

ISMAIL KASIKCI



Kurzschluss- stromberechnung in elektrischen Anlagen

**nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) –
Theorie, Vorschriften,
Praxis – Betriebsmittelparameter
und Rechenbeispiele**

6., durchgesehene Auflage

expert›

Kurzschlussstromberechnung in elektrischen Anlagen

Ismail Kasikci

Kurzschlussstromberechnung in elektrischen Anlagen

nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) –
Theorie, Vorschriften, Praxis –
Betriebsmittelparameter und Rechenbeispiele

6., durchgesehene Auflage

expert›

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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



© 2019 · expert verlag GmbH
Dischingerweg 5 · D-72070 Tübingen

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Alle Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erstellt. Fehler können dennoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Weder Verlag noch Autoren oder Herausgeber übernehmen deshalb eine Gewährleistung für die Korrektheit des Inhaltes und haften nicht für fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Internet: www.expertverlag.de
eMail: info@verlag.expert

Printed in Germany

ISBN 978-3-8169-3492-9 (Print)
ISBN 978-3-8169-8492-4 (ePDF)

Vorwort

Diese vorliegende 6. Auflage wurde noch einmal durchgesehen, insbesondere die Berechnung der Kurzschlussströme von Windkraftwerken auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators eingearbeitet und die Themen punktuell überarbeitet und dem neuesten Stand von Berechnungsnormen angepasst, in vielen Abschnitten erweitert und auch durch völlig neue Themen ergänzt.

Dieses Buch behandelt die Berechnungsmethoden von Kurzschlussströmen in elektrischen Drehstromnetzen. Die Norm **DIN EN 60909-0:2012-02** hat sich in der Praxis etabliert. Die rasche Entwicklung der regenerativen Energien und die elektrische Anlagenplanung zeigt sich auch in der Verbesserung und Ausarbeitung dieses Buches. Weitere Methoden zur Kurzschlussberechnung wie IEC 61363-1, IEEE 1584 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, NFPA 70E-2004 130.3, ANSI IEEE C37.010 und IEC 61660 sind ausführlich beschrieben und mit Beispielen vertieft. Die thermische Gefährdung von Störlichtbögen für den Schutz von Anlagen und Personen ist in das Buch neu aufgenommen worden.

Neue zahlreiche Beispiele aus der Praxis vertiefen die theoretischen Grundlagen. Viele Diagramme und Tabellen, die man zur Berechnung braucht, erleichtern die Anwendung der Normen und die Berechnung von Kurzschlussströmen und vermindern so den Zeitaufwand zur Projektierung von elektrischen Anlagen.

Das Buch ist ein wertvolles Hilfsmittel für Studenten an Universitäten und Hochschulen der Elektrotechnik, Elektroingenieure und Techniker aus der Industrie, dem Handwerk, Behörden, Netzbetreiber, Ingenieurbüros, Sachverständige, aus den Bereichen Netzschutz, Planung und Betrieb, Planer und Lehrkräfte. Das Buch ist jedoch kein Ersatz für die angegebenen und beschriebenen Normen. Im Zweifelsfall gelten die erwähnten Normen.

Literaturhinweise zur Berechnung der Kurzschlussströme ermöglichen es allen Lesern, die hier erworbenen Kenntnisse zu vertiefen. Ich danke den Firmen ABB Stotz und Siemens für die freundliche Unterstützung bei der Zusammenstellung von Unterlagen, Kennlinien, Schaltgerätedaten und -diagrammen.

Herrn Ulrich Sandten danke ich vom ganzen Herzen für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Veröffentlichung dieses Buches.

Ich danke an dieser Stelle allen Fachkollegen, die mich durch ihre Anregungen, jede Kritik, Vorschläge und Berichtigungen unterstützt haben.

Ich möchte an alle Leser dieses Buches eine Bitte richten: Jeder Vorschlag, Kritik und Anregung zur Anwendung dieses Buches ist willkommen.

Weinheim, im September 2019

Ismail Kasikci

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XI
Abkürzungen	XIV
Indizes	XV
Nebenzeichen	XV
Nationale und internationale Gremien	XV
1 Einleitung	1
2 Begriffe und Definitionen	7
3 Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstroms	9
4 Einteilung der Kurzschlussarten	13
5 Methoden zur Kurzschlussberechnung	15
5.1 Überlagerungsverfahren	15
5.2 Ersatzspannungsquelle	17
5.3 Berechnung mit Bezugsgrößen	20
6 Allgemeines zu DIN EN 60909-0 (VDE 0102)	23
7 Die Bedeutung von DIN EN 60909-0 (VDE 0102)	25
8 Versorgungsnetze	29
8.1 Berechnungsgrößen für Versorgungsnetze	29
8.2 Einseitig gespeiste Leitung	29
8.3 Strahlennetz	30
8.4 Ringnetz	31
8.5 Maschennetz	31
9 Netzformen bei der Kurzschlussstromberechnung	33
9.1 Netzformen für die Niederspannung	33
9.2 Netzformen für die Mittelspannung	35

9.3 Netzformen für die Hochspannung	39
10 Berechnung des Fehlerstroms in der Praxis	43
11 Umwandlung der Netzformen	49
11.1 Schaltungen	49
11.2 Einfach gespeistes Netz	50
11.3 Mehrfach gespeiste und vermaschte Netze	51
12 Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen	53
12.1 Systeme nach Art der Erdverbindung bis 1 kV	53
12.1.1 TN-System	53
12.1.2 TT-System	55
12.1.3 IT-System	57
12.2 Sternpunktbehandlung in Drehstromnetzen über 1 kV	58
12.2.1 Netze mit isoliertem, freiem Sternpunkt	59
12.2.2 Netze mit Erdschlusskompensation	61
12.2.3 Netze mit niederohmiger Sternpunktbehandlung	65
13 Komplexe Rechnung	69
13.1 Rechenregel für komplexe Zahlen	70
13.2 Komplexe Berechnung eines Wechselstromkreises	71
14 Symmetrische Komponenten	73
14.1 Methode der symmetrischen Komponenten	75
14.2 Symmetrierung und Entsymmetrierung	76
14.3 Impedanzen der symmetrischen Komponenten	81
15 Impedanzen von Drehstrom-Betriebsmitteln	85
15.1 Netzeinspeisungen	86
15.2 Generatoren	88
15.3 Transformatoren	93
15.4 Stelltransformatoren	98
15.5 Kabel und Freileitungen	100
15.6 Erdstromtiefe	104
15.7 Windkraftanlagen	115
15.7.1 Windkraftwerk mit Asynchrongenerator	116
15.7.2 Windkraftwerk mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator	117
15.7.3 Windkraft mit Vollumrichter	118
15.8 Asynchronmaschinen	118
15.9 Kurzschlussstrom-Begrenzungs-drosselspulen	120
15.10 Berücksichtigung von Kondensatoren und nichtrotierenden Lasten	122
15.11 Berücksichtigung von statischen Umrichtern	122
15.12 Übersicht der Betriebsmittelimpedanzen	123

