

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieses Dokuments ist 2018-06-01.

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	8
Nationaler Anhang NA (informativ) Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten	8
Nationaler Anhang NB (informativ) Literaturhinweise.....	10
Einleitung	11
1 Anwendungsbereich	12
2 Normative Verweisungen	12
3 Begriffe und Abkürzungen	12
3.1 Begriffe	12
3.2 Abkürzungsverzeichnis.....	14
4 Verantwortlichkeiten beim Entwurf von Stromwandlern.....	16
4.1 Rückblick	16
4.2 Untergliederung des Entwurfsprozesses von Stromwandlern	17
5 Grundlegende theoretische Gleichungen für den Entwurf des transienten Verhaltens	18
5.1 Elektrischer Stromkreis.....	18
5.1.1 Allgemeines	18
5.1.2 Stromwandler	21
5.2 Transientes Verhalten	23
5.2.1 Allgemeines	23
5.2.2 Fehlereinsatzwinkel	25
5.2.3 Differenzialgleichung	26
6 Schließfolgen	28
6.1 Schließfolge C–O	28
6.1.1 Allgemeines	28
6.1.2 Fehlereinsatzwinkel	30
6.1.3 Transientenfaktor K_{tf} und transienter Dimensionierungsfaktor K_{td}	31
6.1.4 Verringerung der Unsymmetrie durch Definition des kleinsten Stromeinsatzwinkels.....	55
6.2 Schließfolge C–O–C–O	57
6.2.1 Allgemeines	57
6.2.2 Fall A: Keine Sättigung bis t'	58
6.2.3 Fall B: Sättigung zwischen t'_{al} und t'	60
6.3 Zusammenfassung	62
7 Bestimmung des transienten Dimensionierungsfaktors K_{td} durch numerische Berechnung.....	65
7.1 Allgemeines	65
7.2 Grundschialtung	65

7.3	Algorithmus	67
7.4	Berechnungsverfahren	67
7.5	Bezugsbeispiele	68
8	Kernsättigung und Remanenz	74
8.1	Definition der Sättigung für die gängige Praxis	74
8.1.1	Allgemeines	74
8.1.2	Definition des Sättigungsflusses in der vorhergehenden Norm IEC 60044-1	74
8.1.3	Definition des Sättigungsflusses in IEC 61869-2	76
8.1.4	Ansatz „5 % – Faktor 5“	77
8.2	Kerne mit Luftspalt und Kerne ohne Luftspalt	78
8.3	Mögliche Ursachen der Remanenz	81
9	Praktische Empfehlungen	85
9.1	Gefährdung der Genauigkeit bei verschiedenen Definitionen der PR-Klasse für denselben Kern	85
9.2	Eingrenzung des Fehlwinkels $\Delta\varphi$ und der sekundären Zeitkonstante T_s durch den transienten Dimensionierungsfaktor K_{td} für TPY-Kerne	85
10	Beziehungen zwischen verschiedenen Typen von Klassen	86
10.1	Übersicht	86
10.2	Berechnung der EMK bei Grenzbedingungen	86
10.3	Berechnung des Erregerstroms (oder Magnetisierungsstroms) bei Grenzbedingungen	87
10.4	Beispiele	87
10.5	Mindestanforderungen an die Klassenspezifikation	88
10.6	Ersetzen eines Kerns ohne Luftspalt durch einen Kern mit Luftspalt	89
11	Schutzfunktionen und richtige Spezifikation des Stromwandlers	89
11.1	Allgemeines	89
11.2	Allgemeine Anwendungsempfehlungen	90
11.2.1	Schutzfunktionen und geeignete Klassen	90
11.2.2	Richtiger Entwurf der Stromwandler in der Vergangenheit und heute	91
11.3	Überstromschutz: ANSI-Code: (50/51/50N/51N/67/67N); IEC-Symbol: I>	93
11.3.1	Erläuterung	93
11.3.2	Empfehlung	95
11.3.3	Beispiel	95
11.4	Überstromschutz: ANSI-Codes: 21/21N, IEC-Code: Z<	95
11.4.1	Erläuterung	95
11.4.2	Empfehlungen	97
11.4.3	Beispiele	98
11.5	Differenzialschutz	104
11.5.1	Erläuterung	104
11.5.2	Allgemeine Empfehlungen	105

11.5.3	Transformator-Differenzialschutz (87T)	105
11.5.4	Sammelschienenenschutz: ANSI-Codes (87B)	110
11.5.5	Längsdifferenzialschutz: ANSI-Codes (87L) (niederohmig)	113
11.5.6	Hochohmiger Differenzialschutz	117
Anhang A (informativ)	Softwarecode der Schließfolge C–O	135
Anhang B (informativ)	Softwarecode für die numerische Berechnung von K_{td}	137
Literaturhinweise		142

Bilder

Bild 1 – Definition des Fehlereinsatzwinkels γ	14
Bild 2 – Bestandteile des Schutzkreises	18
Bild 3 – Gesamter elektrischer Stromkreis	20
Bild 4 – Primärer Kurzschlussstrom	21
Bild 5 – Nichtlinearer Fluss von L_{ct}	22
Bild 6 – Linearisierte magnetisierende Induktivität eines Stromwandlers	23
Bild 7 – Simuliertes Kurzschlussverhalten mit dem nichtlinearen Modell	24
Bild 8 – Verhalten bei dreiphasigem Kurzschluss	26
Bild 9 – Zusammensetzung des Flusses	27
Bild 10 – Kurzschlussstrom für zwei unterschiedliche Fehlereinsatzwinkel	29
Bild 11 – $\psi_{\max}$ als Kurve der maximalen Flusswerte	29
Bild 12 – Kurvenverläufe des Primärstroms für die 4 Fälle bei 50 Hz und $\varphi = 70^\circ$	30
Bild 13 – Vier maßgebliche Fälle der Kurzschlussströme mit den Auswirkungen auf die magnetische Sättigung des Stromwandlers	31
Bild 14 – Maßgebliche Zeitbereiche für die Berechnung des Transientenfaktors	34
Bild 15 – Auftreten des ersten Scheitelwertes des Flusses in Abhängigkeit von T_p bei 50 Hz	35
Bild 16 – Ungünstigster Winkel $\theta_{tf,\psi_{\max}}$ als Funktion von T_p und t'_{al}	36
Bild 17 – Ungünstigster Fehlereinsatzwinkel $\gamma_{tf,\psi_{\max}}$ als Funktion von T_p und t'_{al}	37
Bild 18 – $K_{tf,\psi_{\max}}$ berechnet mit dem ungünstigsten Fehlereinsatzwinkel $\theta_{\psi_{\max}}$	38
Bild 19 – Polardiagramm mit $K_{tf,\psi_{\max}}$ und $\gamma_{tf,\psi_{\max}}$	39
Bild 20 – Bestimmung von K_{tf} im Zeitbereich 1	44
Bild 21 – Kurvenverläufe des Primärstroms für 50 Hz, $T_p = 1$ ms, $\gamma_{\psi_{\max}} = 166^\circ$ für $t'_{al} = 2$ ms	45
Bild 22 – Ungünstigster Fehlereinsatzwinkel für 50 Hz, $T_p = 50$ ms und $T_s = 61$ ms	46
Bild 23 – Transientenfaktor für unterschiedliche Zeitbereiche	47
Bild 24 – K_{tf} in allen Zeitbereichen für $T_s = 61$ ms bei 50 Hz mit t'_{al} als Parameter	48
Bild 25 – Zeitlich gedehnter Ausschnitt aus Bild 24	48
Bild 26 – Primärstrom für eine kleine primäre Zeitkonstante	49
Bild 27 – K_{tf} -Werte für eine kleine primäre Zeitkonstante	50
Bild 28 – Kurzschlussströme für unterschiedliche Fehlereinsatzwinkel	51

Bild 29 – Transientenfaktoren für verschiedene Fehlereinsatzwinkel (Beispiel).....	52
Bild 30 – Ungünstigste Fehlereinsatzwinkel für jeden Zeitschritt (Beispiel für 50 Hz)	52
Bild 31 – Primärstrom für zwei unterschiedliche Fehlereinsatzwinkel (Beispiel für 16,67 Hz).....	53
Bild 32 – Transientenfaktoren für unterschiedliche Fehlereinsatzwinkel (Beispiel für 16,67 Hz)	54
Bild 33 – Ungünstigste Fehlereinsatzwinkel für jeden Zeitschritt (Beispiel für 16,67 Hz)	54
Bild 34 – Auftreten von Fehlern nach Warrington	55
Bild 35 – Geschätzte Verteilung von Fehlern über mehrere Jahre	56
Bild 36 – Mit verschiedenen Fehlereinsatzwinkeln γ berechneter Transientenfaktor K_{tf}	57
Bild 37 – Verlauf des Flusses bei einer C–O–C–O-Folge eines Kerns ohne Luftspalt.....	58
Bild 38 – Typischer Kurvenverlauf des Flusses bei einer C–O–C–O-Folge für einen Kern mit Luftspalt mit einem höheren Fluss bei der zweiten Erregung	59
Bild 39 – Kurvenverlauf des Flusses eines Kerns mit Luftspalt in einer C–O–C–O-Folge mit höherem Fluss in der ersten Erregung	60
Bild 40 – Kurvenverlauf des Flusses in einer C–O–C–O-Folge mit zulässiger Sättigung	61
Bild 41 – Zur Verringerung des Fluss-Scheitelwertes genutzte Sättigung des Kerns.....	62
Bild 42 – Übersicht über Kurvenverläufe für den Entwurf des transienten Übertragungsverhaltens.....	63
Bild 43 – Grundsicherung für die numerische Berechnung von K_{td}	66
Bild 44 – Berechnung von K_{td} für eine C–O-Folge.....	69
Bild 45 – Berechnung von K_{td} für eine C–O–C–O-Folge ohne Kernsättigung im ersten Zyklus	70
Bild 46 – Berechnung von K_{td} für eine C–O–C–O-Folge unter Berücksichtigung der Kernsättigung im ersten Zyklus	71
Bild 47 – Berechnung von K_{td} für eine C–O–C–O-Folge mit verringerter Unsymmetrie	72
Bild 48 – Berechnung von K_{td} für eine C–O–C–O-Folge mit kurzer t'_{al} und t''_{al}	73
Bild 49 – Berechnung von K_{td} für eine C–O–C–O-Folge eines Kerns ohne Luftspalt	74
Bild 50 – Vergleich der Definitionen der Sättigung nach IEC 60044-1 und IEC 61869-2	75
Bild 51 – Remanenzfaktor K_r nach der vorherigen Definition in IEC 60044-1	76
Bild 52 – Bestimmung von Sättigung und Remanenzfluss nach dem Gleichstromverfahren für einen Kern mit Luftspalt	77
Bild 53 – Bestimmung von Sättigung und Remanenzfluss nach dem Gleichstromverfahren für einen Kern ohne Luftspalt	77
Bild 54 – Sekundärströme des Stromwandlers als Störschrieb eines Lichtbogenofentransformators	82
Bild 55 – Vierdrahtverbindung	83
Bild 56 – Sekundärströme des Stromwandlers als Störschrieb im zweiten Stromfluss bei automatischer Wiedereinschaltung	84
Bild 57 – Anwendung eines unverzögerten/verzögerten Überstromrelais (ANSI-Codes 50/51) mit unabhängiger Zeitkennlinie	94
Bild 58 – Zeitverzögertes Überstromrelais, Zeitkennlinien.....	94
Bild 59 – Beispiel für die Spezifikation eines Stromwandlers, Überstromzeit.....	95
Bild 60 – Distanzschutz, Prinzip (Zeit-Distanz-Diagramm)	96
Bild 61 – Distanzschutz, Prinzip (R/X -Diagramm)	97

Bild 62 – Entwurfsbeispiel, Distanzschutz	98
Bild 63 – Primärstrom mit Schließfolge C–O–C–O.....	102
Bild 64 – Transientenfaktor K_{tf} mit seiner Hüllkurve K_{tfp}	102
Bild 65 – Transientenfaktor K_{tf} für die Stromwandlerklasse TPY mit Sättigung im ersten Fehler.....	103
Bild 66 – Transientenfaktor K_{tf} für Stromwandlerklasse TPZ mit Sättigung im ersten Fehler.....	103
Bild 67 – Transientenfaktor K_{tf} für die Stromwandlerklasse TPX	104
Bild 68 – Differenzialschutz, Prinzip	105
Bild 69 – Transformator-Differenzialschutz, Fehler	106
Bild 70 – Transformator-Differenzialschutz	107
Bild 71 – Sammelschienenschutz, äußerer Fehler.....	110
Bild 72 – Simulierte Ströme eines Stromwandlers für Sammelschienen-Differenzialschutz.....	113
Bild 73 – Entwurf eines Stromwandlers für eine einfache Leitung mit zwei Enden.....	114
Bild 74 – Mit einem einfachen elektromechanischen Relais realisierter Differenzialschutz.....	117
Bild 75 – Prinzip des hochohmigen Schutzes	118
Bild 76 – Zeigerdiagramm für äußere Fehler.....	119
Bild 77 – Zeigerdiagramm für innere Fehler	120
Bild 78 – Magnetisierungskurve des Stromwandlers.....	121
Bild 79 – Einstrich-Netzschema für Sammelschienen- und hochohmigen Differenzialschutz	125
Bild 80 – Ströme am Fehlerort (Primärwerte).....	127
Bild 81 – Primärströme durch die Stromwandler, skaliert auf die Sekundärseite der Stromwandler.....	127
Bild 82 – Sekundärströme der Stromwandler.....	128
Bild 83 – Differenzialspannung	128
Bild 84 – Differenzialstrom und Effektivwertfilter-Signal	129
Bild 85 – Ströme am Fehlerort (Primärwerte).....	129
Bild 86 – Primärströme durch die Stromwandler, skaliert auf die Sekundärseite der Stromwandler.....	130
Bild 87 – Sekundärströme der Stromwandler.....	130
Bild 88 – Differenzialspannung	131
Bild 89 – Differenzialstrom und Effektivwert-gesfiltertes Signal	131
Bild 90 – Ströme am Fehlerort (Primärwerte).....	132
Bild 91 – Primärströme durch die Stromwandler, skaliert auf die Sekundärseite der Stromwandler.....	132
Bild 92 – Sekundärströme der Stromwandler.....	133
Bild 93 – Differenzialspannung	133
Bild 94 – Differenzialstrom und Effektivwert-gesfiltertes Signal	134
Bild 95 – Differenzialspannung ohne Begrenzung durch den Varistor.....	134

Tabellen

Tabelle 1 – Vier maßgebliche Fälle des Kurzschlussstrom-Einsetzwinkels.....	30
Tabelle 2 – Übersicht über Gleichungen für den Entwurf des transienten Übertragungsverhaltens	64
Tabelle 3 – Vergleich der Definitionen des Sättigungspunktes	78

	Seite
Tabelle 4 – Gemessene Remanenzfaktoren.....	79
Tabelle 5 – Verschiedene Definitionen der PR-Klasse für denselben Kern.....	85
Tabelle 6 – EMK-Definitionen.....	86
Tabelle 7 – Umrechnung der EMK-Werte	86
Tabelle 8 – Umrechnung der Dimensionierungsfaktoren.....	87
Tabelle 9 – Definitionen des Grenzstroms	87
Tabelle 10 – Mindestanforderungen an die Klassenspezifikation	88
Tabelle 11 – Auswirkungen von Kernen mit Luftspalt und ohne Luftspalt	89
Tabelle 12 – Anwendungsempfehlungen	90
Tabelle 13 – Ergebnisse der Berechnung der Überdimensionierung eines TPY-Kerns	109
Tabelle 14 – Ergebnisse der Berechnung der Überdimensionierung als PX-Kern.....	109
Tabelle 15 – Berechnungsschema für den Längsdifferenzialschutz.....	116
Tabelle 16 – Sammelschienenschutz mit zwei eingehenden Speiseleitungen.....	124

Nationales Vorwort

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 471 „Messwandler“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Die VDE-Leitlinien enthalten sicherheitstechnische Festlegungen mit einem im Vergleich zu den VDE-Bestimmungen wesentlich erweiterten Ermessensraum für eigenverantwortliches sicherheitstechnisches Handeln.

