

Modellbasierte Prüfung von Stromwandlern

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Fachhochschule Vorarlberg
Energietechnik und Energiewirtschaft (ETW)

Betreut von
DI Robert Hoschek

Vorgelegt von
Thomas Bischof, BSc

Dornbirn, 6. August 2018

Kurzreferat

Modellbasierte Prüfung von Stromwandlern

Damit eine möglichst ausfallsichere Energieversorgung und Energieübertragung gewährleistet werden kann, werden verschiedene Betriebsmittel benötigt. Diese Betriebsmittel müssen gewisse Genauigkeitsgrenzwerte einhalten. In dieser Masterarbeit wird die Prüfung der Genauigkeit von Stromwandlern diskutiert. Die Ermittlung der Genauigkeit kann durch das Einspeisen eines Primärnennstroms (einige kA) und eine Messung des Sekundärstroms erfolgen. Daraus wird der Übertragungsfehler bestimmt. Die Genauigkeit wird unter anderem durch den Übertragungsfehler beschrieben, welcher sich aus dem Übersetzungsfehler und dem Phasenfehler zusammensetzt. Es wird bei diesem Verfahren von der Primärmethode oder auch Primärstrommethode gesprochen, dies ist die Referenzmessung nach den Normen IEC 61869-2 und IEEE C57.13. Die Firma OMICRON electronics GmbH entwickelte ein modellbasiertes Messverfahren, das den Einsatz eines mobilen und leichten Messgeräts erlaubt. Das Messgerät wird CT Analyzer genannt. Bei Verwendung dieser Methode werden keine hohen Ströme verwendet, was den BenutzerInnen zusätzlich eine höhere Sicherheit für die Bedienung des Geräts bietet. Mit diesem Messverfahren werden die einzelnen Komponenten des elektrischen Ersatzschaltbildes des Transformators bestimmt. Mit den ermittelten Komponenten kann dann der Übertragungsfehler berechnet werden. Das modellbasierte Messverfahren beruht auf Messungen, die von der Sekundärseite des Stromwandlers her durchgeführt werden. Man spricht bei diesem Messverfahren von der Sekundärspannungsmethode, welche inzwischen in der Norm IEC 61869-2 als alternative Messung angeführt ist.

Der Vorteil der Primärmethode ist die Hoch-Präzisionsmessung, da die Prüfung unter realen Bedingungen und mit einer direkten Messung durchgeführt wird. Die Genauigkeit dieser Methode wird durch die Messtechnik selbst bestimmt, sie ist sehr genau und daher als Referenz gültig. Das Ziel der Sekundärspannungsmethode ist es, den Vorteil der Hoch-Präzisionsmessung für die Sekundärspannung zu nutzen. Da es sich um ein modellbasiertes Messverfahren handelt, wird die Messgenauigkeit bei diesem Verfahren durch das angewandte Modell bestimmt und nicht durch die Messtechnik wie bei der Primärmethode. Daher sind Untersuchungen am Modell notwendig. Es gibt einige wenige Stromwandlerarten, bei denen es größere nicht akzeptable Differenzen zwischen der Primärmethode und der Sekundärspannungsmethode gibt. Diese Masterarbeit befasst sich deshalb mit Untersuchungen von Möglichkeiten und Grenzen der Sekundärspannungsmethode. Zu Beginn wird eine theoretische Sensitivitätsanalyse mathematisch erarbeitet. In diesem Zusammenhang wird der komplexe Fehlervektor eines Stromwandlers eingeführt. Diese Sensitivitätsanalyse dient der Ermittlung des Einflusses auf den komplexen Fehler in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern und zur Auswahl von Stromwandler-Testobjekten. Des Weiteren wird die Sensitivitätsanalyse durch Messungen an verschiedenen Stromwandlern verifiziert. Die Untersuchungen basieren auf MATLAB-Simulationen und Messungen mit dem OMICRON Messgerät CT Analyzer, welches die Sekundärspannungsmethode anwendet. Die Ergebnisse werden mit den Herstellerdaten (Primärmethode) verglichen und analysiert werden.

Abstract

Model-based testing of current transformer

To ensure a reliable power supply and energy transfer, various assets are required. These assets must comply to certain accuracy limits. This master thesis discusses the testing of the accuracy of current transformers. The determination of the accuracy can be achieved by injecting the nominal primary current (in the range of kA) and then measuring the resulting secondary output current. The accuracy is defined by the transmission error which contains the ratio error and the phase displacement. This procedure is called primary method or primary current method, which is the reference measurement as per IEC 61869-2 and IEEE C57.13 standard. The company OMICRON electronics GmbH developed a model-based method which allows the use of a mobile and light weight measurement device. The device is called CT Analyzer. Utilizing this method, high currents are no longer required for test, which provides the user with a higher safety when operating the device. With this measurement method the individual components of the electrical equivalent circuit diagram of the current transformer are determined. When these individual components are all known, the transmission error can be calculated. The model-based method is based on measurements made from the secondary side of the current transformer. This method is called secondary voltage method and is meanwhile part of the IEC 61869-2 standard as an alternative measurement method.

The advantage of the primary method is that it is a high-precision measurement as it is done under real condition and performed as a direct measurement. The accuracy of this method is dependent on the measuring technique itself, which is very accurate and therefore valid as a reference. The aim of the secondary voltage method is to take advantage of the high-precision measurement for the secondary voltage method. The measurement accuracy of the secondary voltage method is dependent from the model itself and not by the measurement technique as for the primary method. Therefore, investigations on the model are necessary. There are few current transformer types with larger unacceptable differences when measuring accuracy between the primary current method and secondary voltage method. This master thesis studies potentialities and limits of the secondary voltage method. First a theoretical sensitivity analysis will be mathematically derived. In this context the complex error of a current transformer is introduced. This sensitivity analysis is used to determine the influence on the complex error depending on different parameters and for selecting current transformer test objects. Furthermore, the derived sensitivity is verified by different current transformer measurements. The investigations are based on MATLAB simulations and measurements with the OMICRON CT Analyzer using the secondary voltage method. The results are compared and analyzed with the manufacturer data (primary method).

Vorwort

Neben der Primärmethode wurde eine alternative Lösung zur Prüfung der Genauigkeit von Stromwendlern gesucht, um ein leichtes und handliches Messgerät für die Vor-Ort-Messung zu erlauben. Die Firma OMICRON electronics GmbH entwickelte ein modellbasiertes Verfahren zur Prüfung von Stromwendlern. Man spricht von der Sekundärspannungsmethode. Damit wurde ein leichtes Messgerät auf den Markt gebracht. Der modellbasierte Ansatz funktioniert für fast alle konventionellen Stromwandler. Ich machte in den letzten Jahren aber hin und wieder die Erfahrung, dass es Abweichungen zur Messung mit der Primärmethode gibt. Bis jetzt konnte man die Ursachen nicht genau analysieren. Daraus ergab sich diese Masterarbeit zur Untersuchung von Grenzen der Sekundärspannungsmethode.

Zu Beginn der Arbeit wird die Prüfung von Stromwendlern mit zwei verschiedenen Messmethoden motiviert. Daraus leitet sich die Forschungsfrage ab. Des Weiteren wird die Methodik zur Beantwortung der Forschungsfrage erläutert. Dann wird die Theorie von Stromwendlern an Hand von elektrischen Ersatzschaltbildern näher erklärt. Der komplexe Fehlervektor wird eingeführt und der Einfluss auf den Fehler in Abhängigkeit verschiedener Modellparameter untersucht. So lassen sich geeignete Untersuchungsobjekte finden. Mithilfe von Simulationen und Messungen werden Untersuchungen an verschiedenen Stromwendlern durchgeführt.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn **DI Robert Hoschek** für die Unterstützung recht herzlich bedanken.

Ein weiterer Dank möchte ich Herrn **Dr.-Ing. Michael Freiburg** aussprechen. Er war der Initiator dieser Thematik seitens OMICRON electronics GmbH, er unterstützte mich tatkräftig und war stets sehr bemüht, meine Fragen zu beantworten.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
Variablenverzeichnis	XVI
1. Einleitung	1
2. Forschungsfrage	2
2.1 Motivation	2
2.1.1 Primärmethode	3
2.1.2 Sekundärspannungsmethode	3
2.1.3 Vergleich Primärmethode und Sekundärspannungsmethode	4
2.2 Definition der Forschungsfrage	6
2.3 Nutzen der Forschungsfrage	6
2.4 Analyse der Forschungsfrage	6
2.5 Literaturrecherche	7
2.5.1 Publikationen	8
2.5.2 Patent	11
2.5.3 Zusammenfassung	11
2.6 Methodik	12
2.6.1 Arbeitspakete	12
2.6.2 Zieldefinition der Fragestellung	12
2.6.3 Begründung der Antwort auf die Forschungsfrage	13
2.7 Meilensteine	15
3. Theorie über Stromwandler	16
3.1 Bauarten von Stromwandlern	16
3.1.1 Hair-pin Typ	17
3.1.2 Kreuzringwandler	18
3.1.3 Kopfwandler	18
3.1.4 Kombinierte Strom- und Spannungswandler	19
3.2 Physikalisches Prinzip eines Einphasentransformators	19
3.2.1 Sekundärseitiger Leerlauf eines Transformators	20
3.2.2 Sekundärseitige Belastung des Transformators	23
4. Ersatzschaltbild eines Stromwandlers	25
4.1 Durchflutungsgesetz	25
4.2 Ringspule	26
4.3 Stromwandler-Ersatzschaltbild für eine Ringspule	27

4.4	Berechnung der Übertragungsgenauigkeit des Modells ESB-CTA	28
4.4.1	Messzyklus 1: Bestimmung des Sekundärwicklungswiderstandes	28
4.4.2	Messzyklus 2: Bestimmung der Magnetisierungskurve	30
4.4.3	Messzyklus 3: Bestimmung der Übersetzung	32
4.4.4	Berechnung der Übertragungsgenauigkeit	33
4.4.5	Grenzwerte der Übertragungsfehler	36
5.	Erweiterung des elektrischen Ersatzschaltbildes	38
5.1	Elektrisches Ersatzschaltbild mit Streuinduktivität ESB-LS	39
5.2	Erweiterung der Übertragungsfehlerberechnung mit der Streuinduktivität	39
6.	Fehlerkomponenten eines Stromwandlers	40
6.1	Komplexer Fehlervektor eines Stromwandlers	40
6.2	Sensitivitätsanalyse	41
6.3	Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse	44
6.4	Allgemeine Sensitivität auf den Fehler	46
6.5	Verifikation der Sensitivität anhand von Messungen	48
6.5.1	Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses	49
6.5.2	Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit des Sekundärwiderstands	50
6.5.3	Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Streuinduktivität	52
6.5.4	Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz	54
6.6	Stromwandler-Untersuchungsobjekte	56
7.	Modellerweiterung – Berechnung Windungszahlverhältnis	58
8.	Messungen an Stromwandlern	60
8.1	Stromwandler mit hoher Übersetzung – Allgemeine Sensitivität	60
8.2	Stromwandler mit niedriger Übersetzung – Allgemeine Sensitivität	68
8.3	Vergleich mit hoher und niedriger Übersetzung	74
9.	Untersuchung der Einflüsse auf das Windungszahlverhältnis	77
9.1	Windungszahlverhältnis in Abhängigkeit der Spannung	77
9.2	Windungszahlverhältnis in Abhängigkeit des Widerstandes	79
9.3	Windungszahlverhältnis in Abhängigkeit der Streuinduktivität	81
9.4	Einfluss der Genauigkeit des Windungszahlverhältnisses auf den Fehler	83
10.	Simulation der Streuinduktivität	88
11.	Messversuch zur Bestimmung der Streuinduktivität	89
11.1	Möglichkeit zur Bestimmung der Sekundärstreuinduktivität	90
11.2	Ergebnisse von Stromwandlern	93
11.2.1	ITL-Stromwandler 39379	93
11.2.2	ITL-Stromwandler 520-33318	94

12.	Erkenntnisse und Beantwortung der Forschungsfrage	95
12.1	Streuinduktivität	96
12.1.1	Streuinduktivität – Berechnung des Übertragungsfehlers	96
12.1.2	Streuinduktivität – Berechnung des Windungszahlverhältnisses	96
12.1.3	Streuinduktivität – Kombination	97
12.1.4	Messversuch der Streuinduktivität	97
12.2	Messgenauigkeit	97
12.2.1	Messgenauigkeit – Sekundärwicklungswiderstand	97
12.2.2	Messgenauigkeit – Windungszahlverhältnis	97
12.3	Grenzen und Anwendbarkeit der Sekundärspannungsmethode	98
12.4	Zusammenfassung der Erkenntnisse und Grenzen der Sekundärspannungsmethode	101
12.5	Möglichkeiten der Sekundärspannungsmethode	102
13.	Ausblick	103
Literaturverzeichnis		105
Anhang		107
Eidesstattliche Erklärung		113

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schaltsymbol für Strom- und Spannungswandler gemäß Norm DIN EN 60617 und früher verwendetes Symbol (alt)	1
Abbildung 2: Prüfung eines Stromwandlers während des Lebenszyklus	2
Abbildung 3: Messaufbau der Primärmethode zur Messung der Genauigkeit eines Stromwandlers	3
Abbildung 4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild mit zugehörigem Zeigerdiagramm eines Stromwandlers	4
Abbildung 5: Magnetisierungskurve für verschiedene Kernmaterialien	8
Abbildung 6: (a) Hysteresekurve für verschiedene Spannungen, (b) Zeitlicher Signalverlauf einer Hysteresekurve	9
Abbildung 7: Elektrisches Ersatzschaltbild (ESB) eines Stromwandlers	13
Abbildung 8: Zeigerdiagramm des modellierten Kerns	14
Abbildung 9: Methode zur Beantwortung der Forschungsfrage	15
Abbildung 10: Arten von Stromwandlern	16
Abbildung 11: Typische Konstruktionen von Stromwandlern	17
Abbildung 12: Hair-pin Typ mit u-förmigem Primärleiter	17
Abbildung 13: Top-core Typ mit einem schienenförmigen Primärleiter	18
Abbildung 14: Schnittdarstellung eines Kopfwandlers	19
Abbildung 15: Einphasentransformator bestehend aus Primärwicklung, Sekundärwicklung und Eisenkern	20
Abbildung 16: Spannungsgleichgewicht zwischen der Primärspannung U_1 und der Selbstinduktionsspannung E_1	21
Abbildung 17: Zeigerdiagramm des Spannungsgleichgewichts	21
Abbildung 18: Ersatzschaltbild eines idealen Einphasentransformators, Sekundärseite ist im Leerlauf.....	22
Abbildung 19: Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Primärwicklung mit Verlusten ..	23
Abbildung 20: Ersatzschaltbild des Transformators im Leerlauf mit Berücksichtigung der Streuinduktivität.....	23
Abbildung 21: Ersatzschaltbild des Einphasentransformators unter Berücksichtigung der Streuinduktivität und der Eisenverluste bei sekundärseitiger Belastung....	24
Abbildung 22: Ersatzschaltbild eines Einphasentransformators, Sekundärgrößen sind auf die Primärseite umgerechnet.....	24
Abbildung 23: Langer, gerader, stromdurchflossener Leiter	25
Abbildung 24: Prinzipieller Aufbau einer Ringspule	26
Abbildung 25: Ersatzschaltbild eines Stromwandlers für eine Ringspule, Sekundärgrößen sind auf die Primärseite umgerechnet.....	28
Abbildung 26: Messprinzip des CT Analyzers für die Bestimmung des Sekundärwicklungswiderstands R_{CT}	29
Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der Messsignale für die Sekundärwiderstandsmessung	29
Abbildung 28: Messprinzip des CT Analyzers zur Bestimmung der Magnetisierungskurve	31
Abbildung 29: Hysteresekurve und Magnetisierungskurve	32

Abbildung 30: Messprinzip des CT Analyzers zur Bestimmung der Übersetzung	32
Abbildung 31: Messung der Übersetzung eines Stromwandlers als Funktion der Frequenz in einer 220 kV-Umspannanlage.....	33
Abbildung 32: Ersatzschaltbild des Stromwandlers zur Berechnung des Übertragungsfehlers, Modell: ESB-CTA	34
Abbildung 33: Zeigerdiagramm des Ersatzschaltbildes für die Berechnung des Übertragungsfehlers	34
Abbildung 34: Übertragungsfehler eines Stromwandlers mit den dazugehörigen Grenzwerten nach der Norm IEC 61869-2.....	38
Abbildung 35: Ersatzschaltbild des Stromwandlers mit der Erweiterung der Streuinduktivität.....	39
Abbildung 36: Zeigerdiagramm des komplexen Fehlervektors	40
Abbildung 37: Prinzipieller nichtlinearer Verlauf einer Magnetisierungskurve eines Stromwandlers	45
Abbildung 38: Variation der Eisenkernimpedanz, dargestellt als Magnetisierungskurve, ITL-Stromwandler (520-33318).....	47
Abbildung 39: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei Variation des Windungszahlverhältnisses, Ritz-Stromwandler (05-594259)	49
Abbildung 40: Übersetzungsfehler als Funktion des Windungszahlverhältnisses für verschiedene Stromwandler	50
Abbildung 41: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei Variation des Sekundärwicklungswiderstandes, EPRO-Stromwandler (3-16-1569).....	51
Abbildung 42: Übertragungsfehler als Funktion des Sekundärwicklungswiderstandes für verschiedene Stromwandler	52
Abbildung 43: Übersetzungsfehler und Phasenfehler als Funktion des Primärstroms bei Variation der Streuinduktivität, EPRO-Stromwandler (3-16-1569).....	53
Abbildung 44: Übertragungsfehler als Funktion der Streuinduktivität für verschiedene Stromwandler	54
Abbildung 45: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei Variation der Eisenkernimpedanz, Ritz-Stromwandler (01-568886)	55
Abbildung 46: Übertragungsfehler als Funktion der Eisenkernimpedanz für verschiedene Stromwandler	56
Abbildung 47: Ersatzschaltbild für die Messung des Übersetzungsverhältnisses mit Berücksichtigung der Streuinduktivität	58
Abbildung 48: Konzept zur Untersuchung der Einflüsse auf den Fehler	60
Abbildung 49: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses, Schrittweite ΔN ist 1, Stromwandler Ritz (05- 594259)	62
Abbildung 50: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses, Schrittweite ΔN ist 1, Stromwandler ITL (520- 33318)	62
Abbildung 51: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Sekundärwiderstandes, Schrittweite ΔR ist $0,5 \Omega$, Stromwandler Ritz (05- 594259)	64

Abbildung 52: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Sekundärwiderstandes, Schrittweite ΔR ist 0,5 Ω , Stromwandler ITL (520-33318).....	64
Abbildung 53: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität, Schrittweite ΔL ist 1 mH, Stromwandler Ritz (05-594259).....	65
Abbildung 54: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität, Schrittweite ΔL ist 4,6 mH, Stromwandler ITL (520-33318).....	66
Abbildung 55: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz, Schrittweite ΔZ_k ist +10 %, Stromwandler Ritz (05-594259)	67
Abbildung 56: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz, Schrittweite ΔZ_k ist +10 %, Stromwandler ITL (520-33318)	67
Abbildung 57: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses, Schrittweite ΔN ist 1, Stromwandler ITL (39379).....	69
Abbildung 58: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses, Schrittweite ΔN ist 1, Stromwandler Astra (3408420)	69
Abbildung 59: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Wicklungswiderstandes, Schrittweite ΔR ist 0,1 Ω , Stromwandler ITL (39379).....	70
Abbildung 60: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Wicklungswiderstandes, Schrittweite ΔR ist 0,1 Ω , Stromwandler Astra (3408420)	71
Abbildung 61: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität, Schrittweite ΔL ist 0,2 mH, Stromwandler ITL (39379).....	72
Abbildung 62: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität, Schrittweite ΔL ist 500 μH , Stromwandler Astra (3408420).....	72
Abbildung 63: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz, Schrittweite ΔZ_k ist +10 %, Stromwandler ITL (39379)	73
Abbildung 64: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz, Schrittweite ΔZ_k ist +10 %, Stromwandler Astra (3408420)	74
Abbildung 65: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses für eine hohe und eine niedrige Übersetzung	75
Abbildung 66: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Sekundärwicklungswiderstandes für eine hohe und eine niedrige Übersetzung	76
Abbildung 67: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität für eine hohe und eine niedrige Übersetzung	76
Abbildung 68: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz für eine hohe und eine niedrige Übersetzung	77
Abbildung 69: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Variation der Sekundärspannung U_{AC} bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler ITL (39379)	78

Abbildung 70: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Änderung des Sekundärwicklungswiderstandes R_{CT} bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler ITL (39379).....	79
Abbildung 71: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Änderung des Sekundärwicklungswiderstandes R_{CT} bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler Astra (3408420).....	80
Abbildung 72: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms, Variation der Streuinduktivität bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler ITL (39379)	82
Abbildung 73: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms, Variation der Streuinduktivität bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler Astra (3408420)	82
Abbildung 74: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Schrittweite ΔN von 0,01, Stromwandler ITL (39379).....	83
Abbildung 75: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Schrittweite ΔN von 0,01, Stromwandler Astra (3408420)	84
Abbildung 76: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms mit der garantierten Fehlertoleranz der Windungszahlverhältnismessung, Stromwandler ITL (39379).....	85
Abbildung 77: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms mit der garantierten Fehlertoleranz der Windungszahlverhältnismessung, Stromwandler Astra (3408420)	86
Abbildung 78: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms, Vergleich der garantierten Fehler des Windungszahlverhältnisses und der Messeingänge, Stromwandler ITL (39379)	87
Abbildung 79: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms, Vergleich der garantierten Fehler des Windungszahlverhältnisses und der Messeingänge, Astra (3408420)	87
Abbildung 80: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, $N(L_\sigma)$ – $\epsilon(L_\sigma)$ – $\delta(L_\sigma)$, Astra-Stromwandler (3408420)	88
Abbildung 81: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, $N(L_\sigma)$ – $\epsilon(L_\sigma)$ – $\delta(L_\sigma)$, ITL-Stromwandler (520-33318)	89
Abbildung 82: Ersatzschaltbild und Messung der Streuinduktivität des Stromwandlers ...	90
Abbildung 83: Vergleich des Übersetzungsfehlers mit Sekundärwärmemethode und Sekundärspannungsmethode, Übersetzungsfehler mit und ohne L_σ , ITL- Stromwandler (39379)	94
Abbildung 84: Vergleich des Übersetzungsfehlers mit Sekundärwärmemethode und Sekundärspannungsmethode, Übersetzungsfehler mit und ohne L_σ , ITL- Stromwandler (520-33318)	95
Abbildung 85: Schematische Darstellung der Magnetisierungskurve, Windungszahlverhältnismessung in einem Arbeitspunkt.....	98
Abbildung 86: Vereinfachtes Ersatzschaltbild ohne Windungszahlverhältnis	99
Abbildung 87: Vereinfachtes Ersatzschaltbild mit Windungszahlverhältnis $N_1:N_2$	99
Abbildung 88: Typischer Verlauf der Fehlerkurve in Abhängigkeit des angewendeten Modells	100

Abbildung 89: Vereinfachtes Ersatzschaltbild mit Windungszahlverhältnis $N_1:N_2$ mit Streuinduktivität.....	100
Abbildung 90: Typischer Verlauf der Fehlerkurve in Abhängigkeit der Streuinduktivität.	101
Abbildung 91: Typischer Verlauf der Fehlerkurven mit Streuinduktivität	101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile der Primärmethode und der Sekundärspannungsmethode	5
Tabelle 2: Genauigkeitsgrenzwerte für Messstromwandler nach IEC 61869-2	36
Tabelle 3: Genauigkeitsgrenzwerte für Schutzstromwandler nach IEC 61869-2.....	37
Tabelle 4: Spezifikation der Stromwandler-Untersuchungsobjekte	48
Tabelle 5: Sekundärwiderstände der Variation	50
Tabelle 6: Streuinduktivitäten der Variation	53
Tabelle 7: Erarbeitete Spezifikation der Untersuchungsobjekte anhand der Sensitivitätsanalyse	57
Tabelle 8: Spezifikation des Ritz 05-594259- und ITL 520-33318-Stromwandlers	60
Tabelle 9: Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, Ritz (05-594259)	61
Tabelle 10: Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, ITL (520-33318)	61
Tabelle 11: Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes, Ritz (05-594259)	63
Tabelle 12: Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes, ITL (520-33318)	63
Tabelle 13: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität, Ritz (05-594259) ..	65
Tabelle 14: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität, ITL (520-33318) ...	65
Tabelle 15: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, Ritz (05-594259)	66
Tabelle 16: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, ITL (520-33318)	66
Tabelle 17: Spezifikation des ITL 39379- und Astra 3408420-Stromwandlers	68
Tabelle 18: Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, ITL (39379)	68
Tabelle 19: Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, Astra (3408420)	68
Tabelle 20: Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes, ITL (39379)	70
Tabelle 21: Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes, Astra (3408420)	70
Tabelle 22: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität, ITL (39379)	71
Tabelle 23: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität, Astra (3408420) ...	71
Tabelle 24: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, ITL (39379) ...	73
Tabelle 25: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, Astra (3408420)	73
Tabelle 26: Übersetzungsfehler und Windungszahlverhältnis bei unterschiedlicher Sekundärspannung, Stromwandler ITL (39379)	78
Tabelle 27: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms bei entsprechendem Sekundärwiderstand, Stromwandler ITL (39379)	80

Tabelle 28: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms bei entsprechendem Sekundärwiderstand, Stromwandler Astra (3408420)	81
Tabelle 29: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und Streuinduktivität, Stromwandler ITL (39379)	81
Tabelle 30: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und Streuinduktivität, Stromwandler Astra (3408420)	81
Tabelle 31: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und Windungszahlverhältnis N, Stromwandler ITL (39379)	84
Tabelle 32: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und Windungszahlverhältnis N, Stromwandler Astra (3408420)	84
Tabelle 33: Garantierte Genauigkeit der Spannungsmesseingänge des Messgeräts CT Analyzer	86
Tabelle 34: Messung der Gesamtstreuinduktivität, ITL-Stromwandler (39379)	91

Abkürzungsverzeichnis

e.m.f.....	<i>electromotive force, Kernspannung</i>
ESB.....	<i>elektrisches Ersatzschaltbild</i>
ESB-CTA	<i>Modell: Elektrisches Ersatzschaltbild CT Analyzer</i>
ESB-LS	<i>Modell: Elektrisches Ersatzschaltbild mit Streuinduktivität</i>
EVU	<i>Energieversorgungsunternehmen</i>
FAT	<i>Factory Acceptance Test</i>
IEC.....	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE.....	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LWL	<i>Lichtwellenleiter</i>
PMA.....	<i>Post-Mortem-Analyse</i>

Variablenverzeichnis

U_1, U_{Prim}	Primärspannung
U_2, U_{AC}	Sekundärspannung
$U_K, E.M.K.$	Kernspannung, elektromotorische Kraft
N_1, n_1	Anzahl Primärwindungen
N_2, n_2	Anzahl Sekundärwindungen
$N, \dot{N}, N_2:N_1$	Windungszahlverhältnis
X_h	Hauptinduktivität des magnetischen Kerns
R_{Fe}	Eisenverluste
$X_{1\sigma}, L_{1\sigma}$	Primärstreureaktanz, Primärstreuinduktivität
$X_{2\sigma}, L_{2\sigma}$	Sekundärstreureaktanz, Sekundärstreuinduktivität
X_σ, L_σ	Gesamtstreureaktanz, Gesamtstreuinduktivität
$R_{\text{DC}}, R_{\text{CT}}$	Sekundärwicklungswiderstand
$Z_{\text{Bürde}}$	Bürdenimpedanz
$Z_{\text{Nenn-Brüde}}$	Nenn-Bürdenimpedanz
I_1, I_p	Primärstrom
I_{pn}	Primärnennstrom
I_2	Sekundärstrom, Bürsenstrom
I_{2n}, I_{sn}	Sekundärnennstrom
I_0	Magnetisierungsstrom
I_μ	Induktiver Anteil von I_0
I_R, I_v	Ohmscher Anteil von I_0 , Verluststrom
ϕ_1, ϕ_2	Primärer bzw. sekundärer magnetischer Fluss
ϕ_{1h}, ϕ_{2h}	Primärer bzw. sekundärer magnetischer Hauptfluss
$\phi_{1\sigma}, \phi_{2\sigma}$	Primärer bzw. sekundärer magnetischer Streufluss
E_w	Induzierte Spannung in einer Windung
E_1	Induzierte Spannung in einer Wicklung (Selbstinduktionsspannung)
\vec{H}	Magnetische Feldstärke
\vec{j}	Stromdichte
\vec{D}	Verschiebungsdichte
r	Radius eines Kreises
\hat{B}	Maximale magnetische Flussdichte, Spitzenwert
$\hat{\phi}$	Maximaler magnetischer Fluss, Spitzenwert
A_{Fe}	Querschnitt des Eisenkerns
ε	Übersetzungsfehler des Stromwandlers
δ	Phasenfehler des Stromwandlers
\underline{E}	Komplexer Fehlervektor, Magnetisierungsstrom
$Z_{\text{längs}}$	Längsimpedanz des Stromwandlers bei kurzgeschlossener Primärseite

1. Einleitung

Damit ein Energieversorgungssystem korrekt und sicher arbeitet, müssen die Ströme und Spannungen im elektrischen Netz überwacht werden.

Die Schutztechnik hat die Aufgabe, die Betriebsmittel und die Verbraucher vor Überströmen zu schützen. Ein Kurzschluss wird mittels Sicherungen oder Leistungsschaltern schnellstmöglich abgeschaltet. Hingegen führen zeitlich begrenzte Überlastungen zu Warnungen. (Vgl. Schwab 2012, S. 631)

Daher müssen die Leitungsströme und Leitungsspannungen in verarbeitbare Signale transformiert werden, damit entsprechende Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden können.

Als Betriebsmittel werden ein Strom- und ein Spannungswandler verwendet, welche den Primärstrom und die Primärspannung auf einen messbaren proportionalen Wert transformieren. Dieser Wert ist meist eine genormte elektrische Größe. (Vgl. Heuck; Dettmann; Schulz 2013, S. 170)

Die Darstellung 1 zeigt das Symbol für den Strom- und Spannungswandler gemäß der Norm DIN EN 60617 und das vor der Norm verwendete Symbol.

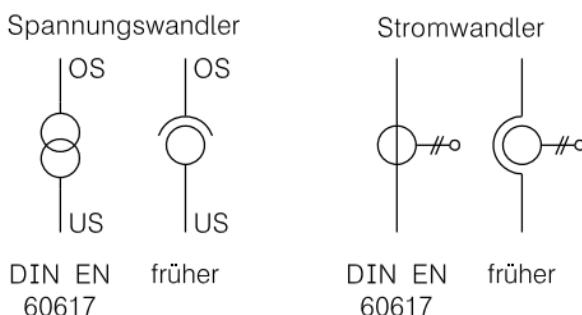


Abbildung 1: Schaltsymbol für Strom- und Spannungswandler gemäß Norm DIN EN 60617 und früher verwendetes Symbol (alt)

Quelle: (Heuck; Dettmann; Schulz 2013, S. 171)

In der Norm IEC 61869-2 für Stromwandler werden Normwerte für den Sekundärstrom von 1 A oder 5 A angegeben. Für Spannungswandler wird in der Norm IEC 61869-3 eine Sekundärspannung von 100 V oder 110 V als Normwert festgelegt.

An die Sekundärseite des Strom- bzw. Spannungswandlers werden Messgeräte und Schutzeinrichtungen angeschlossen. (Vgl. Heuck; Dettmann; Schulz 2013, S. 170–171)

Die Genauigkeit der Übertragung der Ströme und der Spannungen ist wesentlich für ein stabiles Energieversorgungssystem und für die korrekte Abrechnung der verbrauchten Energie an den Endkunden. Deshalb werden die Genauigkeitsgrenzen für Stromwandler in der Norm IEC 61869-2 und für Spannungswandler in der Norm IEC 61869-3 spezifiziert. Die Einhaltung der Genauigkeit der Strom- und Spannungswandler wird in Labors getestet, indem der Primärstrom bzw. die Primärspannung an den Strom- bzw. Spannungswandler angelegt wird und das transformierte Signal auf der Sekundärseite sehr präzise gemessen wird. Hier wird auch von der konventionellen Methode

gesprochen. Dies erfordert entsprechend große Strom- bzw. Spannungsquellen. Für den Einsatz vor Ort im Umspannwerk ist das sehr unhandlich und erfordert einen großen Aufwand für die Installation des Messsystems zur Bestimmung der Genauigkeit der Strom- und Spannungswandler. Deshalb wurde in der Norm eine alternative Methode zur Bestimmung der Genauigkeit eingeführt. Bei dieser Methode handelt es sich um eine modellbasierte Sekundärspannungsmethode, welche von der Firma OMICRON electronics GmbH patentiert ist. Die Übertragungsgenauigkeit wird unter Berücksichtigung der Kernverluste durch Anlegen einer Spannung an der Sekundärseite und das Messen der Primärspannung bestimmt. Durch diesen modellbasierten Ansatz ergibt sich der Vorteil, dass handliche Geräte mit kleinen Prüfsignalen verwendet werden können, was optimal für die Vor-Ort-Messung anwendbar ist, jedoch bei diversen Stromwählern zu Differenzen im Vergleich zur Primärmethode führen kann.

2. Forschungsfrage

Für einen Großteil der Stromwandler ist die Genauigkeit der Sekundärspannungsmethode mit der konventionellen Messung vergleichbar. Es ergibt sich jedoch bei bestimmten Konstruktionen eine Abweichung der Sekundärspannungsmethode im Vergleich zur konventionellen Methode. Die Ursachen können unter anderem geringe Übersetzungsverhältnisse, nicht symmetrisch gewickelte Sekundärleiter, die Position des Primärleiters, Luftspalte im Kern oder Fehlerkompensationsmaßnahmen sein.

2.1 Motivation

Ein Stromwandler wird in seinem Lebenszyklus mehrmals getestet. Die Abbildung 2 zeigt, wann ein Stromwandler gemessen wird. Die ersten Messungen werden während des Herstellungsprozesses durchgeführt. Dazu gehört auch der Factory Acceptance Test (FAT). Mit diesem Report garantiert der Hersteller die Genauigkeit des Stromwandlers. Danach werden Messungen während der Inbetriebnahme und während des Betriebs durch den Endkunden gemacht, um den Zustand des Stromwandlers zu überwachen. Als letzte Messung kann eine Post-Mortem-Analyse (PMA) durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang wird die Ursache gesucht, warum das Betriebsmittel Schaden genommen hat.

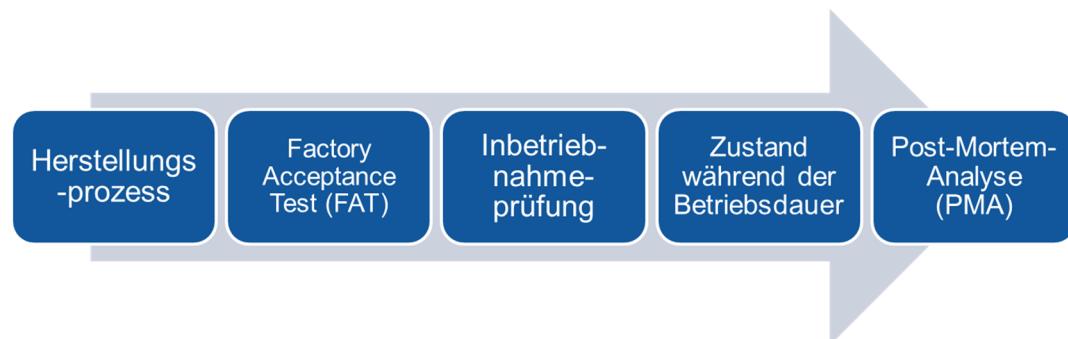


Abbildung 2: Prüfung eines Stromwandlers während des Lebenszyklus

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Prüfung von Stromwendlern hat ihre Berechtigung. Sie ist wesentlich für die Schutztechnik, Personensicherheit, die korrekte Abrechnung der verbrauchten Energie und ist Bestandteil für ein stabiles Energieversorgungssystem.

Für die Prüfung eines Stromwandlers gibt es, wie in Kapitel 1 erwähnt, die Primärmethode, auch Primärstrommethode genannt, und die Sekundärspannungsmethode. Sie werden hier genauer beschrieben.

2.1.1 Primärmethode

Die Primärmethode wird auch als Primärstrommethode oder als konventionelle Messmethode bezeichnet.

Die Abbildung 3 zeigt den Messaufbau, der nach der Norm IEC 61869-2 definiert ist.

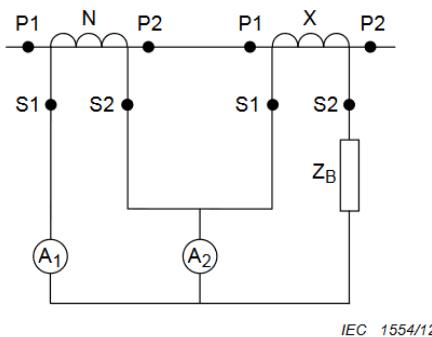


Abbildung 3: Messaufbau der Primärmethode zur Messung der Genauigkeit eines Stromwandlers
Quelle: (IEC 61869-2 2013, S. 45)

Der Stromwandler N ist der Referenzstromwandler, welcher einen vernachlässigbaren Fehler hat. Der Stromwandler X ist das zu untersuchende Testobjekt. Beide Stromwandler werden von derselben Hochstromquelle versorgt. Auf der Sekundärseite der Stromwandler wird der Effektivwert des Stroms mit den Amperemetern A1 und A2 gemessen. Zur Genauigkeitsbestimmung werden diese beiden Ströme verglichen. Die wesentlichen zwei Merkmale sind der Übersetzungsfehler und der Phasenfehler. (Vgl. IEC 61869-2 2013, S. 45)

Bei der Primärmethode wird der tatsächlich im Betriebsfall vorkommende Strom eingespeist. Man spricht deshalb auch von der direkten Messmethode.

An dieser Stelle ist zusätzlich zu erwähnen, dass die amerikanische Norm IEEE C57.13 noch weitere Möglichkeiten zum Messaufbau beschreibt.

2.1.2 Sekundärspannungsmethode

Die Sekundärspannungsmethode wird in der Norm IEC 61869-2 im Anhang 2E als alternative Messmethode angeführt. Für Stromwandler mit niedriger Streuinduktivität ist die Genauigkeit der Messung vergleichbar mit der direkten Methode. Die direkte Messmethode liefert die höchste Evidenz. (Vgl. IEC 61869-2 2013, S. 66)

Die Abbildung 4 zeigt ein vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Stromwandlers. Auf der Sekundärseite wird eine sinusförmige Spannung an den Klemmen S1 – S2 angelegt. Die Testspannung $U_{s\text{ Test}}$ und der Teststrom $I_{s\text{ Test}}$ werden gemessen. Die angelegte Spannung muss an der Hauptinduktivität X_m eine elektromotorische Kraft e.m.f erzeugen, welche unter Betriebsbedingung mit angeschlossener Bürde den gleichen Wert ergeben würde. Daraus kann dann der Übertragungsfehler ermittelt werden. (Vgl. IEC 61869-2 2013, S. 66)

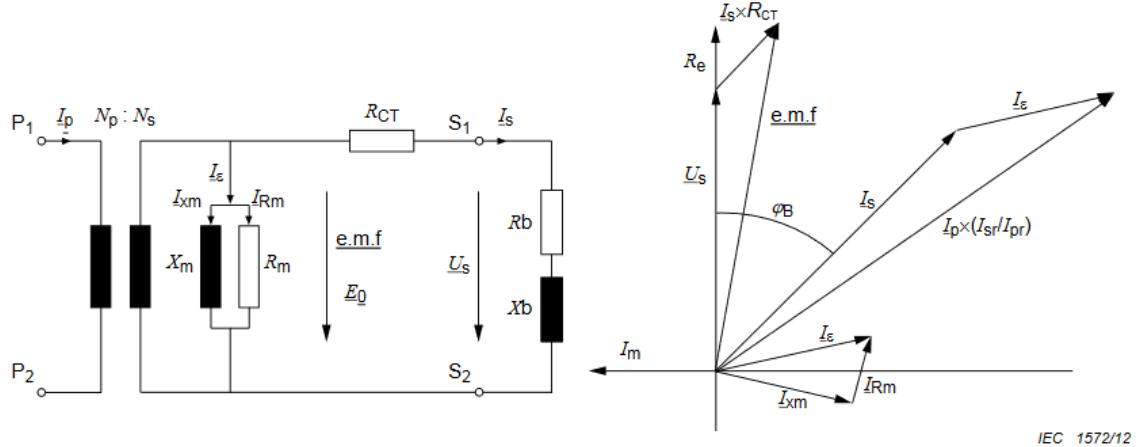


Abbildung 4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild mit zugehörigem Zeigerdiagramm eines Stromwandlers

Quelle: (IEC 61869-2 2013, S. 66)

Die Sekundärspannungsmethode verwendet im Vergleich zur Primärmethode nicht den realen Strom zur Beurteilung der Übertragungsgenauigkeit. Die Messung erfolgt von der Sekundärseite des Stromwandlers her. Durch diverse Messungen werden die einzelnen Komponenten des elektrischen Ersatzschaltbildes (ESB) bestimmt. Deshalb spricht man bei der Sekundärspannungsmethode auch von der indirekten Messmethode.

2.1.3 Vergleich Primärmethode und Sekundärspannungsmethode

Die Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile der beiden Messmethoden.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile der Primärmethode und der Sekundärspannungsmethode

Primärmethode		Sekundärspannungsmethode	
Vorteil	Nachteil	Vorteil	Nachteil
Hoch-Präzisionsmessung	hoher Transportaufwand	geringer Transportaufwand	Modellabweichungen führen zu Messfehlern
Prüfung bei realen Bedingungen	schwere Geräte hohe Ströme/Spannungen manuelle Bewertung hoher Messaufwand	leichte Handhabung (8 kg) kleine Testsignale (120 V und 5 A) automatische Bewertung One-Step-Test	Prüfung nicht bei realen Bedingungen

Ein Nachteil der Primärmethode ist der hohe Transportaufwand der Geräte aufgrund der Größe und des Gewichts. Des Weiteren werden sehr hohe Ströme und Spannungen erzeugt, die zusätzlich spezielle Sicherheitsmaßnahmen erfordern. Bei der Primärmethode muss jeder Betriebspunkt manuell eingestellt werden, und es muss manuell bewertet werden, ob die Grenzen innerhalb der Norm liegen. Das bedeutet einen hohen Messaufwand. Der Vorteil der Sekundärspannungsmethode ist hingegen der geringe Transportaufwand, da die Masse des Geräts nur 8 kg beträgt. Die Messung wird für alle Betriebspunkte vollautomatisch durchgeführt und nach der Norm bewertet: One-Step-Test. One-Step-Test bedeutet, dass der Stromwandler zur Messung angeschlossen und die Messung gestartet wird. Nach der Messung werden alle Messergebnisse dargestellt und bewertet. Ein Nachteil ist, dass es sich um ein modellbasiertes Verfahren handelt. Das hat zur Folge, dass Modellabweichungen zu Messfehlern führen können.

Betrachtet man den Vorteil der Hoch-Präzisionsmessung bei der Primärmethode genauer, heißt das, dass die Primärmethode unter realen Bedingungen und mit einer direkten Messung sehr genaue Werte erreicht. Die Genauigkeit wird bei dieser Methode durch die Messtechnik bestimmt, welche heute sehr genau ist. Dieser Vorteil der Hoch-Präzisionsmessung soll auch für die Sekundärspannungsmethode genutzt werden. Bei der Sekundärspannungsmethode wird nicht unter realen Bedingungen gemessen. Die Messung erfolgt von der Sekundärseite her, daher ist ein Modell notwendig. Das heißt, dass die Genauigkeit nicht durch das Messwerk bestimmt wird, sondern vom angewandten Modell abhängt. Deshalb sind Untersuchungen notwendig, zum einen, um das Modell zu erweitern, und zum anderen, um die Grenzen der Methode herauszufinden.

Daraus lässt sich nun die Forschungsfrage ableiten.

2.2 Definition der Forschungsfrage

Aus der in Kapitel 1 und Kapitel 2 beschriebenen Ausgangslage und Motivation ergibt sich für die Masterarbeit die folgende Forschungsfrage:

„Was sind Grenzen und Möglichkeiten der Sekundärspannungsmethode zur Prüfung von Stromwählern?“

2.3 Nutzen der Forschungsfrage

Durch die Beantwortung der Forschungsfrage werden Grenzen analysiert und quantifiziert. Durch die Quantifizierung der Grenzen wird ermittelt, unter welchen Voraussetzungen und Bedingungen diese auftreten. Dies erlaubt die Weiterentwicklung der Anwendbarkeit der Sekundärspannungsmessmethode. Des Weiteren können aufgrund der ermittelten Grenzen Modelländerungen diskutiert werden, die von akademischem Interesse sind. Außerdem sind die Erkenntnisse nicht nur für den AuftraggeberInnen interessant, sondern auch für Hersteller von Stromwählern und Energieversorgungsunternehmen in der Anwendung. Der Grund liegt darin, dass diese Sekundärspannungsmethode, wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, eine akzeptierte und in der Norm IEC 61869-2 festgehaltene alternative Messmethode ist.

2.4 Analyse der Forschungsfrage

In diesem Kapitel wird die Forschungsfrage nach bestimmten Kriterien analysiert.

Innovativ

Durch die Anwendung der Sekundärspannungsmethode wird der Messaufwand reduziert und es erlaubt ein Messgerät, das klein und sehr leicht ist. Der Grund liegt darin, dass ein modellbasierter Ansatz zur Messung des Stromwählers angewendet wird. So können kleine Messsignale von 120 V DC verwendet werden. Im Vergleich dazu benötigt die Primärmethode eine Wechselstromquelle mit einer großen Leistung, die mehrere 1000 A erzeugen muss. Bei Stromwählern mit Schutzkernen kann das bis zum 20-fachen des Nennstroms sein. Deshalb ist diese Methode für die Vor-Ort-Messung im Umspannwerk nur mit sehr viel Aufwand auszuführen.

Bis jetzt ist keine Literatur bekannt, welche die Grenzen und Möglichkeiten der Sekundärspannungsmethode beschreibt. Über die Erkenntnisse von Grenzen können in weiterer Folge Modelländerungsvorschläge abgeleitet werden.

Spezifisch

Die Fragestellung ist auf die Grenzen und Möglichkeiten der Sekundärspannungsmethode bei Stromwählern eingegrenzt. Die Fragestellung beinhaltet die Modelländerung bewusst nicht. Der Grund liegt darin, dass mögliche Grenzen aufgezeigt werden können, sich aber nicht in einem Modell abbilden lassen.

Für die Versuchsdurchführung werden konventionelle Stromwandler verwendet.

Messbar

Die Grundlage der Beurteilung sind Messungen an verschiedenen konventionellen Stromwandlern. Anhand von systematischen Untersuchungen und Messungen werden die Grenzen und Möglichkeiten an speziell angefertigten Stromwandlern untersucht. Die Testobjekte werden mit der Primärmessmethode und mit der Sekundärspannungsmethode gemessen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können in einem Modell simuliert und verglichen werden.