16 Impedanzkorrekturen	125
16.1 Korrekturfaktor von Generatoren K_G	125
16.2 Kraftwerksblock K_{KW}	126
16.3 Korrekturfaktor für Transformatoren K_T	127
17 Berechnung der Kurzschlussströme	129
17.1 Dreipoliger Kurzschluss	129
17.2 Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung	131
17.3 Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung	132
17.4 Einpoliger Erdkurzschluss	134
17.5 Stoßkurzschlussstrom i_p	138
17.6 Ausschaltwechselstrom I_b	140
17.7 Dauerkurzschlussstrom I_k	143
18 Kurzschlüsse in Netzen	145
18.1 Unvermaschte Netze	145
18.2 Vermaschte Netze	146
19 Berücksichtigung von Motoren	147
19.1 Kurzschluss an den Klemmen eines Asynchronmotors	147
19.2 Motorengruppen eingespeist über Transformatoren	149
19.3 Motorengruppen, eingespeist über Transformatoren mit verschiedenen Nennspannungen	150
20 Kurzschlussstromfestigkeit	153
20.1 Mechanische Kurzschlussstromfestigkeit	153
20.2 Thermische Kurzschlussstromfestigkeit	156
20.3 Kurzschlussstrom-Begrenzung	158
21 Berechnungsgrößen für die Kurzschlussfestigkeit	163
21.1 Kurzschlussfestigkeit der MS-Schaltanlagen	163
21.2 Kurzschlussfestigkeit der NS-Schaltanlagen	164
22 Überstrom-Schutzeinrichtungen	167
22.1 Sicherungen	168
22.2 Leitungsschutzschalter	172
22.3 Leistungsschalter	173
23 Kurzschluss auf der NS-Seite eines Transformators	177
24 Kurzschlussströme in Gleichstromanlagen	183
24.1 Widerstände von Leitungsabschnitten	184
24.2 Stromrichter	186
24.3 Batterien	187
24.4 Kondensatoren	189
24.5 Gleichstrommotoren	190

25 Lastflussberechnung	193
25.1 Darstellung eines Energieversorgungsnetzes	193
25.2 Lastmodellierung	194
26 Weitere Methoden zur Kurzschlussberechnung	197
26.1 Kurzschlussberechnung nach IEC 61363-1	197
26.1.1 Netzgestaltung von Schiffen	197
26.1.2 Synchrongenerator	201
26.1.3 Asynchronmotor	203
26.1.4 Transformator	205
26.1.5 Leitungen	205
26.1.6 Systemberechnungen	205
26.1.7 Verfahren zur Kurzschlussberechnung	206
26.1.8 Auslegung und Anwendung der Ergebnisse	206
26.2 Kurzschlussberechnung nach ANSI IEEE-Norm C37.010	207
26.3 Kurzschlussberechnung nach IEC 61660	208
27 Störlichtbogen	211
27.1 Begriffe	212
27.2 Normen und Vorschriften	213
27.2.1 DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1)	213
27.2.2 DIN EN (IEC) 61439-1/2 (VDE 0660-600-1/2)	214
27.2.3 DIN VDE 0682-306-1-2:	216
27.2.4 Bestimmung der Parameter	216
27.2.5 Lichtbogenschutz	218
27.2.6 IEEE 1584 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Cal- culations	219
27.2.7 NFPA 70E-2004 130.3	223
28 Beispiele: Berechnung der Kurzschlussströme	225
28.1 Beispiel 1: Kenngrößen des Kurzschlussstroms	225
28.2 Beispiel 2: Einschaltvorgänge	226
28.3 Beispiel 3: Symmetrische Komponenten	227
28.4 Beispiel 4: Symmetrische Komponenten	228
28.5 Beispiel 5: Komplexe Rechnungen	228
28.6 Beispiel 6: Berechnung der Netzeinspeisung	229
28.7 Beispiel 7: Berechnung eines Generators	229
28.8 Beispiel 8: Berechnung eines Generators	230
28.9 Beispiel 9: Berechnung eines Transformators	233
28.10 Beispiel 10: Kurzschlussstromverlauf eines Transformators	234
28.11 Beispiel 11: Betrachtung der Netzimpedanz	235
28.12 Beispiel 12: Berechnung eines Motors	236
28.13 Beispiel 13: Berechnung eines Kabels	236
28.14 Beispiel 14: Berechnung einer Freileitung	237
28.15 Beispiel 15: Berechnung einer Freileitung	238
28.16 Beispiel 16: Sternpunktbehandlung	239

28.17	Beispiel 17:	
	Bestimmung der Erdungsleitung	239
28.18	Beispiel 18: Netzeinspeisung	241
28.19	Beispiel 19: Hausanschlusskasten	242
28.20	Beispiel 20: Nachweis der Schutzmaßnahmen	243
28.21	Beispiel 21: Anschluss eines Motors	246
28.22	Beispiel 22: Berechnung eines Abgangs	248
28.23	Beispiel 23: Berechnung einer Industrieanlage	250
28.24	Beispiel 24: Berechnung des dreipoligen Kurzschlussstroms	251
28.25	Beispiel 25: Berechnung einer Energieversorgung	253
28.26	Beispiel 26: Parallelschaltung von Transformatoren	256
28.27	Beispiel 27: Vermaschtes Netz	257
28.28	Beispiel 28: Versorgung einer Fabrik	261
28.29	Beispiel 29: Berechnung mit Impedanzkorrekturen	262
28.30	Beispiel 30: Berechnung mit Impedanzkorrekturen	266
28.31	Beispiel 31: Anschluss eines Transformators	268
28.32	Beispiel 32: Parallelschaltung von Motoren	270
28.33	Beispiel 33: Nachweis der Kurzschlussfestigkeit	272
28.34	Beispiel 34: Kurzschlussfestigkeit von HS- und MS-Anlagen	274
28.35	Beispiel 35: Berechnung eines Generators	285
28.36	Beispiel 36: Berechnung einer Windkraftanlage	288
28.37	Beispiel 37: Berechnung mit p.u.-Größen	288
28.38	Beispiel 38: Berechnung mit p.u.-Größen	290
28.39	Beispiel 39: Berechnung mit MVA-Größen	292
28.40	Beispiel 40: Berechnung der Kurzschlussleistung	297
28.41	Beispiel 41: Kurzschlussberechnung auf Schiffen	299
28.42	Beispiel 42: Lichtbögen	308
Literaturverzeichnis		311
Stichwortverzeichnis		315

