \text{ m}\Omega$
400 Hz	$\bar{R} = 16,7 \text{ m}\Omega$

Tabelle 3.41.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE Phase L1 - Einphasige Bestimmung des Leiterwiderstands.

Quelle: Eigene Darstellung.

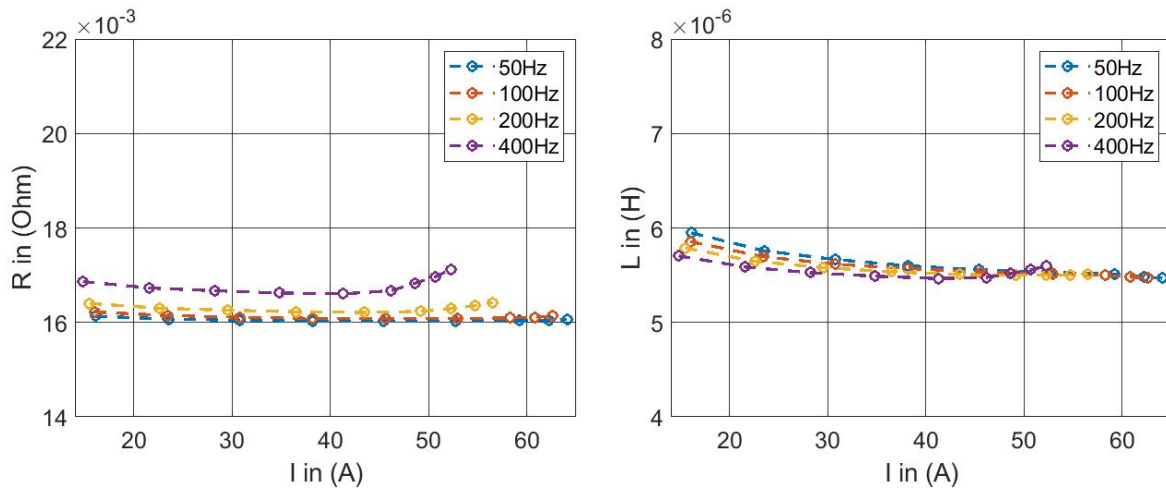


Abbildung 3.25.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Längsimpedanz.
Quelle: Eigene Darstellung.

Strom I	Leiterinduktivität L
16,1 A	$L = 5,9 \mu\text{H}$
23,5 A	$L = 5,8 \mu\text{H}$
30,8 A	$L = 5,7 \mu\text{H}$
38,2 A	$L = 5,6 \mu\text{H}$
45,4 A	$L = 5,6 \mu\text{H}$
52,7 A	$L = 5,5 \mu\text{H}$
59,2 A	$L = 5,5 \mu\text{H}$
62,2 A	$L = 5,5 \mu\text{H}$
64,1 A	$L = 5,5 \mu\text{H}$

Tabelle 3.42.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE Phase L1 - Einphasige Bestimmung der Leiterinduktivität.
Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.3.3. Bestimmung der Queradmittanz

Im Anschluss an die frequenz- und stromabhängige Bestimmung der Längsimpedanz im einphasigen Messaufbau, folgt zur Komplettierung der Charakterisierung der NAYY-J 4x35 mm² RE Leitung die frequenzabhängige Bestimmung der Queradmittanzen. Die Queradmittanzen werden wie bei den Leitungsnachbildungen auch, nur auf die Bestimmung der Leiterkapazitäten hin untersucht.

Die Leiterkapazitäten werden anhand des in Abbildung 2.12 dargestellten Messaufbaus bestimmt. Betrachtet werden die Frequenzpunkte von 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz.

Zu aller Erst werden die Leiterkapazitäten wieder innerhalb einer Kastengraphik statistisch visualisiert und die Abweichungen aller Leiterkapazitäten zueinander dargestellt. Anschließend wird eine mögliche Frequenzabhängigkeit der Leiterkapazitäten exemplarisch an der Leiterkapazität zwischen der Phase L1 und L2 untersucht.

Die in Abbildung 3.26 dargestellte statistische Gegenüberstellung der Leiterkapazitäten zeigt eine hohe Übereinstimmung der einzelnen Leiterkapazitäten zueinander, mit einer etwa 4 % höheren Leiterkapazität zwischen der Phase L1 und L3 zu L2. Die Geometrie des Kabels betrachtend, sollte die Kapazität, abhängig von dem Leiterabstand, zwischen den Phasen L1-PE und L1-L2 wegen der direkt benachbarten Lage nebeneinander einen höheren Wert aufweisen als die Kapazität zwischen den Phasen L1 und L3, welche sich gegenüberliegen.

Zur Verdeutlichung der Verteilung der Leiterkapazitäten ist in der folgenden Tabelle 3.43 der Median, der Mittelwert, das Maximum, das Minimum und die Standardabweichung der Messreihen der drei Leiterkapazitäten bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz dargelegt.

	L1-PE	L1-L2	L1-L3
Median	34,2 nF	34,7 nF	34,2 nF
Mittelwert	34,3 nF	35,7 nF	34,3 nF
Minimum	30 nF	32 nF	31,71 nF
Maximum	38 nF	38 nF	37,7 nF
Standardabweichung	1,6 nF	1,5 nF	1,6 nF

Tabelle 3.43.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE - Statistische Auswertung der Leiterkapazitäten L1-PE, L1-L2, L1-L3 bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz.

Quelle: Eigene Darstellung.

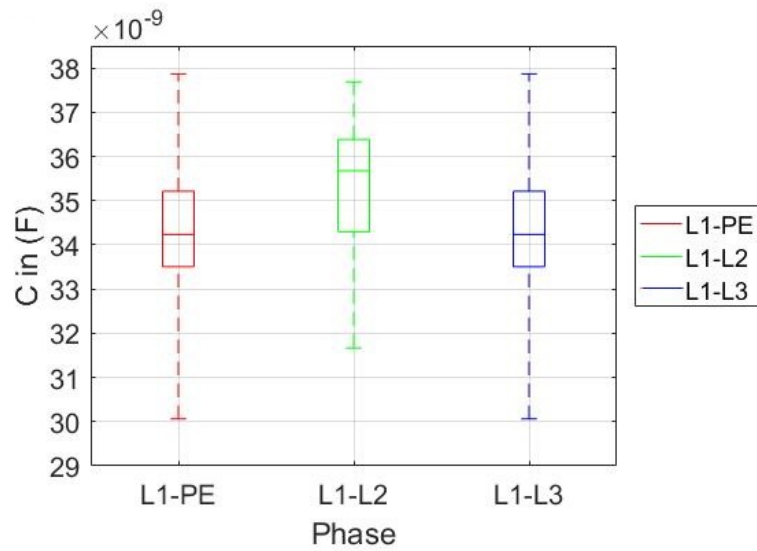


Abbildung 3.26.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE - Verteilung der Leiterkapazitäten L1-PE, L1-L2 und L1-L3 bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz.
Quelle: Eigene Darstellung.

Mit der abgeschlossenen statistischen Betrachtung der Leiterkapazitäten wird nun auch für die Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE die Leiterkapazität der Phase L1-L2 auf eine Frequenzabhängigkeit untersucht. In der Abbildung 3.27 ist die Leiterkapazität über die farblich gekennzeichneten Frequenzpunkte aufgetragen. In der Abbildung ist eine deutliche Abnahme der Leiterkapazität um 88 % von 35.2 nF bei 50 Hz bis auf 4.3 nF bei 400 Hz zu erkennen. Dies wird in der Tabelle 3.44 nochmals verdeutlicht.

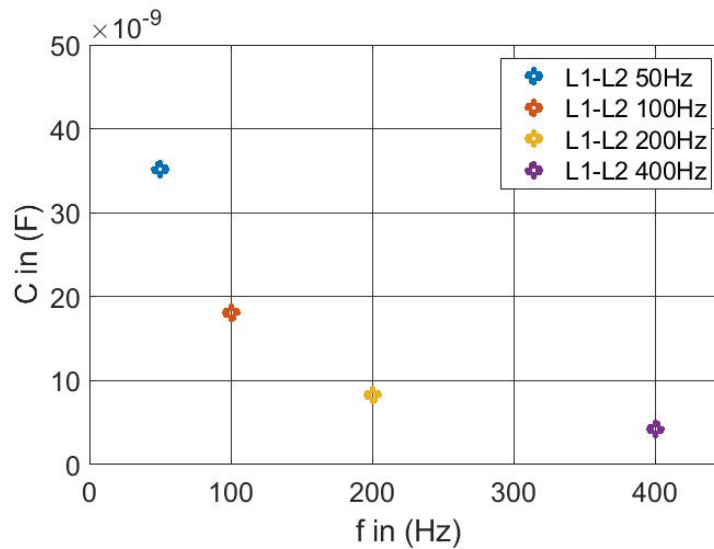


Abbildung 3.27.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität.

Quelle: Eigene Darstellung.

Frequenz f	Leiterkapazität C
50 Hz	$\bar{C} = 35,3 \text{ nF}$
100 Hz	$\bar{C} = 18,4 \text{ nF}$
200 Hz	$\bar{C} = 8 \text{ nF}$
400 Hz	$\bar{C} = 4,2 \text{ nF}$

Tabelle 3.44.: Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE Phase L1-L2 - Frequenzabhängige Bestimmung der Leiterkapazität.

Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.3.4. Vergleich NAYY-J 4x35 mm² - Leitungsnachbildung Typ C

Im Anschluss an die Charakterisierung des Übertragungsverhaltens und der Bestimmung der Leitungsparameter der Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE, wird diese mit der Charakteristik der Leitungsnachbildung des Typs C verglichen. Die Leitungsnachbildung des Typs C repliziert eine NAYY 4x35mm² Leitung mit einer Länge von 50 m. Zum Zwecke des Vergleichs der Leitungsparameter, müssen die zuvor berechneten auf eine Länge von 20 m bezogenen Leitungsparameter auf den Längenbezug von 50 m transformiert werden. Da es sich bei den bestimmten Leitungsparametern um Längen bezogene Werte handelt, können diese mit dem Verhältnis $\frac{l}{\Delta l}$ verrechnet werden. Dies ergibt mit:

$$l = 20\text{m}$$

$$\Delta l = 50\text{m}$$

Einen Faktor von $\frac{l}{\Delta l} = 2,5$ zur Anpassung der Leitungsparameter auf 50 m.

Betrachtet werden im folgenden die Leitungsparameter der Längsimpedanz der Phase L1 und der Queradmittanz zwischen der Phase L1 und L2 bei 50 Hz, entnommen aus den Tabellen 3.37, 3.38 und 3.43.

Die Umrechnung auf eine Leitungslänge von 50 m ergibt sich daraus zu:

$$\begin{aligned} R_{50m} &= R_{20m} \cdot \frac{l}{\Delta l} & (3.4) \\ &= 16,5 \text{ m}\Omega \cdot 2,5 = 41,25 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{50m} &= L_{20m} \cdot \frac{l}{\Delta l} & (3.5) \\ &= 7,7 \text{ }\mu\text{H} \cdot 2,5 = 19,25 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{50m} &= C_{20m} \cdot \frac{l}{\Delta l} & (3.6) \\ &= 35,7 \text{ nF} \cdot 2,5 = 89,25 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

Der Vergleich zu der Längsimpedanz der Phase L1 und der Queradmittanz zwischen der Phase L1 und L2 der Leitungsnachbildung Typ C bei 50 Hz ist in der folgenden Tabelle 3.45 dargestellt. Die Werte der Leitungsparameter der Leitungsnachbildung Typ C sind aus der Tabelle 3.15, 3.16 und 3.35 entnommen.

Leistungsparameter	NAYY-J 4x35 mm ² RE	Leitungsnachbildung Typ C
Leiterwiderstand R	41,25 mΩ	24,34 mΩ
Leiterinduktivität L	19,25 μH	23,47 μH
Leiterkapazität C	89,25 nF	10,6 nF

Tabelle 3.45.: Vergleich der Leistungsparameter der Leitungsnachbildung Typ C mit der Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE.

Quelle: Eigene Darstellung.

Die Tabelle 3.45 zeigt eine deutliche Differenz der Leistungsparameter der NAYY-J 4x35 mm² RE Leitung zu der Leitungsnachbildung des Typs C. Die Abweichung des Leiterwiderstands der Leitungsnachbildung zu der realen Leitung beträgt 41 %, die der Leiterinduktivität –22 % und die Abweichung der Leiterkapazität 88 %. Diese Untersuchung bezieht nur eine Phase der Leitung, beziehungsweise der Leitungsnachbildung ein. Allerdings ist auf Grund der zuvor bestimmten Leitersymmetrie nicht mit einem stark abweichenden Ergebnis im Falle der Betrachtung anderen Phasen zu rechnen. Eine so hohe Diskrepanz bei den Leistungsparametern wird vermutlich eine Auswirkung auf das Übertragungs- und Frequenzverhalten haben und sollte weitergehend untersucht werden.