Akzeptiert

Die Sekundärspannungsmethode ist in der Norm IEC 61869-2 als alternative Messung im Anhang 2E angeführt. Die Methode wird sowohl von Herstellern als auch von Energieversorgungsunternehmen (EVU) zur Entwicklung und Inbetriebnahmeprüfung von Stromwandlern akzeptiert. Diese Sekundärspannungsmethode wird vom OMICRON CT Analyzer verwendet. Die Genauigkeit des CT Analyzers und seiner Messmethode wurde von mehreren unabhängigen Labors bestätigt. Der CT Analyzer hat daher eine hohe Akzeptanz auf dem Markt.

Realistisch

Die Arbeit ist realistisch, da ich beruflich mit dieser Messmethodik bereits arbeitete und vor allem im Bereich der Applikation Erfahrungen sammeln konnte. Des Weiteren bin ich mit dem CT Analyzer, der diese Sekundärspannungsmethode verwendet, sehr gut vertraut.

Einzelne Testobjekte und die Messgeräte sind vorhanden.

Terminierbar

Die Masterarbeit wird in Arbeitspakete eingeteilt, die in einer bestimmten Zeit abzuarbeiten sind. Daraus lässt sich der Aufwand gut abschätzen.

Im Allgemeinen werden die Prüflinge spezifiziert, im Haus gemessen und extern nachgemessen.

2.5 Literaturrecherche

Als Literaturquellen stehen für diese Arbeit Bücher und Publikationen zur Verfügung. Bei den Büchern handelt es sich um Literatur über Elektrotechnik, Werkstofftechnik sowie magnetische Materialien. Mit Hilfe von Publikationen werden vorhandene Methoden, welche zur Beantwortung der Fragestellung herangezogen werden können, überprüft.

Als Literatur steht zudem die Norm IEC 61869-2 zur Verfügung. Im Folgenden wird ein Teil der gefundenen und relevanten Literatur zusammengefasst. Es gibt aber weit mehr Literatur über Stromwandler als hier angeführt. In der verwendeten Literatur konnte allerdings keine Aussage über die Beantwortung der Forschungsfrage für diese Masterarbeit gefunden werden.

2.5.1 Publikationen

Paper 1: Inductive current transformer accuracy of transformation for the PQ measurements (Kaczmarek 2017)

In diesem Paper wird die Genauigkeit des Stromwandlers über die Frequenzen betrachtet. Dabei wird die Hysteresekurve für die Kernmaterialien Permalloy (NiFe), Transformatorstahl (SiFe) und eine Kombination davon über einen Frequenzbereich dargestellt.

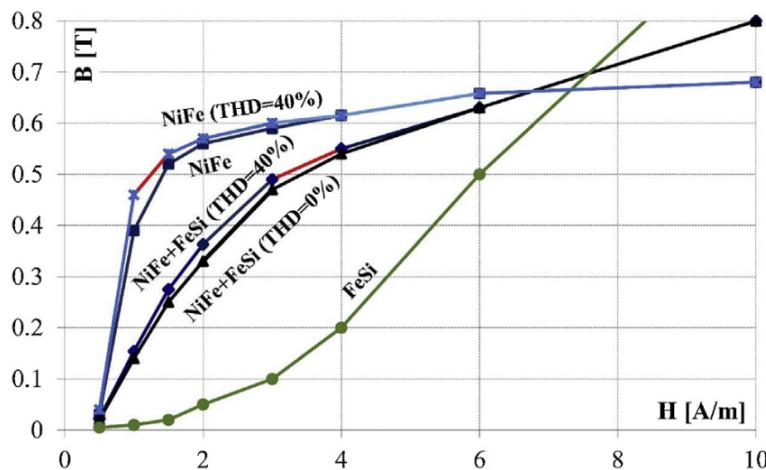


Abbildung 5: Magnetisierungskurve für verschiedene Kernmaterialien

Quelle: (Kaczmarek 2017, S. 172)

Dieser Artikel gibt Auskunft über die Hauptaspekte für das Design eines induktiven Stromwandlers für die Power Quality (PQ)-Messung.

Paper 2: Some remarks on metrological properties and production technology of current transformers made of nanocrystalline cores (Pluta u.a. 2017)

Dieses Paper erläutert messtechnische Untersuchungen von „low voltage“ (dt. niedrige Spannung) und „high accurate CTs“ (dt. hoch genaue Stromwandler). Für die Untersuchung werden nanokristalline Kerne verwendet.

Nanokristalline Kerne zeigen unter anderem die folgenden Charakteristiken auf:

- steile oder flache, aber schlanke Hysteresekurve
- gute Linearität der magnetischen Flussdichte gegenüber der magnetischen Feldstärke

Paper 3: Electromagnetic characterization of current transformer with toroidal core under sinusoidal conditions (Koprivica; Milovanovic 2016)

Dieses Paper beschreibt eine Modellierung des Stromwandlers zur Berechnung des Übersetzungsverhältnisses und des Phasenfehlers unter der Berücksichtigung von

sinusförmigen Signalen. Die Hysteresekurve wird daher mit Ellipsen modelliert (siehe Abbildung 6). Das heißt, dass in diesem Fall nur der Normalbetrieb simuliert und keine Aussage im Sättigungsbereich getroffen wird.

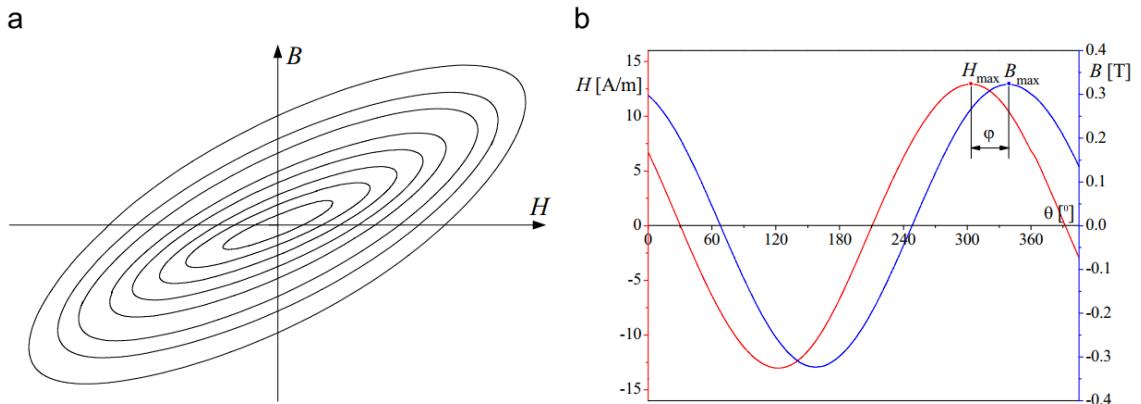


Abbildung 6: (a) Hysteresekurve für verschiedene Spannungen, (b) Zeitlicher Signalverlauf einer Hysteresekurve

Quelle: (Koprivica; Milovanovic 2016, S. 36)

Paper 4: Current Transformer Concepts (Zocholl; Smaha 1992)

Es wird die Stromwandler-Kernsättigung anhand eines Ersatzschaltbildes näher betrachtet und das Konzept der Spannungszeitfläche (magnetischer Fluss) erläutert. Des Weiteren werden Computer-Simulationen anhand von verschiedenen Applikationen vorgestellt (zum Beispiel Transformator- und Generator-Differentialschutz).

Ergebnisse:

- Die Stromwandler-Kernsättigung kann durch das Konzept der Spannungszeitfläche verstanden werden.
- Die Stromwandler-Magnetisierungskurve liefert die Steady-State-Performance. Der Kniepunkt ist der Punkt, bei dem die Permeabilität maximal und nicht am Punkt der Sättigung ist.
- Es werden Stromwandlermodelle diskutiert, die das transiente Verhalten bei symmetrischen Strömen darstellen.

Paper 5: Die Nachbildung von Magnetisierungskurven durch einfache algebraische oder transzendente Funktionen (Fischer; Moser 1955)

Das Ziel ist es, eine gegebene empirische Magnetisierungskurve mit einer algebraischen oder transzentralen Funktion nachzubilden. Dabei soll eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden. Die Magnetisierungskurven werden gemessen, indem entweder die magnetische Feldstärke H oder die Induktion B einer sinusförmigen Schwingung entsprechen. Je nachdem, welche Größen von der magnetischen Feldstärke H und der magnetischen Flussdichte B verwendet werden, gibt es Unterschiede in der Magnetisierungskurve. Bei Größen von B und H spricht man von Scheitelwerten,

arithmetischen Mittelwerten einer halben Periode, Effektivwerten und Effektivwerten der Grundschwingungen.

In diesem Paper werden Annäherungsfunktionen für verschiedene Bereiche der Magnetisierungskurve erläutert.

Paper 6: Effect of magnetization on instrument transformer errors (Draxler; Styblíková 2010)

Bei nichtsinusförmigen Strömen wie zum Beispiel einem Blitzeinschlag oder bei transienten Strömen wird der Stromwandlerkern bzw. der Spannungswandlerkern magnetisiert. Das hat zur Folge, dass die Übertragungsgenauigkeit reduziert wird. Diese Effekte werden an nanokristallinen und Trafoperm-Kernen untersucht. Der Übertragungsfehler des Stromwandlers wird durch diesen Magnetisierungseffekt des Kerns verändert.

Ergebnis:

- Der Effekt ist für Stromwandler mit nanokristallinem Kern weniger von Bedeutung als für Spannungswandler mit Trafoperm-Silizium-Stahl- oder Permalloy-Kernen.

Paper 7: Evaluation of Experimental Methods for Determining the Magnetically Nonlinear Characteristics of Electromagnetic Device (Stumberger u.a. 2015)

Dieses Paper evaluiert verschiedene experimentelle Methoden zur nichtlinearen, magnetischen Charakteristik eines elektromagnetischen Geräts (engl. electromagnetic device EMD). Das Testobjekt wird mit einer sinusförmigen Spannung versorgt. Die stromabhängige Charakteristik des Flusses wird durch die Messung der Spannung und des Stroms bestimmt, wobei eine numerische Integration, eine Fourier-Analyse oder eine Impedanzberechnung zur Anwendung kommen.

Ergebnis:

- Dieses Paper präsentiert und evaluiert sechs experimentelle Methoden zur Bestimmung der nichtlinearen, magnetischen Charakteristik.

Paper 8: Improved Method for the Fitting of Excitation Curve for Voltage Transformer (Heng-xu; Lei; Zhi-qian o. J.)

Es wird eine Methode vorgestellt, wie die Magnetisierungskurve eines Spannungswandlers bestmöglich nachgebildet werden kann. Dazu werden für den Sättigungsbereich und für den linearen Bereich der Magnetisierungskurve unterschiedliche Modelle untersucht.

Ergebnis:

- Eine Simulation in MATLAB zeigt, dass der Approximationsfehler mit der verbesserten Methode kleiner wird.

Paper 9: Field Determination of Current-Transformer Errors by the Secondary-Voltage Method (Goodale; Holbeck 1944)

Das Paper beschreibt bereits im Jahr 1944 die Sekundärspannungsmethode zur Prüfung von Stromwendlern. Es wird dargestellt, wie die Magnetisierungskurve von der Sekundärseite her mit einer variablen Spannungsquelle gemessen werden kann. Der Erregerstrom (engl. exciting current) wird auf einen Magnetisierungsstrom und auf Kernverluste aufgeteilt. Des Weiteren wird erwähnt, dass der Stromwandler vor der Messung demagnetisiert werden muss. Bei der Entmagnetisierung soll die Primärseite offen sein, wobei die Testspannung auf der Sekundärseite des Stromwandlers mit einer Rampe von 0 V auf 100 V erhöht und dann wieder zurück auf 0 V geführt wird.

Dissertation: Ein Verfahren zum modellbasierten Genauigkeitsnachweis von Mittel- und Hochspannungswandlern für den Vor-Ort-Einsatz (Freiburg 2014)

Diese Dissertation erklärt ein Verfahren zur modellbasierten Genauigkeitsmessung von Spannungswandlern. Für die Masterarbeit ist das *Kapitel 6 Modellbildung* interessant. In diesem Kapitel wird die Modellierung eines Spannungswandlers betrachtet. Es wurden Untersuchungen zum Frequenzverhalten, zur Aufteilung der Streuinduktivitäten zwischen Primär- und Sekundärseite und zu den Kernverlusten durchgeführt.

Für die Kernverluste (Ferromagnetische Verluste) werden verschiedene Modelle erläutert, das Modell R_{eddy} , Modell $R_{\text{eddy,enh}}$ und Modell R_0 .

Diese Modelle können in dem MATLAB-Modell für Stromwandler untersucht werden.

2.5.2 Patent

Verfahren zum Testen eines Transformatoren und entsprechende Testvorrichtung (Süss; Dr. Krüger; Kaufmann 2005)

Patentinhaber: Omicron electronics GmbH, 6833 Klaus (AT)

Patentnummer: EP 1 398 644 B1

Das Patent beschreibt ein Verfahren zum Testen eines Transformatoren mit der Sekundärspannungsmethode. Die Bestimmung der Kernverluste mit der Sekundärspannungsmethode wird detailliert beschrieben.

2.5.3 Zusammenfassung

Im Allgemeinen gibt es sehr viel Literatur und Papers über Stromwandler. Für diese Thematik sind unter anderem Publikationen interessant, die Verlustmodelle für magnetische Kerne beschreiben.

2.6 Methodik

2.6.1 Arbeitspakete

Die Masterarbeit wird in Arbeitspakete eingeteilt, die zeitlich begrenzt sind.

1. Arbeitspaket: Einarbeitung und Literaturrecherche

Die aktuellen Kenntnisse und die einschlägige Literatur zu dieser Thematik werden studiert. Nach entsprechender Einarbeitung ist ein Mess- und Untersuchungskonzept zu erstellen, das die Erfüllung der Aufgabenstellung erlaubt. In diesem Zusammenhang wird die Theorie erarbeitet, so dass ein grundlegendes Verständnis für die Bearbeitung des zweiten Arbeitspakets vorhanden ist.

2. Arbeitspaket: Modellierung

Ein wesentlicher Teil dieses Arbeitspakets ist die Erweiterung des MATLAB-Modells. In diesem Modell wird die Sekundärspannungsmethode implementiert, damit die Übertragungsgenauigkeit (Übersetzungsfehler und Phasenfehler) simuliert werden kann. Anschließend wird mit diesem Berechnungsmodell eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Einflussfaktoren und die Einflusshöhe auf die Sekundärspannungsmethode werden durch eine Parametervariation im MATLAB-Modell simuliert und ermittelt.

3. Arbeitspaket: Messungen

Es werden vergleichende Untersuchungen der Sekundärspannungs- und Primärstrommethode durchgeführt, um die Forschungsfrage zu beantworten. Hier wird mit zertifizierten Kalibrierlabors zusammengearbeitet. Es können die folgenden Einflussfaktoren messtechnisch untersucht werden: Anwendung im linearen oder nichtlinearen Bereich, Abhängigkeiten von der Anzahl der Amperewindungen, nicht symmetrisch gewickelte Sekundärleiter, die Position des Primärleiters, Luftspalte im Kern, Fehlerkompensationsmaßnahmen (zwei Wandlerkerne, mehrere sekundäre Wicklungsdrähte) oder ein geringes Übersetzungsverhältnis. Die Wahl der Testobjekte hängt von den Simulationsergebnissen ab.

4. Arbeitspaket: Dokumentation

Zuletzt erfolgt die schriftliche Ausarbeitung nach den Vorgaben der FH Vorarlberg und die Darstellung der Ergebnisse. Des Weiteren wird eine Präsentation der Ergebnisse bei OMICRON electronics GmbH durchgeführt. Die Testobjekte, Daten und Ausarbeitungen werden an OMICRON electronics GmbH übergeben.

2.6.2 Zieldefinition der Fragestellung

Das Ziel der Masterarbeit ist die Untersuchung der Anwendbarkeit und die Ermittlung von Grenzen der sogenannten Sekundärspannungsmethode zur Prüfung von Stromwandlern. Die Sekundärspannungsmethode stellt eine alternative Prüflösung zur Prüfung mit Primärströmen dar. Aus der Arbeit soll ersichtlich werden, welche Effekte die

Sekundärspannungsmethode beeinflussen und welche Sensitivität die Prüfmethode hinsichtlich der angeführten Einflüsse aufweist. Um dieses Ziel systematisch zu erreichen, müssen messtechnische Untersuchungen an unterschiedlichen Stromwandlern durchgeführt werden. Dabei ist es wichtig, dass die Messungen mit kalibrierten Messinstrumenten durchgeführt und mit Referenzmessungen aus zertifizierten Laboren verglichen werden. Die Arbeit soll als Nachschlagewerk dienen und daher eine Übersicht über die physikalischen Einflussgrößen, deren Einflusshöhe und mögliche Gegenmaßnahmen respektive Verbesserungen beinhalten.

Die Genauigkeit der Sekundärspannungsmethode ist von dem hinterlegten Stromwandlermodell abhängig und kann je nach Modell und Wandler zu Unterschieden zwischen der Primär- und Sekundärspannungsmethode führen. Wenn die Hintergründe dieser Unterschiede und die einzelnen Einflussgrößen untersucht und dargestellt sind, können als Sekundärziel dieser Arbeit Verbesserungen am Modell oder an der Messmethode diskutiert oder weiter untersucht werden. Die Verbesserungen sind jedoch nicht zwingend zur Beantwortung der Fragestellung der Masterarbeit notwendig.

2.6.3 Begründung der Antwort auf die Forschungsfrage

Durch die Erweiterung eines vorhandenen MATLAB-Modells, welches die Sekundärspannungsmethode teilweise modelliert, soll eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Das MATLAB-Modell verwendet das elektrische Ersatzschaltbild, wie in Abbildung 7 gezeigt. Das zugehörige Zeigerdiagramm für die Darstellung der Kernverluste wird in Abbildung 8 dargestellt. Aufgrund theoretischer Überlegungen können folgende Abhängigkeiten vermutet werden.

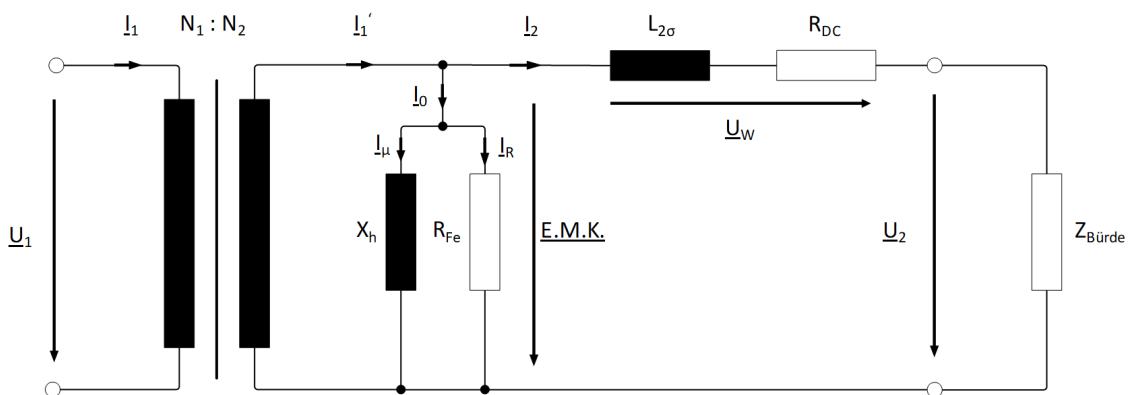


Abbildung 7: Elektrisches Ersatzschaltbild (ESB) eines Stromwandlers

Quelle: Eigene Ausarbeitung

U_1	Primärspannung	$L_{2\sigma}$	Sekundärstreuinduktivität
U_2	Sekundärspannung, Bürdenspannung	R_{DC}, R_{CT}	Sekundärwicklungswiderstand
E.M.K.	Elektromotorische Kraft, Kernspannung	$Z_{Bürde}$	Bürdenimpedanz
U_w	Spannung der Sekundärwicklung	I_1	Primärstrom
N_1	Anzahl Primärwindungen	I_1'	Ideal transformierter Primärstrom
N_2	Anzahl Sekundärwindungen	I_2	Sekundärstrom, Bürdenstrom
$N_2:N_1$	Windungszahlverhältnis	I_0	Magnetisierungsstrom
X_h	Hauptinduktivität des Kerns	I_μ	Induktiver Anteil von I_0
R_{Fe}	Eisenverluste	I_R	Ohmscher Anteil von I_0

Der Übertragungsfehler von der Primärseite auf die Sekundärseite (in Betrag und Phase) wird durch das Windungszahlverhältnis und den Magnetisierungsstrom I_0 verursacht.

Eine Variation des Wirbelstromwiderstandes R_{Fe} ändert den Betrag des Stroms I_R . Der induktive Anteil des Magnetisierungsstroms I_μ bleibt konstant. Das heißt, dass sich der Betrag des Fehlers ändert, während der Phasenfehler gleichbleibt.

Eine Variation des Windungszahlverhältnisses $N_1:N_2$ bewirkt, dass der Übertragungsfehlereinfluss größer wird und sich unmittelbar auf den Übersetzungsfehler auswirkt.

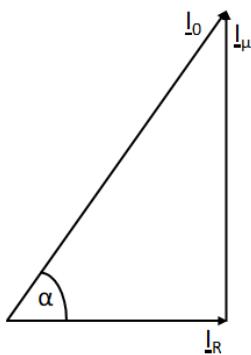


Abbildung 8: Zeigerdiagramm des modellierten Kerns

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Eine Variation des induktiven Anteils des Magnetisierungsstroms I_μ bewirkt eine Änderung des Phasenwinkels α , wobei der Betrag des Wirbelstroms I_R sich nur geringfügig ändert (siehe Abbildung 8). Dies hat eine Änderung des Phasenfehlers zur Folge.

Das Ziel ist es, diese Vermutungen mit einer Parametervariation der einzelnen Komponenten im elektrischen Ersatzschaltbild zu überprüfen und die Einflusshöhe auf die Übertragungsgenauigkeit zu ermitteln. Der Vorteil liegt darin, dass bereits durch die Simulation die Komponente herausgefunden werden kann, welche den größten Einfluss auf die Übertragungsgenauigkeit hat. So kann entschieden werden, welche Komponente näher betrachtet wird.

Im nächsten Schritt ist es geplant, eine messtechnische Untersuchung und den Vergleich mit dem MATLAB-Modell durchzuführen. Dafür werden geeignete Testobjekte ausgewählt.

Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten für Testobjekte, die zur Untersuchung herangezogen werden können. Alle Untersuchungen werden aus zeitlichen Gründen im Rahmen der Masterarbeit nicht durchgeführt werden können.

Die nachstehenden Testobjekte können zur Untersuchung verwendet werden:

- Testobjekte mit gleichem Kern, aber unterschiedlicher Übersetzung
- Testobjekte mit gleichem Kern und gleicher Übersetzung, aber unterschiedlichem Material (nicht-orientiertes Blech oder korn-orientiertes Blech)
- Testobjekte mit variablen Wicklungsdicken
- Testobjekte mit variablen Blechdicken
- Testobjekte mit variabler Wicklungssymmetrie

Die Primärmethode ist die anerkannte Messmethode zur Beurteilung des Übertragungsfehlers von Stromwandlern. Deshalb dient die Primärmethode als Referenz zur Beurteilung der Ergebnisse der Sekundärspannungsmethode.

Im Vergleich der Messungen mit den simulierten Daten werden Indizien dafür gesucht, für welchen Stromwandler das Modell funktioniert. Somit können dann die Grenzen und Möglichkeiten der Sekundärspannungsmethode gefunden werden. Abbildung 9 zeigt die Methodik, beginnend mit der Sensitivitätsanalyse über die Wahl der Testobjekte und Messungen bis zum Vergleich der Messungen mit dem MATLAB-Modell zur Beantwortung der Forschungsfrage.

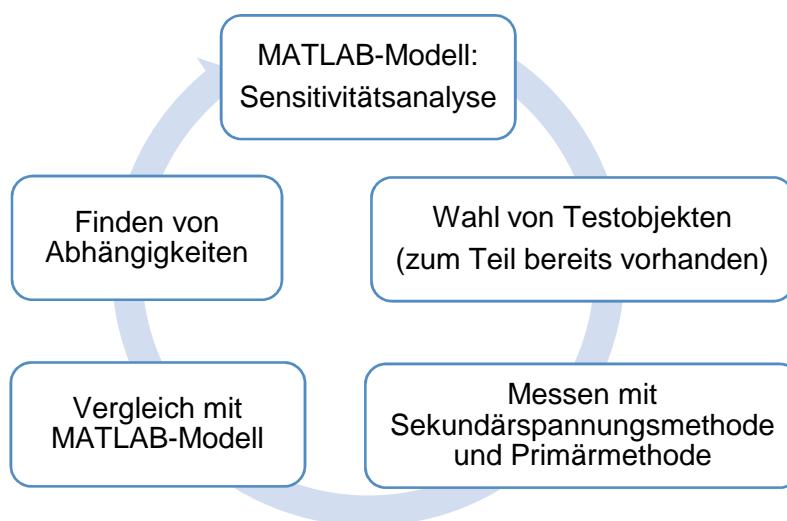


Abbildung 9: Methode zur Beantwortung der Forschungsfrage

Quelle: Eigene Ausarbeitung

2.7 Meilensteine

Die Masterarbeit wird in die fünf Meilensteine M1 bis M5 unterteilt.

- M1 – MATLAB Sensitivitätsanalyse, Definition und Bestellung von Testobjekten
- M2 – Analyse der ersten Messungen und Vergleich mit dem MATLAB-Modell
- M3 – Analyse weiterer Messungen, erste Ergebnisse zur Beantwortung der Forschungsfrage
- M4 – Messungen abgeschlossen, Ergebnisse zur Beantwortung der Forschungsfrage vorhanden
- M5 – Masterarbeit fertig dokumentiert

Abgabe der Masterarbeit an den Betreuer: 06.08.2018

Abgabe der Masterarbeit im Sekretariat: 28.08.2018

Masterprüfung: 11.09.2018 und 12.09.2018

3. Theorie über Stromwandler

Wie in der Einleitung erläutert, ist es die Aufgabe des Stromwandlers, einen hohen, nicht messbaren Strom in einen proportional kleineren und messbaren Strom zu transformieren. Für diese Aufgabe gibt es verschiedene Stromwandlerbauarten. Dieses Kapitel dient dem Verständnis der wichtigsten Zusammenhänge über Stromwandler und soll als Überblick dienen.

3.1 Bauarten von Stromwandlern

Für Stromwandler gibt es je nach Anwendung verschiedene Bauweisen.

Bei einem Kreuzringwandler wird der Primärleiter in den geerdeten Kessel geschleift (siehe Abbildung 10 a). Dabei muss die Primärwicklung gegen den Kessel und die Sekundärwicklung hochspannungsfest isoliert werden. Beim Kopfwandler hingegen ist der induktive Wandler auf dem Hochspannungspotential angebracht (siehe Abbildung 10 b). Auf dem Erdpotential befinden sich die Sekundärwicklung und der Kern, die gegen den Primärleiter und den Kessel hochspannungsfest isoliert werden müssen. (Vgl. Küchler 2009, S. 401)

Es gibt noch weitere Möglichkeiten, um Ströme zu transformieren, zum Beispiel über magnetooptische Wandler. Um den Primärleiter wird eine lichtleitende Faser (Lichtwellenleiter, LWL) gewickelt, die parallel zum magnetischen Feld verläuft (siehe Abbildung 10 c). Bei diesen Stromwandlern wird der Faraday-Effekt angewendet. Eine weitere Bauart sind hybrid-optische Wandler, bei denen der Strom mit einem konventionellen induktiven Stromwandler gemessen wird. Dieses Signal wird digitalisiert und über einen Lichtwellenleiter dem Empfänger übermittelt (siehe Abbildung 10 d). (Vgl. Küchler 2009, S. 402)

Man spricht bei diesen Bauarten auch von nicht konventionellen Wandlern. In dieser Arbeit wird auf diese Typen nicht näher eingegangen, da dies eine andere Messmethode ist.

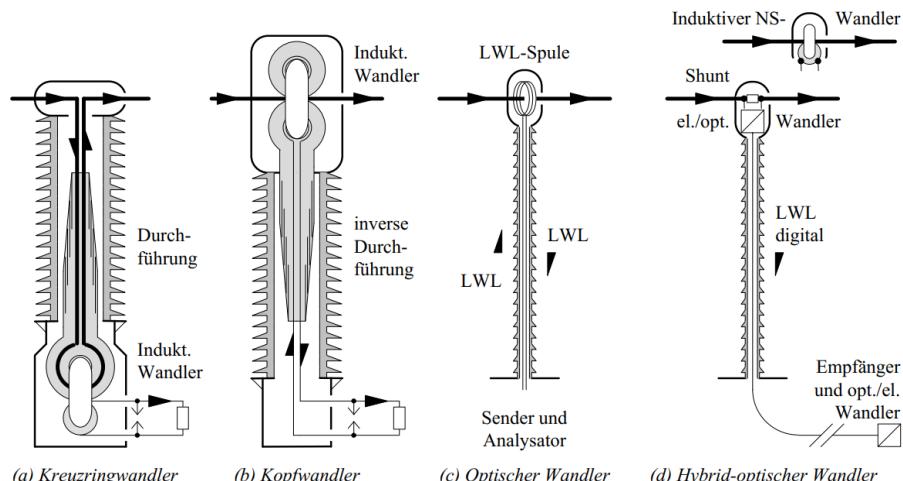


Abbildung 10: Arten von Stromwandlern

Quelle: (Küchler 2009, S. 401)

Die Abbildung 11 stellt Schnittbilder der am häufigsten angewendeten Konstruktionsformen von Stromwendlern dar, die je nach Anwendung und Spezifikation des Kunden zum Einsatz kommen.

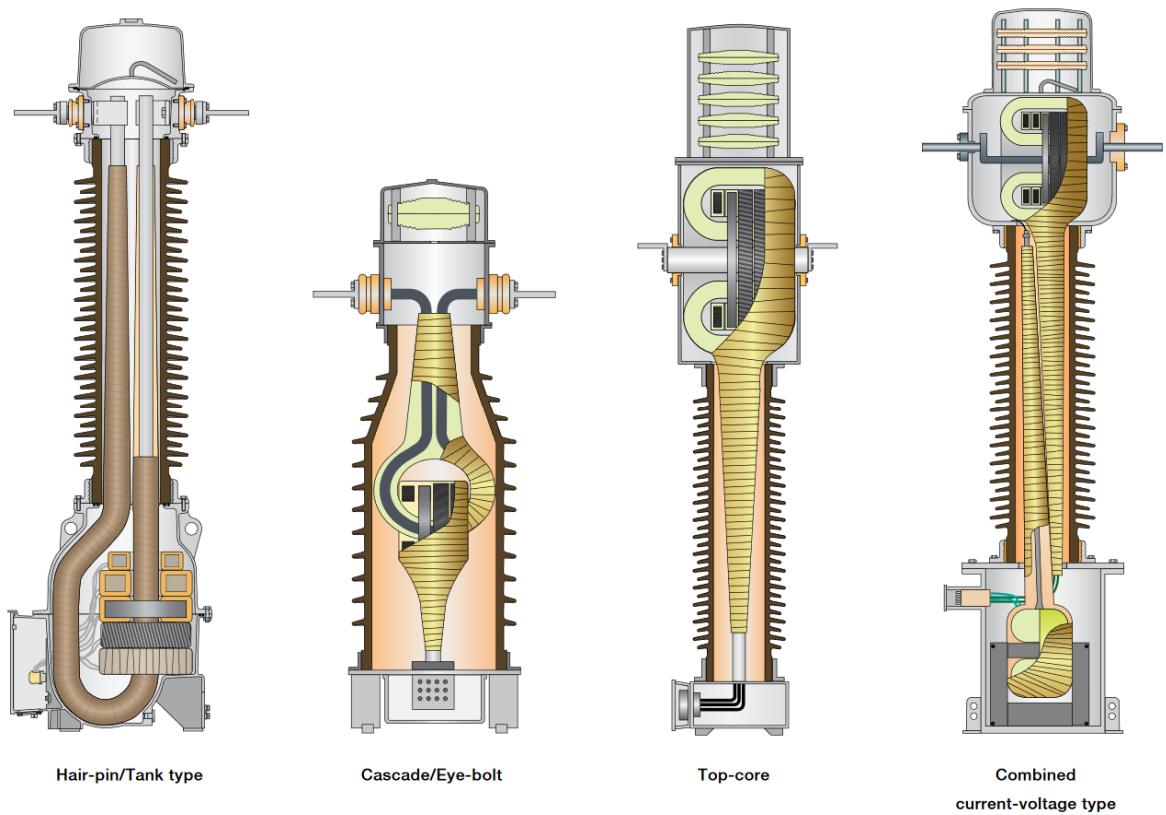


Abbildung 11: Typische Konstruktionen von Stromwendlern

Quelle: („Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 82)

3.1.1 Hair-pin Typ

Der *Hair-pin Typ* wird auch als *Tank Typ* bezeichnet (siehe Abbildung 11). Der Eisenkern befindet sich im unteren Bereich des Stromwenders nahe dem Boden, wie in Abbildung 12 dargestellt. Deshalb ist der Primärleiter u-förmig. (Vgl. „Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 79)

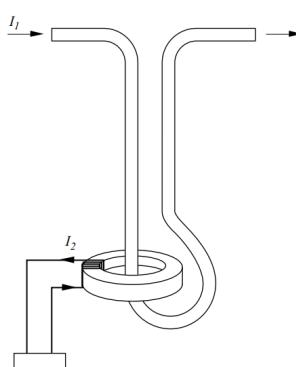


Abbildung 12: Hair-pin Typ mit u-förmigem Primärleiter

Quelle: („Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 79)

Der Vorteil dieses Typs ist die hohe Resistenz gegen Erdbeben. Im Primärleiter gibt es eine Ölzirkulation, welche die Temperatur gleichmäßig verteilt, wodurch kein Hotspot entsteht. Der Nachteil sind der lange Primärleiter und die damit verbundenen thermischen Verluste. (Vgl. „Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 80–81)

3.1.2 Kreuzringwandler

Der *Kreuzringwandler* (engl. eye-bolt type, Abbildung 11) ist ein Hybrid zwischen *hair-pin* und *top-core* Konstruktion. Der Nachteil dieses Designs ist der lange Primärleiter, wodurch erhöhte thermische Verluste entstehen. Des Weiteren ist die Kühlung des Primärleiters nur schwer möglich, daher sind die Kurzschlussströme für diesen Typ begrenzt. (Vgl. „Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 81)

3.1.3 Kopfwandler

Bei einem Kopfwandler (engl. *Top-core*) befindet sich der Eisenkern im oberen Bereich des Stromwandlers (siehe Abbildung 13). Der Primärleiter kann schienenförmig oder auch als Wicklung um den Eisenkern ausgeführt werden. (Vgl. „Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 79)

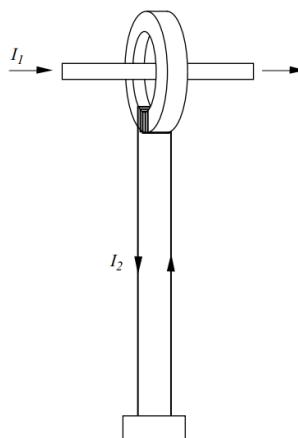


Abbildung 13: Top-core Typ mit einem schienenförmigen Primärleiter

Quelle: („Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 79)

Der Messkern mit Wicklung ist in einem mit Öl gefüllten Gehäuse, wobei sich die Eisenkerne zusätzlich in einem geerdeten Gehäuse mit einer Isolierung befinden. Dieses Gehäuse ist für den Anschluss der Messleitung mit einer Kondensatordurchführung verbunden. (Vgl. Heuck; Dettmann; Schulz 2013, S. 175)

Die Abbildung 14 stellt den Schnitt des Kopfwandlers dar. Im Wesentlichen besteht der Kopfwandler aus einer Messwicklung, einem Primäranschluss, einem Sekundäranschluss und einer Isolation. Der Sekundäranschluss ist über den Klemmkasten zugänglich. Die Isolation des Stromwandlers kann zum Beispiel mit Porzellan ausgeführt werden.

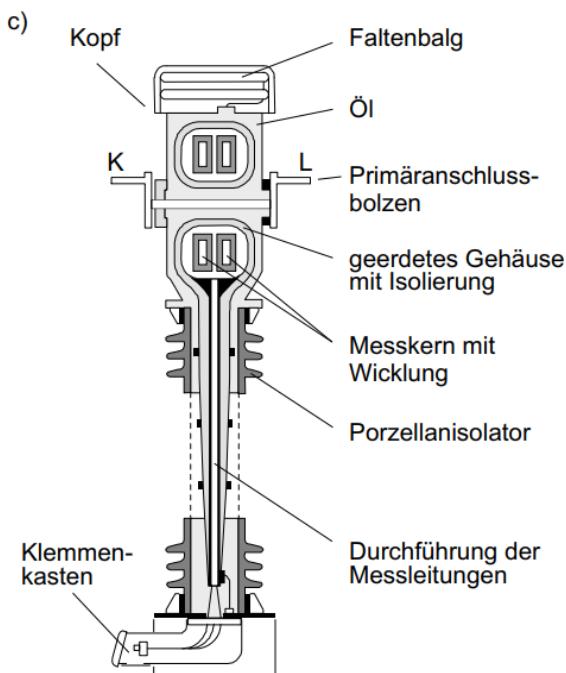


Abbildung 14: Schnittdarstellung eines Kopfwandlers

Quelle: (Heuck; Dettmann; Schulz 2013, S. 176)

Der Vorteil ist ein kurzer Primärleiter, welcher zu geringeren thermischen Verlusten führt. Dadurch können Stromwandler mit hohen Bemessungsströmen und Kurzschlussströmen ausgelegt werden. Ein Nachteil dieses Typs ist die Kühlung der Sekundärwicklung, welche in eine Papierisolierung eingebettet ist. (Vgl. „Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 81)

3.1.4 Kombinierte Strom- und Spannungswandler

Kombinierte Strom- und Spannungswandler (engl. *Combined current-voltage type*, Abbildung 11) haben den Vorteil, dass sie gleichzeitig Strom und Spannung messen können. Durch diese Konstruktion kann in der Umspannanlage Platz gespart werden. (Vgl. „Instrument Transformers Application Guide, ABB“ 2015, S. 82)

Der Stromwandler befindet sich bei dieser Konstruktion im oberen Teil und der Spannungswandler im unteren Bereich.

3.2 Physikalisches Prinzip eines Einphasentransformators

Grundsätzlich sind Stromwandler Einphasentransformatoren, die aus einem Eisenkern, einer Primärwicklung und einer Sekundärwicklung bestehen. Die Primärwicklung hat die Windungsanzahl n_1 und die Sekundärwicklung die Windungsanzahl n_2 . Die Abbildung 15 stellt den schematischen Aufbau eines Einphasentransformators und seiner physikalischen Größen dar.

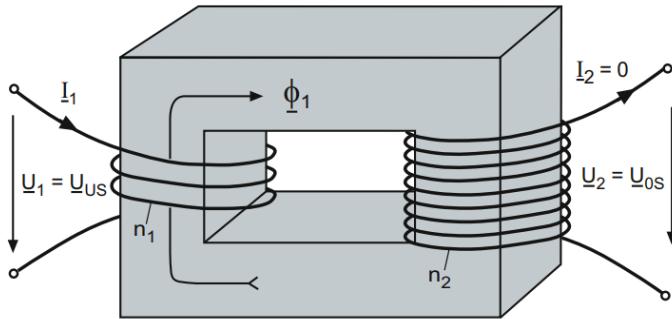


Abbildung 15: Einphasentransformator bestehend aus Primärwicklung, Sekundärwicklung und Eisenkern

Quelle: (Schwab 2012, S. 375)

U_1	Primärspannung	I_1	Primärstrom
U_2	Sekundärspannung	I_2	Sekundärstrom
n_1	Anzahl Primärwindungen	Φ_1	Primärer magnetischer Fluss
n_2	Anzahl Sekundärwindungen		

Die Übersetzung wird als Verhältnis der Windungsanzahl n_1 und n_2 gebildet. (Vgl. Schwab 2012, S. 375)

$$\ddot{u} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

Bei einem idealen Einphasentransformator gelten bei sinusförmigen Signalen die folgenden Zusammenhänge für die Spannung und für den Strom: (Vgl. Schwab 2012, S. 375)

Spannungen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\ddot{u}} \quad (2)$$

Ströme:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} = \ddot{u} = N \quad (3)$$

3.2.1 Sekundärseitiger Leerlauf eines Transformators

Zunächst wird der Transformator im unbelasteten Zustand der Sekundärwicklung erläutert.

Bei Betrachtung eines idealen Transformatoren und des Leerlaufs der Sekundärseite bewirkt eine Primärspannung U_1 einen Stromfluss I_1 durch die Primärwicklung. Dies hat einen magnetischen Fluss Φ_1 im Eisenkern zur Folge. In jeder Windung der Primärwicklung wird eine Spannung E_w induziert.

$$E_W = -j * \omega * \phi_1 \quad (4)$$

Diese Spannung (siehe Formel (4)) summiert sich über die Wicklung zu einer Spannung \underline{E}_1 und wird auch Selbstinduktionsspannung genannt.

$$E_1 = -j * \omega * \phi_1 * n_1 = j * \omega * L_1 * I_1 \quad (5)$$

Diese Selbstinduktionsspannung wirkt der außen anliegenden Primärspannung \underline{U}_1 nach der *Lenzschen* Regel entgegen. Die Selbstinduktionsspannung und die äußere Spannung \underline{U}_1 sind stets im Gleichgewicht (siehe Abbildung 16). Das heißt, der magnetische Fluss stellt sich so ein, dass sich in Summe die Spannung Null ergibt. (Vgl. Schwab 2012, S. 376)

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 = 0 \quad (6)$$

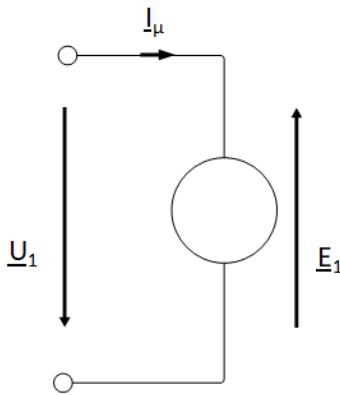


Abbildung 16: Spannungsgleichgewicht zwischen der Primärspannung \underline{U}_1 und der Selbstinduktionsspannung \underline{E}_1

Quelle: (Schwab 2012, S. 376), eigene Bearbeitung

Die Abbildung 17 stellt das dazugehörige Zeigerdiagramm dar. Der Magnetisierungsstrom I_μ eilt der Spannung um 90° nach.

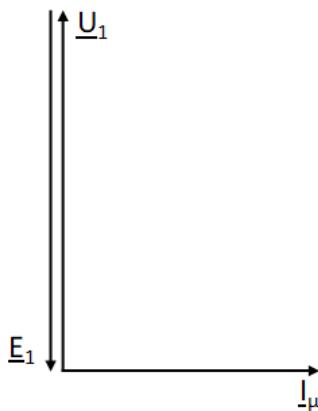


Abbildung 17: Zeigerdiagramm des Spannungsgleichgewichts

Quelle: (Schwab 2012, S. 376), eigene Bearbeitung

Im Leerlauf entspricht der Primärstrom I_1 dem Magnetisierungsstrom I_μ . Die

Selbstinduktionsspannung E_1 kann als Spannungsfall U_1 an einer Induktivität angenommen werden. (Vgl. Schwab 2012, S. 377)

$$U_1 = j * \omega * L_1 * I_1 \quad (7)$$

Die Abbildung 18 zeigt das Ersatzschaltbild eines idealen Transformators mit sekundärseitigem Leerlauf.

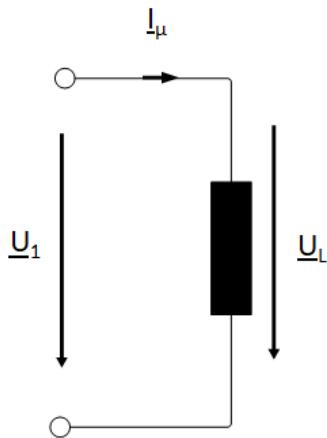


Abbildung 18: Ersatzschaltbild eines idealen Einphasentransformators, Sekundärseite ist im Leerlauf

Quelle: (Schwab 2012, S. 377), eigene Bearbeitung

Bei einem realen Transformator müssen die Verluste berücksichtigt werden. Diese werden in Wirbelstromverluste und Hystereseverluste unterteilt.

Der magnetische Fluss des Magnetisierungsstroms induziert ein elektrisches Wirbelfeld im Eisenkern. Aufgrund der Leitfähigkeit des Kerns entsteht ein Stromfluss. Diesen Strom nennt man Wirbelstrom, er wirkt sich als Verlust aus. Die Verwendung von Eisenblechen erlaubt eine Reduktion der Leitfähigkeit des Kerns, da die Bleche voneinander isoliert werden. Dadurch werden die Wirbelstromverluste reduziert. Ein weiterer Verlust entsteht bei der Ummagnetisierung der magnetischen Dipole im Eisenkern. Diese Dipole werden mit der Frequenz stetig neu ausgerichtet. Dadurch entstehen Ummagnetisierungsverluste, welche auch als Hystereseverluste bezeichnet werden.

Die Verluste verursachen in der Primärwicklung einen zusätzlichen Verluststrom I_v , welcher berücksichtigt werden muss.

$$I_1 = I_0 = I_\mu + I_v \quad (8)$$

Die Hystereseverluste und die Wirbelstromverluste werden als Eisenverluste interpretiert. In der Netzwerktheorie werden die Eisenverluste durch eine ideale Induktivität und einen ohmschen Widerstand R_{Fe} modelliert. Die Kupferverluste der Primärwicklung werden mit einem ohmschen Widerstand R_1 modelliert. (Vgl. Schwab 2012, S. 377–378)

Die Abbildung 19 zeigt das Ersatzschaltbild und das Zeigerdiagramm der Primärwicklung mit Kupferverluste und Eisenverluste.

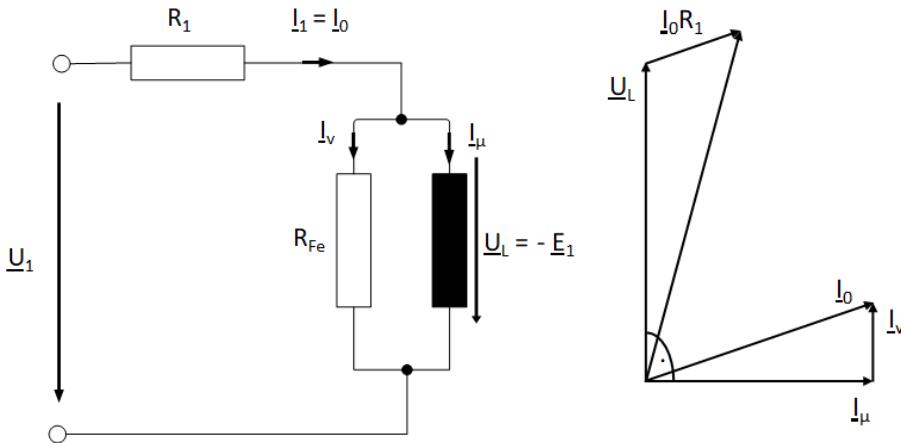


Abbildung 19: Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm der Primärwicklung mit Verlusten

Quelle: (Schwab 2012, S. 378), eigene Bearbeitung

Der magnetische Fluss durch den Magnetisierungsstrom wird in einen Hauptfluss $\underline{\Phi}_{1h}$ und in einen Streufluss $\underline{\Phi}_{1\sigma}$ aufgeteilt. Der Hauptfluss durchsetzt alle Primärwindungen und alle Sekundärwindungen. Der Streufluss durchsetzt hingegen nur die einzelnen Primärwindungen. Deshalb trägt er nicht zum magnetischen Fluss im Eisenkern bei. In der Netzwerktheorie wird die primäre Reaktanz X_1 in die Hauptreaktanz X_{1h} und in die Streureaktanz $X_{1\sigma}$ aufgeteilt. (Vgl. Schwab 2012, S. 379)

Dadurch ergibt sich das folgende Ersatzschaltbild.

