

2 Grundlagen des Transformators

2.1 Sinn und Zweck

Transformatoren ermöglichen die Umwandlung von der Spannungsebene auf beliebige Spannungsebenen. Mit Hilfe von Transformatoren können Spannungen so transformiert werden, dass Energie wirtschaftlich über längere Strecken transportiert werden kann. Des Weiteren können mit Transformatoren Netze voneinander getrennt werden, so dass durch die magnetische Kopplung Energie potentialfrei, d.h. ohne leitende Verbindung, übertragen werden kann.

2.2 Aufbau

Transformatoren bestehen aus einem gut magnetisierten Kern, den Primär und Sekundärwicklungen. Des Weiteren können diverse Konstruktionsteile wie z.B. Befestigungs- und Anschlusssteile, Ölkessel und Überwachungseinrichtungen vorhanden sein.

2.2.1 Transformatorkern von Einphasen- und Drehstromtransformatoren

2.2.1.1 Eisenquerschnitt

Der magnetische Kreis des Wechselfeldes muss mit Rücksicht auf die Wirbelstromverluste aus Blechen geschichtet sein, dabei werden heute durchweg kornorientierte 0,23 mm bis 0,35 mm starke Bleche verwendet. Die gegenseitige Isolation erfolgte früher durch aufgeklebtes Papier oder Lackierung. Heute übernimmt diese Aufgabe eine sehr dünne Silikat-Phosphatschicht, die bereits während dem Auswalzen der Bleche aufgebracht wird.

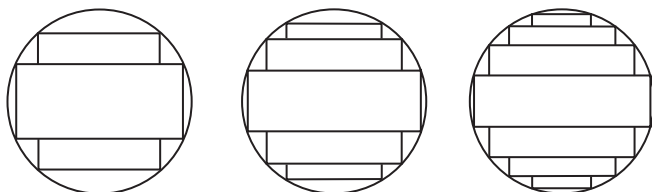


Bild 2.2.1:

Stufenweise Anpassung des Kernquerschnitts

$A_{Fe} = D^2 \cdot \pi/4 \cdot k_a \cdot f_{Fe}$ an die Kreisform

k_a geometrischer Ausnutzungsfaktor

f_{Fe} Eisenfüllfaktor

Um den Innendurchmesser der Transformatorwicklungen möglichst gut auszunützen, nähert man durch eine 5- bis 15-fache Stufung der Blechbreiten den Eisenquerschnitt (Bild 2.2.1) an die Kreisform an. Mit Rücksicht auf die Geräuschbildung und zur Erzielung einer optimalen magnetischen Leitfähigkeit werden die Blechstreifen nicht stumpf, sondern verzapft zusammengesetzt. Bei kornorientierten Blechen muss dabei zur Beibehaltung der magnetischen Vorzugsrichtung ein Schrägschnitt (Bild 2.2.2) vorgesehen werden.

2.2.1.2 Kernaufbau

Die gestuften Blechpakete werden durch Bandagen z.B. aus Glasfaser zu einem kompakten Querschnitt zusammengepresst. Ferner kann eine Verkeilung mit dem zylindrischen Wicklungsträger erfolgen. Bei großen Leistungen bringt man im Bereich des unteren und oberen Jochs zusätzlich eine kräftige Presskonstruktion an. Um Zusatzverluste zu reduzieren, ist man bestrebt, weitestgehend Pressungen mit Bolzen quer durch das Eisen zu vermeiden.

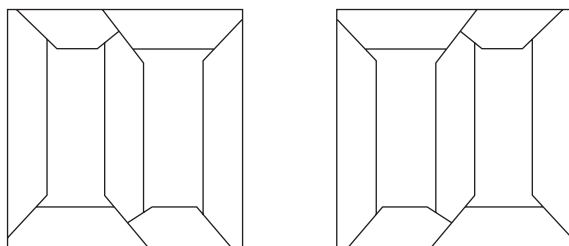


Bild 2.2.2: Schichtung eines Dreischenkelkerns mit kornorientierten Blechen

Einphasenkerne. Mit dem Kern- und dem Manteltyp (Bilder 2.2.3 und 2.2.4) bestehen zwei grundsätzliche Bauformen von Einphasentransformatoren. Allgemein bezeichnet man den von der Wicklung umschlossenen Teil des Eisenweges als Schenkel, Säule oder Kern und den äußeren Rückschluss als Joch.

