

	Synthetische Prüfung von Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschaltern (IEC 427 :1989 + A1:1992) Deutsche Fassung EN 60427 :1992 + A1:1993	DIN EN 60427
VDE	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Vorstand beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter nebenstehenden Nummern in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der etz Elektrotechnische Zeitschrift bekanntgegeben worden.	Klassifikation VDE 0670 Teil 108
Diese Norm enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm IEC 427		
ICS 29.120.60 Deskriptoren: Elektrotechnik, Hochspannungsschalter, Wechselstrom-Leistungsschalter, Prüfverfahren Report on synthetic testing of high voltage alternating current circuit-breakers (IEC 427 :1989 + A1:1992); German version EN 60427 :1992 + A1:1993 Essais synthétiques des disjoncteurs à courant alternatif à haute tension (CEI 427 :1989 + A1:1992); Version allemande EN 60427 :1992 + A1:1993 Die Europäische Norm EN 60427 :1992 + A1:1993 hat den Status einer Deutschen Norm. Beginn der Gültigkeit Die EN 60427 :1992 gilt seit 1992-06-16, A1:1993 gilt seit 1993-03-09. Übergangsfrist: Die Übergangsfristen sind im Vorwort der EN wie folgt festgelegt: EN 60427 :1992 Für Erzeugnisse, die vor 1993-09-01 dem HD 580 S1:1990 entsprochen haben, wie durch den Hersteller oder durch eine Zertifizierungsstelle nachgewiesen, darf diese vorhergehende Norm für die Fertigung bis 1998-09-01 noch weiter angewendet werden. EN 60427/A1:1993 Für Erzeugnisse, die vor 1994-03-01 der EN 60427 :1992 entsprochen haben, wie durch den Hersteller oder durch eine Zertifizierungsstelle nachgewiesen, darf diese vorhergehende Norm für die Fertigung bis 1999-03-01 noch weiter angewendet werden. Der Inhalt der EN 60427 :1992 war im Kurzverfahren veröffentlicht, der Inhalt der EN 60427/A1:1993 war als E DIN VDE 0670-108/A1 (VDE 0670 Teil 108/A1) :1992-04 veröffentlicht. Fortsetzung Seite 2 und 3 und 60 Seiten EN Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)		

Nationales Vorwort

Diese Norm enthält die Deutschen Fassungen der Europäischen Normen EN 60427, „Synthetische Prüfungen von Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschaltern (IEC 427 :1989)“, Ausgabe Juli 1992, und EN 60427/A1 „Synthetische Prüfungen von Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschaltern (IEC 427 :1989/A1:1992)“, Ausgabe März 1993, in die die Internationalen Normen IEC 427, „Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers“, Ausgabe Oktober 1989, und IEC 427/A1, „Amendment 1 – Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers“, Ausgabe Oktober 1992, unverändert übernommen worden sind.

Für die Norm ist das nationale Arbeitsgremium UK 432.1 „Hochspannungs-Schaltgeräte“ der Deutschen Elektrotechnischen Kommission im DIN und VDE (DKE) zuständig.

Die Überarbeitung von IEC 427 bzw. DIN VDE 0670 Teil 108 war erforderlich, nachdem seit der Veröffentlichung der 1. Ausgabe im Jahre 1973 umfangreiche Erfahrungen mit synthetischen Prüfverfahren für Hochspannungs-Leistungsschalter gewonnen werden konnten, die in die neue Fassung als Stand der Technik eingebracht wurden.

Außerdem war die Norm an die Neufassung von IEC 56, 4. Ausgabe 1987, bzw. DIN VDE 0670 Teile 101 bis 106 anzupassen, um gemeinsame Anforderungen unter gleichen Abschnittsnummern einordnen zu können.

Die Bilder und Gleichungen des Anhangs GG sind folgender Veröffentlichung entnommen:

„Anforderungen für Prüfungen des kapazitiven Schaltens mit synthetischen Prüfkreisen für Leistungsschalter ohne Parallelwiderstände. ELECTRA; Nr. 87, März 1983, Seiten 25 bis 39“.

Sie werden mit einigen Erläuterungen und der freundlichen Erlaubnis der CIGRE wiedergegeben.

Für den Bereich der Hochspannungsgeräte-Normen wird sowohl der Nennwert als geeigneter, gerundeter Wert einer Größe zur Bezeichnung oder Identifizierung eines Elementes, einer Gruppe oder einer Einrichtung als auch der Bemessungswert als ein für eine vorgegebene Betriebsbedingung geltender Wert einer Größe, der im allgemeinen vom Hersteller für ein Element, eine Gruppe oder eine Einrichtung festgelegt wird, benötigt.

Nennwert und Bemessungswert haben den gleichen Wert. Dieser wird zweifelsfrei durch die Vorsilbe „Nenn-“ gekennzeichnet.

Beispiel: Nenn-Kurzschlußausschaltstrom: 63 kA
Identifizierung: 63-kA-Leistungsschalter
Bemessung für einen Ausschaltstrom unter Nenn-Kurzschlußbedingungen: 63 kA.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben.

Für den Fall einer undatierten Verweisung (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild, usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm gelten die angegebenen Ausgaben.

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
HD 348 S4:1991	IEC 56:1987	DIN VDE 0670-101 (VDE 0670 Teil 101):1992-12	VDE 0670 Teil 101
		DIN VDE 0670-102 (VDE 0670 Teil 102):1992-12	VDE 0670 Teil 102
		DIN VDE 0670-103 (VDE 0670 Teil 103):1992-10	VDE 0670 Teil 103
		DIN VDE 0670-104 (VDE 0670 Teil 104):1992-10	VDE 0670 Teil 104
		DIN VDE 0670-105 (VDE 0670 Teil 105):1992-10	VDE 0670 Teil 105
		DIN VDE 0670-106 (VDE 0670 Teil 106):1992-10	VDE 0670 Teil 106

Zitierte Normen

DIN VDE 0670-101 (VDE 0670 Teil 101)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Teil 101: Allgemeines und Begriffe
DIN VDE 0670-102 (VDE 0670 Teil 102)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Teil 102: Einstufung
DIN VDE 0670-103 (VDE 0670 Teil 103)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Teil 103: Konstruktion und Bau
DIN VDE 0670-104 (VDE 0670 Teil 104)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Teil 104: Typ- und Stückprüfungen
DIN VDE 0670-105 (VDE 0670 Teil 105)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Teil 105: Auswahl von Leistungsschaltern für den Betrieb
DIN VDE 0670-106 (VDE 0670 Teil 106)	Wechselstromschaltgeräte für Spannungen über 1 kV – Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter – Teil 106: Angaben in Anfragen, Angeboten, Bestellungen sowie Hinweise für Transport, Aufstellung und Instandhaltung

Änderungen

Gegenüber DIN 57670-108 (VDE 0670 Teil 108):1979-05 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- EN 60427:1992 + A1:1993 übernommen.

Frühere Ausgaben

DIN 57670-108 (VDE 0670 Teil 108):1979-05

Zurückgezogen: 2001-06

EUROPÄISCHE NORM
EUROPEAN STANDARD
NORME EUROPÉENNE

EN 60427

Juli 1992
+ A1
März 1993

DK 621.316.541:621.3.026.27:620.1

Ersatz für HD 580 S1 : 1990

Deskriptoren: Hochspannungsschaltgeräte, Geräte für das Schalten elektrischer Leistung, Leistungsschalter, Wechselstrom, Prüfung, Ausschaltprüfung, Kurzschlußprüfung

Deutsche Fassung

**Synthetische Prüfung von
Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschaltern**
(IEC 427 :1989 + A1:1992)

Report on synthetic testing of high voltage
alternating current circuit-breakers
(IEC 427 :1989 + A1:1992)

Essais synthétiques des disjoncteurs à courant
alternatif à haute tension
(CEI 427 :1989 + A1:1992)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 1992-06-16 angenommen. Die Änderung A1 ändert die Europäische Norm EN 60427 :1992. Sie wurde von CENELEC am 1993-03-09 angenommen.

Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien und dem Vereinigten Königreich.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B – 1050 Brüssel

Vorwort zu EN 60427 :1992

Infolge der IEC-CENELEC-Vereinbarung wurde HD 580 S1:1990 (IEC 427 :1989) zur Umwandlung in eine Europäische Norm dem Abstimmungsverfahren von CENELEC unterworfen.

Der Text der Internationalen Norm wurde von CENELEC am 16. Juni 1992 als EN 60427 genehmigt.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum der Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm (dop): 1993-09-01
- spätestes Datum für die Zurückziehung entgegenstehender nationaler Normen (dow): 1993-09-01

Anhänge, die als „normativ“ bezeichnet sind, gehören zum Norminhalt. In dieser Norm ist der Anhang ZA normativ.

Für Erzeugnisse, die vor 1993-09-01 dem HD 580 S1:1990 entsprochen haben, wie durch den Hersteller oder durch eine Zertifizierungsstelle nachgewiesen, darf diese vorhergehende Norm für die Fertigung bis 1998-09-01 noch weiter angewendet werden.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 427 :1989 wurde von CENELEC als Europäische Norm ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort zu EN 60427/A1 :1993

Der Text des Schriftstücks 17A(CO)230, wie ausgearbeitet vom Sub-Comittee 17A: High-voltage switchgear and controlgear, vom IEC Technical Committee N° 17: Switchgear and controlgear, wurde im November 1991 in die IEC-CENELEC Parallel-Abstimmung gegeben.