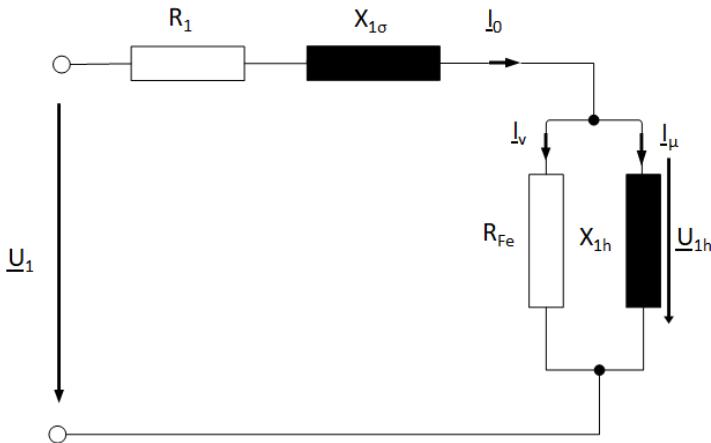


Abbildung 20: Ersatzschaltbild des Transformators im Leerlauf mit Berücksichtigung der Streuinduktivität

Quelle: (Schwab 2012, S. 380), eigene Bearbeitung

3.2.2 Sekundärseitige Belastung des Transfornators

Bei Belastung der Sekundärseite mit einer Impedanz Z_2 kommt es zu einem Stromfluss I_2 durch die Sekundärwicklung. Der Strom I_2 steht in Zusammenhang mit dem magnetischen Fluss $\underline{\Phi}_2$ und wird wie auf der Primärseite in einen Hauptfluss $\underline{\Phi}_{2h}$ und einen Streufluss $\underline{\Phi}_{2\sigma}$ unterteilt. (Vgl. Schwab 2012, S. 381)

Daraus ergibt sich das Ersatzschaltbild des belasteten Einphasentransformators in Abbildung 21.

Nach der *Lenzschen Regel* wirkt der magnetische Fluss Φ_{2h} dem magnetischen Fluss Φ_{1h} entgegen. Dadurch ist der resultierende Gesamtfluss kleiner als Φ_{1h} . Das würde bedeuten, dass in der Primärwicklung eine kleinere Quellenspannung E_{1h} induziert wird. Durch die Verringerung der induzierten Spannung E_{1h} könnte das Gleichgewicht mit der äußeren Spannung U_1 nicht eingehalten werden. Damit dieses Gleichgewicht gehalten werden kann, wird in der Primärwicklung automatisch der Primärstrom um ΔI_1 erhöht (siehe Gleichung). Dieser Strom ΔI_1 stellt sich so ein, dass der magnetische Fluss Φ_{1h} denselben Wert wie im Leerlaufbetrieb annimmt. (Vgl. Schwab 2012, S. 382)

$$I_1 = I_\mu + I_\nu + \Delta I_1 \quad (9)$$

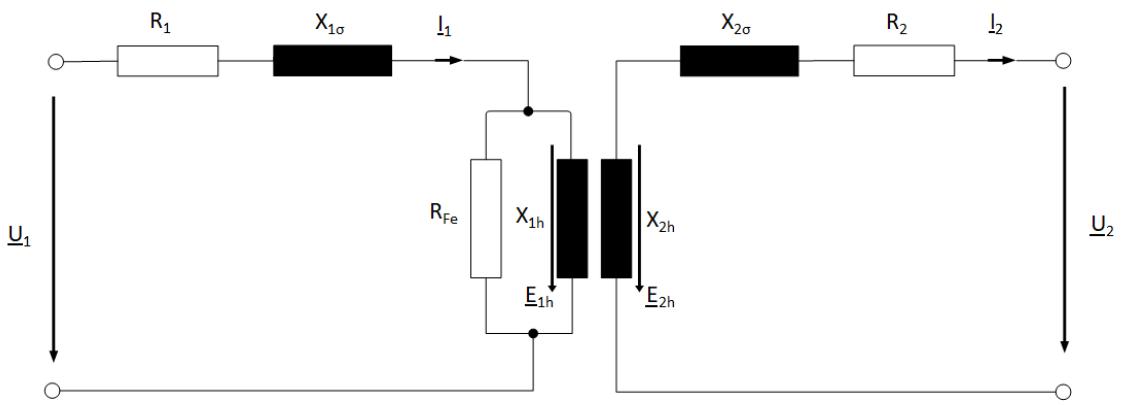


Abbildung 21: Ersatzschaltbild des Einphasentransformators unter Berücksichtigung der Streuinduktivität und der Eisenverluste bei sekundärseitiger Belastung

Quelle: (Schwab 2012, S. 382), eigene Bearbeitung

Das Ersatzschaltbild aus Abbildung 21 kann als T-Ersatzschaltbild abgebildet werden. Die Abbildung 22 zeigt das Ersatzschaltbild des Einphasentransformators mit Umrechnung der Sekundärgrößen auf die Primärseite. (Vgl. Schwab 2012, S. 385)

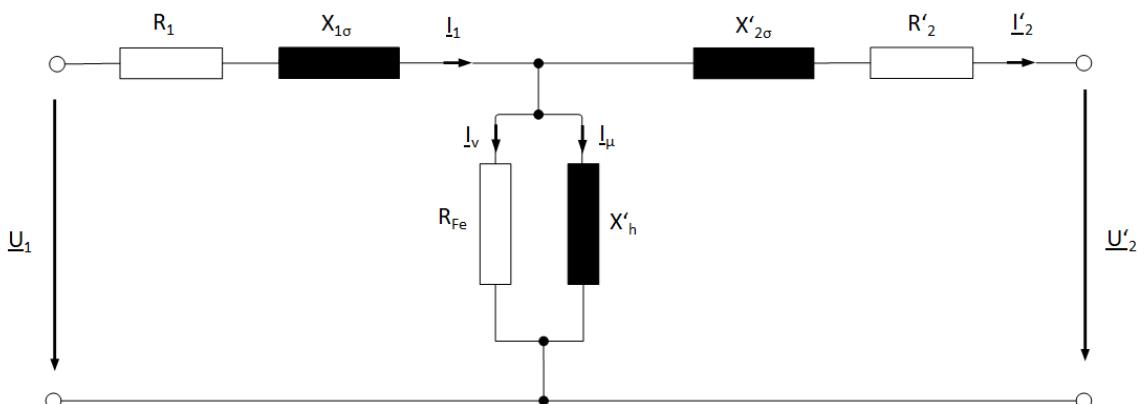


Abbildung 22: Ersatzschaltbild eines Einphasentransformators, Sekundärgrößen sind auf die Primärseite umgerechnet

Quelle: (Schwab 2012, S. 385), eigene Bearbeitung

Dieses elektrische Ersatzschaltbild wird sowohl für Spannungswandler als auch für Stromwandler angewendet.

4. Ersatzschaltbild eines Stromwandlers

Ein Stromwandler ist vom Prinzip her ein Einphasentransformator, bei dem die Netzströme auf der Primärseite durchfließen. Für Stromwandler werden zum Großteil Ringkerne verwendet. Deshalb ist es möglich, das Ersatzschaltbild aus Abbildung 22 weiter zu vereinfachen. Dies wird im Folgenden erläutert.

4.1 Durchflutungsgesetz

Für das Verständnis wird im ersten Schritt das Durchflutungsgesetz hergeleitet und im zweiten Schritt an einer Ringspule angewendet.

Betrachtet man einen langen und geraden Leiter, der von einem Strom durchflossen wird, resultiert daraus ein magnetisches Feld \vec{H} (siehe Abbildung 23).

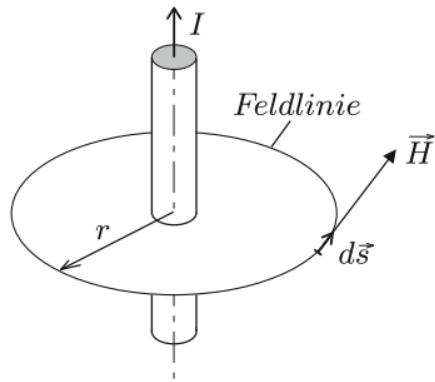


Abbildung 23: Langer, gerader, stromdurchflossener Leiter

Quelle: (Marinescu 2012, S. 173)

Ein Magnetfeld hat geschlossene Feldlinien, daher kann die Integration über die Feldlinie durchgeführt werden. (Vgl. Marinescu 2012, S. 173)

Das Durchflutungsgesetz für die Anordnung in Abbildung 23 kann durch die Anwendung der Maxwell-Gleichung für das allgemeine Durchflutungsgesetz hergeleitet werden.

Maxwell-Gleichung-Durchflutungsgesetz: (Vgl. Marinescu 2012, S. 273)

$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = \iint \vec{J} * d\vec{A} + \iint \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} * d\vec{A} \quad (10)$$

Der Strom ergibt sich durch die Integration der Stromdichte \vec{J} über die Fläche \vec{A} : (Vgl. Marinescu 2012, S. 175)

$$I = \iint \vec{J} * d\vec{A} \quad (11)$$

Da kein elektrisches Feld vorhanden ist, werden die Verschiebungsdichte \vec{D} und die zeitliche Ableitung Null:

$$\iint \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} * d\vec{A} = 0 \quad (12)$$

Daraus ergibt sich das Durchflutungsgesetz für einen stromdurchflossenen und sehr langen Leiter: (Vgl. Marinescu 2012, S. 175)

$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = I \quad (13)$$

Bei einem langen, geraden, stromdurchflossenen Leiter ergeben sich folgende Beziehungen: (Vgl. Marinescu 2012, S. 173)

$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = 2 * \pi * r * H \quad (14)$$

$$I = 2 * \pi * r * H \quad (15)$$

4.2 Ringspule

Im Folgenden wird eine Ringspule genauer betrachtet.

Eine Ringspule kann als lange, dünne Zylinderspule, die an den Enden zusammengeführt wird, betrachtet werden. Falls die Windungen N dicht um die Ringspule gewickelt sind, können die Feldlinien als kreisförmig gesehen werden. (Vgl. Marinescu 2012, S. 186)

Die Abbildung 24 zeigt den Aufbau einer Ringspule mit dem Innendurchmesser r_i und dem Außendurchmesser r_a . Die Ringspule wird in drei Bereiche unterteilt:

- ① Bereich 1: $0 \leq r \leq r_i$
- ② Bereich 2: $r_i \leq r \leq r_a$
- ③ Bereich 3: $r \geq r_a$

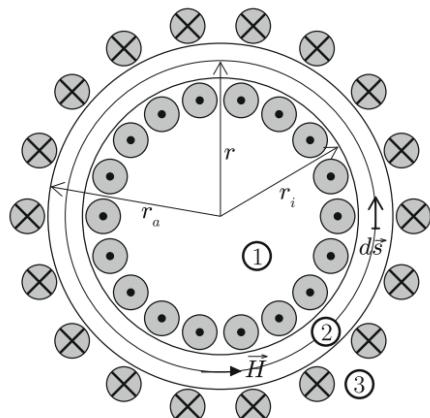


Abbildung 24: Prinzipieller Aufbau einer Ringspule

Quelle: (Marinescu 2012, S. 187)

Wird der Integrationspfad $d\vec{s}$ im Bereich 1 festgelegt, gibt es keine magnetische Feldstärke H, weil kein Strom umflossen wird. (Vgl. Marinescu 2012, S. 186)

$$H_1 = 0 \quad (16)$$

Der Leiterstrom wird N-mal umschlossen, wenn der Integrationspfad $d\vec{s}$ im Bereich 2 festgelegt wird. Daraus ergibt sich das Durchflutungsgesetz über den Integrationspfad $d\vec{s}$:

$$\oint \vec{H} * d\vec{s} = N * I \quad (17)$$

Die Länge des Integrationspfades $d\vec{s}$ entspricht in diesem Fall dem Umfang eines Kreises mit dem Radius r:

$$d\vec{s} = 2 * \pi * r \quad (18)$$

Daraus lässt sich die Gleichung umstellen: (Vgl. Marinescu 2012, S. 187)

$$H_2 * 2 * \pi * r = N * I \quad (19)$$

$$H_2 = \frac{N * I}{2 * \pi * r} \quad (20)$$

Wird der Integrationspfad $d\vec{s}$ außerhalb, also im Bereich 3, gewählt, ist keine magnetische Feldstärke H vorhanden: (Vgl. Marinescu 2012, S. 186)

$$\oint H_3 * ds = N * I - N * I \quad (21)$$

$$H_3 = 0 \quad (22)$$

Außerhalb der Ringspule gibt es praktisch kein magnetisches Feld. Deshalb ist eine Ringspule annähernd streufrei, unter der Voraussetzung, dass die Ringspule schmal und dicht gewickelt ist. (Vgl. Marinescu 2012, S. 188)

4.3 Stromwandler-Ersatzschaltbild für eine Ringspule

Zur Transformation der Netzströme auf die Sekundärströme von 1 A oder 5 A ist im Vergleich zu Spannungswandlern eine relativ geringe Anzahl an Windungen erforderlich. Daher ist der Einfluss der Streuinduktivität bei Stromwandlern geringer als bei Spannungswandlern. (Vgl. Heuck; Dettmann; Schulz 2013, S. 176)

Der primäre Wicklungswiderstand wird vernachlässigt, weil bei einem Stromwandler meistens ein Leiter, also eine Windung, durch die Ringspule geführt wird. Der primäre Widerstand liegt dann im Mikroohm-Bereich und ist daher vernachlässigbar klein.

Aus der Begründung von Kapitel 4.2, dass eine Ringspule nahezu streufrei ist, kann die Komplexität des Einphasentransformator-Ersatzschaltbildes aus Abbildung 22 reduziert werden.

Daher kann das Ersatzschaltbild, wie in Abbildung 25 dargestellt, vereinfacht werden. Dieses Ersatzschaltbild gilt für Stromwandler mit einer Ringspule und vernachlässigbar kleinem Streufluss.

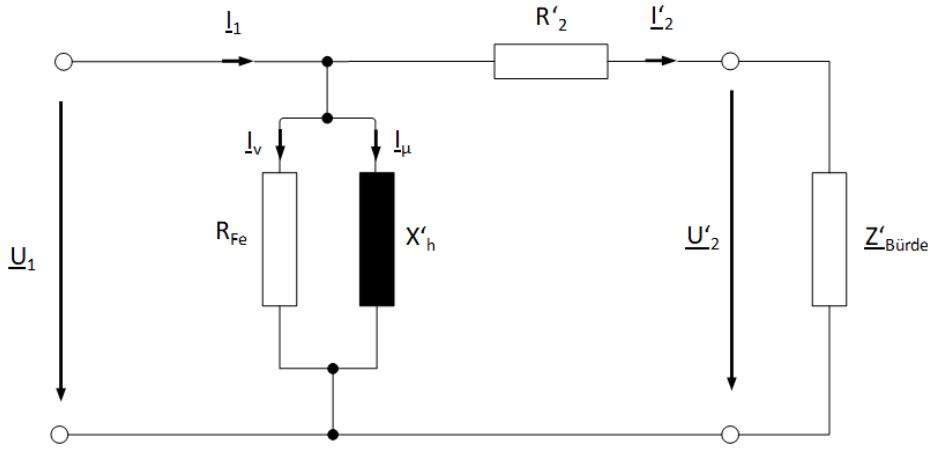


Abbildung 25: Ersatzschaltbild eines Stromwandlers für eine Ringspule, Sekundärgrößen sind auf die Primärseite umgerechnet

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Der CT Analyzer verwendet das Ersatzschaltbild in Abbildung 25 unter Vernachlässigung der Streuinduktivität. In weiterer Folge wird das CT Analyzer Ersatzschaltbild-Modell als ESB-CTA bezeichnet.

4.4 Berechnung der Übertragungsgenauigkeit des Modells ESB-CTA

Für die Berechnung der Übertragungsgenauigkeit müssen die einzelnen Komponenten des Ersatzschaltbildes (ESB-CTA) bestimmt werden. Die Bestimmung der Komponenten erfolgt in drei Messzyklen, die automatisiert ablaufen. Die zu messenden Größen sind in der Farbe Rot gekennzeichnet.

4.4.1 Messzyklus 1: Bestimmung des Sekundärwicklungswiderstandes

Für die Messung des Sekundärwicklungswiderstandes R_{CT} wird ein Gleichstrom I_{DC} in die Sekundärwicklung eingeprägt und die Spannung U_{DC} gemessen. Das Messprinzip wird in der Abbildung 26 dargestellt.

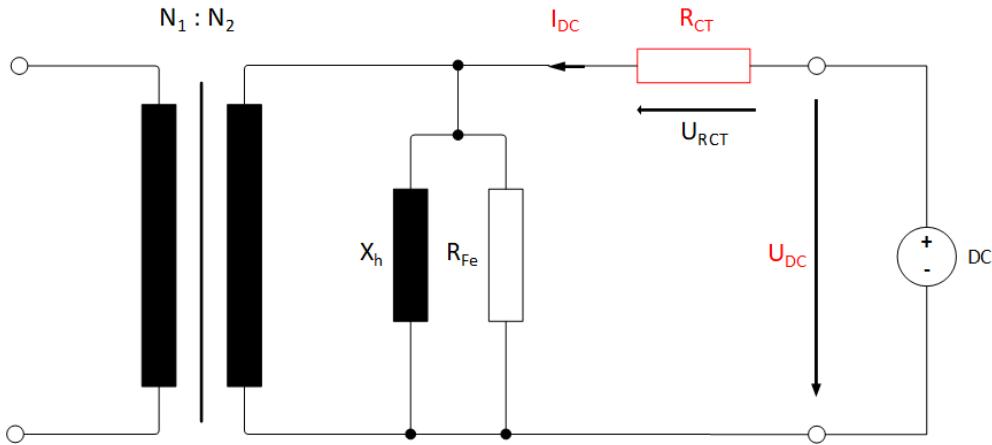


Abbildung 26: Messprinzip des CT Analyzers für die Bestimmung des Sekundärwicklungswiderstands R_{CT}

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Der Gleichstrom bewirkt eine Sättigung des Eisenkerns, wodurch die Impedanz des Eisenkerns vernachlässigbar klein wird. Der Kern wirkt dann wie ein Kurzschluss. Dies hat zur Folge, dass die gemessene Spannung U_{DC} dem Spannungsabfall U_{RCT} entspricht.

Die Stabilisierung der Messsignale dauert je nach Kernmaterial und Baugröße bei Stromwählern einige Sekunden. Die Abbildung 27 stellt den zeitlichen Verlauf der Widerstandsmessung dar. Es wird die Gleichspannung U_{DC} , der Gleichstrom I_{DC} und der Sekundärwicklungswiderstand R_{CT} als Funktion der Zeit dargestellt.

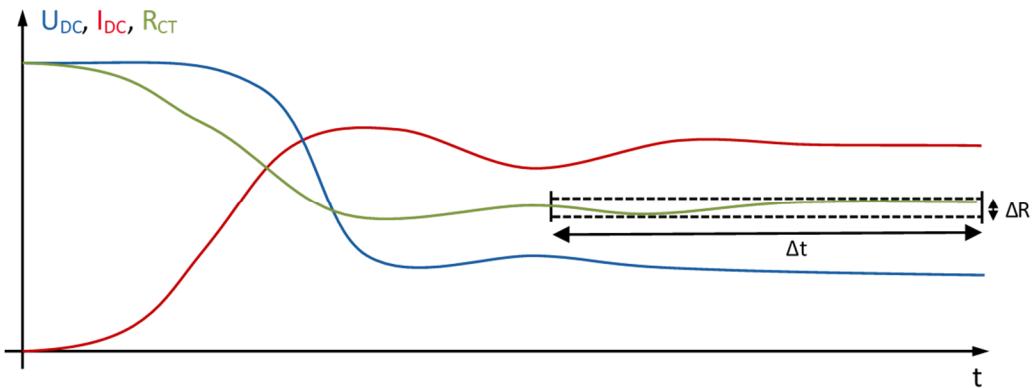


Abbildung 27: Zeitlicher Verlauf der Messsignale für die Sekundärwiderstandsmessung

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Sobald der Strom innerhalb einer Zeit Δt eingeschwungen ist, stabilisiert sich auch der Sekundärwicklungswiderstand. Die Messung des Gleichstroms I_{DC} und der Gleichspannung U_{DC} wird durchgeführt, wenn die Welligkeit des Widerstandwertes ΔR innerhalb eines bestimmten Wertes liegt. Die Berechnung des Sekundärwiderstandes erfolgt dann durch die folgende Gleichung.

$$R_{CT} = \frac{U_{DC}}{I_{DC}} \quad (23)$$

4.4.2 Messzyklus 2: Bestimmung der Magnetisierungskurve

Die Magnetisierungskurve ist eine nichtlineare Funktion und charakterisiert den Eisenkern. Die Darstellung der Magnetisierungskurve erfolgt über die Spannung als Funktion des Stroms. Eine Erhöhung der Spannung bewirkt eine größere Spannungszeitfläche, was dem magnetischen Fluss entspricht. Es gibt zwei Möglichkeiten, den magnetischen Fluss im Eisenkern zu erhöhen, was in weiterer Folge näher erläutert wird.

Für das Induktionsgesetz mit N Windungen gilt die Formel (24): (Vgl. Marinescu 2012, S. 271)

$$u(t) = -N * \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (24)$$

Eine Änderung des magnetischen Flusses $\phi(t)$ bewirkt eine Induktion der Spannung $u(t)$. Für die weitere Betrachtung wird der magnetische Fluss $\phi(t)$ als Sinusfunktion angenommen. (Vgl. Fischer 2016, S. 309)

$$\phi(t) = \hat{\phi} * \sin(\omega * t) \quad (25)$$

Durch das Einsetzen des magnetischen Flusses (Formel (25)) in die Gleichung für das Induktionsgesetz (Formel (24)) kann der Effektivwert der induzierten Spannung U berechnet werden. Man spricht bei den Formeln (26) und (27) auch von den Transformationsformeln.

$$U = \frac{2 * \pi * f}{\sqrt{2}} * \hat{\phi} * N \quad (26)$$

Daraus ergibt sich die Spannung U : (Vgl. Fischer 2016, S. 309)

$$U = 4,44 * f * \hat{\phi} * N \quad (27)$$

Im nächsten Schritt wird für den Scheitelwert des magnetischen Flusses $\hat{\phi}$ die Beziehung in Formel (28) angewendet:

$$\hat{\phi} = \hat{B} * A_{Fe} \quad (28)$$

Der Scheitelwert der magnetischen Flussdichte wird mit \hat{B} und der Eisenquerschnitt mit A_{Fe} bezeichnet. Durch das Einsetzen der Formel (28) in (27) ergibt sich die magnetische Flussdichte \hat{B} :

$$\hat{B} = \frac{U}{4,44 * f * N * A_{Fe}} \quad (29)$$

Es ist ersichtlich, dass die magnetische Flussdichte entweder durch Erhöhung der Spannung oder durch Verringerung der Frequenz vergrößert werden kann.

Die konventionellen Messungen verwenden die Methode der Spannungserhöhung bei gleichbleibender Frequenz. Die Frequenz entspricht dabei der Netzfrequenz. Diese

Messung erfordert dadurch eine Spannungsquelle mit größerer Leistung, da bei Stromwandlern (abhängig vom Typ des Stromwandlers und des Eisenkerns) die Spannung einige Kilovolt und die Ströme einige Ampere betragen können.

Der CT Analyzer verwendet deshalb die Methode, bei der die Spannung so lange erhöht wird, bis die maximale Leistung des Geräts erreicht wird. Danach reduziert er die Frequenz unter Berücksichtigung der Verluste. Da die Eisenkernverluste frequenzabhängig sind, muss die Magnetisierungskurve über einen Algorithmus auf die Netzfrequenz zurück modelliert werden. Dadurch kann das Messgerät kleinere Ströme und Spannungen verwenden, was die Messeinrichtung kleiner und handlicher macht.

Die Aufteilung und die Ermittlung der Kernverluste sowie das Verfahren zum Testen eines Stromwandlers sind von OMICRON electronics GmbH patentiert. (Vgl. Süss; Dr. Krüger; Kaufmann 2005)

Das folgende Bild zeigt das Messprinzip des CT Analyzers mit einer Spannungsquelle und variabler Frequenz. Die Messung der Magnetisierungskurve erfolgt unter Berücksichtigung des Spannungsabfalls U_{RCT} . Mit diesem Ansatz kann für die Charakterisierung der Magnetisierungskurve die tatsächliche am Eisenkern abfallende Spannung U_K berechnet werden.

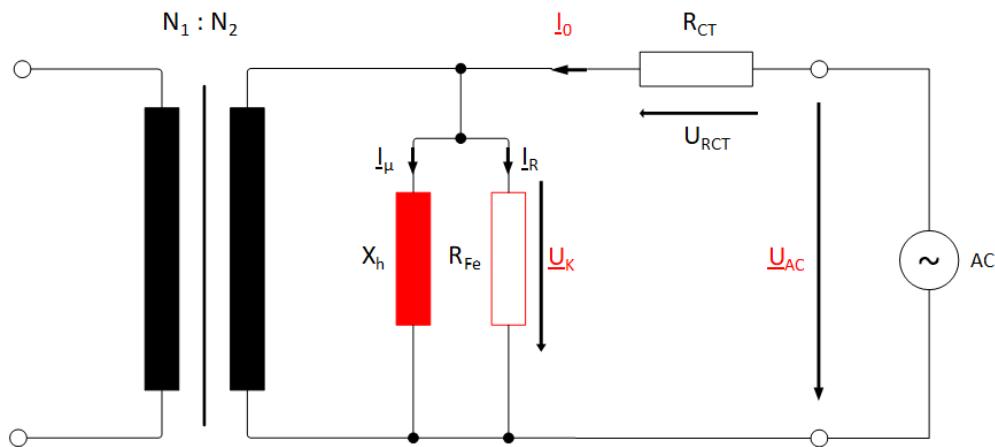


Abbildung 28: Messprinzip des CT Analyzers zur Bestimmung der Magnetisierungskurve
Quelle: Eigene Ausarbeitung

Wird eine sinusförmige Wechselspannung $u_{AC}(t)$ an die Sekundärseite des Stromwandlers angelegt, resultiert daraus ein Magnetisierungsstrom $i_0(t)$. Dieser Magnetisierungsstrom $i_0(t)$ kann als Funktion der Kernspannung $u_K(t)$ dargestellt werden und wird als Hysteresekurve bezeichnet (siehe Ziffer 1 in Abbildung 29). Diese Hysteresekurve wird innerhalb einer Periodendauer T durchlaufen. Solange keine Sättigungseffekte im Eisenkern auftreten, ist die Hysteresekurve näherungsweise ellipsenförmig. Durch die weitere Erhöhung der Spannung wird der Sättigungsbereich erreicht, bei dem der magnetische Fluss im Eisenkern nicht mehr weiter erhöht werden kann. Der maximale Punkt jeder Hysteresekurve wird ermittelt und dargestellt. Diese wird als Magnetisierungskurve bezeichnet (siehe Ziffer 2 in Abbildung 29).

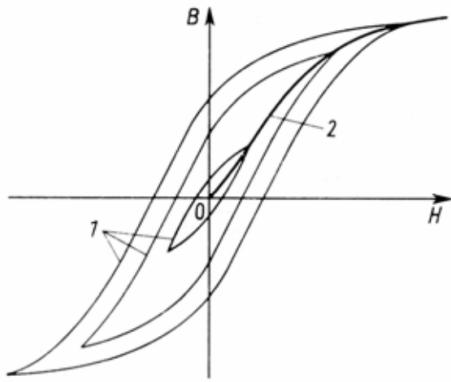


Abbildung 29: Hysteresekurve und Magnetisierungskurve

Quelle: (Steffen; Bausch 2007, S. 151)

4.4.3 Messzyklus 3: Bestimmung der Übersetzung

Die Übersetzung wird auch als Windungszahlverhältnis bezeichnet. Die Ermittlung der Übersetzung des Stromwandlers erfolgt über eine Spannungsmessung. An der Sekundärseite des Stromwandlers wird eine Wechselspannung U_{AC} angelegt, auf der Primärseite wird die Spannung U_{Prim} gemessen.

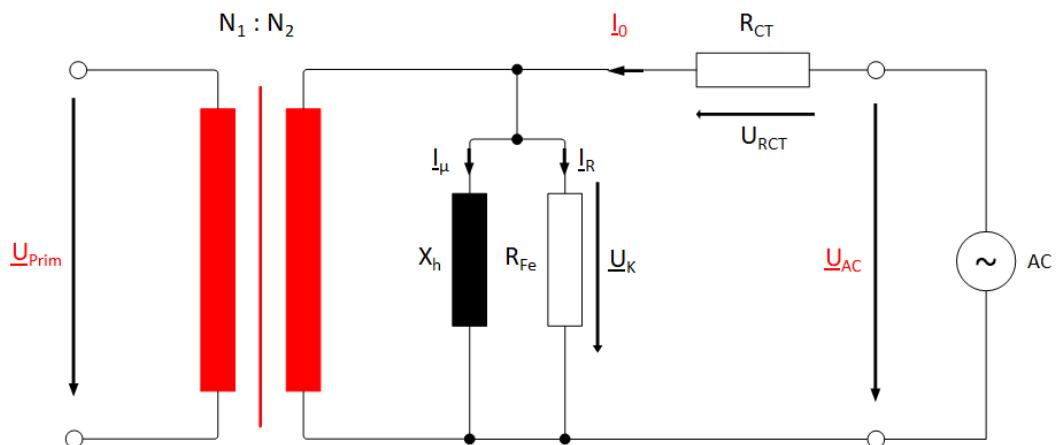


Abbildung 30: Messprinzip des CT Analyzers zur Bestimmung der Übersetzung

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Für die Berechnung der Übersetzung ist es von Bedeutung, dass die Kernspannung U_K anstatt der Klemmspannung U_{AC} verwendet wird. Da der Sekundärwicklungswiderstand bekannt ist, kann der Spannungsabfall über den Widerstand U_{RCT} berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich für die Kernspannung U_K die Gleichung (30):

$$U_K = U_{AC} - U_{RCT} = U_{AC} - I_0 * R_{CT} \quad (30)$$

Die Übersetzung bzw. das Windungszahlverhältnis N wird mit der Formel (31) bestimmt:

$$N = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_K}{U_{Prim}} \quad (31)$$

Die Messung des Windungszahlverhältnisses kann nicht bei der Netzfrequenz erfolgen. Der Grund liegt darin, dass in einem Umspannwerk sehr viele Störungen mit der Netzfrequenz vorhanden sind. Diese Störungen können unter anderem durch Schalthandlungen im Netz entstehen, welche dann auf der Primärseite des Stromwandlers eingekoppelt werden. Dadurch entsteht bei der Messung der Primärspannung ein hoher Messfehler bei der Netzfrequenz. Die Abbildung 31 zeigt die Messung des Windungszahlverhältnisses N eines Stromwandlers als Funktion der Frequenz in einer 220 kV-Umspannanlage. Bei einer Netzfrequenz von 50 Hz ist es deutlich ersichtlich, dass der Übersetzungsfehler eine hohe Abweichung von etwa 10 Windungen hat.

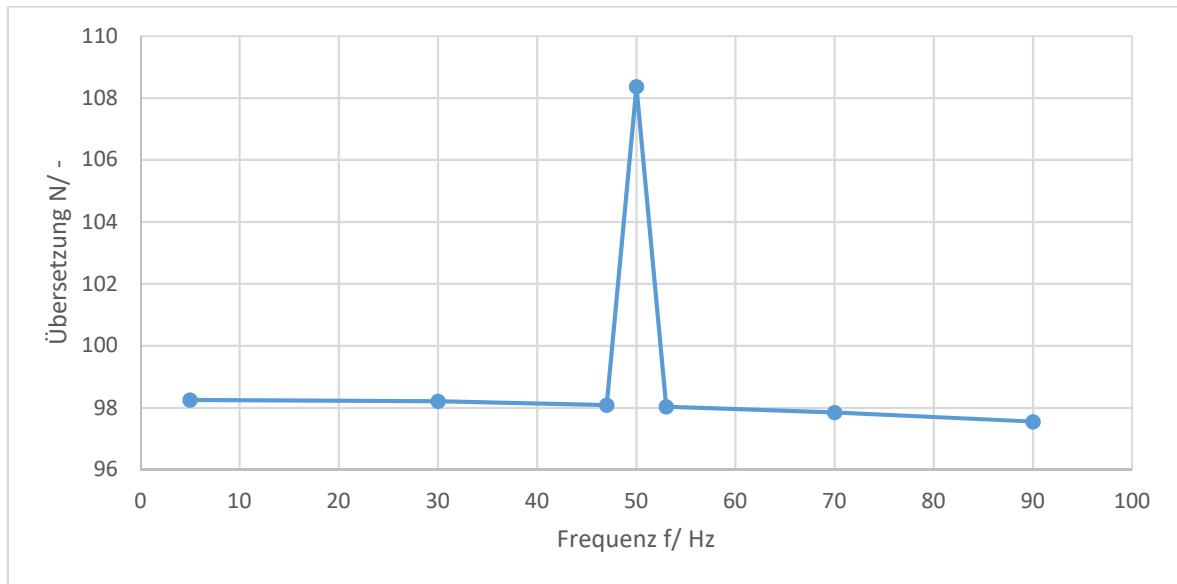


Abbildung 31: Messung der Übersetzung eines Stromwandlers als Funktion der Frequenz in einer 220 kV-Umspannanlage

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Deshalb wird eine sogenannte frequenzselektive Messung durchgeführt. Das heißt, die Übersetzung wird nicht bei der Netzfrequenz gemessen, sondern bei einer davon abweichenden Frequenz und dann auf die Netzfrequenz interpoliert.

4.4.4 Berechnung der Übertragungsgenauigkeit

Mit diesen drei Messzyklen sind alle Komponenten des Ersatzschaltbildes ESB-CTA bekannt. Daraus lässt sich der Übertragungsfehler bei einer bestimmten Bürde berechnen. Der Übertragungsfehler beinhaltet den Übersetzungsfehler und den Phasenfehler von der Primärseite auf die Sekundärseite des Stromwandlers.

Die Berechnung des Übertragungsfehlers basiert auf der Magnetisierungskurve. Für eine bestimmte Bürde des Stromwandlers ergibt sich eine Kernspannung. Bei dieser Kernspannung kann der entsprechende Magnetisierungsstrom in der Magnetisierungskurve gefunden werden. Daraus lassen sich dann der Übersetzungsfehler und der Phasenfehler bei einem bestimmten Sekundärstrom

ermitteln. Die Berechnungen erfolgen auf Basis des Ersatzschaltbildes in Abbildung 32 und des dazugehörigen Zeigerdiagramms in Abbildung 33.

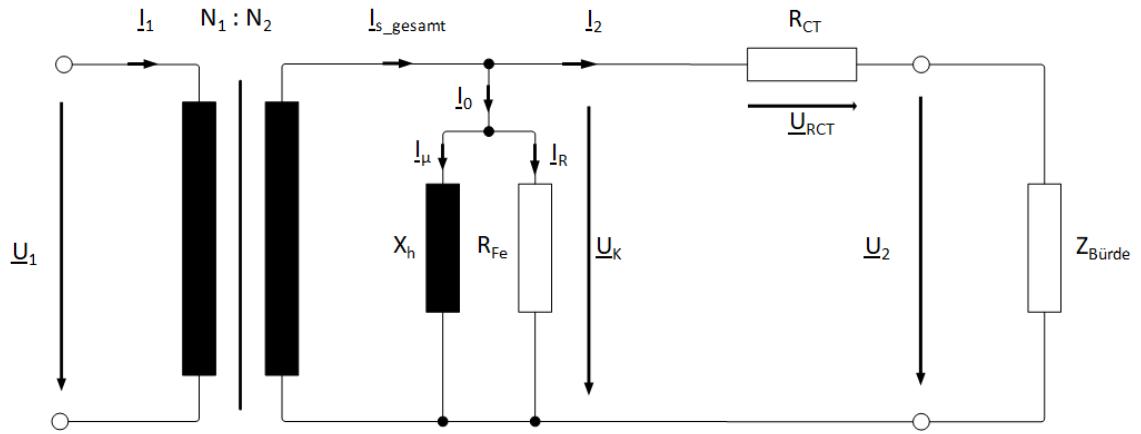


Abbildung 32: Ersatzschaltbild des Stromwandlers zur Berechnung des Übertragungsfehlers,
Modell: ESB-CTA

Quelle: Eigene Ausarbeitung

U_1	Primärspannung	R_{CT}	Sekundärwicklungswiderstand
U_2	Sekundärspannung, Bürdenspannung	$Z_{Bürde}$	Bürdeneimpedanz
U_K	Kernspannung	I_1	Primärstrom
U_{RCT}	Spannung der Sekundärwicklung	I_{s_gesamt}	Gesamtsekundärstrom
N_1	Anzahl Primärwindungen	I_2	Sekundärstrom
N_2	Anzahl Sekundärwindungen	I_0	Magnetisierungsstrom
$N_2:N_1, N$	Windungszahlverhältnis	I_μ	Induktiver Anteil von I_0
X_h	Hauptinduktivität des Kerns	I_R	Ohm'scher Anteil von I_0
R_{Fe}	Wirbelstromwiderstand (Eisenverluste)		

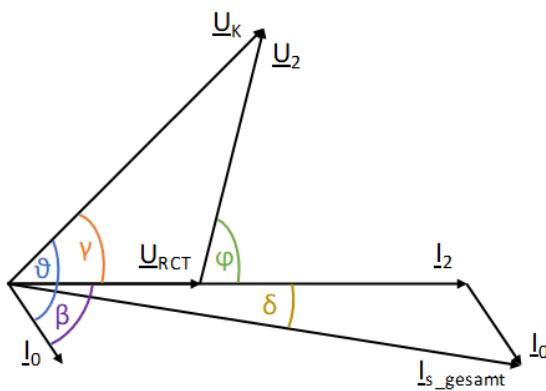


Abbildung 33: Zeigerdiagramm des Ersatzschaltbildes für die Berechnung des Übertragungsfehlers
Quelle: Eigene Ausarbeitung

- | | | | |
|-------------|---|-----------|--|
| ϑ | Phase zwischen Kernspannung und Magnetisierungsstrom | φ | Phase zwischen Sekundärspannung und Sekundärstrom |
| γ | Phase zwischen Kernspannung und Sekundärstrom | δ | Phase zwischen Gesamtsekundärstrom und Sekundärstrom, Phasenfehler |
| β | Phase zwischen Sekundärstrom und Magnetisierungsstrom | | |

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Berechnung der Übertragungsfehler näher erläutert.

1. Berechnung der Bürde:

$$R_b = \frac{S_b}{I_{sn}^2} * \cos \phi \quad (32)$$

$$X_b = \frac{S_b}{I_{sn}^2} * \sin \phi \quad (33)$$

2. Berechnung der Last:

$$R_{Last} = R_{CT} + R_b \quad (34)$$

$$X_{Last} = X_b \quad (35)$$

$$Z_{Last} = \sqrt{R_{Last}^2 + X_{Last}^2} \quad (36)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{X_{Last}}{R_{Last}} \quad (37)$$

3. Berechnung des Sekundärstroms:

Zur Bestimmung des Übertragungsfehlers bei einem bestimmten Sekundärstrom bzw. Primärstrom (zum Beispiel 50 % des Sekundärnennstroms I_{sn}), muss für die Berechnung der entsprechende Sekundärstrom I_2 verwendet werden:

$$I_2 = x * I_{sn} \quad (38)$$

4. Berechnung der Kernspannung:

$$U_K = I_2 * Z_{Last} \quad (39)$$

5. Berechnung des Magnetisierungsstroms und des Verlustwinkels:

Aus der Magnetisierungskurve werden der Magnetisierungsstrom I_0 und die Phase ϑ bei der entsprechenden Kernspannung U_K gesucht.

$$\begin{aligned} U_K &\rightarrow I_0 \\ U_K &\rightarrow \vartheta \end{aligned}$$

6. Berechnung der Phasenverschiebung zwischen dem Sekundärstrom I_2 und dem Magnetisierungsstrom I_0 :

$$\beta = \vartheta - \gamma \quad (40)$$

7. Berechnung des Gesamtsekundärstroms I_{s_gesamt} :

$$I_{s_gesamt} = \sqrt{(I_2 + I_0 * \cos \beta)^2 + (I_0 * \sin \beta)^2} \quad (41)$$

8. Berechnung des Primärstroms:

$$I_1 = I_{s_gesamt} * N_{mess} \quad (42)$$

9. Berechnung des Übersetzungsfehlers:

$$\varepsilon = \frac{I_2 - \frac{I_1}{N_{nom}}}{\frac{I_1}{N_{nom}}} \quad (43)$$

10. Berechnung des Phasenfehlers zwischen I_{s_gesamt} und I_2 :

$$\delta = \tan^{-1} \frac{I_0 * \sin \beta}{I_2 + I_0 * \cos \beta} \quad (44)$$

4.4.5 Grenzwerte der Übertragungsfehler

Die Grenzwerte der Übertragungsfehler werden in den Normen IEC 61869-2 und IEEE C57.13 definiert. Die Grenzwerte sind von der Genauigkeitsklasse und vom Typ des Stromwandlers abhängig. Es werden zwei verschiedene Typen unterschieden: Messstromwandler und Schutzstromwandler.

Im Allgemeinen hat ein Messstromwandler die Aufgabe, einen Strom von 5 % bis 120 % möglichst genau zu messen. Diese Stromwandler werden zum Beispiel für die Abrechnung an den Endkunden verwendet. Ein Schutzstromwandler hat die Aufgabe, sehr hohe Fehlerströme, wie zum Beispiel einen 20-fachen Nennstrom, mit einer akzeptablen Genauigkeit zu übertragen. Damit kann im Fehlerfall garantiert werden, dass der Strom richtig interpretiert wird und entsprechende Abschaltungen im Netz durchgeführt werden können.

Die Tabelle 2 stellt die Genauigkeitsgrenzwerte nach der Norm IEC 61869-2 für verschiedene Messstromwandler mit unterschiedlichen Genauigkeitsklassen dar.

Tabelle 2: Genauigkeitsgrenzwerte für Messstromwandler nach IEC 61869-2

Quelle: (IEC 61869-2 2013, S. 21), eigene Bearbeitung

Genauigkeitsklasse	Übersetzungsfehler ε					Phasenfehler δ			
	$\pm \%$				\pm Minuten				
	Prozent des Nennstroms				Prozent des Nennstroms				
	5	20	100	120	5	20	100	120	
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	
1	3	1,5	1	1	180	90	60	60	

Die Tabelle 3 stellt die Genauigkeitsgrenzwerte nach der Norm IEC 61869-2 für Schutzstromwandler mit unterschiedlichen Genauigkeitsklassen dar.

Tabelle 3: Genauigkeitsgrenzwerte für Schutzstromwandler nach IEC 61869-2

Quelle: (IEC 61869-2 2013, S. 23), eigene Bearbeitung

Genauigkeitsklasse	Übersetzungsfehler ε	Phasenfehler δ
	$\pm \%$	\pm Minuten
	Prozent des Nennstroms	Prozent des Nennstroms
	100	100
5P und 5PR	1	60
10P und 10PR	3	-

An dieser Stelle ist anzumerken, dass es weitere Genauigkeitsklassen für Messstromwandler und Schutzstromwandler gibt, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, da diese für die Arbeit nicht relevant sind. Des Weiteren gibt es je nach Genauigkeitsklasse zusätzliche Anforderungen, die eingehalten werden müssen.

Die Abbildung 34 stellt ein typisches Übertragungsfehlerdiagramm dar. Die farbliche Kennzeichnung der Kurven und deren Bedeutung ist in dieser Arbeit vereinheitlicht, sofern nicht anders dokumentiert. Die Kurven in der Farbe Rot mit einer durchgezogenen Linie sind die Grenzwerte nach der Norm IEC 61869-2 (siehe auch Tabelle 2). Die hellgrüne Kurve (durchgezogene Linie) ist der berechnete Fehler des CT Analyzer Messgeräts bei der Nennbürde des Stromwandlers. Die Kurve in der Farbe Magenta mit der durchgezogenen Linie ist die Nachberechnung des Fehlers in MATLAB, basierend auf den Messdaten des CT Analyzers bei der entsprechenden Nennbürde. Für beide Fehlerkurvenberechnungen wurde das Modell ESB-CTA verwendet. Der Übersetzungsfehler wird in Prozent und der Phasenfehler in Minuten angegeben. Dieser Stromwandler hält in diesem Fall die Genauigkeitsklasse ein, da die Fehlerkurven innerhalb des Toleranzbandes liegen.

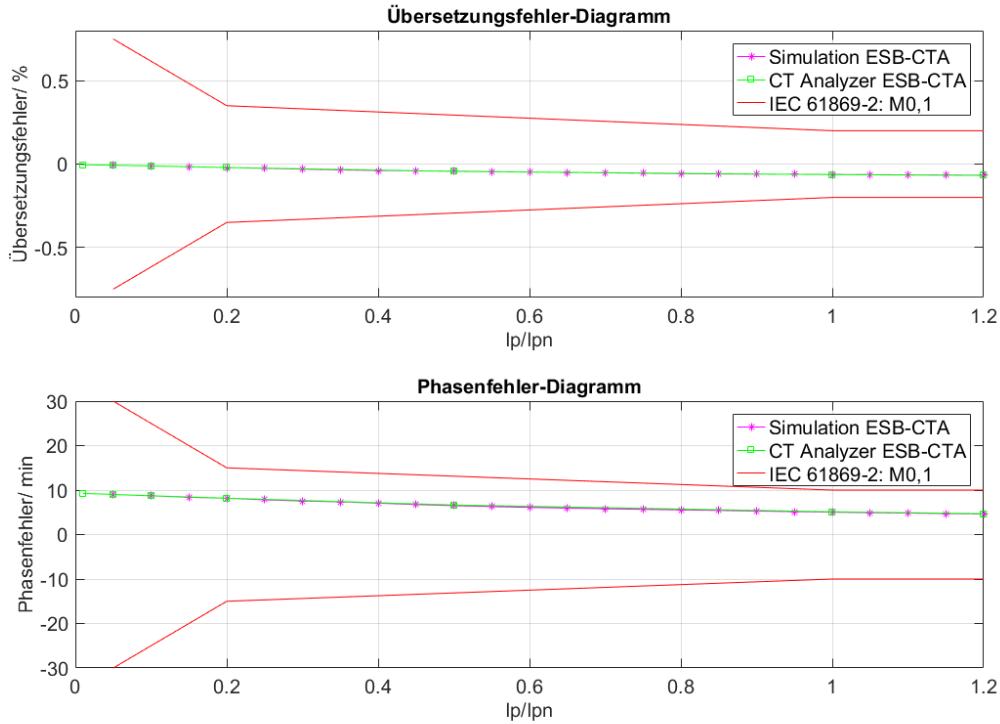


Abbildung 34: Übertragungsfehler eines Stromwandlers mit den dazugehörigen Grenzwerten nach der Norm IEC 61869-2

Quelle: Eigene Ausarbeitung

5. Erweiterung des elektrischen Ersatzschaltbildes

Auf dem Markt gibt es eine große Anzahl an verschiedenen Stromwandlerarten, die je nach Kundenanforderung spezifiziert werden. Diese können unter anderem verschiedene Eigenschaften haben. Einige Eigenschaften sind hier angeführt:

- Stromwandler mit großer Übersetzung (zum Beispiel $N = 10000$)
- Stromwandler mit kleiner Übersetzung (zum Beispiel $N = 50$)
- geschlossener Eisenkern
- Eisenkern mit Luftspalte
- ringförmiger oder ovaler Eisenkern

Aus Kapitel 4.3 geht hervor, dass das Ersatzschaltbild für eine Ringspule gültig ist. Das heißt, der Eisenkern ist ringförmig. Gibt es eine Abweichung von dieser Form, ist die Streuinduktivität nicht mehr vernachlässigbar. Des Weiteren wird die Gültigkeit des Ersatzschaltbildes (siehe Abbildung 25) mit einer dichten Sekundärwicklung beschrieben. Das heißt, die Windungsanzahl beziehungsweise die Übersetzung muss entsprechend groß sein, damit dies erfüllt werden kann. Eine Schlussfolgerung daraus ist, dass die Relevanz der Streuinduktivität bei kleinen Übersetzungen zunehmen wird.

