



Power Transmission and Distribution

**Drehstrom-
Verteilungstransformatoren**
50 bis 2500 kVA

SIEMENS

Inhalt

Geltungsbereich, Normen und Vorschriften 2

Begriffe, Bestimmungsgrößen 3

Eisenkern	3
Wicklungen	3
Anzapfungen und Anzapfungsbereich	3
Spannungen	3
Ströme	3
Bemessungs-Betrieb	3
Bemessungs-Leistung	3
Bemessungs-Frequenz	3
Bemessungs-Übersetzung	3
Verluste	3
Bemessungs-Kurzschlussspannung	4
Kurzschlussspannung	4
Ohmscher Spannungsfall	4
Streuspannung	4
Dauerkurzschlussstrom	4
Spannungsänderung bei Belastung	4
Wirkungsgrad	5
Schaltungen und Schaltgruppen	5
Geräuschstärke	5
Toleranzen	5

Bemessungs-Frequenz 60 Hz 6

Anschluss an 60 Hz	6
Auslegung für 60 Hz mit 10 % höherer Bemessungs-Leistung	6

Einphasentransformatoren 6

Prüfungen 6

Stückprüfungen	6
Typprüfungen	6
Abnahmeprüfungen	6

Betrieb von Transformatoren 7

Übertemperaturen	7
Überlastbarkeit	7
Aufstellung	7
Parallelbetrieb	8

Geltungsbereich, Normen und Vorschriften

Geltungsbereich

Diese Druckschrift enthält allgemeine Angaben über Verteilungstransformatoren, wie sie in DIN VDE 0532 und in IEC-Publikation 60076 Teil 1 bis 5 sowie in IEC-Publikation 606 festgelegt sind. Die Aussagen gelten sowohl für flüssigkeitsgefüllte Verteilungstransformatoren als auch für GEAUFOL®-Gießharztransformatoren. Wo sich beide unterscheiden, ist ausdrücklich darauf hingewiesen.

Normen und Vorschriften

Die Transformatoren entsprechen den jeweils gültigen VDE-Bestimmungen DIN VDE 0532 „Transformatoren und Drosselspulen“ und den „Technischen Liefervereinbarungen für Drehstrom-Transformatoren“, aufgestellt von der VDEW und dem ZVEI.

Damit erfüllen sie auch die Anforderungen der internationalen Normen der IEC-Publikation 60076 Teil 1 bis 5 und entsprechen den Normen und Vorschriften (HD und EN) der Europäischen Union (EU).

Bei anderen Vorschriften ist Rückfrage erforderlich. Wesentliche Abweichungen von IEC weisen nur noch die amerikanischen (ANSI/NEMA) und die kanadischen Vorschriften (CSA) auf.

Begriffe, Bestimmungsgrößen

Eisenkern

Der Eisenkern ist der Träger des magnetischen Flusses.

Wicklungen

Die Wicklungen sind die Träger der elektrischen Durchflutung. Dabei bezeichnet man die elektrische Leistung aufnehmende Wicklung als Eingangswicklung, die leistungsabgebende als Ausgangswicklung. Die Wicklung für die höchste Bemessungs-Spannung wird mit Oberspannung, die mit niedrigster Bemessungs-Spannung mit Unterspannung bezeichnet.

Anzapfungen und Anzapfungsbereich

Anzapfungen sind zusätzliche Wicklungsanschlüsse zur Änderung der Übersetzung.

Anzapfungsbereich ist der Bereich zwischen der Bemessungs-Spannung und der höchsten bzw. niedrigsten einstellbaren Spannung einer Wicklung. Der Anzapfungsbereich wird als Plus- und Minusprozentsatz der Bemessungsspannung angegeben.

Spannungen

Höchste Spannung für Betriebsmittel U_m ist der höchste Effektivwert der Leiterspannung, für den eine Transformatorwicklung hinsichtlich ihrer Isolation ausgelegt ist. Genannte Werte für U_m (in kV) sind in der VDE-Bestimmung DIN VDE 0532 Teil 3 sowie in der IEC-Publikation 60076-3 angegeben.

Den U_m -Werten sind Werte der Bemessungs-Stehwechselfeldspannung (AC, Effektivwert) und Bemessungs-Stehblitzstoßspannung (LI , Scheitelwert; nur für $U_m > 1,1$ kV) zugeordnet, die den Isolationspegel der betreffenden Wicklung kennzeichnen.

Bemessungs-Spannung (U_r) einer Wicklung ist die Spannung, die zwischen den Leiteranschlüssen einer Wicklung eines Mehrphasentransformators oder zwischen den Anschlüssen einer Wicklung eines Einphasentransformators anzulegen ist oder bei Leerlauf auftritt.

Leerlaufspannung

ist die Spannung zwischen den Leiteranschlüssen eines erregten Transformators auf der unbelasteten Ausgangsseite.

Volllastspannung

ist die Spannung zwischen den Leiteranschlüssen auf der Ausgangsseite bei Belastung des Transformators mit Bemessungsstrom. Sie ist vom Leistungsfaktor $\cos \varphi$ abhängig.

Ströme

Bemessungs-Strom (I_r)

ist der über den Leiteranschluss einer Wicklung fließende Strom; er wird bestimmt, indem man die Bemessungsleistung der Wicklung durch ihre Bemessungs-Spannung und den entsprechenden Phasenfaktor dividiert.

Leerlaufstrom (I_0)

ist der Strom, der über einen Leiteranschluss einer Wicklung fließt, wenn Bemessungs-Spannung bei Bemessungs-Frequenz angelegt wird, während die andere bzw. die anderen Wicklungen unbelastet bleiben. Er wird als Mittelwert der drei Phasen in Prozent des Bemessungs-Stromes angegeben.

Bemessungs-Betrieb

Der Bemessungs-Betrieb ist der Betrieb bei Bemessungs-Spannung auf der Eingangsseite, Bemessungs-Strom auf der Ausgangsseite und Bemessungs-Frequenz.

Bemessungs-Leistung (S_r)

Die Bemessungs-Leistung ist die Scheinleistung, die eine Grundlage für die Auslegung und die Prüfungen darstellt und einen bestimmten Wert für den Bemessungs-Strom festlegt, der bei angelegter Bemessungs-Spannung fließen darf.

Bemessungs-Frequenz (f_r)

Bemessungs-Frequenz ist die Betriebsfrequenz, für die der Transformator bemessen ist.

