

SIEMENS



[siemens.com/energy](https://www.siemens.com/energy)

GEAFOL® – Gießharztransformatoren in Schutzgehäusen mit Luft-Wasser-Kühlsystem

Fachbericht von Gerd Maur

Answers for energy.



GEAFOL-AFWF seit 1996 im Einsatz auf dem Luxus-Kreuzfahrtschiff „Grand Princess“

Sichere Leistung unter allen Einsatzbedingungen

Bewährte Technologien intelligent kombiniert

GEAFOL-Gießharztransformatoren sind universell, umweltfreundlich, weitestgehend wartungsfrei und flexibel für nahezu alle Anwendungsfälle und Aufstellorte geeignet. Vor allem wegen ihrer Vorteile hinsichtlich Zuverlässigkeit, Brandsicherheit und Umweltschutz sind sie seit 1965 weltweit im Einsatz – von der Stromerzeugung bis zum Endverbraucher, lieferbar im Leistungsbereich von 50 bis ca. 50.000 kVA und für Betriebsspannungen bis 45 kV.

Bei anspruchsvollen Umgebungsbedingungen bietet Siemens mit der Komplettseinheit „Transformator im Schutzgehäuse IP44 in Kühlungsart ADWF“ eine vorteilhafte Alternative zur klassischen Ausführung mit natürlicher oder forcierter Luftkühlung (AN bzw. AF) als „Transformator IP00“ oder „Transformator in einem Schutzgehäuse, z. B. IP23“. Mit dem optimierten Design dieser Einheit verbindet Siemens die bewährte GEAFOL-Technologie mit der einfachen Zufuhr des Kühlmedium, der berührungssicheren Aufstellung des Transformators und der Unabhängigkeit von den Umgebungsbedingungen.

Kühlungserfordernisse bei Sonderanwendungen

GEAFOL-Transformatoren erreichen Wirkungsgrade von über 99 Prozent. Dennoch entsteht im Betrieb Verlustwärme, die durch entsprechende Kühlung abgeführt werden muss. Abhängig vom Aufstellungsort erfordert dies anlagenseitig zuweilen erhöhte technische und bauliche Vorkehrungen. So benötigt ein typischer Verteiltransformator im mittleren Leistungsbereich von etwa 3.500 kVA physikalisch bedingt zirkulierende Kühlluftmengen von ca. 6.000 m³ je Stunde; bei höheren Leistungen oder erweiterten Anforderungen, etwa bei Betrieb von drehzahlregulierten Antrieben, entsprechend mehr. Die Zu- und Abfuhr solcher Luftvolumina kann bauseitig zu einem erheblichen Zusatzaufwand für Luftkanäle führen, verbunden mit ggfs. unvermeidlichen Maßnahmen zur Geräuschdämmung im Falle von Zwangsbelüftung durch Ventilatoren.

Besonderes Augenmerk ist zudem auf die Temperatur der Kühlluft zu richten. Werden die nach IEC 60076-1 definierten Werte für mittlere Jahrestemperatur, mittlere Tagestemperatur im wärmsten Monat sowie der maximalen



20-MVA-GEAFOL-Transformator-ADWF 33,00/11,50 kV für die derzeit weltgrößte FPSO zur Gasförderung und Verflüssigung vor der Westküste Australiens

Temperatur überschritten, muss entweder der Transformator größer dimensioniert oder seine Abgabeleistung reduziert werden. Häufig wird auch zum Schutz von Personen oder bei härteren Umgebungsbedingungen (z. B. stark staubbelastete oder aggressive Kühlluft) ein Schutzgehäuse mit erhöhter Schutzklasse gewünscht, um bauseitige Aufwendungen für eine Trafozelle zu vermeiden.