4. Zusammenfassung & Fazit

Das Ziel dieser Abschlussarbeit war die Charakterisierung von Leitungsnachbildungen hinsichtlich der Bestimmung der Leitungsparameter, sowie deren Untersuchung auf eine Frequenz- und Stromabhängigkeit. Mit den drei Typen der Leitungsnachbildungen A, B und C lassen sich Leitungen unterschiedlichen Typs, Querschnitts und Längen in der Mittel- und Niederspannungsebene in einer kompakten Form replizieren. Die Modellierung der Leitungen besteht aus der nach dem vereinfachten π - Ersatzschaltbild aufgebauten Verschaltung eines Ohmschen Widerstandes, einer Induktivität und einer Kapazität.

Die zur Ermittlung der frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften der Leitungsnachbildungen gemessene Frequenzganganalyse zeigt eine deutliche Abweichung zu den berechneten Frequenzgängen mit den statischen Werten der Leitungsparameter des Herstellers auf. Der gemessene Frequenzgang des Typs A weist eine Abweichung von 17 % im Punkt der Resonanzfrequenz und -64 % im Betrag der Amplitudenverstärkung auf. Eine noch signifikantere Abweichung von bis zu 40 % bei der Resonanzfrequenz und -80 % im Betrag der Amplitudenverstärkung ist bei Typ B zu erkennen. Dem Verhältnis gegenüber steht bei der Betrachtung des Typs C eine relativ geringe Abweichung der Resonanzfrequenz von 2,5 % und der Amplitudenverstärkung von -28 %.

Diese Abweichungen stehen mit den parasitären Frequenzeigenschaften des Leiterwiderstands und der Leiterinduktivität in Zusammenhang.

Besonders hervorgehoben wird dieses Frequenzverhalten der Leitungsparameter bei der frequenzabhängigen dreiphasigen Bestimmung der Längsimpedanzen. Die Ergebnisse zeigen bei einer Erhöhung der Frequenz von 50 Hz auf 400 Hz einen Anstieg des Leiterwiderstands von bis zu 49 % bei Typ A und B und lediglich 5 % bei Typ C. Gleichzeitig verringert sich die Leiterinduktivität der Typen A und B um bis zu 5 % und die des Typs C um 3 %.

Entgegen der Annahme des Skin Effekts kann die Erhöhung des Leiterwiderstands, wie in Abschnitt 3.2.1.1 dargelegt, nicht mit der verringerten Leitschicht-Eindringtiefe begründet werden.

Der Grund für die Abweichung des gemessenen zum berechneten Frequenzgang findet sich hingegen im Frequenzverhalten der Längsimpedanz wieder. Die Erhöhung des Leiterwiderstands mit steigender Frequenz verringert die Amplitudenverstärkung im Resonanzpunkt. Gleichzeitig verschiebt sich der Resonanzpunkt durch die Verringerung der Leiterinduktivität in den höheren Frequenzbereich.

Ein weiterer Aspekt der drei- und einphasigen Bestimmung der Längsimpedanz und Queradmittanz ist die Schlussfolgerung auf eine symmetrische Verteilung der Leitungsparameter zwischen den einzelnen Phasen, sowie der Übereinstimmung mit denen vom Hersteller der Leitungsnachbildungen angegebenen Sollwerten.

Der Typ B weist mit einer Differenz der Längsimpedanz von maximal 3 % und der Queradmittanz von 4 % eine sehr homogene Verteilung zwischen den Phasen auf. Ebenfalls der Typ C zeigt mit einer Abweichung der Längsimpedanz von maximal 6 % und der Queradmittanz von weniger als 1 % eine hohe Symmetrie der Phasen zueinander auf. Der Typ A allerdings besitzt mit einer Abweichung der Längsimpedanz von bis zu 23 % eine hohe Asymmetrie der Phasen zueinander.

Die Betrachtung der Abweichungen der Leitungsparameter vom angegebenen Sollwert verdeutlicht eine hohe Differenz der Längsimpedanzen der Typen A und B. Bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz beträgt diese bis zu 19 % im Fall A und 17 % im Fall B. Der Typ C liegt mit einer maximalen Abweichung von 11 % nah am Toleranzbereich von 10 %.

Die Queradmittanzen des Typs A hingegen befinden sich alle innerhalb des Toleranzbereichs. Der Typ C liegt mit der Abweichung einzelner Leiterkapazitäten von bis zu 12 % teilweise außerhalb des Toleranzbereichs. Im Falle des Typs B besteht mit einer Abweichung von bis zu 29 % eine signifikante Abweichung der Queradmittanz zum angegebenen Sollwert.

Die erfolgreiche Bestimmung der Leitungsparameter und die Charakterisierung des Frequenzverhaltens sind ein grundlegender Aspekt für den zukünftigen Vergleich der Leitungsnachbildungen mit realen Leitungen.

Hinsichtlich des stromabhängigen Verhaltens lässt sich bei keinem Typ der Leitungsnachbildungen das Auftreten von Sättigungserscheinungen in Form einer Abnahme der Leiterinduktivität erkennen. Dies kann jedoch nicht auf den maximalen Bemessungsstrom von 75 A der Leitungsnachbildungen bezogen werden, da lediglich ein Strombereich von 65 A untersucht werden konnte.

Abschließend konnte im Vergleich der Leitungsnachbildung Typ C mit der replizierten Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE eine sehr hohe Abweichung der Längsimpedanz mit einer Differenz von bis zu 41 % sowie der Queradmittanz mit einer Differenz von bis zu 88 % festgestellt werden. Diese Abweichung ist ein relevanter Aspekt in der Leitungsmodellierung und sollte bezüglich des Frequenzverhaltens weitergehend untersucht werden.

5. Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse werfen neue Forschungsfragen auf, an welche sich zukünftige Untersuchungen anschließen könnten.

Beginnend mit der auftretenden Frequenzabhängigkeit des Leiterwiderstands wäre hier wegen der nicht zu begründenden Widerstandserhöhung mittels des Skin-Effekts eine weitere Untersuchung notwendig. Dabei stellt sich zudem die Frage nach der unterschiedlichen Prägnanz der Frequenzabhängigkeit der verschiedenen Leitungsnachbildungen.

Mit einer mathematischen Beschreibung des frequenzabhängigen Verhaltens könnte dieses in einer Modellierung des Übertragungsverhaltens einbezogen und unter der Berücksichtigung eines zu untersuchenden Temperaturverhaltens ein vollständiges Leitungsmodell zur Übertragungssimulation erstellt werden. Anhand dessen ließen sich diverse Netzstrukturen, sowie Betrieb- und Belastungsarten untersuchen. Eine Modellierung von unterschiedlichen Netzstrukturen erfordert zudem eine Untersuchung des Übertragungsverhaltens verketteter Leitungsnachbildungen.

Im Hinblick auf eine umfassende Untersuchung des stromabhängigen Verhaltens sollten die Leitungsnachbildungen zur Ermittlung von möglichen Sättigungserscheinungen im vollen Betriebsstrombereich von 75 A und weiterführend in einem Überstrombereich untersucht werden.

In Bezug auf eine abschließende Bewertung der Realitätsnähe der eingesetzten Leitungsnachbildungen wäre eine Vermessung und Untersuchung der weiteren beiden replizierten Leitungstypen NAYY 4x240 mm² und N2XSEY 20 kV 3x240 mm² notwendig. Bekräftigt wird diese weitere Untersuchung mit der hohen Abweichung der Leitungsparameter der Leitungsnachbildung Typ C zur replizierten Leitung NAYY-J 4x35 mm² RE.

Literaturverzeichnis

Boekhoff, H. (2018). *Bedienungsanleitung Netznachbildungen: Zur Modellierung typischer Leitungsstrukturen im Mittel- und Niederspannungsnetz* [PDF] (S. 4-6, S. 9-10, S. 14-25). Jemgum: Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH.

Bosse, G., Glaab, A. (1996). *Grundlagen der Elektrotechnik 3: Wechselstromlehre, Vierpol- und Leitungstheorie* (3. Auflage). Düsseldorf: VDI-Verlag.

Buchholz, B. M., Styczynski, Z. (2019). *Smart Grids: Grundlagen und Technologien der elektrischen Energienetze der Zukunft* (2.Auflage). Berlin: VDE-Verlag.

Dewesoft GmbH (2019). *SIRIUS Technical Reference Manual* [PDF] (Version 1.5.5) (S. 128-129). Abgerufen am 22. Februar 2020, von https://d36j349d8rqm96.cloudfront.net/3/6/SIRIUS_technical_reference_manual_EN.pdf

Büttner, W. E. (2009). *Grundlagen der Elektrotechnik 2* (2.Auflage). München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.

FRIZLEN GMBH U. CO KG (o. D.). *Last- und Prüf Widerstände - Belastungswiderstandsgeräte bis 50 kW, einstellbar, für Wechsel- bzw. Drehspannung (230/400V)* [PDF] () Gutfleisch, F. (2016). *Vorlesung Elektrotechnik 3*. Esslingen: Hochschule Esslingen.

Gutfleisch, F., Krichel, W., Lehner, W. D., Schmidt, G., Würslin, R. (2016). *Vorlesung Elektrotechnik 2*. Esslingen: Hochschule Esslingen.

Marti, O. (2002-2017). *Vierpole und Vierpoltheorie*. Abgerufen am 20. Februar 2020, von http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/physikalischeelektronik/phys_elektr/phys_elektrse5.html

Mietke, D. (o. D.). *Leitungen und Ihre Eigenschaften*. Abgerufen am 07. Januar 2020, von <https://elektroniktutor.de/elektrophysik/leitung.html>

Omicron, Lab. (2019). *Bode 100: User Manual* [PDF] (S. 1, S. 12-15, S. 18, S. 50) (Version 8). Abgerufen am 20. Februar 2020, von <https://www.omicron-lab.com/products/vector-network-analysis/bode-100/technical-data/>

Skin Effekt (o. D.). Abgerufen am 20. Februar 2020, von <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Skin-Effekt>

Regatron AG (2019). *TC.ACS.50.528.4WR.S.LC* [PDF] (S. 2-4). Abgerufen am 22. Februar 2020, von https://www.regatron.com/assets/resources/Documents/Technical-Datasheets/TC.ACS/2210_TC.ACS.50.528.4WR.S.LC_E_2019-09-24.pdf

Anhang

A. Dokumentation Messtechnik

Bode-100 Netzwerkanalysator




Bode 100

User Manual



4 Technical data

 In this section you can find the most important technical data for the *Bode 100 Revision 2*. Technical data can change without notice.

You can download a detailed technical data sheet for *Bode 100* from the OMICRON Lab website www.omicron-lab.com → Bode 100 → Technical Data

4.1 Absolute maximum ratings

NOTICE

Exceeding the absolute maximum ratings listed below might result in a permanent damage of the device.
Please take special care when using external passive probes (see: [9.9 Using probes](#) on page 129)

Table 4-1: Absolute maximum ratings

Characteristic	Absolute Maximum Rating
DC Power Input	
DC supply voltage	+28 V
Max. DC supply reverse voltage	-28 V
INPUT CH 1, INPUT CH 2 connectors (high Z input impedance selected)	
Maximum DC input signal	50 V
Maximum AC input signal	1 Hz...1 MHz: 50 Vrms 1 MHz...2 MHz: 30 Vrms 2 MHz...5 MHz: 15 Vrms 5 MHz...10 MHz: 10 Vrms 10 MHz ... 50 MHz: 7 Vrms
INPUT CH 1, INPUT CH 2 connectors (50 Ω input impedance selected)	
Maximum input power	1 W
Maximum input voltage	7 Vrms
OUTPUT connector	
Maximum reverse power	0.5 W
Maximum reverse voltage	3.5 Vrms

4.2 Bode 100 specifications


 In this section you can find the most important technical data for the *Bode 100*. This technical data is valid for *Bode 100 R2* (Hardware revision 2). To find out what hardware revision you use, please check [5.4 Hardware revisions](#) on page 19. Technical data can change without notice. You can download a detailed technical data sheet from the OMICRON Lab website www.omicron-lab.com → Bode 100 → Technical Data


Table 4-2: *Bode 100* specifications

Characteristic	Rating
OUTPUT	
Voltage range	-30 dBm...13 dBm 7 mVrms...1 Vrms at 50 Ω load 14 mVrms...2 Vrms at high impedance load
Frequency range	1 Hz...50 MHz
Wave form	sinusoidal
Source impedance	50 Ω
Connector	BNC
INPUT CH 1, INPUT CH 2	
AC measurement range	100 mVrms full scale with 0 dB input attenuation 10 Vrms full scale with 40 dB input attenuation
Frequency range	1 Hz...50 MHz
Input impedance	Selectable via software: <ul style="list-style-type: none"> • 50 Ω • 1 MΩ ±2% 40...55 pF (AC-coupled)
Connectors	BNC
Input attenuators	Selectable via software: 0 dB, 10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB
Receiver bandwidth	Selectable via software: 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz, 30 Hz, 100 Hz, 300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 5 kHz* *only <i>Bode 100 R2</i>
Dynamic Range	> 100 dB (10 Hz receiver bandwidth)
Gain Error	< 0.1 dB (calibrated)
Phase Error	< 0.5° (calibrated)
PC interface	
Universal serial bus	USB 2.0 or higher
Connector	USB type B socket

4.3 Power requirements

Table 4-3: Power requirements

Characteristic	Rating
DC input	
Supply voltage range	+9 ... 24 V
Minimum DC supply power	10 W
Connector	Coaxial power socket Inner Diameter: 2.5 mm Outer Diameter: 5.5 mm
Polarity	 Inner conductor: Positive voltage Outer conductor: Ground

 We strongly recommend you to use the power supply delivered with *Bode 100*.