5.1 Elektrisches Ersatzschaltbild mit Streuinduktivität ESB-LS

Aus den oben genannten Gründen macht es Sinn, die Streuinduktivität $L_{2\sigma}$ zu berücksichtigen.

Die Streuinduktivität hat einen Einfluss auf die Berechnung der Kernspannung zur Bestimmung des Übertragungsfehlers des Stromwandlers. Durch die zusätzliche Induktivität ändert sich die sekundärseitige Last Z_{Last} . Zum anderen beeinflusst die Streuinduktivität auch die Messung des Windungszahlverhältnisses N , da ein zusätzlicher Spannungsabfall entsteht (siehe Kapitel 7). Ein weiterer Modellierungsfehler bei der Nichtberücksichtigung der Streuinduktivität entsteht bei der Berechnung der Kernspannung zur Ermittlung der Magnetisierungskurve.

Die Streuinduktivität wird durch Variation des Wertes angenommen, indem der Übertragungsfehler mit den Referenzwerten verglichen wird und Übereinstimmungen gesucht werden.

Das Ersatzschaltbild des CT Analyzers aus Abbildung 32 wird durch die Streuinduktivität $L_{2\sigma}$ mit der dazugehörigen Impedanz $X_{2\sigma}$ in der Abbildung 35 erweitert.

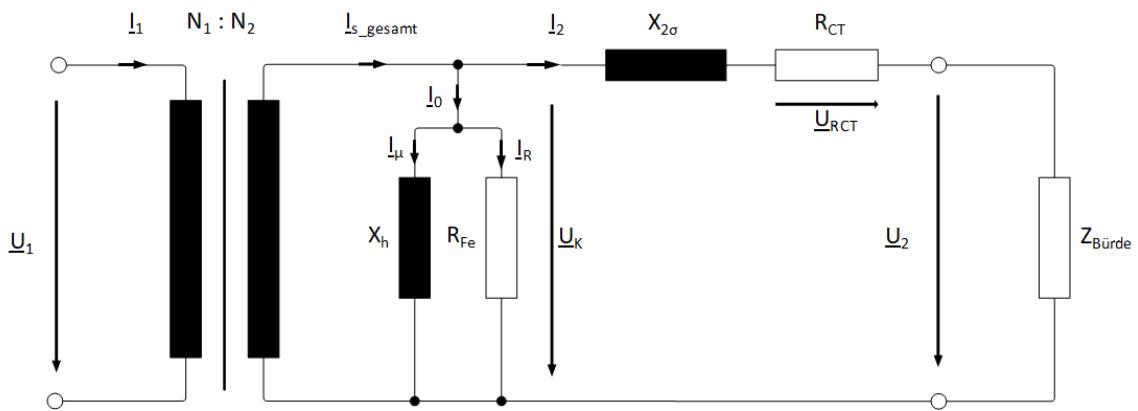


Abbildung 35: Ersatzschaltbild des Stromwandlers mit der Erweiterung der Streuinduktivität
Quelle: Eigene Ausarbeitung

Das Ersatzschaltbildmodell in Abbildung 35 wird in weiterer Folge als ESB-LS bezeichnet.

5.2 Erweiterung der Übertragungsfehlerberechnung mit der Streuinduktivität

Die Berechnung des Übertragungsfehlers erfolgt wie in Kapitel 4.4.4 beschrieben. Bei der Anwendung des Modells ESB-LS gibt es eine Änderung in der Berechnung unter Punkt 2 - Berechnung der Last. In dieser Berechnung muss die Streuinduktivität inkludiert werden. Die Änderungen sind in den folgenden Formeln braun markiert.

$$X_{2\sigma} = 2 * \pi * f * L_{2\sigma} \quad (45)$$

$$R_{Last} = R_{CT} + R_b \quad (46)$$

$$X_{Last} = X_b + \textcolor{brown}{X}_{2\sigma} \quad (47)$$

$$Z_{Last} = \sqrt{R_{Last}^2 + X_{Last}^2} \quad (48)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{X_{Last}}{R_{Last}} \quad (49)$$

Durch die zusätzliche Komponente der Streuinduktivität ändern sich der Betrag und der Winkel der Last. Da die Lastimpedanz Z_{Last} zur Bestimmung der Kernspannung U_K notwendig ist, hat diese Impedanz einen Einfluss auf den Übertragungsfehler, auf den Übersetzungsfehler und auf den Phasenfehler des Stromwandlers.

6. Fehlerkomponenten eines Stromwandlers

Zur Bestimmung der zu untersuchenden Komponente des elektrischen Ersatzschaltbildes werden mittels einer Sensitivitätsanalyse diejenigen Parameter gesucht, die den größten Einfluss auf den Übertragungsfehler haben könnten. Für diese Analyse wird die sekundärseitige Streuinduktivität mitberücksichtigt. Dieses Kapitel soll die Sensitivität der einzelnen Komponenten des elektrischen Ersatzschaltbildes auf den komplexen Fehlervektor \underline{F} untersuchen.

Die Bestimmung der Sensitivität mit dem komplexen Fehlervektor für Spannungswandler wurde bereits in einer Dissertation durchgeführt. (Vgl. Freiburg 2014, S. 73)

Dieses Konzept soll hier für Stromwandler angewendet werden.

6.1 Komplexer Fehlervektor eines Stromwandlers

Der komplexe Fehlervektor \underline{F} des Stromwandlers bestimmt sich aus dem Sekundärstrom \underline{I}_2 und dem Primärstrom \underline{I}_1 . Die Abbildung 36 stellt das Zeigerdiagramm des komplexen Fehlervektors dar, wobei der Fehlervektor dem Magnetisierungsstrom \underline{I}_0 entspricht.

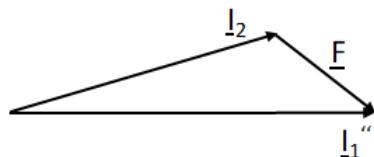


Abbildung 36: Zeigerdiagramm des komplexen Fehlervektors

Quelle: Eigene Ausarbeitung

$$\underline{F} = \underline{I}_0 = \underline{I}_1'' - \underline{I}_2 \quad (50)$$

$$\underline{F} = \underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_1}{N} - \frac{U_K}{R_{CT} + R_b + j * \omega * (L_{2\sigma} + L_b)} \quad (51)$$

Der Betrag des komplexen Fehlervektors ergibt:

$$|F| = I_0 = \frac{I_1}{N} - \frac{U_K}{Z_{Last}} \quad (52)$$

$$\text{mit: } Z_{Last} = \sqrt{(R_{CT} + R_b)^2 + \omega^2 * (L_{2\sigma} + L_b)^2} \quad (53)$$

Durch das Einsetzen der Transformationsformel (siehe Formel (26)) ergibt sich der Betrag des Fehlervektors in Abhängigkeit der Materialeigenschaften des Eisenkerns.

$$|F| = I_0 = \underbrace{\frac{I_1}{N}}_{\text{Term 1}} - \underbrace{\frac{\sqrt{2} * \pi * f * \hat{B} * A_{Fe}}{Z_{Last}}}_{\text{Term 2}} \quad (54)$$

Mit dem idealen Windungszahlverhältnis N im Term 1 wird die Einstellung des Fehlers ermöglicht. Somit wäre nur der Term 2 fehlerbestimmend. Der Fehler des Stromwandlers wird mit steigender Frequenz f, steigender magnetischer Flussdichte \hat{B} und größerem Eisenquerschnitt A_{Fe} kleiner. Eine Verringerung der Lastimpedanz bewirkt eine Vergrößerung des Fehlerbetrags.

Der Realteil des komplexen Fehlervektors entspricht dem Betragsfehler und der Imaginärteil des Fehlervektors dem Winkelfehler.

6.2 Sensitivitätsanalyse

Mit einer Sensitivitätsanalyse wird die Sensitivität bzw. Empfindlichkeit einer Funktion in Abhängigkeit eines Parameters untersucht. Im weiteren Sinne bedeutet das in diesem Fall, welchen Einfluss die Bestimmung einzelner Parameter hat, wenn ein Modell angewendet wird. Durch geeignete Substitutionen wird im Folgenden die theoretische, relative Sensitivität der einzelnen Komponenten aus dem Ersatzschaltbild ESB-LS berechnet.

1. Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Kernspannung

Substitution:

$$\underline{a} = R_{CT} + R_b + j * \omega * (L_{2\sigma} + L_b) \quad (55)$$

Daraus ergibt sich der komplexe Fehlervektor:

$$\underline{F}(\underline{U}_K) = \underline{I}_1'' - \frac{\underline{U}_K}{\underline{a}} \quad (56)$$

Sensitivität:

$$\frac{\partial \underline{F}}{\partial \underline{U}_K} = -\frac{1}{\underline{a}} \quad (57)$$

Die Sensitivität $\frac{\partial \underline{F}}{\partial \underline{U}_K}$ hängt nicht von der Höhe der Kernspannung ab, sondern nur von der sekundärseitigen Last des Stromwandlers. Je kleiner die Last, desto größer ist die Sensitivität.

2. Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstands

Substitution:

$$\underline{b} = R_b + j * \omega * (L_{2\sigma} + L_b) \quad (58)$$

Daraus ergibt sich der komplexe Fehlervektor:

$$\underline{F}(R_{CT}) = \underline{I}_1'' - \frac{\underline{U}_K}{R_{CT} + \underline{b}} \quad (59)$$

Sensitivität:

$$\frac{\partial \underline{F}}{\partial R_{CT}} = \frac{\underline{U}_K}{(\underline{b} + R_{CT})^2} \quad (60)$$

Die Sensitivität $\frac{\partial \underline{F}}{\partial R_{CT}}$ hängt linear von der Höhe der Kernspannung ab. Mit kleiner werdendem Sekundärwicklungswiderstand wird die Sensitivität größer und der Fehler kleiner.

3. Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit des Bürdenwiderstandes

Substitution:

$$\underline{c} = R_{CT} + j * \omega * (L_{2\sigma} + L_b) \quad (61)$$

Daraus ergibt sich der komplexe Fehlervektor:

$$\underline{F}(R_b) = \underline{I}_1'' - \frac{\underline{U}_K}{R_b + \underline{c}} \quad (62)$$

Sensitivität:

$$\frac{\partial \underline{F}}{\partial R_b} = \frac{\underline{U}_K}{(\underline{c} + R_b)^2} \quad (63)$$

Die Sensitivität $\frac{\partial \underline{F}}{\partial R_b}$ hängt linear von der Höhe der Kernspannung ab. Mit kleiner werdendem Bürdenwiderstand wird die Sensitivität größer und der Fehler kleiner.

4. Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Bürdeninduktivität

Substitution:

$$\underline{d} = R_{CT} + R_b + j * \omega * L_{2\sigma} \quad (64)$$

Daraus ergibt sich der komplexe Fehlervektor:

$$\underline{F}(L_b) = \underline{I}_1'' - \frac{\underline{U}_K}{j * \omega * L_b + \underline{d}} \quad (65)$$

Sensitivität:

$$\frac{\partial \underline{F}}{\partial L_b} = \frac{j * \omega * \underline{U}_K}{(\underline{d} + j * \omega * L_b)^2} \quad (66)$$

Die Sensitivität $\frac{\partial \underline{F}}{\partial L_b}$ hängt linear von der Höhe der Kernspannung ab. Mit kleiner werdender Bürdeninduktivität wird die Sensitivität größer und der Fehler kleiner.

5. Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Streuinduktivität

Substitution:

$$\underline{e} = R_{CT} + R_b + j * \omega * L_b \quad (67)$$

Daraus ergibt sich der komplexe Fehlervektor:

$$\underline{F}(L_{2\sigma}) = \underline{I}_1'' - \frac{\underline{U}_K}{j * \omega * L_{2\sigma} + \underline{e}} \quad (68)$$

Sensitivität:

$$\frac{\partial \underline{F}}{\partial L_{2\sigma}} = \frac{j * \omega * \underline{U}_K}{(\underline{e} + j * \omega * L_{2\sigma})^2} \quad (69)$$

Die Sensitivität $\frac{\partial \underline{F}}{\partial L_{2\sigma}}$ hängt linear von der Höhe der Kernspannung ab. Mit kleiner werdender Streuinduktivität wird die Sensitivität größer und der Fehler kleiner.

6. Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Übersetzung

Substitution:

$$\underline{f} = \frac{\underline{U}_K}{R_{CT} + R_b + j * \omega * (L_{2\sigma} + L_b)} \quad (70)$$

$$\underline{I}_1'' = \frac{\underline{I}_1}{N} \quad (71)$$

Daraus ergibt sich der komplexe Fehlervektor:

$$\underline{F} = \frac{\underline{I}_1}{N} - \underline{f} \quad (72)$$

Sensitivität:

$$\frac{\partial \underline{F}}{\partial N} = - \frac{\underline{I}_1}{N^2} \quad (73)$$

Die Sensitivität $\frac{\partial \underline{F}}{\partial N}$ ist unabhängig von der Kernspannung. Sie ist negativ und

umgekehrt proportional zum Quadrat der Übersetzung. Je kleiner die Übersetzung, desto größer werden die Sensitivität und der Fehler.

7. Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz Z_K

Für diese Sensitivitätsbetrachtung wird die Kernspannung U_K der komplexen Fehlerfunktion durch den Magnetisierungsstrom I_0 und die Eisenkernimpedanz Z_K ausgedrückt.

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1'' - \frac{\underline{I}_0 * \underline{Z}_K}{R_{CT} + R_b + j * \omega * (L_{2\sigma} + L_b)} \quad (74)$$

Daraus ergibt sich die komplexe Fehlerfunktion:

$$\underline{F}(Z_K) = \underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_1''}{1 + \frac{\underline{Z}_K}{R_{CT} + R_b + j * \omega * (L_{2\sigma} + L_b)}} \quad (75)$$

Substitution:

$$\underline{g} = R_{CT} + R_b + j * \omega * (L_{2\sigma} + L_b) \quad (76)$$

Komplexe Fehlerfunktion:

$$\underline{F}(Z_K) = \underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_1''}{1 + \frac{\underline{Z}_K}{\underline{g}}} = \frac{\underline{I}_1'' * \underline{g}}{\underline{g} + \underline{Z}_K} \quad (77)$$

Sensitivität:

$$\frac{\partial \underline{F}}{\partial \underline{Z}_K} = - \frac{\underline{I}_1'' * \underline{g}}{\left(\underline{g} + \underline{Z}_K\right)^2} = - \frac{\underline{I}_1}{N} * \frac{\underline{g}}{\left(\underline{g} + \underline{Z}_K\right)^2} \quad (78)$$

Die Sensitivität $\frac{\partial \underline{F}}{\partial \underline{Z}_K}$ hängt linear von der Höhe des Primärstroms ab. Mit kleiner werdender Kernimpedanz werden die Sensitivität und der Fehler größer.

6.3 Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse

Aus der Sensitivitätsanalyse ist ersichtlich, dass die Streuinduktivität bei kleinen Werten eine hohe Sensitivität bekommt. Die Streuinduktivität wird im Modell des CT Analyzers jedoch nicht berücksichtigt. Deshalb ist es für die weiteren Untersuchungen von Bedeutung, die Streuinduktivität für die Betrachtung der Stromwandlergenauigkeit mitzuberücksichtigen, da diese Streuinduktivitäten als klein anzunehmen sind. Des Weiteren ist aus dem Kapitel 4.2 ersichtlich, dass die Streuinduktivität nur vernachlässigbar ist, falls es sich um eine Ringspule handelt, welche dicht gewickelt und möglichst schmal ist.

Zudem zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass die Sensitivität bei sehr kleinen Übersetzungen mit dem Quadrat des Windungszahlverhältnisses negativ in den komplexen Fehlervektor eingeht. Der Fehler wird mit kleinerer Übersetzung größer. Dies ist ein Grund für die Untersuchung von Stromwählern mit niedriger Übersetzung.

Die Sensitivitätsanalyse der Eisenkernimpedanz zeigt, dass die Sensitivität und der Fehler bei kleinen Impedanzen größer werden. Am Anfang und in der Sättigung des Eisenkerns (siehe Abbildung 37, Bereich 1 und Bereich 2) ist die Eisenkernimpedanz am geringsten. Dort kann die größte Sensitivität erwartet werden. Die drei Bereiche in Abbildung 37 werden hier erläutert.

Bereich 1: Die Steigung der Magnetisierungskurve ist im Bereich 1 flach, was einer niedrigen Impedanz des Eisenkerns entspricht. Durch die geringere Impedanz fließt ein größerer Magnetisierungsstrom. Ein größerer Magnetisierungsstrom bewirkt eine Verringerung des Sekundärstroms. Dadurch ist der Übersetzungsfehler im Bereich 1 größer.

Bereich 2: Im Bereich 2 ist die Magnetisierungskurve über einen weiten Bereich linear und erreicht die größte Steigung. Die Impedanz ist in diesem Bereich sehr groß. Das bedeutet, dass der Magnetisierungsstrom kleiner ist und der Übersetzungsfehler minimal wird.

Bereich 3: Im Sättigungsbereich der Magnetisierungskurve ist die Steigung wie im Bereich 1 flach. Es kann kein zusätzlicher magnetischer Fluss im Eisenkern aufgebaut werden. Die Impedanz wird dadurch wieder kleiner und der Übersetzungsfehler größer. Der Eisenkern verhält sich im Bereich 3 näherungsweise wie bei einem Kurzschluss.

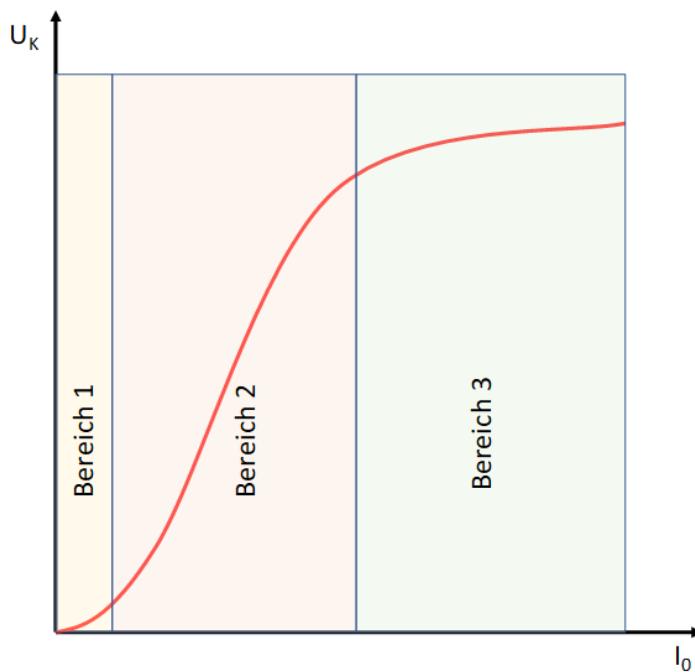


Abbildung 37: Prinzipieller nichtlinearer Verlauf einer Magnetisierungskurve eines Stromwählers
Quelle: Eigene Ausarbeitung

6.4 Allgemeine Sensitivität auf den Fehler

Für die Simulationen wird zur Bestimmung der Sensitivität eine Parametervariation durchgeführt. Im Folgenden wird detailliert erläutert, was unter allgemeiner Sensitivität verstanden wird.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses:

Die Sensitivität wird berechnet, indem das Windungszahlverhältnis N mit einem Initialwert (gemessener Wert) startet und dann mit einer einstellbaren Schrittweite (Formel (80), stepSize) erhöht wird.

$$N_1 = N_{\text{gemessen}} \quad (79)$$

$$N_i = N_{i-1} + \text{stepSize} \quad (80)$$

Für jedes Windungszahlverhältnis N wird der Übertragungsfehler für jeden Arbeitspunkt berechnet. Es wird das Modell ESB-CTA verwendet.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes:

Die Sensitivität wird berechnet, indem der Sekundärwiderstand R_{CT} mit einem Initialwert (gemessener Wert) startet und dann mit einer einstellbaren Schrittweite (Formel (82), stepSize) erhöht wird.

$$R_{CT1} = R_{CT,\text{gemessen}} \quad (81)$$

$$R_{CT,i} = R_{CT,i-1} + \text{stepSize} \quad (82)$$

Bei jeder Iteration werden die sekundäre Last (Z_{Last}) und der Übertragungsfehler berechnet. Es wird das Modell ESB-CTA verwendet. Das Windungszahlverhältnis N ist der gemessene Wert der CT Analyzer-Messung.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität:

Die Sensitivität auf den Übertragungsfehler wird dargestellt, indem die Streuinduktivität variiert wird. Die Streuinduktivität wird in der Berechnung der Last (Z_{Last}) und in der Berechnung des Übertragungsfehlers berücksichtigt. Die Variation der Streuinduktivität startet mit einem angenommenen Initialwert (Formel (83)), da die Streuinduktivität nicht bekannt ist.

$$L_{\sigma1} = L_{\sigma,\text{Annahme}} \quad (83)$$

$$L_{\sigma i} = L_{\sigma,i-1} + \text{stepSize} \quad (84)$$

Für jede Streuinduktivität werden die sekundäre Last (Z_{Last}) und der Übertragungsfehler berechnet. Es wird das Modell ESB-LS verwendet. Das Windungszahlverhältnis N ist der gemessene Wert der CT Analyzer-Messung. Für die einzelnen Variationswerte der Streuinduktivität werden die folgenden Indizes verwendet: $L_{\sigma1}, L_{\sigma2}, L_{\sigma3}, L_{\sigma4} \dots L_{\sigma i}$

Nicht zu verwechseln: Die allgemeine Sekundärstreuinduktivität wird mit $L_{2\sigma}$ bezeichnet.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz:

Die Eisenkernimpedanz wird aus der Magnetisierungskurve berechnet.

$$\underline{I}_0 = I_0 * e^{i*\vartheta} \quad (85)$$

$$\underline{U}_K = U_K * e^{-i*0} \quad (86)$$

$$Z_K = \frac{U_K}{\underline{I}_0} \quad (87)$$

Diese Eisenkernimpedanz Z_K wird für jeden Messpunkt der Magnetisierungskurve berechnet. Durch die Variation der Eisenkernimpedanz verschieben sich die Magnetisierungskurve und der Verlustwinkel zwischen Kernspannung U_K und Magnetisierungsstrom I_0 . Die Abbildung 38 stellt die Magnetisierungskurve und den Verlustwinkel dar. Eine Erhöhung der Eisenkernimpedanz bewirkt eine Verschiebung der Magnetisierungskurve nach links zu kleineren Magnetisierungsströmen.

Für jede Magnetisierungskurve wird der Übertragungsfehler berechnet. Für die Simulation wurde das Modell ESB-CTA verwendet. Das Windungszahlverhältnis N ist der gemessene Wert der CT Analyzer-Messung.

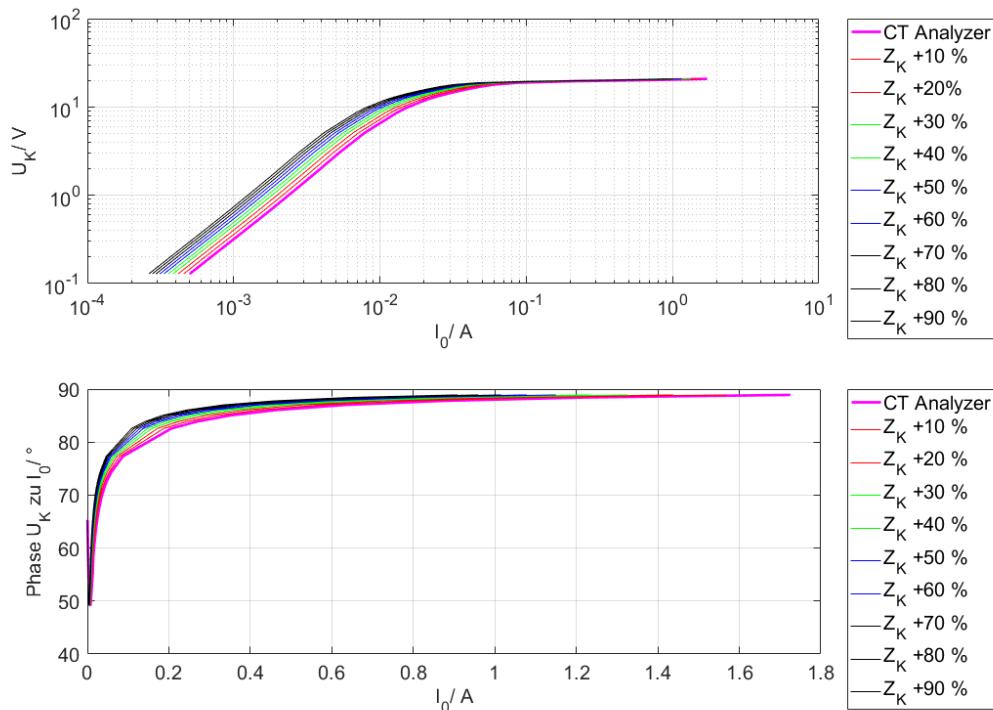


Abbildung 38: Variation der Eisenkernimpedanz, dargestellt als Magnetisierungskurve, ITL-Stromwandler (520-33318)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Darstellung der Ergebnisse der allgemeinen Sensitivität werden übersichtshalber nur für einen Arbeitspunkt bei 100 % des Primärnennstroms I_{pn} dargestellt. Zusätzlich werden die Simulationspunkte mit einer Regression mit einem Polynom zweiter Ordnung angenähert. Damit kann verifiziert werden, ob die Simulationen bei realen Stromwandlern dieselben Tendenzen wie in Kapitel 6.2 zeigen.

6.5 Verifikation der Sensitivität anhand von Messungen

In Kapitel 6.2 wurde die relative Sensitivität auf den Fehlervektor in Abhängigkeit der verschiedenen Parameter berechnet. Im Folgenden soll die allgemeine Sensitivität (siehe Kapitel 6.4) des absoluten Fehlers anhand von realen Messdaten an verschiedenen Stromwandlern mit den in Kapitel 6.2 ermittelten Abhängigkeiten verglichen werden. Das Ziel ist es, dieselben Tendenzen wie in Kapitel 6.2 für das Verhalten des Fehlers in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, des Sekundärwiderstandes, der Streuinduktivität und der Eisenkernimpedanz zu finden. Für den Vergleich wurden die Stromwandler in Tabelle 4 verwendet.

Tabelle 4: Spezifikation der Stromwandler-Untersuchungsobjekte

EPRO	JR0.5	Seriennummer:	3-16-1569
I_{pn}	50 A	Bürde	7,5 VA, $\cos \varphi = 0,8$
I_{sn}	1 A	Klasse	5P
Ritz	KSO 1811	Seriennummer:	05-594259
I_{pn}	2000 A	Bürde	2,5 VA, $\cos \varphi = 1$
I_{sn}	1 A	Klasse	M0,1
Ritz	KSO 882	Seriennummer:	01-568886
I_{pn}	1000 A	Bürde	30 VA, $\cos \varphi = 1$
I_{sn}	1 A	Klasse	5P
ITL		Seriennummer:	39373
I_{pn}	50 A	Bürde	2,5 VA, $\cos \varphi = 1$
I_{sn}	1 A	Klasse	M0,5
ITL		Seriennummer:	39375
I_{pn}	75 A	Bürde	2,5 VA, $\cos \varphi = 1$
I_{sn}	5 A	Klasse	M0,2
ITL		Seriennummer:	39376
I_{pn}	100 A	Bürde	5 VA, $\cos \varphi = 0,8$
I_{sn}	1 A	Klasse	M0,5
Astra		Seriennummer:	3408420
I_{pn}	100 A	Bürde	5 VA, $\cos \varphi = 0,8$
I_{sn}	5 A	Klasse	M0,3

6.5.1 Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses

Eine Variation des Windungszahlverhältnisses soll den Einfluss auf den Fehler ermitteln. Es wird der Ritz-Stromwandler KSO 1811 (05-594259) verwendet. Die Abbildung 39 stellt den Verlauf des Übertragungsfehlers bei verschiedenen Übersetzungen dar. Mit zunehmendem Windungszahlverhältnis wird der Übersetzungsfehler größer, wobei der Phasenfehler gleich bleibt.

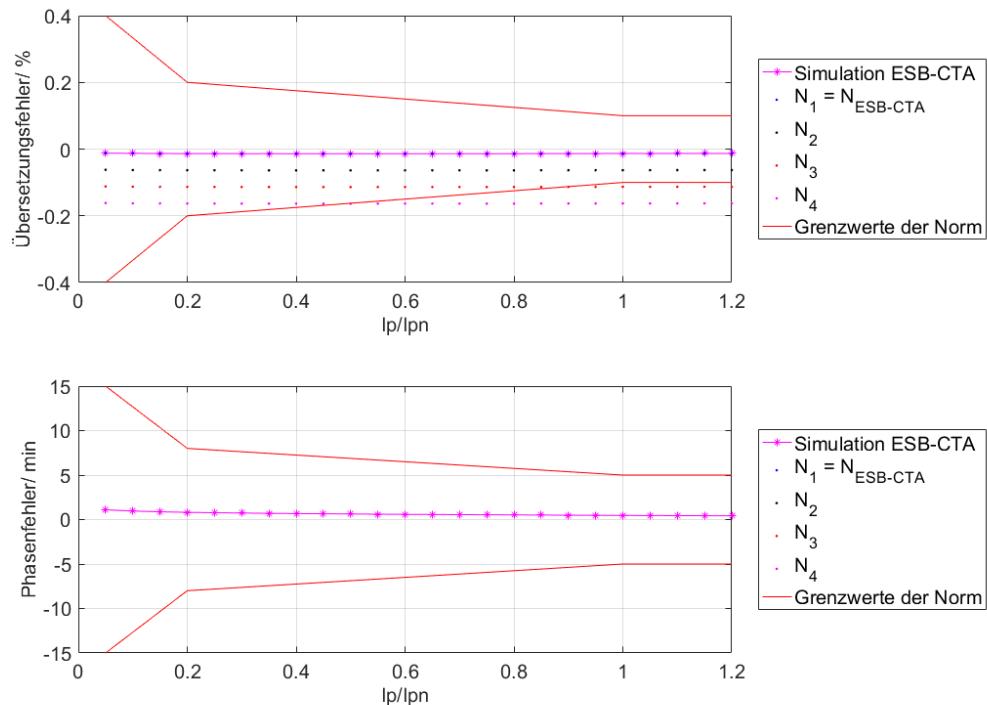


Abbildung 39: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei Variation des Windungszahlverhältnisses, Ritz-Stromwandler (05-594259)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Abbildung 40 stellt die Sensitivität auf den Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms für verschiedene Stromwandler dar. Die Simulationspunkte (x) werden mit einer Regression mit einem Polynom zweiter Ordnung (--) angenähert. Es sind vergleichbare Tendenzen ersichtlich, wie in Kapitel 6.2 hergeleitet.

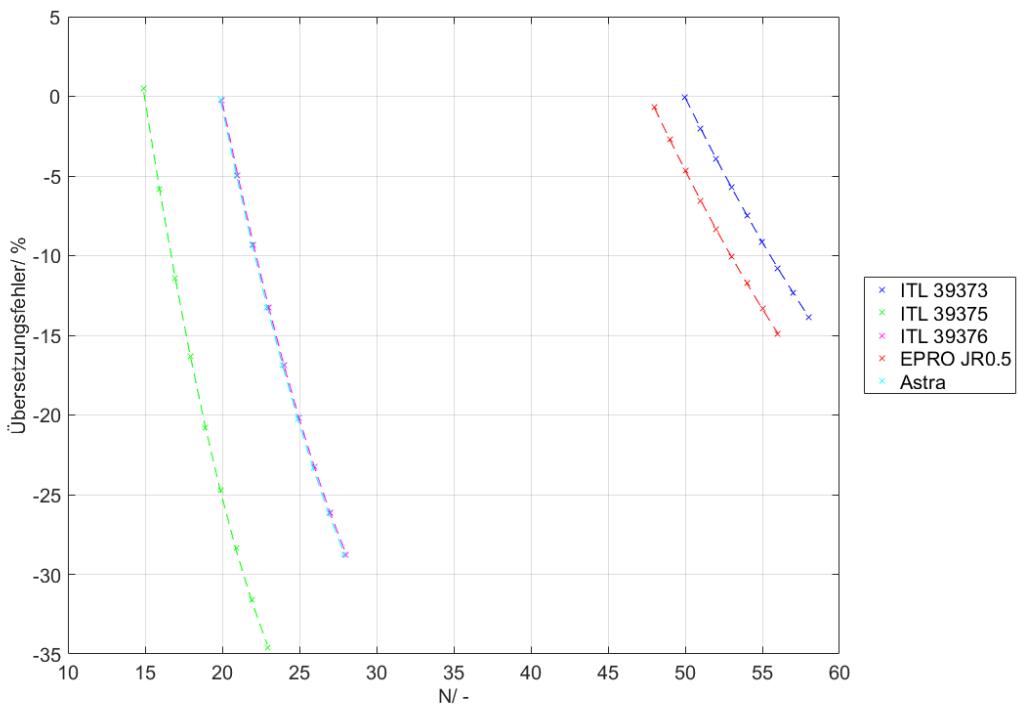


Abbildung 40: Übersetzungsfehler als Funktion des Windungszahlverhältnisses für verschiedene Stromwandler

Quelle: Eigene Ausarbeitung

6.5.2 Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit des Sekundärwiderstands

Durch die Variation des Sekundärwiderstands wird der Einfluss auf den Fehler untersucht. Als Testobjekt wird der EPRO-Stromwandler (3-16-1569) verwendet. Die Abbildung 41 zeigt, dass der Übersetzungsfehler und der Phasenfehler mit zunehmendem Widerstand größer werden. Für die Simulation wurde das Modell ESB-CTA verwendet.

In der Tabelle 5 werden die verwendeten Sekundärwiderstände dargestellt:

Tabelle 5: Sekundärwiderstände der Variation

R_{CT1}	0,1491 Ω	R_{CT2}	0,6491 Ω
R_{CT3}	1,1491 Ω	R_{CT4}	1,6491 Ω

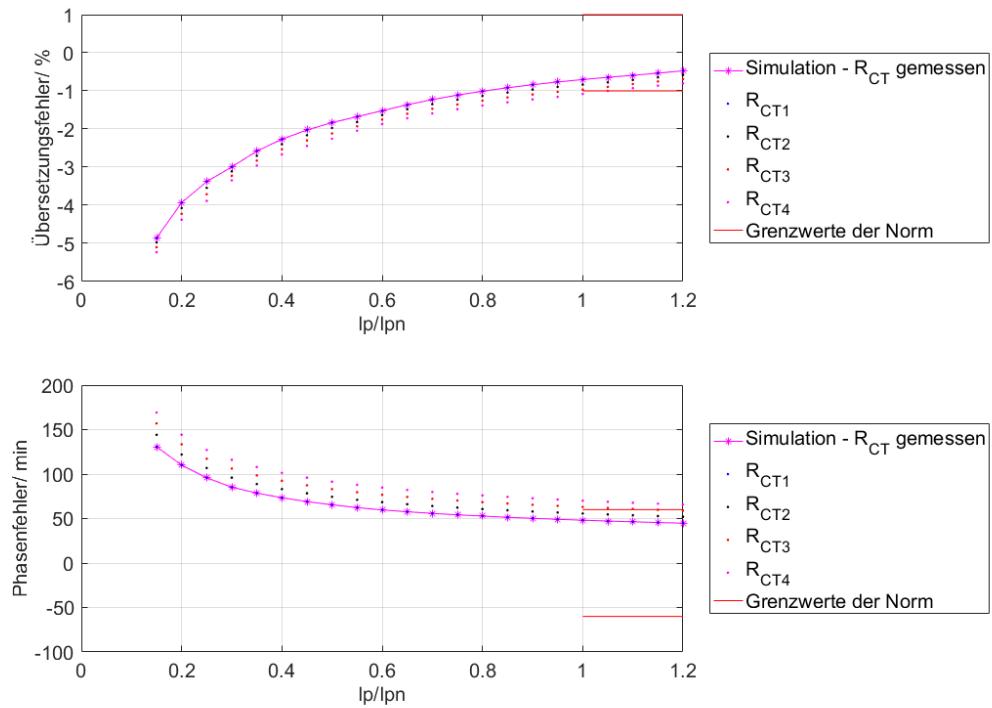


Abbildung 41: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei Variation des Sekundärwicklungswiderstandes, EPRO-Stromwandler (3-16-1569)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Betrachtet man den Fehler bei 100 % des Nennstroms in Abhängigkeit des Sekundärwiderstandes, kann die Sensitivität auf den Fehler ermittelt werden. Die Abbildung 42 zeigt den Übersetzungsfehler und den Phasenfehler als Funktion des Sekundärwiderstands bei 100 % des Nennstroms für verschiedene Stromwandler. Durch die Erhöhung des Sekundärwiderstands werden die Kernspannung und somit der Magnetisierungsstrom erhöht. Da der Magnetisierungsstrom dem Fehlervektor entspricht, muss der Übersetzungsfehler größer werden.

Die berechneten Simulationspunkte (x) können durch eine Regression mit einem Polynom zweiter Ordnung angenähert werden (--). Der Einfluss auf den Übersetzungsfehler und den Phasenfehler nimmt näherungsweise quadratisch ab. Dieselbe Abhängigkeit wurde im Kapitel 6.2 berechnet.

Für den ITL-Stromwandler (39376) ergibt sich ein Sensitivitätswert (Formel (60)) von 21, für den Astra-Stromwandler von 22 und für den EPRO-Stromwandler von 0,13. Diese Werte wurden mit dem gemessenen Sekundärwicklungswiderstand berechnet. Je höher der Sensitivitätswert, desto größer ist die Sensitivität. Die Höhe der Sensitivität wird durch die Kernspannung und die sekundärseitige Last des Stromwandlers bestimmt.

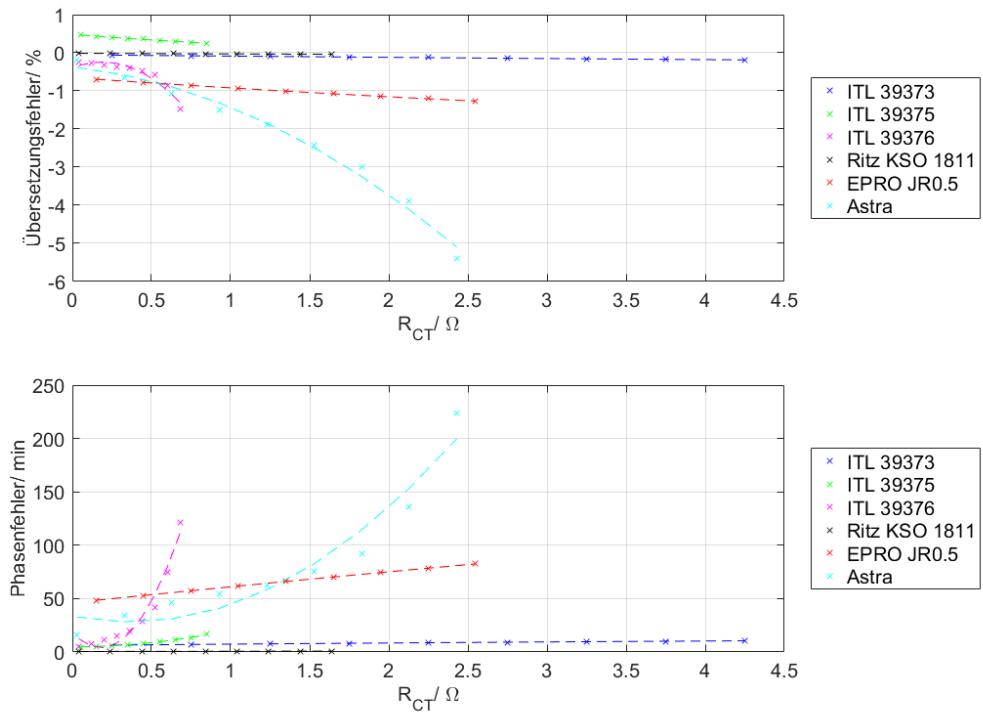


Abbildung 42: Übertragungsfehler als Funktion des Sekundärwicklungswiderstandes für verschiedene Stromwandler

Quelle: Eigene Ausarbeitung

6.5.3 Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Streuinduktivität

Der Einfluss der Streuinduktivität auf den absoluten Fehler wird durch das Variieren der Streuinduktivität ermittelt. Als Testobjekt wird der EPRO-Stromwandler (3-16-1569) verwendet. Für die Simulation wurde das Modell ESB-LS verwendet. Die Abbildung 43 zeigt, dass der Übersetzungsfehler mit steigender Streuinduktivität größer wird. Der Phasenfehler wird hingegen kleiner.

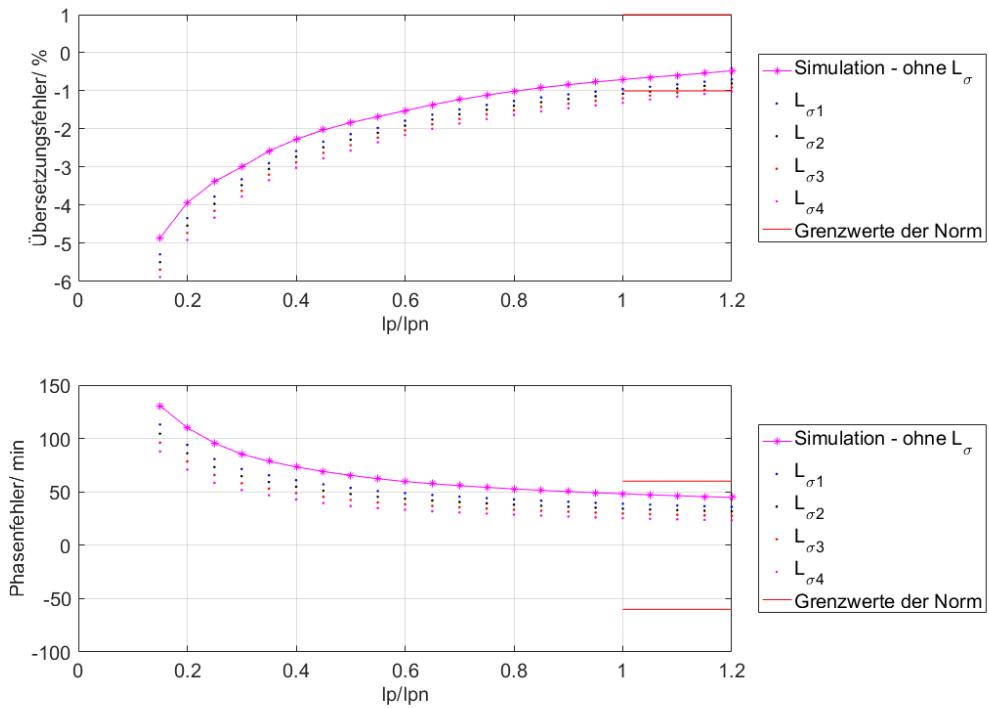


Abbildung 43: Übersetzungsfehler und Phasenfehler als Funktion des Primärstroms bei Variation der Streuinduktivität, EPRO-Stromwandler (3-16-1569)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Für die Simulation wurden die Streuinduktivitäten der Tabelle 6 verwendet:

Tabelle 6: Streuinduktivitäten der Variation

$L_{\sigma 1}$	2 mH	$L_{\sigma 2}$	3 mH
$L_{\sigma 3}$	4 mH	$L_{\sigma 4}$	5 mH

Betrachtet man wiederum den Fehler bei 100 % des Nennstroms in Abhängigkeit der Streuinduktivität, kann die Sensitivität auf den Fehler ermittelt werden. Die Abbildung 44 zeigt den Übersetzungsfehler und den Phasenfehler als Funktion der Streuinduktivität bei 100 % des Nennstroms für verschiedene Stromwandler. Durch die Erhöhung der Streuinduktivität werden die Kernspannung und somit der Magnetisierungsstrom erhöht. Da der Magnetisierungsstrom dem Fehlervektor entspricht, muss der Übersetzungsfehler größer werden.

Die berechneten Simulationspunkte (x) können durch eine Regression mit einem Polynom zweiter Ordnung angenähert werden (--). Der Übersetzungsfehler nimmt näherungsweise quadratisch zu und der Phasenfehler quadratisch ab. Der Stromwandler KSO 1811 zeigt ein lineares Verhalten mit sehr geringer Änderung des Übertragungsfehlers. Der Variationsbereich konnte aufgrund fehlender Messpunkte für die Magnetisierungskurve nicht größer gewählt werden.

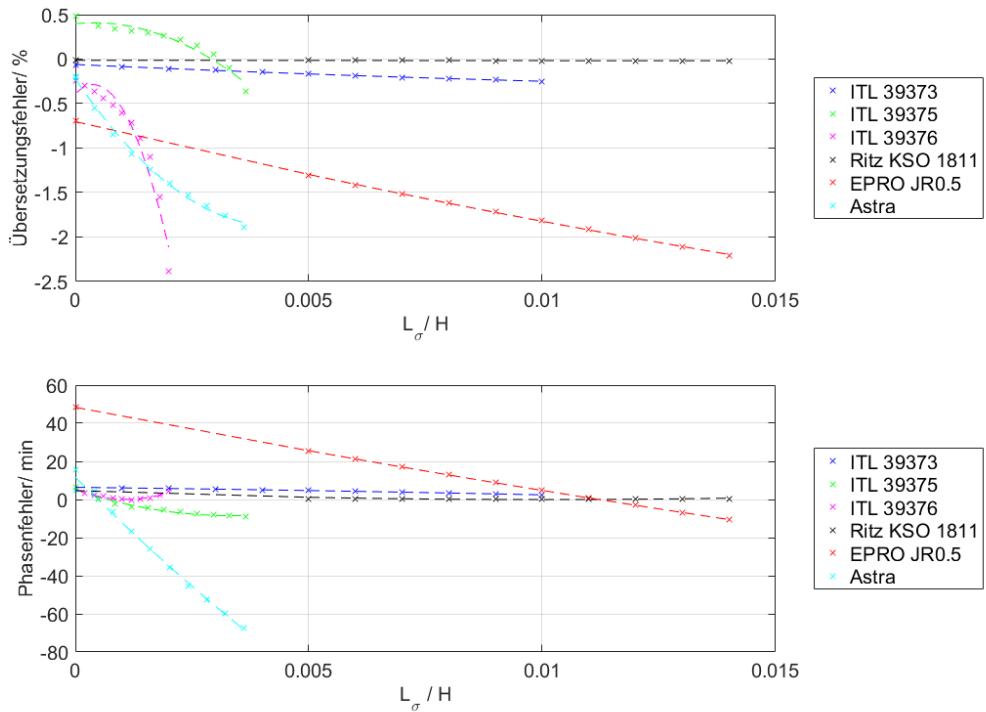


Abbildung 44: Übertragungsfehler als Funktion der Streuinduktivität für verschiedene Stromwandler
Quelle: Eigene Ausarbeitung

Für den ITL-Stromwandler (39376) ergibt sich ein Sensitivitätswert (Formel (69)) von 19, für den Astra-Stromwandler von 22 und für den EPRO-Stromwandler von 0,13. Je höher der Sensitivitätswert, desto größer ist die Sensitivität. Die Höhe der Sensitivität wird durch die Kernspannung und die sekundärseitige Last des Stromwandlers bestimmt.