Bemessungs-Übersetzung (ii_r)

Die Bemessungs-Übersetzung ist das Verhältnis der Bemessungs-Spannung einer Wicklung zur niedrigeren oder gleichen Bemessungs-Spannung einer anderen Wicklung.

Verluste

Leerlaufverluste (P_0)

sind die aufgenommene Wirkleistung, wenn Bemessungs-Spannung bei Bemessungs-Frequenz an die Anschlüsse einer Wicklung angelegt wird, während die andere Wicklung unbelastet bleibt. Sie bestehen aus den Verlusten im Eisenkern und Dielektrikum sowie den vom Leerlaufstrom in den Wicklungen hervorgerufenen Verlusten. Die Verluste im Dielektrikum und in den Wicklungen sind im Allgemeinen unbedeutend.

Die Eisenverluste – also der wesentlichste Teil der Leerlaufverluste – setzen sich aus den Hystereseverlusten und den Wirbelstromverlusten zusammen.

Die Hystereseverluste entstehen durch das Umklappen der Mikrokristalle, welche Elementarmagnete sind. Jeder Drehung und Ausrichtung setzen sie einen Widerstand entgegen. Die damit verbundene Arbeit ist im Allgemeinen nicht rückgewinnbar, sie tritt als Verlustwärme auf.

Die neben den Hystereseverlusten im Eisen auftretenden Wirbelstromverluste werden dadurch hervorgerufen, dass das zeitlich veränderliche Magnetfeld im Eisen Spannungen induziert. Infolge dieser Spannungen entstehen Ströme, die in wirbelförmigen Bahnen verlaufen. Ohmscher Widerstand des Eisens und die Wirbelströme ergeben aufgrund der Beziehung $I^2 R$ die Wirbelstromverluste. Durch die Verwendung von besonders dünnen, voneinander isolierten Blechen, kann man die Wirbelstromverluste niedrig halten.

Kurzschlussverluste (P_k)

sind bei Bemessungs-Frequenz aufgenommene Wirkleistung, wenn über den Leiteranschluss einer der Wicklungen der Bemessungs-Strom fließt, während die Anschlüsse der anderen Wicklung kurzgeschlossen sind. Die Kurzschlussverluste bestehen aus den Stromwärmeverlusten in den ohmschen Widerständen ($I^2 R$) und den Zusatzverlusten, hervorgerufen durch Wirbelströme in den Wicklungen und in Konstruktionsteilen.

Begriffe, Bestimmungsgrößen

Die Kurzschlussverluste werden auf eine Bezugstemperatur umgerechnet. Diese Bezugstemperatur ist 75 °C bei Öltransformatoren. Für Gießharztransformatoren gilt nach IEC 60076-11 entsprechend der thermischen Klassen: B = 100 °C; F = 120 °C; H = 145 °C. Bei unterschiedlichen Klassen an einem Transformator gilt die jeweils höchste Bezugstemperatur. Bei der Umrechnung z. B. auf 75 °C muss der dem Gleichstromwiderstand entsprechende Teil der Verluste und Aluminiumwicklungen im Verhältnis

$\frac{225 + 75}{225 + \vartheta_k}$ erhöht, der den Zusatzverlusten entsprechende Teil dagegen im Verhältnis $\frac{225 + \vartheta_k}{225 + 75}$ vermindert

werden, wobei ϑ_k die Temperatur bedeutet, bei der die Verluste gemessen werden. Bei Kupferwicklungen muss in der Formel die Umrechnungskonstante „225“ in „235“ umgeändert werden. Bei einer vom Bemessungs-Betrieb abweichenden Belastung ändern sich die Kurzschlussverluste

P_k im Verhältnis $\left(\frac{\text{Laststrom}}{\text{Bemessungs-Strom}}\right)^2$.

Bemessungs-Kurzschluss-Spannung (U_{Zr}, u_{Zr})

Die Bemessungs-Kurzschluss-Spannung ist die Spannung, die bei Bemessungs-Frequenz an die Leiteranschlüsse einer Wicklung eines Mehrphasentransformators oder die Anschlüsse einer Wicklung eines Einphasentransformators anzulegen ist, um den Bemessungs-Strom über diese Anschlüsse fließen zu lassen, während die Anschlüsse der anderen Wicklung kurzgeschlossen sind. Die Bemessungs-Kurzschluss-Spannung wird gewöhnlich in Prozent der Bemessungs-Spannung der Wicklung angegeben, an die die Spannung gelegt wird.

Kurzschluss-Spannung (U_{Zr}, u_{Zr})

Die Kurzschluss-Spannung bezeichnet eine Größe, die der Bemessungs-Kurzschluss-Spannung ähnlich ist, sich aber auf andere Stromwerte und/oder andere Anzapfungen als die Hauptanzapfung beziehen kann. Bei einer vom Bemessungs-betrieb abweichenden Belastung beträgt die in Prozent der Bemessungs-Spannung ausgedrückte Kurzschluss-Spannung

$$u_{Zr} = u_{Zr} \cdot \frac{\text{Laststrom}}{\text{Bemessungs-Strom}} [\%].$$

Ohmscher Spannungsfall (U_{Rr}, u_{Rr})

Der ohmsche Spannungsfall ist die Komponente einer Kurzschluss-Spannung, die in Phase mit dem Strom ist. Der ohmsche Spannungsfall bei Bemessungsstrom in Prozent der Bemessungs-Spannung wird wie folgt errechnet:

$$u_{Rr} = \frac{P_k [\text{kW}]}{S_r [\text{kVA}]} \cdot 100 [\%].$$

Streu-Spannung (U_{Xr}, u_{Xr})

Die Streu-Spannung ist die Komponente einer Kurzschluss-Spannung, die gegenüber dem Strom um 90° phasenverschoben ist. Die Streu-Spannung bei Bemessungsstrom in Prozent der Bemessungs-Spannung ermittelt man wie folgt:

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{Zr}^2 - u_{Rr}^2} [\%].$$

Dauerkurzschlussstrom (I_{kd})

Der Dauerkurzschlussstrom ist der Effektivwert des Stromes im Leiteranschluss, der sich bei allpoligem Klemmenkurzschluss auf der Ausgangsseite, starre Eingangsspannung vorausgesetzt, nach Abklingen des Gleichstromgliedes einstellt.