4.4 System requirements

Table 4-4: System requirements

Characteristic	Minimum PC Configuration
Processor	Intel Core-I Dual-Core (or similar)
Memory (RAM)	2 GB, 4 GB recommended
Graphics resolution	Super VGA (1024x768) higher resolution recommended
Graphics card	DirectX 11 with Direct2D support
USB interface	USB 2.0 or higher
Operating System	Microsoft Windows 7 SP1 or higher
Software	Bode 100 Revision 2 requires Bode Analyzer Suite 3.00 or newer.

4.5 Environmental requirements

Table 4-5: Environmental requirements

Characteristic	Condition	Rating
Temperature	Storage	-35 ... +60 °C / -31...+140 °F
	Operating	+5 ... +40 °C / -41...+104 °F
	For specification	23 °C ±5 °C / 73 °F ±18 °F
Relative humidity	Storage	20 ... 90 %, non-condensing
	Operating	20 ... 80 %, non condensing

4.6 Mechanical data

Table 4-6: Mechanical data

Characteristic	Rating
Dimensions (w x h x d) without connectors	26 cm x 5 cm x 26.5 cm / 10.25 " x 2 " x 10.5 "
Weight	< 2 kg / 4.4 lbs

5.2 Block diagram

Bode 100 is a flexible device that features the following mayor building blocks:

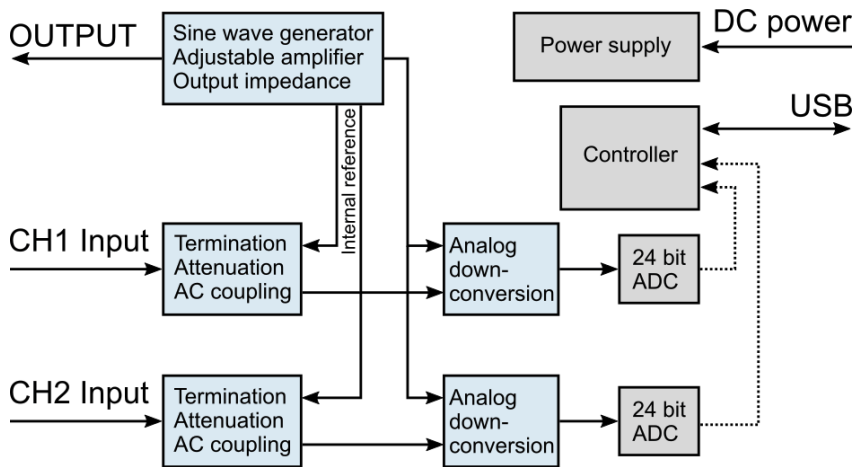


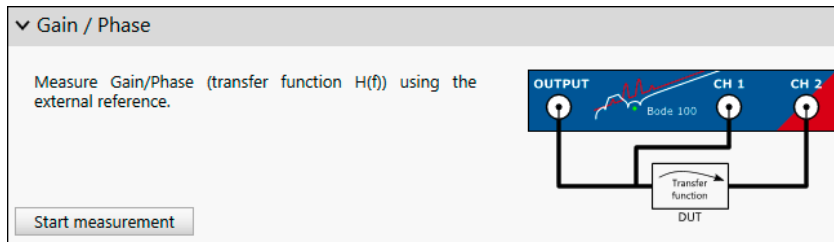
Figure 5-3: *Bode 100* block diagram

- Signal source:**
 The signal source of *Bode 100* consists of an adjustable DDS sine-wave generator and adjustable amplifiers. The output impedance of *Bode 100* is 50 Ω .
 Internal reference connections allow to directly connect the source signal to the receivers.
- Channel inputs:**
 Each of the *Bode 100* input features adjustable attenuators for best signal / noise ratio and software-switchable termination. Channel termination can be either 50 Ω or 1 M Ω . Without 50 Ω terminations the inputs are AC coupled, representing a very high impedance at DC.
- Down conversion & sampling:**
 The input signal is down-converted to an intermediate frequency and sampled by a 24bit ADC.
 The sampled data is sent to the PC and evaluated by the *Bode Analyzer Suite*.

More details on the hardware configuration can be found in [6.5 Hardware setup](#) on page 35.

7.3.2 Gain / Phase

The Gain / Phase measurement mode is designed to measure the transfer function of a DUT using the external reference connection. This means that both Channel 1 and Channel 2 are active.



The Gain Measurement

Bode 100 measures

$$Gain = \frac{V_{CH2}}{V_{CH1}}$$

Gain therefore equals the transfer function of a 2-port DUT if Channel 1 is connected to the DUT input port and Channel 2 is connected to the DUT output port. The inputs Channel 1 and Channel 2 are set to 1 MΩ by default.

Details on the gain measurement can be found in [7.1 Gain measurement introduction](#) on page 38.

Calibration

The Gain / Phase measurement mode does not require calibration to perform a measurement. However, to remove the influence of probes and cables Gain (Thru) calibration is recommended. For more details regarding the Gain calibration please refer to [8 Calibration](#) on page 73.

Typical applications

Typical applications for the Gain / Phase measurement mode are:

- Measuring the transfer function of filters or other circuits.
- Measuring in-circuit transfer functions using high-impedance probes.
- Measuring the transfer function of amplifiers etc.
- Measuring loop stability of power supplies.

SIRIUS Leistungsanalysator

SIRIUS®

DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft® DEWESoft®

5.19 HS-HV

5.19.1 HS-HVv2: Specifications

Inputs		Voltage	
ADC Type	16bit SAR with 100kHz 5 th order analogue AAF filter or bypass (5.2.3 SIRIUS®-HS series: High speed and bandwidth page 66)		
Sampling Rate	Simultaneous 1MS/sec		
Analogue bandwidth	2 MHz		
Voltage ranges		±1600 V, ±800 V, ±400 V, ±200 V, ±100 V, ±50 V, ±20 V	
Input Accuracy ²¹	Signal frequency	Accuracy	
	DC	±0.03% of reading ±0.02% of range ±0.04V	
	Up to 1kHz	±0.03% of reading ±0.02% of range	
	Up to 10 kHz	±0.1% of reading ±0.05% of range	
	Up to 100 kHz	±2% of reading ±0.1% of range	
Up to 1000 kHz	±5% of reading ±0.5% of range		
Typ. SNR	1600 Volt	400 Volt	100 Volt
BW: 2 MHz	83 dB	79 dB	71 dB
BW: 100 kHz	85 dB	85 dB	82 dB
BW: 10 kHz	100 dB	97 dB	90 dB
Typ. CMR @ 50Hz (1kHz)	85 dB @ 50 Hz; 75 dB @ 400 Hz; 50 dB @ 10 kHz		
Gain Drift	Typical 10 ppm/K, max. 40 ppm/K		
Offset Drift	Typical 1 mV/K + 1 ppm of range/K, max 2 mV/K + 5 ppm of range/K		
Gain Linearity	<0.02%		
Channel Cross talk	115 dB @ 50Hz; 90 dB @ 1kHz		
Input Coupling	DC		
Input Impedance	10 MΩ 2pF		
Protection class	CAT III 600 V; CAT II 1000 V		
Over-voltage Protection	In+ to In-: 1.8 kV _{RMS} , Inx to GND: 1.4kV _{RMS}		
Digital low pass Filter			
Filter characteristic	Butterworth or Bessel		
Filter order	2 nd , 4 th , 6 th or 8 th		
Ratio Sample rate to Filter Freq.	From 2 to 1000		
Topology	Cascaded IIR Filter (up to 4 sections)		
Additional Specifications			
Input connector	Banana		
TEDS support	NA		

Table 36: SIRIUS-HS-HV specifications

²¹ 50 V Range (1.2 MHz) and 20 V range (700 kHz) have limited bandwidth

measurement innovation measurement innovation measurement innovation measurement innovation measurement innovation measurement innovation measurement innovation measurement innovation

5.19.2 HS-HV Banana

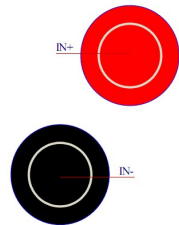


Illustration 167: SIRIUS-HS-HV pin-out Banana plug



Illustration 168: SIRIUS 8xHS-HV-BAN

5.19.2.1 HS-HV: Voltage

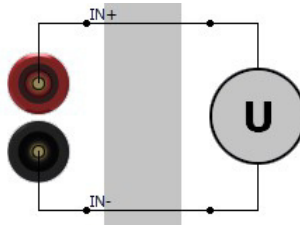


Illustration 169: HS-HV Voltage

B. Dokumentation Leitungsnachbildungen

2 ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN

Netznachbildung Modul A

Betriebsspannung	400 / 230	V AC
Schaltung 4 Stränge	L1/ L2/ L3/ N	
Nennleistung je Strang	35	W
Nennstrom je Strang	75	A
Widerstandswert je Strang	6,25	mΩ ±10%
Induktivität* je Strang	31	μH ±10%
Kapazität je Strang	15,5	nF ±10%
Einschaltdauer	100	%
Kühlung	**	
Einsatztemperatur	-10°C bis +40°C	

*Die Drossel bildet auch den Ohm'schen Anteil aus.

Netznachbildung Modul B

Betriebsspannung	400	V AC
Schaltung 3 Stränge	L1/ L2/ L3	
Nennleistung je Strang	248	W
Nennstrom je Strang	75	A
Drosselkernverluste je Strang, ca.	50	W
Widerstandswert je Strang	44	mΩ ±10%
Induktivität je Strang	400	μH ±10%
Kapazität je Strang	25	nF ±10%
Zuschaltbare Kapazität je Strang	161	nF ±10%
Einschaltdauer	100	%
Kühlung	**	
Einsatztemperatur	-10°C bis +40°C	

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

Netznachbildung Modul C

Betriebsspannung	400 / 230	V AC
Schaltung 4 Stränge	L1/ L2/ L3/ N	
Nennleistung je Strang	147	W
Nennstrom je Strang	75	A
Widerstandswert je Strang	26,2	mΩ ±10%
Induktivität je Strang	24	μH ±10%
Kapazität je Strang	9,4	nF ±10%
Einschaltdauer	100	%
Kühlung	**	
Einsatztemperatur	-10°C bis +40°C	

**

Zur Installation der RLC-Module sind Schränke oder Racks mit geeigneter Belüftung/ Klimatisierung von Wärsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH vorzusehen.

Die Eignung abweichender Schrank- bzw. Rackfabrikate ist zur Sicherstellung von Gewährleistungsansprüchen vorher mit der Wärsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH abzustimmen.