Formelzeichen

A	Anfangswert der Gleichstromkomponente
A	Leiterquerschnitt
a	Leitermittenabstand, Arbeitsabstand
$\underline{a}, \underline{a}^2$	Drehoperatoren
b	Breite des Rechteckleiters
B_r	Batteriezweig
c	Spannungsfaktor
C	Kapazität
C_E	Erdschlusskapazität
d	Elektrodenabstand
E	innere Spannung einer Spannungsquelle; Quellenspannung
E_B	Leerlaufspannung einer Batterie
E''	Subtransiente Spannung einer Synchronmaschine
E'_q	transiente Spannung des Generators
E''_q	subtransiente Spannung des Generators
f	Frequenz
h	Leiterhöhe
L'	Induktivitätsbelag
I_a	Abschaltstrom, Lichtbogenstrom
I_{an}	Anlaufstrom
I_{CE}	kapazitiver Erdschlussstrom
I_b	Betriebsstrom
I_{bf}	dreipoliger Kurzschlussstrom
I_G	Bemessungsstrom des Generators
I_k	Dauerkurzschlussstrom
I''_k	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom
I''_{k1}	einpoliger Kurzschlussstrom
I''_{k2}	zweipoliger Kurzschlussstrom
I''_{k3}	dreipoliger Kurzschlussstrom
I''_{k2E}	zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung
I''_{kEE}	Doppelerdschluss
I_k	Dauerkurzschlussstrom des Generators
I'_k	transienter Kurzschlussstrom des Generators
I''_k	subtransienter Kurzschlussstrom des Generators
I_L	induktiver Erdschlussreststrom
I_{ma}	Bemessungs-Kurzschlusseinschaltstrom
I_n	Nennstrom der Schutzeinrichtung
i_p	Stoßkurzschlussstrom
i_{dc}	abklingender Gleichstromanteil des Generators
i_{ac}	abklingender Wechselstromanteil des Generators
I_r	Bemessungsstrom
I_r	Erdschlussreststrom
I_{rM}	Bemessungsstrom des Motors
I_{sc}	Bemessungs-Kurzschlussausschaltstrom

I_{cm}	Bemessungs-Kurzschlusseinschaltstrom
I_{cu}	Bemessungsgrenz-Kurzschlussausschaltstrom
I_{cw}	Bemessungs-Kurzzeitstromfestigkeit
I_{thz}	thermische Kurzschlussstrombelastbarkeit
I_{pk}	Bemessungsstoßstromfestigkeit
I_{th}	thermisch wirksamer Mittelwert des Kurzschlussstroms
$I_{\text{w}\nu}$	Oberschwingungsanteil des Reststroms der Ordnungszahl
I_{w}	Wirkreststrom
K	Korrekturfaktor
k_{B}	Strombegrenzungsfaktor
L_{B}	Induktivität der Batterie
L_{BBr}	Gesamtinduktivität der Batterie
L_{BL}	Induktivität einer Batterieleitung
L_{C}	Induktivität des Kondensators
L_{CBr}	Gesamtinduktivität des Kondensators
L_{CL}	Induktivität einer Kondensatorleitung
L_{CY}	Induktivität des Koppelzweiges des Kondensators
L_{DL}	Induktivität der Leitung im Stromrichterzweig
L_{M}	Induktivität des Gleichstrommotors
L_{MBr}	Gesamtinduktivität des Gleichstrommotors
L_{ML}	Induktivität der Gleichstrommotorleitung
L_{s}	Induktivität der gesättigten Drosselspule
L_{Y}	Induktivität des Koppelzweigs
m	Abklingendes Gleichstromglied
M_{r}	Bemessungsmoment des Motors
n	Abklingendes Wechselstromglied
p	Polpaarzahl der ASM
p	Verhältnis $\frac{I_{\text{k}}}{i_{\text{p}}}$
P	Wirkleistung
P_{krT}	Transformatorwicklungsverluste
p_{T}	Transformatorverstellung
Q	Blindleistung
r	Resistanz, Leiterradius, absoluter bzw. bezogener Wert
R_{R}	Rotorwiderstand
R_{S}	Statorwiderstand
X_{R}	Rotorreaktanzen
X_{S}	Statorreaktanzen
R	Ohmscher Widerstand
R_{L}	Leiterwiderstand
R'	Widerstandsbelag
$R_{\text{T}}, X_{\text{T}}$	ohmscher, induktiver Widerstand des Transformators
R_{aG}	statischer Widerstand des Generators
$R_{(0)\text{T}}, X_{(0)\text{T}}$	ohmscher, induktiver Nullwiderstand des Transformators
$R_{(0)\text{L}}, X_{(0)\text{L}}$	ohmscher, induktiver Nullwiderstand des Leitungsnetzes
R_{BL}	Resistanz einer Batterieleitung