Bei Betrieb des Transformators mit Bemessungs-Spannung und Bemessungs-Frequenz und Einstellung auf die Hauptanzapfung errechnet er sich aus dem Bemessungs-Strom I_r und der Bemessungs-Kurzschluss-Spannung u_{Zr} :

$$I_{kd} = \frac{I_r [\text{A}]}{u_{Zr} [\%]} \cdot 100$$

Spannungsänderung bei Belastung (u_φ)

Die Spannungsänderung bei Belastung ist die Differenz zwischen der Bemessungs-Spannung einer Wicklung und der Spannung, die bei bestimmten Werten von Belastung und Leistungsfaktor auftritt, wenn an die andere(n) Wicklung(en) die Bemessungs-Spannung angelegt wird.

Die Spannungsänderung auf der Hauptanzapfung in Prozent der Bemessungs-Spannung ist für eine bestimmte bezogene Teillast n und einen bestimmten Leistungsfaktor $\cos \varphi$ gleich:

$$u_\varphi = n \cdot u_\varphi' + \frac{1}{2} \frac{(n \cdot u_\varphi'')^2}{10^2} [\%]$$

wobei

$$u_\varphi' = u_{Rr} \cdot \cos \varphi + u_{Xr} \cdot \sin \varphi,$$

$$u_\varphi'' = u_{Rr} \cdot \sin \varphi + u_{Xr} \cdot \cos \varphi,$$

u_{Rr} und u_{Xr} siehe vorher

$$n = \text{Teillastfaktor} = \frac{\text{Teillast}}{\text{Bemessungs-Leistung}}$$

Bei Bemessungs-Kurzschluss-Spannung bis 4% ist $u_\varphi \approx n \cdot u_\varphi'$ und dementsprechend $u_\varphi \approx n \cdot u_{Rr}$, wenn $\cos \varphi = 1$ ist.

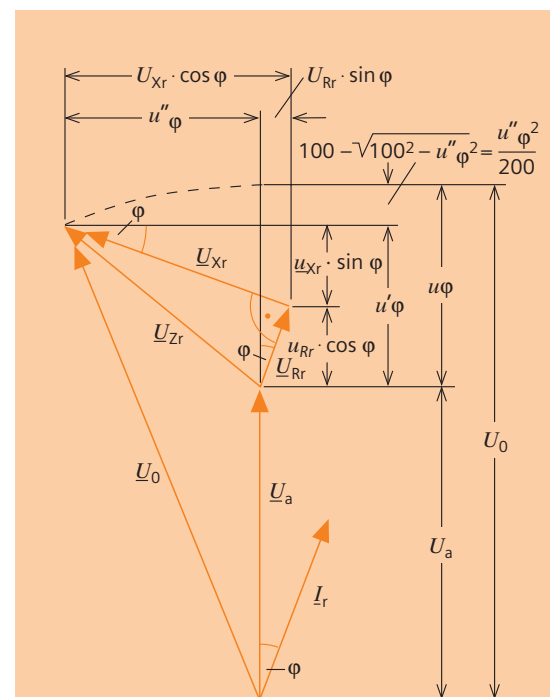
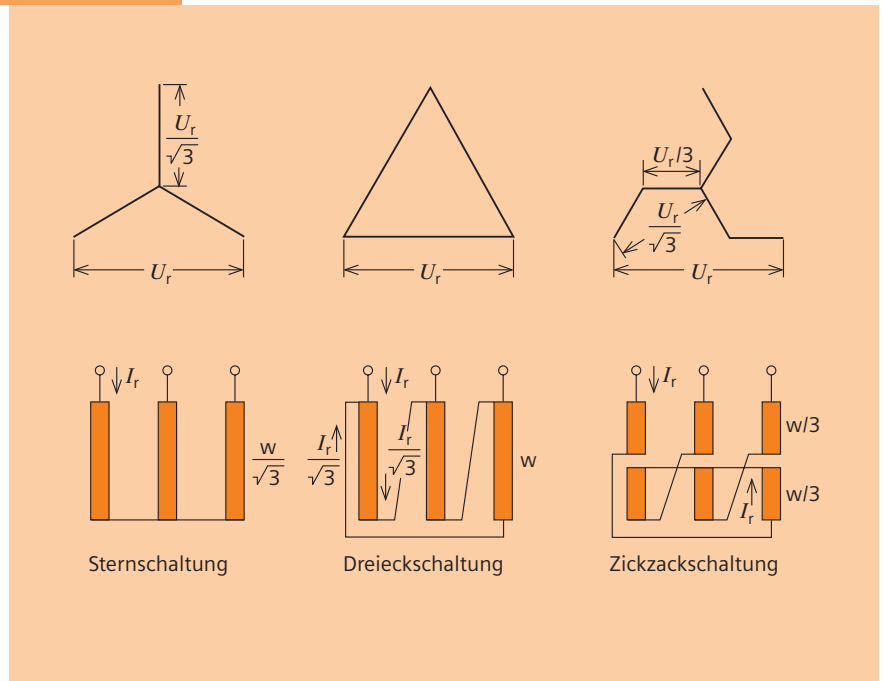


Bild 1
Grafische Ermittlung
der Spannungsänderung u_φ
bei Bemessungs-Strom I_r

Bild 2
Schaltungen von
Drehstromtransformatoren
mit Zeigerdiagrammen



Wirkungsgrad (η)

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis von abgegebener zu aufgenommener Wirkleistung.

Bei einer bestimmten bezogenen Teillast n und einem bestimmten Leistungsfaktor $\cos \varphi$ lautet die Formel:

$$\eta = 100 - \frac{P_0 + n^2 \cdot P_k}{n \cdot S_r \cdot \cos \varphi \left(1 - \frac{u_0}{100}\right) + P_0 + n^2 \cdot P_k} \cdot 100 [\%]$$

$$\approx 100 - \frac{P_0 + n^2 \cdot P_k}{n \cdot S_r \cdot \cos \varphi + P_0} \cdot 100 [\%]$$

Diese Formel liefert für die Praxis genügend genaue Werte.

Ein Transformator hat seinen maximalen Wirkungsgrad bei einer Belastung, für die P_0 gleich $n^2 \cdot P_k$ ist. Dieser Fall tritt bei einem Belastungsfaktor (bezogene Teillast)

$$n = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \text{ ein.}$$

Schaltungen und Schaltgruppen

Die Schaltungen von Drehstromtransformatoren sind die Verbindungen der Wicklungsstränge von Eingangs- oder Ausgangsseite zu Stern-, Dreieck- oder Zickzackschaltung. Diese Schaltbilder und die entsprechenden Zeigerdiagramme sind Bild 2 zu entnehmen. Die Schaltgruppe gibt die Schaltung der Stränge von 2 Wicklungen eines Transformators sowie die Kennzahl für die Phasenlage der Spannungszeiger an. Die Schaltungen werden mit nachstehenden Kennbuchstaben bezeichnet:

Sternschaltung Y, y
Dreieckschaltung D, d
Zickzackschaltung Z, z

Die Großbuchstaben kennzeichnen die Schaltung der Oberspannungswicklung, die Kleinbuchstaben die der Unterspannungswicklung. In den Schaltgruppen werden die großen Buchstaben vorangestellt.