3 MECHANISCHE DATEN

Netznachbildung Modul A

Gehäusetyp	19" Einschub, 4HE
Schutzart	IP20
Gehäusematerial	Stahlblech verzinkt
Oberflächenbeschichtung	/
Abmessung BxTxH, ca.	480x500x180mm
Gewicht, ca.	16,5kg
Ausstattung Frontplatte:	
Lastanschlussklemmen/ Erdungsanschluss	Reihenklammern ZDU16 mit Zugfederanschluss; Klemmbarkeitsbereich: 1,5 – 25mm ²

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

Netznachbildung Modul B

Gehäusotyp	19" Einschub, 4HE
Schutzart	IP20
Gehäusematerial	Stahlblech verzinkt
Oberflächenbeschichtung	/
Abmessung BxTxH, ca.	480x500x180mm
Gewicht, ca.	32kg
Ausstattung Frontplatte:	
Lastanschlussklemmen/ Erdungsanschluss	Reihenklammern ZDU16 mit Zugfederanschluss; Klemmbarkeitsbereich: 1,5 – 25mm ²

Netznachbildung Modul C

Gehäusotyp	19" Einschub, 4HE
Schutzart	IP20
Gehäusematerial	Stahlblech verzinkt
Oberflächenbeschichtung	/
Abmessung BxTxH, ca.	480x500x180mm
Gewicht, ca.	20kg
Ausstattung Frontplatte:	
Lastanschlussklemmen/ Erdungsanschluss	Reihenklammern ZDU16 mit Zugfederanschluss; Klemmbarkeitsbereich: 1,5 – 25mm ²

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

6 ÜBERSICHT DER NETZNACHBILDUNGEN

Netznachbildung Nr.	Leitungsbezeichnung	Aderquerschnitt in mm ²	Aderzahl	Länge in m	Anzahl	Bemessungsstrom in A
1	NAYY	240	4	50	15	75
2	NAYY	240	4	300	2	75
3	N2XSEY 20kV	240	3 (inkl. Erdrückführung)	1000	3	75
4	N2XSEY 20kV	240	3 (inkl. Erdrückführung)	2000	3	75
5	NAYY	35	4	50	30	25
6	NAYY	35	4	50	10	75

Soll-Werte aus Datenblättern Kabelhersteller pro Phase/ pro Strang					
Viefaches RLC	R in mOhm	L in µH Einzelader	L in µH 3pol. Kabel	C in µF	P in W
15x 4x	6,25	31	18	0,0155	35
2x 4x	37,5	186	108	0,093	211
3x 3x	75,4	620	360	0,31	424
3x 3x	150,8	1240	720	0,62	848
30x 4x	26,2		24	0,008	147
10x 4x	26,2		24	0,008	147

Erforderliche Anzahl Module		
Typ "A"	Typ "B"	Typ "C"
15	0	0
2x6=12	0	0
3x5=15	3x1=3	0
3x3=9	3x3=9	0
0	0	30
0	0	10

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

Nenn-Gesamtwerte, Toleranzen +/-10% pro Phase/ pro Strang				
Vielfaches RLC	R in mOhm	L in µH	C in µF	P in W
15x 4x	6,25	31	0,0155	35
2x 4x	37,5	186	0,093	211
3x 3x	75,3	555	0,31	424
3x 3x	150,8	1293	0,61	848
30x 4x	26,2	24	0,0094	147
10x 4x	26,2	24	0,0094	147

Vorgehensweise:

Soll ein bestimmter Kabeltyp bzw. dessen Länge simuliert werden, muss bzw. müssen eines oder mehrere der 3 verfügbaren Module A, B oder C in entsprechender Anzahl aus der oben angegebenen Tabellen ausgewählt bzw. kombiniert werden.


Die ausgewählten Module werden in ein vor Ort vorhandenes 19" – Schranksystem installiert. Die Anordnung erfolgt übereinander.

Wurden mehrere Module ausgewählt, so müssen diese mit Hilfe von Kabelverbindungen über die frontseitig installierten Federzugklemmen elektrisch miteinander verbunden werden, so dass eine Reihenschaltung entsteht:

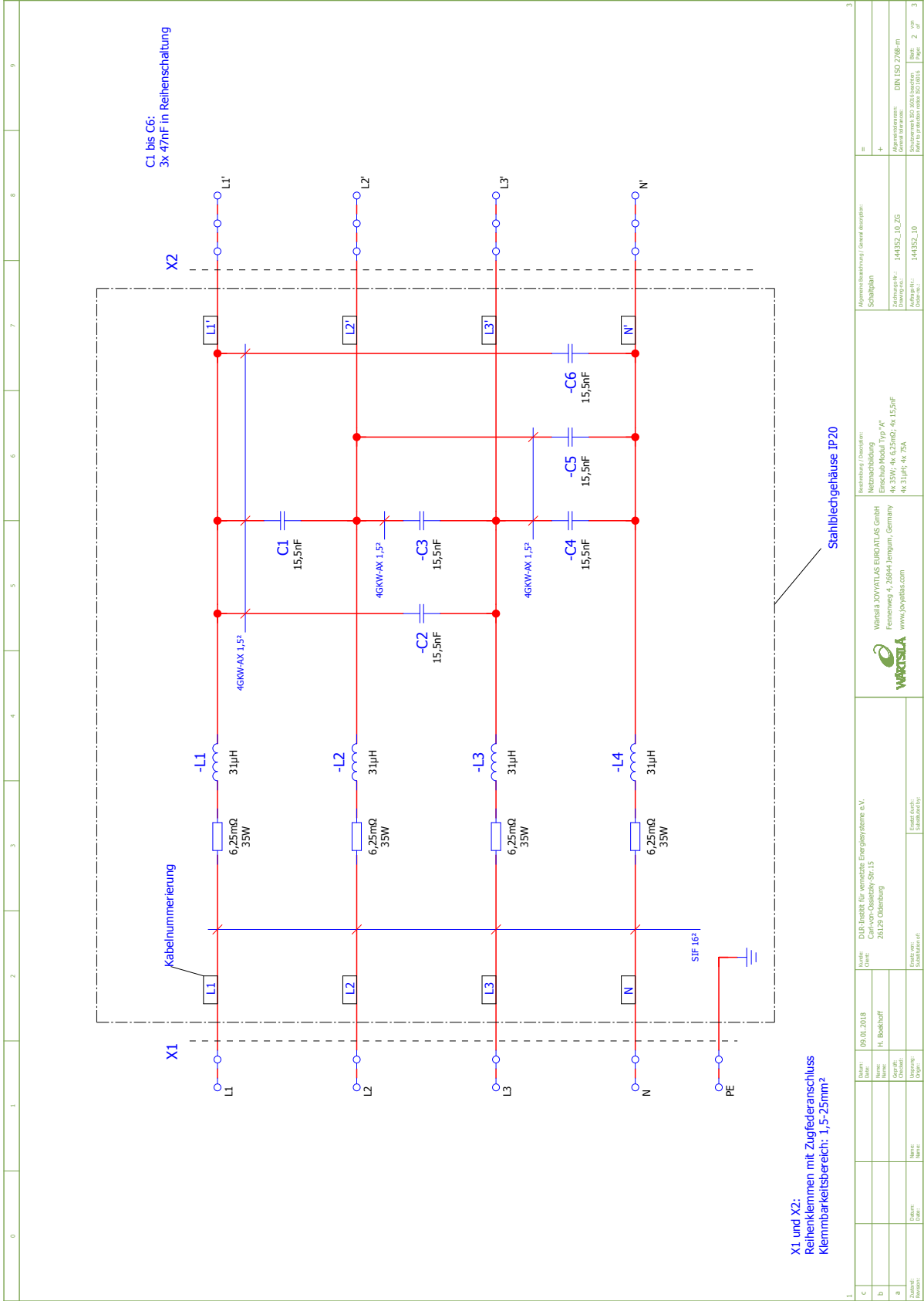
Verbindungen Modul ↔ Modul herstellen immer von Klemme X2 *Lastkabelanschluss AUSGANG* nach Klemme X1 *Lastkabelanschluss EINGANG*.

X2/L1' → X1/L1
X2/L2' → X1/L2
X2/L3' → X1/L3
X2/N' → X1/N
X1/PE → X1/PE

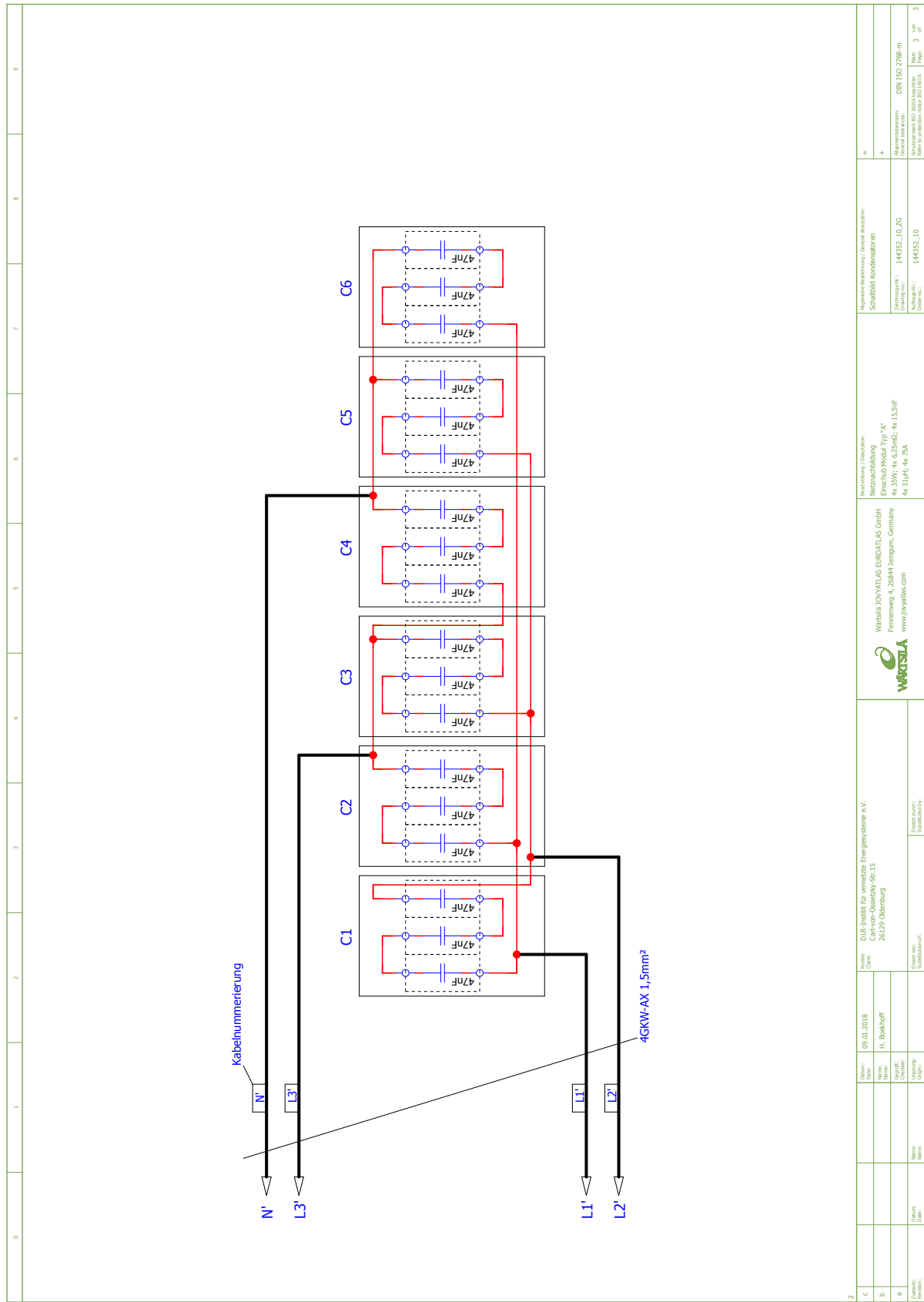
B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																												
F26_JOVY_A3_DE_EN																																																																					
 <p> WÄRTSILÄ Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.de </p>																																																																					
<p> Kunde: Client: DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V. Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg </p>																																																																					
<p> Beschreibung: Description: Netznachbildung Einschub Modul Typ "A" </p>																																																																					
<p> Auftrags-Nr.: Order-no.: 144352_10 Zeichnungs-Nr.: Drawing-no.: 144352_10_ZG Betriebsanleitung: Operating manual: 144352_de_BA </p> <p style="text-align: right;">Anzahl der Seiten: Number of pages: 3</p>																																																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">C</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;">09.01.2018</td> <td style="width: 10%;">DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V.</td> <td style="width: 10%;">Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH</td> <td style="width: 10%;">Algemeine Beschreibung / General description:</td> <td style="width: 10%;">=</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td>b</td> <td></td> <td>H. Bockhoff</td> <td>Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg</td> <td>Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.com</td> <td>Deckblatt / Cover Sheet</td> <td>+</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>B</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Zeichnungs-Nr. / Drawing no.:</td> <td></td> <td>144352_10_ZG</td> <td></td> <td>Administrations- / General information:</td> </tr> <tr> <td>Revisio- / Revision:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Order no.:</td> <td></td> <td>144352_10</td> <td></td> <td>Administrations- / General information:</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Refer to the revision table (ISO 15926)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Blatt: 1 von 3 Page: 1 of 3</td> </tr> </table>										C		09.01.2018	DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V.	Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH	Algemeine Beschreibung / General description:	=				b		H. Bockhoff	Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg	Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.com	Deckblatt / Cover Sheet	+				B					Zeichnungs-Nr. / Drawing no.:		144352_10_ZG		Administrations- / General information:	Revisio- / Revision:					Order no.:		144352_10		Administrations- / General information:										Refer to the revision table (ISO 15926)										Blatt: 1 von 3 Page: 1 of 3
C		09.01.2018	DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V.	Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH	Algemeine Beschreibung / General description:	=																																																															
b		H. Bockhoff	Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg	Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.com	Deckblatt / Cover Sheet	+																																																															
B					Zeichnungs-Nr. / Drawing no.:		144352_10_ZG		Administrations- / General information:																																																												
Revisio- / Revision:					Order no.:		144352_10		Administrations- / General information:																																																												
									Refer to the revision table (ISO 15926)																																																												
									Blatt: 1 von 3 Page: 1 of 3																																																												