6.5.4 Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz

Durch die Variation der Kernimpedanz kann der Einfluss auf den absoluten Fehler ermittelt werden. Als Testobjekt wird der Ritz-Stromwandler (01-568886) verwendet.

Eine Vergrößerung der Eisenkernimpedanz bewirkt eine Verringerung des Übersetzungsfehlers und des Phasenfehlers, wie in Abbildung 45 dargestellt. Je größer die Eisenkernimpedanz wird, desto kleiner wird der Magnetisierungsstrom. Da der Fehlervektor dem Magnetisierungsstrom entspricht, werden in weiterer Folge bei kleinerem Magnetisierungsstrom der Übersetzungsfehler und der Phasenfehler kleiner.

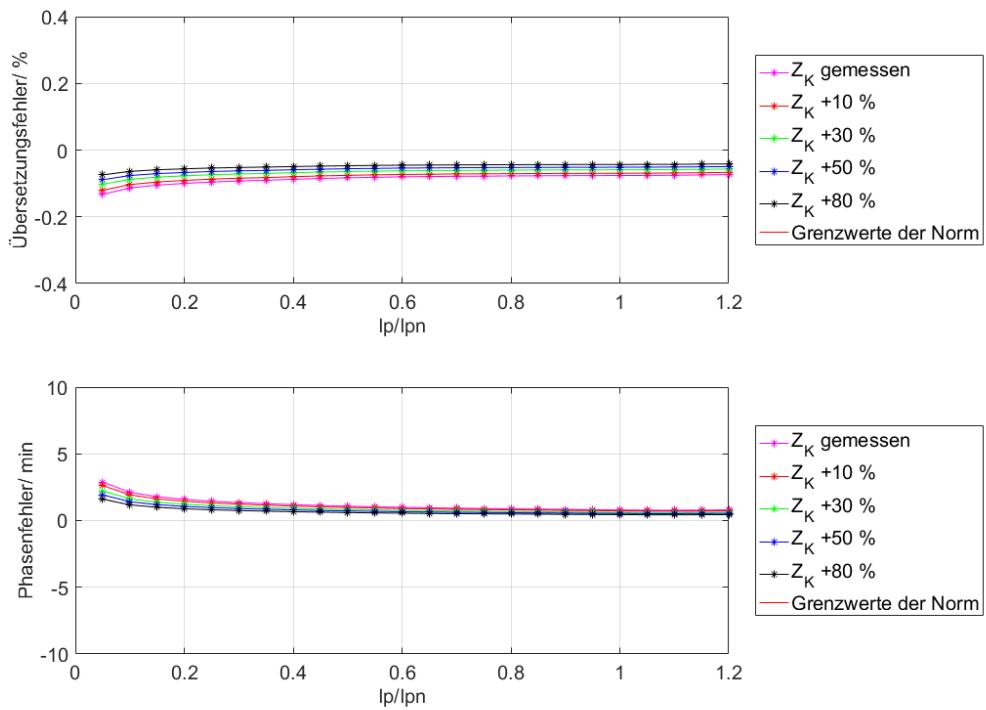


Abbildung 45: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei Variation der Eisenkernimpedanz, Ritz-Stromwandler (01-568886)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Betrachtet man den Fehler bei 100 % des Nennstroms in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, kann der Einfluss auf den Fehler ermittelt werden. Die Abbildung 46 zeigt den Übersetzungsfehler und den Phasenfehler als Funktion der Eisenkernimpedanz bei 100 % des Nennstroms für verschiedene Stromwandler. Die berechneten Simulationspunkte (x) können durch eine Regression mit einem Polynom zweiter Ordnung angenähert werden (--). Der Übersetzungsfehler und der Phasenfehler nehmen für den EPRO- und Astra-Stromwandler näherungsweise quadratisch ab. Die ITL- und der Ritz-Stromwandler zeigen in diesem Bereich ein lineares Verhalten. Man müsste den Bereich größer wählen, damit eine quadratische Abhängigkeit ersichtlich wird. Dies konnte für diese Stromwandler jedoch nicht bewiesen werden.

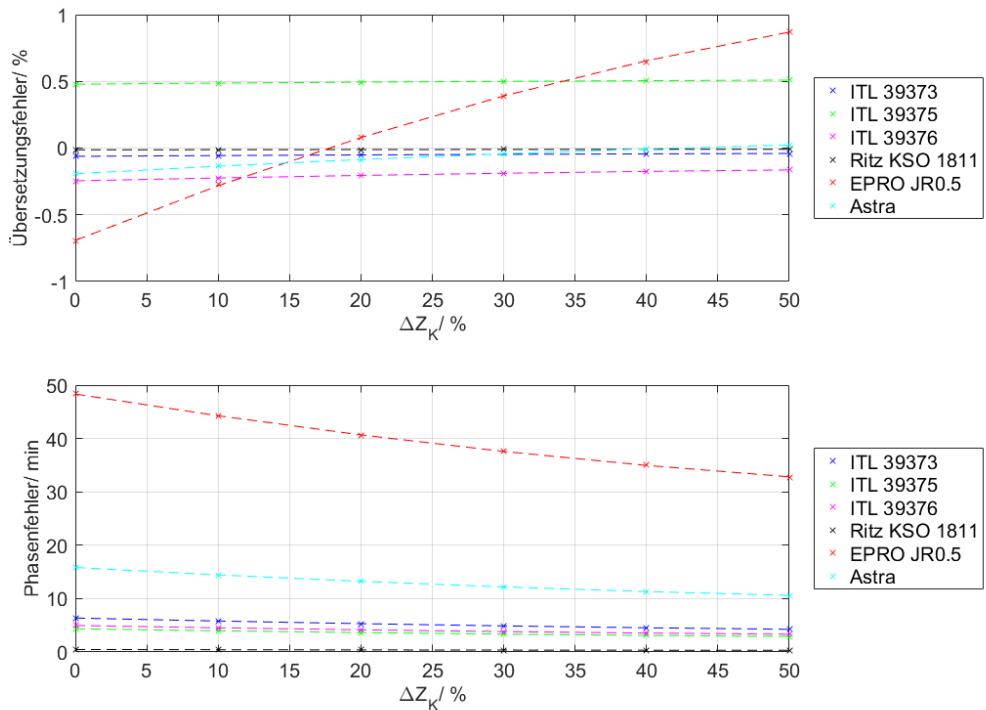


Abbildung 46: Übertragungsfehler als Funktion der Eisenkernimpedanz für verschiedene Stromwandler

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Je größer die Übersetzung, desto kleiner ist der Übertragungsfehler (siehe Formel (77)). Deshalb zeigt der Ritz-Stromwandler den kleinsten Fehler und die geringste Sensitivität. Die Höhe der Sensitivität hängt von der Übersetzung und von der sekundärseitigen Last des Stromwandlers ab. Der EPRO-Stromwandler hat die größte Bürde mit 7,5 VA und eine Übersetzung von 50:1. Deshalb ist die Sensitivität für diesen Stromwandler am größten.

6.6 Stromwandler-Untersuchungsobjekte

Aufgrund der Sensitivitätsanalyse werden Untersuchungsobjekte erarbeitet, die zur Beantwortung der Forschungsfrage herangezogen werden können.

Wird die Bürde sehr gering spezifiziert, ist der Stromwandler nur vom Sekundärwicklungswiderstand R_{CT} und von der Streuinduktivität $L_{2\sigma}$ abhängig, da der Stromwandler nahezu im Kurzschluss betrieben wird.

Die Tabelle 7 stellt die gewünschten Untersuchungsobjekte (UO) in Abhängigkeit der Parameter dar und soll als eine qualitative Spezifikation für die Stromwandler betrachtet werden. Es werden bewusst keine Absolutwerte angegeben. Der Pfeil „↓“ bedeutet einen verhältnismäßig geringen Wert und der Pfeil „↑“ einen verhältnismäßig großen Wert.

Tabelle 7: Erarbeitete Spezifikation der Untersuchungsobjekte anhand der Sensitivitätsanalyse

Untersuchungsobjekt	Kernspannung	Bürdenwiderstand	Bürdeninduktivität	Wicklungswiderstand	Streuinduktivität	Windungszahlverhältnis	Eisenkernimpedanz	Stromwandlertyp	Seriennummer
1	Bürde ↓								
2		R _b ↑							
		L _b ↑							
3		R _b ↓							
		L _b ↑							
4			Bürde ↓				KSO1811	05-94259	
				R _{CT} ↑					
5			Bürde ↓						
				R _{CT} ↓					
6				Bürde ↓			Astra	3408420	
					L _{2σ} ↑		ITL	520-33318	
7						N ↓	ITL	39379	
8						N ↑	KSO1811	05-94259	
9							Z _k ↓		

Untersuchungsobjekt UO 1:

Die Bürde wird sehr gering gewählt. Dadurch wird erreicht, dass der Stromwandler sehr sensitiv auf die Kernspannung wird (siehe Kapitel 6.2, Punkt 1).

Untersuchungsobjekte UO 2 und UO 3:

Der Bürdenwiderstand und die Bürdeninduktivität werden beim UO 2 sehr groß gewählt. Dann wird der Stromwandler nicht mehr im Kurzschluss betrieben. Beim UO 3 wird der Bürdenwiderstand verringert und so kann der Einfluss der Bürdeninduktivität auf den Fehler untersucht werden.

Untersuchungsobjekt UO 4 und UO 5:

Bei diesen Untersuchungsobjekten wird die Bürde sehr gering gewählt. Der Stromwandler soll eine geringe Streuinduktivität aufweisen. Dann ist der Stromwandler nur noch vom Sekundärwicklungswiderstand abhängig. Der Einfluss auf den Fehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes soll für einen sehr großen und einen sehr kleinen Sekundärwicklungswiderstand durchgeführt werden.

Untersuchungsobjekt UO 6:

Für den Stromwandler wird wie bei UO 4 und UO 5 eine geringe Bürde verwendet. In diesem Fall wird der Einfluss auf den Fehler in Abhängigkeit der Sekundärstreuinduktivität untersucht. Hier ist es notwendig, dass der Sekundärwicklungswiderstand möglichst gering gewählt wird. Dann ist der Stromwandler nur noch von der

Sekundärstreuinduktivität abhängig. Das UO 6 sollte eine große Streuinduktivität haben, zum Beispiel durch Luftspalte oder Eisenkerne, die oval oder rechteckig sind.

Untersuchungsobjekt UO 7 und UO 8:

Für das UO 7 und das UO 8 wird der Einfluss auf den Fehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses untersucht. Wird das Windungszahlverhältnis klein gewählt, wird der Term 1 bereits sehr groß und es stellt sich ein größerer Fehler ein (siehe Kapitel 6.1). Deshalb ist es besonders wichtig, dass Stromwandler mit niedrigem Windungszahlverhältnis untersucht werden.

Untersuchungsobjekt UO 9:

Das UO 9 hat eine geringe Eisenkernimpedanz. Dadurch wird erreicht, dass die Sensitivität und der Fehler groß werden. Es wird der Einfluss auf den Fehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz untersucht.

7. Modellerweiterung – Berechnung Windungszahlverhältnis

Die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses N des CT Analyzers wird im Kapitel 4.4.3 erläutert. Bei diesem Modell (ESB-CTA) wird die Streuinduktivität zur Berechnung der Kernspannung nicht berücksichtigt. Bei zu großer Streuinduktivität kann bereits in der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses N eine Abweichung erwartet werden. Die Berechnung des Windungszahlverhältnisses aus Kapitel 4.4.3 wird im nächsten Schritt mit der Streuinduktivität erweitert (siehe Abbildung 47). Es wird das Modell ESB-LS angewendet.

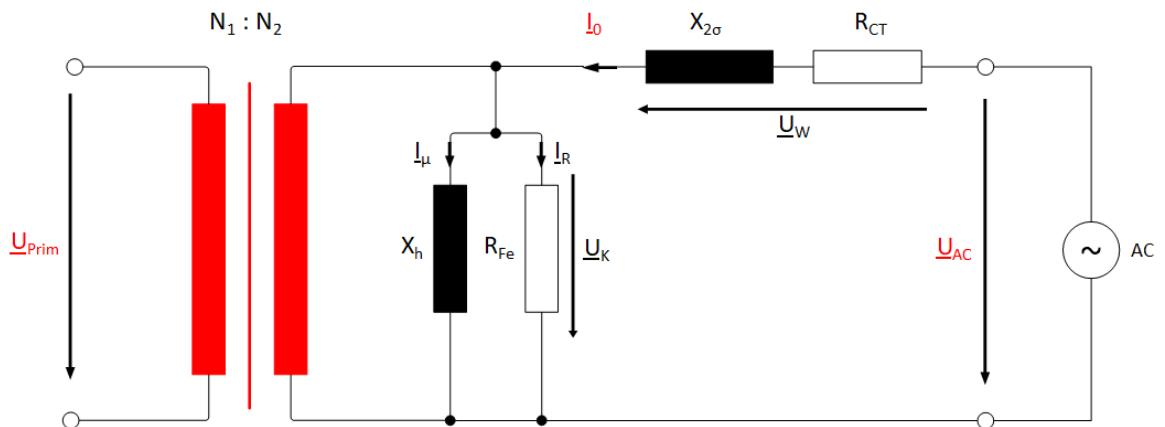


Abbildung 47: Ersatzschaltbild für die Messung des Übersetzungsverhältnisses mit Berücksichtigung der Streuinduktivität

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Daraus ergibt sich für das Windungszahlverhältnis die folgende Beziehung.

$$U_K = U_{AC} - U_W = U_{AC} - I_0 * \sqrt{R_{CT}^2 + (\omega * L_{2\sigma})^2} \quad (88)$$

$$N = \frac{U_K}{U_{Prim}} = \frac{U_{AC} - I_0 * \sqrt{{R_{CT}}^2 + (\omega * L_{2\sigma})^2}}{U_{Prim}} \quad (89)$$

Für die weitere Untersuchung soll das Windungszahlverhältnis als Funktion der Spannung U_{AC} und der Impedanzen (R_{CT} und $L_{2\sigma}$) analysiert werden. Die Wahl der Testspannung U_{AC} kann einen Einfluss auf das Ergebnis des Windungszahlverhältnisses haben, da die Magnetisierungskurve eine nichtlineare Funktion ist.

Für die Untersuchung des Windungszahlverhältnisses können die folgenden Beziehungen analysiert werden:

- Windungszahlverhältnis N als Funktion der Spannung N(U_{AC}):

Für die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses wird das Modell ESB-CTA verwendet. Die Messung der Sekundärspannung U_{AC} und der Primärspannung U_{Prim} zur Bestimmung der Übersetzung wird frequenzselektiv mit dem CT Analyzer durchgeführt.

$$N(\textcolor{red}{U}_{AC}) = \frac{U_K}{U_{Prim}} = \frac{\textcolor{red}{U}_{AC} - I_0 * R_{CT}}{U_{Prim}} \quad (90)$$

- Windungszahlverhältnis N als Funktion des Sekundärwicklungswiderstandes N(R_{CT}):

Für die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses wird das Modell ESB-CTA verwendet.

Die Abhängigkeit vom Sekundärwicklungswiderstand wird durch Anwendung der garantierten Genauigkeit des CT Analyzers analysiert.

Die Messgenauigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes ist angegeben mit:
(Vgl. OMICRON electronics GmbH 2016, S. 165)

$$R_{CT} = R_{CT,gemessen} \pm (R_{CT,gemessen} * 0,1 \% + 1 m\Omega) \quad (91)$$

In weiterer Folge wird die folgende Terminologie für den positiven und negativen Toleranzbereich des Sekundärwicklungswiderstandes für die Legenden der Grafiken verwendet.

R_{CT} pos. Toleranz (positiver Toleranzbereich):

$$R_{CT} = R_{CT,gemessen} + (R_{CT,gemessen} * 0,1 \% + 1 m\Omega) \quad (92)$$

R_{CT} neg. Toleranz (negativer Toleranzbereich):

$$R_{CT} = R_{CT,gemessen} - (R_{CT,gemessen} * 0,1 \% + 1 m\Omega) \quad (93)$$

Windungszahlverhältnis als Funktion des Sekundärwiderstandes:

$$N(\textcolor{red}{R}_{CT}) = \frac{U_K}{U_{Prim}} = \frac{U_{AC} - I_0 * \textcolor{red}{R}_{CT}}{U_{Prim}} \quad (94)$$

- Windungszahlverhältnis N als Funktion der Streuinduktivität $N(L_{2\sigma})$

Für die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses wird das Modell ESB-LS verwendet.

$$N(\textcolor{red}{L}_{2\sigma}) = \frac{U_{AC} - I_0 * \sqrt{R_{CT}^2 + (\omega * \textcolor{red}{L}_{2\sigma})^2}}{U_{Prim}} \quad (95)$$

8. Messungen an Stromwandlern

Der komplexe Fehlervektor des Stromwandlers (Kapitel 6.1) beschreibt, dass der Fehler (Magnetisierungsstrom) bereits mit dem idealen Windungszahlverhältnis (Kapitel 6.1, Term 1) eingestellt werden kann. Deshalb werden für diese Untersuchung die Einflüsse auf den Fehler bei Stromwandlern mit hoher und niedriger Übersetzung analysiert.

Die Abbildung 48 zeigt das Konzept der Messung. Die Untersuchung wird in zwei Kategorien unterteilt. Die erste Kategorie besteht aus der Messung von Stromwandlern mit großer Übersetzung und die zweite Kategorie aus der Messung von Stromwandlern mit niedriger Übersetzung. Bei jeder Kategorie wird die allgemeine Sensitivität, wie in Kapitel 6.4 beschrieben, betrachtet.

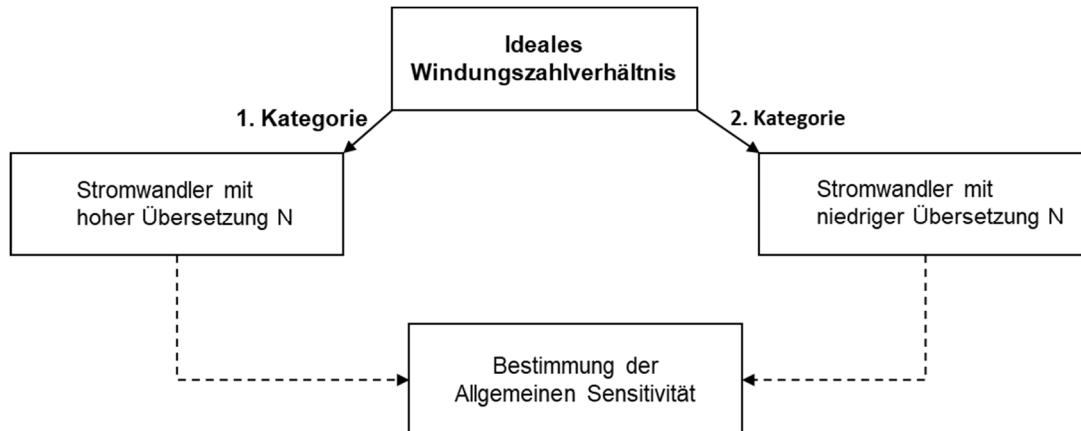


Abbildung 48: Konzept zur Untersuchung der Einflüsse auf den Fehler

Quelle: Eigene Ausarbeitung

8.1 Stromwandler mit hoher Übersetzung – Allgemeine Sensitivität

Für diese Untersuchung werden die Stromwandler der Tabelle 8 verwendet.

Tabelle 8: Spezifikation des Ritz 05-594259- und ITL 520-33318-Stromwandlers

Hersteller: Ritz	Seriennummer:	05-594259	
Primärnennstrom I_{pn}	2000 A	Bürde	2,5 VA, $\cos \varphi = 1$
Sekundärnennstrom I_{sn}	1 A	Klasse	M 0,1

Hersteller: ITL	Seriennummer:	520-33318	
Primärnennstrom I_{pn}	1000 A	Bürde	1 VA, $\cos \varphi = 1$
Sekundärnennstrom I_{sn}	1 A	Klasse	M 0,5

Der Ritz-Stromwandler hat einen ringförmigen und der ITL-Stromwandler einen rechteckigen Eisenkern. Das theoretische Windungszahlverhältnis des Ritz-Stromwandlers beträgt 2000 und das des ITL-Stromwandlers 1000.

Bei der theoretischen Betrachtung des Windungszahlverhältnisses bewirkt das Fehlen einer Windung bei einem Windungszahlverhältnis N von 2000 einen Übersetzungsfehler von 0,05 % und bei einem Windungszahlverhältnis von 1000 einen Übersetzungsfehler von 0,1 %. Die folgende Sensitivitätsanalyse wird bei 100 % des Primärnennstroms I_{pn} durchgeführt, in diesem Fall bei einem Primärstrom von 2000 A beim Ritz-Stromwandler und 1000 A beim ITL-Stromwandler.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses

Für die Bestimmung des Übersetzungsfehlers wurde das gemessene Übersetzungsverhältnis mit einer Schrittweite ΔN von 1 erhöht. Die Tabelle 9 und die Tabelle 10 zeigen den Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms I_{pn} an.

Tabelle 9: Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, Ritz (05-594259)

N_1	2000,000375	ϵ_1	-0,0133 %
N_2	2001,000375	ϵ_2	-0,0633 %
N_3	2002,000375	ϵ_3	-0,1132 %
N_4	2003,000375	ϵ_4	-0,1631 %

Tabelle 10: Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, ITL (520-33318)

N_1	1005,8422	ϵ_1	-0,9928 %
N_2	1006,8422	ϵ_2	-1,091 %
N_3	1007,8422	ϵ_3	-1,189 %
N_4	1008,8422	ϵ_4	-1,287 %

Wird die Windungszahl von N_1 auf N_2 erhöht, resultiert daraus eine Änderung des Übersetzungsfehlers von etwa 0,05 % beim Ritz-Stromwandler und etwa 0,1 % beim ITL-Stromwandler (siehe Tabelle 9 und Tabelle 10).

Aus der Abbildung 49 ist ersichtlich, wie sich die Sensitivität auf den Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses beim Ritz-Stromwandler verhält.

Die Abbildung 50 zeigt die Sensitivität auf den Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses für den ITL-Stromwandler.

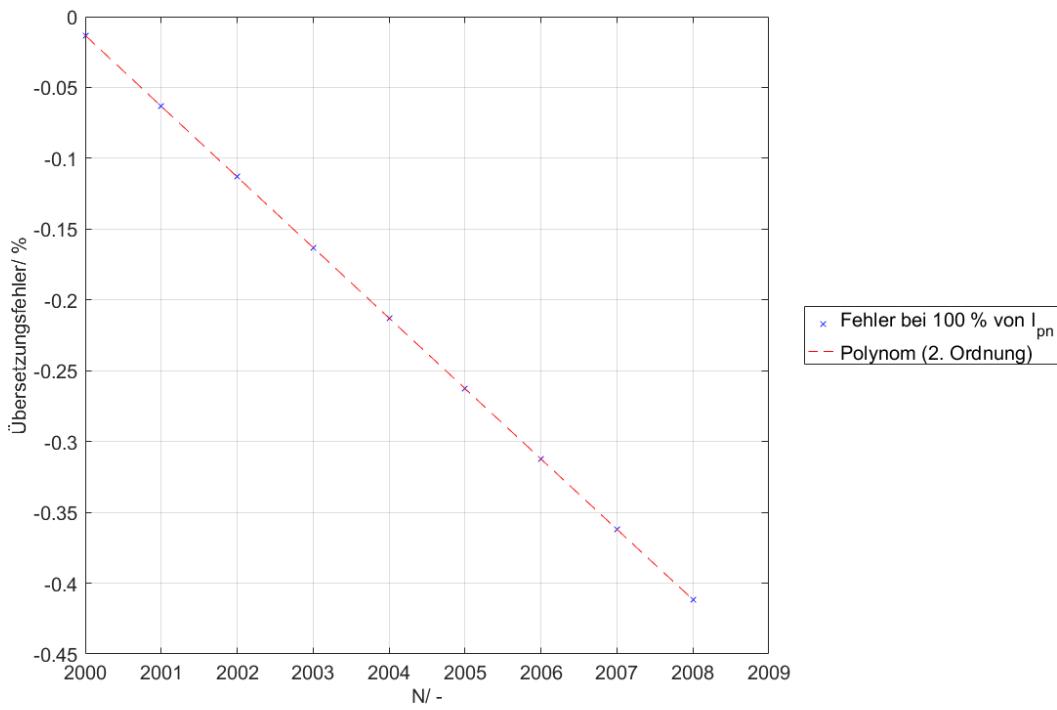


Abbildung 49: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses,
Schrittweite ΔN ist 1, Stromwandler Ritz (05-594259)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

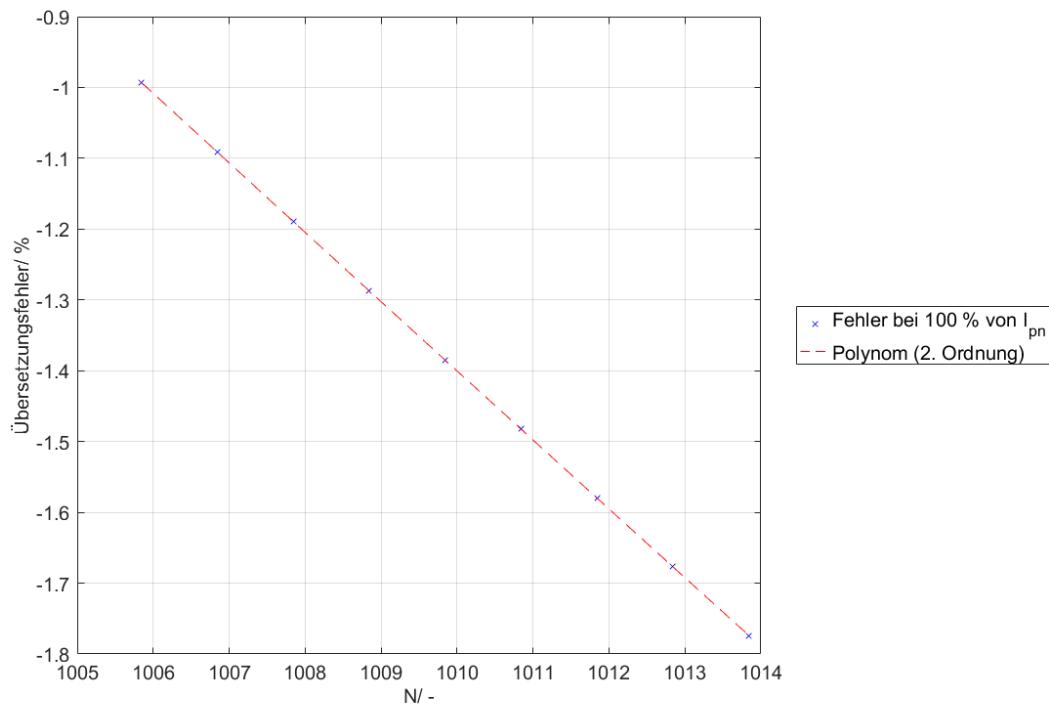


Abbildung 50: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses,
Schrittweite ΔN ist 1, Stromwandler ITL (520-33318)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes

Die Schrittweite ΔR beträgt $0,5 \Omega$ für den Ritz- und ITL-Stromwandler.

Die Änderung des Übertragungsfehlers in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes ist beim Ritz-Stromwandler sehr gering. Eine Widerstandsänderung von $0,5 \Omega$ (R_1 auf R_2) ergibt eine Änderung des Übersetzungsfehlers von etwa $0,0271\%$ und eine Änderung des Phasenfehlers um $0,0098$ Minuten beim Ritz-Stromwandler (siehe Tabelle 11).

Beim ITL-Stromwandler bedeutet eine Änderung des Widerstandes von R_1 auf R_2 eine Änderung des Übersetzungsfehlers um etwa $0,04\%$ und des Phasenfehlers um etwa $1,6$ Minuten (siehe Tabelle 12).

Der Widerstand R_1 entspricht in der Tabelle 11 und in der Tabelle 12 dem tatsächlich gemessenen Sekundärwiderstand.

Tabelle 11: Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes, Ritz (05-594259)

R_1	$8,461 \Omega$	ε_1	-0,0133 %	δ_1	0,4644 min
R_2	$8,961 \Omega$	ε_2	0,0138 %	δ_2	0,4742 min
R_3	$9,461 \Omega$	ε_3	0,0144 %	δ_3	0,4836 min
R_4	$9,961 \Omega$	ε_4	0,0149 %	δ_4	0,4928 min

Tabelle 12: Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes, ITL (520-33318)

R_1	$2,8955 \Omega$	ε_1	-0,9928 %	δ_1	16,4774 min
R_2	$3,3955 \Omega$	ε_2	-1,0334 %	δ_2	18,0920 min
R_3	$3,8955 \Omega$	ε_3	-1,0740 %	δ_3	19,7047 min
R_4	$4,3955 \Omega$	ε_4	-1,1136 %	δ_4	21,6346 min

Die Tabelle 11 und die Tabelle 12 zeigen den Übertragungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms I_{pn} .

Der Einfluss auf den Fehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes wird in Abbildung 51 und Abbildung 52 dargestellt.

Die Abbildung 52 stellt den Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes für den ITL-Stromwandler dar. Aus der Simulation ist ersichtlich, dass der Phasenfehler bei einer Änderung des Sekundärwicklungswiderstandes eine größere Änderung hervorruft als beim Ritz-Stromwandler in Abbildung 51. Ein Grund dafür ist der kleinere Sekundärwicklungswiderstand beim ITL-Stromwandler. Dadurch steigt die Sensitivität auf den komplexen Fehler an (siehe Kapitel 6.2).

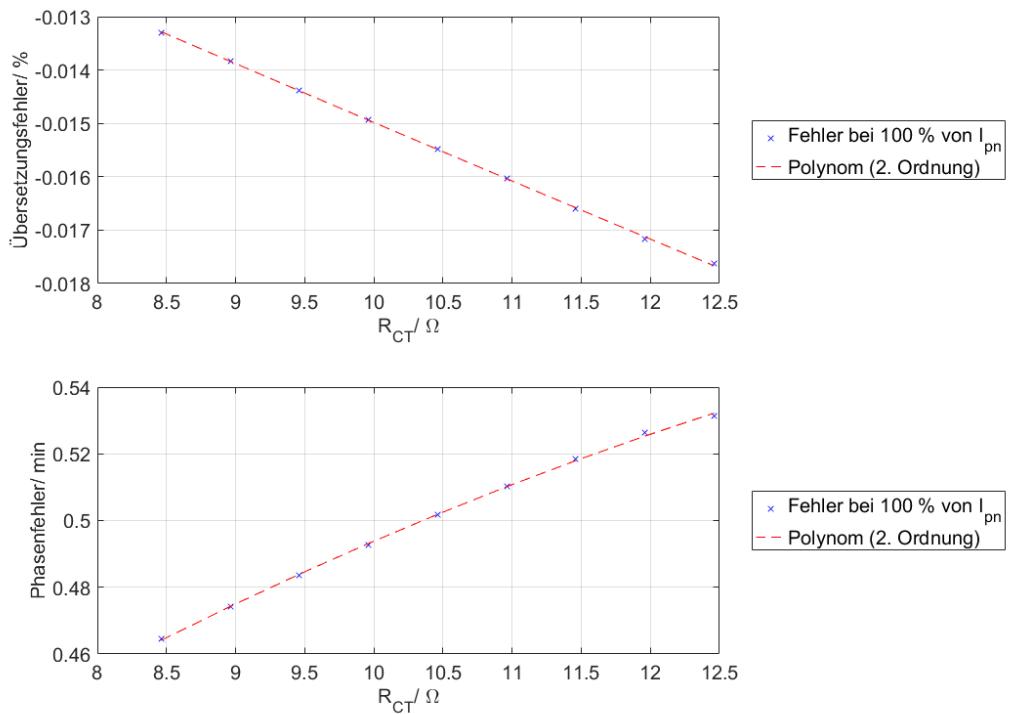


Abbildung 51: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Sekundärwiderstandes,
Schrittweite ΔR ist $0,5 \Omega$, Stromwandler Ritz (05-594259)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

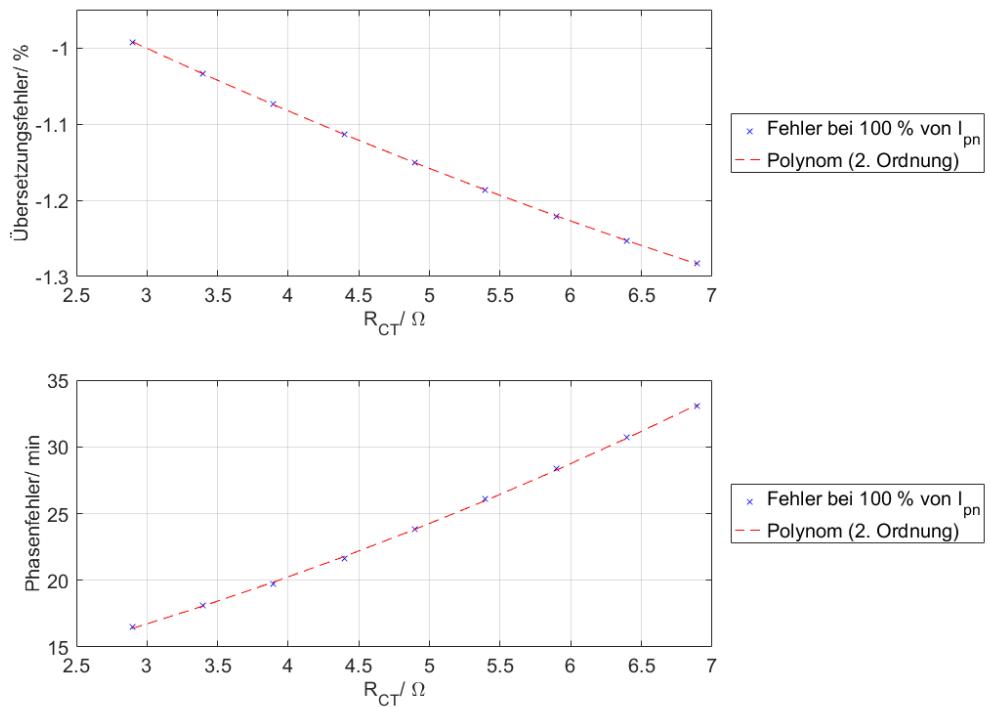


Abbildung 52: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Sekundärwiderstandes,
Schrittweite ΔR ist $0,5 \Omega$, Stromwandler ITL (520-33318)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität

Die Streuinduktivität wird mit einer Schrittweite ΔL von 2 mH beim Ritz-Stromwandler und 4,6 mH beim ITL-Stromwandler erhöht. Bei einer Änderung der Streuinduktivität von $L_{\sigma 1}$ auf $L_{\sigma 2}$ ergibt sich beim Ritz-Stromwandler eine Änderung des Übersetzungsfehlers um 0,0004 % und eine Änderung des Phasenfehlers um 0,0135 Minuten. Beim ITL-Stromwandler sind es 0,166 % und 5,45 Minuten (siehe Tabelle 13 und Tabelle 14).

Tabelle 13: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität, Ritz (05-594259)

$L_{\sigma 0}$	0 mH	ε_1	-0,0133 %	δ_1	0,4644 min
$L_{\sigma 1}$	2 mH	ε_2	-0,0141 %	δ_2	0,4378 min
$L_{\sigma 2}$	3 mH	ε_3	-0,0145 %	δ_3	0,4243 min
$L_{\sigma 3}$	4 mH	ε_4	-0,0148 %	δ_4	0,4105 min

Tabelle 14: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität, ITL (520-33318)

$L_{\sigma 0}$	0 mH	ε_1	-0,9928 %	δ_1	16,4775 min
$L_{\sigma 1}$	10 μ H	ε_2	-0,9931 %	δ_2	16,4659 min
$L_{\sigma 2}$	4,61 mH	ε_3	-1,1597 %	δ_3	11,0133 min
$L_{\sigma 3}$	9,21 mH	ε_4	-1,3085 %	δ_4	5,6291 min

Die Abbildung 53 und die Abbildung 54 zeigen die Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Streuinduktivität. Die Änderung des Übersetzungsfehlers und des Phasenfehlers ist beim Ritz-Stromwandler viel geringer als beim ITL-Stromwandler.

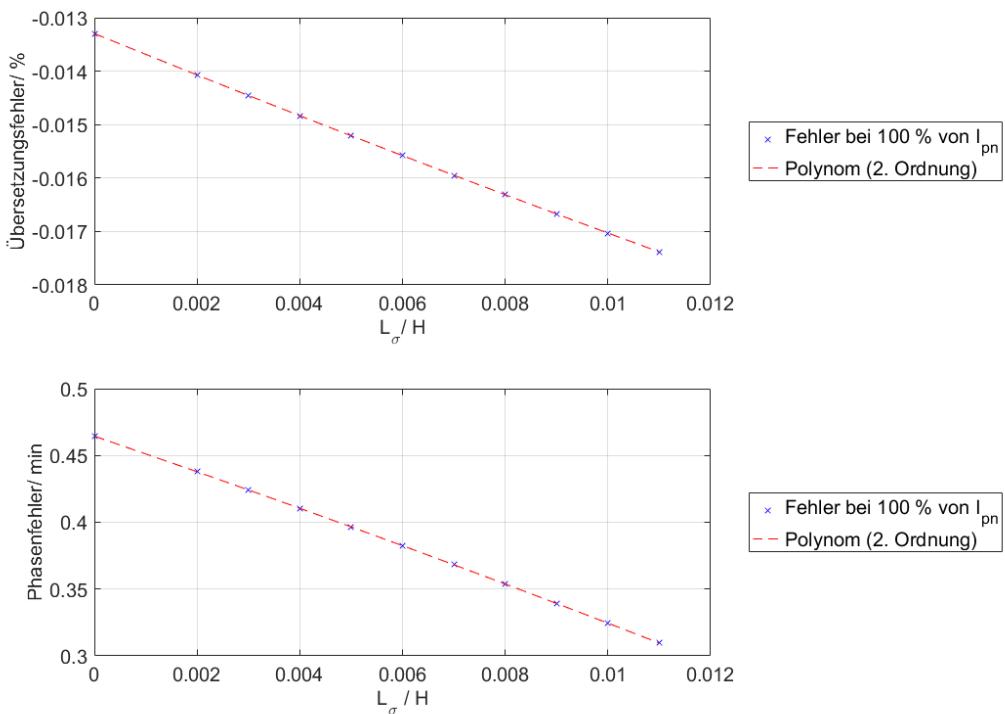


Abbildung 53: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität, Schrittweite ΔL ist 1 mH, Stromwandler Ritz (05-594259)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

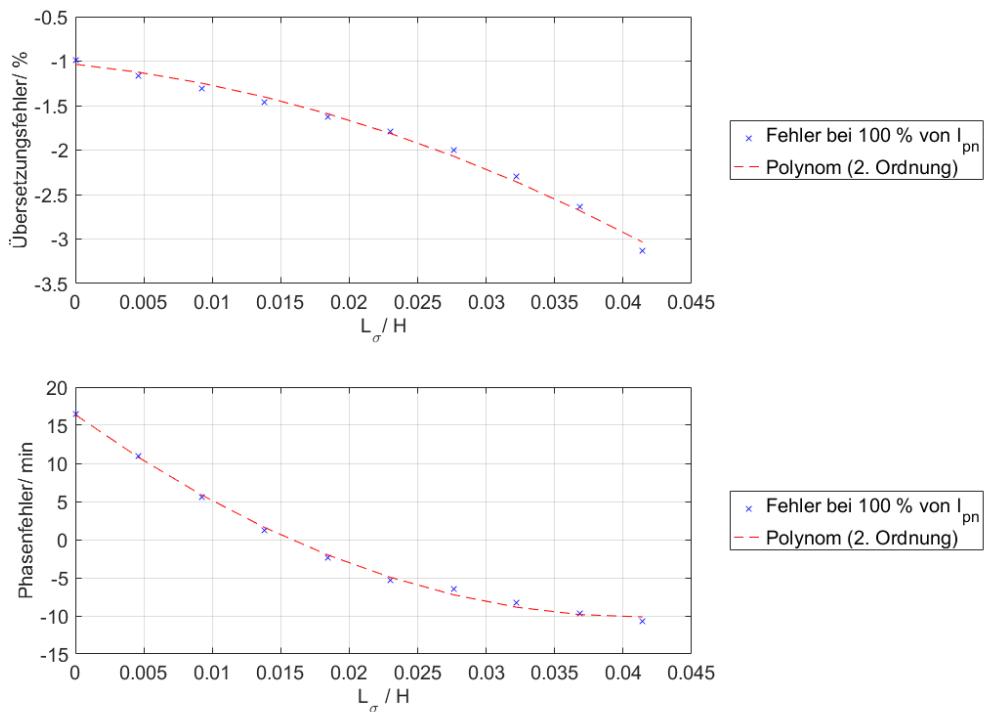


Abbildung 54: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität, Schrittweite ΔL ist 4,6 mH, Stromwandler ITL (520-33318)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz

Die Eisenkernimpedanz wird ausgehend vom gemessenen Wert mit jedem weiteren Messpunkt um 10 % erhöht. Bei einer Änderung um 10 % von Z_{K1} auf Z_{K2} ändern sich der Übersetzungsfehler beim Ritz-Stromwandler um 0,0012 % und der Phasenfehler um 0,0442 Minuten. Eine Änderung der Eisenkernimpedanz verursacht also eine sehr geringe Änderung des Übertragungsfehlers. Die Eisenkernimpedanz Z_{K1} entspricht dem gemessenen Wert (siehe Tabelle 15 und Tabelle 16). Der Übertragungsfehler in Tabelle 15 und in Tabelle 16 wird bei 100 % des Primärnennstroms I_{pn} angegeben.

Tabelle 15: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, Ritz (05-594259)

Z_{K1}	+0 %	ε_1	-0,0133 %	δ_1	0,4644 min
Z_{K2}	+10 %	ε_2	-0,0121 %	δ_2	0,4222 min
Z_{K3}	+20 %	ε_3	-0,0111 %	δ_3	0,387 min
Z_{K4}	+30 %	ε_4	-0,0102 %	δ_4	0,3537 min

Tabelle 16: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, ITL (520-33318)

Z_{K1}	+0 %	ε_1	-0,9928 %	δ_1	16,4775 min
Z_{K2}	+10 %	ε_2	-0,9554 %	δ_2	14,9852 min
Z_{K3}	+20 %	ε_3	-0,9242 %	δ_3	13,7407 min
Z_{K4}	+30 %	ε_4	-0,8978 %	δ_4	12,6871 min

Die Abbildung 55 und die Abbildung 56 stellen den Einfluss auf den Fehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz dar.

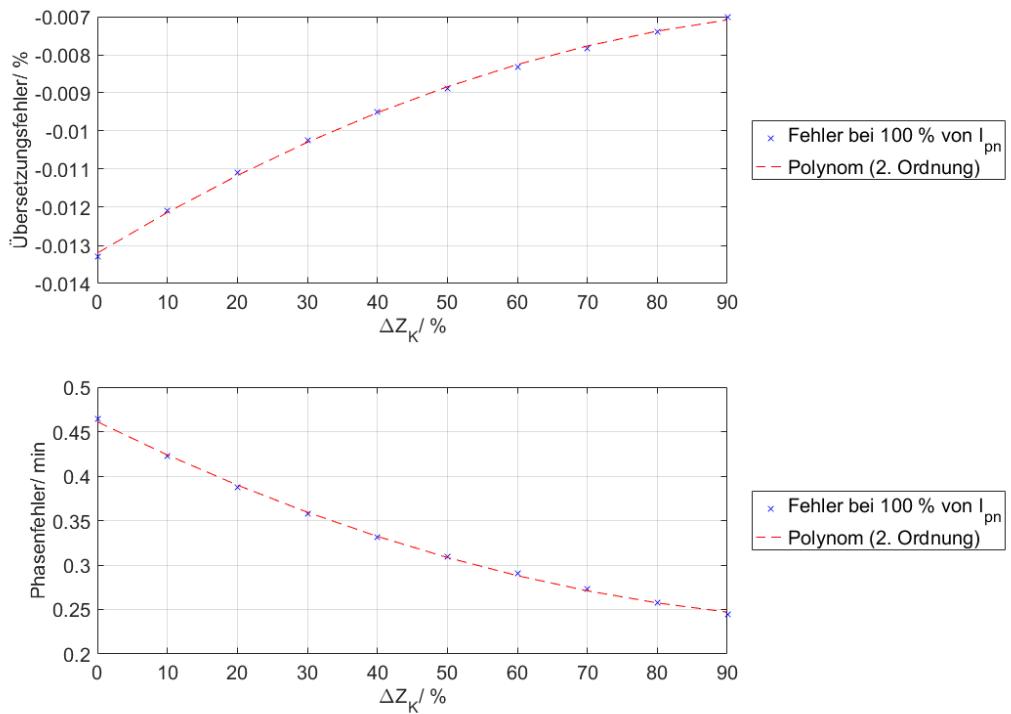


Abbildung 55: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz,
Schrittweite ΔZ_K ist +10 %, Stromwandler Ritz (05-594259)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

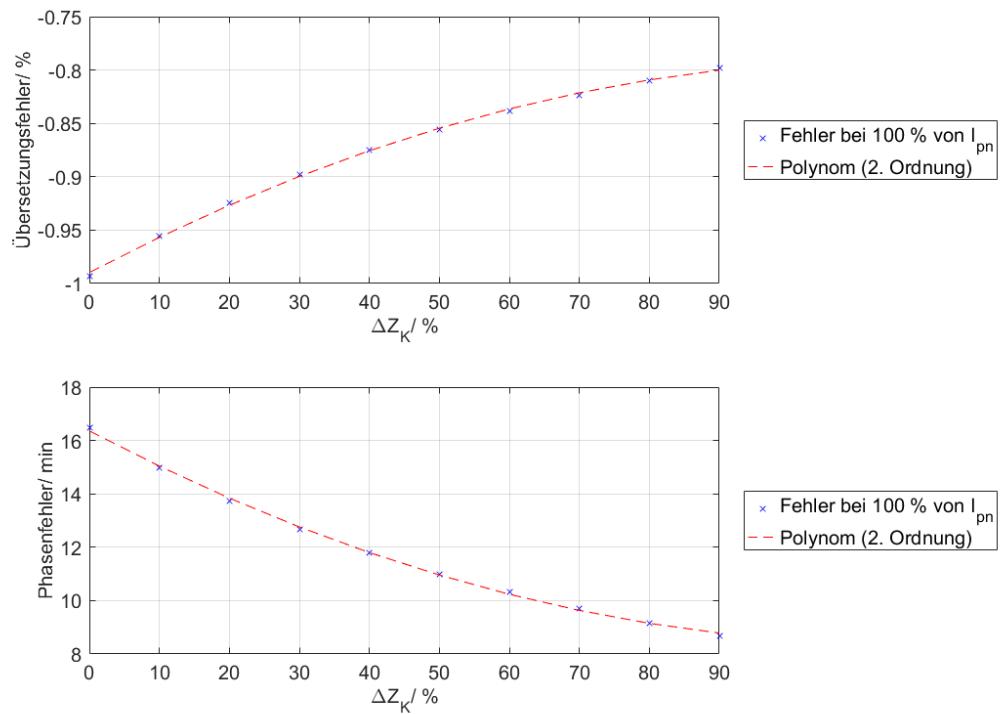


Abbildung 56: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz,
Schrittweite ΔZ_K ist +10 %, Stromwandler ITL (520-33318)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

8.2 Stromwandler mit niedriger Übersetzung – Allgemeine Sensitivität

Für diese Untersuchung wurden die Stromwandler der Tabelle 17 verwendet.