Wenn der Sternpunkt einer Wicklung in Stern- oder Zickzackschaltung herausgeführt ist, lautet die Kennzeichnung YN oder ZN bzw. yn oder zn.

Die Kennzahl (0; 5 usw.) gibt im Zeigerdiagramm an, um welches Vielfache von 30° der Zeiger der Unterspannung gegen den der Oberspannung mit zugeordneter Anschlussbezeichnung nacheilt. Die Drehrichtung der Zeiger ist dabei entgegen dem Uhrzeigersinn.

Übliche Schaltgruppen

Die üblichen Schaltgruppen sind: Yy0 (Yy6), Yz5 (Yz11), Dy5 (Dy11). Bei Transformatoren mit Schaltgruppen gestattet ein auf der Ausgangsseite herausgeführter Sternpunkt im Drehstromverteilungsnetz den Anschluss eines Nullleiters. Die Schaltgruppenbezeichnungen lauten dann: Yyn0 (Yyn6), Yzn5 (Yzn11), Dyn5 (Dyn11).

Der Sternpunkt ist bei Transformatoren mit den Schaltgruppen Yyn0 (Yyn6) nur für Erdungszwecke oder für eine Belastung von höchstens 10 % des Bemessungsstromes verwendbar. Daher eignet sich zur Speisung von Verteilungsnetzen mit viertem, neutralem Leiter die Yyn-Schaltung im Allgemeinen nicht. Es muss dann eine andere der angeführten Schaltgruppen vorgehen werden. Bei der Yzn- und Dyn-Schaltung ist eine Belastung des Sternpunktes mit 100 % des Bemessungsstromes möglich.

Bei der Zickzackschaltung fließt der Strom vom Leiter- zum Sternpunktanschluss stets über zwei Schenkelswicklungen.

Die Teilspannungen je Schenkel schließen miteinander im Drehstromsystem einen Winkel von 120° ein.

Die Spannung zwischen den Leiteranschlüssen der zu einer Phase gehörenden Windungen ist daher nicht die doppelte Teilspannung je Schenkel, sondern nur die $\sqrt{3}$ fache Teilspannung. Bei der Zickzackschaltung wird deshalb gegenüber der Sternschaltung um

den Faktor $\frac{2}{\sqrt{3}}$ mehr Wicklungsmaterial benötigt.

Bei der Dreieckschaltung werden auf jedem Schenkel gegenüber der Sternschaltung um den Faktor $\sqrt{3}$ mehr Windungen benötigt, um die gleiche Spannung zu erhalten.

Der Querschnitt der Leiter ist dagegen bei der Dreieckschaltung um den Faktor $\frac{1}{\sqrt{3}}$ kleiner als bei der Sternschaltung.

Geräuschstärke

Die Geräusche bei Verteilungstransformatoren entstehen durch die Magnetostraktion der Kernbleche. Die Geräuschwerte sind für Öltransformatoren in DIN 42500 und für Gießharztransformatoren in DIN 42523 genormt.

Als Maß für die Geräuschstärke gilt die nach DIN EN 60551 gemessene Schalleistung.

Toleranzen

Aus Fertigungsgründen sind Toleranzen für die technischen Daten notwendig. Die Toleranz ist die zulässige Abweichung des Istwertes vom Sollwert. Sie wird in den einzelnen Normen und Vorschriften festgelegt und als Prozentsatz des Sollwertes angegeben.

Bemessungs-Frequenz 60 Hz

Anschluss an 60 Hz

Ein Transformator für Bemessungs-Frequenz 50 Hz kann auch in einem Netz gleicher Spannung mit Bemessungs-Frequenz 60 Hz betrieben werden. Bemessungs-Leistung und Kurzschlussverluste bleiben dabei gleich, die Leerlaufverluste sinken um etwa 20 bis 25 %, die Streuspannung steigt um etwa 20 %.

Auslegung für 60 Hz mit 10 % höherer Bemessungs-Leistung

Kurzschluss- und Leerlaufverluste sowie Erwärmung ändern sich hierbei nicht.

Ohmscher Spannungsfall

$$u_{Rr\ 60\ Hz} = \frac{u_{Rr}}{1,1} [\%]$$

Bemessungs-Kurzschlussspannung

$$u_{Zr\ 60\ Hz} = \sqrt{\left(\frac{u_{Rr}}{1,1}\right)^2 + 1,2 \cdot (u_{Zr}^2 - u_{Rr}^2)} [\%]$$

Einphasentransformatoren

Für einen Einphasentransformator mit einer Leistung = $\frac{2}{3}$ der Leistung eines listenmäßigen Drehstromtransformators kann man die Einphasen-Kennwerte aus den Drehstrom-Listwerten näherungsweise ermitteln:

$$P_{0\ Einph.} \approx \frac{2}{3} P_{0DS}$$

$$P_{k\ Einph.} \approx \frac{2}{3} P_{kDS}$$

$$u_{Z\ Einph.} \approx u_{ZDS}$$

$$\text{Gewicht}_{\text{Einph.}} \approx 0,7 \cdot \text{Gewicht}_{\text{DS}}$$

$$\text{Länge}_{\text{Einph.}} \approx 0,7 \cdot \text{Länge}_{\text{DS}}$$

$$\text{Breite}_{\text{Einph.}} \approx \text{Breite}_{\text{DS}}$$

$$\text{Höhe}_{\text{Einph.}} \approx \text{Höhe}_{\text{DS}}$$

Prüfungen

Prüfungen dienen dem Nachweis, dass die technischen Daten eingehalten sind und die Betriebstüchtigkeit gewährleistet ist. Unsere Transformatoren werden allen in den VDE-Bestimmungen DIN VDE 0532 und IEC-Publikationen 60076 sowie in den auf Seite 2 aufgeführten nationalen Vorschriften festgelegten Stück- und Typprüfungen unterzogen.

