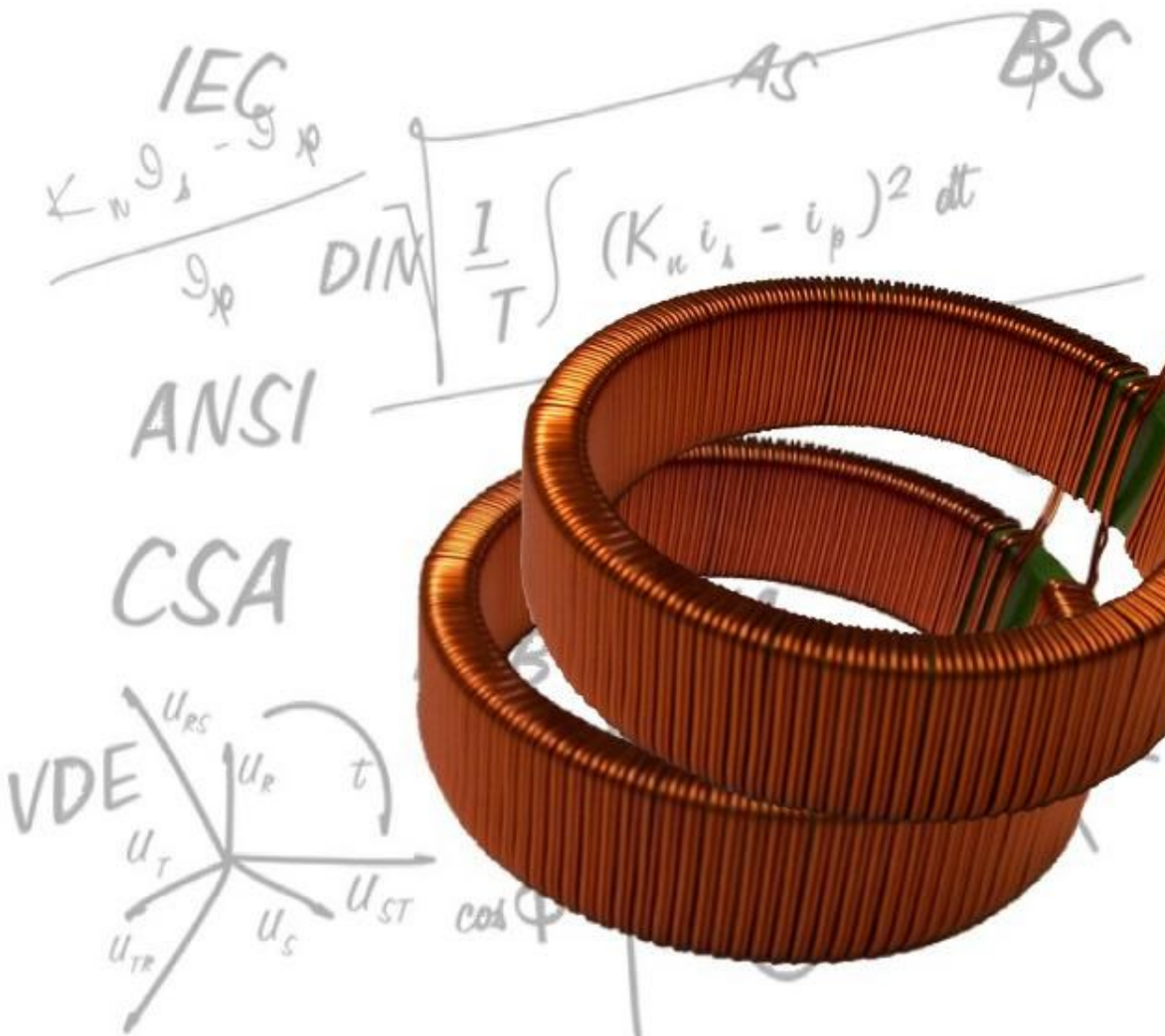


Strom-Messwandler

Grundlagen und Berechnungsverfahren



Berichte aus der Elektrotechnik

Alois Bröder

Strom-Messwandler

Grundlagen und Berechnungsverfahren

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5649-5
ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Schon Goldstein bemerkte 1928, dass die Fachliteratur über Messwandler sehr dürftig ist und Lehrbücher über Transformatoren diese überhaupt nicht oder nur sehr stiefmütterlich behandeln. Als Grund sah er hier die Eigenart der auftretenden Probleme, die abseits der sonst im Transformatorenbau zu behandelnden Fragen liegen. ([1], Seite III) Hieran hat sich seitdem leider nicht viel geändert.