Tabelle 17: Spezifikation des ITL 39379- und Astra 3408420-Stromwandlers

Hersteller: ITL	Seriennummer:	39379
Primärnennstrom I_{pn}	100 A	Bürde 5 VA, $\cos \varphi = 1$
Sekundärnennstrom I_{sn}	5 A	Klasse M 0,2
Hersteller: Astra	Seriennummer:	3408420
Primärnennstrom I_{pn}	100 A	Bürde 5 VA, $\cos \varphi = 1$
Sekundärnennstrom I_{sn}	5 A	Klasse M 0,5

Der ITL-Stromwandler hat einen ringförmigen und der Astra-Stromwandler einen ovalen Eisenkern. Beide Stromwandler haben eine theoretische Übersetzung von 100:5 A. Das entspricht einem Windungszahlverhältnis von 20.

Bei der theoretischen Betrachtung des Windungszahlverhältnisses bewirkt das Fehlen einer Windung bei einem Windungszahlverhältnis von 20 einen Übersetzungsfehler von 5 %. Die folgende Sensitivitätsanalyse wird bei 100 % des Primärnennstroms I_{pn} durchgeführt. Das heißt, in diesem Fall bei einem Primärnennstrom von 100 A.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses

Für die Bestimmung der Fehlerkurven wurde das gemessene Übersetzungsverhältnis mit einer Schrittweite ΔN von 1 erhöht. In der Tabelle 18 und in der Tabelle 19 sind die Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms bei verschiedenen Windungszahlverhältnissen für den ITL- und Astra-Stromwandler ersichtlich.

Tabelle 18: Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, ITL (39379)

N_1	19,998	ϵ_1	-0,0623 %
N_2	20,9998	ϵ_2	-4,8213 %
N_3	21,9998	ϵ_3	-9,1477 %
N_4	22,9998	ϵ_4	-13,0978 %

Tabelle 19: Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses, Astra (3408420)

N_1	19,9087	ϵ_1	-0,193 %
N_2	20,9087	ϵ_2	-4,9669 %
N_3	21,9087	ϵ_3	-9,3046 %
N_4	22,9087	ϵ_4	-13,2636 %

Die Abbildung 57 und die Abbildung 58 zeigen den Übersetzungsfehler als Funktion des Windungszahlverhältnisses für den ITL- und für den Astra-Stromwandler. Die Änderung des Übersetzungsverhältnisses von N_1 auf N_2 bewirkt eine Änderung des Übersetzungsfehlers um etwa 4,76 % beim ITL-Stromwandler und um 4,77 % beim Astra-Stromwandler.

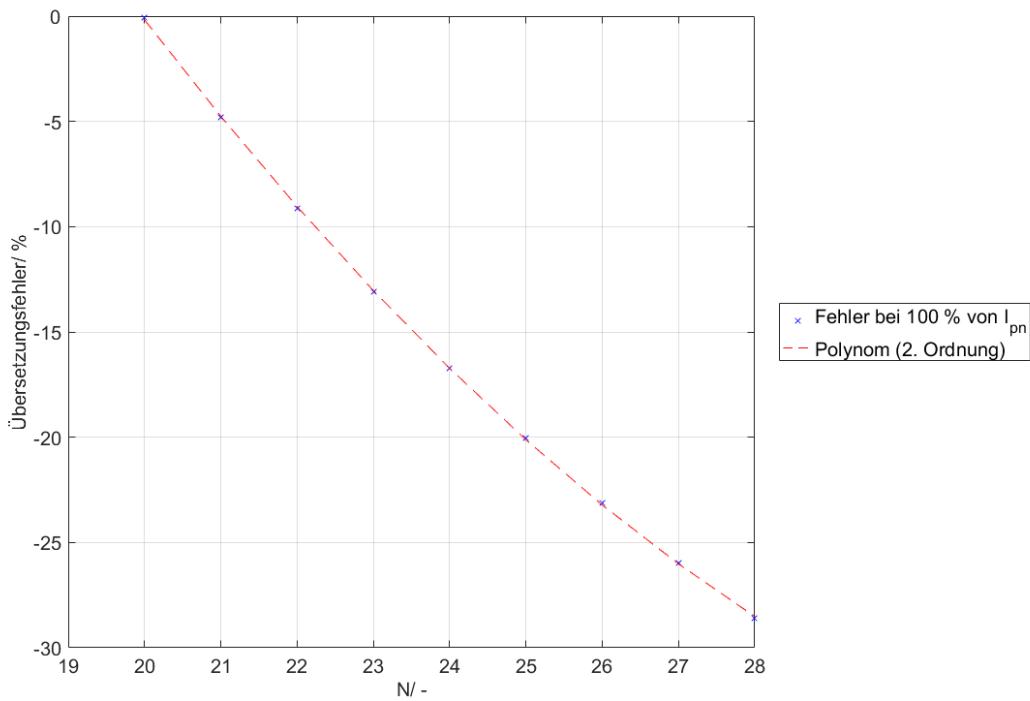


Abbildung 57: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses,
Schrittweite ΔN ist 1, Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

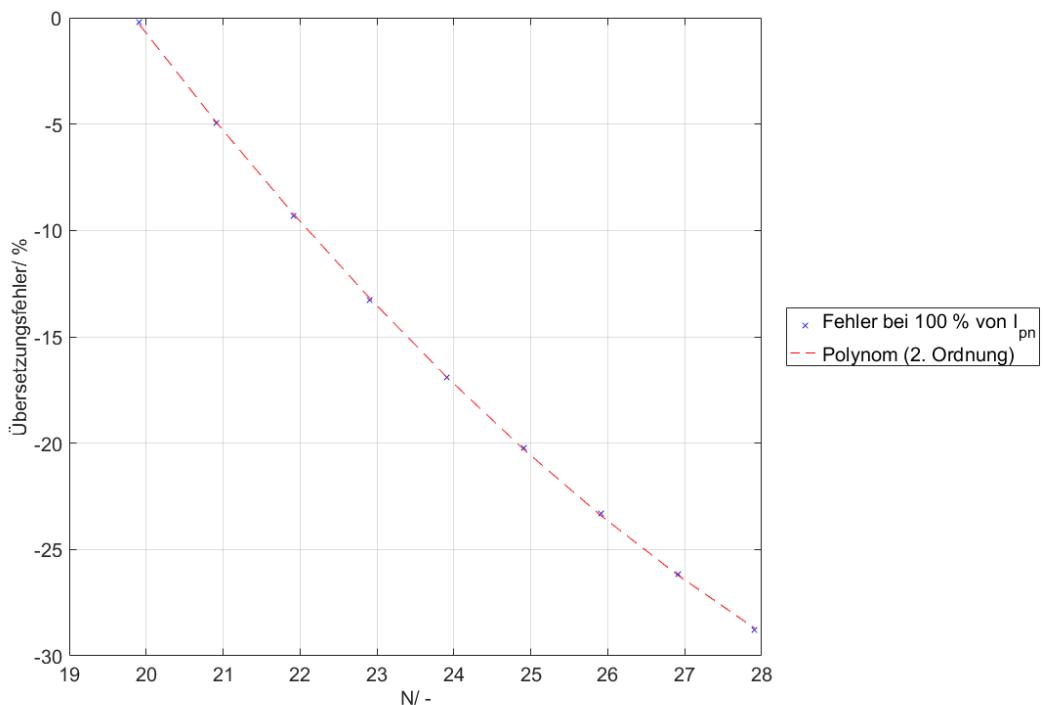


Abbildung 58: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses,
Schrittweite ΔN ist 1, Stromwandler Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes

Die Tabelle 20 und die Tabelle 21 stellen den Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes für den ITL- und Astra-Stromwandler dar. Die Änderung des Fehlers von R_1 auf R_2 beträgt beim ITL-Stromwandler etwa 0,03 % und 1 Minute und beim Astra-Stromwandler etwa 0,13 % und 6,9 Minuten. Der Widerstand R_1 entspricht dem gemessenen Widerstand.

Tabelle 20: Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes, ITL (39379)

R_1	0,0399 Ω	ε_1	-0,0623 %	δ_1	5,0339 min
R_2	0,1399 Ω	ε_2	-0,0925 %	δ_2	6,0591 min
R_3	0,2399 Ω	ε_3	-0,1152 %	δ_3	6,9996 min
R_4	0,3399 Ω	ε_4	-0,1387 %	δ_4	7,8641 min

Tabelle 21: Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes, Astra (3408420)

R_1	0,0289 Ω	ε_1	-0,193 %	δ_1	15,85 min
R_2	0,1289 Ω	ε_2	-0,324 %	δ_2	22,76 min
R_3	0,2289 Ω	ε_3	-0,476 %	δ_3	28,91 min
R_4	0,3289 Ω	ε_4	-0,642 %	δ_4	34,47 min

Der Einfluss auf den Übertragungsfehler in Abhängigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes bei 100 % des Primärnennstroms wird in Abbildung 59 und Abbildung 60 für beide Stromwandler dargestellt.

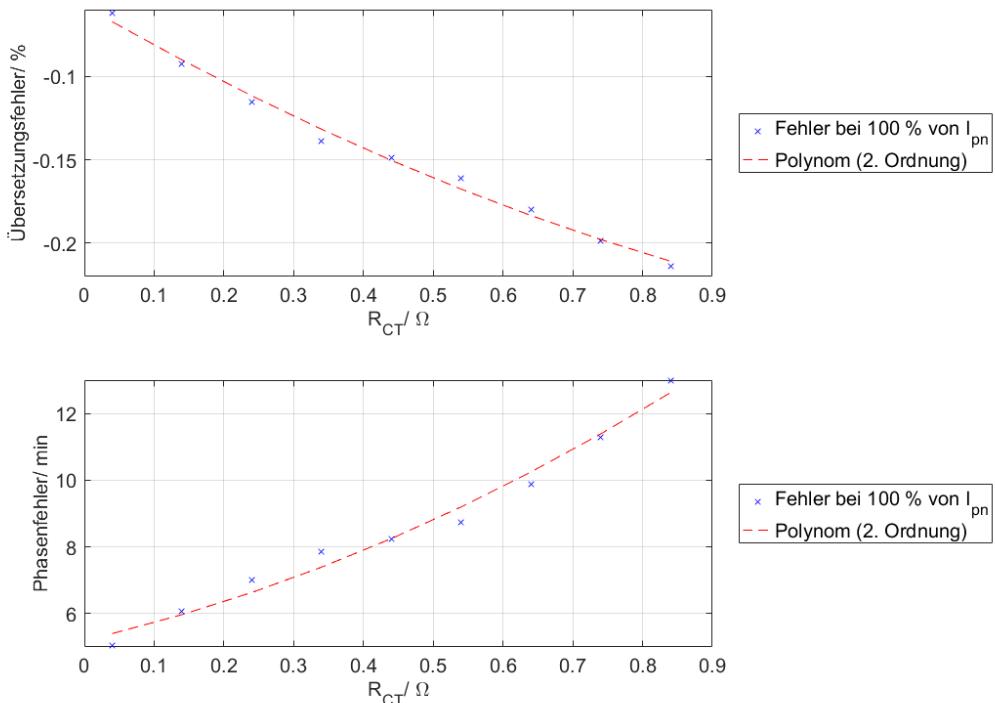


Abbildung 59: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Wicklungswiderstandes, Schrittweite ΔR ist 0,1 Ω , Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

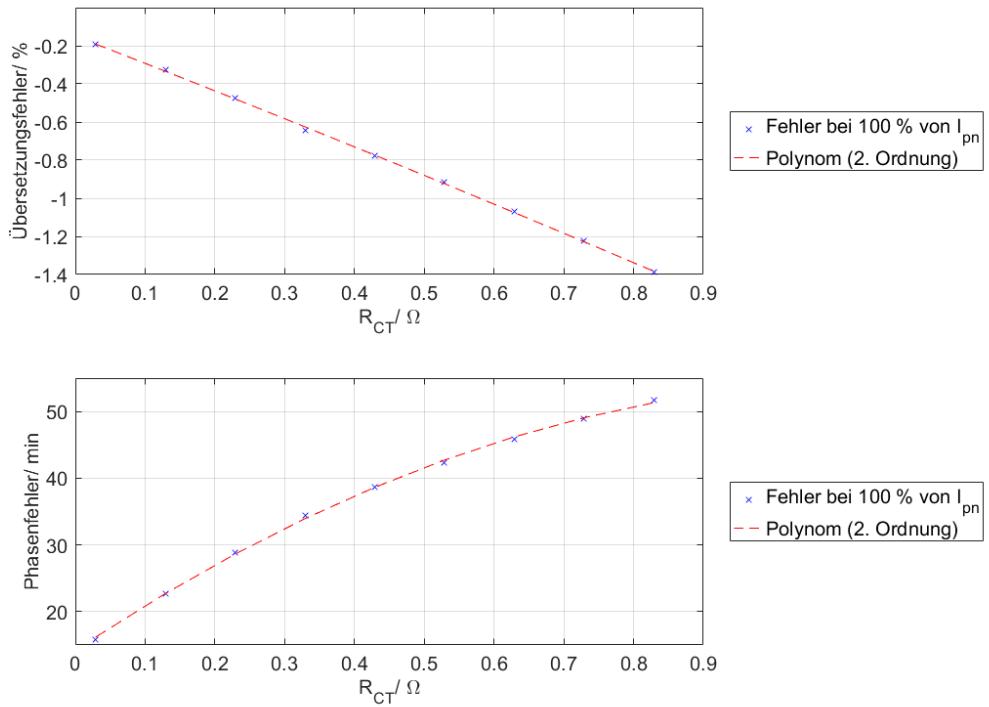


Abbildung 60: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Wicklungswiderstandes, Schrittweite ΔR ist $0,1 \Omega$, Stromwandler Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität

Die Tabelle 22 und die Tabelle 23 zeigen den Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität. Die Änderung des Übersetzungsfehlers und des Phasenfehlers von $L_{\sigma 1}$ auf $L_{\sigma 2}$ beträgt etwa 0,04 % und 1,5 Minuten beim ITL-Stromwandler und 0,12 % und 14 Minuten beim Astra-Stromwandler.

Tabelle 22: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität, ITL (39379)

$L_{\sigma 0}$	0 mH	ϵ_1	-0,0623 %	δ_1	5,0339 min
$L_{\sigma 1}$	0,2 mH	ϵ_2	-0,1008 %	δ_2	4,3804 min
$L_{\sigma 2}$	0,4 mH	ϵ_3	-0,1377 %	δ_3	3,5668 min
$L_{\sigma 3}$	0,6 mH	ϵ_4	-0,1692 %	δ_4	2,6737 min

Tabelle 23: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität, Astra (3408420)

$L_{\sigma 0}$	0 mH	ϵ_1	-0,193 %	δ_1	15,85 min
$L_{\sigma 1}$	1 μ H	ϵ_2	-0,194 %	δ_2	15,82 min
$L_{\sigma 2}$	501 μ H	ϵ_3	-0,623 %	δ_3	1,81 min
$L_{\sigma 3}$	1,001 mH	ϵ_4	-0,971 %	δ_4	-11,61 min

Die Abbildung 61 und die Abbildung 62 zeigen die Sensitivität des Fehlers in Abhängigkeit der Streuinduktivität bei 100 % des Primärnennstroms.

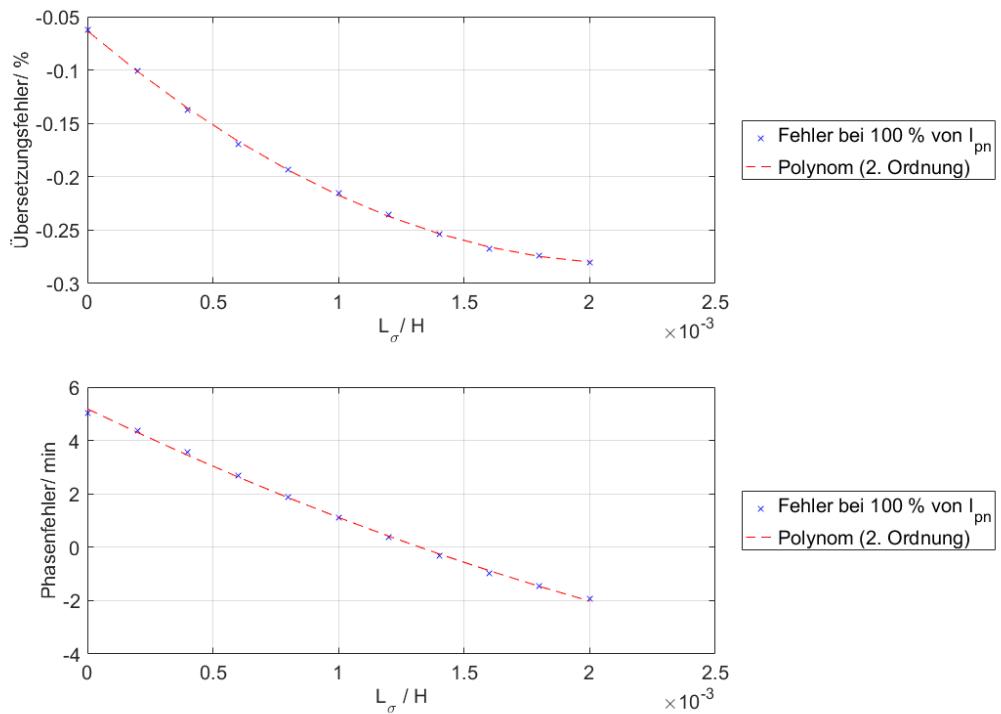


Abbildung 61: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität, Schrittweite ΔL ist 0,2 mH, Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

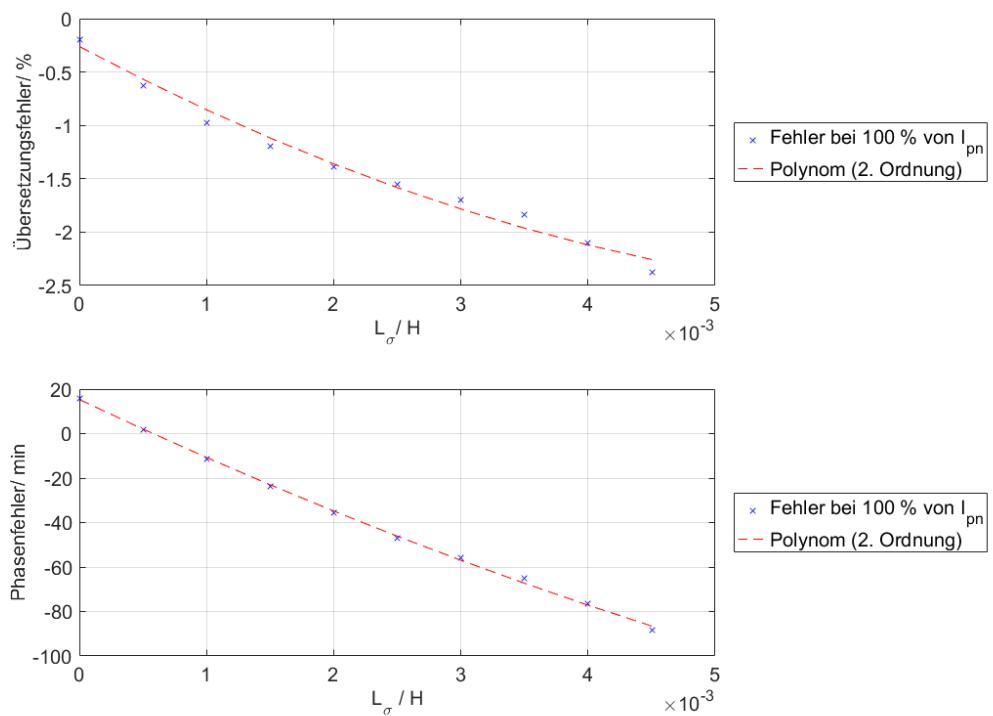


Abbildung 62: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität, Schrittweite ΔL ist 500 μ H, Stromwandler Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz

Die Eisenkernimpedanz wird ausgehend vom gemessenen Wert Z_{K1} mit jedem weiteren Messpunkt um 10 % erhöht. Die Tabelle 24 und die Tabelle 25 zeigen den Übertragungsfehler für den ITL- und für den Astra-Stromwandler. Eine Änderung der Eisenkernimpedanz um 10 % verursacht beim ITL-Stromwandler eine Änderung des Übersetzungsfehlers um etwa 0,04 % und des Phasenfehlers um etwa 0,5 Minuten. Beim Astra-Stromwandler beträgt die Änderung etwa 0,06 % und 1,4 Minuten.

Tabelle 24: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, ITL (39379)

Z_{K1}	+0 %	ε_1	-0,0623 %	δ_1	5,0339 min
Z_{K2}	+10 %	ε_2	-0,0566 %	δ_2	4,5765 min
Z_{K3}	+20 %	ε_3	-0,0518 %	δ_3	4,1953 min
Z_{K4}	+30 %	ε_4	-0,0477 %	δ_4	3,8728 min

Tabelle 25: Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz, Astra (3408420)

Z_{K1}	+0 %	ε_1	-0,193 %	δ_1	15,85 min
Z_{K2}	+10 %	ε_2	-0,134 %	δ_2	14,42 min
Z_{K3}	+20 %	ε_3	-0,085 %	δ_3	13,22 min
Z_{K4}	+30 %	ε_4	-0,043 %	δ_4	12,21 min

Die Abbildung 63 und die Abbildung 64 stellen den Einfluss auf den Fehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz bei 100 % des Primärnennstroms für beide Stromwandler dar.

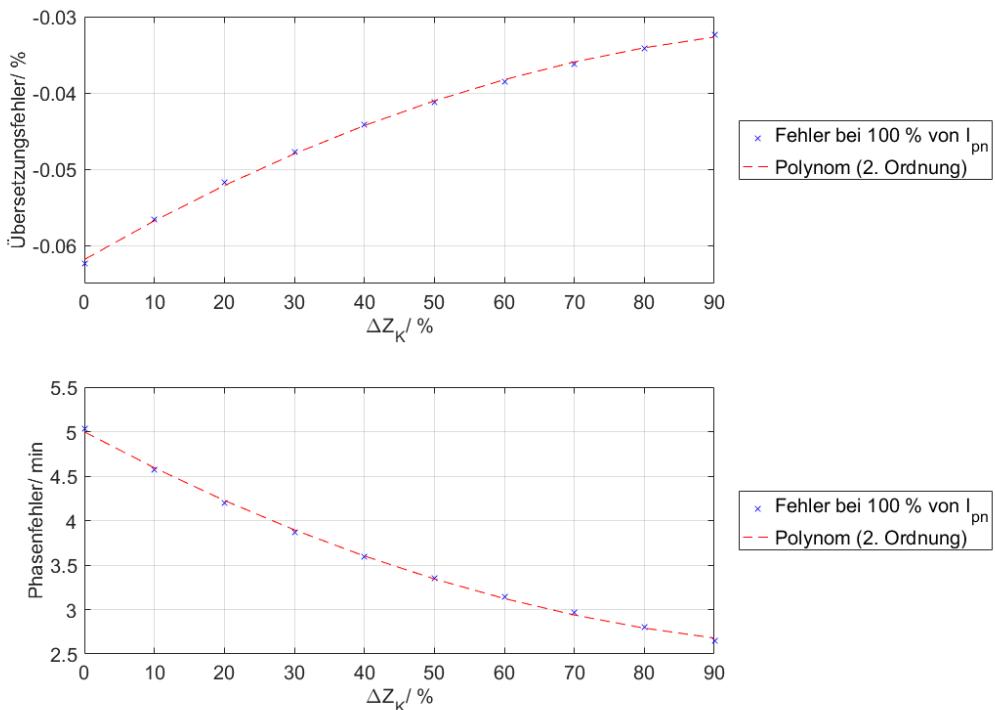


Abbildung 63: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz, Schrittweite ΔZ_K ist +10 %, Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

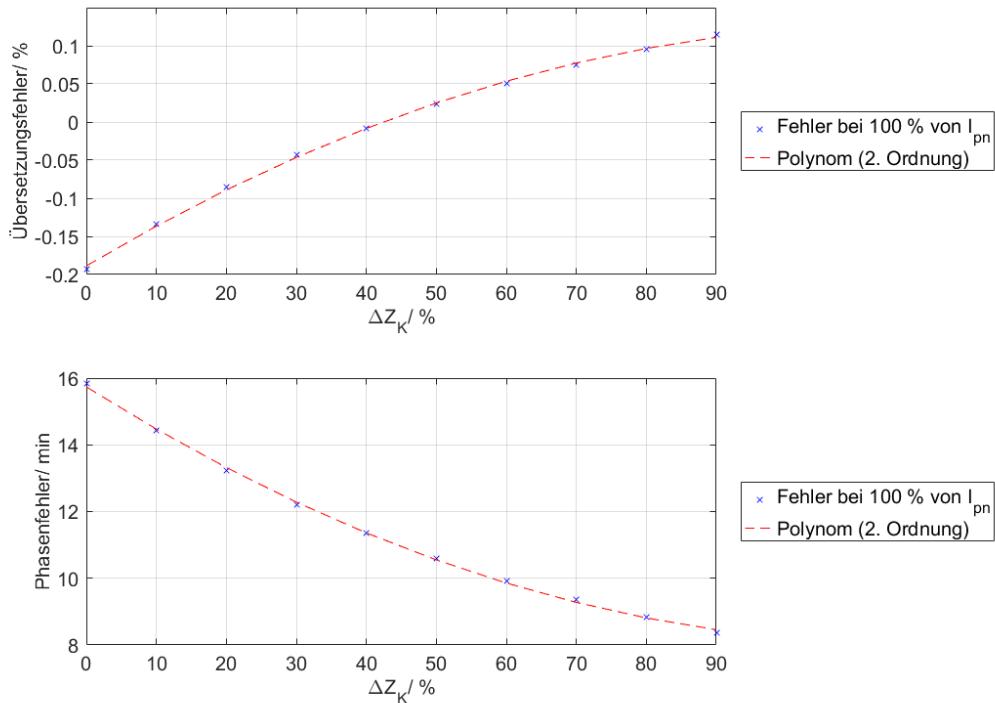


Abbildung 64: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz,
Schrittweite ΔZ_K ist +10 %, Stromwandler Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

8.3 Vergleich mit hoher und niedriger Übersetzung

Im Folgenden werden die Kategorien mit hoher Übersetzung (Ritz-Stromwandler, Seriennummer: 05-594259, 1. Kategorie) und niedriger Übersetzung (Astra-Stromwandler, Seriennummer: 3408420, 2. Kategorie) gegenübergestellt.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses:

Die Simulationen in Kapitel 8.1 und 8.2 zeigen, dass der Einfluss auf den Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses für Stromwandler mit niedriger Übersetzung sehr viel größer ist als bei Stromwandlern mit hoher Übersetzung.

In Abbildung 65 wird der Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses für eine hohe und eine niedrige Übersetzung dargestellt. Die Sensitivität auf den Übersetzungsfehler in Abhängigkeit des Windungszahlverhältnisses ist beim Astra-Stromwandler mit niedriger Übersetzung deutlich größer.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Sekundärwiderstandes:

Es wird in Kapitel 8.1 und 8.2 ersichtlich, dass der Einfluss auf den Übertragungsfehler mit kleiner werdendem Sekundärwiderstand sowohl für eine niedrige als auch für eine hohe Übersetzung zunimmt. Dies ist auch mit der Sensitivitätsanalyse erarbeitet worden.

In Abbildung 66 wird der Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Sekundärwicklungswiderstandes für eine hohe und eine niedrige Übersetzung dargestellt. Bei niedriger Übersetzung ist eine deutlich höhere Sensitivität erkennbar.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit des Sekundärstreuinduktivität:

Die Kapitel 8.1 und 8.2 zeigen, dass die Sekundärstreuinduktivität vor allem bei ovalen und rechteckigen Eisenkernen einen wesentlichen Einfluss auf den Übertragungsfehler hat. Des Weiteren ist ein Einfluss auf den Übertragungsfehler bei ringförmigen Eisenkernen und niedriger Übersetzung erkennbar.

In Abbildung 67 wird der Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität für eine hohe und eine niedrige Übersetzung dargestellt. Die Sensitivität auf den Übertragungsfehler in Abhängigkeit der Streuinduktivität ist beim Astra-Stromwandler mit niedriger Übersetzung größer.

Sensitivität auf den Fehler in Abhängigkeit der Eisenkernimpedanz:

Eine Änderung der Eisenkernimpedanz wirkt sich auf den Übertragungsfehler aus, sowohl für Stromwandler mit hoher als auch mit niedrigen Übersetzung (siehe Kapitel 8.1 und 8.2).

In Abbildung 68 wird der Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz für eine hohe und eine niedrige Übersetzung dargestellt. Die Sensitivität ist bei kleiner Übersetzung größer.

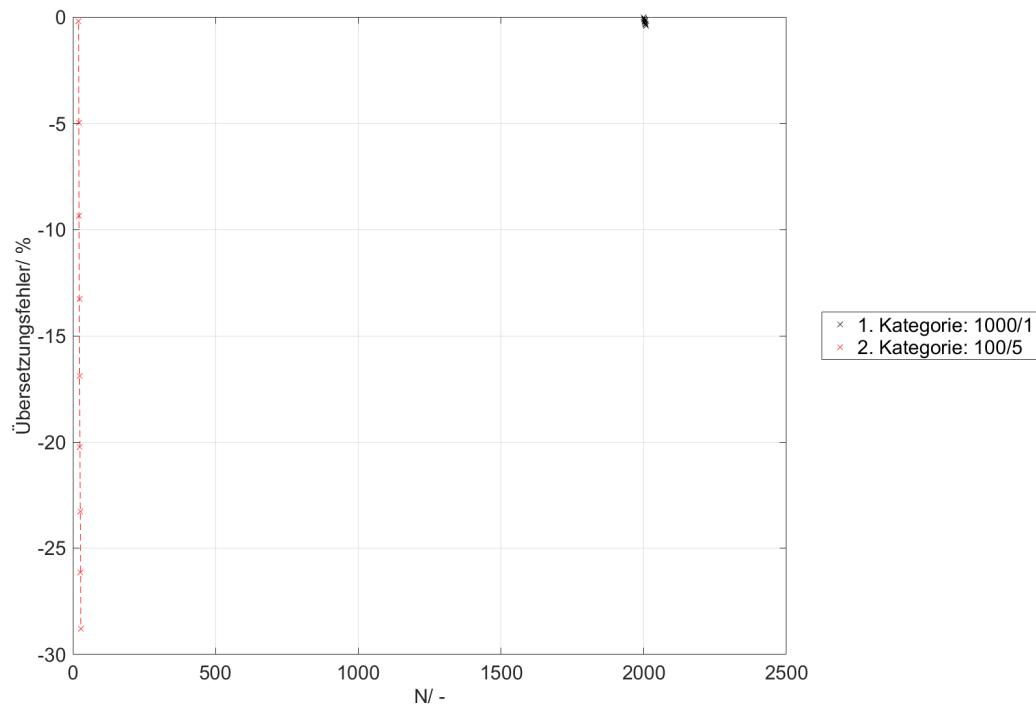


Abbildung 65: Übersetzungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Windungszahlverhältnisses für eine hohe und eine niedrige Übersetzung

Quelle: Eigene Ausarbeitung

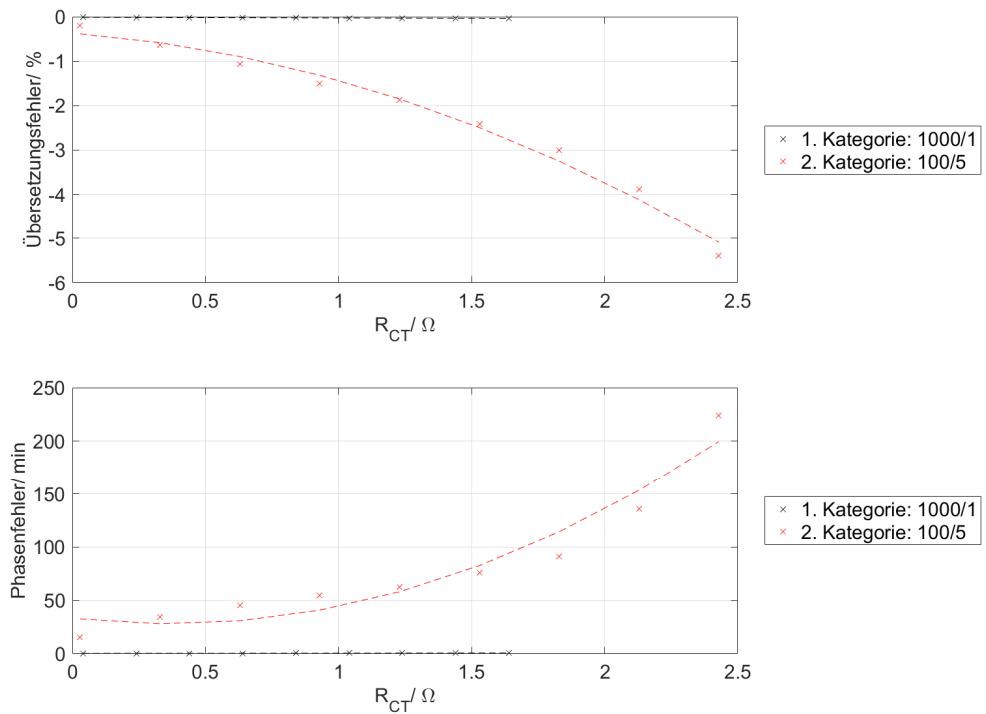


Abbildung 66: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion des Sekundärwicklungswiderstandes für eine hohe und eine niedrige Übersetzung

Quelle: Eigene Ausarbeitung

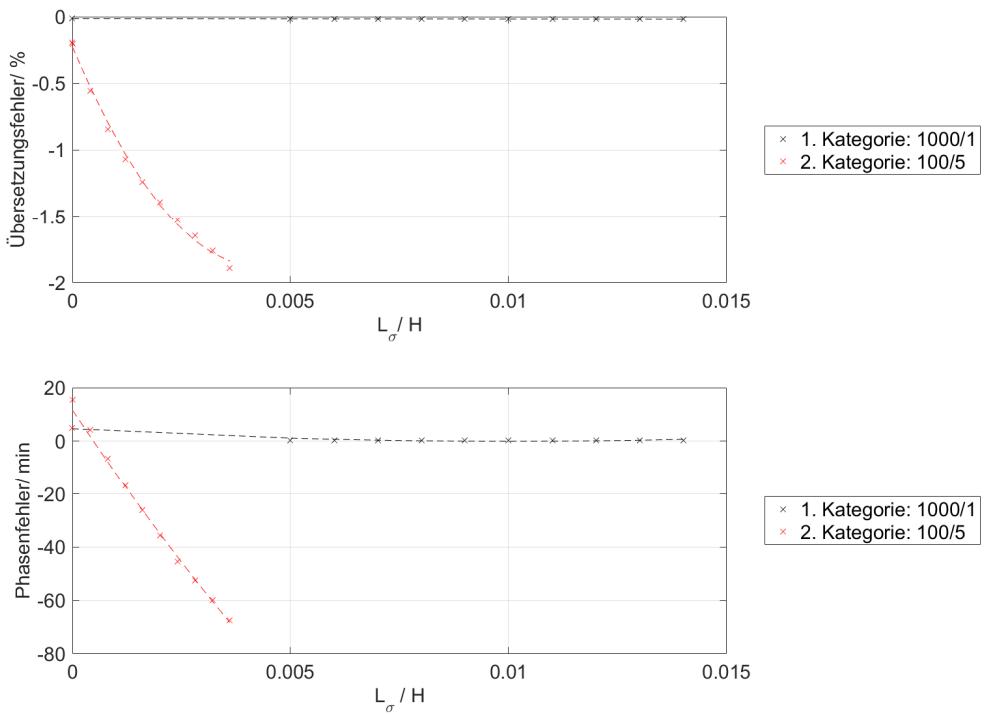


Abbildung 67: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Streuinduktivität für eine hohe und eine niedrige Übersetzung

Quelle: Eigene Ausarbeitung

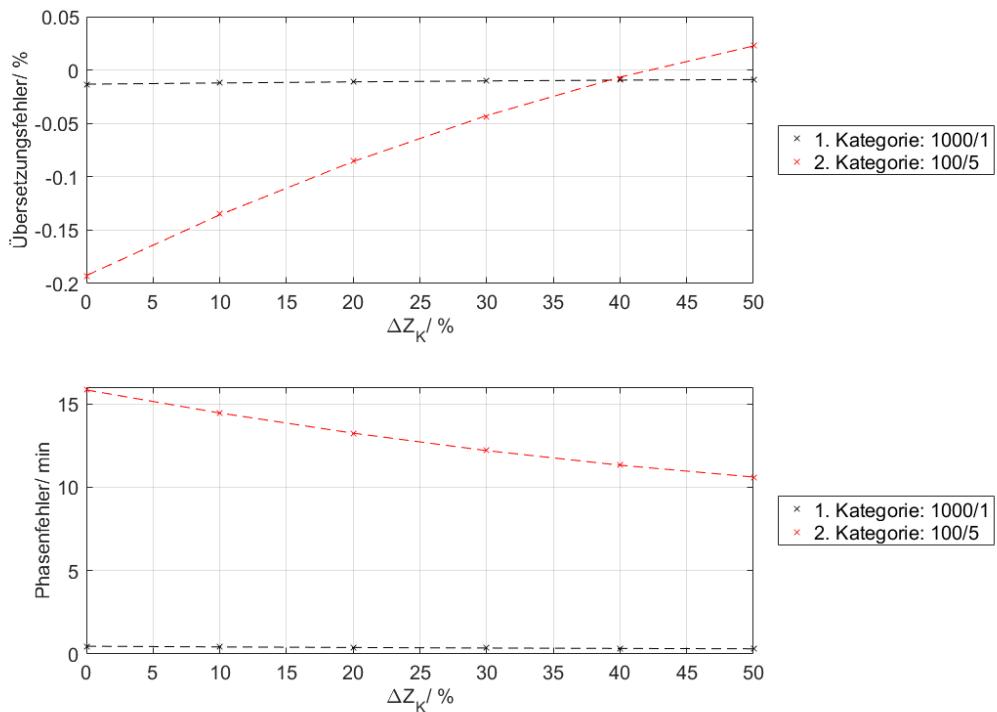


Abbildung 68: Übertragungsfehler bei 100 % von I_{pn} als Funktion der Eisenkernimpedanz für eine hohe und eine niedrige Übersetzung

Quelle: Eigene Ausarbeitung

9. Untersuchung der Einflüsse auf das Windungszahlverhältnis

Die theoretische Betrachtung des Windungszahlverhältnisses in Kapitel 7 wird anhand von Messungen und Simulationen näher analysiert. Es werden die Einflüsse auf den Übertragungsfehler bei verschiedenen Abhängigkeiten des Windungszahlverhältnisses wie der Sekundärspannung oder auch der Streuinduktivität betrachtet.

9.1 Windungszahlverhältnis in Abhängigkeit der Spannung

Für diese Betrachtung wurde das Windungszahlverhältnis N bei unterschiedlichen Sekundärspannungen U_{AC} evaluiert (siehe Kapitel 7, $N(U_{AC})$).

Die Messung der Sekundärspannung U_{AC} und der Primärspannung U_{Prim} zur Bestimmung der Übersetzung wurde frequenzselektiv gemessen. Die Abbildung 69 stellt den Übertragungsfehler bei verschiedenen Sekundärspannungen U_{AC} dar. Als Vergleich ist die Fehlerkurve der CT Analyzer-Messung dargestellt („Simulation ESB-CTA“). Die Berechnung des Windungszahlverhältnisses wurde vom Gerät bei 2,9 V durchgeführt.

Aus Abbildung 69 geht hervor, dass der Übersetzungsfehler bei einer Spannung U_{AC} von 0,2 V („N-0,2 V“) und 1,8 V („N-1,8 V“) die größten Abweichungen zur „Simulation ESB-CTA“ hat. Die Bestimmung des Übersetzungsverhältnisses bei 1 V („N-1V“) und 2,9 V („N-2,9 V“) weist die beste Annäherung zur Fehlerkurve „Simulation

ESB-CTA“ auf. Die Fehlerkurve mit 0,6 V („N-0,6 V“) hat einen etwas größeren Übersetzungsfehler als die Fehlerkurve mit 1 V („N-1 V“) und 2,9 V („N-2,9 V“).

Aufgrund der Betrachtung des Windungszahlverhältnisses N als Funktion der Sekundärspannung U_{AC} ist beim ITL-Stromwandler keine systematische Änderung des Fehlers erkennbar.

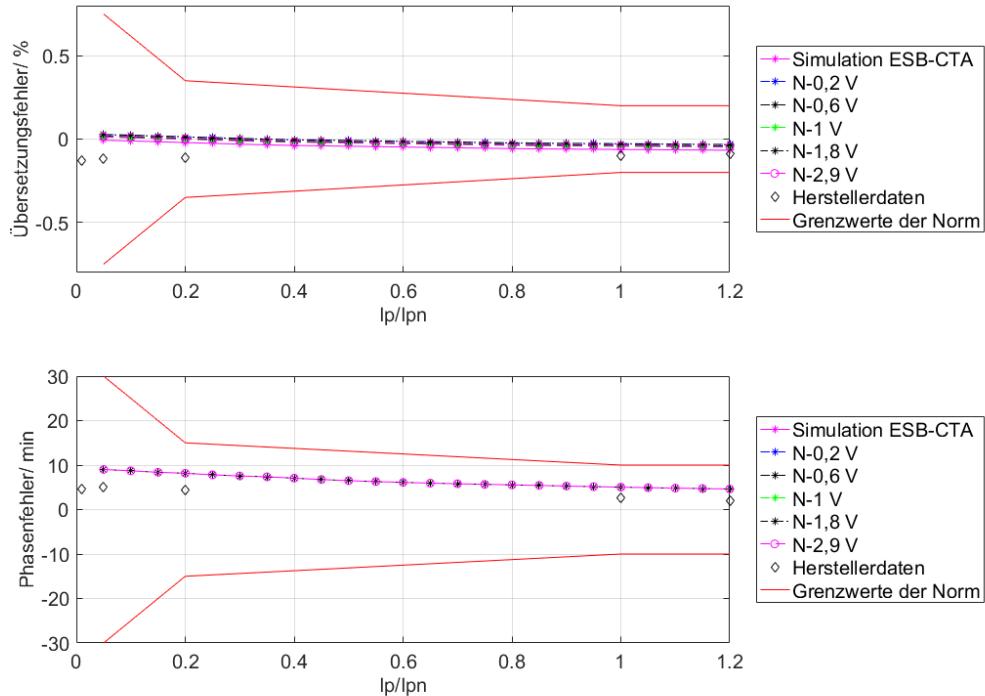


Abbildung 69: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Variation der Sekundärspannung U_{AC} bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Tabelle 26 gibt die Werte aus Abbildung 69 für den Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und das Windungszahlverhältnis N an.

Tabelle 26: Übersetzungsfehler und Windungszahlverhältnis bei unterschiedlicher Sekundärspannung, Stromwandler ITL (39379)

	ϵ at 100 % von I_{pn}	N	Arbeitspunkt
N-0,2 V	-0,0271 %	19,9928	17 % von I_{pn}
N-0,6 V	-0,0368 %	19,9947	50 % von I_{pn}
N-1 V	-0,0435 %	19,9960	83 % von I_{pn}
N-1,8 V	-0,0284 %	19,9930	150 % von I_{pn}
N-2,9 V	-0,0411 %	19,9956	240 % von I_{pn}
Simulation ESB-CTA	-0,0623 %	19,9998	240 % von I_{pn}

Bei der Berechnung der Übersetzung ist ersichtlich, dass sich die Werte nur in der dritten Nachkommastelle ändern.

9.2 Windungszahlverhältnis in Abhängigkeit des Widerstandes

Bei dieser Betrachtung wird das Windungszahlverhältnis N bei verschiedenen Sekundärwiderständen untersucht. Die Wahl des zu untersuchenden Sekundärwiderstandsbereichs wird anhand der garantierten Genauigkeit der Widerstandsmessung getroffen. Die garantierte Genauigkeit der Widerstandsmessung wird mit $0,1\% + 1 \text{ m}\Omega$ angegeben. (Vgl. OMICRON electronics GmbH 2016, S. 165)

Die Messgenauigkeit des Sekundärwiderstandes für den CT Analyzer wird mit der Formel (91) angegeben (siehe Kapitel 7).

Der Toleranzbereich des Sekundärwiderstandes wird für die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses verwendet, um den Einfluss auf den Übersetzungsfehler zu analysieren. Die Abbildung 70 stellt den Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms für den ITL-Stromwandler dar. Die Änderung des Sekundärwiderstandes innerhalb des Toleranzbereichs hat nur eine sehr kleine Änderung des Übersetzungsfehlers zur Folge (siehe auch Tabelle 27).

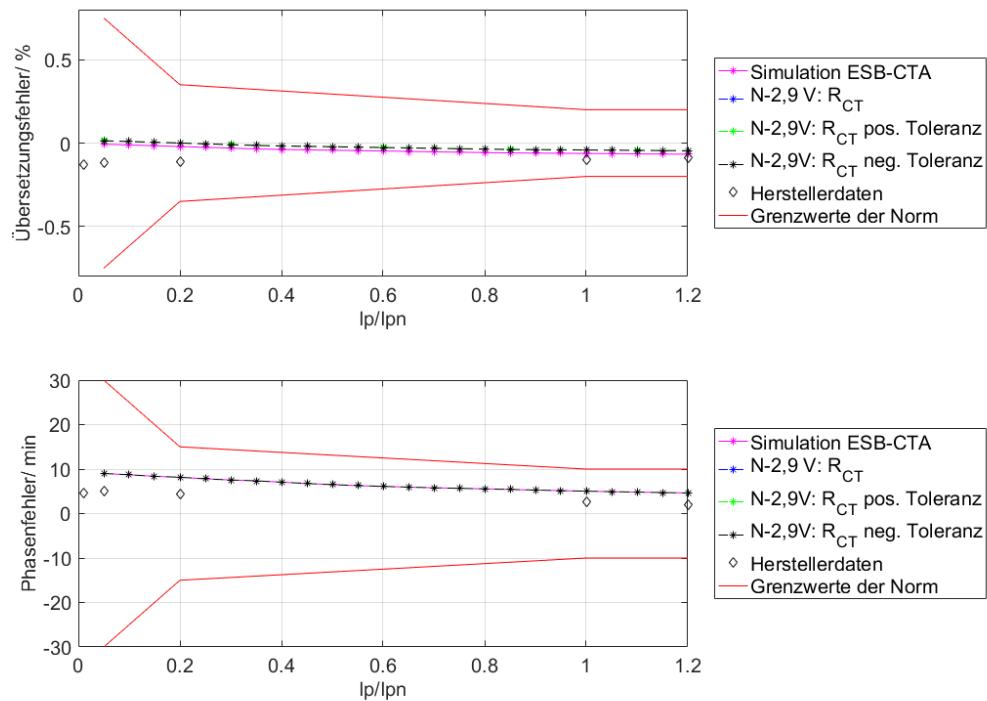


Abbildung 70: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Änderung des Sekundärwicklungswiderstandes R_{CT} bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Tabelle 27 zeigt den Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms für die verschiedenen Sekundärwiderstände. Das Windungszahlverhältnis N wurde bei 240 % von I_{pn} gemessen.