Stückprüfungen

Stückprüfungen erfolgen an jedem Transformator und umfassen folgende Messungen und Prüfungen:

Messung des Wicklungswiderstandes
Messung der Übersetzung und Nachweis der Polarität oder der Schaltgruppe

Messung der Kurzschlussspannung
Messung der Kurzschlussverluste
Messung von Leerlaufverlusten und Leerlaufstrom

Windungsprüfung
(Prüfung mit induzierter Spannung)

Wicklungsprüfung
(Prüfung mit Fremdspannung)

Über die Stückprüfung wird ein Prüfprotokoll ausgestellt.

Typprüfungen

Typprüfungen werden bei Erstellung einer neuen Bauserie durchgeführt und umfassen:

Erwärmungsmessung,
Prüfung mit Blitzstoßspannung
Geräuschmessung (nach den VDE-Bestimmungen fällt diese Messung unter „Sonderprüfungen“).

Nachweis der Kurzschlussfestigkeit

Abnahmeprüfungen

sind eine Wiederholung der Stück- bzw. Typprüfungen und erfordern daher einen Mehraufwand und Mehrkosten.

Übertemperaturen

Transformatoren sind so ausgelegt, dass bei Bemessungs-Betrieb die nach den Vorschriften zulässigen Übertemperaturen nicht überschritten werden. Die Übertemperatur der Wicklung und bei flüssigkeitsgefüllten Transformatoren auch die der Kühl- und Isolierflüssigkeit ist die Differenz zwischen der Temperatur des betrachteten Teiles und der Temperatur der umgebenden Luft. Für die umgebende Luft sind in den Vorschriften Höchsttemperaturen sowie mittlere Tages- und Jahrestemperaturen angegeben.

Für die Wicklung gilt die mittlere Übertemperatur, die durch die Temperaturabhängigkeit ihres ohmschen Widerstandes bestimmt wird.

Die maximale Übertemperatur der Kühl- und Isolierflüssigkeit ergibt sich aus der Temperaturmessung in der Thermometertasche. Sie liegt bei unseren Transformatoren in den meisten Fällen unter der zulässigen Übertemperatur der Isolierflüssigkeit.

Überlastbarkeit

Eine Überlastung des Transformators ist nach den VDE-Bestimmungen zulässig, wenn die angegebenen Werte der Kühlmitteltemperatur unterschritten werden. Um die gleiche Abweichung dürfen die Übertemperaturen erhöht werden. Die entsprechende Leistungssteigerung kann für unsere Transformatoren nach einer Faustregel ermittelt werden und beträgt: 1 % je 1 K¹⁾ Unterschreitung der Kühllufttemperatur bei Öltransformatoren, 0,6 % je 1 K bei GEAFFOL-Transformatoren.

Überlastung ohne Überschreitung der zulässigen Wicklungsübertemperatur ist aber auch dann vorübergehend möglich, wenn die vorangegangene dauernde Belastung unterhalb der Bemessungsleistung lag und damit die zulässigen Übertemperaturen nicht erreicht werden. Eine weitere Überlastungsmöglichkeit (leistungsabhängig bis ca. 50 %) lässt sich (auch nachträglich) durch eine Beblasung der Transformatoren mit Lüftern, d. h. durch eine erzwungene Bewegung des äußeren Kühlmittels erreichen.

Transformatoren werden im Allgemeinen in einem sich fortlaufend wiederholenden 24-stündigen Belastungszyklus betrieben. Meist liegt der Lebensdauerverbrauch bei dieser Belastungsweise niedriger als bei einem „normalen“ Lebensdauerverbrauch, worunter dauernder Betrieb mit Bemessungsleistung bei 20 °C Umgebungstemperatur verstanden wird. In DIN VDE 0532 Teil 11 „Belastbarkeit von Öltransformatoren“ und DIN VDE 0532 Teil 12 „Belastbarkeit von Trockentransformatoren“ werden Richtlinien angegeben, nach welchen unter Berücksichtigung zeitweilig erhöhten bzw. verminderten Lebensdauerverbrauchs die Überlastbarkeit überprüft oder die Auswahl einer entsprechenden Leistungsgröße getroffen werden kann.

Werte für die Überlastbarkeit bei flüssigkeitsgefüllten Transformatoren als auch bei Gießharztransformatoren GEAFFOL sind in den jeweiligen Technischen Listen enthalten.

Aufstellung

Listenmäßige Transformatoren sind geeignet zur Aufstellung in Höhen bis 1000 m über N. N. Da mit zunehmender Höhe die Kühleigenschaft der Luft abnimmt, ist bei Höhen über 1000 m N. N. entweder eine Sonderausführung vorzusehen oder die Bemessungsleistung zu reduzieren. Für je 100 m Überschreitung der zulässigen Aufstellungshöhe ist die Bemessungsleistung bei flüssigkeitsgefüllten Transformatoren um etwa 0,4 %, bei Trockentransformatoren um etwa 0,5 % zu verringern. Da aber auch die Durchschlagfestigkeit der Luft in größeren Höhen abnimmt, ist bei Bestellung die Aufstellungshöhe, sofern diese mehr als 1000 m über N. N. beträgt, zur richtigen Auslegung der Schlagweiten und Mindestluftabstände anzugeben.

Werden Transformatoren an Orten mit einer Kühllufttemperatur über den in den Vorschriften angegebenen Werten betrieben, so müssen die zulässigen Übertemperaturen verringert werden, und zwar um 5 K, wenn die Temperaturüberschreitung 5 K oder weniger beträgt, und um 10 K, wenn sie zwischen 5 und 10 K liegt. Bei noch höheren Kühllufttemperaturen entspricht der Betrag der Absenkung der Übertemperatur dem der Erhöhung der Kühllufttemperatur.

Ähnlich wie die Leistungssteigerung kann auch die Leistungsminderung für unsere Transformatoren mit Hilfe einer Faustregel ermittelt werden und beträgt:

1,5 % je 1 K Überschreitung der Kühllufttemperatur bei Öltransformatoren, 0,8 % je 1 K bei GEAFFOL-Transformatoren.

Bei Transformatoren für tropische Klimazonen müssen Anstrich und Temperaturbedingungen besonders angegeben werden. Für feuchtwarmes Tropenklima sowie in Meeres- und Industrieluft empfehlen wir, Öltransformatoren mit Luftentfeuchter und GEAFFOL-Transformatoren mit Spezialanstrich einzusetzen.