Der Bitte von Hochschulen, sowie Kollegen und Geschäftsfreunden folgend und gewürzt mit der nicht ganz ernst gemeinten Aussage (frei nach Günther Oettinger, Politiker) "Wer Messwandler entwickelt, muss sich an seinen Misserfolgen lebenslang messen lassen" reifte die Motivation für diese kleine Abhandlung. Die sachkundigen Leser mögen sich hier gerne berufen fühlen, diese Abhandlung zu ergänzen oder fortzuführen.

Trotz des Bemühens, diese Arbeit so leicht verständlich wie möglich zu halten, geht es nicht ganz ohne Mathematik. Vertrautheit mit den Grundlagen der Elektrotechnik ist obligatorisch. Sind Kenntnisse der Differenzial- und Integral- auch nur marginal erforderlich, so geht es keinesfalls ohne fundiertes Wissen im Rechnen mit komplexen Größen. Auch können einigen sachkundigen Lesern manche Ausführungen zu ausschweifend und langwierig erscheinen. Sie sind jedoch meiner dreißigjährigen Erfahrung in diesem Metier gezollt mit dem Wissen darum, dass bei dem einen oder anderen hier manchmal Verständnisprobleme vorhanden sind.

Ein Großteil dieser Abhandlung ist der Berechnung von Stromwandlern gewidmet, wobei die Herleitung der Gleichungen eine wesentliche Rolle spielt. Auf die unterschiedlichen Arten von Stromwandlern wird dabei nur marginal eingegangen. Die Beschaffenheit der Isolation für den Betrieb von Stromwandlern an der jeweils geforderten Betriebsspannung ist anderen, zur Genüge vorhandenen Literaturen überlassen, insbesondere möchte ich den interessierten Leser verweisen an das Werk "Messwandler für Mittel- und Hochspannungsnetze" von Ingmar Grambow (weitere Einzelheiten siehe unter Quellenachweis). Dem gegenüber geht es hier hauptsächlich um die Berechnung des Übertragungsverhaltens, die im Betrieb auftretenden Fehler und deren Verringerung.

Nach einer kurzen Einführung wird die Wirkungsweise, die der eines Transformators entspricht, knapp besprochen. Eine Betrachtung der häufigsten Arten von Stromwandlern rundet die Einführung ab. Bevor wir zur eigentlichen Berechnung übergehen können, werden einige unerlässliche Vorbetrachtungen angestellt und eine Klärung der unterschiedlichen Bedeutungen des Begriffs "Bürde" versucht. Eine Überleitung zu den aus der Norm zitierten Anforderungen an Genauigkeit und Überstromfaktor bereiten auf das nächste Kapitel vor.

In den darauffolgenden beiden Kapiteln wird über das Ersatzschaltbild das Zeigerdiagramm entwickelt und dabei ein Fehler in einigen Veröffentlichungen entdeckt, bevor in dem nächsten Kapitel die unterschiedlichen Permeabilitätsbegriffe definiert werden. Eine kurze Herleitung der Transformator-Hauptgleichung führt dann letztlich zu den Fehlergleichungen für Stromwandler. Dieses Kapitel wird mit einer Diskussion der Fehlergleichung abgeschlossen.

Weitere Kapitel sind der quantitativen Berechnung und der Fehlerminderung gewidmet, wobei auf unterschiedliche Möglichkeiten der Gewinnung magnetischer Kenndaten nur soweit eingegangen wird, wie es den Entwickler von Stromwandlern interessiert. Die hier vorgestellten Berechnungsmethoden sind nicht die einzig möglichen, bieten dem Konstrukteur jedoch eine schnelle Berechnungsmöglichkeit, vor allem in Verbindung mit Tabellen-Kalkulationsprogrammen.

Zum bessern Auffinden von Gleichungen, Abbildungen und Tabellen wurden deren Nummerierungen jeweils zusätzlich um die Seitenzahl des ersten Erscheinens im Text erweitert.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Josef Hodapp, Dekan des Fachbereichs Energietechnik an der FH Aachen, für seinen unermüdlichen Einsatz und seine Anregungen und Vorschläge. Er hat mit dem Korrekturlesen dieser Arbeit sehr viel Zeit verbracht und damit auch eine große Bürde – um im Sprachgebrauch der Messwandler zu bleiben – und eine hohe Verantwortung übernommen.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Stefan Bauschke, mit dem ich ebenfalls über meine Gedankengänge diskutieren konnte und der mir neue Sichtweisen aufgezeigt hat.