R_s	Widerstand der gesättigten Drosselspule
R_Y	Widerstand des Koppelzweigs
R_{BY}	Resistanz des Koppelzweiges der Batterie
R_C	Resistanz eines Kondensators
R_{CBF}	Gesamtresistanz eines Kondensators
R_{CL}	Resistanz einer Kondensatorleitung
R_{DL}	Widerstand der Leitung im Stromrichterzweig
R_M	Resistanz des Gleichstrommotors
R_{ML}	Resistanz der Gleichstrommotorleitung
R_{MY}	Resistanz des Koppelzweiges des Gleichstrommotors
S	Scheinleistung, Querschnitt
S_G	Bemessungsleistung des Generators
S''_k	Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung
t_r	Bemessungswert des Übersetzungsverhältnisses des Blocktransformators
t	Zeit, transformierte Größe
T'_d	transiente Zeitkonstante des Generators
T''_d	subtransiente Zeitkonstante des Generators
T_{dc}	Gleichspannungszeitkonstante des Generators
T_k	Kurzschlussdauer
t_p	Zeit bis zum Stoßkurzschlussstrom
U_{nB}	Nennspannung einer Batterie
U_G	Bemessungsspannung des Generators
U_{rM}	Bemessungsspannung des Gleichstrommotors
u_{Rr}	Bemessungswert des ohmischen Spannungsfalls
u_{kr}	Bemessungswert der Kurzschlussspannung
W_{LB}	Lichtbogenenergie
W_{LBP}	Prüfpegel
$W_{LB\ddot{a}}$	äquivalente Lichtbogenenergie, Schutzpegel
X	Reaktanz
x''_d	Subtransiente Reaktanz einer SM
X_G	Reaktanz des Generators
Y_{ii}	Summe aller an den Knoten i unmittelbar angeschlossenen Längs- und Queradmittanzen
Y_{ik}	negative Admittanz des Längszweiges zwischen den Knoten i und k
Z	Impedanz
Z_k	Kurzschlussimpedanz eines Netzes
Z_d	stationäre Impedanz des Generators
Z'_d	transiente Impedanz des Generators
Z''_d	subtransiente Impedanz des Generators
Z_G	Impedanz des Generators
Z_S	Schleifenimpedanz
Z_T	Impedanz des Transformators
Z_W	Gesamte Kurzschlussmitimpedanz der Windkraftanlage
$Z_{(1)}$	Mitimpedanz

$Z_{(2)}$	Gegenimpedanz
$Z_{(0)}$	Nullimpedanz
φ	Phasenwinkel
ε	Erdungszahl
μ	Faktor zur Berechnung des Ausschaltwechselstroms
λ	Faktor zur Berechnung des Dauerkurzschlussstroms
μ_0	Absolute Permiabilität des Vakuums($4\pi 10^{-7} H/m$)
κ	Stoßfaktor
η	Wirkungsgrad eines Asynchronmotors
ρ	Spezifische Resistanz
δ	Abklingkoeffizient, Erdfehlerfaktor
Ψ	Impedanzwinkel
ω	Winkelgeschwindigkeit

Abkürzungen

a.c. : AC	Wechselstrom
ASG	Asynchrongenerator
AMZ	abhängiges maximalstrom Zeitrelais
ASM	Asynchronmaschine
C	Kondensator
D	Stromrichter
DGAG	Doppelt gespeister Asynchrongenerator
d.c. : DC	Gleichstrom
E	Erde
F	Kurzschlussstelle
G	Generator
HAK	Hausanschlusskasten
HS	Hochspannung
HV	High Voltage
K	Kabel
L	Leitung
L_1, L_2, L_3	Außenleiter
LV	Low Voltage
MS	Mittelspannung
M	Motor
NS	Niederspannung
N	Neutralleiter, Netz
OS	Oberspannung
PE	Schutzleiter
Q	Netzanschlusspunkt
S	Glättungs-drosselspule
T	Transformator
UMZ	unabhängiges Maximalstrom-Zeitrelais

US	Unterspannung
ÜSE	Überstrom-Schutzeinrichtung
UW	Umspannwerk
WKA	Windkraftanlage
VT	Verteilungsanlage

Indizes

a	Ausschalt
i	Innen
k	Kurzschluss
k1	einpoliger Kurzschlussstrom
k2	zweipoliger Kurzschlussstrom
k3	dreipoliger Kurzschlussstrom
k2E	zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung
kEE	Doppelerdschluss
max	Maximal
min	Minimal
n	Nennwert, nominal value
p	peak
r	Bemessungswert, rated value
1	Komponente des Mitsystems
2	Komponente des Gegensystems
0	Komponente des Nullsystems

Nebenzeichen

"	Subtransienter Wert
'	Transienter Wert
'	Resistanz oder Reaktanz je Längeneinheit
*	relative Größe

Nationale und internationale Gremien

1. VDE : Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V
2. DIN : Deutsches Institut für Normung e.V
3. IEC : International Electrotechnical Commision
4. EN : European Norms

Amerikanischer Kabelaufbau AWG

Amerikanischer Kabelaufbau " American Wire Gauge (AWG)" wird für größere Querschnitte in MCM (circular mills) angezeigt.

AWG in mm² Umrechnungstabelle:

1CM	= 1 Circ. mil = 0,0005067 mm ²
1MCM	= 1000 Circ. mils = 0,5067 mm ²

1 Einleitung

Jede elektrische Anlage muss nicht nur dem normalen Betriebszustand genügen, sie ist auch für Störfälle auszulegen und muss sowohl den fehlerlosen als auch den fehlerbehafteten Betriebsfall überleben.

Daher sind elektrische Anlagen so zu dimensionieren, dass weder Personen noch Sachwerte gefährdet werden. Die Bemessung, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit der Anlagen ist stark von der Beherrschung der Kurzschlussströme abhängig. Mit zunehmender installierter Leistung gewann auch die Berechnung der Kurzschlussströme an Bedeutung.

Die Kurzschlussstromberechnung ist Voraussetzung für die richtige Bemessung der elektrischen Betriebsmittel, die Überprüfung der Schutzmaßnahmen und der Kurzschlussfestigkeit bei der Auswahl der Geräte.

Der größtmögliche Kurzschlussstrom I''_{k3} ist für die Bemessung der Betriebsmittel auf thermische und dynamische Beanspruchungen im Kurzschlussfall und der kleinste Kurzschlussstrom I''_{k1} für die Schutzmaßnahme "Schutz durch Abschaltung" sowie für die Einstellung des Netzschutzes maßgebend wie z. B. Leistungsschalter und Schutzrelais.

Ein Drehstromsystem kann vorübergehend oder dauernd durch Fehler, besonders Kurzschlüsse, Schaltungsmaßnahmen oder durch Verbraucher gestört werden. Zur Berechnung der Betriebsgrößen stehen Berechnungsmodelle und Lösungsalgorithmen für Systeme der Stromerzeugung, der Übertragung und der Verteilung ein umfassendes Werkzeug zur Planung, Auslegung, Analyse, Optimierung und Verwaltung von beliebigen Netzen der Energieversorgung zur Verfügung.