Das Referenzdokument wurde von CENELEC am 9. März 1993 als Änderung A1 zu EN 60427 :1992 genehmigt.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum der Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm (dop): 1994-03-01
- spätestes Datum für die Zurückziehung entgegenstehender nationaler Normen (dow): 1994-03-01

Für Erzeugnisse, die vor 1994-03-01 der EN 60427 :1992 entsprochen haben, wie durch den Hersteller oder durch eine Zertifizierungsstelle nachgewiesen, darf diese vorhergehende Norm für die Fertigung bis 1999-03-01 noch weiter angewendet werden.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Änderung 1:1992 zur Internationalen Norm IEC 427 :1989 wurde von CENELEC als Änderung zur Europäischen Norm ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
1 Einführung	4
2 Anwendungsbereich	4
3 Begriffe	4
HAUPTABSCHNITT EINS – TECHNIK UND VERFAHREN SYNTHETISCHER PRÜFUNGEN	
4 Kurzschluß-Ausschaltprüfungen	5
4.1 Grundlagen und allgemeine Anforderungen für synthetische Ausschaltprüfverfahren.	5
4.1.1 Hochstrom-Intervall.	5
4.1.2 Wechselwirkungs-Intervall	6
4.1.3 Hochspannungs-Intervall	6
4.2 Synthetische Prüfkreise und hierauf bezogene wesentliche Anforderungen für Ausschaltprüfungen	7
4.2.1 Stromüberlagerungsverfahren	7
4.2.2 Spannungsüberlagerungsverfahren	8
4.2.3 Prüfverfahren mit 2fach-Überlagerung (Transformator- oder Skeats-Kreis).	8
4.2.4 Andere synthetische Prüfverfahren	8
5 Kurzschluß-Einschaltprüfungen	9
5.1 Grundlagen und allgemeine Anforderungen für synthetische Einschaltprüfverfahren	9
5.1.1 Hochspannungs-Intervall	9
5.1.2 Vorzünd-Intervall.	9
5.1.3 Verklünnungs-Intervall und vollständig geschlossene Stellung	10
5.2 Synthetischer Prüfkreis und hierauf bezogene wesentliche Anforderungen für Einschaltprüfungen	10
5.2.1 Prüfkreis	10
5.2.2 Besondere Anforderungen	10
5.3 Auswertung der größten Vorzündzeit	10
HAUPTABSCHNITT ZWEI – BESONDERE ANFORDERUNGEN FÜR DIE DURCHFÜHRUNG SYNTHETISCHER EINSCHALT- UND AUSSCHALTPRÜFUNGEN nach IEC 56, Abschnitte 6.102 bis 6.111	
6.102.1.3 Prüfung in mehreren Teilen.	11
6.102.2 Anordnung des Leistungsschalters bei den Prüfungen	11
6.102.9 Leistungsschalter mit kurzer Lichtbogenzeit.	11
6.106 Standard-Kurzschlußprüfschaltfolgen.	11
6.106.1-2-3 Prüfschaltfolgen 1, 2 und 3	12
6.106.4 Prüfschaltfolge 4.	12
6.106.5 Prüfschaltfolge 5.	12
6.109 Abstandskurzschlußprüfungen	14
6.111 Synthetische Verfahren zum Schalten kapazitiver Ströme	14
Tabellen 1 bis 5	14
Bilder 1 bis 6	19
Anhang AA Stromverzerrung	25
Anhang BB Stromüberlagerungsverfahren	37
Anhang CC Spannungsüberlagerungsverfahren	42
Anhang DD Prüfkreis mit 2fach-Überlagerung (Transformator- oder Skeats-Kreis)	44
Anhang EE Angaben für synthetische Prüfungen und Aufzeichnung der Ergebnisse	45
Anhang FF Besondere Prüfverfahren für Leistungsschalter mit Parallel-Ausschaltwiderständen	46
Anhang GG Synthetische Verfahren zum Schalten kapazitiver Ströme	48
Anhang HH Synthetische Prüfverfahren für dreiphasige Prüfungen	57
Anhang JJ Fortzündverfahren zur Verlängerung der Lichtbogenzeit	58

1 Einführung

Während der letzten Jahrzehnte konnten Erfahrungen über die Technik und Verfahren synthetischer Prüfungen gewonnen werden. Es hat sich erwiesen, daß Hochspannungs-Wechselstrom-Leistungsschalter in synthetischen Prüfkreisen wirtschaftlich und technisch einwandfrei nach IEC 56 geprüft werden können.

Aus diesem Grund wurde entschieden, nach einer gründlichen Revision der 1. Ausgabe der IEC 427 synthetische Prüfungen als gleichwertig zu direkten Prüfungen einzubeziehen.

2 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für Wechselstrom-Leistungsschalter nach IEC 56 (Abschnitt 1). Sie gibt allgemeine Regeln für synthetische Ein- und Ausschaltprüfungen im Leistungsbereich der Prüfschaltfolgen, die in IEC 56, Abschnitte 6.102 bis 6.111, beschrieben sind.

ANMERKUNG: Einzelheiten von Prüfkreisen für die Prüfschaltfolge nach Abschnitt 6.111 sind noch nicht genormt. Die heute üblichen Verfahren sind im Anhang GG beschrieben.

Nur die allgemein angewendeten Methoden und Techniken werden beschrieben. Zweck dieser Norm ist, Kriterien für synthetische Prüfungen und die richtige Auswertung der Ergebnisse festzulegen. Diese Kriterien sollen die Gültigkeit der Prüfmethode begründen, ohne die Weiterentwicklung der Prüfkreise zu behindern.

3 Begriffe

Es gelten die Begriffe nach IEC 56 und folgende Ergänzungen:

3.1 Direkte Prüfung

Prüfung, bei der die treibende Spannung, der Strom, die Einschwingspannung und die betriebsfrequente Wiederkehrspannung von einer einzigen Energiequelle geliefert werden. Diese kann aus einem Netz oder besonderen Generatoren in einem Kurzschlußprüffeld oder einer Kombination aus beiden bestehen.

3.2 Synthetische Prüfung

Prüfung, bei der der gesamte Strom oder der überwiegende Teil davon aus einer Energiequelle (Hochstromkreis) geliefert wird und die treibende Spannung und/oder die Wiederkehrspannungen (Einschwing- und betriebsfrequente Spannung) insgesamt oder teilweise aus einer oder mehreren Spannungsquellen bezogen werden (Hochspannungs-Kreise).

3.3 Prüfschalter

Leistungsschalter, der zu prüfen ist (siehe IEC 56, Abschnitt 6.102.2).

3.4 Hilfsschalter

Ein oder mehrere Leistungsschalter, die einen Teil des synthetischen Prüfkreises bilden, so daß der Prüfschalter in der geforderten Beziehung zu verschiedenen Teilkreisen steht.

3.5 Hochstromkreis

Teil der synthetischen Prüfschaltung, der den betriebsfrequenten Strom oder den größeren Teil davon liefert.

3.6 Hochspannungskreis

Teil der synthetischen Prüfschaltung, der die Prüfspannung oder den größeren Teil davon liefert.

3.7 Unbeeinflußter Strom

Strom, der im Prüfkreis fließen würde, wenn jeder Pol der Prüf- und Hilfsschalter durch einen Leiter mit vernachlässigbarer Impedanz ersetzt würde.

3.8 Beeinflußter Strom

Strom durch den Prüfschalter (beeinflußt durch die Lichtbogenspannung der Prüf- und Hilfsschalter).

3.9 Verzerrungsstrom

Strom, berechnet als Differenz von unbeeinflußtem und beeinflußtem Strom.

3.10 Nachstrom

Strom, der über die Schaltstrecke eines Leistungsschalters fließt, unmittelbar nachdem der Strom und die Lichtbogenspannung Null geworden sind und die Einschwingspannung einsetzt.

3.11 Stromüberlagerungsverfahren

Synthetisches Prüfverfahren, bei dem der Hochspannungskreis vor dem Nulldurchgang des betriebsfrequenten Stromes an den Prüfschalter geschaltet wird.

3.12 Überlagerungsstrom

Strom des Hochspannungskreises eines Stromüberlagerungs-Prüfkreises, wenn dieser an den Prüfschalter geschaltet wird.

3.13 Spannungsüberlagerungsverfahren

Synthetisches Prüfverfahren, bei dem der Hochspannungskreis erst nach dem Nulldurchgang des betriebsfrequenten Stromes an den Prüfschalter geschaltet wird.

3.14 Referenz-Netzbedingungen

Bedingungen eines elektrischen Netzes mit den Einflußgrößen, aus denen sich die Nenn- und Prüfwerte nach IEC 56 herleiten.

HAUPTABSCHNITT EINS – TECHNIK UND VERFAHREN SYNTHETISCHER PRÜFUNGEN

4 Kurzschluß-Ausschaltprüfungen

4.1 Grundlagen und allgemeine Anforderungen für synthetische Ausschaltprüfverfahren

Jedes spezielle synthetische Prüfverfahren muß den zu prüfenden Leistungsschalter angemessen beanspruchen. Im allgemeinen ist dies erreicht, wenn das Prüfverfahren den Forderungen der folgenden Abschnitte genügt.

Grundlegende Intervalle

Ein Leistungsschalter hat zwei Grundstellungen: geschlossen und offen. In der geschlossenen Stellung führt der volle Strom zu einem vernachlässigbaren Spannungsfall an seinen Kontakten. In der offenen Stellung ist der Strom vernachlässigbar, aber die volle Spannung liegt an den Kontakten. Dies führt zu den zwei Hauptbeanspruchungen durch Strom und Spannung zu unterschiedlichen Zeiten.

Bei genauer Betrachtung der Spannungs- und Strombeanspruchungen während des Unterbrechungsvorgangs sind drei Hauptintervalle erkennbar (siehe Bild 1):

- Hochstrom-Intervall

Das Hochstrom-Intervall ist die Zeit von Kontakttrennung bis zum Beginn der bedeutsamen Änderung der Lichtbogenspannung und geht dem Wechselwirkungs-Intervall und dem Hochspannungs-Intervall voraus.