VDE-Leitlinien sind angebracht, wenn die Vielfalt der zu betrachtenden Sachlagen oder Gestaltungsmöglichkeiten nach vorherrschender Meinung durch unmittelbar anwendbare Anweisungen nicht erfasst werden kann. Sie dienen dem Anwender als Beispielsammlung oder Grundlage für eigene sicherheitstechnische Entscheidungen. Für sich allein sind sie nicht als ausreichende Entscheidungsgrundlage für die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden oder die Anwender geeignet.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 38 „Instrument transformers“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60044-1:1999 + A1:2000 + A2:2003 <i>ersetzt durch:</i> EN 61869-2:2012	IEC 60044-1:1996 + A1:2000 + A2:2002 <i>ersetzt durch:</i> IEC 61869-2:2012	DIN EN 60044-1 (VDE 0414-44-1):2003-12 <i>ersetzt durch:</i> DIN EN 61869-2 (VDE 0414-9-2):2013-07	VDE 0414-44-1 VDE 0414-9-2
EN 60044-6:1999 <i>ersetzt durch:</i> EN 61869-2:2012	IEC 60044-6:1992, mod. <i>ersetzt durch:</i> IEC 61869-2:2012	DIN EN 60044-6 (VDE 0414-7):1999-10 <i>ersetzt durch:</i> DIN EN 61869-2 (VDE 0414-9-2):2013-07	VDE 0414-7 VDE 0414-9-2
–	IEC 60050-321:1986	a	–
–	IEC 60617-DB	–	–
EN 60617-3:1996	IEC 60617-3:1996	DIN EN 60617-3:1997-08	–
EN 60255 (alle Teile)	IEC 60255 (alle Teile)	DIN EN 60255 (VDE 0435) (alle Teile)	VDE 0435
EN 60255-1	IEC 60255-1	DIN EN 60255-1 (VDE 0435-300)	VDE 0435-300
EN 60255-121	IEC 60255-121	DIN EN 60255-121 (VDE 0435-3121)	VDE 0435-3121
EN 60255-127	IEC 60255-127	DIN EN 60255-127 (VDE 0435-3127)	VDE 0435-3127
EN 60255-149	IEC 60255-149	DIN EN 60255-149 (VDE 0435-3149)	VDE 0435-3149
EN 60255-151	IEC 60255-151	DIN EN 60255-151 (VDE 0435-3151)	VDE 0435-3151
EN 60909-0:2001 <i>ersetzt durch:</i> EN 60909-0:2016	IEC 60909-0:2001 <i>ersetzt durch:</i> IEC 60909-0:2016	DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2002-07 <i>ersetzt durch:</i> DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2016-12	VDE 0102 VDE 0102
EN 61869 (alle Teile)	IEC 61869 (alle Teile)	DIN EN 61869 (VDE 0414) (alle Teile)	VDE 0414 (alle Teile)
EN 61869-1:2009	IEC 61869-1:2007, mod.	DIN EN 61869-1 (VDE 0414-9-1):2010-04	VDE 0414-9-1
^a „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Deutsche Ausgabe“, Online-Zugang: http://www.dke.de/dke-iev .			

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60617-3:1997-08, *Graphische Symbole für Schaltpläne – Teil 3: Schaltzeichen für Leiter und Verbinder (IEC 60617-3:1996); Deutsche Fassung EN 60617-3:1996*

DIN EN 60255 (VDE 0435) (alle Teile), *Messrelais und Schutzeinrichtungen*

DIN EN 60255-1 (VDE 0435-300), *Messrelais und Schutzeinrichtungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*

DIN EN 60255-121 (VDE 0435-3121), *Messrelais und Schutzeinrichtungen – Teil 121: Funktionsanforderungen für den Distanzschutz*

DIN EN 60255-127 (VDE 0435-3127), *Messrelais und Schutzeinrichtungen – Teil 127: Funktionsnorm für Über-/Unterspannungsschutz*

DIN EN 60255-149 (VDE 0435-3149), *Messrelais und Schutzeinrichtungen – Teil 149: Funktionsanforderungen an den thermischen Überlastschutz*

DIN EN 60255-151 (VDE 0435-3151), *Messrelais und Schutzeinrichtungen – Teil 151: Funktionsanforderungen für Über-/Unterstromschutz*

DIN EN 60909-0 (VDE 0102):2016-12, *Kurzschlussströme in Drehstromnetzen – Teil 0: Berechnung der Ströme (IEC 60909-0:2016); Deutsche Fassung EN 60909-0:2016*

DIN EN 61869 (VDE 0414) (alle Teile), *Messwandler*

DIN EN 61869-1 (VDE 0414-9-1):2010-04, *Messwandler – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 61869-1:2007, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61869-1:2009*

DIN EN 61869-2 (VDE 0414-9-2):2013-07, *Messwandler – Teil 2: Zusätzliche Anforderungen für Stromwandler (IEC 61869-2:2012); Deutsche Fassung EN 61869-2:2012*

Einleitung

Seit der Veröffentlichung von IEC 60044-6:1992¹⁾, *Requirements for protective current transformers for transient performance*, ist das Anwendungsgebiet für diese Art der Stromwandler größer geworden. Das hat zur Folge, dass der theoretische Hintergrund für die Bemessung nach elektrischen Anforderungen wesentlich komplexer geworden ist. Um IEC 61869-2 auch weiterhin so anwenderfreundlich wie möglich zu gestalten, wurde die Erläuterung der Hintergrundinformationen in diesen Teil von IEC 61869 überführt.

¹⁾ Zurückgezogen und ersetzt durch IEC 61869-2:2012.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 61869 gilt für induktive Stromwandler für Schutzzwecke, die die Anforderungen der Norm IEC 61869-2 erfüllen.

Er kann Herstellern von Relais und Stromwandlern sowie Projektingenieuren einen genaueren Eindruck davon vermitteln, wie Stromwandler auf vereinfachte oder standardisierte Kurzschluss-signale reagieren. Hierzu liefert dieser Teil weitergehende Informationen, um sowohl die Definition von induktiven Stromwandlern als auch die an sie gestellten Anforderungen abzudecken.

Die Informationen dieses Dokuments richten sich an gelegentliche Anwender ebenso wie an Experten. Wo notwendig, wird der Abstraktionsgrad im Dokument angegeben. Darüber hinaus wird die Frage der Verantwortlichkeiten im Entwurfsprozess von Stromwandlern behandelt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60255 (alle Teile), *Measuring relays and protection equipment*

IEC 60909-0:2016, *Short circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents*

IEC 61869-1:2007, *Instrument transformers – Part 1: General requirements*

IEC 61869-2:2012, *Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers*

3 Begriffe und Abkürzungen

3.1 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 61869-1:2007, IEC 61869-2:2012 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: unter <http://www.iso.org/obp>

3.1.1

primärer Bemessungs-Kurzschlussstrom

I_{psc}

Effektivwert der Wechselstromkomponente eines primären transienten Kurzschlussstroms, auf dem das Genauigkeitsverhalten des Stromwandlers beruht

[QUELLE: IEC 61869-2:2012, 3.3.206]

3.1.2

thermischer Bemessungs-Kurzzeitstrom

I_{th}

höchster Effektivwert des primären Stroms, dem ein Wandler mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung für eine festgelegte kurze Zeit standhalten kann, ohne beschädigt zu werden

[QUELLE: IEC 60050-321:1986, 321-02-22; IEC 61869-2:2012, 3.3.203]

3.1.3**Anfangs-Kurzschlusswechselstrom** I''_k

Effektivwert des Wechselstromanteils eines zu erwartenden Kurzschlussstroms im Augenblick des Kurzschlusseintritts, wenn die Impedanz ihre Größe zum Zeitpunkt Null beibehält

[QUELLE: IEC 60909-0:2001, 1.3.5]

Anmerkung 1 zum Begriff: Während es sich bei I_{th} um einen grundlegenden Parameter einer Anlage und ihrer Bauteile handelt, handelt es sich bei I_{psc} um eine Genauigkeitsanforderung, die entscheidende Auswirkungen auf das Sättigungsverhalten eines Stromwandlers hat. Das Schutzsystem stellt das Auslösen bei einem Strom I''_k sicher, der üblicherweise niedriger ist als I_{th} . Je nach Anforderung an den Schutz kommt es zu einer erheblichen Sättigung des Stromwandlers, bevor I''_k erreicht wird. In manchen Fällen ist I_{psc} daher gegebenenfalls deutlich geringer als I''_k .

3.1.4**Primärstrom** I_p

Strom, der durch die Primärwicklung eines Stromwandlers fließt

3.1.5**Sekundärstrom** I_s

Strom, der durch die Sekundärwicklung eines Stromwandlers fließt

3.1.6**Kreisfrequenz** ω

Kreisfrequenz des Primärstroms

3.1.7**Zeit** t

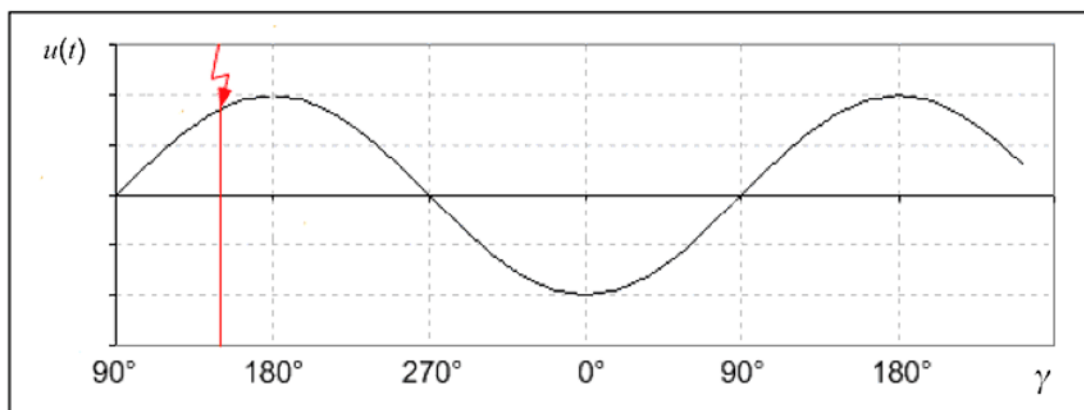
Zeitspanne

3.1.8**Phasenwinkel der Kurzschlussimpedanz des Netzes** φ

Phasenwinkel der Kurzschlussimpedanz des Netzes

3.1.9**Fehlereinsetzwinkel** γ

Einsetzwinkel des primären Kurzschlusses, 180° beim Spannungsmaximum (siehe Bild 1)

**Legende**

u Primärspannung
 γ Fehlereinsatzwinkel

Bild 1 – Definition des Fehlereinsatzwinkels γ **3.1.10****kleinster Fehlereinsatzwinkel** γ_m

niedrigster Wert des Fehlereinsatzwinkels γ , der beim Entwurf eines Stromwandlers zu berücksichtigen ist

3.1.11**alternative Definition des Fehlereinsatzwinkels** θ

Einsetzwinkel des primären Kurzschlusses, definiert als $\gamma - \varphi$

3.2 Abkürzungsverzeichnis

Diese Liste umfasst den Inhalt aus IEC 61869-2:2012, Tabelle 3.7, sowie die Begriffe aus 3.11 bis 3.1.11.

AIS	luftisolierte Schaltanlage
ALF	Genauigkeitsgrenzfaktor
CT	Stromwandler
CVT	kapazitiver Spannungswandler
E_{al}	Grenzwert der Bemessungs-Ersatzsekundär-EMK
E_{ALF}	sekundärseitige Grenz-EMK für Stromwandler für Schutzzwecke der Klassen P und PR
E_{FS}	sekundärseitige Grenz-EMK für Stromwandler für Messzwecke
E_k	Bemessungs-Kniepunkt-EMK
f	Frequenz
F	mechanische Last
F_c	Konstruktionsfaktor
f_R	Bemessungsfrequenz
F_{rel}	relative Streuflussrate
FS	Überstrom-Begrenzungsfaktor
GIS	gasisolierte Schaltanlage

I''_k	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
$\hat{I}_{al}$	Scheitelwert des sekundären Erregerstroms bei E_{al}
I_{cth}	thermischer Bemessungs-Dauerstrom
I_{dyn}	Bemessungs-Stoßstrom
I_e	Erregerstrom
I_{PL}	Bemessungs-Grenzstrom
I_p	Primärstrom
I_{pr}	primärer Bemessungsstrom
I_{psc}	primärer Bemessungs-Kurzschlussstrom
I_s	Sekundärstrom
I_{sr}	sekundärer Bemessungsstrom
IT	Messwandler
I_{th}	thermischer Bemessungs-Kurzzeitstrom
i_ε	Momentanwert des Fehlerstroms
k	tatsächliches Windungszahlenverhältnis
k_r	Bemessungs-Windungszahlenverhältnis
K_R	Remanenzfaktor
K_{ssc}	Faktor des symmetrischen Bemessungs-Kurzschlussstroms
K_{td}	transienter Dimensionierungsfaktor
K_{tf}	Transientenfaktor
K_x	Dimensionierungsfaktor
L_{ct}	nichtlineare Induktivität eines Stromwandlers
L_m	linearisierte magnetisierende Induktivität eines Stromwandlers
L1, L2, L3	Bezeichnung der Phasen im elektrischen Dreiphasensystem
n_s	Anzahl der sekundären Windungen
R_b	ohmsche Bemessungsbürde
R_{ct}	Widerstand der Sekundärwicklung
R_s	Widerstand des Sekundärkreises
S_r	Bemessungsleistung
t	Zeit
t'	Dauer des ersten Stromflusses
t''	Dauer des zweiten Stromflusses
t'_{al}	festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze im ersten Stromfluss
t''_{al}	festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze im zweiten Stromfluss

t_{fr}	Stromfluss-Pausenzeit
T_p	festgelegte primäre Zeitkonstante
T_s	sekundäre Zeitkonstante
U_m	höchste Spannung für Betriebsmittel
U_{sys}	höchste Systemspannung
VT	Spannungswandler
$\Delta\varphi$	Fehlwinkel
ε	Übersetzungsmessabweichung
ε_c	Gesamtmessabweichung
$\hat{\varepsilon}$	Scheitelwert des Momentanwertes des Fehlers
$\hat{\varepsilon}_{ac}$	Scheitelwert des Fehlers der Wechselstromkomponente
φ	Phasenwinkel der Kurzschlussimpedanz des Netzes
γ	Fehlereinsatzwinkel
γ_m	kleinster Fehlereinsatzwinkel
θ	alternative Definition des Fehlereinsatzwinkels
ψ	magnetischer verketteter Sekundärfluss im Stromwandlerkern
ψ_r	Remanenzfluss
ψ_{sat}	Sättigungsfluss
ω	Kreisfrequenz

4 Verantwortlichkeiten beim Entwurf von Stromwandlern

4.1 Rückblick

Die Norm IEC 60044-6, *Instrument transformers – Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance*, erschien 1992 (damals als IEC 44-6). Es war die erste Norm, die das transiente Übertragungsverhalten von Stromwandlern für Schutzzwecke behandelte.

Bei der bekannten Klasse P muss die üblicherweise unerlässliche Überdimensionierung, die sich aus der primären Gleichstromkomponente ergibt, im Genauigkeitsgrenzfaktor oder in der Bürde „versteckt“ werden.

Die Definition der neuen Klassen TPX, TPY und TPZ orientierte sich stärker an den Schließfolgen und beinhaltet die Definitionen aller notwendigen Parameter der Folgen C–O und C–O–C–O. Mit diesen Klassen wurde es möglich, die Verantwortung für die Berechnung der Überdimensionierung aufgrund der primären Gleichstromkomponente (ausgedrückt durch den „Transientenfaktor“ K_{td} , der heute als „transienter Dimensionierungsfaktor“ bezeichnet wird), auf den Hersteller des Stromwandlers zu übertragen.

Die Klassen des transienten Übertragungsverhaltens fanden aus verschiedenen Gründen nur einen geringen Anklang:

- Ihre auf Schließfolgen (und der Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze, sofern erforderlich) beruhende Festlegung ist wesentlich komplexer als die herkömmlichen Klassen 5P und 10P, die ursprünglich für elektromechanische Relais vorgesehen waren.

- In der Schließfolgendefinition sind die tatsächlichen Kriterien für die Definition der Überdimensionierungsfaktoren nicht mehr enthalten.

Heutzutage ist es üblich, dass Entwickler von Relais die erforderliche Überdimensionierung von Stromwandlern für Schutzzwecke vorgeben und dabei die Wellenform des Primärsignals ebenso wie ihre eigenen Sicherheitsanforderungen berücksichtigen.

Als IEC 60044-6 in IEC 61869-2 überführt wurde, wurde der zurückgehenden Bedeutung der Schließfolgendefinition angesichts der oben erläuterten Aspekte Rechnung getragen. Folgerichtig wurde die Definition des transienten Übertragungsverhaltens so erweitert, dass anstelle von Parametern für Schließfolgen direkt der transiente Dimensionierungsfaktor K_{td} definiert werden kann. Diese neue Art der Festlegung ist deutlich weniger komplex und gleicht der der bekannten Klasse P. Ziel dieses Technischen Berichts ist es unter anderem, solche alternativen Festlegungen für bestimmte kritische Anwendungen zu erläutern.

4.2 Untergliederung des Entwurfsprozesses von Stromwandlern

Bei modernen Digitalrelais ist die Zeitspanne, in der die Entscheidung getroffen wird, aufgrund steigender Abstraten und der Weiterentwicklung der Schutzalgorithmen immer kürzer geworden. Dadurch verkürzte sich auch das erforderliche sättigungsfreie Zeitintervall der Stromwandler entsprechend. Dies hat kleinere Stromwandlerkerne zur Folge, was zu der Entwicklung der modernen kompakten gasisolierten Schaltanlagen passt. Darüber hinaus werden in einigen Algorithmen Fourier- und Effektivwertfilter für das dynamische Stromwandler-Stromsignal implementiert. In der Folge reagieren die Relais „geschmeidiger“ auf hohe Ströme mit möglicher Sättigung. Aus diesen Gründen lassen sich das erforderliche Verhalten des Stromwandlers und die letztendlichen Maße des Kerns nicht ausschließlich anhand der anfänglichen Sättigungszeit und einer einfachen analytischen Gleichung beschreiben.

Entwickeln von Relais wird daher empfohlen, analytische Gleichungen zunächst für eine erste Einschätzung heranzuziehen. In einem zweiten Schritt dürfen die Algorithmen anhand eines Simulationsmodells des Stromwandlerkerns geprüft und die Anforderungen in Form einfacher Parameter (z. B. Überdimensionierungsfaktor, transienter Dimensionierungsfaktor usw.) für die maßgeblichen ungünstigen Fehlerszenarien im Handbuch des Schutzrelais (oder anderen Dokumenten) veröffentlicht werden. Im Rahmen der Projektierungsphase werden die veröffentlichten Anforderungen auf konkrete Fälle angewendet und die so überprüften Klassenparameter an den Hersteller des Stromwandlers weitergegeben.