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN



B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN




TC	Version:	09.01.2018	Name:	DLR-Partner für vernetzte Energiesysteme e.V.	Algemeinbezeichnung / General description: Schaltbild Kondensatoren	Zeichnungs-Nr.: 144352_ID_ZGS General drawing Referenz zur Projektion: siehe BGD 1013
	Date:	H. Bockhoff	Umsatz:	26129 Odenburg		
b	Name:		Grupp:		Beschreibung / description: Netzschubbildung Einbauschub Modul Typ "A" 4x 33V; 4x 6,25mF; 4x 1,52mF 4x 31µF; 4x 75A	Administration: General drawing Referenz zur Projektion: siehe BGD 1013
B	Grupp:		Umsatz:		Firmen-Logo: 	Zeichnungs-Nr.: 144352_ID General drawing Referenz zur Projektion: siehe BGD 1013
Revisi:	Umsatz:		Umsatz:			Blatt: 3
Revisi:	Umsatz:		Umsatz:			Blatt: 3

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

F26_JOVY_A3_DE_EN



WÄRTSILÄ

Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH
 Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany
www.jovyatlas.de

Kunde:
Client:

DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V.
 Carl-von-Ossietzky-Str.15
 26129 Oldenburg

Beschreibung:
Description:

Netznachbildung
 Einschub Modul Typ "B"

Auftrags-Nr.:
Order-no.:

144352_20

Zeichnungs-Nr.:
Drawing-no.:

144352_20_ZG

Betriebsanleitung:
Operating manual:

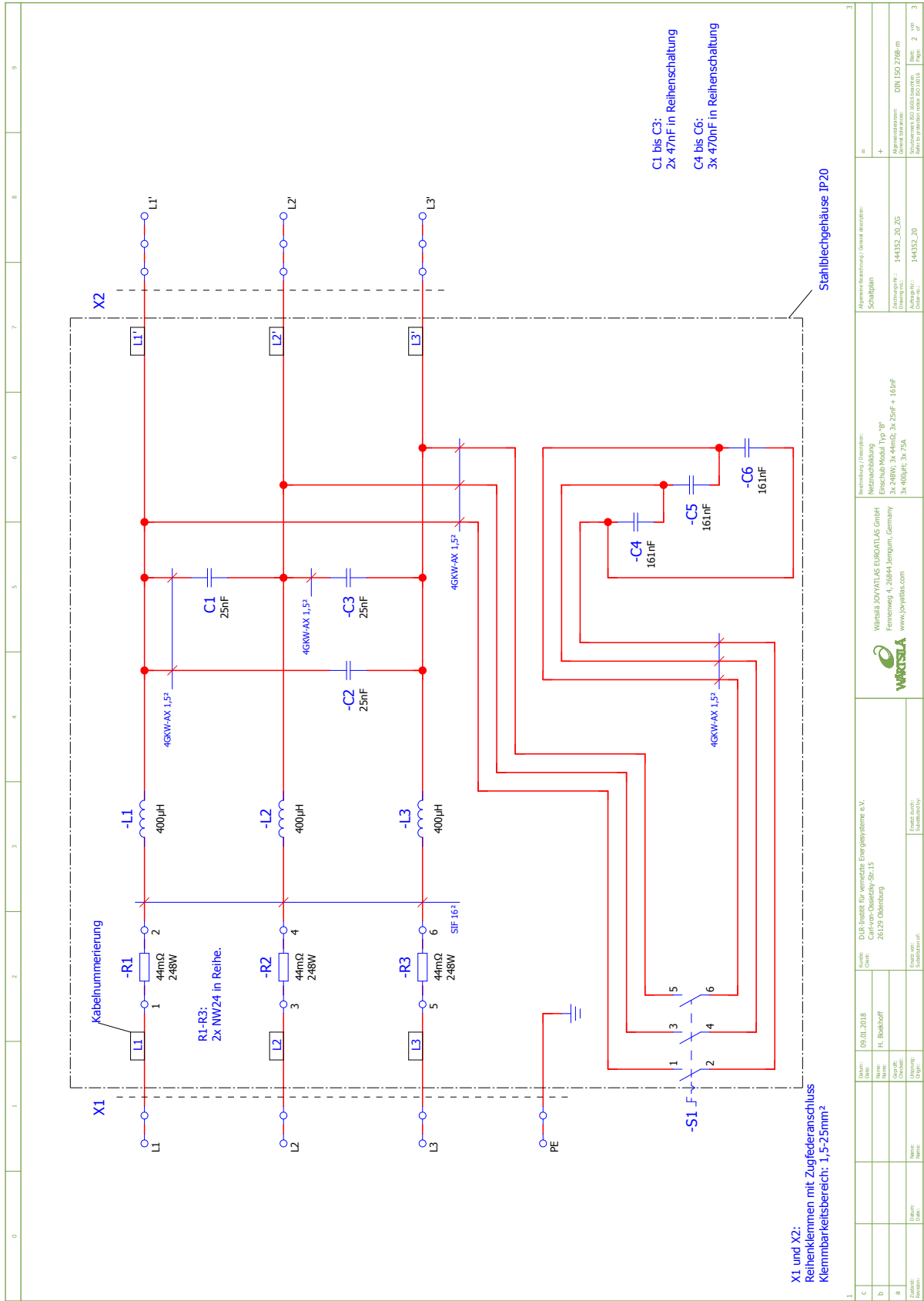
144352_de_BA

Anzahl der Seiten:
Number of pages:

3

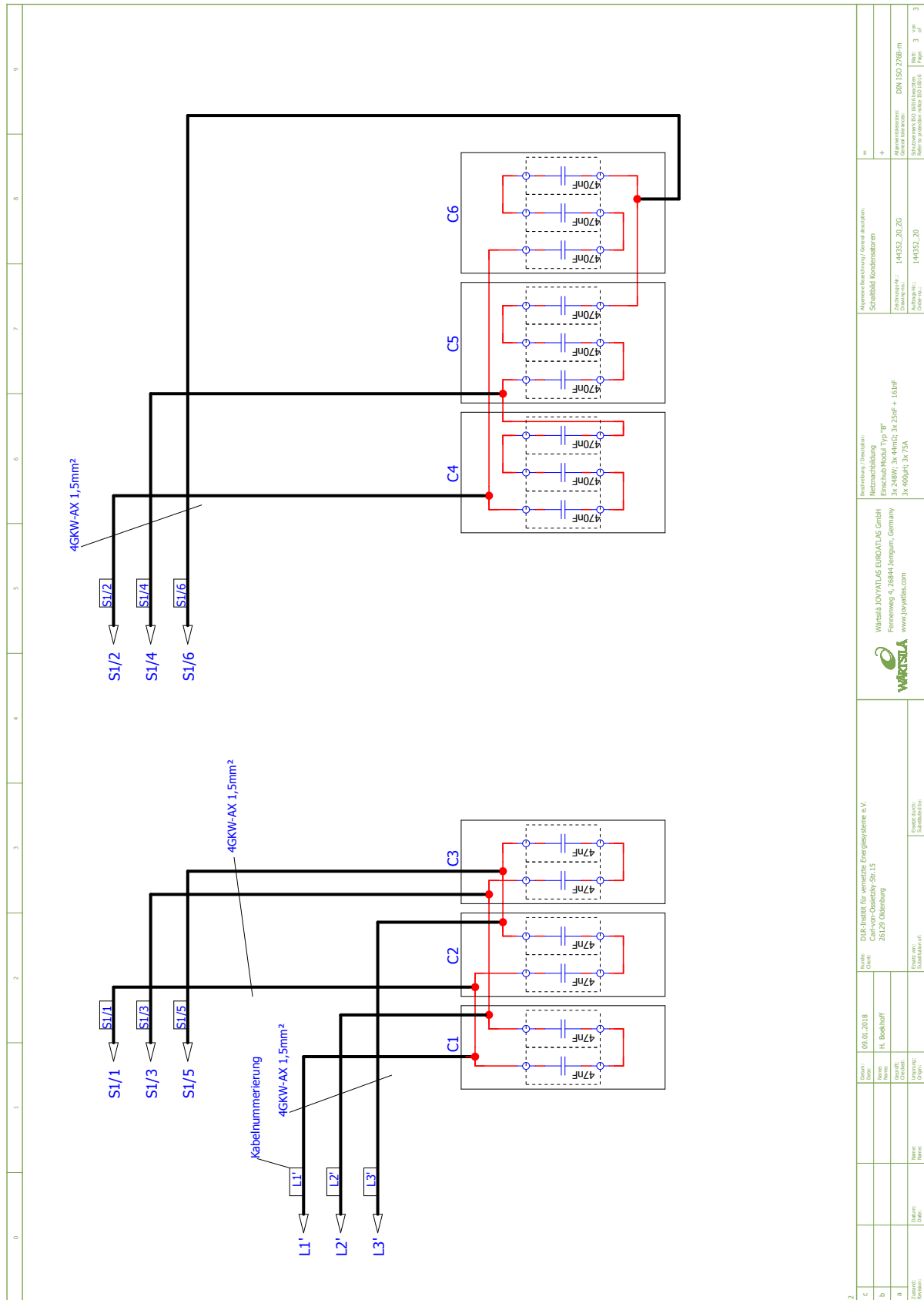
C	09.01.2018	Name: H. Bockhoff	Machen: DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V. Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg	Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.com	Algemeine Bezeichnung / General description: Deckblatt / Cover Sheet	=
b					Zeichnungs-Nr. / Drawing no.:	+
B					144352_20_ZG	
Revisions:					Administrations: General description: Refer to the revision table ISO 9001	
					144352_20	
						Blatt: 1 von 3 Page: 1 of 3

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN



1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<p>Technische Beschreibung (General description): Schaltplan</p> <p>Abmessungen (Dimensions): Zeichnungsart: 144352_2D_ZG General description: 144352_2D Drawing no.: 144352_2D</p> <p>Abmessungen (Dimensions): Zeichnungsart: 144352_2D_ZG General description: 144352_2D Drawing no.: 144352_2D</p> <p>Abmessungen (Dimensions): Zeichnungsart: 144352_2D_ZG General description: 144352_2D Drawing no.: 144352_2D</p> <p>Abmessungen (Dimensions): Zeichnungsart: 144352_2D_ZG General description: 144352_2D Drawing no.: 144352_2D</p>									