Bedingt durch die Liberalisierung der Energiemärkte und insbesondere den raschen Ausbau der Erneuerbaren Energien werden die Anforderungen an die Netzplanungs- und Betriebsführungsprozesse immer komplexer. Diese Komplexe Netztechnologien und Netztopologien sind heute ohne Berechnungs-Programme nicht denkbar [3], [4], [5].

Der Umfang der Netzberechnungen und der Anlagenplanung können sein:

1. Symmetrische und unsymmetrische Lastflussberechnung in gekoppelten und vermaschten AC/DC-Netzen unter Berücksichtigung von Kraftwerks- und Netzregelfunktionen
2. Kurzschlussstromberechnung nach IEC 60909, VDE 0102/0103, IEEE 41/-ANSI C37, G74 und IEC 61363 sowie vollständiger Überlagerungsmethode unter Berücksichtigung der Spannungsstützung von Wechselrichtern und Mehrfachfehlerberechnung beliebiger Fehlerart
3. Schnelle Netzausfallberechnung mit Unterstützung von Parallelrechnerstrukturen
4. Netzzustandsschätzung (z. B. für SCADA-Anwendungen)
5. Schutzkoordination von UMZ/AMZ und Distanzschutzeinrichtungen einschließlich Schutzsimulation
6. Störlichtbogenberechnung nach IEEE-1584-2002 und NFPA 70E-2012
7. Berechnung der Netzqualität inkl. Harmonischer Lastfluss (IEC 61000-3-6, BDEW 2008). Flickerberechnung nach IEC 61400-21 und IEC 61000-4-15 sowie Filterdimensionierung
8. Trennstellen-Optimierung in Mittelspannungsnetzen sowie Optimierung von Kompensationsreinrichtungen
9. Optimierung von Transformator-Stufenstellern bei directionalem Lastfluss
10. Zuverlässigkeitsberechnungen einschließlich optimaler Wiederversorgungsstrategien
11. Optimale Lastflussberechnung zur Wirk- und Blindleistungsoptimierung (OPF)
12. Stabilitätsberechnungen (RMS) unter Einbeziehung von Kraftwerken, Verbrauchern und Schutzeinrichtungen
13. Berechnung elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge (EMT), z. B. Einschaltüberspannungen, Ferroresonanzen durch Trafosättigung
14. Berechnung von Eigenwerten, Eigenvektoren und Partizipationsfaktoren
15. Modellierung virtueller Kraftwerke

Mit geeigneten Programmen lassen sich die Bemessung und Auswahl von elektrischen Betriebsmitteln, die Berechnung der mechanischen und thermischen Kurzschlussfestigkeit, die Berechnung von Kurzschlussströmen, die Selektivität und der Back-up-Schutz zur Auswahl von Überstrom-Schutzeinrichtungen sowie die Berechnung der Temperaturerhöhung in Schaltschränken vornehmen.

Als Einspeisungen stehen Transformatoren (mit oder ohne Mittelspannung), Generatoren und neutrale Netzeinspeisungen zur Auswahl. Eine neutrale Netzeinspeisung kann durch die Vorgabe der Impedanzen, der Schleifenimpedanz oder der Kurzschlussströme abgebildet werden. In Einspeisestromkreisen kann optional zu der Absicherung von parallelen Kabeln durch ein Schutzgerät eine Einzelabsicherung paralleler Kabel mit mehreren Schutzgeräten berechnet und dimensioniert werden. Die gewählten Einspeisungen können über gerichtete oder ungerichtete Kupplungen miteinander verbunden werden. So lässt sich durch die anschließend mögliche Definition der verschiedenen erforderlichen Betriebsarten (z.B. Normalbetrieb, Notfallbetrieb....), die Netzeinspeisung praxisgerecht darstellen und in die Berechnung einbeziehen.

Durch die Verbindung von zwei nicht gleichen Einspeisungen über eine ungerichtete Kupplung kann Netzparallelbetrieb abgebildet werden. Auch Einspeisungen auf der Unterverteilungsebene lassen sich in die Berechnung einbeziehen. Ebenso ist eine Darstellung von Inselnetzen möglich. Die Einspeise-Elemente in der Bibliothek beinhalten folgende Elemente:

1. Im Falle der Auswahl eines Transformators mit Mittelspannung sind im Einspeise-Element ein Mittelspannungs-Schaltgerät und die Zuleitung zum Transformator enthalten.
2. Transformator, Generator oder neutrale Netzeinspeisung entsprechend der Auswahl des Einspeisetyps
3. Schaltgeräte nach dem Transformator oder Generator bzw. der neutralen Netzeinspeisung, wobei als Schaltgerät ein Leistungsschalter, Lasttrennschalter mit Sicherung, Sicherungslasttrennschalter oder eine Sicherung mit Sockel
4. Kabel- oder Schienenverbindung mit Schaltgerät vor dem Einspeisepunkt, wobei als Typ des Schaltgeräts ein Leistungsschalter, Leistungstrennschalter, Lasttrennschalter mit Sicherung, Sicherungslasttrennschalter oder eine Sicherung mit Sockel zur Auswahl stehen.

Als Verteiler stehen Unterverteiler, Gruppenschalter, Schienenverteiler, Schienenverteiler mit Mitteneinspeisung oder Verteiler mit Ersatzimpedanzen zur Auswahl. Auch bei der Auswahl dieser Elemente sind wieder bestimmte Vorgaben bezüglich der Ausführung zu treffen, z.B. ob die Verbindungsleitung als Stromschiene oder Kabel ausgeführt werden soll, welches und wie viele Schaltgeräte eingesetzt werden sollen etc. Im Falle der Auswahl einer Kabelstrecke ist zudem die vorgesehene Verlegeart anzugeben, so dass die dadurch beeinflussten Werte der Strombelastbarkeit entsprechend in der Dimensionierung berücksichtigt werden. Die Verteiler werden immer an einer Sammelschiene in die Grafik eingefügt. Dies kann sowohl die Sammelschiene sein, die den Einspeisepunkt symbolisiert, aber auch die Sammelschiene eines bereits angeordneten Verteilers bzw. die Darstellung eines Stromschienenstranges sein, so dass auf diese Weise das Netz als Strahlennetz weiter verzweigt werden kann.