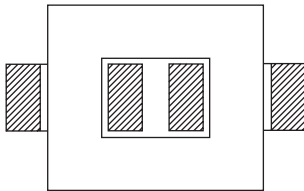


Bild 2.2.3: Aufbau eines Einphasen-Kerntransformators

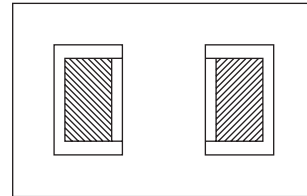


Bild 2.2.4: Aufbau eines Einphasen-Manteltransformators

Beim Einphasen-Kerntransformator ist auf jedem Schenkel die halbe Windungszahl untergebracht und der Eisenquerschnitt überall gleich. Der Einphasen-Manteltransformator trägt die gesamte Wicklung auf einem Mittelschenkel und spart durch die Aufteilung des Rückschlusses an Bauhöhe, da jede Jochhälfte nur den halben Fluss führt.

Drehstromkerne. Konzentriert man die Wicklungen von drei Einphasen-Kerntransformatoren, die an ein Drehstromsystem angeschlossen sind, jeweils auf einen der drei um 120° versetzten Schenkel, so wird in einer Leiterschleife, welche die drei zusammengestellten freien Schenkel umfasst, keine Spannung induziert. Die Kernflüsse sind wie die Strangspannungen jeweils 120° gegeneinander zeitlich verschoben und ergänzen sich in den Sternpunkten zu Null. Verbindet man die Joche miteinander, so können die freien Schenkel entfallen. Dies ergibt die als Tempeltyp bezeichnete Bauform eines symmetrischen Drehstromtransformators, die jedoch konstruktiv ungünstig ist.

Die Ausführung lässt sich vereinfachen, indem man alle drei Schenkel in eine Ebene legt (Bild 2.2.5). Es entsteht damit die Bauart des unsymmetrischen Drehstrom-Kerntransformators, in der heute die meisten Einheiten ausgeführt sind. Die Bezeichnung unsymmetrisch bezieht sich auf den Bedarf an Magnetisierungsdurchflutung für die drei Stränge, der für den mittleren auf Grund des kürzeren Eisenwegs geringer ist.

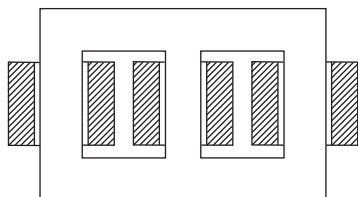


Bild 2.2.5: Aufbau eines Drehstrom-Kerntransformators (Dreischenkelnkern)

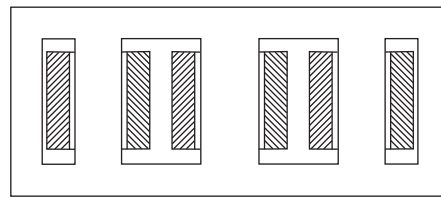


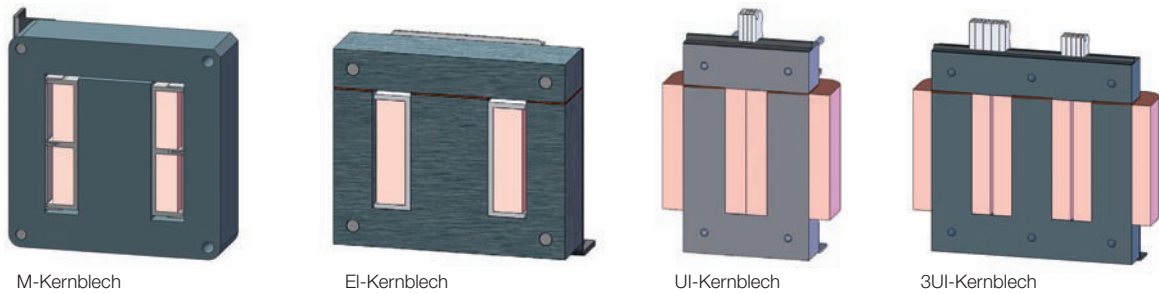
Bild 2.2.6: Drehstromtransformator mit Fünfschenkelkern

Besonders für sehr große Leistungen wird auch der Fünfschenkelkern (Bild 2.2.6) ausgeführt, der zwei zusätzliche äußere Rückschlüsse besitzt. Dadurch kann der Jochquerschnitt auf etwa 60% des Wertes der Schenkel gesenkt werden, womit man an Bauhöhe spart.