Im Sinne der Rückwärtskompatibilität mit IEC 60044-6 darf der Transientenfaktor K_{tf} – analytisch berechnet anhand von Parametern wie der Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze t'_{a1} , der Schließfolge usw. – ohne weitere Prüfungen des Schutzrelais direkt als transienter Dimensionierungsfaktor K_{td} angewendet werden. Diese Vorgehensweise wird nicht empfohlen, darf aber angewendet werden, wenn die Verantwortung für den Entwurf nicht vollständig an den Hersteller des Relais übertragen wird.

Die Verfahren zum Bestimmen des transienten Dimensionierungsfaktors K_{td} auf der Grundlage von Schutzregeln können als spezifisches Wissen von Relais-Experten angesehen werden und sind nicht Bestandteil dieses Technischen Berichts.

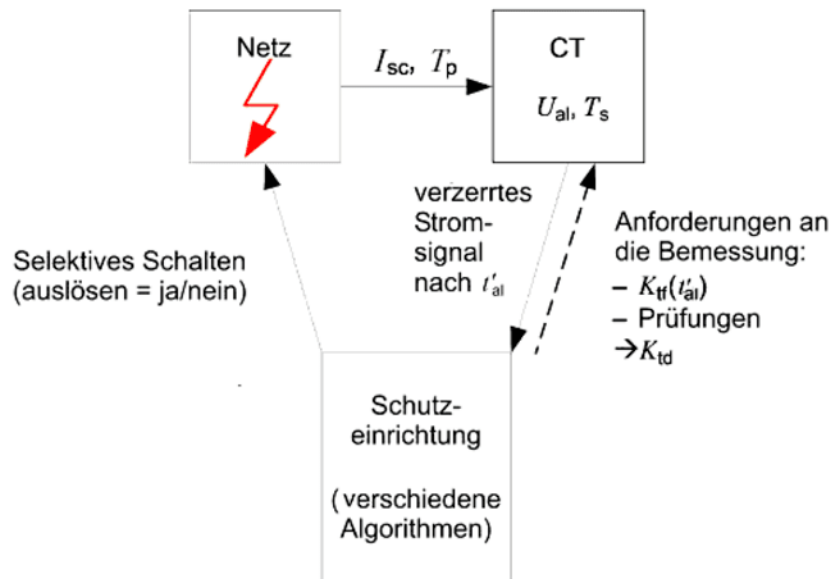
Im Sinne einer Ergänzung wird in diesem Bericht der Weg von der Schließfolgendefinition, der nach wie vor eine gewisse Bedeutung beizumessen ist, zu der Definition eines transienten Dimensionierungsfaktors dargestellt. Die analytischen Gleichungen in diesem Technischen Bericht sind sehr umfassend und verschiedenartig. Im Vergleich zu denen in IEC 60044-6 wirken sie daher deutlich komplexer. Die Idee ist jedoch, dass sie nur von wenigen Entwicklern von Schutzrelais überhaupt angewendet werden, welche den Projekt-Ingenieuren und den Herstellern von Stromwandlern anschließend Entwurfsparameter an die Hand geben, die für ein einfacheres Verfahren der Stromwandlerbemessung herangezogen werden können.

5 Grundlegende theoretische Gleichungen für den Entwurf des transienten Verhaltens

5.1 Elektrischer Stromkreis

5.1.1 Allgemeines

Als Einführung wird in Bild 2 die vereinfachte Wechselwirkungskette zwischen den Hauptbestandteilen des Schutzkreises dargestellt: Die Netzströme werden mit Stromwandlern gemessen und die Werte werden an die Schutzeinrichtungen übertragen.



Legende

- I_{sc} primärer Kurzschlussstrom
- K_{td} transienter Dimensionierungsfaktor
- K_{tf} Transientenfaktor
- T_p festgelegte primäre Zeitkonstante
- T_s sekundäre Zeitkonstante
- t'_{al} festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze im ersten Stromfluss
- U_{al} Grenzwert der Bemessungs-Ersatzsekundär-EMK

Bild 2 – Bestandteile des Schutzkreises

Entwicklung von Schutzrelais:

- Ermitteln der ungünstigsten Szenarien in typischen Netzen für Kurzschlussströme mit I_{sc} , T_p .
- Definieren des erforderlichen K_{ssc} und Beginn der analytischen Berechnung von K_{tf} (t'_{al} , t''_{al} , t' , t_{fr} , T_p , T_s).
- Überprüfen der ersten Ergebnisse in Prüfungen: digitale CT-Simulation (Software) und Schutzrelais (Hardware). Sofern erforderlich, Korrigieren von K_{ssc} und K_{tf} und Aufnehmen von Sicherheitsfaktoren.
- Veröffentlichen der Ergebnisse für die maßgeblichen ungünstigsten Fehlerszenarien (bzw. das ungünstigste maßgebliche Fehlerszenario) im Handbuch des Schutzrelais. Der Transientenfaktor K_{tf} (aus Schutzperspektive) wird nun zum transienten Dimensionierungsfaktor K_{td} (für CT Bemessung und Konstruktionsperspektive), wobei K_{td} Sicherheitszugaben M beinhaltet: $K_{td} = K_{tf} \cdot M$. Nach den Prüfungen muss K_{td} keine Korrelationen mit dem ursprünglichen K_{tf} aufweisen, falls sich bei den Prüfungen ein unterschiedliches Verhalten zeigt.

ANMERKUNG Hersteller von Schutzrelais führen die Prüfungen üblicherweise an vollständigen Schutz-IEDs (Software und Hardware) durch, um die Anforderungen an Stromwandler als transienten Gesamt-Dimensionierungsfaktor K_{tot} festzulegen und zu veröffentlichen. Je nach Schutzfunktion und Anwendung finden in diesem Faktor auch die erforderliche Mindestzeit bis zur Sättigung, der Remanenzfaktor und weitere Größen Berücksichtigung. In diesen Prüfungen deckt der Fehlereinsatzwinkel den gesamten definierten Bereich ab und ist nicht auf den theoretischen ungünstigsten Fall beschränkt. Weitere Informationen können 8.2 entnommen werden.

Projektierung:

- Heranziehen des Schutzrelais-Handbuchs bezüglich der Anforderungen an den Stromwandler.
- Ermitteln der ungünstigsten Szenarien im geplanten Netz mit Kurzschlussströmen mit I_{sc} , T_p . Nachschlagen, ob diese ungünstigsten Szenarien im Handbuch aufgeführt sind.
- Die primären Bemessungsströme I_{pr} , K_{SSC} , die Bürden R_b usw. berechnen und unter Zugrundelegung von K_{td} aus dem Schutzrelais-Handbuch die erforderlichen CT-Parameter festlegen.
- Der CT-Hersteller wendet die festgelegten Parameter an, ohne dabei i'_{al} , i''_{al} , i' , t_{fr} , T_p , usw. zu berücksichtigen.

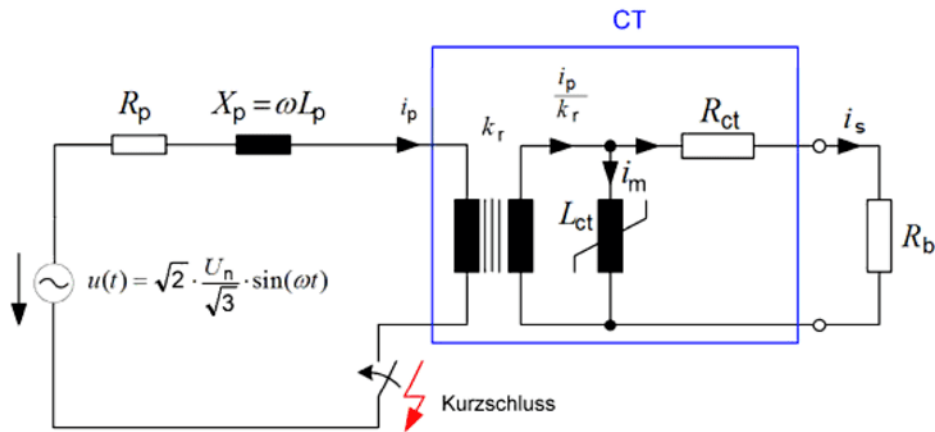
Rückwärtskompatibilität mit IEC 60044-6:

Alternativ kann K_{tf} (i'_{al} , i''_{al} , i' , t_{fr} , T_p , T_g) berechnet und ohne weitere Prüfungen direkt als K_{td} übernommen werden, sofern die Verantwortlichkeit bei den Projektbeteiligten liegt.

- Die primären Bemessungsströme I_{pr} , K_{SSC} , die Bürden R_b usw. berechnen und die erforderlichen CT-Parameter (Klasse, i'_{al} , i''_{al} , i' , t_{fr} , T_p) festlegen.
- Der CT-Hersteller darf $K_{\text{td}} = K_{\text{tf}}$ als Funktion von i'_{al} , i''_{al} , i' , t_{fr} , T_p berechnen.

Der umfangreichere elektrische Stromkreis (Bild 3), der für den Entwurf von Stromwandlern zu betrachten ist, enthält

- das Primärnetz, dargestellt durch einen Ersatz-Kurzschlusskreis,
- den Stromwandler (CT) und
- die Schutzeinrichtung als Bürde (Last).



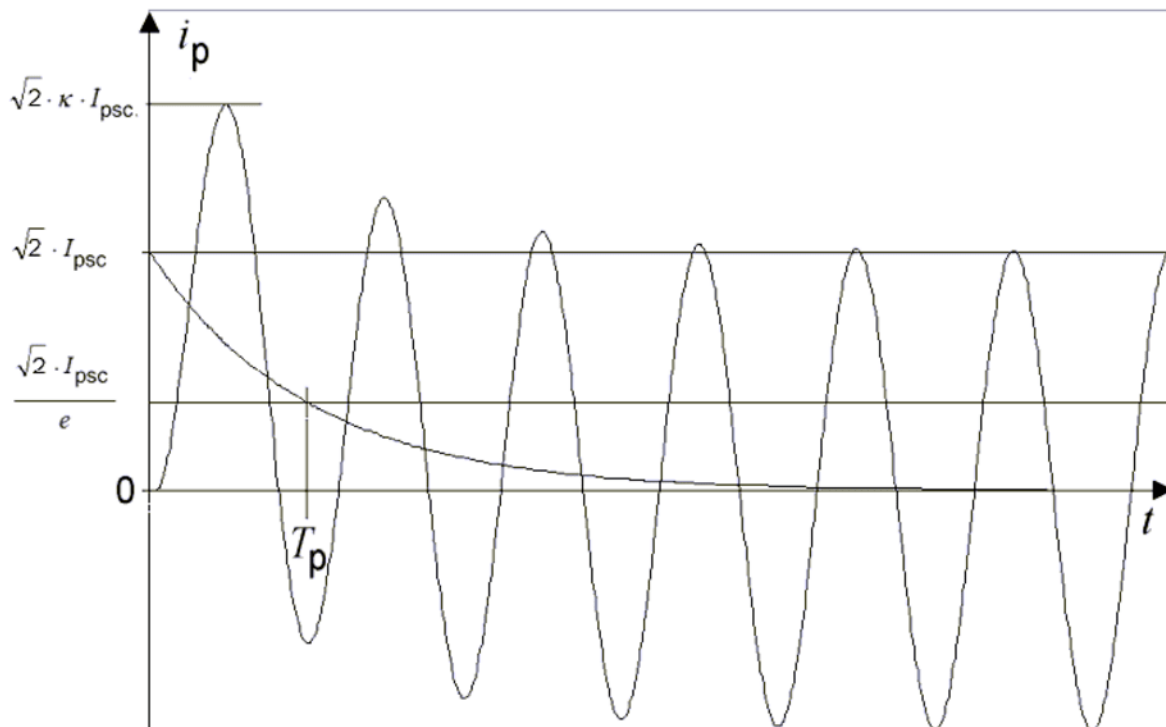
Zeitkonstante der Gleichstromkomponente des primären Kurzschlussstroms: $T_p = \frac{L_p}{R_p} = \frac{X_p}{\omega R_p}$

Legende

- i_p Primärstrom
- i_m Erregerstrom
- i_s Sekundärstrom
- k_r Bemessungs-Windungsverhältnis
- L_{ct} nichtlineare Induktivität des Stromwandlers
- L_p Induktivität des Primärkreises
- R_b ohmsche Bemessungsbürde
- R_{ct} Widerstand der Sekundärwicklung
- R_p ohmscher Anteil der Impedanz des Primärkreises
- u Primärspannung
- U_n Betriebsspannung Außenleiter – Außenleiter
- T_p festgelegte primäre Zeitkonstante
- X_p induktiver Anteil der Impedanz des Primärkreises
- ω Kreisfrequenz

Bild 3 – Gesamter elektrischer Stromkreis

Der primäre Ersatz-Kurzschlusskreis stellt den gesamten Primärkreis nach IEC 60909-0:2001 dar und führt den primären Kurzschlussstrom $i_p(t)$ ein, der sich aus einer Wechselstromkomponente und einer mit der primären Zeitkonstante T_p (siehe Bild 4) exponentiell abklingenden Gleichstromkomponente zusammensetzt. Zur Vereinfachung wird hier nur der generatorferne Kurzschluss behandelt.



Legende

i_p Primärstrom

I_{psc} primärer Bemessungs-Kurzschlussstrom

e Basis des natürlichen Logarithmus

t Zeit

T_p festgelegte primäre Zeitkonstante

κ Faktor für die Berechnung des Stoßkurzschlussstroms nach IEC 60909-0:2001. Er erreicht seinen Maximalwert $\kappa = 2$, wenn T_p gegen ∞ geht

Bild 4 – Primärer Kurzschlussstrom

In IEC 61869-2 wird der Normwert für I_{dyn} als $2,5 I_{th}$ definiert. Dieser Wert entspricht nicht genau dem ungünstigsten Wert von $\sqrt{2} \cdot \kappa \cdot I_{psc}$, der $2,83 \cdot I_{psc}$ ist.

BEISPIEL Bei 50 Hz entspricht der Faktor $\kappa = 2,5 / \sqrt{2} = 1,77$ einem X_p/R_p -Wert von 11 und einem T_p -Wert von nur 35 ms.

5.1.2 Stromwandler

Der Stromwandler wird durch das Übersetzungsverhältnis k_r und die nichtlineare Induktivität L_{ct} mit der Magnetisierungskurve und den Wicklungswiderstand R_{ct} repräsentiert.

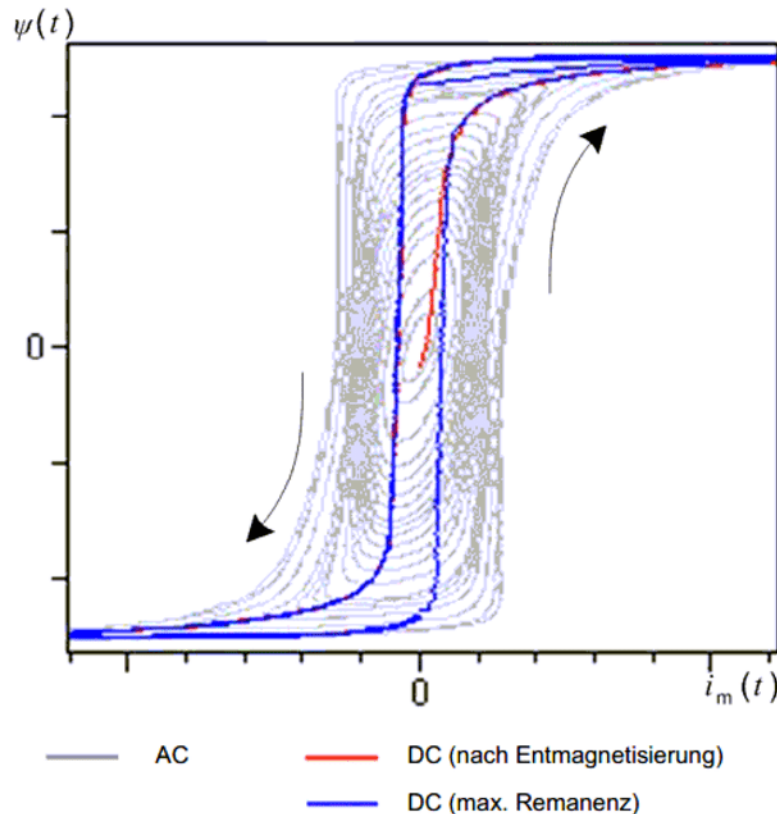
In Bild 5 ist die zeitabhängige Magnetisierungskurve eines typischen Stromwandlers dargestellt als Fluss $\psi(t)$ in der nichtlinearen Induktivität L_{ct} in Abhängigkeit vom Magnetisierungsstrom $i_m(t)$ (siehe Bild 3), gewonnen durch Messung mit einer indirekten Prüfung (Primärseite mit offenen Anschlüssen, Erregung und Messung an den Sekundäranschlüssen). Wenn eine Spannung mit Bemessungsfrequenz angelegt wird (z. B. 50 Hz), sind die grauen Kurvenverläufe das Ergebnis der Erregungen im stationären Zustand mit unterschiedlichen Größen. Wenn die Erregung mit einer Gleichspannung erfolgt (siehe Gleichstromverfahren in IEC 61869-2), beginnend mit einem entmagnetisierten CT-Kern, ist der rote Kurvenverlauf das Ergebnis. Wenn die Erregung mit einer Gleichspannung mit positiver Remanenz beginnt, ist der blaue anfängliche Kurvenverlauf das Ergebnis (siehe auch Bild 51). Der Hauptunterschied zwischen den Kurvenverläufen bei

Wechselspannung und Gleichspannung wird in erster Linie durch die höheren Wirbelströme im Wechselspannungsfall verursacht.