- Wechselwirkungs-Intervall

Das Wechselwirkungs-Intervall ist die Zeit vom Beginn der bedeutsamen Änderung der Lichtbogenspannung vor dem Stromnull bis zum endgültigen Aufhören des Stromes einschließlich des Nachstromes, sofern vorhanden, durch den Prüfschalter (siehe Anhang BB2).

- Hochspannungs-Intervall

Das Hochspannungs-Intervall beginnt mit dem Aufhören des Stromes einschließlich des Nachstromes, sofern vorhanden, durch den Prüfschalter und endet mit Abschluß der Prüfung.

4.1.1 Hochstrom-Intervall

Während dieses Intervalls muß der Prüfschalter durch den Prüfkreis so beansprucht werden, daß unter Berücksichtigung von festzulegenden Grenzüberschreitungen die Voraussetzungen bei Beginn des Wechselwirkungs-Intervalls die gleichen sind wie unter den Referenz-Netzbedingungen.

In synthetischen Prüfkreisen ist das Verhältnis der betriebsfrequenten Spannung des Hochstromkreises zur Lichtbogenspannung im Vergleich zu Prüfungen unter Referenz-Netzbedingungen aus zwei Gründen klein:

- die Spannung des Hochstromkreises ist nur ein Bruchteil der Netzspannung;
- die Lichtbogenspannungen des Prüfschalters und des Hilfsschalters summieren sich.

Als Folge davon werden die Dauer der Stromteilschwingung und der Scheitelwert des Stromes verringert. Diese Verzerrung des Stromes wird in Anhang AA beschrieben.

Überlegungen im Hinblick auf die im Prüfschalter verbleibende Lichtbogenenergie führen zu einem höchstzulässigen Einfluß, der durch Grenzüberschreitungen für zwei charakteristische Werte des Stromverlaufs gegeben ist. Dies sind der Scheitelwert und die Dauer der Stromteilschwingung (siehe Anhang AA).

Die Grenzüberschreitungen für die Amplitude und die Betriebsfrequenz des unbeeinflussten Ausschaltstromes nach IEC 56, Abschnitte 6.103.2 und 6.104.3, dürfen nicht von dem durch den Prüfschalter fließenden tatsächlichen Strom überschritten werden. Deshalb müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

- die tatsächliche Stromamplitude muß während der letzten Teilschwingung durch den Prüfschalter die Forderungen für den unbeeinflussten Strom nach IEC 56, Abschnitt 6.104.3, erfüllen. Die Amplitude der letzten Halbwelle des beeinflussten Stromes in einem einphasigen Kreis darf 90 % des festgelegten Wertes nicht unterschreiten.

- die Dauer der letzten Teilschwingung des beeinflussten betriebsfrequenten Stromes darf nicht kleiner sein als 90 % der Teilschwingungsdauer bei Nennfrequenz, wobei gegebenenfalls die Auswirkung der festgelegten Gleichstromkomponente zu berücksichtigen ist.
- bei der synthetischen Prüfung von Leistungsschaltern mit Lichtbogenspannungscharakteristiken, die den Strom im Netz merkbar verändern würden, daß der Einfluß der Lichtbogenspannung auf die Stromamplitude und die Teilschwingungsdauer unter Beachtung der vorher angegebenen Grenzabweichungen berücksichtigt werden.

Das ausführliche Verfahren zur Abschätzung dieser Korrekturen mit Beispielen für die Festlegung der Grenzabweichungen wird im Anhang AA angegeben.

Um mit dem Prüfstrom innerhalb der Grenzabweichungen zu bleiben, ist es gestattet, den Strom durch Erhöhung der Spannung oder Verringerung der Reaktanz des Hochstromkreises zu vergrößern oder die Gleichstromkomponente zu erhöhen oder die Betriebsfrequenz zu mindern. Zu diesem Zweck dürfen die festgelegten Grenzabweichungen für die Gleichstromkomponente und die Betriebsfrequenz mit Zustimmung des Herstellers überschritten werden.

4.1.2 Wechselwirkungs-Intervall

Im Wechselwirkungs-Intervall geht die Beanspruchung durch den Kurzschlußstrom in die Beanspruchung durch die Hochspannung über. Dabei kann der Leistungsschalter den Strom und die Spannung des Kreises merklich beeinflussen. Wenn der Strom zu Null geht, kann die Lichtbogenspannung steigen, wobei die Parallel-Kapazität aufgeladen und der über den Lichtbogen fließende Strom verzerrt wird. Nach dem Stromnull kann die Nachstromleitfähigkeit eine zusätzliche Dämpfung der Einschwingspannung bewirken und so die Spannung über den Leistungsschalter und die Energie der ionisierten Schaltstrecke beeinflussen. Die Wechselwirkung zwischen dem Kreis und dem Leistungsschalter unmittelbar vor und nach dem Stromnull (also während des Wechselwirkungs-Intervalls) ist von entscheidender Wichtigkeit für den Unterbrechungsvorgang.

Während des Wechselwirkungs-Intervalls müssen Strom und Spannung bei der synthetischen Prüfung gleiche Verläufe wie unter Referenz-Netzbedingungen haben, wobei mögliche Abweichungen des Stromes und der Spannung von den unbeeinflussten Werten durch die Wechselwirkung zwischen dem Leistungsschalter und dem Kreis zu berücksichtigen sind.

Das Wechselwirkungs-Intervall ist die kritische Zeit für ein thermisches Versagen des Leistungsschalters. Darum ist es von entscheidender Wichtigkeit, daß der Verlauf und die Amplitude der unbeeinflussten Einschwingspannung mit der auf den unbeeinflussten Strom der entsprechenden Prüfschaltfolge bezogenen übereinstimmt.

Hieraus ergeben sich verbindliche Anforderungen für den Prüfkreis. Die Anforderungen für das Stromüberlagerungsverfahren sind in Abschnitt 4.2.1 und die für das Spannungsüberlagerungsverfahren sind in Abschnitt 4.2.2 angegeben.

ANMERKUNG: Abhängig von dem verwendeten Prüfkreis kann die Wechselwirkung zwischen dem Kreis und dem Prüfschalter durch das Verhalten des Hilfsschalters im kritischen Bereich um Stromnull zusätzlich beeinflusst sein.

Die Lichtbogenspannung des Hilfsschalters sollte kleiner als die Lichtbogenspannung des Prüfschalters oder gleich dieser sein.

Wenn ein Hilfsschalter mit höherer Lichtbogenspannung verwendet wird, kann es erforderlich werden, den Hochstromkreis mit höherer betriebsfrequenter Spannung zu betreiben.

4.1.3 Hochspannungs-Intervall

Während des Hochspannungs-Intervalls wird die Schaltstrecke des Prüfschalters durch die Wiederkehrspannung beansprucht.

Die unbeeinflusste Einschwingspannung muß den Anforderungen nach IEC 56, Abschnitte 4.102, 4.105, 4.106 und 6.104.5, genügen. Geeignete Verfahren zur Ermittlung der unbeeinflussten Einschwingspannung in synthetischen Prüfkreisen können aus IEC 56, Anhang GG, ausgewählt werden.

Die Impedanz des Hochspannungskreises muß niedrig genug sein, damit gegebenenfalls ein Spannungszusammenbruch sicher erkennbar ist.

ANMERKUNG 1: Wenn der Prüfschalter niederohmige Parallel-Widerstände hat, kann ein besonderes Vorgehen notwendig sein (siehe Anhang FF).

ANMERKUNG 2: Wenn die Einschwingspannung von mehr als einer Quelle erzeugt wird, sollte der Kurvenverlauf keine merklichen Unstetigkeiten zeigen.

Grundsätzlich muß die betriebsfrequente Wiederkehrspannung für die Standard-Kurzschlußprüfschaltfolgen den Forderungen nach IEC 56, Abschnitt 6.104.7, entsprechen. Bei synthetischen Prüfungen wird die Wiederkehrspannung entweder aus dem Hochspannungskreis allein oder in Reihe mit dem betriebsfrequenten Hochstromkreis geliefert. Daher ergibt sich eine Gleichspannung oder eine kombinierte Wechsel-Gleichspannung oder eine Wechsellspannung, die in den meisten Fällen durch die begrenzte Energie des Hochspannungskreises abnimmt. Deshalb ist es nicht immer möglich, den Verlauf der Wiederkehrspannung über mindestens 0,1 s aufrechtzuerhalten.

ten, wie es in IEC 56, Abschnitt 6.104.7, gefordert wird. Abweichungen von der festgelegten Wiederkehrspannung sind statthaft, wenn die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- Der Augenblickswert der wiederkehrenden Spannung darf während der Dauer einer $1/8$ Periode der Nennfrequenz des Leistungsschalters nicht kleiner sein als der gleichwertige Augenblickswert der betriebsfrequenten Wiederkehrspannung, der in IEC 56, Abschnitt 6.104.7, festgelegt ist und mit einem kleinsten Scheitelwert von $0,95 h_{\phi} \sqrt{2} U/\sqrt{3}$ beginnt.

Hierin bedeuten:

h_{ϕ} Polfaktor des erstlöschenden Poles (1,3 oder 1,5).

U Nennspannung des Leistungsschalters.

- Unabhängig davon, ob als wiederkehrende Spannung eine exponentiell fallende Gleichspannung, eine Wechselspannung oder kombinierte Gleich-Wechselspannung angewendet wird, sollte ihr Augenblickswert (bei Gleichspannung) oder ihr Scheitelwert (bei Wechselspannung oder kombinierter Gleich-Wechselspannung) grundsätzlich so nahe wie möglich bei $\sqrt{2} U/\sqrt{3}$ gehalten werden. Auf keinen Fall darf sie in weniger als 0,1 s unter den Wert $0,5 \sqrt{2} U/\sqrt{3}$ fallen (siehe Bild 2).
- Wenn die wiederkehrende Spannung als exponential fallende Gleichspannung oder als kombinierte Gleich-Wechselspannung zu einer unangemessenen Beanspruchung des Leistungsschalters führt, verglichen mit der festgelegten wiederkehrenden Wechselspannung unter Referenz-Netzbedingungen, darf ein besser geeigneter Prüfkreis verwendet werden, wobei IEC 56, Abschnitt 6.104.7, und die oben festgelegten Grenzen zu berücksichtigen sind.