Ich danke den vielen ungenannten, die mich in meinem Leben stets unterstützt und begleitet haben, ohne die ich letztlich meinen heutigen Erfahrungs- und Kenntnisstand nicht erreicht hätte.

Last but not least gilt ein großer Dank meiner Frau Marie-Luise, die meine Höhen und Tiefen während der ganzen Zeit, die ich mit dieser Abhandlung beschäftigt war, geduldig in Liebe ertragen hat.

Merzenich, 2017

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen

1	Einführung.....	1
1.1	Wirkungsweise.....	2
1.2	Arten von Stromwandlern.....	3
1.2.1	Aufsteck- und Wickel-Stromwandler	3
1.2.2	Schutz-Stromwandler	5
1.2.3	Weitere Stromwandler	5
2	Einige Vorbetrachtungen zu Stromwandlern	8
2.1	Stromrichtung.....	8
2.2	Kennzeichnung der Anschlüsse	10
2.3	Die Bürde	11
2.4	Fehlergrenzen für Strom-Messwandler	14
2.5	Überstrom-Begrenzungsfaktor	16
3	Ersatzschaltbild des Stromwandlers	17
3.1	Vollständiges Ersatzschaltbild.....	17
3.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild.....	19
4	Zeigerdiagramm und Fehlerstrom-Dreieck.....	20
4.1	Zeigerdiagramm	20
4.2	Fehlerstrom-Dreieck.....	25
5	Definitionen der Permeabilität	30
5.1	Relative Permeabilität und Amplitudenpermeabilität.....	30
5.2	Komplexe Permeabilität.....	32
5.3	Parallel- und Serienpermeabilität.....	35
6	Transformator-Hauptgleichung.....	41
6.1	Herleitung der Transformator-Hauptgleichung.....	41
6.2	Die Transformator-Hauptgleichung in komplexer Darstellung.....	43
7	Die Fehlergleichungen für Stromwandler	44

7.1	Herleitung des Gesamtfehlers.....	44
7.2	Herleitung des Stromfehlers (Übersetzungsmessabweichung)	49
7.3	Herleitung des Fehlwinkels	52
7.4	Diskussion der Fehlergleichungen	55

II Berechnungsbeispiele und Kennlinien

8	Berechnung eines Stromwandlers	60
8.1	Rechenbeispiel.....	60
8.2	Verbesserungen am berechneten Stromwandler.....	67
8.3	Berechnung der vollständigen Fehlerkurve eines Stromwandlers.....	70
8.4	Betrachtungen zu Fehlerkurven und magnetischen Kennwerten	74
8.5	Fehlerfortpflanzung.....	74
8.6	Sättigungsbeginn und deren Einfluss auf die Genauigkeit	76
9	Ermittlungsmethoden für die benötigten magnetischen Größen	80
9.1	Die μ_{BH} -Kurven.....	80
9.1.1	Die μ_{BH2} -Kurve	80
9.1.2	Die μ_{BHd} -Kurve	81
9.1.3	Bewertung der unterschiedlich gewonnen Größen	82
9.2	Ermittlung des Eisenwinkels φ_0 aus den Eisenverlusten.....	82
9.2.1	Hystereseverluste	83
9.2.2	Wirbelstromverluste	83
9.2.3	Excessverluste	83
9.2.4	Eisenverluste.....	84
9.2.5	Ermittlung der Scheinleistung	85
9.2.6	Zusammenhang zwischen Eisenwinkeln und Eisenverlusten	86
9.2.7	Numerische Beispiele.....	88
9.3	Wertung der unterschiedlichen Methoden zur Gewinnung der magnetischen Kenngrößen	90

III Verbesserung der Fehlergleichung, Bestimmung magnetischer Kenngrößen aus den Fehlerkurven und Gleichungen zur Beschreibung derselben