Der Transformator Kern besteht aus ferromagnetischen Stoffen (Eisen, Kobalt, Nickel).

- Bei technischen Frequenzen $< 1\text{kHz}$
Zur Reduzierung von Wirbelstromverlusten, bevorzugt aus dünnen isolierten geschichteten Elektro- oder Spezialblechen.
- Bei höheren Frequenzen $> 1\text{kHz}$
In gleicher Absicht aus besonders dünnen gewickelten Ring- bzw. Schnittbandkernen
- Bei hohen Frequenzen $> 20\text{kHz}$
Aus sogenannten Ferriten (Oxidkeramik), die das Magnetfeld bei begrenzter Aussteuerbarkeit ebenfalls gut leiten und einen sehr hohen Volumenwiderstand aufweisen.

Der Kern von Kleintransformatoren ist meist aus Blechen genormter Größe (DIN 41302 ff) und geeigneter Blechqualität hergestellt. Dabei werden heutzutage bevorzugt EI-, UI-, oder 3UI- Blechformen entsprechend Bild 2.2.7 verwendet.



M-Kernblech

EI-Kernblech

UI-Kernblech

3UI-Kernblech

Bild 2.2.7: Transformatorkerne

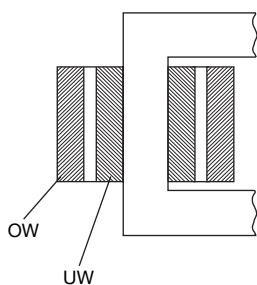
2.2.2 Wicklung

Nach der grundsätzlichen Ausführung lassen sich bei Transformatoren Zylinderwicklungen und Scheibenwicklungen unterscheiden. Innerhalb dieser zwei Typen bestehen je nach den Anforderungen durch die Höhe der Spannung, der Leistung und der besonderen Betriebsbedingungen sehr vielfältige Konstruktionen.

2.2.2.1 Zylinderwicklung

Meist wird die Zylinderwicklung (Bild 2.2.8) bevorzugt, wobei aus isolationstechnischen Gründen die Unterspannungswicklung dem Eisenkern zugewandt ist. Für niedrige Betriebsspannungen werden ein- oder mehrlagige Röhren aus Profilleitern hergestellt, die bei größeren Stromstärken in parallele Teilleiter aufgeteilt sind. Bei großen Leistungen muss man die Teilleiter zur Vermeidung von Zusatzkupferverlusten durch Stromverdrängung außerdem verdrillen.

Für höhere Spannungen wird die Zylinderwicklung in einzelne übereinanderliegende Spulen aufgeteilt. Diese können bei Querschnitten unter ca. 5 mm² aus Runddraht bestehen und sind durch Isolierscheiben voneinander getrennt.



UW: Unterspannungswicklung / OW: Oberspannungswicklung

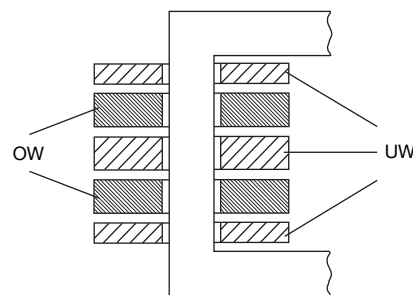


Bild 2.2.9: Scheibenwicklung

2.2.2.2 Scheibenwicklung

Bei der Scheibenwicklung (Bild 2.2.9) werden Ober- und Unterspannungswicklung unterteilt und abwechselnd übereinandergeschichtet. Zur Erzielung einer besseren Verkettung der Wicklungen und mit Rücksicht auf die Isolation beginnt und endet der Aufbau mit je einer Halbspule der Unterspannungsseite.

2.2.3 Isolierung

Die zulässige Erwärmung und damit die Lebensdauer elektrischer Maschinen ist durch die Wärmebeständigkeit der Isolierstoffe begrenzt. Es werden nach VDE 0532 mehrere Isolierstoffklassen unterschieden, denen jeweils eine höchst zulässige Dauertemperatur zugeordnet ist.