Für Endstromkreise stehen als Elemente Verbraucher mit Festanschluss, Steckdosenstromkreise, Motoren, Ladeeinheiten, Kondensatoren und Ersatzlasten als Elemente zur Auswahl. Diese werden wiederum an der Sammelschiene vorhandener Unterverteilungen bzw. der Darstellung eines Stromschienenstranges oder direkt an die den Einspeisepunkt symbolisierende Sammelschiene angebunden. Auch bei der Platzierung dieser Elemente in der Netzgrafik bestehen diverse Auswahlmöglichkeiten bzgl. der Ausführung. Diese werden jeweils in dem für das Element spezifischen Auswahlfenster angeboten.

Für die verschiedenen Stromkreise können zudem Gleichzeitigkeitsfaktoren bzw. Ausnutzungsfaktoren angegeben werden, die dann ebenfalls bei der Dimensionierung berücksichtigt werden.

Ist die Netzstruktur auf diese Weise komplett aufgebaut, kann die eigentliche Berechnung und damit die Dimensionierung und Auswahl der Elemente angestoßen werden. Die Ergebnisse dieser Dimensionierung können in den verschiedenen zur Verfügung stehenden Ansichtsvarianten der Netzgrafik eingesehen und dokumentiert werden. Neben der Möglichkeit, die Beschriftung der Netzgrafik individuell zu konfigurieren, stehen standardisierte Beschriftungsvarianten (Geräteparameter, Lastfluss-/Lastverteilung, Kurzschlussbelastung, Energiebilanz) zur Verfügung, so dass alle für die Netzberechnung relevanten Kenngrößen übersichtlich dargestellt werden.

In der Praxis wird oft zwingend ein Selektivitätsnachweis gefordert, z. B. für Anlagen der Sicherheitsstromversorgung. Bei der Schaltgeräteauswahl kann ggf. auch Back-up-Schutz berücksichtigt werden, d. h., das Schaltvermögen eines nachgeordneten Schalters kann dadurch erhöht sein, dass der vorgeordnete Schalter gleichzeitig auslöst und dadurch den Strom begrenzt.

Die Kurzschlussstromberechnung wird in diesem Buch mit Grundlagen und technischen Hinweisen möglichst *einfach* und *verständlich* nach DIN EN 0909-0 (VDE 0102) zusammengefasst.

Die **Abbildung 1.1** zeigt die Bedeutung und den Aufgabenbereich der Kurzschlussstromberechnung und weitergehende Berechnungen für andere Vorschriften.

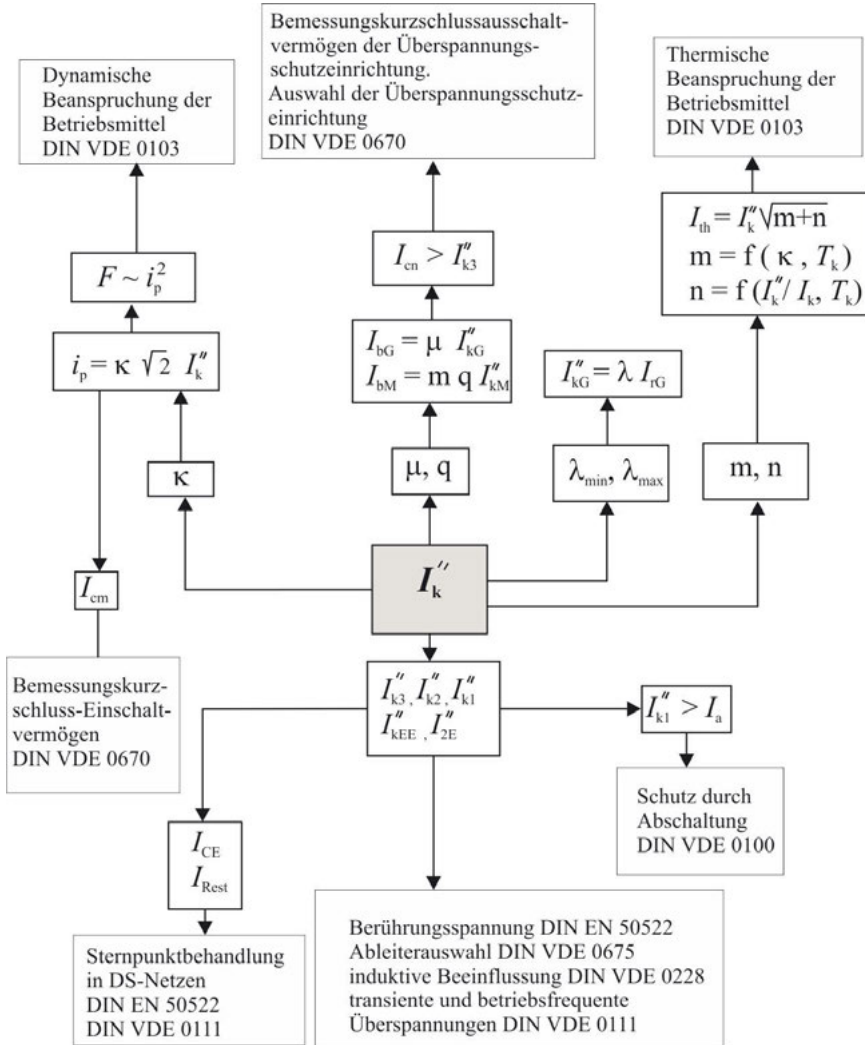


Abbildung 1.1: Aufgabenbereich der Kurzschlussberechnung [1], [7], [31], [62]

Tabelle 1.1 gibt weitere Bezeichnungen und Begriffe, die unterschiedlich in verschiedenen Normen verwendet werden.

Tabelle 1.1: Begriffe und Kurzschlussgrößen

Begriffe, Kurzzeichen	DIN EN 90909-0	EN 60947	EN 61439
Betriebsverhalten	I_r	I_{cu}	I_n
Einschaltvorgang	I_{ma}	I_{cm}	I_{pk}
Ausschaltvermögen	I_{sc}	I_{cu}/I_{cs}	I_{cc}
Therm. Kurzschluss (1 3 s)	I_k	I_{cw}	I_{cw}
Kurzschlussleistung	S''_k		
Kurzschlussleistung am Punkt Q	I_{kQ}		
Nennstrom	I_n	I_n	
Bemessungsstrom	I_r	I_n	
Dauerkurzschlussstrom	I_k		
Stoßkurzschlussstrom	i_p		
Anfangs-Kurzschlusswechselstrom	I''_k		
Übersetzungsverhältnis	t		
Bemessungs-Übersetzungsverhältnis	t_r		
Querschnitt	q		
Ausschaltwechselstrom/Blindstrom	I_b		

Weitere Erklärungen [8]:

- Kennzeichnung von Betriebszuständen: "Kleine" Indizes z.B.: I_k
- Betriebsmittel: "Große" Indizes z.B.: U_{rG}
- Reihenfolge der Indizes: natürliche Größe oder modale Komponente, Betriebszustand, elektrisches Betriebsmittel, Ort, evtl. Zusatz z. B.: $U_{1k1T4HVmax}$

2 Begriffe und Definitionen

Die nachstehenden Begriffe und Definitionen entsprechen im wesentlichen DIN EN 60909-0. Alle hier nicht aufgeführten Begriffe sind in dieser Norm nachzuschlagen.