Derartige Messungen zeigen die Magnetisierungskurve:

- mit einem steilen linearen Teil, der durch die magnetische Sättigung begrenzt ist;
- mit ansteigenden und abfallenden Kurvenverläufen, die aufgrund der Hysterese verschoben sind.

Das Ergebnis ist eine mehrdeutige Kurve, die von der Frequenz und Remanenz abhängt.



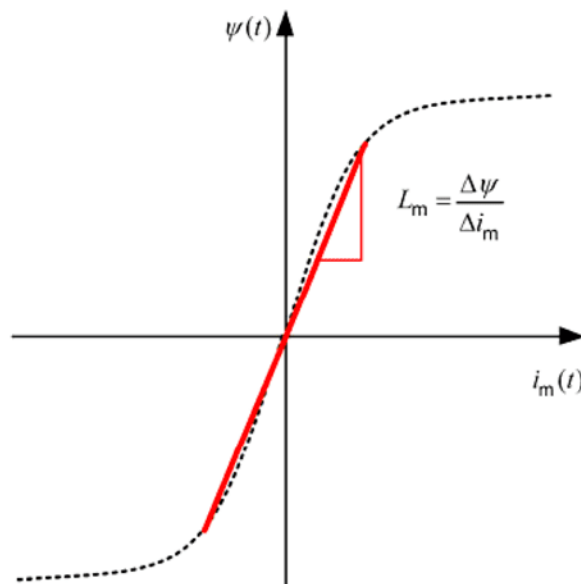
Legende

- ψ magnetischer Fluss im Stromwandlerkern
 i_m Magnetisierungsstrom
 t Zeit

Bild 5 – Nichtlinearer Fluss von L_{ct}

Ein derartiges nichtlineares physikalisches Verhalten ist sehr schwierig zu beschreiben, so dass Vereinfachungen notwendig werden. Deshalb wird zunächst die Hysterese vernachlässigt und die Magnetisierungskennlinie wird zu einem Kurvenverlauf durch den Ursprung einschließlich der Sättigung vereinfacht (gestrichelte Linie in Bild 6).

Dieser Kurvenverlauf kann in einem zweiten Schritt durch ein vereinfachtes Modell mit einer einzigen konstanten Induktivität L_m als der Anstieg des linearen Teils der Magnetisierungskurve (Bild 6) repräsentiert werden, so dass auch die Sättigung vernachlässigt wird (rote Linie in Bild 6).



Legende

- ψ magnetischer Fluss im Stromwandlerkern
- i_m Magnetisierungsstrom
- L_m linearisierte Induktivität
- t Zeit

Bild 6 – Linearisierte magnetisierende Induktivität eines Stromwandlers

Mit einer derartigen vereinfachten linearen analytischen Theorie wird das magnetische Verhalten nur korrekt beschrieben

- für entmagnetisierte Stromwandlerkerne (keine Remanenz) oder Kerne mit Luftspalt, bei denen die Remanenz deutlich verringert ist,
- bis zum Zeitpunkt der ersten Sättigung oder der Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze t'_{al} .

Somit sind zwei Vereinfachungsschritte erforderlich:

- Vernachlässigung der Hysteresephänomene,
- Vernachlässigung der Sättigung.

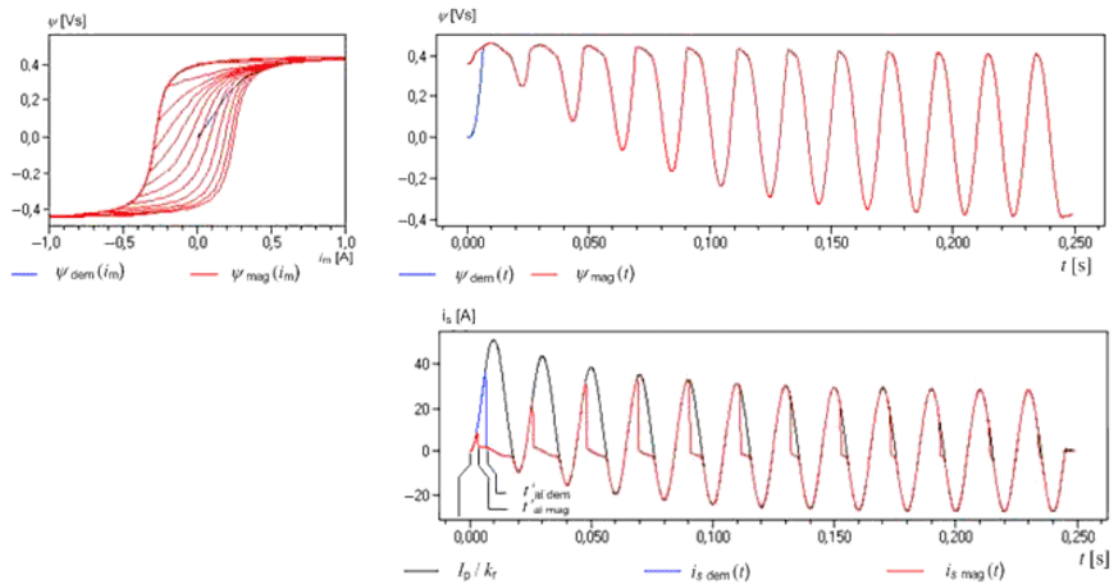
5.2 Transientes Verhalten

5.2.1 Allgemeines

Bei dem Beispiel in [Bild 7](#) wird das Kurzschlussverhalten mit einem nichtlinearen Modell in der folgenden Konfiguration nachgebildet:

Stromwandler: 500/1 A, 2,5 VA, 5P20, $R_{ct} = 2 \Omega$
reale Bürde = Bemessungsbürde

Kurzschluss: $I_{psc} = 10 \text{ kA} = 20 \times I_{pr}$, $T_p = 50 \text{ ms}$



Legende

I_p	Primärstrom
$i_{s \text{ dem}}$	Sekundärstrom in einem anfänglich entmagnetisierten Kern
$i_{s \text{ mag}}$	Sekundärstrom in einem anfänglich magnetisierten Kern
k_r	Bemessungs-Windungszahlenverhältnis
t	Zeit
$t'_{al \text{ dem}}$	maximal möglicher Wert von t'_{al} in einem anfänglich entmagnetisierten Kern
$t'_{al \text{ mag}}$	maximal möglicher Wert von t'_{al} in einem anfänglich magnetisierten Kern
ψ	magnetischer Fluss im Stromwandlerkern
ψ_{dem}	magnetischer Fluss in einem anfänglich entmagnetisierten Kern
ψ_{mag}	magnetischer Fluss in einem anfänglich magnetisierten Kern

Bild 7 – Simuliertes Kurzschlussverhalten mit dem nichtlinearen Modell

Die Simulation in Bild 7 wird in der Phase L1 mit einer maximalen Gleichstromkomponente und mit einer Wechselstromkomponente I''_k durchgeführt, die dem 20-Fachen des primären Bemessungsstroms I_{pr} entspricht. Dieser Stromwandlerkern mit der Schutzklasse 5P20 ist für den symmetrischen stationären Fall korrekt dimensioniert, wenn die Gleichstromkomponente abgenommen hat. Aufgrund der Gleichstromkomponente tritt die Sättigung jedoch kurz nach dem Einsetzen des Fehlers auf, unabhängig davon, ob der Kern entmagnetisiert ist oder nicht. Deshalb wurden die Klassen TPX, TPY, TPZ für das transiente Übertragungsverhalten von Stromwandlern mit einem zusätzlichen transienten Dimensionierungsfaktor K_{td} geschaffen.

Die Simulation beginnt mit einem entmagnetisierten Stromwandlerkern (blaue Linien) und einem gesättigten Kern (90 % Remanenz, rote Linien). Das linke Bild zeigt den magnetischen Fluss $\psi(t)$ als Funktion des Magnetisierungsstroms $i_m(t)$. Es zeigt Hysterese und Sättigung. Aufgrund der Sättigung kann der magnetische Fluss nur zwischen den positiven und negativen Grenzwerten wechseln. Bei einem Beginn ohne Remanenz (entmagnetisierter Fall) wird die erste Sättigung bei $t'_{al, \text{dem}} = 6,5 \text{ ms}$ erreicht. Mit Remanenz wird die erste Sättigung viel eher, nämlich bei $t'_{al, \text{mag}} = 3 \text{ ms}$ erreicht. Dies könnte in einigen Fällen zu Fehlauslösungen bestimmter Schutzrelais führen, z. B. bei der Differenzialschutzfunktion. In anderen Fällen, z. B. beim Überschutz, zieht es keine Fehlauslösungen nach sich. Es kann jedoch zu einer langsameren Reaktion des Schutzsystems führen.

Die remanenzbedingten nachteiligen Auswirkungen auf bestimmte Schutzfunktionen können problemlos durch Anwendung von Stromwandlerkernen mit Luftspalt vermieden werden. Zum Zweck der Vereinfachung wird in diesem Fall die Hysterese vernachlässigt (erster Vereinfachungsschritt).

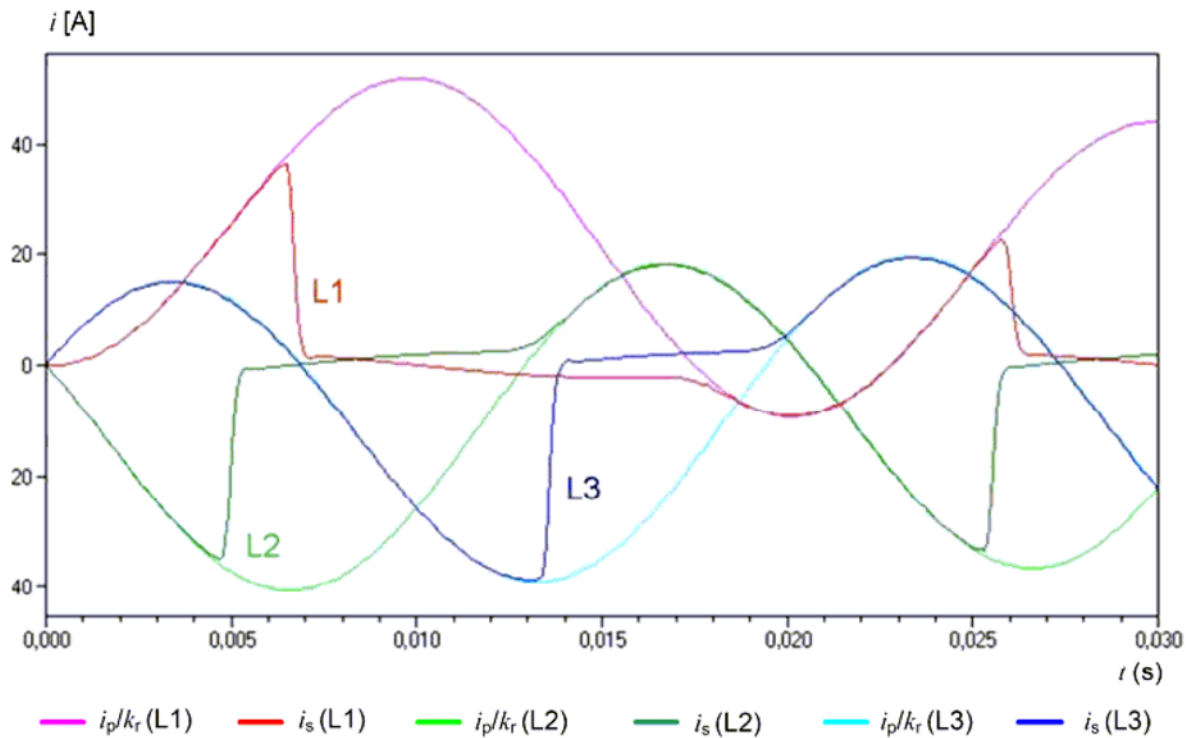
Aus Sicht der Schutzfunktionen ist die Anforderung an die Signalqualität des CT-Sekundärstroms durch die Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze t'_{al} gegeben. Dieser Wert ist als das kleinste sättigungsfreie Zeitintervall, beginnend ab dem ersten Einsetzen des Fehlers, definiert. Innerhalb dieser Zeitspanne muss sich der magnetische Fluss im linearen Bereich der Magnetisierungskurve befinden und die Schutzfunktion muss entscheiden, ob ausgelöst wird oder nicht. Die Zeit nach der ersten Sättigung findet bei dieser Betrachtungsweise dann keine Berücksichtigung. Aus der geforderten Zeit t'_{al} werden der Transientenfaktor K_{tf} und der transiente Dimensionierungsfaktor K_{td} berechnet und/oder durch Prüfung mit dem jeweiligen Schutzrelais bestimmt (siehe [Abschnitt 9](#)). Deshalb ist für derartige Zwecke nur der lineare Bereich der Magnetisierungskurve von Interesse. Das physikalische Problem kann weiter auf ein lineares Problem eingeschränkt und vereinfacht werden, indem auch die Sättigung vernachlässigt wird (zweiter Vereinfachungsschritt). Mit der konstanten Induktivität L_{ct} im linearen Problem kann die Differenzialgleichung [Gleichung \(1\)](#) mit annehmbarem mathematischem Aufwand gelöst werden.

5.2.2 Fehlereinsatzwinkel

In der Simulation in [Bild 7](#) mit einer Phase und entmagnetisiertem Kern wird ein Schaltwinkel zum Erreichen der maximalen Gleichstromkomponente gewählt. Unter dieser Voraussetzung wird eine Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze t'_{al} von etwa 6,5 ms erreicht.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass dieser Wert von t'_{al} nur für eine Phase gültig ist. Bei mehrphasigen Kurzschlüssen müssen die anderen Phasen ebenso berücksichtigt werden. Die vorstehend angegebene Simulation wurde unter Anwendung der gleichen Vorbedingungen entsprechend ergänzt.

In [Bild 8](#) ist die Gleichstromkomponente der Phase L1 auf ihrem Maximum, während die Gleichstromkomponenten der Phasen L2 und L3 erheblich kleiner sind. Ungeachtet dieser Tatsache lässt sich beobachten, dass die Sättigung in der Phase L2 früher ($t'_{al} \approx 5$ ms) als in der Phase L1 auftritt. Aus diesem Grund sind genauere Betrachtungen der Veränderung des Fehlereinsatz- oder Schaltwinkels notwendig.



Legende

i	Strom
i_p	Primärstrom
i_s	Sekundärstrom
k_r	Bemessungs-Windungszahlenverhältnis
t	Zeit

Bild 8 – Verhalten bei dreiphasigem Kurzschluss

5.2.3 Differenzialgleichung

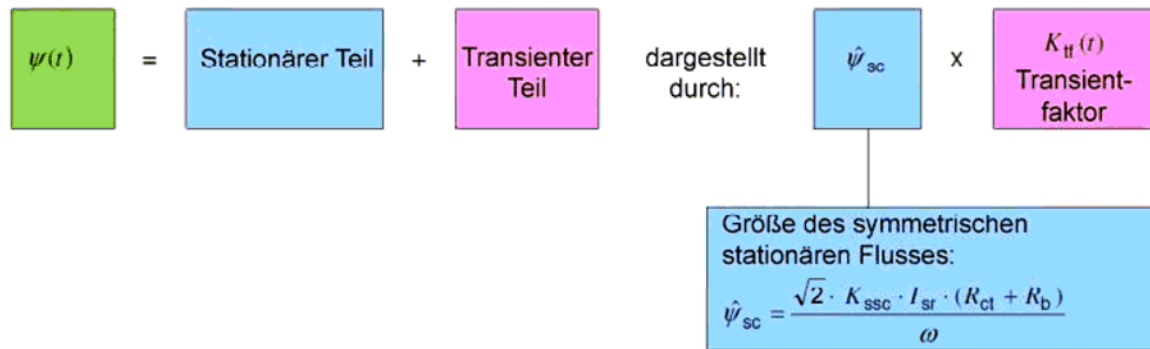
Auf Grundlage der zuvor vorgenommenen Vereinfachungen und mit der konstanten Induktivität L_{ct} im linearen physikalischen Problem wird eine lineare Differenzialgleichung erster Ordnung für den Magnetisierungsstrom i_m und den Primärstrom $i_p(t)$ aufgestellt (siehe Bild 3):

$$T_s \frac{di_m(t)}{dt} + i_m(t) = i_p(t) \quad i_m(0) = 0 \quad (1)$$

Dann kann das magnetische Verhalten mit der analytischen Gleichung für den verketteten Sekundärfluss beschrieben werden:

$$\psi(t) = L_{ct} i_m(t) \quad (2)$$

Der Fluss enthält einen transienten Teil (aufgrund der Gleichstromkomponente des primären Kurzschlussstroms) und einen stationären Wechselstromteil. Diese Teile sind in vereinfachter Form in Bild 9 dargestellt.



Legende

I_{sr}	sekundärer Bemessungsstrom
K_{tf}	Transientenfaktor
K_{ssc}	Faktor des symmetrischen Bemessungs-Kurzschlussstroms
R_b	ohmsche Bemessungsbürde
R_{ct}	Widerstand der Sekundärwicklung
t	Zeit
ψ	verketteter Sekundärfluss
$\hat{\psi}_{sc}$	Scheitelwert des verketteten Sekundärflusses im Stromwandlerkern unter symmetrischen Kurzschlussbedingungen
ω	Kreisfrequenz

Bild 9 – Zusammensetzung des Flusses

Der transiente Teil mit den beiden Zeitkonstanten T_p und T_s wird durch den zeitabhängigen Transientenfaktor $K_{tf}(t)$ dargestellt. Dieser Faktor vergrößert den Betrag von $\hat{\psi}_{sc}$ vom Scheitelwert der Wechselstromkomponente bis zum Scheitelwert der transienten Kurve.