Zur Überprüfung der Erwärmung der Wicklungstemperatur wird meistens das Widerstandsmessverfahren angewendet.

Zur Leiterisolation wird meist eine Papierumbandlung gewählt. Zwischenisolationen, Abstützungen und die Distanzierung erfolgen durch Pressspan, Hartpapier und Holz. Die Beherrschung der teilweise hohen Betriebsspannungen auf möglichst engem Raum stellt hohe konstruktive Anforderungen an die Gestaltung der Transformatorisolation. Als Folge von Gewittern oder Schalthandlungen im Netz können überdies stoßartige Überspannungen auftreten, die zusätzlich ausgehalten werden müssen und besondere Isolationstechnische Maßnahmen erfordern.

2.3 Wachstumsgesetze und Kühlung

Die Scheinleistung des Transformators bei spezifischer Belastung des Leitermaterials und dem Material des Magnetwerkstoffes kann mit Hilfe folgenden Gleichungen beschrieben werden:

$$S = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B \cdot J \cdot A_{Fe} \cdot A_{Cu}$$

A_{Fe} Querschnitt des Eisenkerns
 A_{Cu} Querschnitt der Kupferwicklungen

Würde man bei einem Bezugstransformator alle geometrischen Abmessungen um den linearen Faktor k vergrößern, dann bei konstanter spezifischer Beanspruchung B und J die Kupfer- und Eisenquerschnitte jeweils quadratisch ansteigen. Für die Scheinleistung gegenüber einem Bezugstransformator gilt dann:

$$S^* = S \cdot k^4$$

Die Masse und damit auch die Verluste erhöhen sich mit dem Volumen.

$$m^* = m \cdot k^3 \qquad P_v^* = P_v \cdot k^3$$

Die wärmeableitende Oberfläche dagegen nimmt nur quadratisch zu: $O^* = O \cdot k^2$

Daraus folgt:

- Eine geringere relative Masse pro Leistung
- Weniger relative Verluste pro Leistung
- Kleinere relative Kühlfläche pro Verluste

Man erhält also eine größere spezifische Leistung und einen besseren spezifischen Wirkungsgrad, muss aber trotzdem mehr kühlen.

Eine wirksame Kühlung geschieht bei Kleintransformatoren bevorzugt mit Luft, bei Großtransformatoren meist mit Flüssigkeiten (Öl). Die Kühlung schützt den Transformator vor einer thermischen Zerstörung.

2.4 Wirkungsweise des idealen Transformators

Das Prinzip des Transformators beruht auf dem Induktionsgesetz.

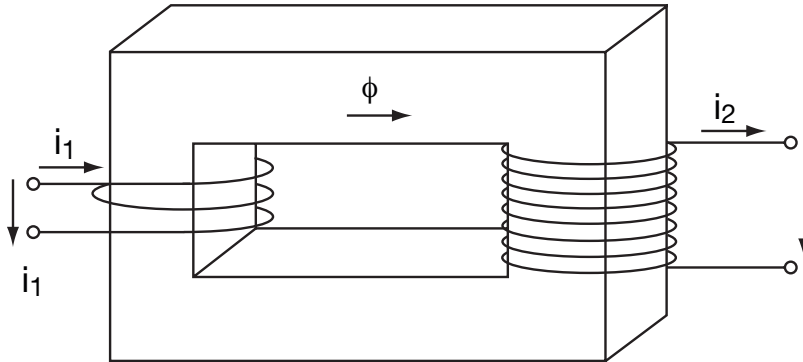


Bild 2.4.1: Prinzip eines Transformators

Für den idealen Transformator gelten folgende Vereinfachungen:

- Der Kern leitet das Magnetfeld perfekt ohne Verluste
- Die Wicklungen bestehen aus perfekt leitendem Material
- Die magnetische Kopplung zwischen den Wicklungen ist vollkommen (d.h. es gibt keine Streufelder)
- Der Kern hat keine resultierende Durchflutung