Tabelle 27: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms bei entsprechendem Sekundärwiderstand, Stromwandler ITL (39379)

	ϵ at 100 % von I_{pn}	R_{CT}
N-2,9 V: R_{CT}	-0,0411 %	0,0399 Ω
N-2,9 V: R_{CT} pos. Toleranz	-0,0405 %	0,0410 Ω
N-2,9 V: R_{CT} neg. Toleranz	-0,0417 %	0,0389 Ω
Simulation ESB-CTA	-0,0623 %	0,0399 Ω

Die Abbildung 71 stellt den Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms für den Astra-Stromwandler dar und zeigt das Verhalten des Übertragungsfehlers bei Änderung des Sekundärwiderstandes innerhalb des garantierten Toleranzbereichs. Der Einfluss des Sekundärwicklungswiderstandes auf den Übertragungsfehler ist bei diesem Stromwandler sehr klein (siehe auch Tabelle 28).

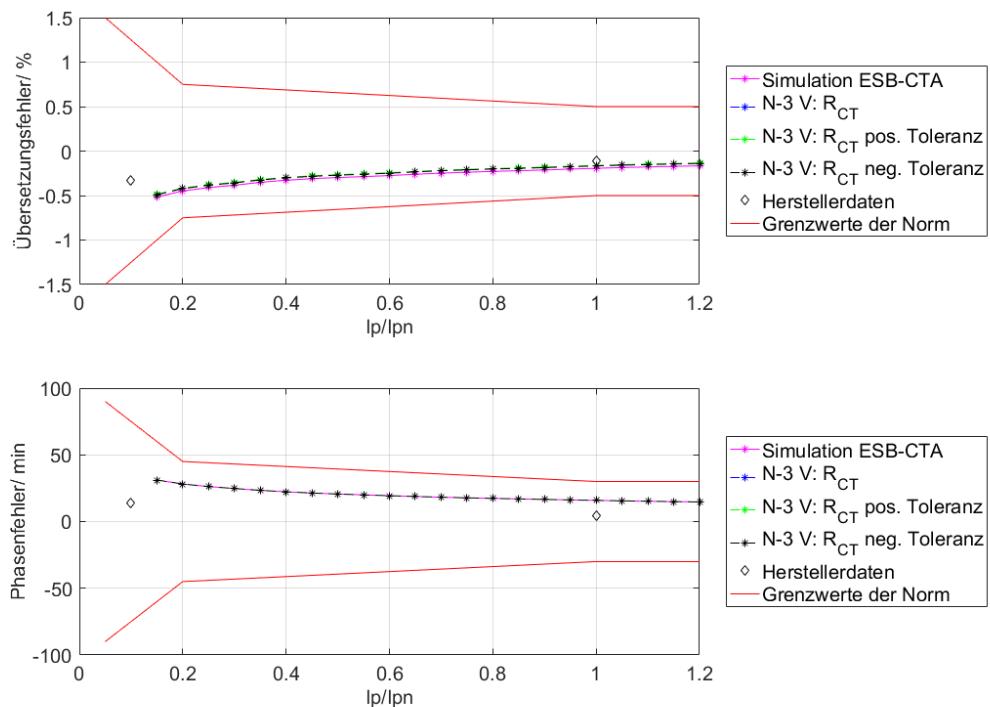


Abbildung 71: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Änderung des Sekundärwicklungswiderstandes R_{CT} bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Tabelle 28 stellt den Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms für die verschiedenen Sekundärwiderstände dar. Das Windungszahlverhältnis N wurde bei 260 % von I_{pn} gemessen.

Tabelle 28: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms bei entsprechendem Sekundärwiderstand, Stromwandler Astra (3408420)

	ϵ at 100 % von I_{pn}	R_{CT}
N-3 V: R_{CT}	-0,1641 %	0,029 Ω
N-3 V: R_{CT} pos. Toleranz	-0,1613 %	0,030 Ω
N-3 V: R_{CT} neg. Toleranz	-0,1669 %	0,028 Ω
Simulation ESB-CTA	-0,1934 %	0,029 Ω

9.3 Windungszahlverhältnis in Abhängigkeit der Streuinduktivität

Bei dieser Betrachtung wird das Windungszahlverhältnis in Abhängigkeit der Streuinduktivität und dessen Auswirkung auf den Übertragungsfehler untersucht.

Die Streuinduktivität wird nur in der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses berücksichtigt und verändert daher nur den Übersetzungsfehler. Die Streuinduktivität wird in der Übertragungsfehlerberechnung nicht verwendet. Die Tabelle 29 und die Tabelle 30 zeigen den Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms bei verschiedenen Streuinduktivitäten für den ITL- und Astra-Stromwandler. Das Windungszahlverhältnis N des ITL-Stromwandlers wurde bei 240 % von I_{pn} und des Astra-Stromwandlers bei 260 % von I_{pn} gemessen.

Tabelle 29: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und Streuinduktivität, Stromwandler ITL (39379)

	ϵ at 100% von I_{pn}	L_σ
N-2,9 V: kein L_σ	-0,0411 %	0 H
N-2,9 V: $L_{\sigma 1}$	-0,0219 %	200 μH
N-2,9 V: $L_{\sigma 2}$	0,0100 %	400 μH
N-2,9 V: $L_{\sigma 3}$	0,0439 %	600 μH
N-2,9 V: $L_{\sigma 4}$	0,0783 %	800 μH
Simulation ESB-CTA	-0,0623 %	0 H

Tabelle 30: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und Streuinduktivität, Stromwandler Astra (3408420)

	ϵ at 100% von I_{pn}	L_σ
N-3 V: kein L_σ	-0,1641 %	0 H
N-3 V: $L_{\sigma 1}$	-0,1641 %	1 μH
N-3 V: $L_{\sigma 2}$	0,2781 %	501 μH
N-3 V: $L_{\sigma 3}$	0,7943 %	1,001 mH
N-3 V: $L_{\sigma 4}$	1,3179 %	1,501 mH
Simulation ESB-CTA	-0,1934 %	0 H

Die Abbildung 72 und die Abbildung 73 stellen den Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei verschiedenen Streuinduktivitäten für den ITL- und Astra-Stromwandler dar. Die Übersetzungsfehlerkurve wird mit zunehmender Streuinduktivität zu höheren Werten verschoben. Das heißt, sie verschiebt sich nach oben.

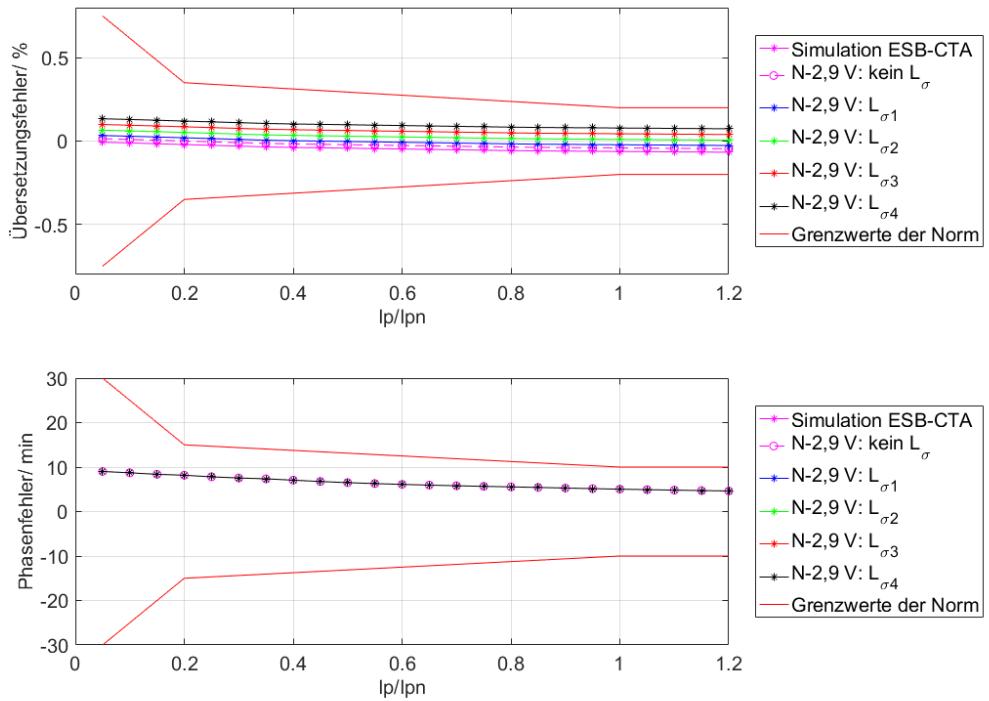


Abbildung 72: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms, Variation der Streuinduktivität bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

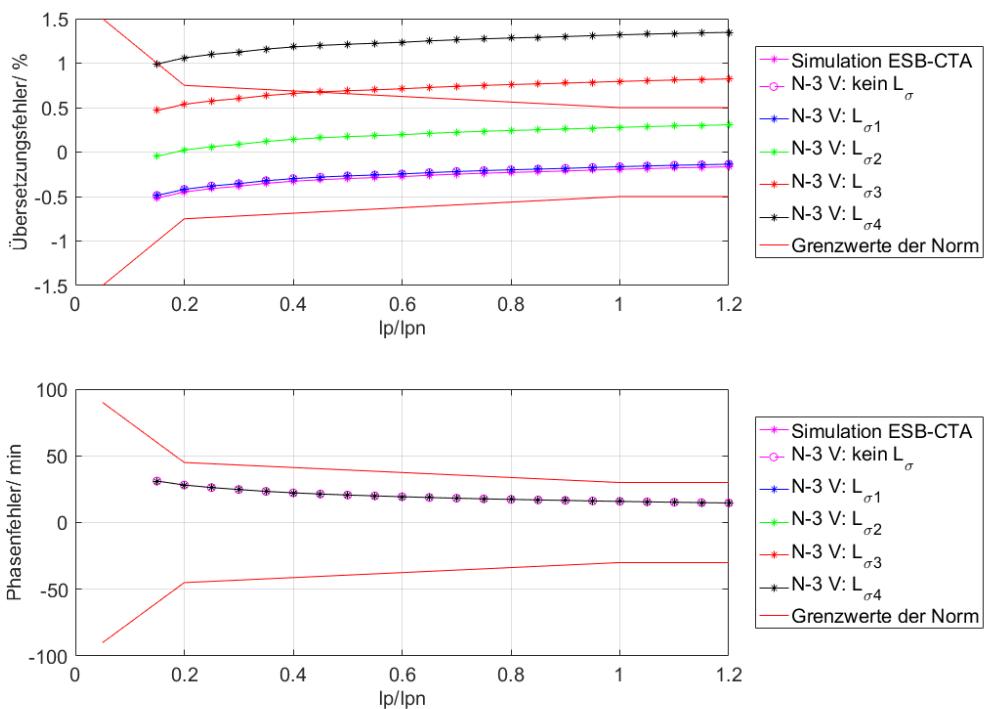


Abbildung 73: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms, Variation der Streuinduktivität bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses, Stromwandler Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

9.4 Einfluss der Genauigkeit des Windungszahlverhältnisses auf den Fehler

Die Firma OMICRON electronics GmbH garantiert im Benutzerhandbuch Genauigkeitsgrenzwerte. (Vgl. OMICRON electronics GmbH 2016, S. 150–154)

Im Folgenden sollen die Einflüsse der garantierten Genauigkeitstoleranzen auf den Übertragungsfehler untersucht werden.

Im ersten Schritt wird die Änderung des Windungszahlverhältnisses und dessen Auswirkung auf den Übersetzungsfehler untersucht. Die Variation des Windungszahlverhältnisses N_1 bis N_4 in Abbildung 74 und Abbildung 75 mit einer Schrittweite ΔN von 0,01 zeigt bereits eine deutliche Verschiebung der Übersetzungskurve. Das Windungszahlverhältnis N_1 entspricht dem Windungszahlverhältnis, das durch die Messung des CT Analyzers mit dem Modell ESB-CTA bestimmt wurde ($N_{\text{ESB-CTA}}$).

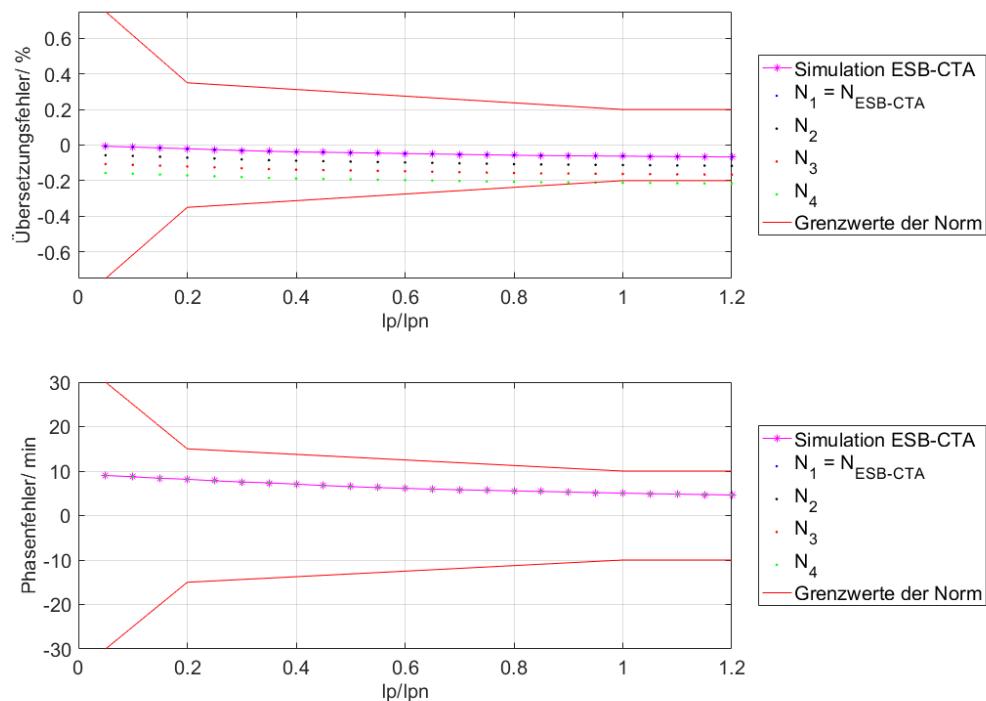


Abbildung 74: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Schrittweite ΔN von 0,01, Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

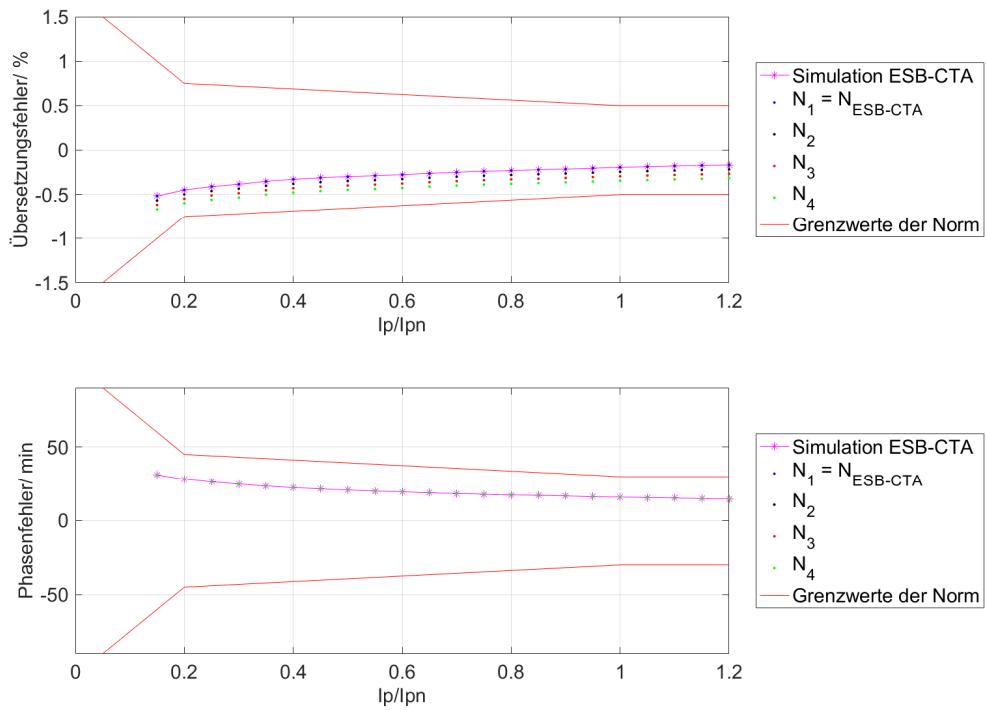


Abbildung 75: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, Schrittweite ΔN von 0,01, Stromwandler Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die garantierte Genauigkeit der Windungszahlverhältnismessung N des CT Analyzers wird mit 0,1 % angegeben. (Vgl. OMICRON electronics GmbH 2016, S. 166)

Die Tabelle 31 zeigt den Übersetzungsfehler beim gemessenen Windungszahlverhältnis und bei Berücksichtigung der Genauigkeit für den ITL-Stromwandler. Eine Änderung des Windungszahlverhältnisses für die positive Toleranz ergibt eine Differenz von 0,0999 % und für die negative Toleranz -0,0993 %. Beim Astra-Stromwandler ergibt sich bei der positiven Toleranz eine Differenz von 0,0997 % und bei der negativen Toleranz 0,0999 % (siehe Tabelle 32).

Tabelle 31: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und Windungszahlverhältnis N , Stromwandler ITL (39379)

	ϵ at 100 % von I_{pn}	N
Simulation ESB-CTA	-0,0623 %	19,9998
N pos. Toleranz	-0,1622 %	20,0198
N neg. Toleranz	0,037 %	19,9798

Tabelle 32: Übersetzungsfehler bei 100 % des Primärnennstroms und Windungszahlverhältnis N , Stromwandler Astra (3408420)

	ϵ at 100 % von I_{pn}	N
Simulation ESB-CTA	-0,1934 %	19,9087
N pos. Toleranz	-0,2931 %	19,9286
N neg. Toleranz	-0,0935 %	19,8888

Die Abbildung 76 und die Abbildung 77 stellen die Auswirkungen des garantierten Fehlers der Windungszahlverhältnismessung auf den Übertragungsfehler für den ITL- und Astra-Stromwandler dar. Durch die Messungenauigkeit der Windungszahlverhältnismessung entsteht eine Abweichung im Übersetzungsfehler, welche die Kurve deutlich verschiebt. Der Phasenfehler wird durch das Windungszahlverhältnis nicht beeinflusst.

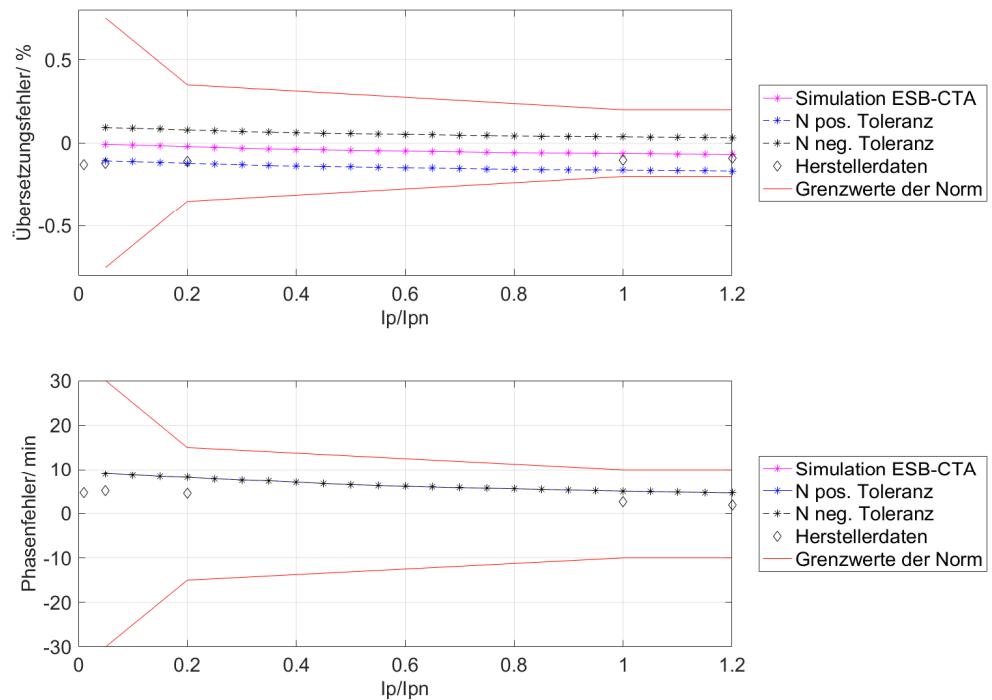


Abbildung 76: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms mit der garantierten Fehlertoleranz der Windungszahlverhältnismessung, Stromwandler ITL (39379)
Quelle: Eigene Ausarbeitung

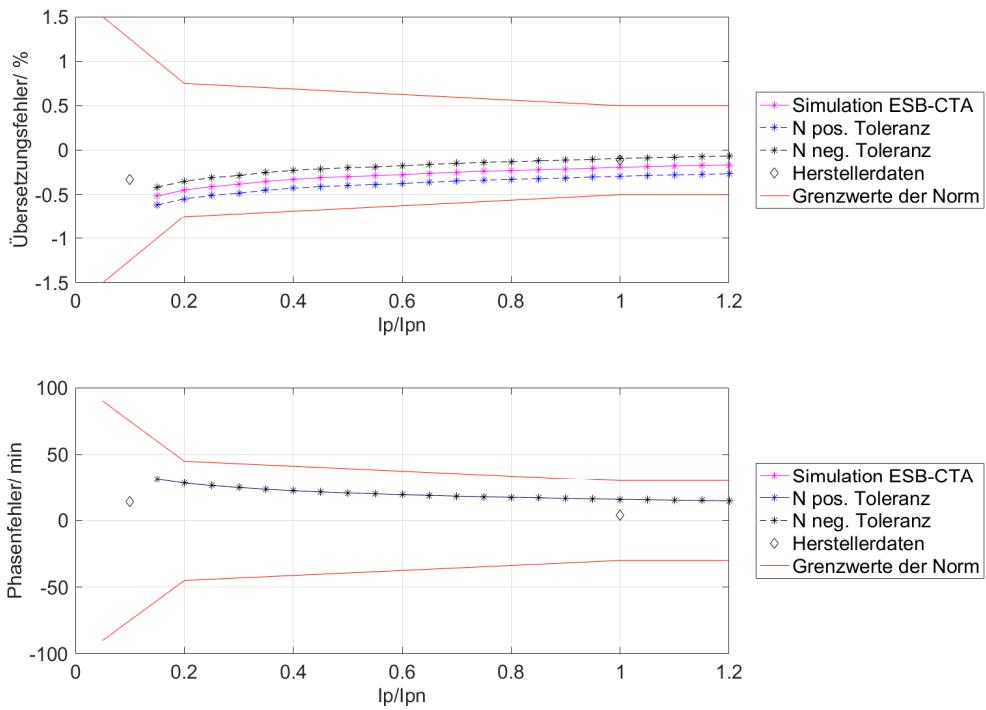


Abbildung 77: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms mit der garantierten Fehlertoleranz der Windungszahlverhältnismessung, Stromwandler Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses wird hauptsächlich durch die Spannungsmessung bestimmt, da der Einfluss des Sekundärwicklungswiderstandes R_{CT} vernachlässigbar ist (siehe Kapitel 9.2). Deshalb wird in weiterer Folge der Einfluss auf die Messgenauigkeit bei den Spannungseingängen des CT Analyzers untersucht. Für die Messung der Sekundärspannung U_{AC} werden der SEC-Messeingang und für die Primärspannung U_{Prim} der PRIM-Messeingang des CT Analyzers verwendet. Diese Messeingänge haben garantierte Genauigkeiten, wie in Tabelle 33 angegeben.

Tabelle 33: Garantierte Genauigkeit der Spannungsmesseingänge des Messgeräts CT Analyzer

Quelle: (OMICRON electronics GmbH 2016, S. 164–165), eigene Bearbeitung

Spannungsmesseingang	Genauigkeit in %
PRIM:	0,1
SEC:	0,1

In der Abbildung 78 und in der Abbildung 79 wird die garantierte Toleranz des Windungszahlverhältnisses mit der garantierten Toleranz der Spannungseingänge des CT Analyzers verglichen. Es ist ersichtlich, dass die Toleranzbereiche für das Windungszahlverhältnis deutlich größer gewählt wurden als bei der Berechnung der Toleranzen der Messeingänge. Aus dieser Analyse geht hervor, dass die Genauigkeit der Spannungseingänge bei den untersuchten Stromwandlern ITL (39379) und Astra (3408420) keinen wesentlichen Einfluss auf den Übersetzungsfehler hat. Die Abweichung zwischen positiver und negativer Toleranz ist sehr klein, deshalb ist nur eine schwarze, strichlierte Linie erkennbar.

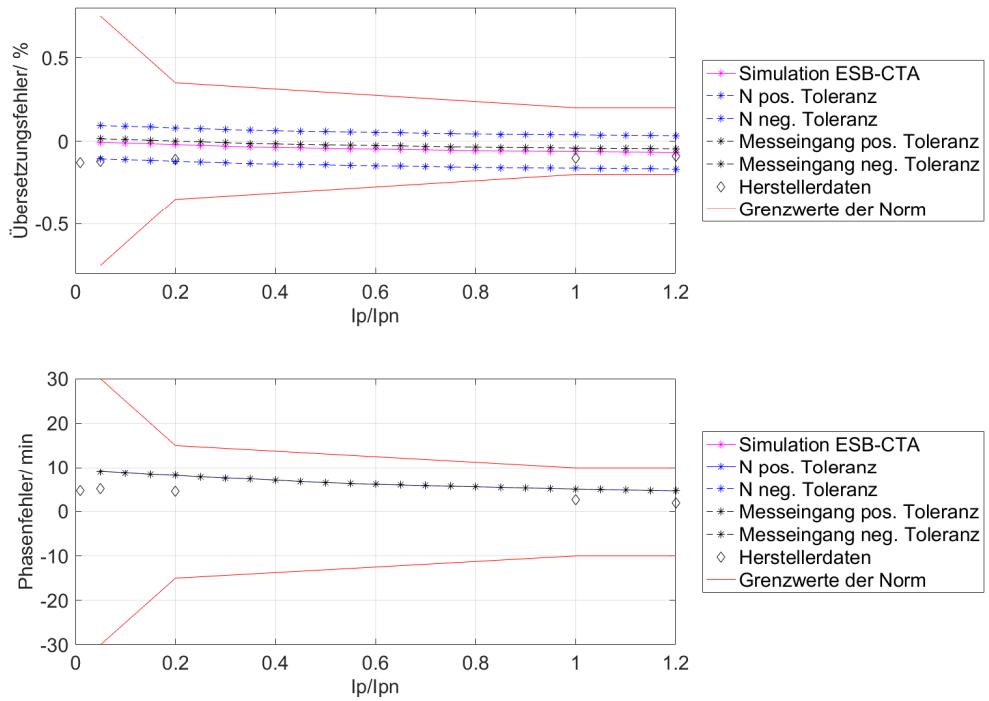


Abbildung 78: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms, Vergleich der garantierten Fehler des Windungszahlverhältnisses und der Messeingänge, Stromwandler ITL (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

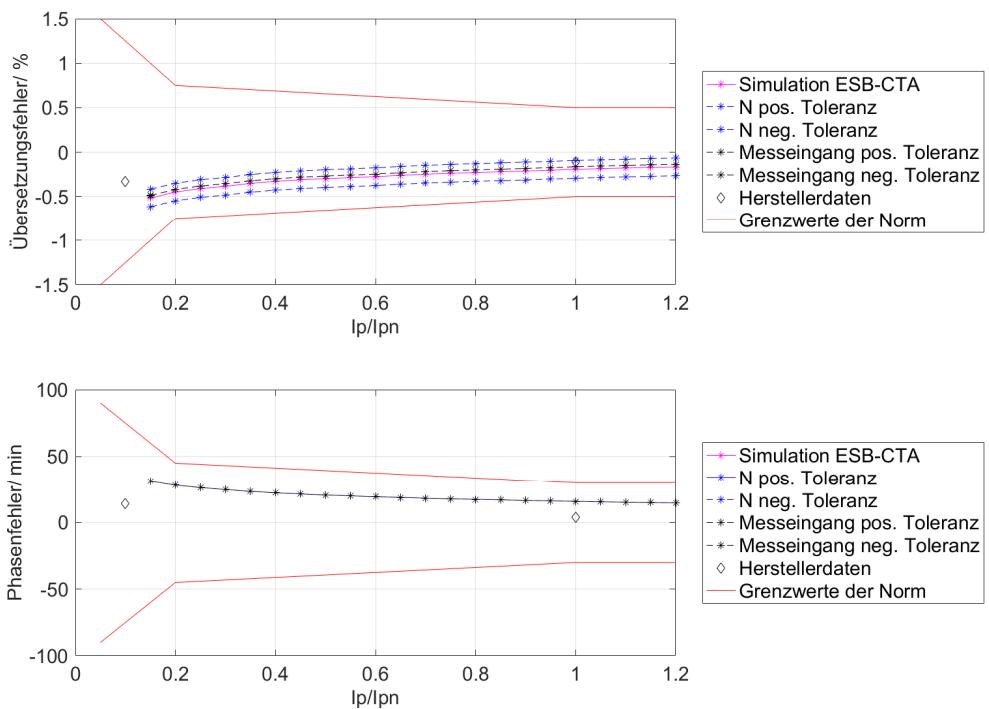


Abbildung 79: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms, Vergleich der garantierten Fehler des Windungszahlverhältnisses und der Messeingänge, Astra (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

10. Simulation der Streuinduktivität

Bei dieser Analyse wird eine angenommene Streuinduktivität in der Berechnung des Übertragungsfehlers und in der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses berücksichtigt. Es wird das Modell ESB-LS zur Simulation und Berechnung angewendet.

Die Untersuchung des Stromwandlers des Herstellers Astra (Seriennummer: 3408420) zeigt bei Berücksichtigung der Streuinduktivität bei der Berechnung des Übertragungsfehlers und des Windungszahlverhältnisses eine Verbesserung. Mit einer angenommenen Streuinduktivität $L_{\sigma 2}$ von 501 μH kann die Genauigkeit im Vergleich zu den Herstellerdaten verbessert werden (siehe Abbildung 80). Bei 100 % des Primärnennstroms ist die Abweichung des Übersetzungsfehlers im Vergleich zu den Herstellerdaten geringer geworden. Im Bereich 10 % bis 60 % des Primärnennstroms wird die Übersetzungsfehlerabweichung gegenüber den Herstellerdaten größer. Ein Grund dafür ist, dass die Messung des Windungszahlverhältnisses bei einer Kernspannung von 3 V durchgeführt wurde. Dies entspricht einem Arbeitspunkt auf der Magnetisierungskurve bei 260 % des Primärnennstroms. Dadurch können durch die Nichtlinearität größere Abweichungen bei kleineren Arbeitspunkten der Magnetisierungskurve entstehen, weil das Windungszahlverhältnis nur an einem Arbeitspunkt bestimmt und dann für alle weiteren Arbeitspunkte zur Berechnung des Übersetzungsfehlers herangezogen wird.

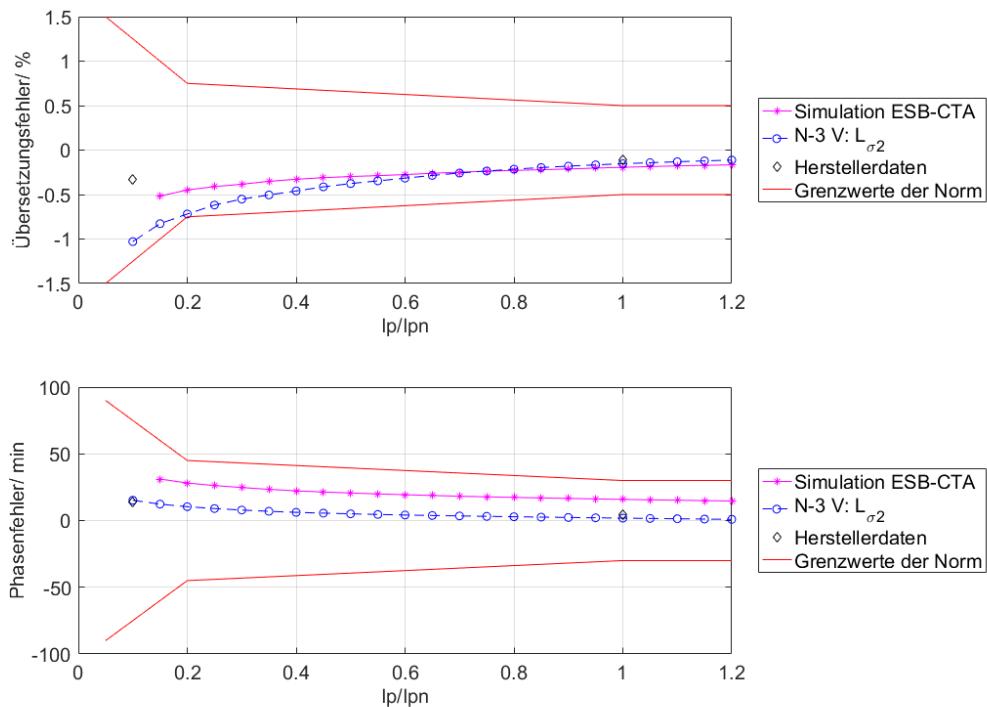


Abbildung 80: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, $N(L_\sigma) - \varepsilon(L_\sigma) - \delta(L_\sigma)$, Astra-Stromwandler (3408420)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Anwendung einer Streuinduktivität von 14 mH in Abbildung 81 führt beim ITL-Stromwandler mit der Seriennummer 520-33318 zu einer Verbesserung des

Phasenfehlers gegenüber den Herstellerdaten. Der Übersetzungsfehler wird etwas größer, daher entsteht die Differenz zu den Herstellerdaten. Beim Übersetzungsfehler wird eine bessere Übereinstimmung mit den Herstellerdaten ohne Berücksichtigung der Streuinduktivität erzielt. Bei 120 % des Primärnennstroms ist der Übersetzungsfehler mit Streuinduktivität näher an den Herstellerdaten. Die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses wurde bei 77 % des Primärnennstroms durchgeführt.

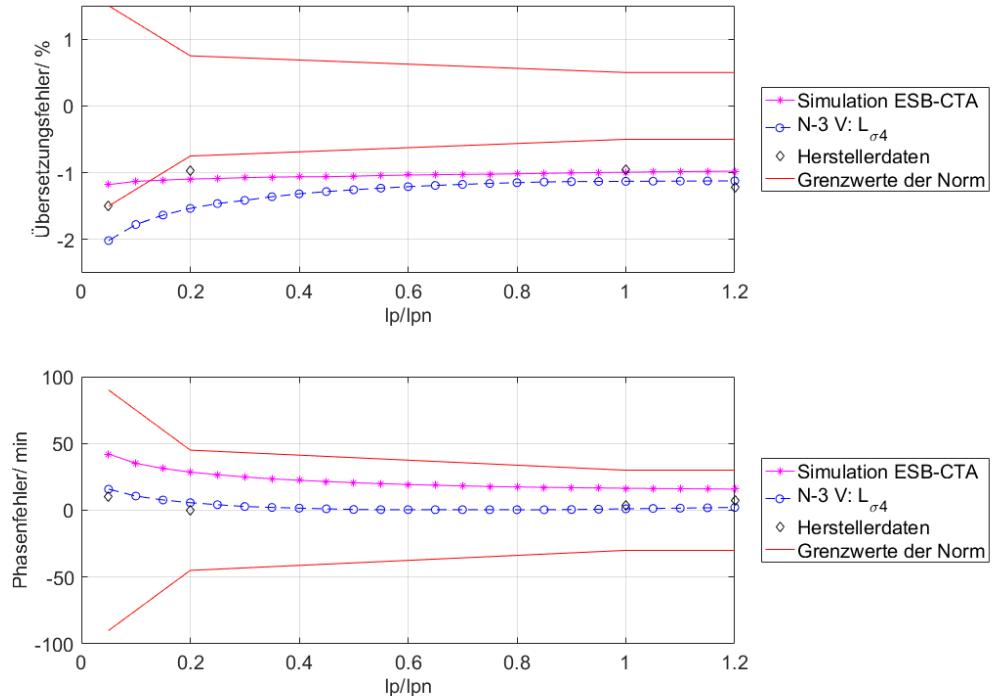


Abbildung 81: Übertragungsfehler als Funktion des Primärstroms bei 100 % Bürde, $N(L_\sigma) - \varepsilon(L_\sigma) - \delta(L_\sigma)$, ITL-Stromwandler (520-33318)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

11. Messversuch zur Bestimmung der Streuinduktivität

Aus physikalischer Sicht gibt es nur ein magnetisches Streufeld. Es handelt sich um das magnetische Feld, das nicht in beiden Wicklungen zur Induktion beiträgt. Wird jedoch das T-Modell (elektrisches ESB) angewendet, muss das Streufeld bzw. die Streuinduktivität auf die Primär- und Sekundärseite aufgeteilt werden. Im Betrieb wird der Stromwandler in Serie zur Hochspannungsleitung angeschlossen. Der Spannungsabfall längs der primären Streuinduktivität wird vom Netz selbst abgedeckt. Deshalb trägt nur die sekundäre Streuinduktivität zum Übertragungsfehler des Stromwandlers bei.

Im Folgenden wird ein Verfahren zur Bestimmung der Sekundärstreuinduktivität beschrieben.

Die Gesamtstreuinduktivität L_σ des Stromwandlers kann gemessen werden. Diese Induktivität beinhaltet die primäre und sekundäre Streuinduktivität des elektrischen ESB. Da die Messung von der Sekundärseite des Stromwandlers her durchgeführt wird, kann

nur die Gesamtstreuinduktivität ermittelt werden. Bei der Messung muss die Primärseite des Stromwandlers kurzgeschlossen werden. An der Sekundärseite des Stromwandlers wird eine sinusförmige Spannung mit der Nennfrequenz f_N angelegt und erhöht, bis der Sekundärnennstrom I_{2n} fließt (siehe Abbildung 82). Die Abbildung 82 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild zur Messung der Gesamtstreuinduktivität.

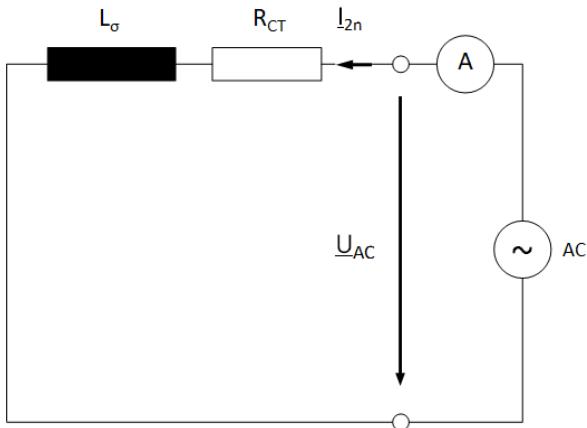


Abbildung 82: Ersatzschaltbild und Messung der Streuinduktivität des Stromwandlers
Quelle: Eigene Ausarbeitung

Berechnung der Gesamtstreuinduktivität L_σ über die Längsimpedanz $Z_{\text{längs}}$:

$$Z_{\text{längs}} = \frac{U_{AC}}{I_{2n}} \quad (96)$$

$$Z_{\text{längs}} = R_{CT} + j * X_\sigma \quad (97)$$

$$Z_{\text{längs}} = \sqrt{R_{CT}^2 + X_\sigma^2} \quad (98)$$

$$X_\sigma = \sqrt{Z_{\text{längs}}^2 - R_{CT}^2} \quad (99)$$

$$L_\sigma = \frac{X_\sigma}{2 * \pi * f_N} \quad (100)$$

Mit diesem Messversuch konnte die für den Fehler verantwortliche Sekundärstreuinduktivität $L_{2\sigma}$ nicht direkt gemessen werden. Deshalb wird im nächsten Schritt eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Sekundärstreuinduktivität untersucht.

11.1 Möglichkeit zur Bestimmung der Sekundärstreuinduktivität

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Ermittlung der Gesamtstreuinduktivität L_σ und der Sekundärstreuinduktivität $L_{2\sigma}$ beschrieben.

Bestimmung der Gesamtstreuinduktivität

1) Kurzschluss der Primärseite des Stromwandlers

Es ist sehr wichtig, dass der Kurzschluss sehr niederohmig ausgeführt wird. Es wird empfohlen, einen Querschnitt von mindestens $2,5 \text{ mm}^2$ zu wählen und kurze Leitungen zu verwenden.

2) Messung und Berechnung der Streuinduktivität

Die Sekundärspannung wird so lange erhöht, bis der Sekundärstrom für einen gewissen Arbeitspunkt erreicht wird. Zum Beispiel wird die Messung der Streuinduktivität im Arbeitspunkt von 20 % des Sekundärnennstroms I_{2n} durchgeführt.

$$I_2 = 0,2 * I_{2n} \quad (101)$$

Die Messergebnisse der Gesamtstreuinduktivität L_σ für die Arbeitspunkte 20 %, 40 %, 60 %, 100 % und 120 % des Nennstroms für den ITL-Stromwandler (Seriennummer: 39379) werden in der Tabelle 34 dargestellt:

Tabelle 34: Messung der Gesamtstreuinduktivität, ITL-Stromwandler (39379)

Arbeitspunkt	Induktivität L_σ
20 % des Primärnennstroms I_{pn}	662,8 μH
40 % des Primärnennstroms I_{pn}	569 μH
60 % des Primärnennstroms I_{pn}	523,2 μH
100 % des Primärnennstroms I_{pn}	2 mH
120 % des Primärnennstroms I_{pn}	3,363 mH

Bestimmung des Übersetzungsfehlers anhand der Sekundärmethode

Es wird hier die Sekundärmethode eingeführt, welche nicht mit der Sekundärspannungsmethode (CT Analyzer-Modell) gleichzusetzen ist.

Bei der Sekundärmethode wird die Sekundärspannung berechnet, die sich bei der Nennbürde und einem bestimmten Sekundärnennstrom (abhängig vom Arbeitspunkt) ergeben würde.

Beispiel: Berechnung des Übersetzungsfehlers bei 100 % des Primärnennstroms

$$I_s = I_{sn} * \frac{100\%}{100} \quad (102)$$

$$U_2 = I_s * Z_{Nenn-Bürde} \quad (103)$$

Die Spannung U_2 wird an die Sekundärseite des Spannungswandlers angelegt und der sich ergebende Sekundärstrom I_0 und die Primärspannung U_{Prim} werden gemessen.

Aus den gemessenen Größen wird der Übersetzungsfehler mit und ohne Sekundärstreuinduktivität berechnet.

Kernspannung - ohne Streuinduktivität:

$$U_K = U_2 - I_0 * R_{CT} \quad (104)$$

Kernspannung - mit Streuinduktivität:

$$U_K = U_2 - I_0 * \sqrt{R_{CT}^2 + (2 * \pi * f_N * L_{2\sigma})^2} \quad (105)$$

Berechnung des Windungszahlverhältnisses und des Übersetzungsfehlers:

$$N = \frac{U_K}{U_{Prim}} \quad (106)$$

$$\varepsilon = \frac{N - \frac{I_{pn}}{I_{sn}}}{\frac{I_{pn}}{I_{sn}}} * 100 \quad (107)$$

Falls die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind, ist das Modell nur von der Sekundärstreuinduktivität abhängig:

- Das Modell ist für 50 Hz gültig.
- Der Sekundärwiderstand R_{CT} und die Hauptinduktivität des Eisenkerns X_h sind korrekt bestimmt.

Die Voraussetzungen sind erfüllt, da die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses im entsprechenden Arbeitspunkt mit der Sekundärwärmethode durchgeführt wird. Der Sekundärwicklungswiderstand wird mit der entsprechenden Genauigkeit gemessen und ist daher korrekt bestimmt. Mit Kenntnis der Herstellerdaten kann dann die für den Fehler verantwortliche Sekundärstreuinduktivität gefunden werden. Dies wird im nächsten Schritt dargestellt.

Bestimmung der Sekundärstreuinduktivität $L_{2\sigma}$

Unter der Annahme, dass der Sekundärwicklungswiderstand R_{CT} und die Hauptinduktivität X_h richtig bestimmt wurden, ist allein die Sekundärstreuinduktivität $L_{2\sigma}$ für die Differenz zwischen Modell und Herstellerdaten verantwortlich. Daher kann durch Variation der Streuinduktivität und Anwendung der Sekundärwärmethode der Wert gefunden werden, bei dem die Differenz zu den Herstellerdaten minimal wird. Der gefundene Wert entspricht der Sekundärstreuinduktivität $L_{2\sigma}$, welche für die Differenz verantwortlich ist.

Für die folgenden Beispiele wurde die Magnetisierungskurve mit dem Sinus-Mode gemessen. Die Charakterisierung des Eisenkerns basiert auf einer Messung mit Sinussignalen. Das heißt, dass kein Modell zur Bestimmung der Hauptinduktivität X_h angewendet wird. Deshalb ist die Annahme, dass die Hauptinduktivität X_h richtig bestimmt wurde, gültig.

11.2 Ergebnisse von Stromwandlern

Die Messungen wurden mit ITL-Stromwandlern durchgeführt. Die Spezifikation der Stromwandler sind in Tabelle 8 und Tabelle 17 angegeben. Der ITL-Stromwandler mit der Seriennummer 39379 hat einen ringförmigen Eisenkern mit einer Übersetzung 200:5 und der ITL-Stromwandler 520-33318 einen rechteckigen Eisenkern mit einer Übersetzung 1000:1.

Die Grafiken werden folgendermaßen dargestellt:

- | | |
|--|-------------------------|
| ε – ohne L_σ (Sekundärmethode): | „x“ in der Farbe Blau |
| ε – mit gemessenem L_σ (Sekundärmethode): | „□“ verschiedene Farben |
| ε – durch Variation bestimmtes L_σ (Sekundärmethode): | „o“ in der Farbe Blau |

11.2.1 ITL-Stromwandler 39379

Die Abbildung 83 stellt die folgenden Messungen gegenüber:

- Primärmethode (Herstellerdaten)
- Messung mit dem CT Analyzer (Simulation ESB-CTA)
- Sekundärmethode ohne Streuinduktivität (ε : ohne L_σ) → „x“
- Sekundärmethode mit gemessener Streuinduktivität bei 20 % des Primärnennstroms (ε : mit $L_{\sigma,20\%}$) → „□“
- Sekundärmethode mit gemessener Streuinduktivität bei 100 % des Primärnennstroms (ε : mit $L_{\sigma,100\%}$) → „□“
- Sekundärmethode mit gemessener Streuinduktivität bei 120 % des Primärnennstroms (ε : mit $L_{\sigma,120\%}$) → „□“
- Sekundärmethode mit variierter Streuinduktivität, bei der die Differenz zwischen Sekundärmethode und Herstellerdaten minimal ist (ε : mit $L_\sigma = 160 \mu\text{H}$) → „o“
- Die gefundene Streuinduktivität von $160 \mu\text{H}$ wird im Modell ESB-LS für die Windungszahlverhältnis- und Übertragungsfehlerberechnung angewendet (N-2,9 V: $L_\sigma = 160 \mu\text{H}$).