Wie nachfolgend gezeigt wird, wird $K_{tf}(t)$ durch mehrere unterschiedliche Gleichungen ausgedrückt und repräsentiert nur die magnetische lineare Theorie. Für das transiente Übertragungsverhalten kann die physikalische Anforderung an den Stromwandler, die sich aus den Schutzalgorithmen ergibt, mit dem Parameter t'_{al} (Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze) ausgedrückt werden. t'_{al} wird wieder zur Berechnung von K_{tf} verwendet, der die Grenze des Flusses definiert, bis zu der der Stromwandlerkern nicht sättigen darf.

Für die Algorithmen der modernen Schutzeinrichtungen ist es nicht ausreichend, nur die Stromwandleranforderungen als einzige Parameter, z. B. t'_{al} , anzugeben. In einigen Fällen ist dieser Wert nicht konstant. Er kann eine Funktion weiterer Parameter sein, z. B. der Größe des Fehlerstroms, seines Einsetzwinkels γ (welcher die Gleichstromkomponente bestimmt, die mit der primären Zeitkonstante T_p absinkt) und der Schutzeinstellungen. Es wird deshalb empfohlen, die Schutzrelais mit unterschiedlichen Stromwandlergrößen und maßgeblichen ungünstigsten Bedingungen anhand eines digitalen nichtlinearen Stromwandlermodells, in dem die Hysterese berücksichtigt wird, zu prüfen. Der analytisch berechnete Transientenfaktor K_{tf} und die zusätzlichen Relaisprüfungen führen zum endgültigen transienten Dimensionierungsfaktor K_{td} des Stromwandlers, der wiederum zum Grenzwert der Bemessungs-Ersatzsekundär-EMK E_{al} nach der Definition in IEC 61869-2:2012, 3.4.237, führt:

$$E_{al} = K_{ssc} \times K_{td} \times (R_{ct} + R_b) \times I_{sr} \quad (3)$$

K_{td} unterscheidet sich in dieser Hinsicht von der Definition in der vorherigen Norm IEC 60044-6: Die Gleichungen in IEC 61869-2:2012 berücksichtigen auch sehr kleine Werte der Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze t'_{al} sowie die ungünstigsten Fehlereinsetzwinkel, die sich aus den Anforderungen an moderne Schutzrelais ergeben.

Sie bilden die Basis für die Relaisprüfungen, die von Schutzeinrichtungsherstellern durchgeführt werden sollten, um einfachere Stromwandleranforderungen in den Relaishandbüchern anzugeben. Diese einfacheren Anforderungen sind von den Endanwendern in ihren Projekten und beim Entwurf der Stromwandler anzuwenden. Die technische Verantwortung für die Stromwandleranforderungen hat sich in dieser Hinsicht etwas von den Endanwendern zu den Relaisherstellern verschoben und dadurch sind die Anforderungen für die Endanwender einfacher geworden.

Die Schutzeinrichtung und die Bürde des Stromwandlers messen niedrige Betriebsströme und höhere Überströme mit der höchsten wünschenswerten Genauigkeit. Das Eingangssignal der Schutzeinrichtung ist der Sekundärstrom des Stromwandlers, der dem Primärstrom entsprechen sollte. In modernen Schutzeinrichtungen sind mehrere Mess- und Schutzalgorithmen realisiert, die vom Stromwandler unterschiedliche Genauigkeitsklassen und ein jeweils anderes transientes Übertragungsverhalten erfordern, so dass ein Kompromiss zwischen den Maßen, der maximalen Genauigkeit und dem besten Übertragungsverhalten des Stromwandlers zu finden ist.

6 Schließfolgen

6.1 Schließfolge C–O

6.1.1 Allgemeines

Die folgenden Gleichungen gelten für eine C–O-Schließfolge. Der allgemeine Ausdruck für den Momentanwert eines primären Kurzschlussstroms lässt sich wie folgt definieren:

$$i_{sc}(t) = \sqrt{2} I_{psc} \left[e^{-t/T_p} \cos(\gamma - \varphi) - \cos(\omega t + \gamma - \varphi) \right] \quad (4)$$

mit der Ersatzspannungsquelle des primären Kurzschlusses

$$u(t) = -U_{\max} \cos(\omega t + \gamma) \quad (5)$$

Dabei ist

I_{psc}	der Effektivwert des primären symmetrischen Kurzschlussstroms $I_{psc} = K_{ssc} \cdot I_{pr}$;
$T_p = \frac{L_p}{R_p}$	die primäre Zeitkonstante;
γ	der Schaltwinkel oder Fehlereinsatzwinkel (siehe 3.1.9);
$= \arctan \frac{X_p}{R_p} = \arctan(\omega T_p)$	der Phasenwinkel der Kurzschlussimpedanz des Netzes.

Zum Zwecke der Vereinfachung können der Fehlereinsatzwinkel und der Kurzschlusswinkel der Netzimpedanz zu einem Winkel θ zusammengefasst werden, wodurch die Berechnung einfacher nachzuvollziehen ist:

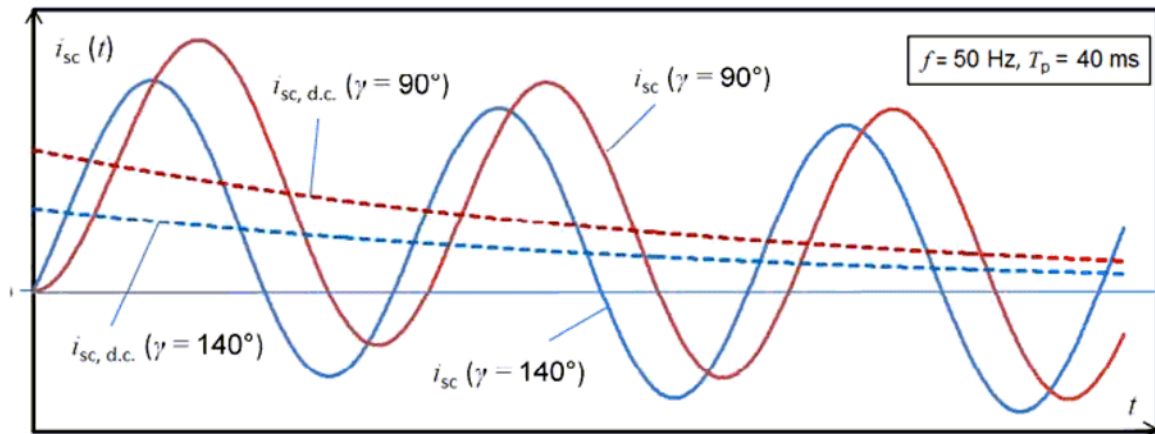
$$\theta = \gamma - \varphi \quad (6)$$

$$i_{sc}(t) = \sqrt{2} I_{psc} \left[e^{-t/T_p} \cos(\theta) - \cos(\omega t + \theta) \right] \quad (7)$$

Die beiden Winkel θ und γ beschreiben die Möglichkeit der Veränderung des Fehlereinsatzwinkels und können daher alternativ, aber entsprechend ihrer Definition verwendet werden.

In Bild 10 sind zwei typische primäre Kurzschlussströme dargestellt:

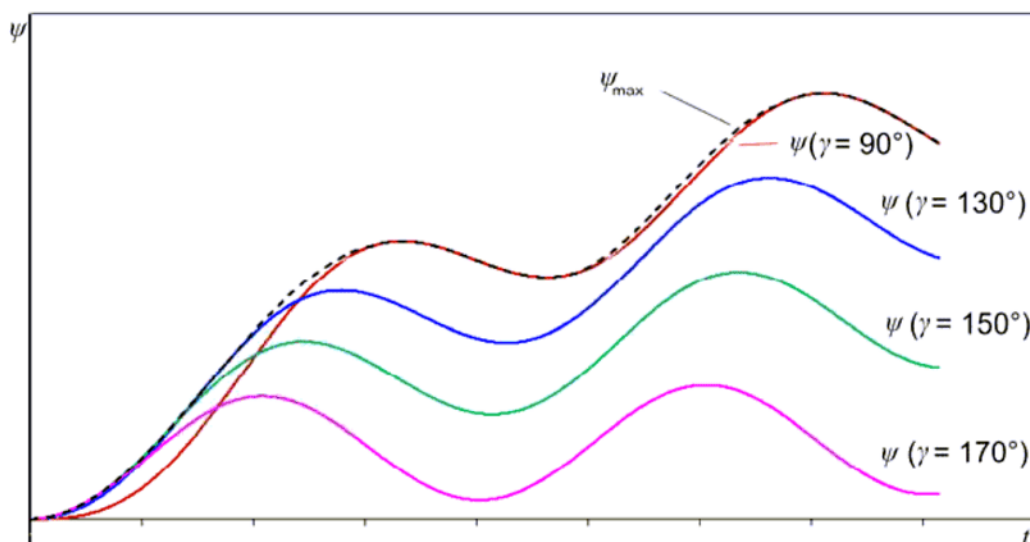
- a) Der rote tritt mit einem Fehlereinsatzwinkel von $\gamma = 90^\circ$ auf, was zum maximalen Scheitelstrom und zum maximalen Scheitelwert des verketteten Sekundärflusses für eine lange t'_{al} führt (Bild 11).
- b) Der blaue tritt mit $\gamma = 140^\circ$ auf, was zu einer geringeren Unsymmetrie führt. Solche Fälle sind wichtig für eine kurze t'_{al} , weil der Strom und der Fluss während der ersten Halbperiode vorübergehend größer als im Fall mit $\gamma = 90^\circ$ sind.



Legende

f	Frequenz
T_p	festgelegte primäre Zeitkonstante
γ	Fehlereinsatzwinkel
i_{sc}	Momentanwert eines primären Kurzschlussstroms
$i_{sc,d.c.}$	Gleichstromkomponente des Momentanwertes eines primären Kurzschlussstroms
t	Zeit

Bild 10 – Kurzschlussstrom für zwei unterschiedliche Fehlereinsatzwinkel



Legende

t	Zeit
γ	Fehlereinsatzwinkel
ψ	verketteter Sekundärfluss
ψ_{max}	maximal möglicher Wert des Flusses zu einem gegebenen Zeitpunkt unter Berücksichtigung aller Fehlereinsatzwinkel γ in einem definierten Bereich

Bild 11 – ψ_{max} als Kurve der maximalen Flusswerte

Es ist einfacher, die Gleichungen in den Berechnungen, die in 6.1.2 und 6.1.3 beschrieben werden, mit einem Software-Werkzeug zu bewerten und darzustellen. Für die komplexeren Gleichungen wird in [Anhang A](#) der Programmcode angegeben.

6.1.2 Fehlereinsatzwinkel

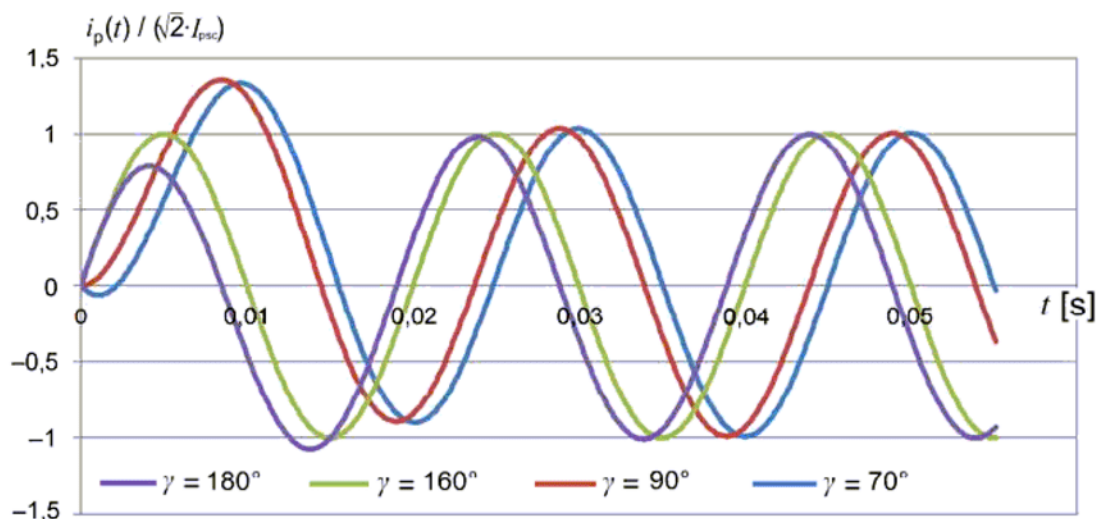
In Tabelle 1 sind die vier maßgeblichen Fälle des Kurzschlussstrom-Einsatzwinkels dargestellt, wobei die Beschreibung hier nur für die positive Strompolarität erfolgt. Die negative Polarität tritt durch Umkehrung der Werte am Ursprung auf; alle Winkel erhöht um 180° .

Tabelle 1 – Vier maßgebliche Fälle des Kurzschlussstrom-Einsatzwinkels

Fallnr.	Bedeutung	θ -Bedingung	Entsprechende γ -Bedingung	Beispiel für $\varphi = 70^\circ$ (Bild 12)
1	maximale Gleichstromkomponente	$\theta = 0^\circ$	$\gamma = \varphi$	$\gamma = 70^\circ$
2	maximaler Scheitelwert des Kurzschlussstroms: $i_p = \sqrt{2} \cdot K \cdot I_{psc}$ Einsetzen des Fehlers beim Spannungsnulldurchgang	$\theta = 90^\circ - \varphi$	$\gamma = 90^\circ$	$\gamma = 90^\circ$
3	keine Gleichstromkomponente	$\theta = 90^\circ$	$\gamma = 90^\circ + \varphi$	$\gamma = 160^\circ$
4	Einsetzen des Fehlers beim Spannungsmaximum	$\theta = 180^\circ - \varphi$	$\gamma = 180^\circ$	$\gamma = 180^\circ$

Fall 4 ist der Fall, in dem der Anfangsfluss am stärksten ansteigt, und damit der ungünstigste Fall für sehr niedrige Werte von t'_{al} .

In Bild 12 sind die Stromverläufe der 4 Fälle dargestellt. Es wurde ein extrem kleiner Phasenwinkel φ der Kurzschlussimpedanz des Netzes gewählt, um die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fällen aufzuzeigen.



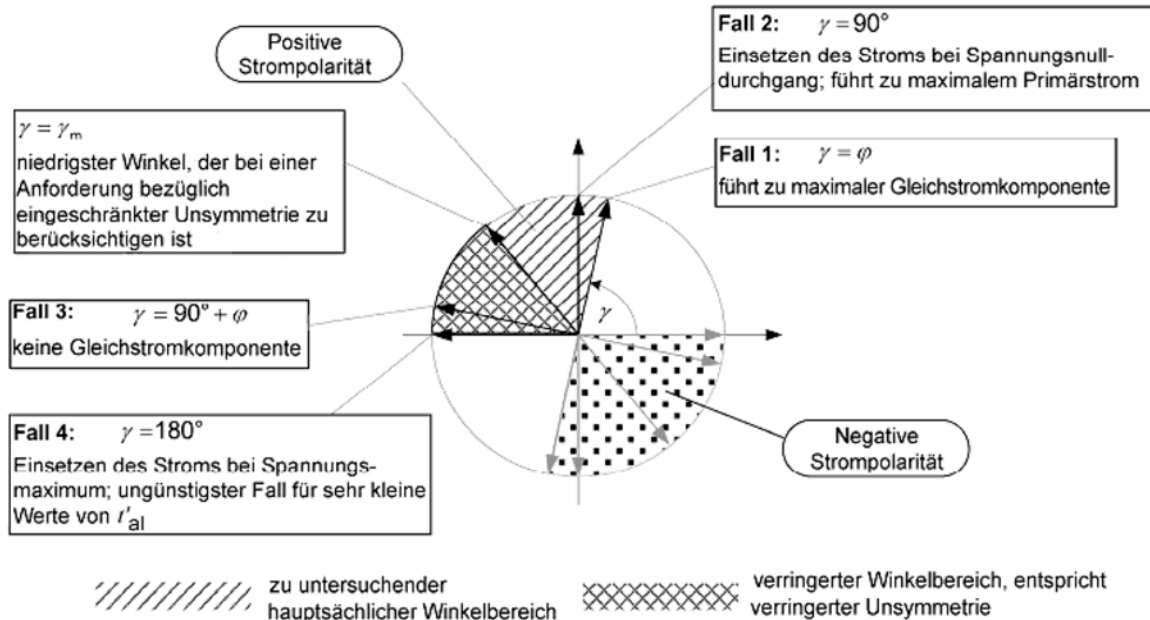
Legende

- i_p Primärstrom
- I_{psc} primärer Bemessungs-Kurzschlussstrom
- t Zeit
- γ Fehlereinsatzwinkel

Bild 12 – Kurvenverläufe des Primärstroms für die 4 Fälle bei 50 Hz und $\varphi = 70^\circ$

In Bild 13 sind die vier Fälle in einem Polardiagramm dargestellt.

γ_m ist der niedrigste Wert von γ , der beim Entwurf des Stromwandlers zu berücksichtigen ist. Die mögliche Begrenzung des Bereichs des Stromeinsetzwinkels wird in 6.1.4 diskutiert.