10 Entstehung der BH-Kurve	93
10.1 Hysteresekurve bei Vollaussteuerung	93
10.2 Hysteresekurven bei unterschiedlichen Aussteuerungen	95
10.3 Entmagnetisierung	96
11 Feldstärkeverläufe bei Ansteuerung mit sinusförmiger Flussdichte	96
11.1 Konstruktion des Feldstärkeverlaufs	97
11.2 Vergleich der Hystereseschleifen mit LISSAJOUS-Figuren	101
11.3 Folgerungen aus dem nicht sinusförmigen Feldstärkeverlauf	103
11.4 Die verbesserte Fehlergleichung	105
12 Numerische Betrachtungen	107
12.1 Numerischer Vergleich Amplituden- und p-Permeabilität	107
12.2 Numerische Berechnung mit der verbesserten Fehlergleichung	111
13 Bestimmung magnetischer Kenngrößen aus den Fehlerkurven	113
13.1 Grundsätzliche Vorgehensweise	114
13.2 Numerisches Beispiel	116
14 Gleichungen zur Beschreibung der p-Permeabilitäts- und der Eisenwinkel-Kurven	119
14.1 Gleichungen zur Beschreibung der p-Permeabilitäts-Kurven	119
14.2 Numerisches Beispiel zur Beschreibung der p-Permeabilitäts-Kurve	122
14.3 Gleichungen zur Beschreibung der Eisenwinkel-Kurven	129
14.3.1 Beschreibung mittels Eisenverlusten	129
14.3.2 Beschreibung mittels Polynomen	130
14.4 Numerisches Beispiel zur Beschreibung der Eisenwinkel-Kurve	131
14.5 Abschlussbetrachtung	133
15 Berechnung magnetischer Anforderungen aus vorgegebener Wandlerspezifikation	136
15.1 Berechnung der Mindest-p-Permeabilität	136

15.2	Numerisches Beispiel zur Ermittlung magnetischer Anforderungen..	137
------	--	-----

IV Maßnahmen zur Fehlerminderung

16	Einleitende Vereinbarungen	140
17	Windungsabgleich	140
17.1	Der Ausgleichstrom	141
17.2	Parallelverschiebung der Stromfehlerkurve bei Windungsabgleich....	144
17.3	Zahlenbeispiel	146
17.4	Fehlerspreizung durch Windungsabgleich.....	149
18	Mischkerne.....	150
18.1	Permeabilität von Mischkernen.....	150
18.2	Eisenwinkel von Mischkernen.....	154
19	Verbesserung des Fehlwinkels durch Erhöhen der Induktivität des Sekundärkreises	156
19.1	Zusätzliche Serieninduktivität im Sekundärkreis	157
19.1.1	Allgemeine Betrachtung der Serieninduktivität.....	157
19.1.2	Serieninduktivität unter Ausnutzung der Nichtlinearität der μ -Kennlinie	159
19.1.3	Numerische Beispiele.....	160
19.2	Erhöhung der Streuung	163
19.2.1	Erhöhung der Streuung durch Wicklungsanordnung.....	163
19.2.2	Erhöhung der Streuung durch Streubleche	164
20	Fehlerrückführung durch zusätzliche Parallelemente im Sekundärkreis.....	165
20.1	Herleitungen zu den Parallelementen im Sekundärkreis	165
20.2	Numerische Beispiele	168
20.3	Folgerungen aus den numerischen Beispielen	177
20.4	Gleichungen für Betrags- und Fehlwinkelveränderung	179

V Ergänzende Kapitel

21	Nochmalige Betrachtung der Betragsfehlergleichung.....	183
22	Erwärmung	189
22.1	Wärmequellen.....	189
22.1.1	Wicklungsverluste.....	189
22.1.2	Eisenverluste.....	190
22.1.3	Überstromverhalten	191
22.2	Erwärmung bei unterschiedlichen Belastungsarten.....	195
22.2.1	Erwärmung bei thermischem Bemessungs-Kurzzeitstrom.....	195
22.2.2	Erwärmung bei offenem Sekundärkreis	196
22.2.3	Erwärmung bei thermischem Bemessungs-Dauerstrom.....	198
22.3	Messfehler durch Fremdfelder	204
22.3.1	Auswirkung von Fremdfeldern	204
22.3.2	Maßnahmen zur Verringerung von Fremdfeldeinflüssen	207

VI Anhang

Literaturverzeichnis.....	210
Bilder.....	212
Verwendete Formelzeichen.....	213
Formelverzeichnis.....	219
Sachwortverzeichnis.....	228