4.2 Synthetische Prüfkreise und hierauf bezogene wesentliche Anforderungen für Ausschaltprüfungen

4.2.1 Stromüberlagerungsverfahren

Diese Prüfverfahren werden durch folgende allgemeine Grundsätze beschrieben (siehe Anhang BB):

- der Strom des Hochspannungskreises wird dem Strom im Prüfschalter vor dem Wechselwirkungs-Intervall überlagert;
- der Strom des Hochstromkreises wird vor dem Wechselwirkungs-Intervall durch einen Hilfsschalter unterbrochen.

Während des Wechselwirkungs-Intervalls ist der Prüfschalter der Spannung des Hochspannungskreises ausgesetzt, dessen Impedanz den Referenz-Netzbedingungen entspricht. Dies begründet die Gültigkeit der Stromüberlagerungs-Prüfverfahren. Von mehreren bekannten Stromüberlagerungs-Prüfverfahren soll nur das mit paralleler Stromüberlagerung nachstehend behandelt werden, weil dieses Prüfverfahren von der Mehrheit der Prüffelder angewendet wird. Die folgenden Bedingungen müssen erfüllt werden:

- a) Kreis, der den Verlauf der Einschwingspannung bestimmt
 - 1) Der Verlauf und die Größe der unbeeinflussten Einschwingspannung müssen mit den festgelegten Werten übereinstimmen.
 - 2) Im Idealfall muß der gleichwertige Schwingwiderstand Z_h (siehe Bild 3) gleich dem Quotienten $(du/dt)/(di/dt)$ im Wechselwirkungs-Intervall sein. Dabei sind du/dt die Steilheit der festgelegten Einschwingspannung und di/dt die Steilheit des festgelegten Kurzschlußstromes.
 - 3) Die Kombination der Streukapazität und der konzentrierten Kapazität C_{dh} parallel zu Z_h bewirkt die Verzögerungszeit $t_d = Z_h C_{dh}$.

- b) Induktivität des Hochspannungskreises

Die Induktivität des Hochspannungskreises muß zwischen dem 1,0fachen und 1,5fachen Wert der Induktivität, abgeleitet aus der gleichwertigen betriebsfrequenten Spannung geteilt durch den unbeeinflussten Strom, liegen.

- c) Frequenz des Überlagerungsstromes und Zeitpunkt der Strom-Überlagerung

Die Frequenz des Überlagerungsstromes muß vorzugsweise im Bereich von 500 Hz, mit einer unteren Grenze von 250 Hz und einer oberen von 1 000 Hz liegen.

Die Zuschaltung des Überlagerungsstromes ist so einzustellen, daß die Zeit, in der der Prüfschalter durch diesen Strom allein beaufschlagt wird, die Dauer einer $1/4$ Periode der Frequenz des Überlagerungsstromes – maximal 500 µs – nicht überschreitet.

Um einen unzulässigen Einfluß auf den Kurvenverlauf des betriebsfrequenten Stromes zu vermeiden, beträgt die untere Grenze der Frequenz des Überlagerungsstromes 250 Hz.

Die höchste Frequenz des Überlagerungsstromes ist durch den Bereich der wesentlichen Änderung der Lichtbogen Spannung bestimmt. Dieser Bereich muß kleiner sein als die Zeit, in der der Lichtbogen durch den Überlagerungsstrom allein gespeist wird. Um dies zu erreichen, sollte die Periodendauer der Überlagerungsfrequenz mindestens 4mal größer sein als der Bereich der wesentlichen Änderung der Lichtbogen Spannung (siehe Anhang BB).

ANMERKUNG: Es sollte darauf geachtet werden, daß der Leistungsschalter nicht möglicherweise überbeansprucht wird, wenn die Zeit, während der Überlagerungsstrom durch den Prüfschalter fließt, kleiner als 200 µs ist.

d) Kurvenform des Überlagerungsstromes

Die unbeeinflusste Steilheit im Stromnull (di/dt) des Überlagerungsstromes muß der des unbeeinflussten betriebsfrequenten Stromes entsprechen.

Der Überlagerungsstrom darf mindestens 100 µs vor dem Stromnull keine Oberwellen enthalten.

4.2.2 Spannungsüberlagerungsverfahren

Von mehreren bekannten Spannungsüberlagerungsverfahren soll nur das mit Serienspannungsüberlagerung nachstehend durch folgende allgemeine Grundsätze beschrieben werden (siehe auch Anhang CC):

- die Spannung des Hochspannungskreises wird dem Prüfschalter nach dem Wechselwirkungs-Intervall zugeführt.
- die Beaufschlagung des Prüfschalters mit der wiederkehrenden Spannung erfolgt durch einen Hilfsschalter mit Parallelkapazität.
- während des Hochstrom- und des Wechselwirkungs-Intervalls ist der Prüfschalter nur mit dem Hochstromkreis verbunden.

Wenn das Spannungsüberlagerungsverfahren zur Prüfung des thermischen Verhaltens des Leistungsschalters verwendet werden soll, das gilt für Prüfungen unter Klemmenkurzschlußbedingungen einschließlich der Anfangseinschwingspannung oder unter Abstandskurzschlußbedingungen, so ist es notwendig, die Gültigkeit der Prüfschaltung für das Wechselwirkungs-Intervall nachzuweisen. Dies ist zwischen Hersteller, Prüffeld und Betreiber zu vereinbaren.

Bei Prüfungen des dielektrischen Verhaltens eines Leistungsschalters müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- die Lichtbogenspannung des Hilfsschalters sollte kleiner oder gleich der des Prüfschalters sein. Diese Bedingung gilt als erfüllt, wenn der Scheitelwert der Lichtbogenspannung bei der Löschung für beide Leistungsschalter näherungsweise gleich ist (siehe Anmerkung in Abschnitt 4.1.2).
- die Impedanz des Hochspannungskreises muß klein genug sein, damit sich gegebenenfalls auftretende Wieder- oder Rückzündungen ausbilden können.

Aus diesem Grunde muß die Kapazität parallel zum Hilfsschalter mindestens 10 nF betragen. Es ist darauf zu achten, daß keine unzulässige Verzerrung des Stromes vor dem betriebsfrequenten Stromnull auftritt.

- Bei der Zusammenschaltung von Hochstrom- und Hochspannungskreis darf keine Pause auftreten.

ANMERKUNG: Für Abstandskurzschlußprüfungen darf zusätzlich zu dem Spannungsüberlagerungskreis für die speiseseitige Einschwingspannung ein Stromüberlagerungskreis für die leitungseitige Einschwingspannung an den leitungsseitigen Anschluß des Prüfschalters geschaltet werden.

4.2.3 Prüfverfahren mit 2fach-Überlagerung (Transformator- oder Skeats-Kreis)

Dieses Verfahren kann durch folgende allgemeine Grundsätze beschrieben werden (siehe auch Anhang DD):

- Strom und Spannung werden von derselben Quelle geliefert.
- die wiederkehrende Wechselfrequenz liefert ein Transformator, der primärseitig mit dem Hochstromkreis verbunden ist.
- die Wiederkehrspannung wird über eine Impedanz (üblicherweise ein Widerstand) an den Prüfschalter angelegt.

Der Hilfsschalter unterbricht den Strom vor dem Prüfschalter. In diesem Kurzzeitbereich (üblicherweise etwa 10 µs) wird der Wert di/dt des Stromes, der durch den Prüfschalter fließt, vermindert.

Der Prüfkreis ist daher nicht für Prüfungen anwendbar, wenn ein thermisches Versagen des Prüfschalters erwartet werden muß.

Der Prüfkreis ist für die Prüfung des dielektrischen Verhaltens von Leistungsschaltern geeignet.

Der Prüfkreis kann für Einschaltprüfungen verwendet werden.

Der Prüfkreis kann vorteilhaft für die volle Spannungsbeaufschlagung bei 2 (oder mehreren) Schaltspielen angewendet werden, z. B. bei der Ein- und Ausschaltung bei einer CO-Schaltfolge, oder bei beiden Ausschaltungen in einer O-t-CO Schaltfolge oder für aufeinanderfolgende Stromnulldurchgänge bei Ausschaltungen (siehe Anhang DD).

4.2.4 Andere synthetische Prüfverfahren

Andere Prüfverfahren können richtig und vorteilhaft für die Prüfung von Leistungsschaltern mit besonderen Eigenschaften oder bei der Prüfung von Leistungsschaltern für spezielle Schaltfälle sein. Obgleich diese Verfahren nicht

in dieser Norm behandelt werden, können sie angewendet werden, vorausgesetzt, ihre Wirkungsweise ist überschaubar, und sie sind zwischen Hersteller und Betreiber vereinbart.

Synthetische Prüfverfahren für 3phasige Kurzschluß-Ausschaltprüfungen und Laststrom-Schaltprüfungen sind bekannt. Dennoch werden für einige Fälle keine Anforderungen in IEC 56 angegeben (beispielsweise Werte der Einschwingspannung für die letztlöschenden Phasen in 3phasigen Kreisen). In anderen Fällen fehlt noch die Erfahrung. Um den heutigen Wissensstand zum Ausdruck zu bringen und um diese Prüfverfahren zur Verfügung zu haben, werden sie in folgenden Anhängen beschrieben:

- Anhang FF – Spezielle Verfahren für die Prüfung von Leistungsschaltern mit Parallel-Ausschaltwiderständen
- Anhang HH – Synthetische Prüfverfahren für 3phasige Prüfungen.