Legende

- γ_m niedrigster Fehlereinsetzwinkel, der im Falle einer Anforderung bezüglich eingeschränkter Unsymmetrie zu berücksichtigen ist
- t'_{al} festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze im ersten Stromfluss
- γ Fehlereinsetzwinkel
- φ Phasenwinkel der Kurzschlussimpedanz des Netzes

Bild 13 – Vier maßgebliche Fälle der Kurzschlussströme mit den Auswirkungen auf die magnetische Sättigung des Stromwandlers

6.1.3 Transientenfaktor K_{tf} und transienter Dimensionierungsfaktor K_{td}

6.1.3.1 Allgemeines

Der transiente Dimensionierungsfaktor K_{td} ist der endgültige Parameter für den Entwurf des Kerns und wird auf dem Leistungsschild angegeben. Er kann aus verschiedenen Funktionen des Transientenfaktors K_{tf} berechnet werden, wie in den nachfolgenden Gleichungen angegeben und in Bild 14 dargestellt.

In 6.1.3 wird die Bestimmung des transienten Dimensionierungsfaktors K_{td} unter der Bedingung diskutiert, dass jeder Fehlereinsetzwinkel γ auftreten kann. In einigen Spezialfällen führt ein verringerter Bereich des Fehlereinsetzwinkels (ausgedrückt durch γ_m) gegebenenfalls zu einem geringeren Faktor K_{td} (siehe 6.1.4).

6.1.3.2 Gleichungen für K_{tf}

Der in diesem Unterabschnitt angegebene Transientenfaktor K_{tf} wird abgeleitet aus der Differenzialgleichung der Ersatzschaltung (Bild 3) mit der konstanten Induktivität L_{ct} des Stromwandlerskerns, mit ohmscher Bürde und ohne Berücksichtigung von Hysterese, Verlusten und Remanenz. Mit der exakten Lösung $i_e(t)$ der Differenzialgleichung wird der Transientenfaktor $K_{tf}(t)$ aus dem Magnetflussverhältnis gewonnen:

$$K_{\text{tf}}(t) = \frac{\psi(t)}{\hat{\psi}_{\text{sc}}} = \frac{L_{\text{ct}} i_{\text{e}}(t)}{\hat{\psi}_{\text{sc}}} \quad (8)$$

Dabei ist

$\hat{\psi}_{\text{sc}}$ der Scheitelwert der Wechselstromkomponente des Flusses während des Kurzschlusses;

L_{ct} die linearisierte Induktivität (siehe Bild 6).

Ähnlich wie der magnetische Fluss hängt auch K_{tf} von der Zeit und letztendlich von der Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze t'_{al} ab, die vom Schutzsystem gefordert wird. Bei der Berechnung mit der linearen Induktivität ist die Lösung nur bis zur ersten Sättigung des Stromwandlers gültig.

Die Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze t'_{al} ist streng genommen der einzige physikalische Parameter, der als eine Übergangsstelle zwischen dem Schutzrelais und dem Stromwandler wirkt; er ist entscheidend für den ordnungsgemäßen und stabilen Betrieb des Relais. In vielen Fällen wird unabhängig von vielen weiteren physikalischen Parametern angenommen, dass t'_{al} konstant ist. Jedoch kann das Schutzsystem aufgrund komplexer Algorithmen und Funktionen in bestimmten Fällen eine t'_{al} erfordern, welche nicht konstant ist und welche von verschiedenen Parametern des Kurzschlussstroms abhängt. Deshalb kann der transiente Dimensionierungsfaktor K_{td} auch direkt vom Hersteller des Schutzsystems entsprechend den in diesem Technischen Bericht beschriebenen physikalischen Grundlagen geprüft und definiert werden. Logischerweise ist dann der Hersteller des Schutzsystems verantwortlich für das einwandfreie Funktionieren des Schutzes.

Der Istwert des transienten K_{tf} mit Wechselstromkomponente ist

$$K_{\text{tf}}(t) = \omega T_{\text{s}} \left[\frac{e^{-t/T_{\text{s}}}}{T_{\text{p}} - T_{\text{s}}} \left(\cos(\theta) T_{\text{p}} e^{(t/T_{\text{s}} - t/T_{\text{p}})} + \frac{\omega T_{\text{s}} \sin(\theta) (T_{\text{p}} - T_{\text{s}}) - T_{\text{s}} \cos(\theta) (1 + \omega^2 T_{\text{s}} T_{\text{p}})}{1 + \omega^2 T_{\text{s}}^2} \right) - \frac{\omega T_{\text{s}} \sin(\omega t + \theta) + \cos(\omega t + \theta)}{1 + \omega^2 T_{\text{s}}^2} \right] \quad (9)$$

Eine vereinfachte Gleichung für K_{tf} lautet wie folgt:

$$K_{\text{tf}}(t) = \frac{\omega T_{\text{s}} T_{\text{p}}}{T_{\text{p}} - T_{\text{s}}} \cos(\theta) \left(e^{-t/T_{\text{p}}} - e^{-t/T_{\text{s}}} \right) + \sin(\theta) e^{-t/T_{\text{s}}} - \sin(\omega t + \theta) \quad (10)$$

Bei extrem kleinen Parametern von T_{p} , T_{s} , und t'_{al} ist der Wert von K_{tf} nach Gleichung (10) kleiner als der nach Gleichung (9) und deshalb nicht sicher.

Bei $\theta = 0$ (entspricht $\gamma = \varphi$) führt Gleichung (10) zu der bekannten Gleichung aus der früheren IEC 60044-6, die hier aus Gründen der Rückwärtskompatibilität angegeben wird (mit Index „dc“):

$$K_{\text{tf, dc}}(t) = K_{\text{tf}}(\theta = 0^\circ) = \frac{\omega T_{\text{p}} T_{\text{s}}}{T_{\text{p}} - T_{\text{s}}} \left(e^{-t/T_{\text{p}}} - e^{-t/T_{\text{s}}} \right) - \sin(\omega t) \quad (11)$$

Bei der Berechnung des für Entwurfszwecke benötigten Transientenfaktors wird Gleichung (9) durch die Annahme der ungünstigsten Bedingung $\sin(\omega t) = -1$ modifiziert. Ergebnis ist die Hüllkurve K_{tfp} für Scheitelwerte des Transientenfaktors.

$$K_{\text{tfp}}(t) = \omega T_s \left[\frac{e^{-t/T_s}}{T_p - T_s} \left(\cos(\theta) T_p e^{(t/T_s - t/T_p)} + \frac{\omega T_s \sin(\theta) (T_p - T_s) - T_s \cos(\theta) (1 + \omega^2 T_s T_p)}{1 + \omega^2 T_s^2} \right) + \frac{1 + \omega T_s}{1 + \omega^2 T_s^2} \right] \quad (12)$$

Eine vereinfachte Gleichung wird mit Gleichung (13) angegeben:

$$K_{\text{tfp}}(t) = \frac{\omega T_s T_p}{T_p - T_s} \cos(\theta) \left(e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s} \right) + \sin(\theta) e^{-t/T_s} + 1 \quad (13)$$

Bei $\theta = 0$ ergibt sich die Gleichung für K_{td} aus IEC 60044-6, jetzt angegeben als $K_{\text{tfp,dc}}$ (siehe Gleichung (14)):

$$K_{\text{tfp,dc}}(t) = \frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-t/T_p} - e^{-t/T_s} \right) + 1 \quad (14)$$

Die Maximalwerte treten zum Zeitpunkt $t = t_{\text{tfp,max}}$ (siehe Gleichung (15)) und $t = t_{\text{tfp,dc,max}}$ (siehe Gleichung (16)) auf:

$$t_{\text{tfp,max}} = \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \ln \frac{\frac{T_p}{T_s} \cos(\theta) + \frac{T_s - T_p}{\omega T_s^2} \sin(\theta)}{\cos(\theta)} \quad (15)$$

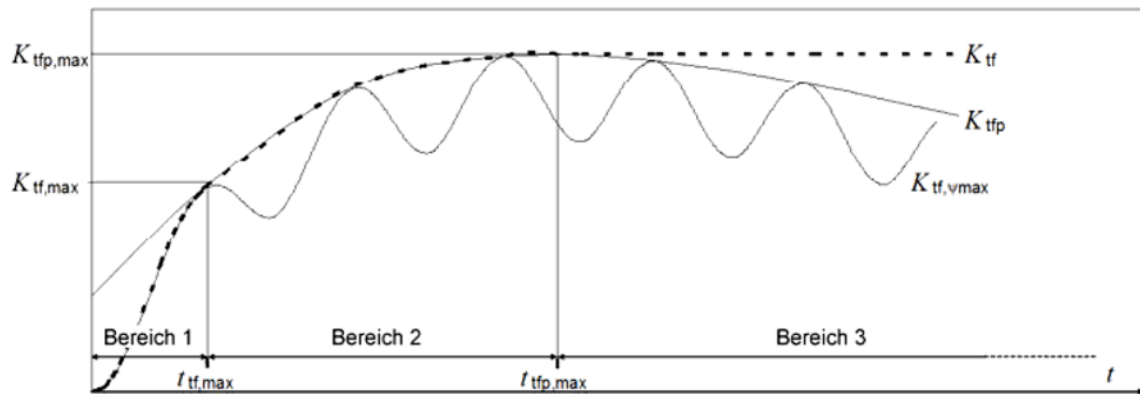
$$t_{\text{tfp,dc,max}} = \frac{T_p T_s}{T_p - T_s} \ln \frac{T_p}{T_s} \quad (16)$$

Die entsprechenden Werte $K_{\text{tfp,max}}$ und $K_{\text{tfp,dc,max}}$ sind in den Gleichungen (17) und (18) angegeben als

$$K_{\text{tfp,max}} = \left(\omega T_p \cos(\theta) + \frac{T_p + T_s}{T_s} \sin(\theta) \right) \cdot \left[\frac{\frac{T_p}{T_s} \cos(\theta) + \frac{T_s - T_p}{\omega T_s^2} \sin(\theta)}{\cos(\theta)} \right]^{\frac{T_p}{T_s - T_p}} + 1 \quad (17)$$

$$K_{\text{tfp,dc,max}} = \omega T_p \left(\frac{T_p}{T_s} \right)^{\frac{T_p}{T_s - T_p}} + 1 \quad (18)$$

Der Kurvenverlauf $K_{\text{tf}, \psi_{\text{max}}}$ wird in Bild 14 als „Gesamttransientenfaktor“ angegeben, also als Transientenfaktor, der alle festgelegten Stromeinsetzwinkel betrifft. Er wird als der Kurvenverlauf $\psi_{\text{max}}(t)$ (Bild 11) geteilt durch den Scheitelwert des stationären Flusses $\hat{\psi}_{\text{sc}}$ (Bild 9) definiert. Das Verhalten der oberen Hüllkurve K_{tfp} des Kurvenverlaufs $K_{\text{tf}, \psi_{\text{max}}}$ führt zu der Definition von drei Zeitbereichen, die in 6.1.3.3 bis 6.1.3.5 beschrieben werden.

**Legende**

$K_{tf, \psi \max}$	Gesamttransientenfaktor
K_{tfp}	Hüllkurve des Kurvenverlaufs $K_{tf, \psi \max}(t)$
$K_{tfp, \max}$	Maximum des Kurvenverlaufs $K_{tfp}(t)$
$K_{tf, \max}$	Wert von K_{tf} , bei dem der Kurvenverlauf $K_{tf, \psi \max}(t)$ seine Hüllkurve $K_{tfp}(t)$ zum ersten Mal berührt
K_{tf}	resultierender Transientenfaktor, abhängig von der erforderlichen sättigungsfreien Zeit
t	Zeit
$t_{tf, \max}$	Zeitpunkt, an dem der Kurvenverlauf $K_{tf, \psi \max}(t)$ seine Hüllkurve $K_{tfp}(t)$ zum ersten Mal berührt
$t_{tfp, \max}$	Zeitpunkt, an dem der Wert von K_{tfp} am größten ist

Bild 14 – Maßgebliche Zeitbereiche für die Berechnung des Transientenfaktors**6.1.3.3 Bereich 1: $0 \leq t'_{al} \leq t_{tf, \max}$**

$t_{tf, \max}$ ist der Zeitpunkt, an dem der Kurvenverlauf $K_{tf}(t)$ die Hüllkurve $K_{tfp}(t)$ zum ersten Mal berührt (siehe Bild 14).

An diesem Punkt ist die folgende Bedingung erfüllt:

$$\sin(\omega t_{tf, \max} + \gamma) = -1$$

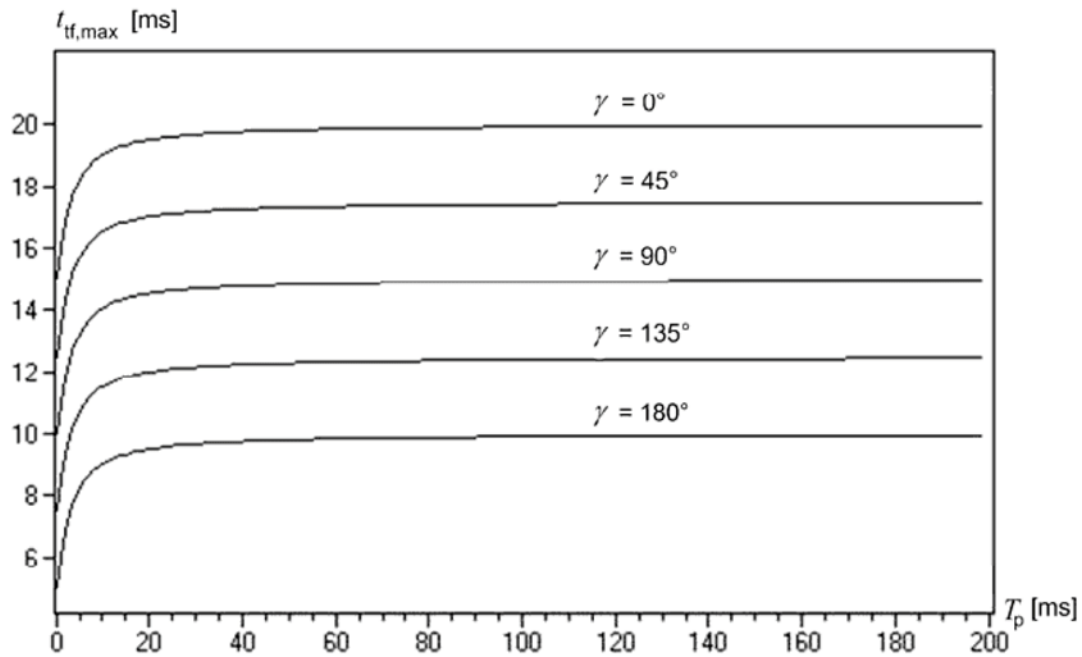
Diese Gleichung ist äquivalent zu

$$t_{tf, \max} = \frac{3\pi/2 - \gamma +}{\omega} \quad (19)$$

Dabei ist

$$= \arctan(\omega T_p).$$

In Bild 15 ist $t_{tf, \max}$ in Abhängigkeit von der primären Zeitkonstante T_p bei mehreren Fehlereinschaltwinkeln γ aufgetragen. Bei den in der üblichen Praxis auftretenden höheren Werten von T_p ist $t_{tf, \max}$ praktisch konstant.



Legende

- $t_{tf,max}$ Zeitpunkt, an dem der Kurvenverlauf $K_{tf,\psi_{max}}(t)$ seine Hüllkurve $K_{tfp}(t)$ zum ersten Mal berührt
 T_p festgelegte primäre Zeitkonstante
 γ Fehlereinsatzwinkel

Bild 15 – Auftreten des ersten Scheitelwertes des Flusses in Abhängigkeit von T_p bei 50 Hz

Für jede t'_{al} gibt es einen bestimmten ungünstigsten Winkel $\theta(t'_{al})$, der zum maximalen Fluss $\psi_{max}(t'_{al})$ bei der Zeit t'_{al} führt.