B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN



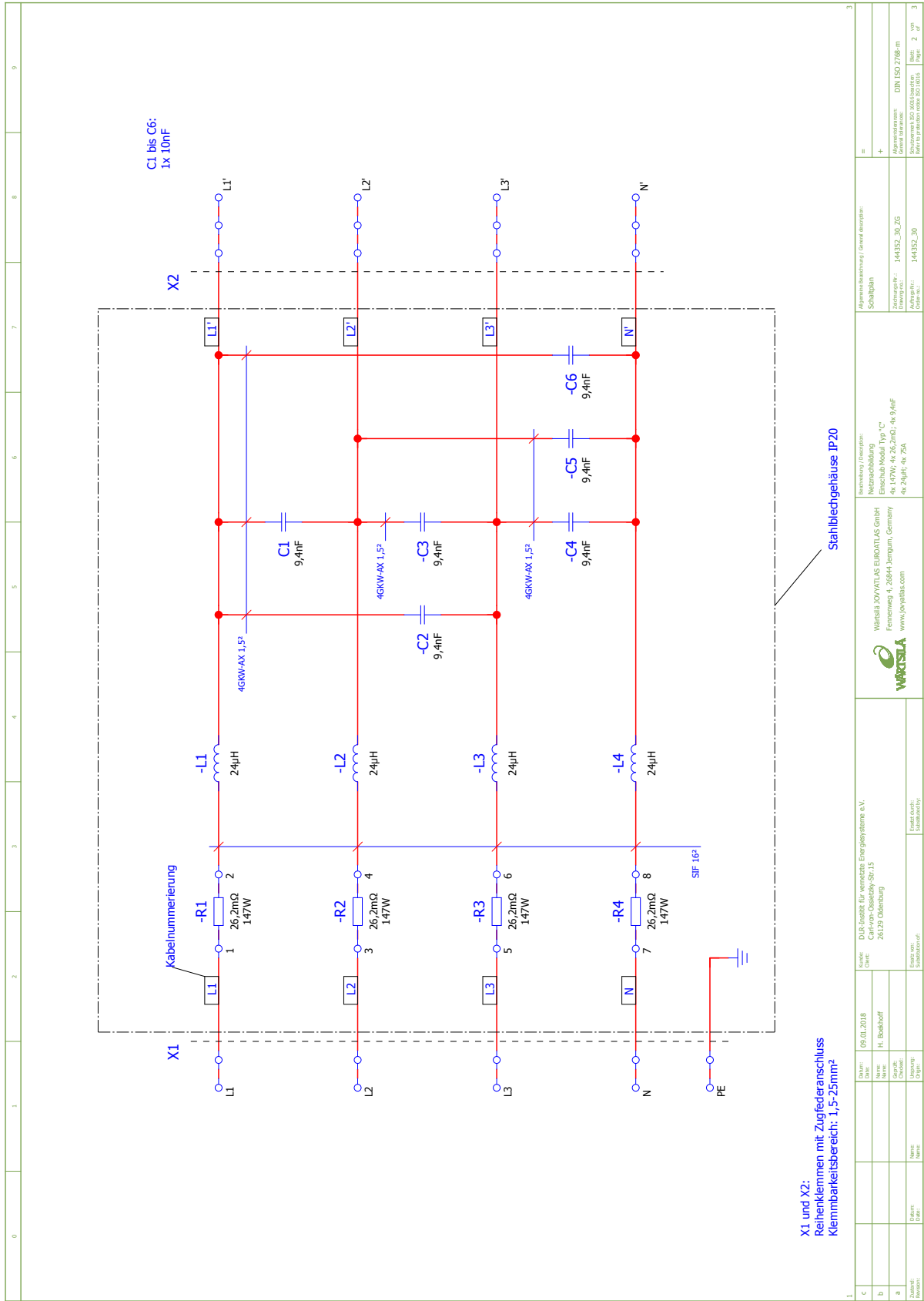
2

TC	09.01.2018	09.01.2018	09.01.2018	DLR Institut für vernetzte Energiesysteme e.V. Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg	Werkstatt Lernfabrik	144352_20	144352_20 ZGS	144352_20	3
b	H. Bockhoff	H. Bockhoff	H. Bockhoff						
a									
B									
Revisio	Revisio	Revisio	Revisio	Revisio	Revisio	Revisio	Revisio	Revisio	Revisio
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

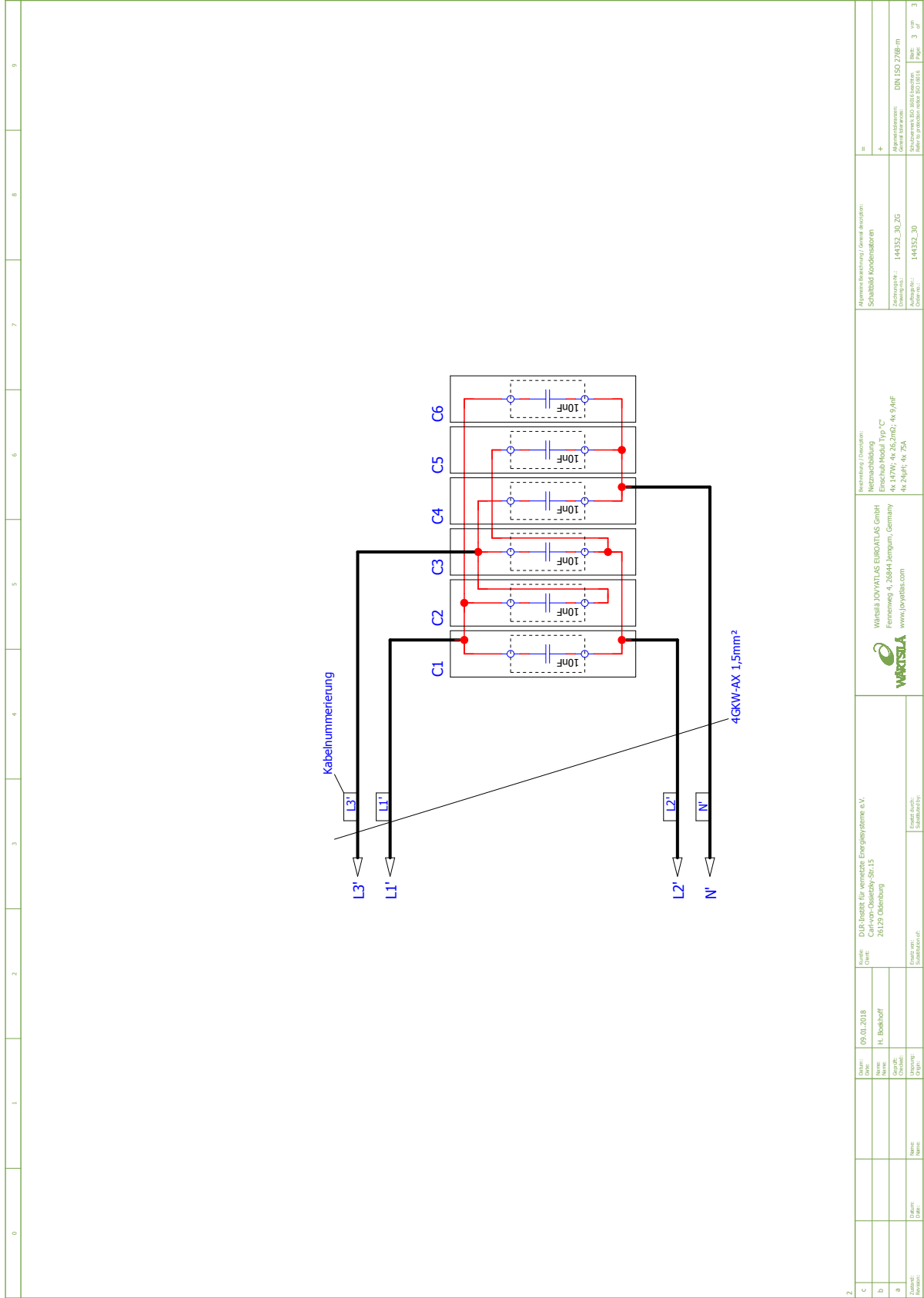
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																				
F26_JOVY_A3_DE_EN																																													
 <p> WÄRTSILÄ Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.de </p>																																													
<p> Kunde: Client: </p> <p> DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V. Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg </p>																																													
<p> Beschreibung: Description: </p> <p> Netznachbildung Einschub Modul Typ "C" </p>																																													
<p> Auftrags-Nr.: Order-no.: </p> <p> Zeichnungs-Nr.: Drawing-no.: </p> <p> Betriebsanleitung: Operating manual: </p> <p style="text-align: right;"> Anzahl der Seiten: Number of pages: </p> <p style="text-align: right;">3</p>																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">C</td> <td style="width: 15%;">09.01.2018</td> <td style="width: 15%;">DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V.</td> <td style="width: 15%;">Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH</td> <td style="width: 15%;">Algemeinbeschreibung / General description:</td> <td style="width: 15%;">=</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>H. Bockhoff</td> <td>Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg</td> <td>Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.com</td> <td>Deckblatt / Cover Sheet</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Zeichnungs-Nr. / Drawing no.:</td> <td>144352_30_ZG</td> </tr> <tr> <td>Revisio- n:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Administrations- General description</td> <td>DN ISO 2708-01</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Order no.:</td> <td>144352_30</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Blatt: 1 von 3 Page: 1 of 3</td> </tr> </table>										C	09.01.2018	DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V.	Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH	Algemeinbeschreibung / General description:	=	b	H. Bockhoff	Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg	Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.com	Deckblatt / Cover Sheet	+	B				Zeichnungs-Nr. / Drawing no.:	144352_30_ZG	Revisio- n:				Administrations- General description	DN ISO 2708-01					Order no.:	144352_30						Blatt: 1 von 3 Page: 1 of 3
C	09.01.2018	DLR-Institut für vernetzte Energiesysteme e.V.	Wärtsilä JOVYATLAS EUROATLAS GmbH	Algemeinbeschreibung / General description:	=																																								
b	H. Bockhoff	Carl-von-Ossietzky-Str.15 26129 Oldenburg	Fennenweg 4, 26844 Jemgum, Germany www.jovyatlas.com	Deckblatt / Cover Sheet	+																																								
B				Zeichnungs-Nr. / Drawing no.:	144352_30_ZG																																								
Revisio- n:				Administrations- General description	DN ISO 2708-01																																								
				Order no.:	144352_30																																								
					Blatt: 1 von 3 Page: 1 of 3																																								

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN



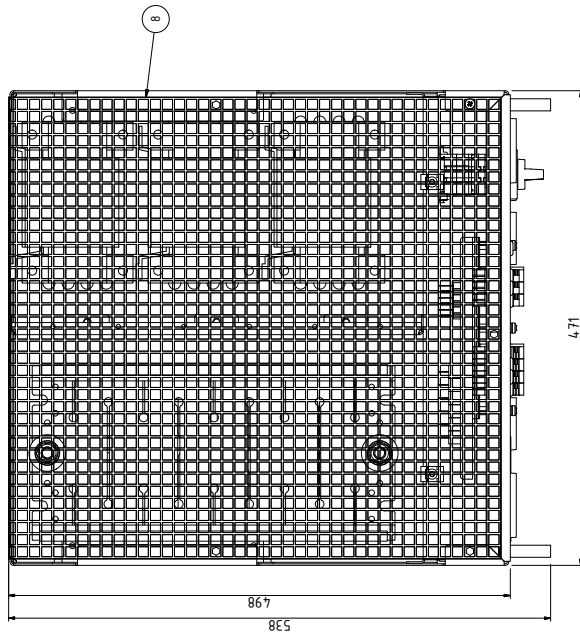
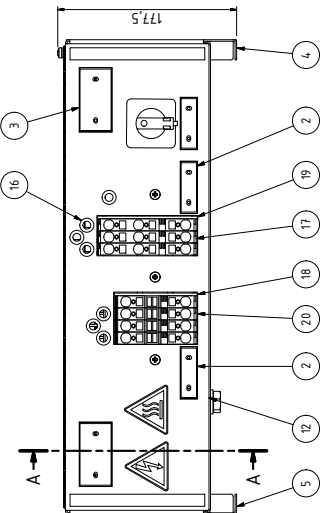
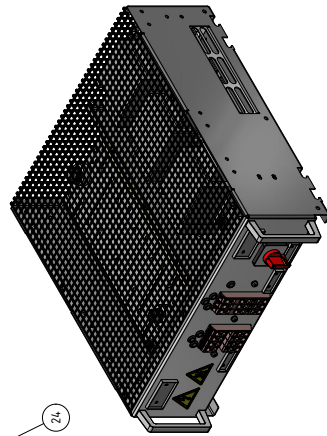
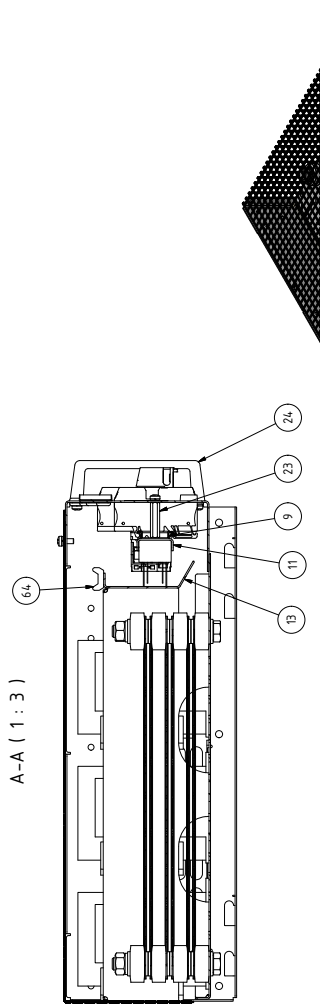
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TC	09.01.2018	Modell:	DUR-Bohrer für veredelte Energiesysteme e.V.		Werkstoff: Stahlblech		Leistung / Hersteller:		Algemeinbezeichnung / General description:	
b		Umsatz:	Carl-von-Ossietzky-Str.15		H. Beckhoff		Netznachbildung		Schaltplan	
B		Name:	26129 Odenburg				Einschubmodul Typ "C"		Zustand: neu	
Erstellt:		Geprüft:					4x 147W; 4x 26,2mΩ; 4x 9,4nF		Administrationsnr.: DN ISO 22868-01	
Revisiert:		Überprüft:					4x 24μH; 4x 75A		General description: 0104 Schaltplan	
		Geplant:					4x 24μH; 4x 75A		Order no.: 144352_3D	
		Umsatz:					Referenz: SIF 16P		Refer to previous issue ISO 22868-01	
		Umsatz:							Blatt: 2 von 3	
		Umsatz:							Seite: 2 von 3	