Mit Kurzschluss und Erdschluss bezeichnet man Fehler in der Betriebsisolation von Betriebsmitteln, wenn dadurch spannungsführende Teile überbrückt werden.

- Ursachen:
 1. Übertemperaturen durch zu hohe Überströme,
 2. Durchschläge aufgrund von Überspannungen,
 3. Überschläge durch Nässe in Verbindung mit Luftverschmutzung, besonders an Isolatoren.
- Auswirkungen:
 1. Unterbrechung der Energieversorgung,
 2. Zerstörung von Anlagenteilen,
 3. Entstehung von unzulässigen mechanischen und thermischen Beanspruchungen von elektrischen Betriebsmitteln.
- Kurzschluss (short circuit):

Nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) ist ein Kurzschluss die zufällige oder beabsichtigte leitfähige Verbindung über eine verhältnismäßig niedrige Resistanz oder Impedanz zwischen zwei oder mehr Punkten eines Stromkreises, die üblicherweise unterschiedliche Spannungen haben.
- Kurzschlussstrom (short-circuit current):

Nach DIN EN 60909-0 (VDE 0102) ist ein Kurzschlussstrom, hervorgerufen durch einen Kurzschluss in einem elektrischen Netz.

Es ist zu unterscheiden zwischen dem Kurzschlussstrom an der Kurzschlussstelle und den Teilkurzschlussströmen in den Netzzweigen.
- Anfangs-Kurzschlusswechselstrom (initial symmetrical short-circuit current):

Das ist der Effektivwert des Kurzschlusswechselstroms im Augenblick des Kurzchlusseintritts, wenn die Kurzschlussimpedanz ihre Größe zum Zeitpunkt Null beibehält.
- Anfangs-Kurzschlusswechselstromleistung (initial symmetrical short-circuit apparent power):

Die Kurzschlussleistung stellt eine fiktive Rechengröße dar. Bei der Planung von Netzen ist die Kurzschlussleistung eine geeignete Kenngröße.

- Stoßkurzschlussstrom (peak short-circuit current):
Größtmöglicher Augenblickswert des auftretenden Kurzschlusses.
- Dauerkurzschlussstrom (steady state short-circuit current):
Effektivwert des Kurzschlusswechselstroms, der nach Abklingen aller Ausgleichsvorgänge bestehen bleibt.
- Gleichstromglied (dc aperiodic component):
Mittelwert der oberen und unteren Hüllkurve des Kurzschlussstroms, der langsam auf Null abklingt.
- Ausschaltwechselstrom:
Effektivwert des Kurzschlussstroms, der zum Zeitpunkt der ersten Kontakttrennung über den Schalter fließt.
- Ersatzspannungsquelle (equivalent voltage source):
Die Spannung an der Kurzschlussstelle, die im Mitsystem als einzige wirksame Spannung eingeführt und zur Berechnung der Kurzschlussströme verwendet wird.
- Überlagerungsverfahren (superposition method):
Das Überlagerungsverfahren berücksichtigt die Vorbelastung des Netzes vor dem Kurzchlusseintritt. Den Lastfluss und die Einstellung des Transformator-Stufenschalters muss man kennen.
- Spannungsfaktor (voltage factor):
Verhältnis zwischen der Ersatzspannungsquelle und der Netzennspannung U_n , dividiert durch $\sqrt{3}$.
- Netznachbildung (equivalent electric circuit):
Ein Modell zur Beschreibung des Netzes durch eine Ersatzschaltung.
- Generatorferner Kurzschluss (far-from-generator short circuit):
Die Größe der symmetrischen Wechselstromkomponente bleibt im wesentlichen konstant.
- Generatornaher Kurzschluss (near-to-generator short circuit):
Die Größe der symmetrischen Wechselstromkomponente bleibt nicht konstant. Die Synchronmaschine liefert einen Anfangs-Kurzschlusswechselstrom, der größer ist als das Doppelte des Bemessungsstroms der Synchronmaschine.
- Kurzschlussmitimpedanz (positive-sequence short-circuit impedance):
Die Impedanz des Mitsystems, von der Kurzschlussstelle aus gesehen.
- Kurzschlussgegenimpedanz (negative-sequence short-circuit impedance):
Die Impedanz des Gegensystems, von der Kurzschlussstelle aus gesehen.
- Kurzschlussnullimpedanz (zero-sequence short-circuit impedance):
Die Impedanz des Nullsystems, von der Kurzschlussstelle aus gesehen. Der dreifache Wert der Impedanz Sternpunkt und Erde ist hier enthalten.
- Kurzschlussimpedanz (short-circuit impedance):
Zur Berechnung der Kurzschlussströme benötigte Impedanz an der Kurzschlussstelle.

3 Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstroms

Abbildung 3.1 zeigt den zeitlichen Verlauf des Kurzschlussstroms bei generatorfernem und generatornahem Kurzschluss. Die Gleichstromkomponente ist vom Zeitpunkt des Kurzschlusseintritts abhängig. Beim generatornahen Kurzschluss sind das subtransiente und das transiente Verhalten von Synchronmaschinen wichtig. Nach Abklingen aller Ausgleichsvorgänge stellt sich der Dauerzustand ein.