5 Kurzschluß-Einschaltprüfungen

5.1 Grundlagen und allgemeine Anforderungen für synthetische Einschaltprüfverfahren

Während einer Einschaltung auf einen Kurzschluß liegt an der Schaltstrecke des Leistungsschalters eine Wechselspannung mit einem Effektivwert $U/\sqrt{3}$, welche einen Durchbruch der Schaltstrecke verursacht. Nach diesem Zeitpunkt wird der Leistungsschalter durch den Einschaltstrom, ausgedrückt durch seine größte Amplitude $\hat{i}$ – siehe Bild 4 – beansprucht (siehe IEC 56, Abschnitt 4.103).

In einem synthetischen Prüfkreis wird die angelegte Spannung durch eine getrennte Spannungsquelle geliefert. Den Kurzschlußstrom liefert ein Hochstromkreis mit verringerter Spannung. Der letztere wird unmittelbar nach dem Durchbruch der Schaltstrecke mittels einer schnellen Einschaltvorrichtung, beispielsweise mit einer Einschalt-Funkenstrecke, zugeschaltet.

Jedes gewählte, beliebige, synthetische Prüfverfahren muß den Leistungsschalter hinreichend beanspruchen. Allgemein ist Gleichwertigkeit dann gegeben, wenn das Prüfverfahren alle Anforderungen der folgenden Abschnitte erfüllt.

Grundlegende Intervalle

Vor dem Einschalten widersteht der Leistungsschalter der an seinen Anschlüssen liegenden Nenn-Leiter-Erde-Spannung, während der Einschaltung führt er den Nenn-Kurzschlußstrom. Bei genauerer Betrachtung der Spannungs- und Strombeanspruchungen während der Einschaltprüfung – Bild 4 – erkennt man drei Intervalle:

- Hochspannungs-Intervall

Das Hochspannungs-Intervall ist die Zeit von der Einleitung der Prüfung mit dem Leistungsschalter in offener Stellung bis zum Zeitpunkt des Durchbruchs der Schaltstrecke.

- Vorzünd-Intervall

Das Vorzünd-Intervall während der Einschaltbewegung des Leistungsschalters ist die Zeit vom Zeitpunkt des Durchbruchs der Schaltstrecke bis zum Berühren der Kontakte.

- Verklünnungs-Intervall

Das Verklünnungs-Intervall während der Einschaltbewegung des Leistungsschalters ist die Zeit von der Kontaktberührung bis zum Erreichen der vollständig geschlossenen Stellung (Verklünnung).

5.1.1 Hochspannungs-Intervall

In diesem Intervall muß der Leistungsschalter durch den Prüfkreis so beansprucht werden, daß die Anfangsbedingungen für das Vorzünd-Intervall innerhalb der festzulegenden Grenzabweichungen mit den Referenz-Netzbedingungen übereinstimmen.

Deshalb sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- die angelegte Spannung muß die Anforderungen nach IEC 56, Abschnitt 6.104.1, erfüllen.
- die Phasenverschiebung zwischen der angelegten Spannung und dem Kurzschlußstrom muß dem Nenn-Leistungsfaktor des Prüfkreises innerhalb der Grenzabweichungen nach IEC 56, Abschnitt 6.103.1, entsprechen.

Bei Leistungsschaltern mit hoher Einschaltgeschwindigkeit und demzufolge kurzer Vorzündzeit kann jedoch eine verringerte angelegte Spannung angewendet werden, wenn die größte Vorzündzeit, ausgewertet nach Abschnitt 5.3, die Zeit $1/\omega$ s (3,2 ms bei 50 Hz und 2,7 ms bei 60 Hz), wie in Bild 5 gezeigt, nicht überschreitet.

5.1.2 Vorzünd-Intervall

Während des Vorzünd-Intervalls wird der Leistungsschalter durch stromabhängige elektrodynamische Kräfte und durch die verschlechternden Wirkungen der Lichtbogenenergie beansprucht. Im allgemeinen setzt sich der Strom aus drei Komponenten zusammen:

- dem Anfangs-Einschwingeneinschaltstrom ITMC
- den Gleich- und Wechselstrom-Komponenten des Kurzschlußstromes.

Abhängig vom Einschaltaugenblick und der Leistungsschalterkonstruktion sind zwei typische Fälle möglich:

- der Durchbruch erfolgt nahe dem Scheitel der angelegten Spannung; ein fast symmetrischer Strom wird eingeleitet. Die Vorlichtbogenenergie und der Anfangs-Einschwingeinschaltstrom sind relativ groß.
- der Durchbruch erfolgt nahe dem Nulldurchgang der angelegten Spannung; ein unsymmetrischer Strom wird eingeleitet. Die Vorlichtbogenenergie und der Anfangs-Einschwingeinschaltstrom sind vernachlässigbar, ausgenommen bei ungleichzeitigem Einschalten eines Poles mit mehreren Schaltstrecken.

ANMERKUNG: Da der Anfangs-Einschwingeinschaltstrom nicht in IEC 56, Abschnitt 4.103, festgelegt ist, wird ein Wert, der die Vorzündung aufrecht erhält, als ausreichend betrachtet.

5.1.3 Verklüppungs-Intervall und vollständig geschlossene Stellung

Während dieser Intervalle hat der Leistungsschalter unter Berücksichtigung der anhaltenden stromabhängigen elektrodynamischen Kräfte und der Reibungskräfte infolge der möglichen Kontaktaufrauung zu schließen. Deshalb muß während dieser Intervalle der Einschaltstrom IEC 56, Abschnitt 4.103, entsprechen.

5.2 Synthetischer Prüfkreis und hierauf bezogene wesentliche Anforderungen für Einschaltprüfungen

5.2.1 Prüfkreis

Der Prüfkreis nach Bild 6 besteht aus zwei Kreisen, dem Hochstromkreis und dem Hochspannungskreis.

- Der Hochspannungskreis, der im wesentlichen aus einem Transformator kleiner Leistung besteht, liefert die angelegte Spannung während des Hochspannungs-Intervalls und während des Vorzünd-Intervalls den Anfangs-Einschwingeinschaltstrom durch die Entladung des dafür vorgesehenen Kreises.
- Der Hochstromkreis liefert den Einschaltstrom während des Vorzünd- und des Verklüppungs-Intervalls.

5.2.2 Besondere Anforderungen

Bei der synthetischen Einschaltprüfung ist die Phasenverschiebung zwischen der angelegten Prüfspannung und dem Kurzschlußstrom von folgenden Einflußgrößen abhängig:

- Phasenverschiebung zwischen der Spannung der Stromquelle u_1 und der Spannung der Spannungsquelle u_2
- Verzögerungszeit der Einschaltfunkenstrecke
- kleinste Durchbruchspannung der Einschaltfunkenstrecke.

Die größte Phasenverschiebung zwischen der angelegten Spannung und dem Kurzschlußstrom darf (90 ± 27) elektrische Grade betragen.

Der Überlagerungsstrom des Hochspannungskreises stellt vor dem Einschalten der schnellen Einschaltfunkenstrecke den Vorüberschlag sicher. Deshalb muß die Zeitkonstante des Kreises für den Anfangs-Einschwingeinschaltstrom größer als die Verzögerungszeit der Einschaltfunkenstrecke sein.

ANMERKUNG: Die Spannung u_2 kann von einer Wechsel- oder Gleichspannungsquelle geliefert werden.

5.3 Auswertung der größten Vorzündzeit

Zur Entscheidung, ob für die Einschaltprüfung eine verringerte, angelegte Spannung ausreicht, muß die größte Vorzündzeit des Leistungsschalters festgestellt werden (siehe Abschnitt 5.1.1). Diese größte Vorzündzeit muß in vorhergehenden direkten Prüfungen mit voller Spannung und größtmöglichem Kurzschlußstrom ermittelt werden. Zur Absicherung muß die Vorzündung im Scheitel der Spannungsteilschwingung einsetzen. Der Strom muß den ausschlaggebenden Durchbruch während der Vorzündung sicherstellen.

Innerhalb der Nennschaltfolgen gehen den Einschaltungen Ausschaltungen voraus, z. B.

$O-t-CO-t'-CO$ oder $CO-t''-CO$.

Daher sind Prüfungen mit folgenden Nennschaltfolgen auszuführen:

$O-t-CO-t'-CO$ mit den Zeitintervallen:

$t = 3 \text{ min}$ für Leistungsschalter, die nicht für Schnellwiedereinschaltung bestimmt sind

$t = 0,3 \text{ s}$ für Leistungsschalter, die für Schnellwiedereinschaltung bestimmt sind

$t' = 3 \text{ min}$.

oder $CO-t''-CO$ mit dem Zeitintervall:

$t'' = 15 \text{ s}$.

HAUPTABSCHNITT ZWEI – BESONDERE ANFORDERUNGEN FÜR DIE DURCHFÜHRUNG SYNTHETISCHER EINSCHALT- UND AUSSCHALTPRÜFUNGEN nach IEC 56, Abschnitte 6.102 bis 6.111

IEC 56, Abschnitt 6.102 bis 6.111, gilt auch für synthetische Prüfungen. In einigen Fällen sind jedoch besondere Techniken notwendig, die in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden. Die Numerierung der Abschnitte bezieht sich auf die entsprechenden Abschnitte von IEC 56.

6.102.1.3 Prüfung in mehreren Teilen

Synthetische Prüfverfahren für Leistungsschalter mit niederohmigen Parallelwiderständen sind in Anhang FF beschrieben.

6.102.2 Anordnung des Leistungsschalters bei den Prüfungen

Synthetische Prüfverfahren für dreiphasige Prüfungen siehe Anhang HH.