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

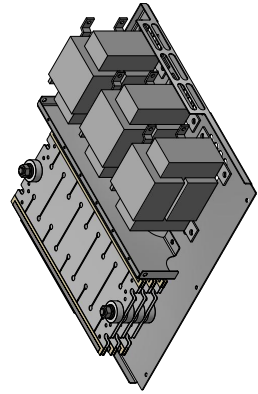


0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2									
TC	Modul:	DUR-Energie für vernetzte Energiesysteme e.V.							
b	Ursprung:	Carl-von-Ossietzky-Str.15							
B	Gezeichnet von:	H. Beckhoff							
Erschienen:	Gezeichnet am:								
Revisoren:	Gezeichnet in:								
			WAKSILA DOVATILAS EIBONATILAS GmbH Firmenweg 7, 26884 Jangum, Germany www.dovatilas.com						
		WAKSILA WAKSILA	Beschreibung (revisions): Netzschubdübel Ersatzteil Modul Typ "C" 4x 117W; 4x 26; 2mC; 4x 9; 4H 4x 24H; 4x 75A						
				Allgemeine Beschreibung (General description): Schaltbleib Kondensatoren					
				Zeichnungs-Nr.: 144352_3D_ZS Zeichnungs-Nr. (engl.): 144352_3D					
				Administrations-Nr.: General description: Refer to instruction manual IEO 0010		= + Administrations-Nr.: General description: Refer to instruction manual IEO 0010			
						Blatt: 3 von 3 Page: 3 of 3			

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN



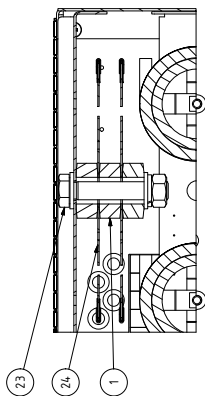
Widerstandsblock



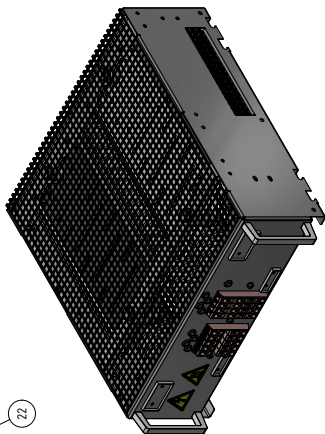
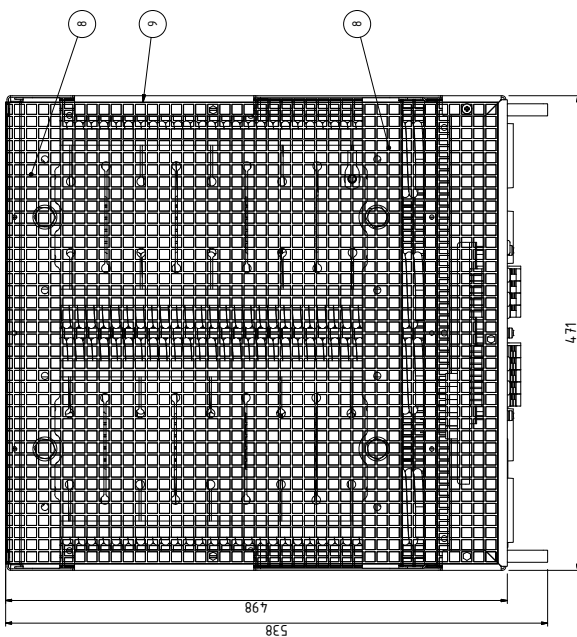
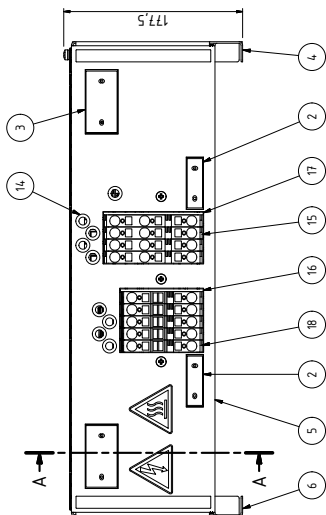
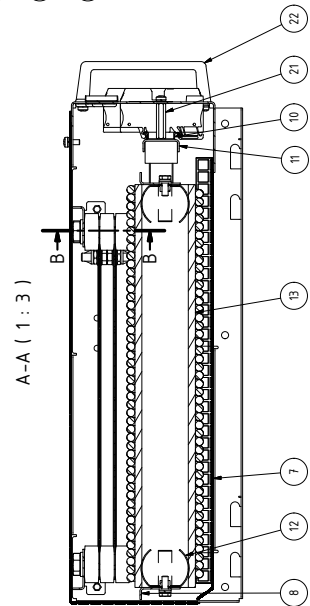
67	1	Zb-109250	Hitzschutzblech	
66	1	Zb-109243	Botenblech	
65	3	Zb-108913	Drossel	
64	2	Zb-109301	Kabelhalter	
Z6	6	HWS 1-360 Gitter	Widerstandsger. Typ HWS 1-360	
Z4	2	49-3508	Alu-Griff	
Z3	3	45-0098	Abschraubboizen, Form A-50 H5x35	
Z2	6	Zb-108343	Kondensator 470µF	
Z0	4	Zb-108267	Klemme, Reihenkl., Zugfeder	
19	1	Zb-108268	Abschlussplatte	
18	1	Zb-108265	Klemme, Reihenkl., Zugfeder	
17	3	Zb-108264	Klemme, Reihenkl., Zugfeder	
16	7	Zb-108259	Schaltrelais	
15	1	Zb-108258	Stromversorgungsbl. IV1208	
14	1	Zb-108257	Verförmg.blech	
11	1	Zb-108320	U-Prüfblech	
10	6	Zb-108319	EIP-Kondensatoren	
9	1	Zb-108286	Hilfschraube Röhren	
8	1	Zb-108263	Lochblechabdeckung	
5	1	Zb-108259	Stellenblech	
4	1	Zb-108257	Stellenblech	
3	2	18-2102	Haltearm, Schid. C-C-H30_60	
2	3	18-2100	Haltearm, Schid. C-C-H15_49	
1	8	11-7541	Diäpanzring Mann	
Pos.	Menge	Zeichnungs-Nr.	Lager-Nr.	Bezeichnung
11/12/08				Bezeichnung 2
WARTSILA LaschWiderstand RLC Modell Typ "B" Wartsila Electric Oy Puhkatie 15, FI-00526 10-108326				
Schutzwinkel ISO 10016 beschriftet / Refer to protection notice ISO 10016				

B. DOKUMENTATION LEITUNGSNACHBILDUNGEN

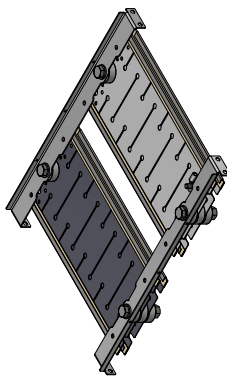
B-B (1 : 2)



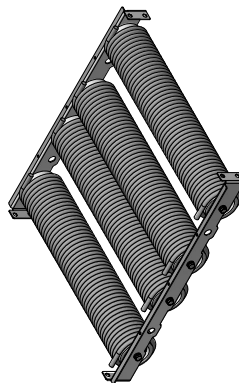
A-A (1 : 3)



Widerstandsblock



Induktivblock



24	4	HWS 1-360 GHz	Widerstandsger. Typ. HWS 1-360
23	4	DN 933 - M12 x 6,5	Sechskant schraube
22	2	49-3508	Alu- Griff
21	3	45-0098	Alu- Endbolzen, Form A-50 MSX35
20	5	3b-10834.3	Kondensator, 4 Tüpf
19	2	3b-10831	Rohrabschuh AB-16
18	5	3b-10826.7	Klemme, Reihenk., Zufeder
17	1	3b-10826.6	Abschlussplatte
16	1	3b-10826.5	Klemme, Reihenk., Zufeder
15	4	3b-10826.4	Klemme, Reihenk., Zufeder
14	9	3b-10810.3	Seitenleit. Rechts
13	4	3b-10810.2	Seitenleit. Links
12	8	3b-10810.1	Vorderwand
11	8	3b-10835	Halteung., Schid., CC-H15_49
10	1	2b-10826.6	Halteung., zentrl., für F60
9	1	2b-10826.3	Halteung., zentrl., für F60
8	4	2b-10826.2	Leuchteboden
7	1	2b-10826.1	Leuchteboden
6	1	2b-10825.9	Leuchteboden
5	1	2b-10825.8	Leuchteboden
4	1	2b-10825.7	Leuchteboden
3	2	1b-2102	Halteung., Schid., CC-H30_60
2	2	1b-2100	Halteung., Schid., CC-H15_49
1	12	11-1541	Diäpanzring, Metall

Pos. Menge Zeichnungs-Nr. Lager-Nr. Bezeichnung

18 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

19 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

20 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

21 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

22 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

23 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

24 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

18 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

19 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

20 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

21 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

22 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

23 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

24 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

18 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

19 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

20 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

21 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

22 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

23 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

24 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

18 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

19 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

20 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

21 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

22 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

23 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

24 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

WARTSILA
 Lastwiderstand RCL
 Modell Typ "C"

WARTSILA
 10-10832.2

18 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

19 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

20 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

21 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

22 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

23 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

24 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

18 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

19 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

20 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

21 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

22 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

23 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

24 1088 1 11-1541 11-1541 Diäpanzring, Metall

C. Dokumentation Lastwiderstand

 Last- und Prüf Widerstände

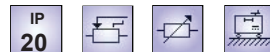
FRIZLEN

Baureihe BW 18 bis BWV 83

Belastungswiderstandsgeräte bis 50 kW, einstellbar, für Wechsel- bzw. Drehspannung (230/400V)



BW 81



Drahtgewickelte Belastungswiderstandsgeräte in Schutzart IP 20 im lackierten Stahlblechgehäuse, in Laborausführung mit Laborklemmen, Nockenschalter, sowie einem Feinsteller, in fahrbarer Ausführung mit 4 Rollen (BW 80 bis BWV 83) für 230 V Wechselspannung sowie für 3 x 230/400 V Drehspannung.

Besondere Merkmale

- kompakte Bauform
- Dauerleistungen bis 50 kW
- BW 18 bis BW 20 für Tischaufstellung mit Gummifüßen
- BW 80 bis BWV 83 für Bodenaufstellung mit 4 Rollen
- Einstellbereich lückenlos
- BWV 83 mit Fremdbelüftung, 230 V; 50 Hz, Anschluss über Heissgerätestecker

Die gesamte Leistung ist in 6, 10 bzw. 20 gleiche Stufen aufgeteilt, die mit Hilfe eines Nockenschalters parallelgeschaltet werden. Mit einem Leistungspotentiometer bzw. einem Schiebewiderstand als Feinsteller in der ersten Stufe lässt sich der Strom über den gesamten Einstellbereich lückenlos (wenn auch nicht stufenlos) einstellen.