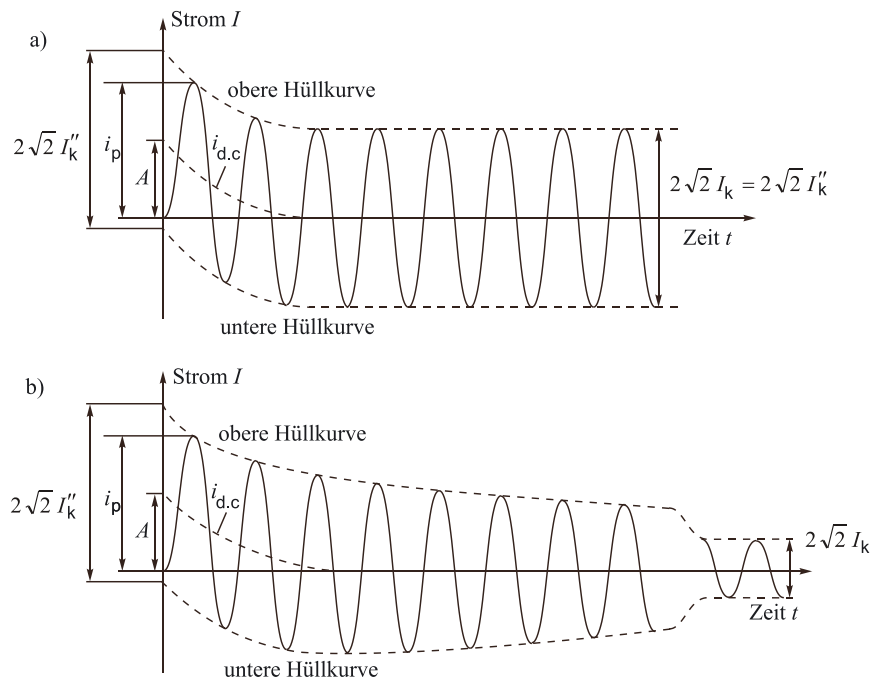


Abbildung 3.1: Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstroms

a) generatorferner Kurzschluss, b) generatornaher Kurzschluss [1],[62]

I''_k : Anfangs-Kurzschlusswechselstrom

I_k : Dauerkurzschlussstrom

i_p : Stoßkurzschlussstrom

i_{DC} : abklingende Gleichstromkomponente

A: Anfangswert der Gleichstromkomponente

Kurzschlussstromkreis im Mitsystem:

Ein dreipoliger Kurzschluss lässt bei gleichen Außenleiter-Spannungen zwischen den drei Leitern drei gleich große Ströme entstehen. Es genügt deshalb in den weiteren Überlegungen, nur einen Leiter zu betrachten.

Der Kurzschlussstromkreis kann durch eine Masche mit Wechselspannungsquelle, Reaktanzen X und Resistanzen R nachgebildet werden (**Abbildung 3.2**). Dabei ersetzen X und R alle Bauelemente wie Kabel, Leitungen, Transformatoren, Generatoren und Motoren.

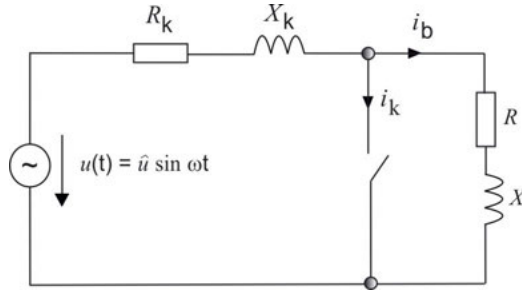


Abbildung 3.2: Ersatzschaltbild des Kurzschlussstromkreises im Mitsystem

Zur Beschreibung des Kurzschlussvorganges kann folgende Differentialgleichung angesetzt werden:

$$i_k \cdot R_k + L_k \frac{di_k}{dt} = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \psi), \quad (3.1)$$

wobei ψ der Schaltwinkel zum Zeitpunkt des Kurzschlusses ist. Vorausgesetzt wird, dass der Strom vor dem Schließen von S (Kurzschluss) Null ist. Die inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung kann durch Bestimmung der homogenen Lösung i_k und einer partikulären Lösung i''_k berechnet werden:

$$i_k = i''_{k\sim} + i_{k-} \quad (3.2)$$

Die homogene Lösung ergibt mit der Zeitkonstanten $\tau = L/R$ zu:

$$i_k = \frac{-\hat{u}}{\sqrt{(R^2 + X^2)}} e^{\frac{t}{\tau}} \sin(\psi - \varphi_k). \quad (3.3)$$

Für die partikuläre Lösung erhält man:

$$i_k'' = \frac{\hat{u}}{\sqrt{(R^2 + X^2)}} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k). \quad (3.4)$$

Der Gesamtkurzschlussstrom setzt sich aus den beiden Komponenten zusammen:

$$i_k = \frac{\hat{u}}{\sqrt{(R^2 + X^2)}} [\sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - e^{\frac{t}{\tau}} \sin(\psi - \varphi_k)]. \quad (3.5)$$

Der Phasenwinkel des Kurzschlussstroms (Kurzschlusswinkel) beträgt entsprechend der obigen Gleichung:

$$\varphi_k = \psi - \nu = \arctan \frac{X}{R}. \quad (3.6)$$

In **Abbildung 3.3** sind die Einschaltvorgänge aufgezeigt.

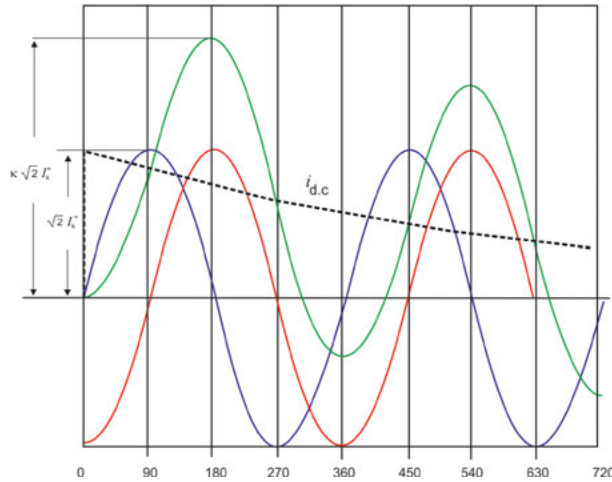


Abbildung 3.3: Kurzschlussstromverlauf-Einschaltvorgänge

Aus den vereinfachten Berechnungen lassen sich zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Kurzschlussstrom hat neben dem stationären Wechselstromanteil immer noch einen abklingenden Gleichstromanteil.
- Die Höhe des Kurzschlussstroms ist abhängig vom Schaltwinkel des Stroms. Er erreicht sein Maximum bei $\gamma = 90$ (rein induktive Belastung). Dieser Fall dient für die weiteren Berechnungen als Grundlage.
- Der Kurzschlussstrom ist immer induktiv.