Es gilt allgemein:

$$u_1 = \frac{d\Psi_{m1}}{dt} = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad u_2 = \frac{d\Psi_{m2}}{dt} = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \frac{u_1}{N_1}$$

daraus folgt für das Übersetzungsverhältnis \ddot{u} :

$$\ddot{u} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \begin{array}{l} N_1 \text{ Windungen der Primärspule} \\ N_2 \text{ Windungen der Sekundärspule} \end{array}$$

Weiterhin gilt, da ein idealer Kern keine resultierende Durchflutung hat:

$$\Theta_1 + \Theta_2 = N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\ddot{u}}$$

Bei sinusförmigen Spannungen $u = \hat{U} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ergibt sich für den magnetischen Fluss Φ :

$$\Phi(t) = \frac{1}{N} \cdot \int u_1 \cdot dt = \dots = -\hat{\phi} \cdot \cos(\omega \cdot t) = -A_{Fe} \cdot \hat{B}_{Fe} \cdot \cos(\omega \cdot t) = -A_{Fe} \cdot B(t)$$

Für den Effektivwert der Klemmenspannung ergibt sich damit:

$$U_{1,2} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \hat{B}_{Fe} \cdot A_{Fe} \cdot N_{1,2}$$

Diese Gleichung trägt auch den Namen Transformatorhauptgleichung und ist für die Dimensionierung von Transformatoren wichtig.

2.5 Betriebsverhalten des realen Transformators

Im Gegensatz zum idealen Transformator muss jetzt berücksichtigt werden, dass der reale Transformator:

- Wicklungsverluste in den Windungen aufweist
- Eisenverluste im Kern aufweist
- aufgrund der endlichen Permeabilität, Hysterese und Wirbelstromverluste aufweist
- keine perfekte magnetische Kopplung hat

2.5.1 Leerlaufversuch

Betreibt man den realen Transformator im Leerlauf, so wird man feststellen, dass ein bestimmter Leerlaufstrom I_{I0} fließt. Mit dem Leerlaufstrom I_{I0} und dem Bemessungsstrom I_{IN} wird der relative Leerlaufstrom definiert:

$$i_{10} = \frac{I_{I0}}{I_{N1}}$$

Der Leerlaufstrom setzt sich aus dem Eisenverluststrom I_{Fe} und dem Magnetisierungsstrom I_{μ} zusammen. Dabei gilt, dass I_{Fe} senkrecht auf I_{μ} steht.

2.5.1.1 Einschaltstromstoß

Wird ein sekundär unbelasteter Transformator mit seiner Primärwicklung an das Netz angeschlossen, so stellt sich der stationäre Leerlaufstrom erst nach Abklingen eines Ausgleichvorgangs ab. Im ungünstigen Fall beginnt der Verlauf des Flusses Φ bei Φ_{rem} (Remanenzinduktion).

Fluss und Spannung sind über $u = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$ verknüpft, daher steigt der Flussverlauf von Φ_{rem}

aus mit dem erforderlichen Differentialquotienten an und es ergibt sich die Spannung an der Primärseite. Dabei können sehr hohe Stromspitzen erreicht werden.

2.5.2 Kurzschlussversuch

Beim Kurzschlussversuch wird bei dem sekundärseitig kurzgeschlossenen Transformator die Spannung an der Primärseite so lange reduziert, bis die jeweiligen Bemessungsströme fließen.

Man kann hier die auf die Bemessungsspannung U_{1N} bezogene Kurzschlussspannung U_{1K} als relative Kurzschlussspannung angeben als:

$$u_k = \frac{U_{1K}}{U_{1N}}$$

2.5.3 Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild gibt die Eigenschaften des realen Transformators wieder. Es resultiert aus den gewonnenen Werten des Leerlaufversuchs und des Kurzschlussversuchs. Die mit Strich gekennzeichneten Größen sind die von der sekundären Seite auf die primäre Seite umgerechneten Größen.

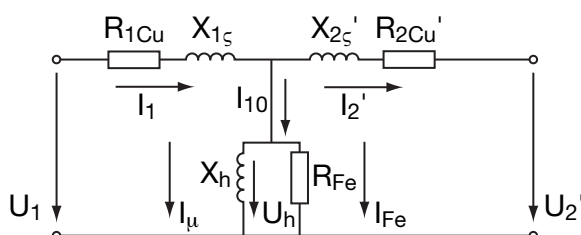


Bild 2.5.1: Ersatzschaltbild eines Transformators

Mit Hilfe des Ersatzschaltbildes kann das Zeigerdiagramm aufgestellt werden.