Dieser Winkel kann durch Berechnung des Extremwertes von K_{tf} in Gleichung (9) oder Gleichung (10) für $t = t'_{al}$ mit θ als der abhängigen Variablen bestimmt werden. Dies definiert den Winkel $\theta_{tf,\psi_{max}}$ und den entsprechenden Fehlereinsatzwinkel $\gamma_{tf,\psi_{max}}$:

$$\theta_{tf,\psi_{max}} = \arctan \frac{Y}{X} \quad (20)$$

Dabei ist

$$Y = \omega T_s - e^{t/T_s} \left[\omega T_s \cos(\omega t) - \sin(\omega t) \right]$$

$$X = \frac{1}{T_p - T_s} \left[T_p \left(1 + \omega^2 T_s^2 \right) e^{(t/T_s - t/T_p)} - T_s \left(1 + \omega^2 T_s T_p \right) \right] - e^{t/T_s} \left[\cos(\omega t) + \omega T_s \sin(\omega t) \right]$$

und

$$\gamma_{tf,\psi_{max}} = \theta_{tf,\psi_{max}} + \varphi \quad (21)$$

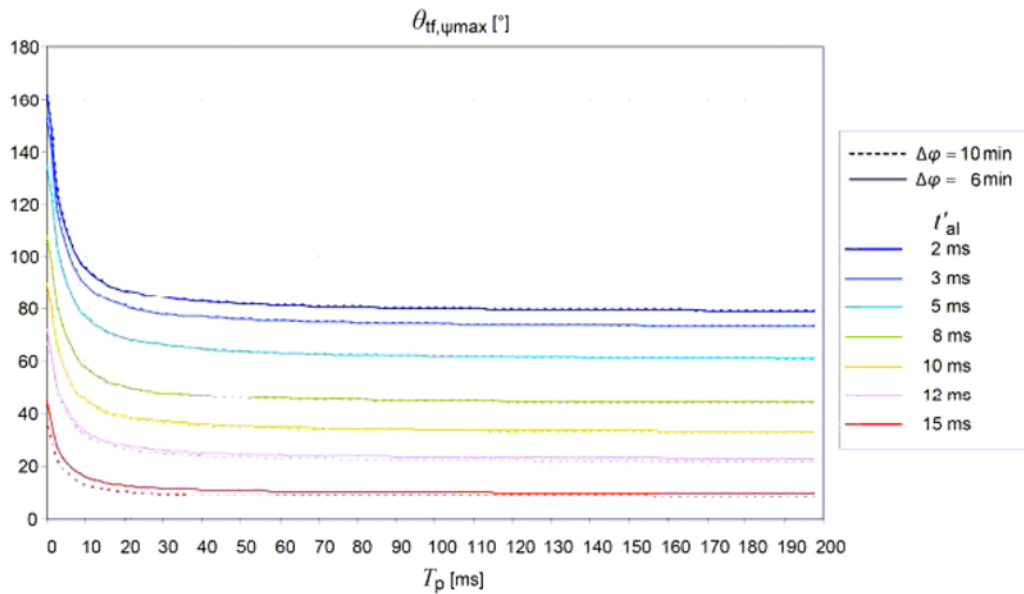
Die Arkustangens-Normalfunktion liefert nur Ergebnisse für $-\pi/2 < \theta < \pi/2$. Ergebnisse für Winkel $|\theta| > \pi/2$ (siehe Bild 16, Bild 17 und Bild 18) können mit einer Arkustangens-Funktion ermittelt werden, die alle vier Quadranten berücksichtigt. In vielen mathematischen Softwarepaketen ist eine derartige Funktion als $\theta = \arctan2(x,y)$ enthalten, wobei x und y Koordinaten sind.

Durch Einführung dieses Winkels in Gleichung (9) oder Gleichung (10) ergibt sich der maximale Dimensionierungsfaktor für den Stromwandler für die festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze t'_{al} .

$$K_{tf,\psi_{\max}} = K_{tf}(t'_{al}, \theta_{tf,\psi_{\max}}) \quad (22)$$

In Bild 16 wird der Winkel $\theta_{tf,\psi_{\max}}$ in Abhängigkeit von der primären Zeitkonstante T_p aufgetragen, und zwar für mehrere Werte von t'_{al} und für zwei extreme Fälle von T_s , wobei sich die Beziehung zwischen T_s und dem Fehlwinkel $\Delta\varphi$ ergibt aus:

$$T_s [s] = \frac{3438}{2\pi \cdot 50 [\text{Hz}] \cdot \Delta\varphi [\text{min}]}$$



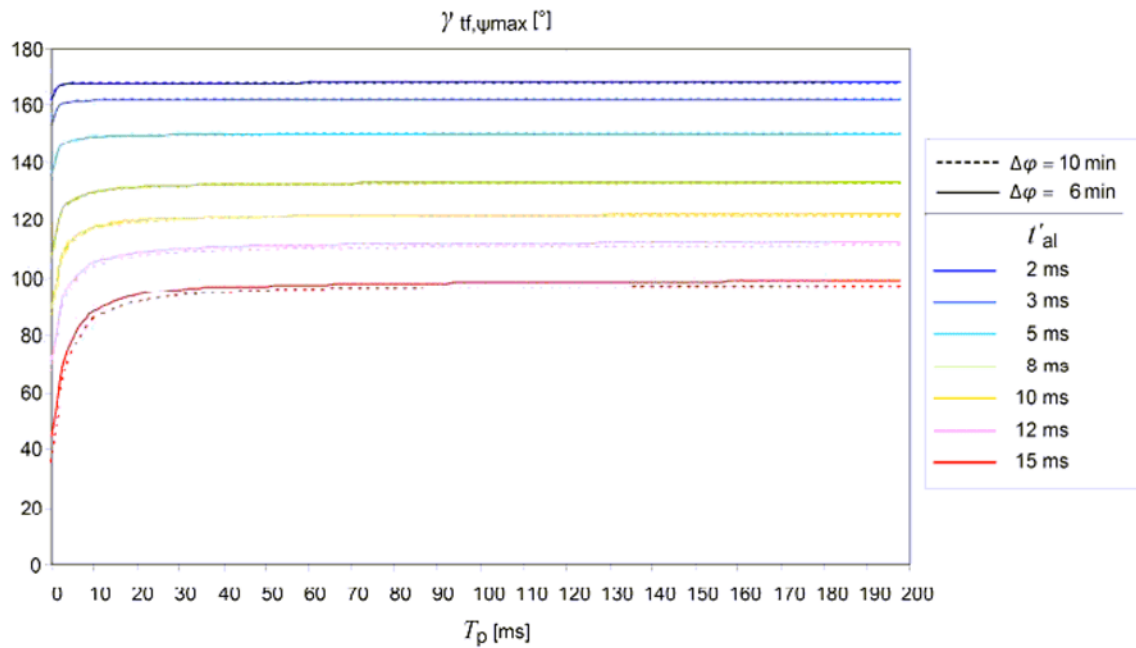
Legende

- T_p festgelegte primäre Zeitkonstante
- t'_{al} festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze im ersten Stromfluss
- $\Delta\varphi$ Fehlwinkel
- $\theta_{tf,\psi_{\max}}$ ungünstigster Fehlereinsatzwinkel (alternative Definition), der zu dem maximalen Fluss bei der Zeit t'_{al} führt

Bild 16 – Ungünstigster Winkel $\theta_{tf,\psi_{\max}}$ als Funktion von T_p und t'_{al}

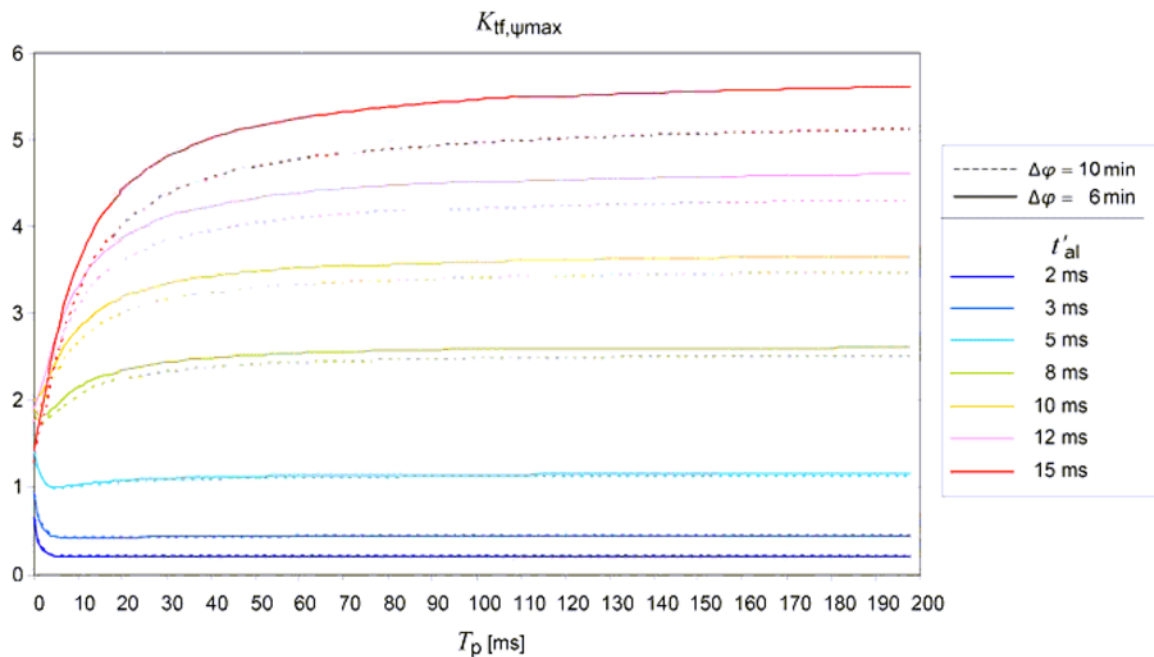
In Bild 17 wurde $\theta_{tf,\psi_{\max}}$ durch $\gamma_{tf,\psi_{\max}}$ ersetzt, siehe Gleichung (21).

Die entsprechenden Werte von $K_{tf,\psi_{\max}}$ werden in Bild 18 angegeben.

**Legende**

- T_p festgelegte primäre Zeitkonstante
 t'_{al} festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze im ersten Stromfluss
 $\gamma'_{tf, \psi_{max}}$ ungünstigster Fehlereinsatzwinkel, der zu dem maximalen Fluss bei der Zeit t'_{al} führt
 $\Delta\phi$ Fehlwinkel

Bild 17 – Ungünstigster Fehlereinsatzwinkel $\gamma'_{tf, \psi_{max}}$ als Funktion von T_p und t'_{al}

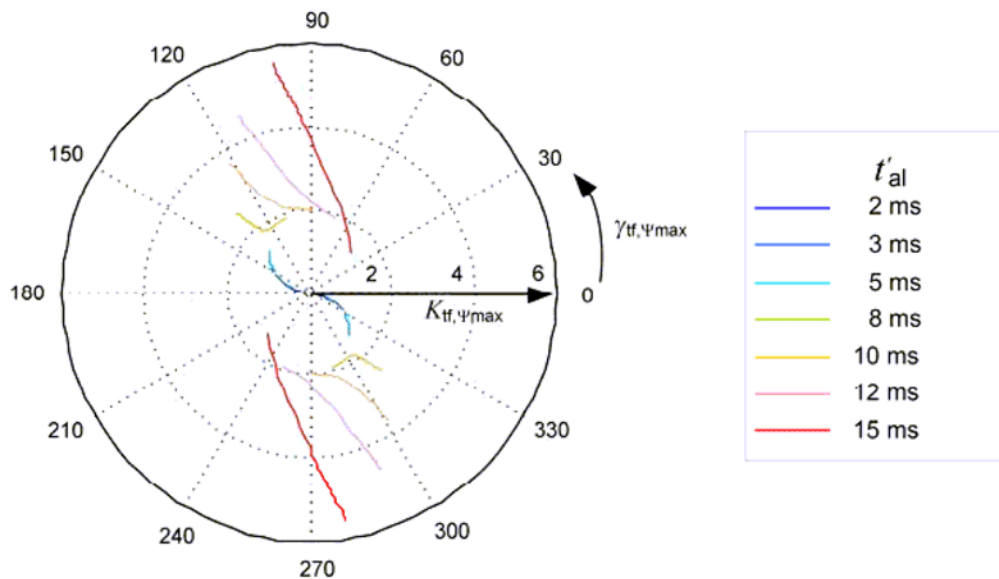
**Legende**

- $K_{tf,\psi_{max}}$ Gesamttransientenfaktor, siehe Bild 14
 T_p festgelegte primäre Zeitkonstante
 t'_{al} festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze im ersten Stromfluss
 $\Delta\phi$ Fehlwinkel

Bild 18 – $K_{tf,\psi_{max}}$ berechnet mit dem ungünstigsten Fehlereinsatzwinkel $\theta_{\psi_{max}}$

In Bild 18 laufen einige der Kurvenverläufe bei einer sehr kleinen primären Zeitkonstante T_p zusammen, jedoch gehören einige Werte dieser Kurvenverläufe nicht in den Zeitbereich 1, sondern in den Zeitbereich 2. Dieser Einfluss wird in Bild 20 korrigiert und beseitigt.

Zum besseren Verständnis werden $K_{tf,\psi_{max}}$ und $\gamma_{tf,\psi_{max}}$ mit T_p als Parameter in einem Polardiagramm (Bild 19) ähnlich dem Diagramm in Bild 13 dargestellt.



Legende

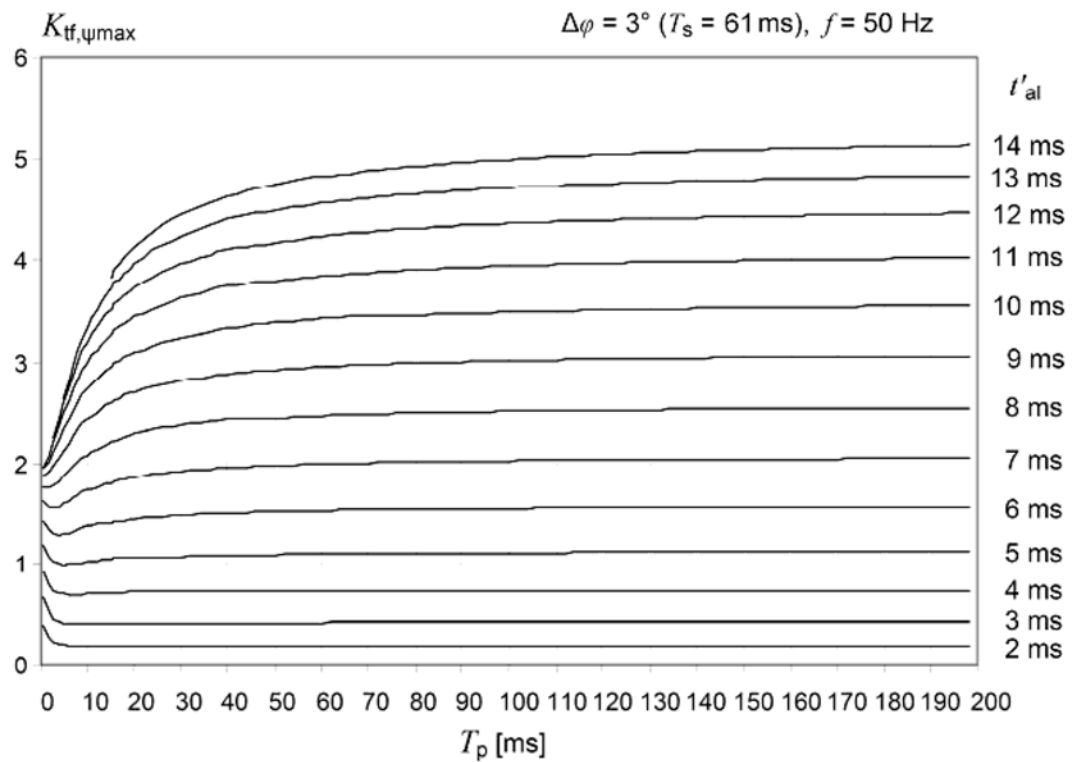
- $K_{tf, \psi_{max}}$ Gesamttransientenfaktor, siehe Bild 14
 $\gamma_{tf, \psi_{max}}$ ungünstigster Fehlereinsatzwinkel, der zu dem maximalen Fluss bei der Zeit t'_{al} führt
 t'_{al} festgelegte Zeit bis zum Erreichen der Genauigkeitsgrenze im ersten Stromfluss

Bild 19 – Polardiagramm mit $K_{tf, \psi_{max}}$ und $\gamma_{tf, \psi_{max}}$

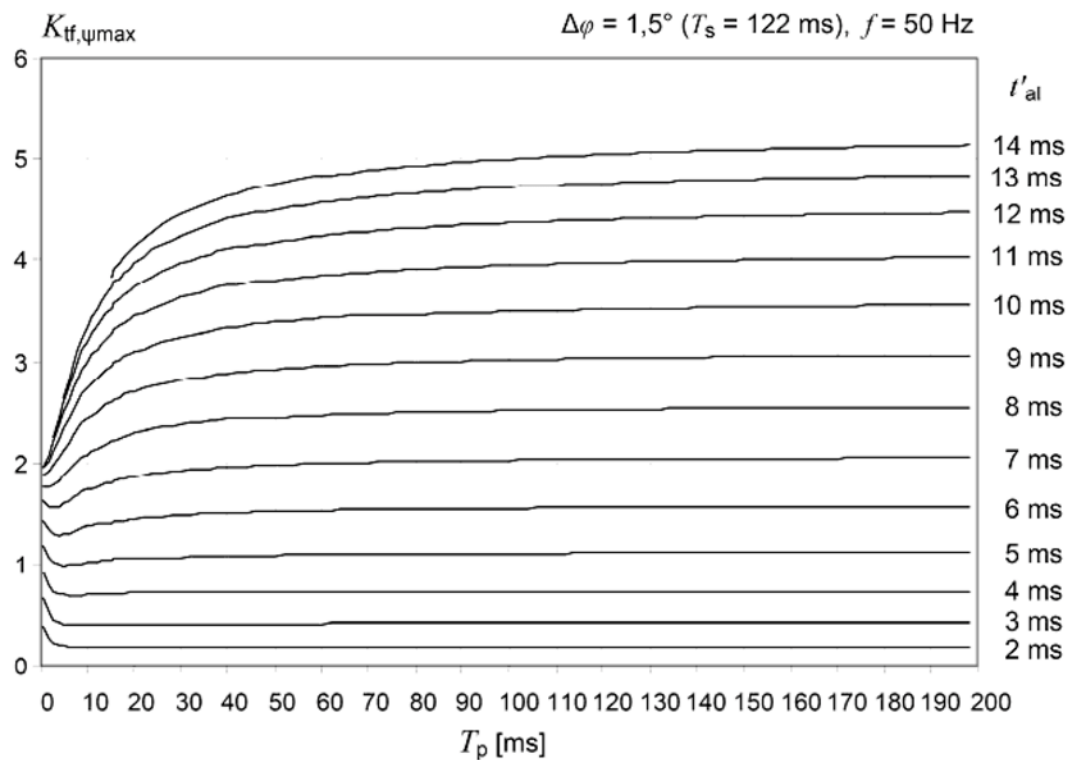
Aufgrund der Komplexität und der möglichen Fehler, die bei der täglichen Anwendung unterlaufen können, wird die Funktion $K_{tf, \psi_{max}} = K_{tf}(\gamma_{tf, \psi_{max}}(t'_{al}))$ in Bild 20 dargestellt als Kurvenverläufe für unterschiedliche t'_{al} und die sekundären Zeitkonstanten T_s werden als Funktion der primären Zeitkonstanten T_p für bestimmte Konfigurationen der sekundären Zeitkonstanten und der Frequenz aufgetragen.