6.102.9 Leistungsschalter mit kurzer Lichtbogenzeit

Um synthetische Prüfungen unter gleichen Voraussetzungen wie bei direkten Prüfungen durchführen zu können, ist es üblicherweise erforderlich, durch Anwendung spezieller Fortzündkreise die Lichtbogenzeit des Prüfschalters auf die notwendige Anzahl der Nulldurchgänge des betriebsfrequenten Stromes zu verlängern. Fortzündverfahren zur Verlängerung der Lichtbogenzeit sind in Anhang JJ beschrieben.

ANMERKUNG: Ein Verfahren mit mehrfacher Zuschaltung des Hochspannungskreises erfordert praktisch den gleichen Prüfablauf wie eine direkte Prüfung. Der Hochspannungskreis wird nach jedem Stromnulldurchgang mit dem Prüfschalter verbunden. Falls der Prüfschalter in einem Stromnulldurchgang unterbricht, wird das Verfahren abgebrochen. Falls der Prüfschalter wiederzündet, wird der Hochstromkreis durch Wiederzünden des Hilfsschalters wieder verbunden. Zur gleichen Zeit wird der Hochspannungskreis getrennt und beim nächsten Stromnulldurchgang mit umgekehrter Polarität wieder zugeschaltet. Das geschilderte Verfahren wird wegen seiner Kompliziertheit jedoch selten angewendet.

Das „Schritt-für-Schritt“-Verfahren ist das bei den meisten synthetischen Prüfungen angewendete Verfahren. Dieses Verfahren wird als eine ausreichende Annäherung an das direkte Prüfverfahren angesehen.

Die Lichtbogenzeit wird durch thermisches Wiederzünden verlängert. Da dieses Verfahren ermöglicht, das Fortzünden des Prüfschalters unter allen Bedingungen zu erzwingen, ist darauf zu achten, daß der Prüfschalter nicht auch in einem Stromnulldurchgang fortgezündet wird, in dem er unterbrechen kann. Es ist daher notwendig, für alle Prüfschaltfolgen (Klemmenkurzschluß, Abstandskurzschluß und Asynchronbedingungen) jeweils die kürzeste Lichtbogenzeit zu ermitteln. Hierzu sind mindestens zwei Schaltungen erforderlich, eine mit Wiederzünden, die andere mit endgültiger Stromunterbrechung. Der Unterschied der Lichtbogenzeit der beiden Schaltungen ist auf 1 ms begrenzt.

Die Ausschaltung nach der kürzesten Lichtbogenzeit ist die erste gültige Ausschaltung.

Die andere Ausschaltung wird auch ausgeführt, um zu zeigen, daß das Wiederzünden bei einem frühen Stromnulldurchgang, zum Beispiel nach einer Lichtbogenzeit etwas unterhalb der kürzesten Lichtbogenzeit, wie bei einer Ausschaltung nach der maximalen Lichtbogenzeit zwischen den Lichtbogenkontakten stattfinden würde.

ANMERKUNG 1: Die zum Nachweis des korrekten Verhaltens bei frühen Stromnulldurchgängen erforderlichen Schaltungen werden aufgrund der kurzen Lichtbogenzeit üblicherweise unbedeutend zur Kontaktabnutzung beitragen. Es sollte deshalb keine Instandsetzung als Folge dieser Prüfungen erforderlich sein.

ANMERKUNG 2: Das bei der Bestimmung der kürzesten Lichtbogenzeit auftretende Wiederzünden stellt kein Versagen des Prüfschalters dar. Es ist jedoch der Nachweis wichtig, daß die Wiederzündung nur zwischen den Lichtbogenkontakten stattgefunden hat. Dies kann durch die Stehspannungs-Koordination für dielektrisches Wiederzünden, zumindest für die entsprechende Kontaktstellung, nachgewiesen werden. Bei Anwendung des Stromüberlagerungsverfahrens ist die Unterbrechung des Schwingstromes einige Teilschwingungen nach der Wiederzündung oft ein nützliches Mittel des Nachweises. Eine eingehende Inspektion von Schirmen, Lichtbogen- und Hauptkontakten usw. sollte zum Nachweis korrekten Verhaltens ebenfalls durchgeführt werden.

Bei Abstandskurzschlußprüfungen ist das Wiederzünden üblicherweise thermischem Versagen zuzuordnen, so daß die Stehspannungs-Koordination nicht betroffen ist.

ANMERKUNG 3: Obgleich sich dieser Abschnitt auf Leistungsschalter mit kurzer Lichtbogenzeit bezieht, gelten im wesentlichen dieselben Anforderungen für Leistungsschalter mit langer Lichtbogenzeit.

6.106 Standard-Kurzschlußprüfschaltfolgen

Die Schaltfolgen bei synthetischer Prüfung der Prüfschaltfolgen 1, 2, 3 und 5 zusammen mit verschiedenen Verfahren zur Durchführung der Prüfschaltfolge 4 zeigt Tabelle 1.

Symbole:

- C_s Einschaltung mit festgelegten Werten in synthetischer Prüfschaltung.
 O_s Ausschaltung mit festgelegten Werten in synthetischer Prüfschaltung.
 C_D Einschaltung mit festgelegtem Einschaltstrom, aber verringerter angelegter Spannung des Hochstromkreises.
 O_D Ausschaltung mit festgelegtem Ausschaltstrom, aber mit verringerten Einschwing- und betriebsfrequenten Wiederkehrspannungen des Hochstromkreises.

ANMERKUNG 1: Wegen der Besonderheiten synthetischer Prüfungen kann es schwierig sein, die festgelegten Pausenzeiten der Nennschaltfolgen einzuhalten. Siehe DIN VDE 0670 Teil 104, Abschnitt 6.105.1.

ANMERKUNG 2: Um alle Prüfanforderungen zu erfüllen, können mehr Schaltspiele erforderlich werden, als für die Nennschaltfolge vorgesehen sind. In solchen Fällen darf der Leistungsschalter nach der Anzahl der Schaltspiele, die denen der Nennschaltfolge entsprechen, instandgesetzt werden.

6.106.1-2-3 *Prüfschaltfolgen 1, 2 und 3*

Für die Prüfschaltfolgen 1, 2 und 3 sind nur Ausschaltprüfungen festgelegt.

6.106.4 *Prüfschaltfolge 4*

Vorgehensweisen, die Nennschaltfolge in synthetischer Prüfung mit den festgelegten Prüfwerten durchzuführen, sind bekannt (siehe Tabelle 1).

Falls diese Vorgehensweisen wegen Beschränkungen des Prüffeldes nicht möglich sind, sind die folgenden Verfahren anwendbar.

Verfahren 1

Die erste Ausschaltung vor der Pausenzeit $t = 0,3$ s oder $t'' = 15$ s kann als O_D -Schaltung ausgeführt werden.

Der Zweck der zusätzlichen einfachen Ausschaltprüfung O_s ist:

- Erfüllung der Anforderung von 2 oder 3 Ausschaltungen mit festgelegten Werten.
- Beschaffung der notwendigen Informationen für die Einstellung der Steuerung des Auslösestromes für die nachfolgenden Schaltfolgen.

Die Bedingungen für diese Prüfung in zwei Teilen sind:

- Die Ausschaltung O_D muß unter gleichen Lichtbogenzeitbedingungen durchgeführt werden, wie bei einer direkten Prüfung mit den festgelegten Prüfwerten. Gewöhnlich sind dafür Fortzündverfahren erforderlich (siehe Anhang JJ).
- Die Steuerung des Auslösestromes für die Ausschaltungen der Schaltfolge muß mit den Anforderungen nach IEC 56, Abschnitt 6.102.9 B) 1), übereinstimmen.
- Die Einstellung der Steuerung des Auslösestromes für die einfache Ausschaltung O_s muß so sein, daß die Lichtbogenzeit die gleiche ist wie für eine Ausschaltung O_D . Für diesen Nachweis kann mehr als eine Prüfung nötig sein.

Verfahren 2a und 2b

Ein- und Ausschaltprüfungen dürfen nach IEC 56, Abschnitte 6.106.4.1 und 6.106.4.2, als getrennte Prüfschaltfolgen 4a und 4b durchgeführt werden.

Wenn es nicht möglich ist, das Verfahren 2a mit einem Leistungsschalter mit dem Zeitintervall $t = 0,3$ s oder $t'' = 15$ s durchzuführen, kann das Verfahren 2b mit der ersten Ausschaltung O_D und Lichtbogenzeitbedingungen nach Verfahren 1 angewendet werden.

Einschaltungen bei kleineren angelegten Spannungen als in IEC 56, Abschnitt 6.104.1, festgelegt, sind nur erlaubt, wenn die Anforderungen nach Abschnitt 5.1.1 eingehalten werden.

Verfahren 3a und 3b

Wenn es nicht möglich ist, bei den Verfahren 2a und 2b die Einschaltungen mit festgelegter Spannung durchzuführen, ist unter bestimmten Voraussetzungen das Verfahren 3a erlaubt (siehe Abschnitt 5.1.1).

Wenn es nicht möglich ist, das Verfahren 3a mit einem Leistungsschalter mit dem Zeitintervall $t = 0,3$ s oder $t'' = 15$ s durchzuführen, kann das Verfahren 3b mit der ersten Ausschaltung O_D und Lichtbogenzeitbedingungen nach Verfahren 1 angewendet werden.

6.106.5 *Prüfschaltfolge 5*

Mit einem Leistungsschalter mit kurzer Lichtbogenzeit müssen, unabhängig von der Nennschaltfolge, drei Ausschaltungen durchgeführt werden.