¹⁾ 1 K = SI-Einheit für 1 °C Temperaturdifferenz

Betrieb von Transformatoren

Bild 3
Mögliche Anschlüsse bei Parallelbetrieb von Transformatoren mit Schaltgruppen der Kennzahlen 5 und 11

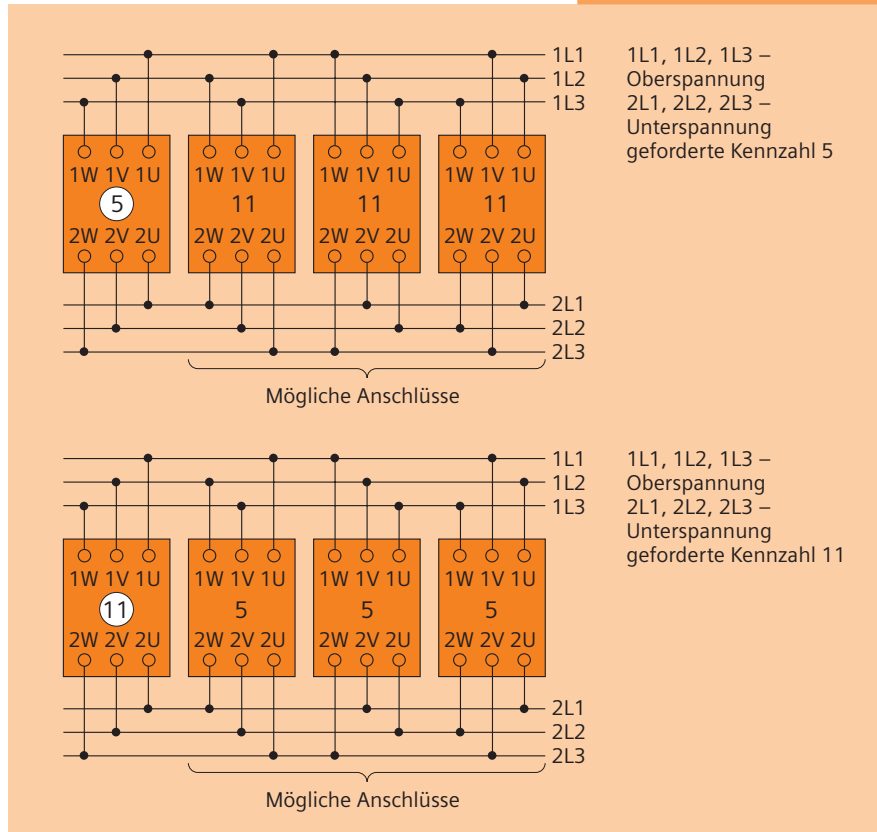
Parallelbetrieb

Parallelbetrieb besteht, wenn Transformatoren sowohl auf der Eingangsseite als auch auf der Ausgangsseite mit gleichen Netzsystemen verbunden sind. Man unterscheidet: Sammelschienen-Parallelbetrieb, Netz-Parallelbetrieb.

Allgemeine Anforderungen an den Parallelbetrieb

Schaltgruppen gleicher Kennzahl

Transformatoren mit Schaltgruppen gleicher Kennzahl sind für den Parallelbetrieb geeignet. Dabei sind gleichnamige Leiteranschlüsse miteinander zu verbinden. Es können aber auch Transformatoren mit einigen bestimmten Schaltgruppen unterschiedlicher Kennzahlen parallel betrieben werden, wenn die Leiteranschlüsse entsprechend vertauscht werden. In Bild 3 sind die möglichen Anschlüsse bei Parallelbetrieb von Transformatoren mit Schaltgruppen der gebräuchlichen Kennzahlen 5 und 11 dargestellt.



Möglichst gleiche Übersetzung einschließlich Anzapfungsbereich

Bei gleicher Übersetzung verteilt sich die Gesamtbelastung auf die parallel geschalteten Transformatoren proportional den Transformatorleistungen und umgekehrt proportional den Kurzschlussspannungen. Bei gleicher Eingangsspannung und ungleicher Ausgangsspannung zweier parallel geschalteter Transformatoren fließt durch beide Transformatoren ein Ausgleichstrom, der nach folgender Näherungsformel bestimmt wird:

$$I_{\text{Ausgl Tr 1}} \approx \frac{I \Delta u}{u_{Z(r)1} + u_{Z(r)2} \cdot \frac{S_{r1}}{S_{r2}}} \cdot 100$$

$I_{\text{Ausgl Tr 1}}$ = Ausgleichstrom in % des Bemessungs-Stromes von Transformator 1

$I \Delta u$ = Absolutwert des Spannungsunterschieds in % der Ausgangsspannung von Transformator 1 bei Leerlauf

$u_{Z(r)1}, u_{Z(r)2}$ = Bemessungs-Kurzschlussspannungen bzw. Kurzschlussspannungen bei bestimmten Anzapfungen und/oder Abweichungen der Bemessungs-Induktion der Transformatoren 1 und 2

$\frac{S_{r1}}{S_{r2}}$ = Verhältnis der Bemessungs-Leistungen

Der Ausgleichstrom ist vollkommen unabhängig von der Belastung und deren Verteilung, er fließt auch bei Leerlauf.

Bei Belastung addiert sich der Belastungsstrom geometrisch zum Ausgleichstrom. Dadurch ergibt sich bei induktivem Leistungsfaktor des Belastungsstromes im Transformator mit der höheren Sekundärspannung stets eine Erhöhung des Gesamtstromes, während der Gesamtstrom im

Transformator mit der niedrigeren Sekundärspannung geringer wird.

Im nachfolgenden Beispiel 1 hat ungünstigerweise gerade der kleinere Transformator die höhere Unterspannung und muss somit den höheren Gesamtstrom führen. Das bedeutet auf das Beispiel angewandt, dass bei einem Ausgleichstrom von 25,6% nur noch ein Belastungsstrom von 74,4% zulässig ist, um den Bemessungs-Strom des Trafos 1 (= 100%) nicht zu überschreiten. Somit kann aber der ganze Transformatorensatz auch nur mit 74,4% seiner Summenleistung von 630 + 1000 = 1630 kVA, das sind etwa, 1213 kVA, betrieben werden. Bei einem Leistungsfaktor der Belastung unter 0,9 liefert diese überschlägige Rechnung einen genügend genauen Anhaltswert. Bei einem Leistungsfaktor > 0,9 wird wegen des dann wachsenden vektoriellen Differenzwertes die zulässige Summenleistung größer.