2.5.4 Kapp'sches Dreieck

Ein Transformator wird mit Nennleistung S_N betrieben, wenn bei Bemessungsspannung U_{1N} der Bemessungsstrom I_{1N} fließt. In diesem Fall kann man den Leerlaufstrom vernachlässigen.

Die Sekundärspannung weicht abhängig vom $\cos(\varphi)$ der Nennspannung ab. Zu ihrer Bestimmung wird das Kapp'sche Dreieck verwendet.

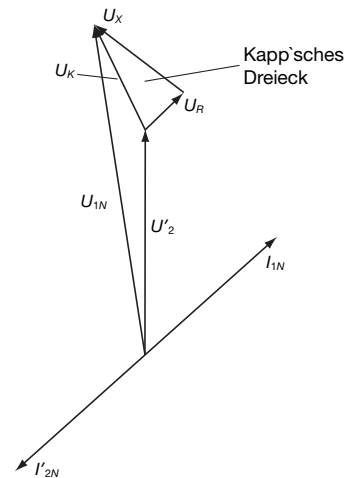


Bild: 2.5.2: Zeigerdiagramm für den Betrieb des Transformators mit Nennleistung

2.6 Einfluss von Belastungsänderungen

2.6.1 Ausgangsspannung und Ausgangsstrom bei Belastung

Nach VDE 0570 darf die Ausgangsspannung, bei Anschluss der Bemessungseingangsgrößen (Eingangsspannung, Frequenz) und Belastung mit einer Impedanz, die bei Bemessungsausgangsspannung und Bemessungsleistungsfaktor die Bemessungsleistung ergibt, nur in bestimmten Grenzen abweichen. Die Prüfung erfolgt durch Messung der Ausgangsspannung im Beharrungszustand. Ist ein Transformator mit Bemessungsausgangsspannung, Bemessungsausgangsstrom, Bemessungsleistungsfaktor gekennzeichnet, so müssen diese Werte vom Grundsatz her übereinstimmen.

2.6.2 Erwärmung

Nach VDE 0570 dürfen Transformatoren und ihre Unterlagen bei bestimmungsmässigem Gebrauch keine unzulässigen Temperaturen annehmen.

Die Art der Prüfung richtet sich nach den Angaben des Herstellers über den Wert für t_a und die verwendeten klassifizierten Werkstoffe (Isolierstoffklassen).

- Die Prüfung findet in einer vorgeschriebenen Umgebung statt.
- Transformatoren werden an die Bemessungs-Eingangsspannung angeschlossen und mit einer Impedanz belastet, die bei Bemessungsausgangsspannung und für Wechselstrom bei Bemessungsleistungsfaktor Bemessungsleistung ergibt. Der Wert des Ausgangsstroms wird gemessen, sobald sich der Beharrungszustand eingestellt hat. Dann wird die Versorgungsspannung um 10% erhöht, und der Ausgangsstrom wird auf den zuvor gemessenen Wert eingestellt. Bei unabhängigen Transformatoren wird der Ausgangsstrom nicht eingestellt. Danach wird im Stromkreis nichts mehr verändert. Die Prüfung wird unter Leerlaufbedingungen wiederholt, falls dies eine ungünstigere Situation ist.
- Die Temperaturerhöhung der Wicklungen wird nach dem Widerstandsverfahren ermittelt, für andere Temperaturerhöhungen (Eisenkern, Oberfläche Isolierung) werden Thermolemente verwendet.
- Während der Prüfung dürfen bestimmte Temperaturen nicht überschritten werden.

2.6.3 Isolationswiderstand und Spannungsfestigkeit

Nach VDE 0570 müssen der Isolationswiderstand und die Spannungsfestigkeit ausreichend sein.

- Der Isolationswiderstand wird mit Gleichspannung gemessen.
- Die Spannungsfestigkeit wird mit einer im wesentlichen sinusförmigen Spannung geprüft. Am Anfang wird der halbe Wert der Prüfspannung angelegt und dann schnell auf den vollen Wert gesteigert. Während der Prüfung darf weder ein Überschlag noch ein Durchschlag auftreten.