Die einphasige Ausführung mit 2 Klemmen ist standardmäßig für 230V Wechselspannung geeignet. Die dreiphasige Variante für Drehspannung ist im Stern geschaltet und hat 3 Klemmen. Der Sternpunkt ist im Widerstand. Als Option auch mit 6 Klemmen möglich (Sternpunkt herausgeführt, s. Anmerkung Seite T 406).

Anwendung

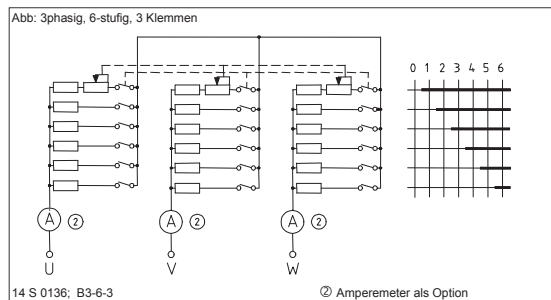
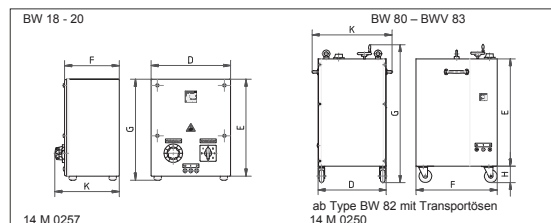
- Einsatz in Labor oder Versuchsfeld
- Als Belastungswiderstand für ein- und dreiphasige Spannungsquellen
- Zum Entwickeln, Prüfen und zur Dauerbelastung von Netzgeräten, unterbrechungsfreien Stromversorgungen, Generatoren und Batterien

Sonderausführung

- andere AC/DC Spannung
- integriertes Amperemeter (bei BW 80 – BWV 83)
- Feinsicherungen zur Absicherung

Elektrische und mechanische Daten

Type	Leistung in kW bei 40°C und 100% ED	Stufenzahl	Stromeinstellbereich in Ampere bei Spannung von		Maße in mm						Gew. in kg
			230V, 50 Hz.	3 x 230/400V, 50 Hz.	D	E	F	G	H	K	
BW 18	1,2	6	0,2-5,2	-	230	295	182	310	-	216	8
BW 19	2,0	6	0,2-8,7	-	290	410	200	440	-	234	14
BW 20	3,0	6	0,3-13	0,2-4,3	290	410	335	440	-	370	20
BW 80	3,0	6	0,3-13	0,2-4,3	430	500	450	700	101	430	32
BW 80	5,0	6	0,6-22	0,3-7,3	430	500	450	700	101	430	35
BW 81	7,5	6	0,7-33	0,4-11	430	600	600	800	101	524	52
BW 81	10	6	0,7-44	0,5-15	430	600	600	800	101	524	55
BW 82	15	10	-	0,5-22	505	800	600	1000	122	600	85
BW 82	20	10	-	0,6-29	505	800	600	1000	122	600	90
BW 83	25	10	-	0,7-36	685	940	680	1140	122	780	125
BW 83	30	10	-	0,9-43	685	940	680	1140	122	780	130
BWV83	50	20	-	0,6-72	685	940	680	1140	122	780	130



FRIZLEN GMBH U. CO KG.

TEL: 07144/8100-0 FAX: /207630
Änderungen vorbehalten

info@frizlen.com

v43

T421

D. Dokumentation Regatron 4-Quadrant Netzsimulator

TC.ACS.50.528.4WR.S.LC

50 kVA / 305 Vrms (L-N) / 72 A

Technical Data

AC lineside ratings

Grid Port

Line voltage	3 x 360 – 528 V _{AC}
Line frequency	48 – 62 Hz
Mains connection type	3L + PE (no neutral)
Input current	3 x 85 Arms
Powerfactor (At nominal power)	1
Precharge unit provided	No inrush current.

AC loadside ratings

Simulation Port: 3L + N

Power range	0 - 50 kVA
Voltage range	0 – 305 Vrms (L-N)
Connection type	3L + N + PE
Current range	3 x 0 – 72 A
Frequency range	0 – 1000 Hz (see fig. 1,2)
Modulation bandwidth	5.0 kHz
DC offset	≤ 10 mV
Efficiency at nominal power	90 %

DC loadside ratings

Simulation Port: 3L + N

Configuration 1: two independent outputs	
.....1 x 0 - 800 V _{DC} , ± 20 A, ± 16 kW (L1 - L2)	
.....1 x 0 - 400 V _{DC} , ± 20 A, ± 8 kW (L3 - N)	
Configuration 2: three independent outputs	
.....3 x 0 - 400 V _{DC} , ± 20 A, ± 8 kW (L1 - N, L2 - N, L3 - N)	
.....(total current in N is limited to 20A)	

Static Accuracy

Voltage @ 50/60 Hz	0.05 % FS
Voltage general	< 1.5 V
Frequency	1 mHz
Phase Angle	1 °

Slew rate

Voltage slew rate	≤ 4 V / μs
10% ... 90% step of full scale	≤ 100 μs (see fig. 4)

Harmonic distortion at 50 Hz

At linear loads	≤ 0.1 %
At non linear loads	≤ 0.8 %

DC ripple + noise

16Hz - 200kHz	230mV rms
9kHz - 20MHz	700mV p-p

Overloadability

up to 10 s every 600 s	≤ 150 % (see fig. 2,3)
up to 1 s every 60 s	≤ 200 % (see fig. 2,3)

Measurement Precision

Voltage	± 0.7 % FS
Current	± 1.4 % FS

Setpoint Resolution

Voltage	0.1 V
Frequency	1 mHz
Phase	0.1 °

Operating Modes

Full 4 quadrant Grid Simulation mode
Full 4 quadrant Load Simulation mode
Full 4 quadrant Amplifier mode CV / CC

Technical Data

Protection

Built-in Protection

Overvoltage protection	programmable
Overcurrent protection	programmable

Internal diagnostics

line input conditions, internal current conditions, temperature conditions, processor idle time, system configuration, system communication, sensor signals, power semiconductor temperatures, power conditions etc.

Type of Protection (according EN 60529)

Basic construction	IP 20
Mounted in cabinet	up to IP 54

Safety interface

The energy transmission between the line side and the load side will be disconnected via integrated safety relays. The interface provides a connection to an external safety circuit.

Conformity CE-Marking

EMC Directive

EMC emission	EN 61000-6-4
EMC immunity	EN 61000-6-2

Low Voltage Directive

Electronic equipment for use in power installations	EN 50178
---	----------

RoHS Directive 2011/65/EU

Technical documentation for the assessment of electrical and electronic products with respect to the restriction of hazardous substances. EN 50581

Ambient conditions

Operation

Operating temperature	5 – 40 °C
Relative air humidity (non-condensing)	0 – 95 %

Storage

Storage temperature	-18 – 70 °C
Relative air humidity (non-condensing)	0 – 95 %

Installation altitude	0 – 1000 m above sea level
Operating orientation	upside
Storage, transport orientation	upside

Utilization category

Protection class	I
Overvoltage category	III
Degree of pollution	2

Emission

Noise level	≤ 74 dB, at 1 m
-------------	-----------------

Liquid Cooling (LC) Specifications

(aircooling possible with optional TC.LAE)

Material	Al
Inlet/outlet on rear side size	G 1/2"
Liquid temperature	15 – 50 °C
Range of flow rate	4 l / min (15°C) – 8 l / min (50°C)
Recommended flow rate	5 l/min
Operation pressure max.	4 bar
Pressure drop	70 mbar @ 5 l/min

All product specifications are subject to change without notification.

REGATRON

2 / 4

2019-09-25

D. DOKUMENTATION REGATRON 4-QUADRANT NETZSIMULATOR

TC.ACS.50.528.4WR.S.LC

50 kVA / 305 Vrms (L-N) / 72 A

Standard Interfaces

Control Port Input Functions (X610 – X612)

Amplifier mode:
Voltage setting L1: -432 V – +432 V -10 – +10 V
Voltage setting L2: -432 V – +432 V -10 – +10 V
Voltage setting L3: -432 V – +432 V -10 – +10 V
Maximum input voltage ± 30 V
Sampling rate 80 kHz
Time delay input to output typ. 70 μ s
Isolation to electronics and earth 125 Vrms
Input impedance 20.5 kOhm

Control Port Output Functions

Trigger ports BNC

Trigger Input X620 (Start) TTL
input impedance 10 kOhm
Trigger Output X621 (programmable) TTL
output impedance 560 Ohm (short-circuit-proof)
Isolation to electronics and earth 250 Vrms

Analog port 12-pin flush-type (X609)

4 Inputs for general usage, ± 10 V reference voltage.
4 Outputs for general usage, ± 10 V reference voltage.
Time delay power output to analogue output: < 50 μ s
Output pins min. load impedance 2 kOhm
Input pins input impedance 330 kOhm
Sampling rate 80 kHz
Isolation to electronics and earth 250 Vrms

USB Type B (X607)

Integrated interface for remote control with the operation software ACSControl
Isolation to electronics and earth 250 Vrms

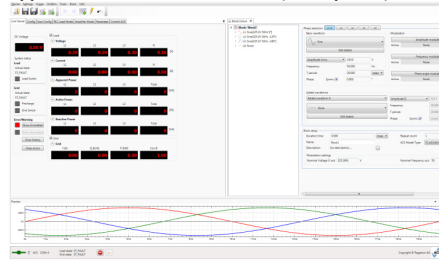
Ethernet (X605)

Integrated interface for remote control with the operation software ACSControl
Isolation to electronics and earth 200 Vrms

RS232 (X606)

Service interface
Isolation to electronics and earth 125 Vrms

Application Software ACSControl (with options)



Possible Test Sequences

IEC 61000-4-11
IEC 61000-4-13
IEC 61000-4-14
IEC 61000-4-27
IEC 61000-4-28
IEC 61000-4-34

Options

Software

Full Waveform Generator Mode (GridSim)
Load Simulation Mode (RLC load)
Current Controlled Amplifier Mode (Current Control)

Hardware

Senseboard with programmable transformer ratio

for RMS voltage drop compensation @ 50/60 Hz
maximum input voltages
L-L: 1000 VRMS, 1500 Vp
L-N: 1000 VRMS, 1500 Vp
N-PE: 500 VRMS, 750 Vp

Digital I/O Interface

8 x Digital IN 24V
8 x Digital OUT 24V
4 x Relays, potential free SPDT

External Liquid to Air Heat Exchanger (TC.LAE)

In addition to the internal Liquid Cooling (LC)

General Data

Weight & Dimension

Weight approx. 150 kg
Width housing (19") 444 mm
Height housing 11 U
Depth with output terminals 634 mm

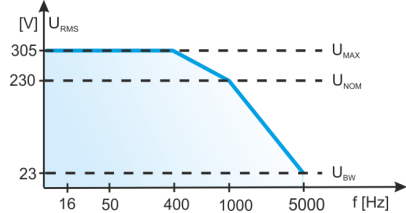
All product specifications are subject to change without notification.

TC.ACS.50.528.4WR.S.LC

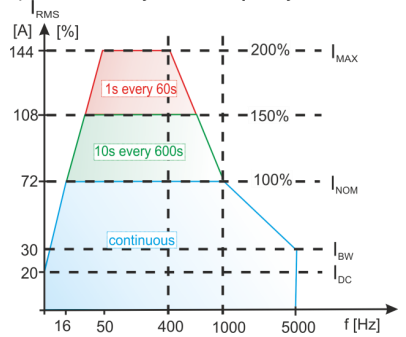
50 kVA / 305 Vrms (L-N) / 72 A

Further description details

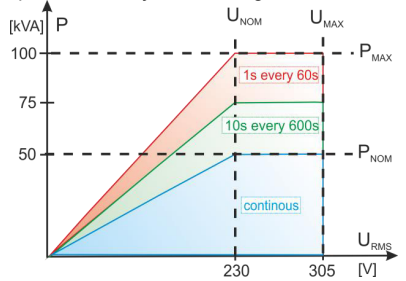
1) Output voltage versus frequency



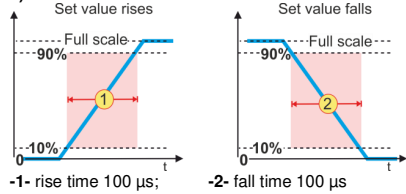
2) Overloadability versus frequency



3) Overloadability versus voltage



4) Slew rate at a resistive load



Regatron AG..... Tel +41 71 846 67 67
 Feldmuehlestrasse 50..... Fax +41 71 846 67 77
 CH-9400 Rorschach..... www.regatron.com
 Switzerland..... topcon@regatron.ch
 All product specifications are subject to change without notification.