Eine Verbesserung der Belastungsmöglichkeiten kann u. U. die Änderung der Einstellung des Umstellers an einem Transformator bringen. Wäre es möglich, beim 630-kVA-Transformator unseres Beispiels überspannungsseitig eine höhere Anzapfung (z. B. 5 % mehr Windungen) einzustellen, so ergäbe sich dadurch infolge Induktionsabsenkung bei Anschluss an die gleiche Oberspannung eine um 1/1,05 niedrigere Unterspannung, also 381 V statt 400 V. Falls durch diese Maßnahme die Verteilungsspannung zu niedrig wird, könnte stattdessen, wenn möglich, beim 1000-kVA-Transformator überspannungsseitig eine niedrigere Anzapfung (z. B. 5 % weniger Windungen) eingestellt werden, wodurch sich infolge Induktionserhöhung (Zulässigkeit überprüfen! Stärkeres Geräusch, Kernerwärmung, Leerlaufstrom) eine um 1/0,95 höhere Unterspannung, also 411 V statt 390 V ergibt.

Bei Änderung der Spannungseinstellung muss berücksichtigt werden, dass sich auch die Kurzschlussspannung verändert. Die mit einer Induktionsänderung verbundene indirekte Spannungseinstellung führt bei unseren Transformatoren nach oder ähnlich DIN zu einer Änderung der Kurzschlussspannung etwa proportional dem Prozentsatz der zu- oder abgeschalteten Windungen.

Das gegebene Beispiel 1 wird nun mit um 5 % niedriger eingestellter Anzapfung des 1000-kVA-Transformators nochmals durchgerechnet (Beispiel 2): Dadurch, dass jetzt der Trafo 2 die höhere sekundäre Leerlaufspannung aufweist, führt er den Summenstrom aus Belastungs- und Ausgleichstrom und bestimmt damit die zulässige Gesamtbelastung der Parallelläufer.

Beispiel 1

	Ausgangsspannung bei Leerlauf V	Bemessungs- Leistung kVA	Bemessungs- Kurzschlussspannung %
Trafo 1	400	630	6
Trafo 2	390	1000	6

$$|\Delta u| = \left| \frac{400 - 390}{400} \cdot 100 \right| = 2,5\%$$

$$\frac{S_{r1}}{S_{r2}} = \frac{630}{1000} = 0,63$$

$$I_{\text{Ausgl Tr1}} \approx \frac{2,5}{6 + 6 \cdot 0,63} \cdot 100 \approx 25,6\%$$

Beispiel 2

	Ausgangsspannung bei Leerlauf V	Bemessungs- Leistung kVA	Bemessungs- Kurzschlussspannung %
Trafo 1	400	630	6
Trafo 2	411	1000	5,7 ($\approx 95\%$ von 6)

$$|\Delta u| = \left| \frac{400 - 411}{400} \cdot 100 \right| = 2,75\%$$

$$\frac{S_{r1}}{S_{r2}} = \frac{630}{1000} = 0,63$$

$$I_{\text{Ausgl Tr1}} \approx \frac{-2,75}{6 + 5,7 \cdot 0,63} \cdot 100 \approx 28,7\%$$

Der auf Trafo 2 bezogene Ausgleichstrom ergibt sich zu:

$$I_{\text{Ausgl Tr 2}} = I_{\text{Ausgl Tr 1}} \cdot \frac{S_{r1}}{S_{r2}}$$

Beispiel:

$$I_{\text{Ausgl Tr 2}} = 28,7\% \cdot \frac{630}{1000} = 18,1\%$$

Der im Trafo 2 somit zulässige Belastungsstrom beträgt $100\% - 18,1\% \approx 81,9\%$ des Nennstroms. Der ganze Transformatorensatz kann also bei einem Leistungsfaktor der Belastung unter 0,9 nun mit etwa 81,9% seiner Summenleistung von 1630 kVA, das sind etwa 1335 kVA, betrieben werden.

Betrieb von Transformatoren

Annähernd gleiche Kurzschluss- spannungen

Die Kurzschlussspannungen der einzelnen Transformatoren sollen nicht mehr als $\pm 10\%$ vom Mittelwert aller parallel zu betreibenden Einheiten abweichen. Sind $S_{r1}, S_{r2} \dots S_{rp}$ die Nennleistungen der parallel laufenden Transformatoren und $u_{Z(r)1}, u_{Z(r)2}, \dots, u_{Z(r)p}$ ihre Bemessungs-Kurzschlussspannungen – wobei der niedrigste Index (1) der kleinsten Kurzschlussspannung entspricht usw. –, so kann die höchstmögliche Gesamtbelastung S nach folgender Näherungsformel bestimmt werden:

$$S \approx S_{r1} + S_{r2} \cdot \frac{u_{Z(r)1}}{u_{Z(r)2}} + S_{r3} \cdot \frac{u_{Z(r)1}}{u_{Z(r)3}} + \dots + S_{rp} \cdot \frac{u_{Z(r)1}}{u_{Z(r)p}}$$

Bei gleichen Bemessungs-Leistungen verhalten sich die Teilbelastungen umgekehrt proportional zu den Kurzschlussspannungen.

Die praktisch mögliche Gesamtbelastung ergibt sich aus:

Beispiel 1		
	Bemessungs- Leistung kVA	Bemessungs- Kurzschluss- spannung %
Trafo 1	400	3,6
Trafo 2	400	4,0
Trafo 3	400	4,4
Trafo 1	$400 \cdot \frac{3,6}{3,6} = 400 \text{ kVA}$	(100 % von S_r)
Trafo 2	$400 \cdot \frac{3,6}{4,0} = 360 \text{ kVA}$	(90 % von S_r)
Trafo 3	$400 \cdot \frac{3,6}{4,4} = 327 \text{ kVA}$	(82 % von S_r)
Gesamtbelastung	= 1087 kVA	= 91 % von der theoretischen Gesamtleistung von $3 \cdot 400 = 1200 \text{ kVA}$

Während der Trafo 1 zu 100 % belastet wird, können der Trafo 2 nur mit 90 % und der Trafo 3 nur mit 82 % der Bemessungsleistung betrieben werden.

Der Transformator mit der kleineren Kurzschlussspannung wird höher belastet als der mit der größeren.

Abweichungen der Kurzschlussspannung zwischen 10 und 20 % sind im Allgemeinen wirtschaftlich noch tragbar, wenn der Transformator mit der kleineren Bemessungs-Leistung die höhere Kurzschlussspannung besitzt. Im umgekehrten Fall kann ein Verhältnis der Leistungen der parallel zu schaltenden Transformatoren von 1 : 3 bereits zu unwirtschaftlichem Betrieb führen.