ANMERKUNG: Zur Absicherung der richtigen Beanspruchung und der Feststellung der kleinsten Lichtbogenzeit des Leistungsschalters darf eine eigene Prüfung durchgeführt werden. Bei dieser Prüfung ist, wie

für die erste gültige Prüfung beschrieben, der Auslösestrom so zu steuern, daß die Kontakttrennung in oder gerade vor der kleinen Teilschwingung erfolgt. Am Ende dieser Teilschwingung muß die auftretende Einschwingspannung zu einer Wiederzündung des Prüfschalters führen. Es ist wichtig festzustellen, daß diese Wiederzündung nur zwischen den Lichtbogenkontakten erfolgt ist. Dies zeigt die richtige Isolationskoordination bei dielektrischen Wiederzündungen.

Bei Prüfungen mit unsymmetrischen Strömen werden durch die Gleichstromkomponente die Stromsteilheit di/dt und die Einschwingspannung teilweise verändert. Bei synthetischen Prüfungen müssen diese Veränderungen berücksichtigt werden durch:

- Steuerung der Gleichstromkomponente des Stromes durch die Wahl des Zeitpunktes der Einleitung des Kurzschlusses;
- Verringerung der Stromsteilheit di/dt im Stromnull beim Stromüberlagerungsverfahren durch Verringerung der Ladespannung des Hochspannungskreises.

Die Gleichung zur Berechnung der verringerten Ladespannung lautet:

$$U_{HA} = U_{HS} \left[\sqrt{1 - p^2} \pm \frac{p}{2 \pi f \cdot \tau} \right] \quad \begin{array}{l} + \text{ für große Teilschwingung} \\ - \text{ für kleine Teilschwingung} \end{array}$$

wobei:

- U_{HA} verringerte Ladespannung für Prüfung mit unsymmetrischem Ausschaltstrom
- U_{HS} Ladespannung für die gleichwertige symmetrische Prüfung
- p Bezogener Wert der Gleichstromkomponente im Stromnull
- τ Abklingzeitkonstante (45 ms) nach IEC 56

Ausgehend von der Unsymmetrie bei Kontakttrennung p_{cs} kann p nach folgender Formel berechnet werden:

$$p = p_{cs} \cdot e^{-\frac{t_a}{\tau}}$$

wobei:

- t_a Lichtbogenzeit.

c) Anpassung der Einschwingspannung

1) Einfaches Verfahren

Für Einschwingspannungen mit einer Zeit $t_2 < 500 \mu s$ kann ein einfaches Verfahren angewendet werden. Dieses hat als Voraussetzung, daß die Einschwingspannung (u_1, t_1, u_c, t_2) proportional der Veränderung di/dt angepaßt wird.

Dies bedeutet, daß die Anpassung der Einschwingspannung selbsttätig mit der Verringerung von di/dt entsprechend b) erfolgt.

2) Für Einschwingspannungen mit Zeiten $t_2 > 500 \mu s$ sind andere Anpassungen und/oder Kreisänderungen notwendig. Die geforderten Werte der unbeeinflussten Einschwingspannung sind in Tabelle 2 angegeben.

ANMERKUNG: Die Tabellen 4 und 5 geben Werte der Einschwingspannung für einen Polfaktor 1,5 und/oder eine Abklingzeitkonstante von 120 ms. Diese Werte sind keine Nennwerte nach IEC 56. Werte der Einschwingspannung für andere Abklingzeitkonstanten, als in den Tabellen angegeben, dürfen mit genügender Genauigkeit durch lineare Inter- oder Extrapolation bestimmt werden.

d) Anpassung der Wiederkehrspannung

Bei einer Prüfung mit Lichtbogenlöschung am Ende einer großen Teilschwingung, sollte der Gleichspannungsanteil der verringerten Wiederkehrspannung die Wiederkehrspannung (eines gleichwertigen direkten Prüfkreises) über den Zeitbereich der ersten $1/4$ -Teilschwingung abdecken.

Bei Lichtbogenlöschung am Ende einer kleinen Stromteilschwingung kann der Gleichspannungsanteil der verringerten Wiederkehrspannung den der Referenz-Netzbedingungen nicht abdecken, weil die betriebsfrequente Wiederkehrspannung mit dem Beginn der Einschwingspannung steigt.

Nach Vereinbarung zwischen Prüffeld, Hersteller und Betreiber darf berücksichtigt werden, daß zusammen mit den Prüfschaltfolgen mit symmetrischem Ausschaltstrom das Ausschaltvermögen des Leistungsschalters ausreichend nachgewiesen ist. Eine Prüfung mit Lichtbogenlöschung des unsymmetrischen Stromes nach der kleinen Teilschwingung mit kleinerem di/dt und kleinerer Einschwingspannung wird als leichter angesehen als eine Prüfung mit symmetrischem Ausschaltstrom. Wenn jedoch die uneingeschränkte Prüfung dieses Schaltfalles erforderlich ist, gibt es drei Möglichkeiten:

- Die Prüfung wird mit unsymmetrischem Ausschaltstrom und der Ladespannung des Hochspannungskreises wie bei der Prüfung mit symmetrischem Ausschaltstrom durchgeführt. Da sowohl di/dt als auch die Einschwingspannung erhöht sind, ist die hierbei auftretende erheblich höhere Beanspruchung als bei einer gleichwertigen direkten Prüfung zu beachten.

- 2) Die Prüfung wird wie unter 1) durchgeführt, wobei die Induktivität des Hochspannungskreises jedoch umgekehrt proportional zum Verhältnis von di/dt erhöht ist. In diesem Fall ist der Wert di/dt genau, aber die Einschwingspannung höher.
- 3) Die Prüfung wird mit einer Wechselspannung als Wiederkehrspannung durchgeführt.

6.109 Abstandskurzschlußprüfungen

Bei synthetischen Abstandskurzschlußprüfungen müssen die Nenngrößen des Abstandskurzschlußkreises IEC 56 entsprechen und der Leitungskreis muß während des gesamten Wechselwirkungs-Intervalls im stromführenden Kreis liegen.

Bei Prüfkreisen mit Stromüberlagerung darf der Abstandskurzschlußkreis in Reihe mit dem Hochspannungskreis liegen. Die Induktivität des Abstandskurzschlußkreises addiert sich zu L_{H1} , siehe Bild BB1.

Durch den Abstandskurzschlußkreis im Hochspannungskreis können Oberwellen im Schwingstromverlauf auftreten. Um die Forderungen des Abschnitts 4.2.1 d) zu erfüllen, sollten diese Oberwellen so gedämpft werden, daß sie den Strom im Bereich der wesentlichen Änderung der Lichtbogen Spannung nicht beeinflussen oder bis spätestens 100 μ s vor Stromnull abgeklungen sind.

In den Kreis, der die Einschwingspannung bestimmt, darf ein Reihenwiderstand eingefügt werden. In den meisten Fällen wird dieser auf die Anfangsteilheit der Einschwingspannung abgestimmte Widerstand für die notwendige Dämpfung ausreichen.

ANMERKUNG: Wenn bei Abstandskurzschlußprüfungen Leitung und Impedanz des Spannungskreises auf einer Seite des Prüfschalters liegen, sollten Spannungsaufteilung und Messung der unbeeinflussten Einschwingspannung besonders beachtet werden.

6.111 Synthetische Verfahren zum Schalten kapazitiver Ströme

Siehe Anhang GG.

Tabelle 1: Schaltfolgen für synthetische Prüfung der Prüfschaltfolgen 1, 2, 3, 4 und 5

Prüf-schaltfolge	Synthetische Prüfung		Nenn-Schaltfolge	
			$O-t-CO-t'-CO$ $t = 0,3 \text{ s oder } 3 \text{ min}$ $t' = 3 \text{ min}$	$CO-t''-CO$ $t'' = 15 \text{ s}$
1, 2, 3	Ausschaltungen*)	a)	$O_s-t-O_s-t'-O_s$	$O_s-t''-O_s$
		b)	O_s $O_D-t-O_s-t'-O_s$	O_s $O_D-t''-O_s$
4	Vollständige Nenn-Schaltfolge		$O_s-t-C_sO_s-t'-C_sO_s$	$C_sO_s-t''-C_sO_s$
	Verfahren 1		O_s $O_D-t-C_sO_s-t'-C_sO_s$	C_sO_s $C_sO_D-t''-C_sO_s$
	Verfahren 2	a)	$C_s-t'-C_s$ $O_s-t-C_D O_s-t'-C_D O_s$	$C_s-t''-C_s$ $C_D O_s-t''-C_D O_s$
		b)	$C_s-t'-C_s$ O_s $O_D-t-C_D O_s-t'-C_D O_s$	$C_s-t''-C_s$ $C_D O_s$ $C_D O_D-t''-C_D O_s$
	Verfahren 3	a)	$O_s-t-C_D O_s-t'-C_D O_s$	$C_D O_s-t''-C_D O_s$
		b)	O_s $O_D-t-C_D O_s-t'-C_D O_s$	$C_D O_s$ $C_D O_D-t''-C_D O_s$
5	Ausschaltungen)))		O_s O_s O_s	
*) Zur erleichterten Durchführung der Prüfung sind Einschaltungen vor den Ausschaltungen in den Prüf-schaltfolgen 1, 2, 3 und 5 erlaubt.				
**) Nur für kurze Lichtbogenzeiten.				