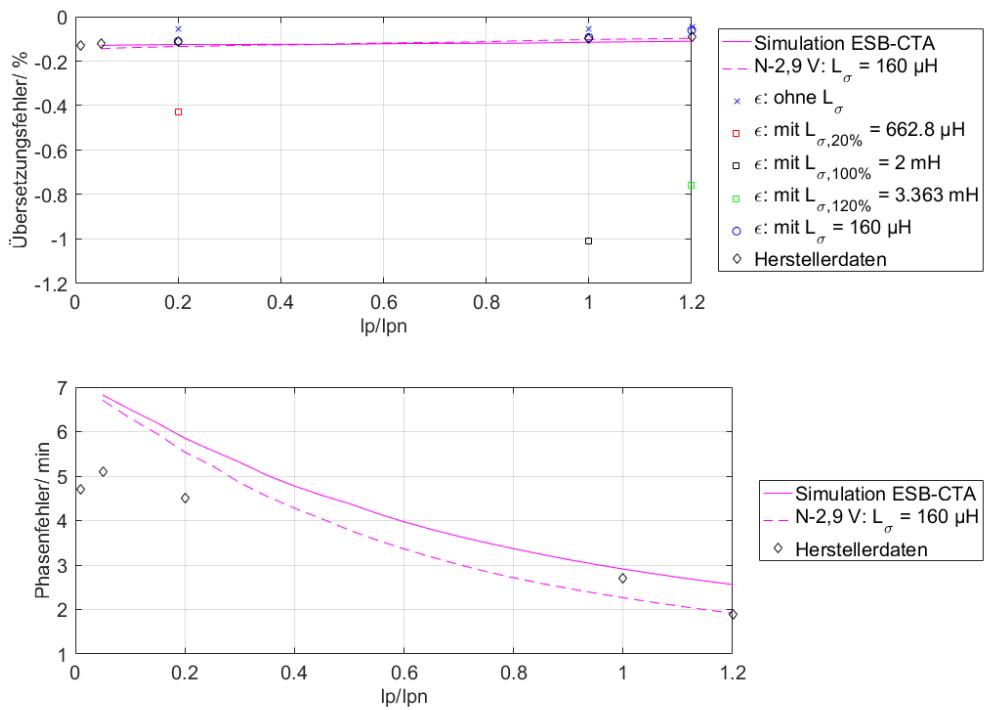


Abbildung 83: Vergleich des Übersetzungsfehlers mit Sekundärmethode und Sekundärspannungsmethode, Übersetzungsfehler mit und ohne L_σ , ITL-Stromwandler (39379)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Abbildung 83 zeigt, dass die Herstellerdaten bei 20 %, 100 % und 120 % des Primärnennstroms und einer Streuinduktivität von 160 μH mit der Sekundärmethode eine gute Übereinstimmung ergeben. Die Simulation mit dieser Streuinduktivität unter Anwendung des Modells ESB-LS (N-2,9 V: $L_\sigma = 160 \mu\text{H}$) resultiert in einer Verbesserung des Übersetzungsfehlers bei 100 % und 120 % des Primärnennstroms. Der Phasenfehler verringert sich unter Berücksichtigung der Streuinduktivität von 160 μH .

Die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses mit der Simulation „N-2,9 V: $L_\sigma = 160 \mu\text{H}$ “ entspricht einem Arbeitspunkt bei 240 % des Primärnennstroms.

11.2.2 ITL-Stromwandler 520-33318

Die Abbildung 84 stellt die folgenden Messungen dar:

- Primärmethode (Herstellerdaten)
- Messung mit dem CT Analyzer (Simulation ESB-CTA)
- Sekundärmethode ohne Streuinduktivität (ϵ : ohne L_σ) → „x“
- Sekundärmethode mit variierter Streuinduktivität, bei der die Differenz zwischen Sekundärmethode und Herstellerdaten minimal ist (ϵ : mit $L_\sigma = 14 \text{ mH}$) → „o“
- Die gefundene Streuinduktivität von 14 mH wird im Modell ESB-LS für die Windungszahlverhältnis- und Übertragungsfehlerberechnung angewendet (N-3 V: $L_\sigma = 14 \mu\text{H}$).

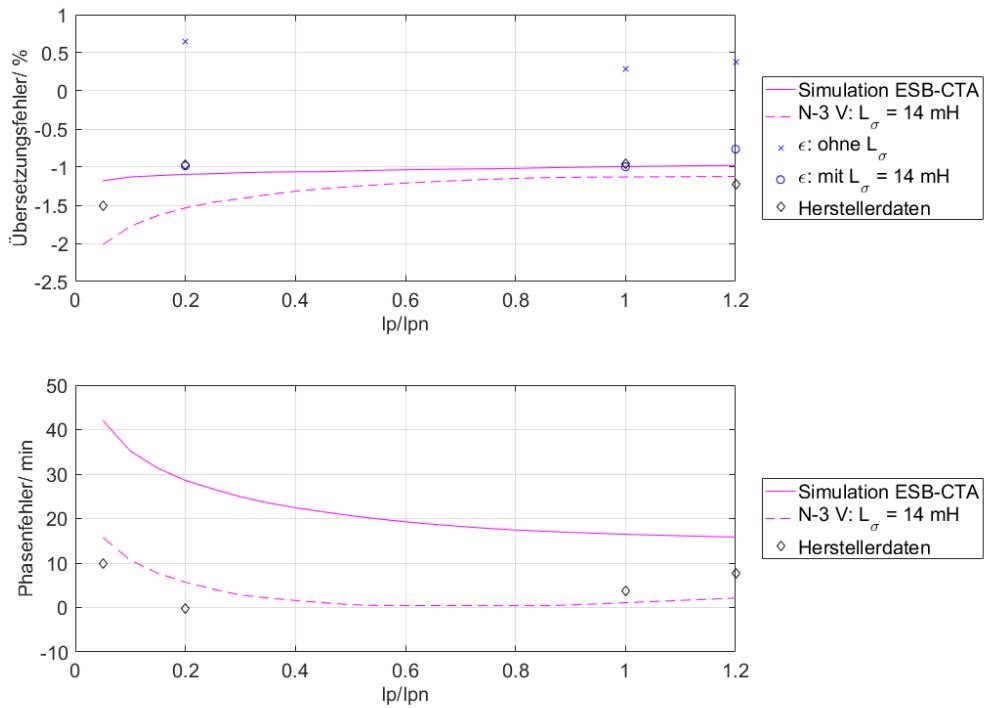


Abbildung 84: Vergleich des Übersetzungsfehlers mit Sekundärmethode und Sekundärspannungsmethode, Übersetzungsfehler mit und ohne L_σ , ITL-Stromwandler (520-33318)

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Abbildung 84 zeigt, dass die Herstellerdaten bei 20 % und 100 % des Primärnennstroms und einer Streuinduktivität von 14 mH mit der Sekundärmethode sehr gut übereinstimmen. Bei 120 % des Primärnennstroms gibt es eine Differenz zwischen Sekundärmethode und Herstellerdaten von etwa 0,4 %. Durch Anwendung der gefundenen Streuinduktivität von 14 mH auf das Modell ESB-LS (N-3 V: $L_\sigma = 14 \text{ mH}$) wird der Übersetzungsfehler etwas größer. Der Phasenfehler kann jedoch gegenüber den Herstellerdaten deutlich verbessert werden.

Die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses mit der Simulation „N-3 V: $L_\sigma = 14 \text{ mH}$ “ entspricht einem Arbeitspunkt bei 77 % des Primärnennstroms.

12. Erkenntnisse und Beantwortung der Forschungsfrage

Aus den Simulationsergebnissen und der Sensitivitätsanalyse ist ersichtlich, dass der Einfluss auf den Übertragungsfehler bei kleinen Übersetzungen wie zum Beispiel 100:5, sehr viel größer ist als bei größeren Übersetzungen wie 1000:1. Erfahrungswerte zeigen auch, dass es unter anderem bei Stromwandlern mit kleiner Übersetzung zu größeren Abweichungen zwischen der Sekundärspannungsmethode (CT Analyzer) und den Herstellerdaten (Primärmethode) kommt. Ein Grund für die Abweichung ist die niedrige Windungsanzahl, da der Einfluss auf den Fehler größer wird (siehe Kapitel 6.2). Des

Weiteren wird die Höhe des Fehlers mit dem idealen Windungszahlverhältnis voreingestellt (siehe Kapitel 6.1).

Zudem wurde gezeigt, dass es Abweichungen zwischen der Sekundärspannungsmethode und der Primärmethode gibt, wenn die Streuinduktivität nicht vernachlässigt werden kann.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse aus dieser Arbeit erläutert und zusammengefasst.

12.1 Streuinduktivität

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Sensitivität auf den komplexen Fehlervektor bei kleinen Streuinduktivitäten groß wird. Zudem wird der komplexe Fehlervektor mit größer werdenden Streuinduktivitäten größer (siehe Kapitel 6.2). Diese Streuinduktivität hat unter anderem einen Einfluss auf die Berechnung des Übertragungsfehlers und auf die Bestimmung des Windungszahlverhältnisses.

12.1.1 Streuinduktivität – Berechnung des Übertragungsfehlers

Wird die Streuinduktivität nur in der Berechnung des Übertragungsfehlers berücksichtigt, kommt es bei einer Verschiebung des Übersetzungsfehlers und des Phasenfehlers zu höheren Werten.

Bei Stromwendlern mit hoher Übersetzung ($N = 1000$ und 2000) ergibt die Variation der Streuinduktivität, dass der Einfluss auf den Übertragungsfehler beim Ritz-Stromwandler (05-594259) mit einem ringförmigen Eisenkern kleiner ist als beim ITL-Stromwandler (520-33318) mit rechteckigem Eisenkern. Dies wird in der Abbildung 53 und in der Abbildung 54 deutlich ersichtlich.

Bei Stromwendlern mit niedriger Übersetzung ($N = 20$) ist aus der Variation der Streuinduktivität ein erheblicher Einfluss auf den Übertragungsfehler erkennbar. Dies wird in der Abbildung 61 und in der Abbildung 62 für die Stromwandler ITL (39379) und Astra (3408420) dargestellt.

12.1.2 Streuinduktivität – Berechnung des Windungszahlverhältnisses

Eine Abweichung zwischen der Sekundärspannungsmethode und den Herstellerdaten stellt die Vernachlässigung der Streuinduktivität bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses N dar. In Kapitel 4.4.3 wird beschrieben, wie das Windungszahlverhältnis berechnet wird. In dieser Berechnung zur Bestimmung der Kernspannung wird der Spannungsabfall über die Streuinduktivität vernachlässigt. Die Simulationen zeigten, dass die Streuinduktivität einen erheblichen Einfluss auf den Übersetzungsfehler hat. Der Phasenfehler ändert sich nicht, wenn die Streuinduktivität nur in der Berechnung des Windungszahlverhältnisses angewendet wird. Dies wird in Kapitel 7 beschrieben.

12.1.3 Streuinduktivität – Kombination

Eine verbesserte Übereinstimmung zwischen der Sekundärspannungsmethode und den Herstellerdaten wird erreicht, wenn die Streuinduktivität in der Simulation bei der Berechnung des Übertragungsfehlers und bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses berücksichtigt wird. Dadurch kann beim ITL- und Astra-Stromwandler eine deutliche Verbesserung erzielt werden (siehe Kapitel 10).

12.1.4 Messversuch der Streuinduktivität

Im Rahmen der Masterarbeit wurde auch ein Messversuch der Streuinduktivität durchgeführt. Die Fehler verursachende Sekundärstreuinduktivität kann mit Kenntnis der Herstellerdaten und unter der Voraussetzung, dass die Hauptinduktivität X_h und der Sekundärwicklungswiderstand R_{CT} richtig sind, durch Variation ermittelt werden. Die Messung erfolgte mit der Sekundärmethode für einen spezifischen Arbeitspunkt.

12.2 Messgenauigkeit

Zusätzlich wurde versucht, den Einfluss der Messfehler auf den Übertragungsfehler zu ermitteln. Unter anderem wurde die Messgenauigkeit des Sekundärwicklungswiderstandes und des Windungszahlverhältnisses untersucht.

12.2.1 Messgenauigkeit – Sekundärwicklungswiderstand

Die Simulationen zeigten, dass die Messgenauigkeit bei Berücksichtigung der Toleranz der Widerstandsmessung von $0,1\% + 1\text{ m}\Omega$ bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses keinen Einfluss auf den Übersetzungsfehler hat und daher vernachlässigt werden kann (siehe Abbildung 70 und Abbildung 71).

12.2.2 Messgenauigkeit – Windungszahlverhältnis

Die Simulationen zeigten, dass bereits eine Änderung des Windungszahlverhältnisses um den garantierten Messfehler von $0,1\%$ eine große Änderung auf den Übersetzungsfehler bewirkt. Deshalb wird die Genauigkeit der Spannungsmesseingänge und die Genauigkeit des Windungszahlverhältnisses in Kapitel 9.4 gegenübergestellt. Diese Untersuchung ergab, dass der Einfluss der Toleranz der Spannungsmesseingänge unter Vernachlässigung der Toleranz des Sekundärwicklungswiderstandes auf den Übersetzungsfehler minimal ist.

12.3 Grenzen und Anwendbarkeit der Sekundärspannungsmethode

Es werden die Grenzen bzw. die Anwendbarkeit der Sekundärspannungsmethode an Hand verschiedener Modelle und deren Auswirkung auf den Übersetzungsfehler beschrieben.

Der CT Analyzer misst das tatsächliche Windungszahlverhältnis N_{mess} des Stromwandlers mit der sogenannten Übersetzungsmessung. Dieses Windungszahlverhältnis wird an einem Arbeitspunkt bzw. an einem Messpunkt MP der Magnetisierungskurve gemessen (Abbildung 85, $U_{K,Test}$ und $I_{0,Test}$). Eine schematische Darstellung wird in der Abbildung 85 gezeigt. Mit diesem Modell wird der Fehler auf Basis der Magnetisierungskurve und unter Berücksichtigung der Verluste für alle Werte I_p/I_{pn} bestimmt.

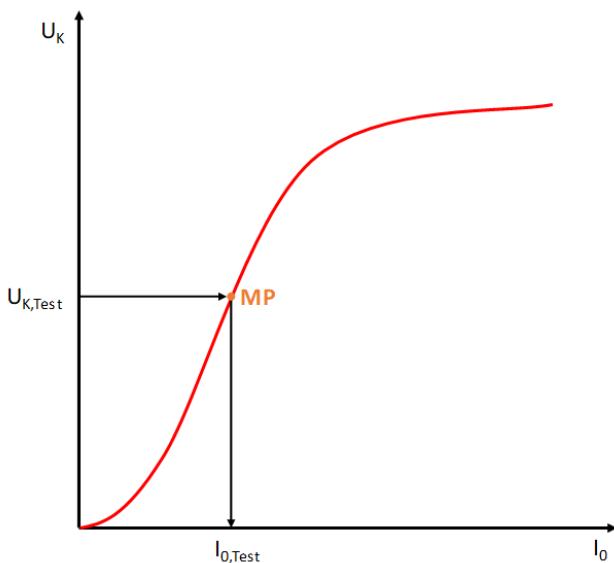


Abbildung 85: Schematische Darstellung der Magnetisierungskurve,
Windungszahlverhältnismessung in einem Arbeitspunkt

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Abbildung 88 stellt verschiedene Verläufe des Übersetzungsfehlers dar, die sich je nach angewandtem Modell ergeben. Sie werden im Folgenden erläutert. Die Herstellerdaten werden mit dem Symbol „◊“ dargestellt. Zur Beurteilung der Grenzen der Sekundärspannungsmethode müssen die Messungen mit den Herstellerdaten verglichen werden. Für diese Betrachtung wird festgelegt, dass das Windungszahlverhältnis bei einem Primärnennstrom I_{pn} bestimmt wird.

Rote Kurve (Abbildung 88, Linie „--“): Dies ist die Übersetzungskurve unter der Annahme, dass das Modell ein Windungszahlverhältnis von 1:1 verwendet. Das heißt, es wird das CT Analyzer-Modell ohne Windungszahlkorrektur angewendet. Das Modell wird in Abbildung 86 dargestellt.

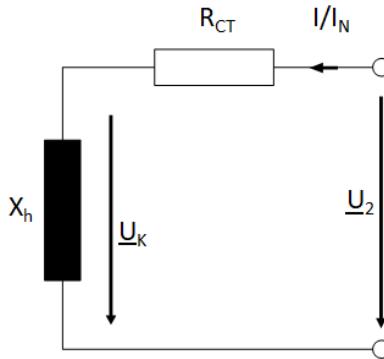


Abbildung 86: Vereinfachtes Ersatzschaltbild ohne Windungszahlverhältnis

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Blaue Kurve (Abbildung 88, Linie „-“): Die Übersetzungskurve wird mit einem Modell dargestellt, das das Windungszahlverhältnis mitberücksichtigt. Dieses Modell beinhaltet deshalb eine Windungszahlkorrektur. Da sich das Windungszahlverhältnis proportional zum Übersetzungsfehler verhält, verschiebt sich die Fehlerkurve ϵ linear um $\Delta\epsilon$. Es wird das Modell in Abbildung 87 angewendet, welches dem Modell des CT Analyzers entspricht.

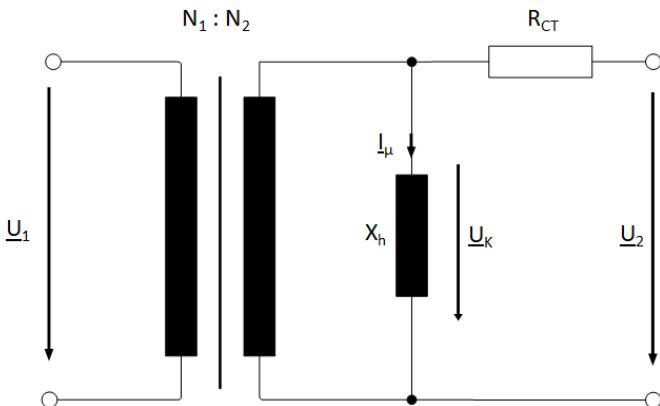


Abbildung 87: Vereinfachtes Ersatzschaltbild mit Windungszahlverhältnis $N_1:N_2$

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Werden die Herstellerdaten durch eine lineare Verschiebung um $\Delta\epsilon$ für alle Werte I_p/I_{pn} angenähert, stimmt das Modell für diesen Stromwandler und die Magnetisierungskurve wird richtig modelliert. In diesem Fall ist die Messung des Windungszahlverhältnisses an einem Arbeitspunkt hinreichend und kann für alle Werte I_p/I_{pn} verwendet werden.

Schwarze Kurve (Abbildung 88, Linie „...“): Die Fehlerkurve hat bei kleinen Werten von I_p/I_{pn} gegenüber den Herstellerdaten eine größere Abweichung. Das bedeutet, dass die Messung des Windungszahlverhältnisses nur bei Primärnennstrom I_{pn} für die Bestimmung des Fehlers für alle Werte von I_p/I_{pn} nicht hinreichend ist. Das wird durch eine nicht korrekte Modellierung der Magnetisierungskurve bei kleinen Werten von I_p/I_{pn} verursacht. Somit ist die Differenz $\Delta\epsilon$ nicht für alle Werte von I_p/I_{pn} konstant. In diesem Fall ist das Modell für diesen Stromwandler nicht ausreichend genau. Für diese Betrachtung wird das Modell in Abbildung 87 angewendet.

Derselbe Verlauf ist für kleine Werte von I_p/I_{pn} in Abbildung 80 und Abbildung 81 ersichtlich. Diese Abweichung ist der Modellierung der Magnetisierungskurve verschuldet.

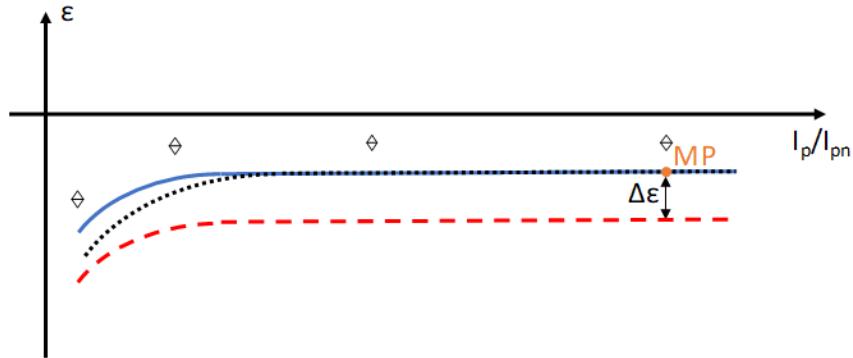


Abbildung 88: Typischer Verlauf der Fehlerkurve in Abhängigkeit des angewendeten Modells
Quelle: Eigene Ausarbeitung

Im Folgenden wird angenommen, dass der Stromwandler eine nicht zu vernachlässigende Streuinduktivität hat.

Bei Anwendung des Modells aus Abbildung 86 ergibt sich mit einer Windungszahlkorrektur ein Übersetzungsfehler mit der durchgezogenen blauen Kurve wie in Abbildung 90 dargestellt. Die Kurven in Schwarz und Hellbraun verwenden das Modell in Abbildung 89 zur Bestimmung des Windungszahlverhältnisses.

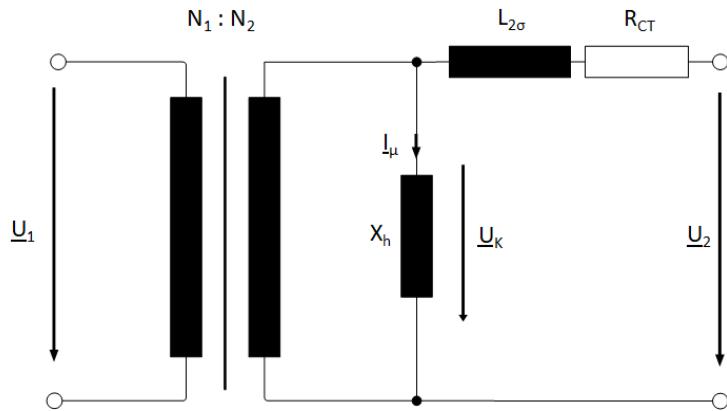


Abbildung 89: Vereinfachtes Ersatzschaltbild mit Windungszahlverhältnis $N_1:N_2$ mit Streuinduktivität
Quelle: Eigene Ausarbeitung

Mit steigender Streuinduktivität wird das $\Delta\epsilon$ größer. Dasselbe Verhalten zeigen die Messungen in Abbildung 72 und Abbildung 73. Durch Erhöhung der Streuinduktivität wird die Kernspannung kleiner und somit auch das Windungszahlverhältnis N. Somit verschiebt sich die Übersetzungsfehlerkurve nach oben (siehe Formel (43)).

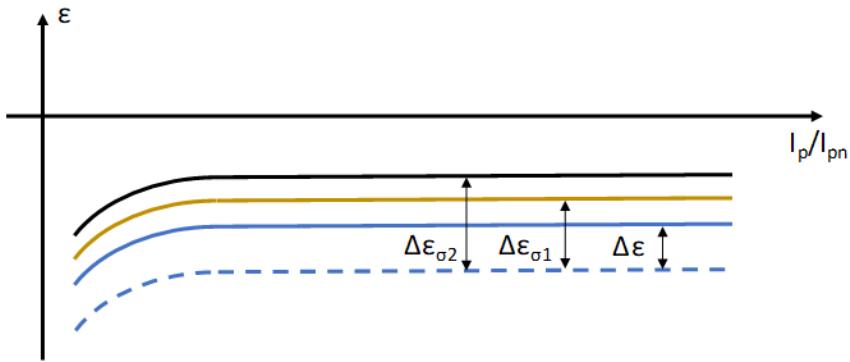


Abbildung 90: Typischer Verlauf der Fehlerkurve in Abhängigkeit der Streuinduktivität

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Abbildung 91 zeigt die Fehlerkurve ohne Windungszahlkorrektur (--) und mit Windungszahlkorrektur (punktierter, rote Kurve und blaue, durchgezogene Kurve) unter Berücksichtigung der Streuinduktivität in der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses. Es wird das Modell in Abbildung 89 angewendet. Bei der blauen, strichlierten Kurve wurde die Magnetisierungskurve für kleine Werte von I_p/I_{pn} richtig modelliert und bei der roten, strichlierten Kurve falsch. Wird die Magnetisierungskurve nicht korrekt modelliert, kommt es zu größeren Abweichungen zu den Herstellerdaten (punktierter, rote Kurve). Dies wird auch in der Abbildung 80 und in der Abbildung 81 ersichtlich.

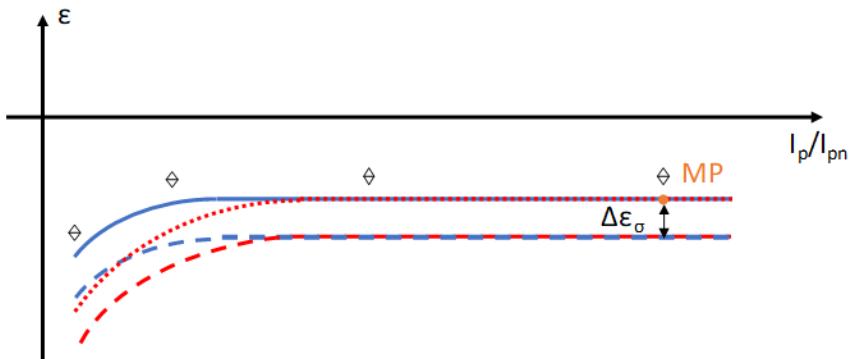


Abbildung 91: Typischer Verlauf der Fehlerkurven mit Streuinduktivität

Quelle: Eigene Ausarbeitung

Die Sekundärmethode in Kapitel 11.2 zeigt, dass es möglich ist, die Herstellerdaten mit der richtigen Magnetisierungskurve und der Messung des Windungszahlverhältnisses am entsprechenden Arbeitspunkt anzunähern.

12.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Grenzen der Sekundärspannungsmethode

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Die Erkenntnisse und Grenzen konnten durch diverse Messungen und MATLAB-Simulationen gewonnen werden. Daraus lassen sich im Folgenden die Anwendbarkeit und somit Grenzen der Sekundärspannungsmethode beschreiben:

- Bei hohen Übersetzungen ($N = 2000$) mit ringförmigem Eisenkern kann die Streuinduktivität vernachlässigt werden.
Bei hohen Übersetzungen ($N = 1000$) mit rechteckigem Eisenkern muss der Einfluss der Streuinduktivität mitberücksichtigt werden.
Bei niedriger Übersetzung muss die Streuinduktivität sowohl für ringförmige als auch für ovale Eisenkerne modelliert werden.
- Die Berücksichtigung der Streuinduktivität in der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses und in der Berechnung des Übertragungsfehlers führt zur besseren Übereinstimmung mit der Primärmethode bei Stromwandlern mit ovalen oder rechteckigen Eisenkernen.
- Die Messung der Streuinduktivität bei $L_{\sigma,20\%}$ und die Anwendung auf das Modell ESB-LS liefert für den ITL-Stromwandler (39379) eine gute Annäherung an die Primärmethode (Herstellerdaten).
- Die Genauigkeitstoleranz des Sekundärwicklungswiderstandes bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses hat einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf den Übersetzungsfehler.
- Messversuche mit der Sekundärmethode unter Berücksichtigung einer Streuinduktivität zeigen gut vergleichbare Ergebnisse mit den Herstellerdaten. Die Voraussetzung ist, dass der Sekundärwicklungswiderstand R_{CT} und die Hauptinduktivität X_h des Kerns korrekt bestimmt sind. Dann ist die Streuinduktivität verantwortlich für die Differenz zur Primärmethode.
- Die Berücksichtigung der Streuinduktivität zeigt eine gute Annäherung des Phasenfehlers an die Herstellerdaten.

12.5 Möglichkeiten der Sekundärspannungsmethode

Aus den ermittelten Grenzen in Kapitel 12.4 können neue Möglichkeiten für die Sekundärspannungsmethode gewonnen werden. Durch Ergänzung des ESB-CTA-Modells mit der Sekundärstreuinduktivität können Verbesserungen in der Genauigkeit und somit eine bessere Annäherung an die Resultate der Primärmethode erzielt werden. Deshalb wird vorgeschlagen, das Modell ESB-LS anzuwenden. Die korrekte Bestimmung der Sekundärstreuinduktivität wurde in dieser Arbeit nicht behandelt.

Im Folgenden wird ein Vorschlag für eine mögliche Anpassung des Messalgorithmus der Sekundärspannungsmethode aufgezeigt (**fett** markiert):

- 1) Messung des Sekundärwicklungswiderstandes
- 2) **Messung der Streuinduktivität**
Die Messung der Streuinduktivität muss noch weiter untersucht werden.
- 3) Messung der Magnetisierungskurve
- 4) **Messung des Windungszahlverhältnisses**
Bestimmung des Windungszahlverhältnisses bei jedem Arbeitspunkt und Berücksichtigung der Streuinduktivität bei der Bestimmung des Windungszahlverhältnisses wie in Kapitel 7 erläutert.
- 5) **Berechnung des Übersetzungsfehlers und Phasenfehlers**
Berücksichtigung der Streuinduktivität (siehe Kapitel 5.2)

Eine weitere Verbesserung des Modells würde erzielt werden, indem das Windungszahlverhältnis nicht nur an einem Messpunkt MP gemessen wird, sondern an mehreren Arbeitspunkten. Ein Vorschlag wäre die Messung des Windungszahlverhältnisses N_1 , N_2 und N_3 an mindestens drei Arbeitspunkten durchzuführen, zum Beispiel bei 10 %, 50 % und 100 % des Primärnennstroms. Für den Bereich 1 % bis 30 % des Primärnennstrom wird N_1 , für den Bereich 30 % bis 70 % wird N_2 und für den Bereich 70 % bis 120 % wird N_3 verwendet.

13. Ausblick

Die Masterarbeit zeigte, dass Verbesserungen mit der Streuinduktivität herbeigeführt werden können. Es muss die Probandenanzahl erhöht und damit weitere Messungen an unterschiedlichen Stromwandlern von verschiedenen Herstellern durchgeführt werden, wie in Kapitel 11 erläutert. Hier gilt es zu untersuchen, ob dieselben Verbesserungen gegenüber den Herstellerdaten erzielt werden können.

Insbesondere muss die Messung der Sekundärstreuinduktivität detailliert analysiert werden. Dies war im Rahmen der Masterarbeit nicht gefordert. Der Messversuch in Kapitel 11 ist nur mit den vorhandenen Herstellerdaten und entsprechenden Annahmen durch eine Iteration der Sekundärstreuinduktivität möglich. Hierzu müssen Messungen an weiteren verschiedenen Stromwandlern durchgeführt werden.

Des Weiteren kann eine spezielle CT Analyzer-Firmware für Testzwecke entwickelt werden, welche es ermöglicht, die Messspannung und somit den Arbeitspunkt für die Windungszahlverhältnismessung vorzugeben. Damit kann die in Kapitel 12.5 vorgeschlagene Methodik und der Einfluss auf den Übersetzungsfehler weiter untersucht werden.

Die Messungen der Primärspannung mit dem CT Analyzer ist bei Stromwandlern mit nicht zu vernachlässigender Sekundärstreuinduktivität von der Position des Leiters abhängig. Die Messungen für diese Masterarbeit wurden mit einem zentrierten Primärleiter durchgeführt. Eine Untersuchung des Übertragungsfehlers in Abhängigkeit der Position des Primärleiters und dessen Einfluss auf die Sekundärstreuinduktivität wird empfohlen.

Ein Fehler kann unter anderem bei der Modellierung der Magnetisierungskurve auftreten. Bei ersten Versuchen wurde mit der Variation der Eisenkernimpedanz versucht, den Einfluss auf den Fehler zu untersuchen. Aus Zeitgründen konnte diese Thematik nicht näher analysiert werden. In diesem Zusammenhang müssen Stromwandler mit unterschiedlichem Kernmaterial betrachtet werden. Es ist wichtig, dass die Kernmaterialien auf magnetische Eigenschaften mit entsprechender Messtechnik untersucht werden. Im Detail müsste die Einflussgröße auf die Sekundärspannungsmethode und auf die Kernverluste näher betrachtet und hinsichtlich der Frequenz- und Flussabhängigkeit untersucht werden. Das vom CT Analyzer angewendete Modell zur Nachbildung dieser Kernverluste muss anhand der gemessenen Daten qualifiziert werden. Die Kernverluste können mit einem Messgerät der Firma Brockhaus Messtechnik, einem Messturm von OMICRON electronics GmbH (CPC 100-DTP) oder mit einer speziellen CT Analyzer Software Version gemessen und

anschließend analysiert werden. Unter anderem könnte die Modellierung der Wirbelstromverluste bei verschiedenen Kernmaterialien systematisch untersucht und mit der CT Analyzer-Modellierung verglichen werden, so dass Modellanpassungen vorgeschlagen werden können.

Hinsichtlich der Modellierung des Eisenkerns wurden im Rahmen der Masterarbeit bereits Untersuchungen durchgeführt. Es wurde die Magnetisierungskurve mit einem 50 Hz-Transformator von der Sekundärseite her aufgenommen und mit der CT Analyzer-Magnetisierungskurve verglichen. In MATLAB kann dann der Übertragungsfehler neu simuliert und die Auswirkungen untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- Draxler, Karel; Styblíková, Renata (2010): „Effect of magnetization on instrument transformer errors.“ In: Journal of Electrical Engineering, Vol. 61 (2010), H. NO 7, S. 50–53.
- Fischer, J.; Moser, H. (1955): „Die Nachbildung von Magnetisierungskurven durch einfache algebraische oder transzendente Funktionen.“ In: Archiv für Elektrotechnik, (1955), S. 286–299.
- Fischer, Rolf (2016): Elektrotechnik für Maschinenbauer: sowie für Studierende der Versorgungstechnik, des Wirtschaftsingenieurwesens und anderer technischer Fachbereiche: mit 393 Bildern und Tabellen, 125 Beispielen und 83 Aufgaben mit Lösungen. 15., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (= Lehrbuch).
- Freiburg, Michael (2014): Ein Verfahren zum modellbasierten Genauigkeitsnachweis von Mittel- und Hochspannungswandlern für den Vor-Ort-Einsatz. Technische Universität Dortmund. Dortmund.
- Goodale, E. C.; Holbeck, J. I. (1944): „Field Determination of Current-Transformer Errors by the Secondary-Voltage Method.“ In: Transactions, VOL. 63 (1944).
- Heng-xu, Ha; Lei, Zhai; Zhi-qian, Bo (o. J.): „Improved Method for the Fitting of Excitation Curve for Voltage Transformer.“ In:
- Heuck, Klaus; Dettmann, Klaus-Dieter; Schulz, Detlef (2013): Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis. 9., aktualisierte und korrigierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (= Lehrbuch).
- IEC 61869-2 (2013): IEC 61869-2:2012 Instrument transformers, Part 2: Additional requirements for current transformers. OVE Austrian Electrotechnical Association.
- „Instrument Transformers Application Guide, ABB“ (2015): Instrument Transformers Application Guide, ABB. Online im Internet: URL: <https://library.e.abb.com/public/94c2ba5a2f381077c1257df000504e0c/1HSM%209543%2040-00en%20IT%20Application%20Guide%20Ed4.pdf> (Zugriff am: 21.05.2018).
- Kaczmarek, M. (2017): „Inductive current transformer accuracy of transformation for the PQ measurements.“ In: Electric Power Systems Research, 150 (2017), H. Supplement C, S. 169–176. Online im Internet: DOI: 10.1016/j.epsr.2017.05.006 (Zugriff am: 10.10.2017).
- Koprivica, Branko; Milovanovic, Alenka (2016): „Electromagnetic characterization of current transformer with toroidal core under sinusoidal conditions.“ In: Physica B: Condensed Matter, (= 10th International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics (HMM 2015)) 486 (2016), H. Supplement C, S. 34–39. Online im Internet: DOI: 10.1016/j.physb.2015.10.017 (Zugriff am: 10.10.2017).

Küchler, Andreas (2009): Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen. 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer (= VDI-Buch).

Marinescu, Marlene (2012): Elektrische und magnetische Felder. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online im Internet: DOI: 10.1007/978-3-642-25794-0 (Zugriff am: 01.12.2017).

OMICRON electronics GmbH (2016): CT Analyzer Benutzerhandbuch. DEU 1039 05 02. Klaus: OMICRON electronics GmbH.

Pluta, Wojciech A. u.a. (2017): „Some remarks on metrological properties and production technology of current transformers made of nanocrystalline cores.“ In: Measurement, 97 (2017), H. Supplement C, S. 38–44. Online im Internet: DOI: 10.1016/j.measurement.2016.11.024 (Zugriff am: 12.10.2017).

Schwab, Adolf J. (2012): Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. 3., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer.

Steffen, Horst; Bausch, Hansjürgen (2007): Elektrotechnik Grundlagen. 6. Auflage. B.G. Teubner Verlag.

Stumberger, Gorazd u.a. (2015): „Evaluation of Experimental Methods for Determining the Magnetically Nonlinear Characteristics of Electromagnetic Devices.“ In: IEEE Transactions on magnetics, VOL. 41 (2015), H. NO. 10, S. 4030–4032.

Süss, Franz; Dr. Krüger, Michael; Kaufmann, Friedrich (2005): Verfahren zum Testen eines Transformators und entsprechende Testvorrichtung. Klaus:

Zocholl, S. E.; Smaha, D. W. (1992): „Current Transformer Concepts.“ In: (1992).

Anhang

Im Anhang sind Auszüge der Funktionen aus dem MATLAB-Skript aufgeführt, die zur Berechnung des Übertragungsfehlers und der Variation der Parameter verwendet wurden.

MATLAB – Berechnung der Last ohne Streuinduktivität

```
function [Z_load, gamma] = calculateLoad( burden, Isn, cosPhi, RCT )
%calculateLoad
% Calculation of the total load (including sec. winding resistance)
connected to the current transformer

%Angle between UCT (voltage drop across burden) and Ict (burden current)
Phi = acosd(cosPhi);

%calculate burden
R_burden = (burden/(Isn*Isn))*cosPhi;
X_burden = (burden/(Isn*Isn))*sind(Phi);

%calculate load
R_load = RCT + R_burden;
X_load = X_burden;
Z_load = sqrt(R_load^2 + X_load^2);
gamma = atand(X_load/R_load);

end
```

MATLAB – Berechnung der Last mit Streuinduktivität

```
function [Z_loadS, gammaS] = calculateLoad_LSigma( burden, Isn, cosPhi,
RCT, L_Sigma, f )
%calculateLoad
% Calculation of the total load (including sec. winding resistance and
LEAKAGE INDUCTANCE) connected to the current transformer

%Angle between UCT (voltage drop across burden) and Ict (burden current)
Phi = acosd(cosPhi);

%calculate burden
R_burden = (burden/(Isn*Isn))*cosPhi;
X_burden = (burden/(Isn*Isn))*sind(Phi);

%calculate load
X_Sigma = 2*pi*f*L_Sigma;
R_load = RCT + R_burden;
X_load = X_Sigma + X_burden;
Z_loadS = sqrt(R_load^2 + X_load^2);
gammaS = atand(X_load/R_load);

end
```

MATLAB – Berechnung des Übertragungsfehlers

```
function [ data ] = calculateError( Isn, Ip, Z_load, gamma, N_turns,
Irms, Urms, PhaseICT )
%calculateError
% Calculation of ratio error and phase displacement at a certain load
% connected to the current transformer

%Define Data-Vector
data = zeros(24,6);

%Fill Matrix: col_1 with value; create vector with step size 0.1
%Relation of Ip/Ipn
i = 0.05;
for j = 1:length(data)
    data([j j]) = [1;i];
    i = i + 0.05;
end

%****Calculation-1****
N_rated = Ipn/Isn;
%****/Calculation-1****

%****Calculation-2****
%Calculation of ratio error and phase displacement from 0.1xIp to
1.2xIpn

per = 0.05; %init first value of Ip/Ipn
for g = 1:length(data)

    %desired secondary current
    Ict = Isn*per;
    %Core-Voltage
    Vc = Ict * Z_load;

    %Look-up excitation curve: Vc --> Iexc --> theta
    Iexc = interp1(Urms,Irms,Vc);
    theta = interp1(Urms,PhaseICT,Vc);

    %Calculate phase between secondary load current Isn and excitation
    %current
    beta = theta - gamma;

    %Calculate total secondary current Ist
    Ist = sqrt((Ict + Iexc*cosd(beta))^2 + (Iexc*sind(beta))^2);

    %Calculate primary current
    Ip = Ist * N_turns;

    %Calculate ratio (current) error
    ratio_err = (Ict-(Ip/N_rated))/(Ip/N_rated);
    ratio_err_per = ratio_err * 100;
    %Calculate phase displacement between Ist and Isn
    delta = atand((Iexc*sind(beta))/(Ict + Iexc * cosd(beta))); %degree
    delta_minutes = delta * 60; %minutes

    %Result-Array
    data(g,2) = ratio_err_per;
    data(g,3) = delta_minutes;
```

```

    data(g,4) = Vc;
    data(g,5) = Iexc;
    data(g,6) = theta;

    per = per + 0.05;
end
*****/Calculation-2*****
end

```

MATLAB – Variation des Windungszahlverhältnisses

```

function [ data_varN_Ratio, data_varN_Phase, N_vector ] =
variationNturns(RCT, stepSize, burden_100, Isn, cosPhi, Ip, N_turns,
Irms, Urms, PhaseICT )
%variationNturns
% Variation of the turns ratio N

data_varN_Ratio = zeros(24,10);
i = 0.05;
for j = 1:length(data_varN_Ratio)
    data_varN_Ratio([j j]) = [1;i];
    i = i + 0.05;
end

data_varN_Phase = zeros(24,10);
i = 0.05;
for j = 1:length(data_varN_Phase)
    data_varN_Phase([j j]) = [1;i];
    i = i + 0.05;
end

N_vector = zeros(1,9)

t = 2;

for n = 1:9
    [Z_loadN100, gammaN100] = calculateLoad(burden_100, Isn, cosPhi, RCT);
    dataN100 = calculateError(Isn, Ip, Z_loadN100, gammaN100, N_turns,
    Irms, Urms, PhaseICT);
    data_varN_Ratio(:,t) = dataN100(:,2);
    data_varN_Phase(:,t) = dataN100(:,3);
    t = t + 1;
    N_vector(1,n) = N_turns
    N_turns = N_turns + stepSize
end

end

```

MATLAB – Variation des Sekundärwicklungswiderstandes

```
function [ data_varRCT_Ratio, data_varRCT_Phase, RCT_vector ] =
variationWindingResistance(RCT, stepSize, burden_100, Isn, cosPhi, Ipn,
N_turns, Irms, Urms, PhaseICT )
%variationStrayInductance
% Variation of the stray inductance

data_varRCT_Ratio = zeros(24,10);
i = 0.05;
for j = 1:length(data_varRCT_Ratio)
    data_varRCT_Ratio([j j]) = [1;i];
    i = i + 0.05;
end

data_varRCT_Phase = zeros(24,10);
i = 0.05;
for j = 1:length(data_varRCT_Phase)
    data_varRCT_Phase([j j]) = [1;i];
    i = i + 0.05;
end

RCT_vector = zeros(1,9)

t = 2;

for n = 1:9
    [Z_loadRCT100, gammaRCT100] = calculateLoad(burden_100, Isn, cosPhi,
RCT);
    dataRCT100 = calculateError(Isn, Ipn, Z_loadRCT100, gammaRCT100,
N_turns, Irms, Urms, PhaseICT);
    data_varRCT_Ratio(:,t) = dataRCT100(:,2);
    data_varRCT_Phase(:,t) = dataRCT100(:,3);
    t = t + 1;
    RCT_vector(1,n) = RCT
    RCT = RCT + stepSize
end

end
```

MATLAB – Variation der Streuinduktivität

```
function [ data_varLSigma_Ratio, data_varLSigma_Phase, LSigma_vector ] =
variationStrayInductance(L_Sigma, stepSize, burden_100, Isn, cosPhi, RCT,
f, Ipn, N_turns, Irms, Urms, PhaseICT )
%variationStrayInductance
% Variation of the stray inductance

data_varLSigma_Ratio = zeros(24,11);
i = 0.05;
for j = 1:length(data_varLSigma_Ratio)
    data_varLSigma_Ratio([j j]) = [1;i];
    i = i + 0.05;
end

data_varLSigma_Phase = zeros(24,11);
i = 0.05;
for j = 1:length(data_varLSigma_Phase)
    data_varLSigma_Phase([j j]) = [1;i];
    i = i + 0.05;
end

LSigma_vector = zeros(1,4)

t = 2;

for n = 1:10
    [Z_loadS100, gammaS100] = calculateLoad_LSigma(burden_100, Isn,
cosPhi, RCT, L_Sigma, f);
    dataS100 = calculateError(Isn, Ipn, Z_loadS100, gammaS100, N_turns,
Irms, Urms, PhaseICT);
    data_varLSigma_Ratio(:,t) = dataS100(:,2);
    data_varLSigma_Phase(:,t) = dataS100(:,3);
    t = t + 1;
    LSigma_vector(1,n) = L_Sigma
    L_Sigma = L_Sigma + stepSize
end

end
```

MATLAB – Berechnung des Windungszahlverhältnisses ohne Streuinduktivität

```
function [ data_Nturns_U ] = calculateNturns_U(RCT, Usec, U_AC, U_prim,
I0, ratioCTA)
%calculate Nturns from CTA Quick measurement
% calculate Nturns from CTA Quick measurement

N_t = (U_AC - I0.*RCT)./U_prim;

data_Nturns_U = zeros(length(ratioCTA),5);
data_Nturns_U(:,1) = Usec;
data_Nturns_U(:,2) = U_AC;
data_Nturns_U(:,3) = U_prim;
data_Nturns_U(:,4) = I0;
data_Nturns_U(:,5) = N_t;

end
```

MATLAB – Berechnung des Windungszahlverhältnisses mit Streuinduktivität

```
function [ data_Nturns_Lsigma ] = calculateNturns_StrayInductance(RCT,
Usec, U_AC, U_prim, I0, LSigma_vector, f, ratioCTA)
%calculate Nturns from CTA Quick measurement at different voltage and
LSigma
% calculate Nturns from CTA Quick measurement at different voltage and
LSigma

% *****DATA VECTOR*****
% 1. Row: Voltage Usoll (at secondary terminal of CT)
% 2. Row: Voltage U_AC (measured at secondary terminal of CT)
% 3. Row: Voltage U_prim (measured at primary terminal of CT)
% 4. Row: Current I0 (measured excitation current at secondary of CT)
% 5. Row: Nturns @ LSigma 1
%
% ...
% n. Row: Nturns @ LSigma n

n = length(ratioCTA); % lenght of vector, lines
m = length(LSigma_vector)+ size(ratioCTA,1); % rows of vector

data_Nturns_Lsigma = zeros(n,m);
data_Nturns_Lsigma(:,1) = Usec;
data_Nturns_Lsigma(:,2) = U_AC;
data_Nturns_Lsigma(:,3) = U_prim;
data_Nturns_Lsigma(:,4) = I0;

for t = 1:length(LSigma_vector)
    N_t = (U_AC - I0.*sqrt(RCT^2+(2*pi*f*LSigma_vector(t))^2))./U_prim;

    data_Nturns_Lsigma(:,4+t) = N_t;
end

end
```

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.



Dornbirn, am 6. August 2018

Thomas Bischof