Als Abhilfe kann dem zu hoch belastenden Transformator eine Parallellauf-drosselspule, z. B. unterspannungsseitig, vorgeschaltet werden. Sie dient nur zur Anhebung der Kurzschlussspannung, eignet sich aber wegen der dabei auftretenden Sättigung im Drosselkern nicht zur Begrenzung des Kurzschlussstromes.

Unter den vorgenannten Bedingungen ist ein einwandfreier Parallellauf möglich.

Größere Abweichungen der Kurzschlussspannungen sind u. U. zulässig, wenn nicht Sammelschienen-Parallelbetrieb, sondern Netz-Parallelbetrieb über Netzimpedanzen vorliegt.

Wirtschaftlichkeit des Parallelbetriebes

Bei zeitlich veränderlicher Belastung einer Gruppe mehrerer parallel geschalteter Transformatoren über eine festgelegte Zeitspanne kann durch Zu- oder Abschalten von Transformatoren ein Minimum der Gesamtverluste erreicht werden. Die Kurzschlussverluste sind von der Belastung quadratisch abhängig, d. h., die Summe der Kurzschlussverluste und der Leerlaufverluste bei Aufteilung der Belastung auf mehrere Transformatoren ist unter Umständen kleiner als bei Einsatz von nur wenigen Transformatoren.

Um einen umständlichen Verlustvergleich der am Parallelbetrieb beteiligten Transformatoren zu vermeiden, kann die Teillast, bei der ein Zuschalten eines weiteren gleichen Transformators (des p-ten Transformators) wirtschaftlich ist, nach folgenden Überlegungen bestimmt werden:

$$\text{Teillastfaktor } n = \frac{\text{Teillast}}{\text{Bemessungs-Leistung}}$$

Leistung der Gruppe

$$S_{\text{Gruppe}} = n \cdot S_r$$

$$S_r = \frac{\text{Bemessungs-Leistung des einzelnen Transformators}}{n}$$

Der Teillastfaktor für das wirtschaftliche Zuschalten eines weiteren gleichen Transformators (des p-ten Transformators) lässt sich nach folgender Formel bestimmen:

$$n = \sqrt{\frac{p \cdot (p-1) \cdot P_0}{P_k}}$$

p = Anzahl der parallel zu schaltenden Transformatoren

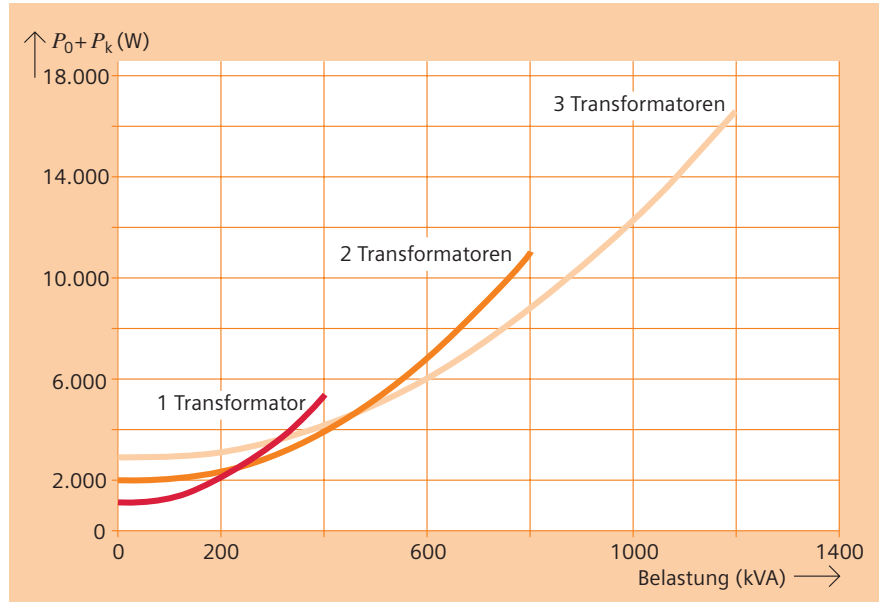


Bild 4 Kurven der Gesamtverluste parallel geschalteter 400-kVA-Transformatoren

Rechnungsbeispiel für 3 parallel zu schaltende gleiche Transformatoren

Bemessungs-Daten:

Bemessungs-Leistung	S_r	400 kVA
Leerlaufübersetzung	i_r	10/0,4 kV
Schaltgruppe		Dyn5
Bemessungs-Frequenz	f_r	50 Hz
Leerlaufverluste	P_0	930 W
Kurzschlussverluste	P_k	4600 W
Bemessungs-Kurzschlussspannung	u_{Zr}	4 %

bei p = 2

$$n = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 930}{4600}} = 0,64$$

$$S_{\text{Gruppe}} = 0,64 \cdot 400 = 256 \text{ kVA}$$

p = 3

$$n = \sqrt{\frac{3 \cdot 2 \cdot 930}{4600}} = 1,10$$

$$S_{\text{Gruppe}} = 1,10 \cdot 400 = 440 \text{ kVA}$$

Das wirtschaftliche Zuschalten des zweiten Transformators liegt bei 256 kVA, das des dritten bei 440 kVA, gerade 10% über der Nennleistung eines Transformators. Dies ist auch aus dem Diagramm (Bild 4) ersichtlich.

Siemens AG
Power Transmission
and Distribution
Transformers Division

Transformatorenwerk Kirchheim
Hegelstraße 20
73230 Kirchheim/Teck
Deutschland
Tel. +49 (0) 7021 508-0
Fax +49 (0) 7021 508-495

Siemens Transzformátor Kft.
1214 Budapest
II. Rákóczi Ferenc u. 189.
Hungary
Tel. +36 (1) 278 5300
Fax +36 (1) 778 5335

www.siemens.de/ptd

Fragen zur
Energieübertragung und -verteilung:
Unser Customer Support Center erreichen Sie
rund um die Uhr

Tel. +49 180 / 524 70 00 } (gebührenpflichtig
Fax +49 180 / 524 24 71 } z. B. 12 ct/min)

E-Mail: ptd.support@siemens.com
www.siemens.com/ptd-support

Die Informationen in diesem Dokument enthalten allgemeine Beschreibungen der technischen Möglichkeiten, welche im Einzelfall nicht immer vorliegen müssen. Die gewünschten Leistungsmerkmale sind daher im Einzelfall bei Vertragsschluss festzulegen.

Änderungen vorbehalten

Bestell-Nr. E50001-U411-A11-V1
Printed in Germany
Dispo-Stelle 19200
61C6046 Ra PA 04052.