Tabelle 2: Einschwingspannung nach der Ausschaltung unsymmetrischer Ströme

Nennfrequenz Hz		50												60											
Nennspannung kV		245		300		362		420		525		765		245		300		362		420		525		765	
Zeitpunkt μs		t_1 130	t_2 390	t_1 159	t_2 477	t_1 192	t_2 576	t_1 223	t_2 669	t_1 279	t_2 837	t_1 406	t_2 1 218	t_1 130	t_2 390	t_1 159	t_2 477	t_1 192	t_2 576	t_1 223	t_2 669	t_1 279	t_2 837	t_1 406	t_2 1 218
	%	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c
		Spannung (kV)																							
Unsymmetrie im Stromnull nach einer großen Teilschwingung	0	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1 137	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1 137
	5	260	363	319	445	385	536	446	621	557	775	811	1 124	260	363	319	444	384	535	445	620	557	773	810	1 121
	10	260	362	318	442	384	532	445	616	556	768	808	1 109	260	361	318	441	383	530	444	614	555	764	806	1 102
	15	259	359	317	439	382	527	443	610	553	758	804	1 091	258	358	316	436	381	525	442	606	551	753	801	1 080
	20	257	356	315	434	380	521	440	602	549	747	797	1 070	257	354	314	431	378	517	438	597	547	740	793	1 055
	25	255	351	312	428	376	514	436	593	543	734	788	1 046	254	349	311	424	374	509	434	586	540	724	783	1 027
	30	252	346	308	421	371	504	430	581	536	718	776	1 019	251	343	307	417	369	498	428	574	533	707	770	996
	35	248	339	303	412	365	494	423	568	527	701	763	988	247	336	302	407	363	487	420	560	523	688	756	962
	40	244	332	298	403	358	481	415	553	517	681	746	954	242	327	296	397	356	473	412	543	512	666	738	925
	45	238	323	291	391	350	467	405	536	504	658	728	916	236	318	289	385	347	458	401	525	499	641	719	883
	50	232	313	283	379	341	451	394	517	490	633	706	875	230	308	280	371	337	441	390	505	484	614	696	838
	55	224	301	274	364	329	433	381	496	474	604	681	829	222	296	271	356	326	422	376	482	467	584	670	788
	60	216	288	263	348	317	413	366	471	455	572	653	778	213	282	260	339	313	401	361	456	448	550	641	733
	65	206	273	251	329	302	390	349	444	433	537	621	721	203	267	248	320	298	377	344	428	426	512	608	673
	70	195	256	238	308	285	364	329	413	408	497	584	658	192	249	234	298	280	350	324	395	400	471	570	607
	75	182	237	222	284	266	334	307	378	380	451	541	587	179	229	218	273	261	319	300	359	371	423	526	532
	80	166	214	203	256	243	299	280	337	346	399	492	506	163	206	198	244	237	284	273	317	337	369	476	447
Unsymmetrie im Stromnull nach einer kleinen Teilschwingung	0	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1 137	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1 137
	5	259	364	317	446	383	539	444	626	556	783	811	1 146	259	364	318	447	383	540	445	627	556	785	812	1 150
	10	257	383	315	445	381	538	442	626	553	785	807	1 153	258	364	316	446	381	540	443	628	554	789	809	1 160
	15	255	361	313	443	378	536	438	624	549	784	802	1 157	256	362	313	445	379	539	440	628	550	790	805	1 168
	20	252	358	309	440	373	533	434	621	543	782	795	1 158	253	360	310	443	375	537	435	626	545	789	798	1 172
	25	249	354	305	435	368	528	428	616	536	777	785	1 156	250	356	306	439	370	533	430	622	539	786	790	1 174
	30	244	349	299	430	362	522	421	609	527	770	773	1 150	245	352	301	434	364	528	423	617	531	781	779	1 172
	35	239	343	293	423	355	514	412	601	517	761	759	1 142	240	346	295	428	357	521	415	610	521	774	766	1 168
	40	233	336	286	414	346	505	402	591	505	750	742	1 130	235	340	288	420	349	513	406	601	509	764	750	1 159
	45	226	327	278	405	336	494	391	578	491	736	723	1 114	228	332	280	411	339	502	395	590	496	752	732	1 147
	50	219	318	269	393	325	481	378	564	475	719	700	1 094	221	323	271	401	328	490	382	576	481	737	710	1 131
	55	210	307	258	380	312	465	364	547	457	699	675	1 070	212	313	261	388	316	476	368	561	463	720	686	1 111
	60	200	294	246	365	298	448	347	527	437	676	646	1 041	203	301	249	374	302	460	352	542	444	698	658	1 085
	65	189	280	233	348	282	428	328	504	414	649	613	1 007	192	287	236	358	286	441	334	521	421	673	626	1 055
	70	177	264	217	329	264	405	307	478	387	618	576	966	179	271	221	339	268	418	313	496	395	644	590	1 017
	75	162	245	200	306	243	378	283	448	357	581	533	917	165	252	204	317	248	393	289	467	366	609	548	972
	80	146	223	179	279	218	346	255	412	322	537	483	858	149	231	184	291	224	362	261	432	332	567	499	917
Polfaktor des erstlöschenden Poles 1,3		Abklingzeitkonstante 45 ms																							

Tabelle 3: Einschwingspannung nach der Ausschaltung unsymmetrischer Ströme

Nennfrequenz Hz		50												60											
Nennspannung kV		245		300		362		420		525		765		245		300		362		420		525		765	
Zeitpunkt μs		t_1 130	t_2 390	t_1 159	t_2 477	t_1 192	t_2 576	t_1 223	t_2 669	t_1 279	t_2 837	t_1 406	t_2 1 218	t_1 130	t_2 390	t_1 159	t_2 477	t_1 192	t_2 576	t_1 223	t_2 669	t_1 279	t_2 837	t_1 406	t_2 1 218
	%	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c	u_1	u_c
		Spannung (kV)																							
Unsymmetrie im Stromnull nach einer großen Teilschwingung	0	260	364	318	446	384	598	446	624	557	780	812	1 137	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1 137
	5	260	363	318	444	384	535	445	620	554	773	809	1 122	260	362	318	443	383	534	445	619	556	772	809	1 119
	10	259	360	317	440	382	530	443	614	554	764	805	1 104	259	359	317	439	382	528	443	612	553	761	804	1 097
	15	257	357	315	436	380	524	440	606	550	753	798	1 083	257	356	314	434	379	522	439	603	548	748	796	1 073
	20	255	352	312	430	376	516	436	597	544	740	790	1 060	255	351	311	428	375	513	435	593	543	734	787	1 047
	25	252	347	308	423	372	508	431	586	537	725	779	1 033	252	345	308	420	371	504	429	581	535	717	775	1 017
	30	249	341	304	415	366	497	424	573	529	708	766	1 003	248	339	303	412	365	493	423	567	527	698	761	983
	35	244	334	298	406	359	485	416	559	519	689	750	970	243	331	297	402	358	480	415	551	516	677	745	947
	40	239	325	292	395	352	472	407	542	507	667	732	934	238	322	291	390	350	466	405	534	504	654	727	907
	45	233	316	285	383	343	457	396	524	493	642	712	893	232	312	283	378	341	449	394	515	490	628	705	864
	50	226	305	276	369	332	439	384	504	478	615	688	849	225	301	275	363	330	431	382	493	474	599	681	816
	55	218	292	266	353	320	420	370	481	460	585	662	801	217	288	265	347	318	411	367	469	456	568	654	764
	60	209	279	255	336	307	399	354	455	440	552	631	747	208	274	253	329	304	389	351	442	436	533	623	708
	65	199	263	242	316	291	374	336	426	417	514	597	688	197	258	240	309	288	364	333	413	412	494	588	645
	70	187	245	228	294	273	347	316	394	391	473	559	622	185	240	226	286	271	336	312	379	386	450	549	576
	75	173	225	211	269	253	316	292	357	361	425	514	549	172	219	209	261	250	304	288	342	356	402	504	500
	89	157	202	191	240	229	280	261	315	327	371	463	466	156	195	189	231	226	268	260	299	321	346	452	413
Unsymmetrie im Stromnull nach einer kleinen Teilschwingung	0	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1 137	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1 137
	5	260	365	318	447	384	540	445	627	557	785	812	1 149	260	365	318	448	384	541	446	628	557	787	813	1 152
	10	259	364	317	447	382	541	444	628	555	788	811	1 158	259	365	317	448	383	542	444	630	556	792	812	1 185
	15	257	363	315	446	380	540	441	628	552	789	807	1 165	257	364	315	448	381	542	442	631	554	794	809	1 174
	20	254	361	312	444	377	538	438	626	548	789	802	1 168	255	363	313	446	378	541	439	630	549	795	804	1 181
	25	251	358	308	440	372	534	433	623	542	786	794	1 168	252	360	309	443	373	538	434	628	544	794	797	1 185
	30	248	354	304	436	367	529	426	618	534	780	784	1 166	248	356	305	439	368	534	428	624	537	790	788	1 185
	35	243	348	298	430	360	522	419	611	525	773	771	1 160	244	351	299	434	362	528	421	618	528	784	776	1 183
	40	238	342	292	422	353	514	410	602	515	763	756	1 150	239	345	293	427	354	521	412	610	518	776	762	1 177
	45	232	335	284	414	344	504	400	591	502	751	739	1 137	233	338	286	419	346	511	402	600	505	765	745	1 167
	50	224	326	276	403	333	492	388	578	487	736	718	1 120	226	330	277	409	335	500	391	588	491	752	725	1 153
	55	216	316	266	391	322	478	374	562	471	718	695	1 098	218	320	267	397	324	487	377	573	475	736	703	1 134
	60	207	304	254	377	308	462	359	544	452	697	668	1 072	206	309	256	384	311	472	362	556	456	716	676	1 111
	65	197	290	242	361	293	443	341	522	430	671	637	1 040	198	295	244	368	296	454	345	536	435	692	646	1 083
	70	185	275	227	347	275	421	321	497	405	642	601	1 001	186	280	229	350	278	432	325	512	410	664	611	1 047
	75	171	257	210	321	255	396	298	468	376	607	560	955	172	263	213	329	258	407	302	484	381	631	570	1 004
	80	155	235	191	295	232	365	271	434	342	565	511	899	157	242	193	304	235	378	275	450	348	590	523	951
Polfaktor des erstlöschenden Poles 1,3		Abklingzeitkonstante 120 ms																							