Aufgrund der Komplexität der Beziehungen können in der täglichen Anwendung Fehler auftreten. Aus diesem Grund ist die Funktion $K_{tf, \psi_{max}}$ in Abhängigkeit von der primären Zeitkonstanten T_p in Bild 20 als Kurvenschar mit dem Gruppenparameter t'_{al} dargestellt.

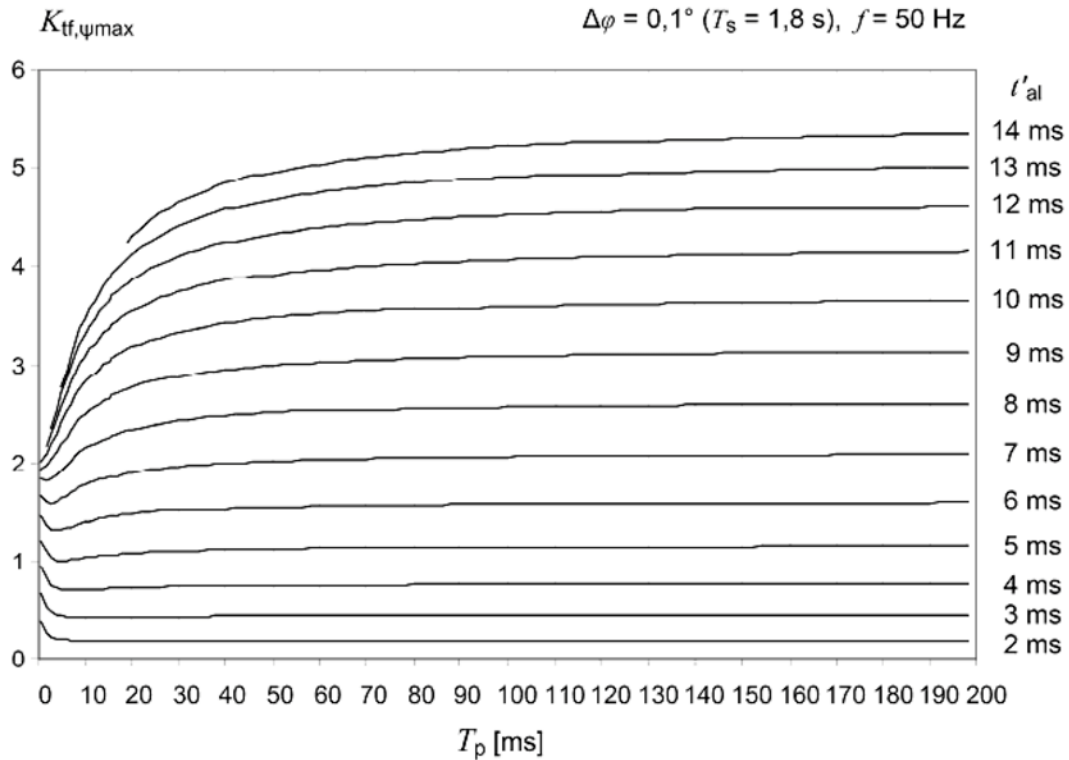
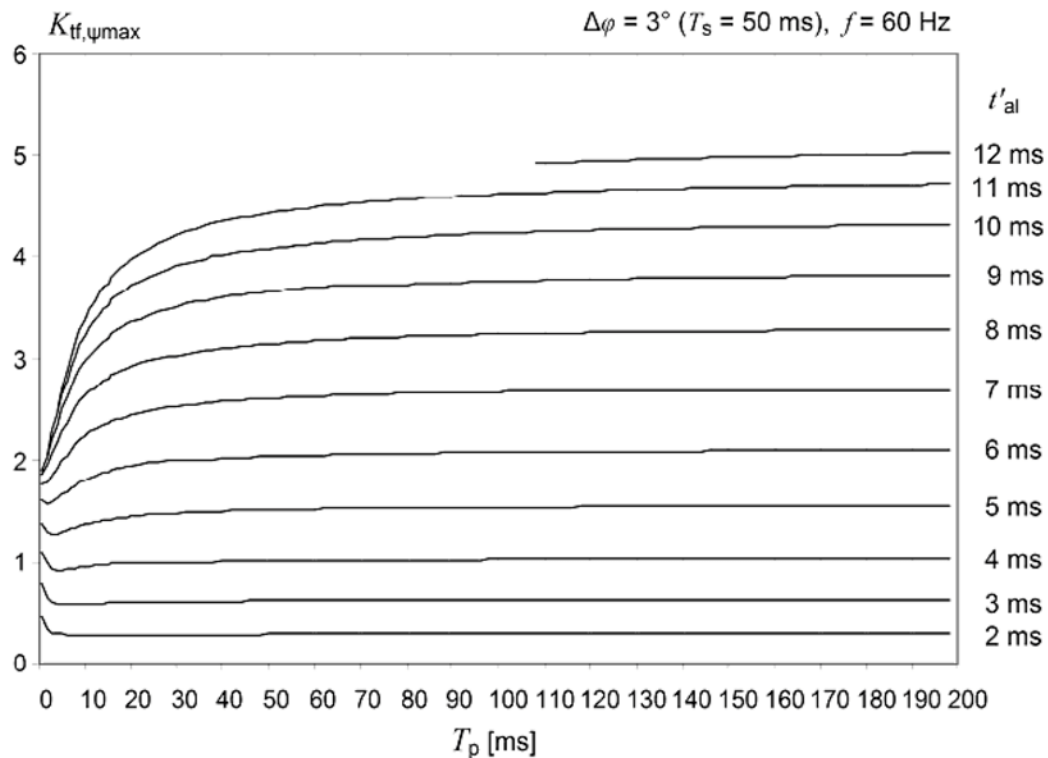
Die Teilbilder a) bis i) decken 3 Frequenzwerte und für jeden der Frequenzwerte 3 Werte der sekundären Zeitkonstanten T_s ab.

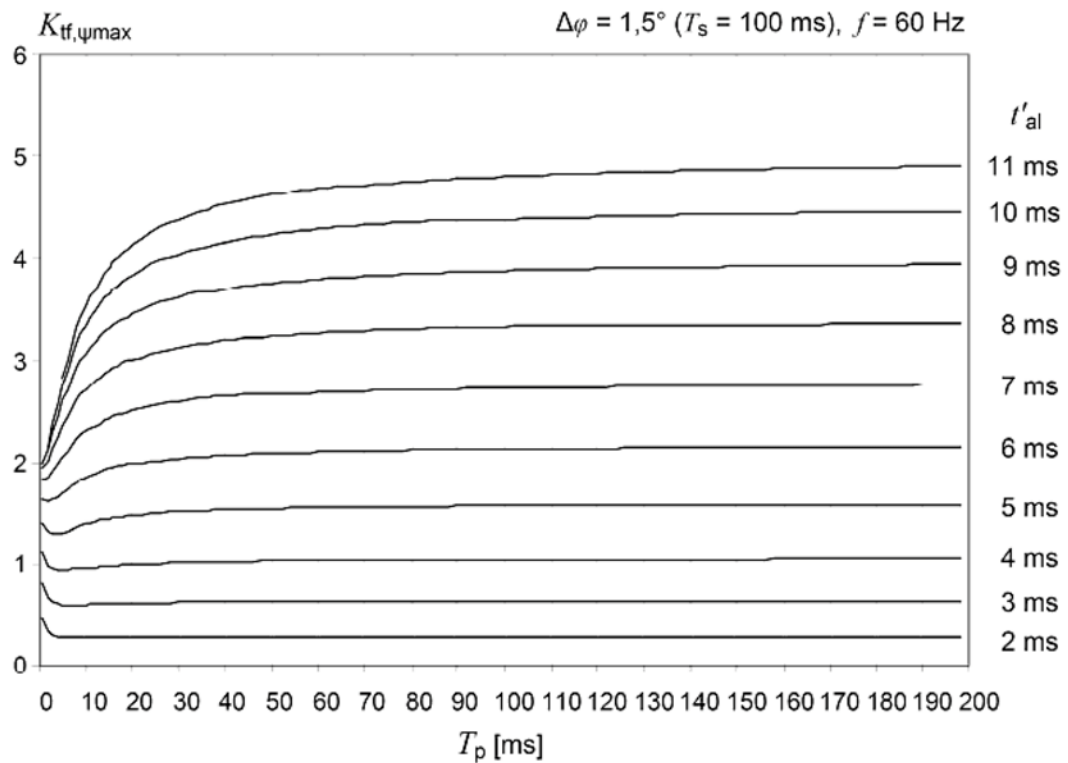


a) $T_s = 61 \text{ ms}$ bei 50 Hz

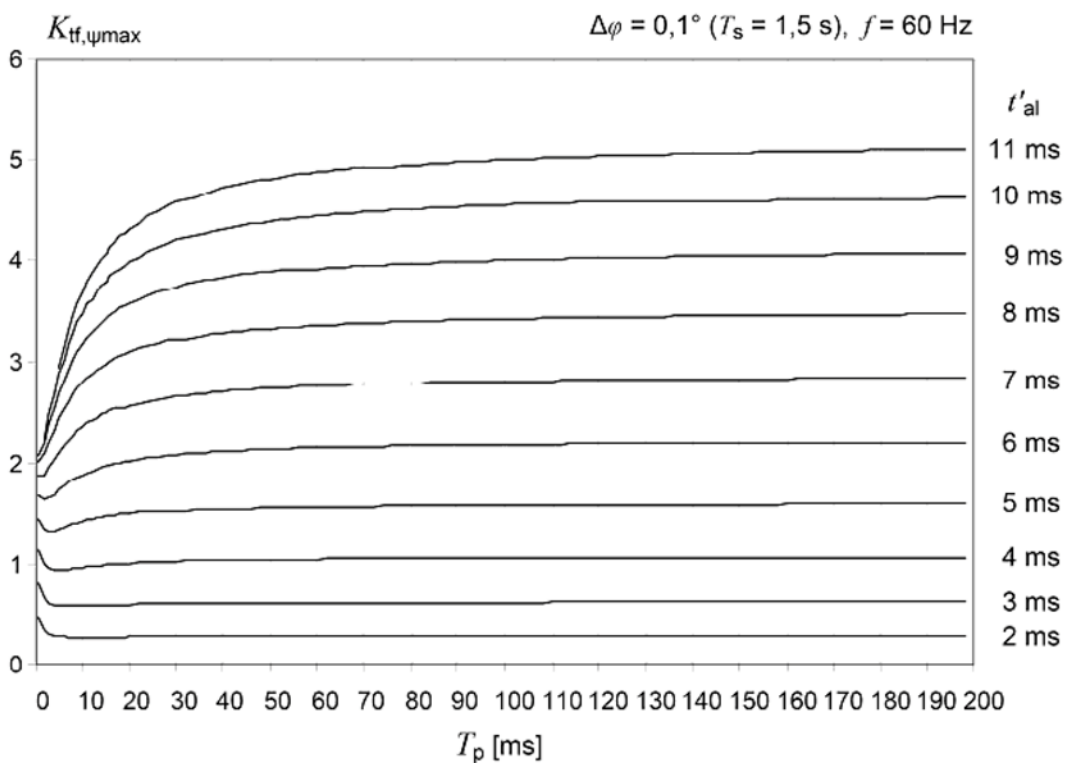


b) $T_s = 122 \text{ ms}$ bei 50 Hz

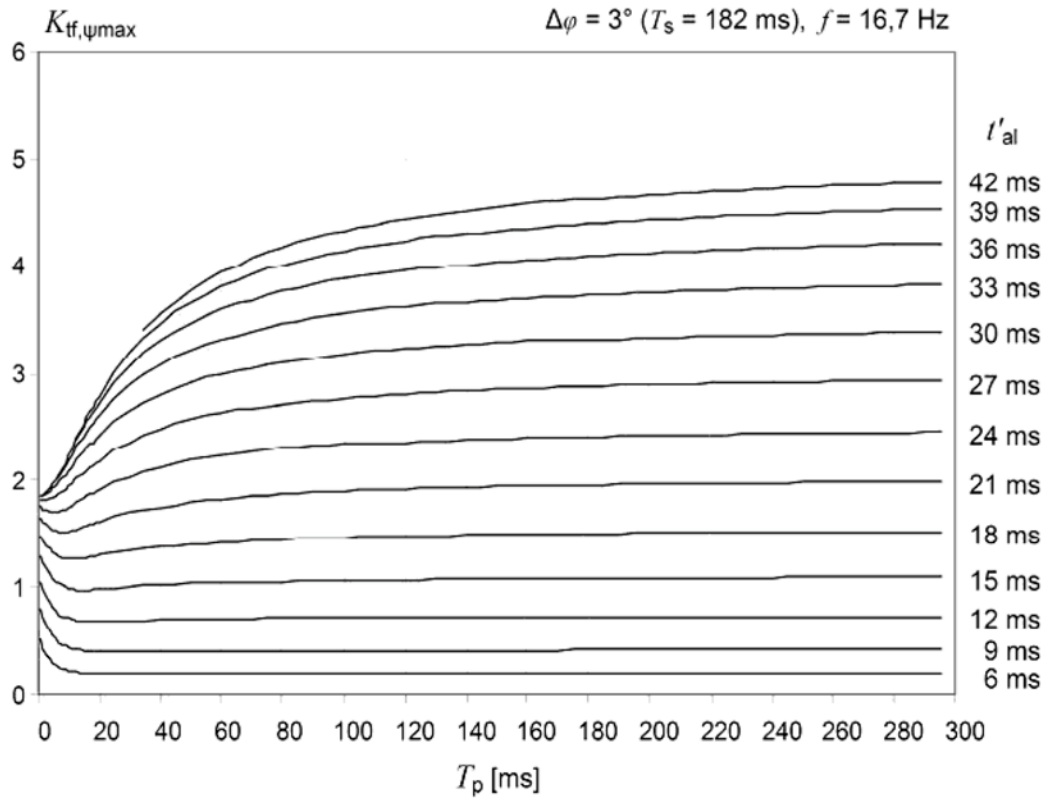
c) $T_s = 1,8$ s bei 50 Hzd) $T_s = 50$ ms bei 60 Hz



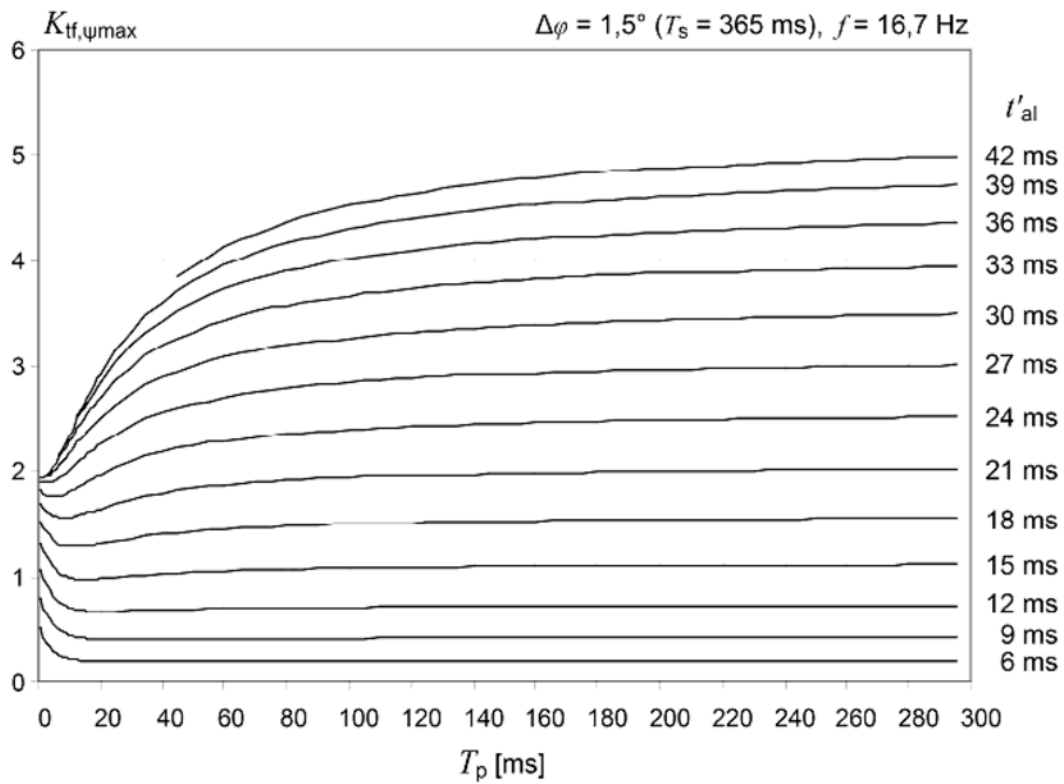
e) $T_s = 100$ ms bei 60 Hz



f) $T_s = 1,5$ s bei 60 Hz



g) $T_s = 182$ ms bei 16,7 Hz



h) $T_s = 365$ ms bei 16,7 Hz