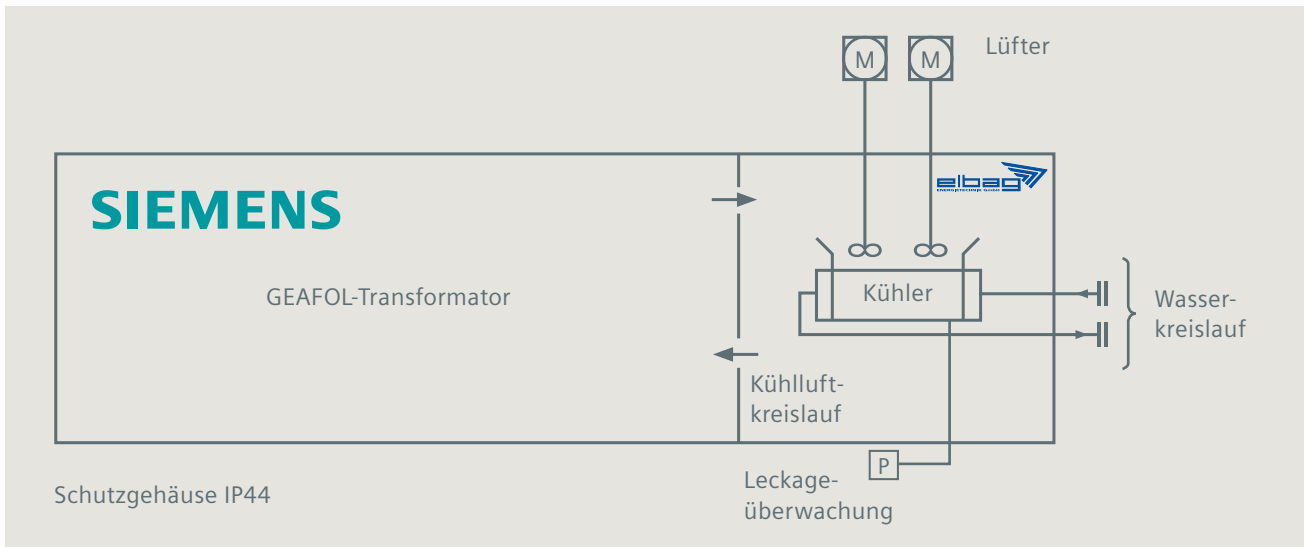
Die Lösung: der bisherige GEAFOL AFWF-IP44 und der neue GEAFOL ADWF-IP44

Siemens bietet für diese Sonderanforderungen eine optimierte Alternative an – den GEAFOL AFWF-IP44 bzw. den GEAFOL ADWF-IP44. Er unterscheidet sich in der Art der Kühlung von den „klassischen“ GEAFOL-Gießharztransformatoren. Dabei steht **AFWF** für **Air Forced – Water Forced** (forcierte Luft- und forcierte Wasserkühlung), **ADWF** für **Air Forced Directed – Water Forced** (forcierte, durch die Hauptwicklungen gerichtete Luftkühlung und forcierte Wasserkühlung).

Schutzklasse IP44 bedeutet nach DIN EN 60529 Schutz gegen Eindringen von festen Fremdkörpern $\geq 1,0$ mm Durchmesser und Spritzwasser. Ein entsprechend geschlossenes Gehäuse ist für eine optimierte Zwangsbelüftung unumgänglich.

Bereits 1996 wurden im Siemens-Trafowerk Kirchheim (Teck) die ersten Transformatoren in dieser Ausführung mit Leistungen von 9.150 kVA für das 5-Sterne-Kreuzfahrtschiff „Grand Princess“ realisiert und seitdem hundertfach im Leistungsbereich von 2 bis 20 MVA gefertigt.

Die größten bisher hergestellten 20-MVA-Transformatoren mit AFWF-Kühlung bringen ein Gewicht von je rund 36 Tonnen auf die Waage und kommen auf einer schiffsähnlichen Flüssiggas-Produktionsplattform (FPSO) zum Einsatz.



Schematische Darstellung der Funktionsweise eines GEAFOLE-Gießharztransformators im Schutzgehäuse mit Luft-Wasserkühlsystem

GEAFOL ADWF – einfach funktionell

Kompakte Leistung

Der eigentliche GEAFOLE-Transformator wird in dieser Ausführung weitestgehend konventionell ausgelegt und gefertigt – wobei er wegen der forcierten Kühlung kleiner und leichter wird. Basis für den Aufbau des Trafos ist ein stabiler, umlaufender Grundrahmen, der gleichzeitig zur Befestigung des umgebenden Schutzgehäuses dient. Dieses besteht aus zwei luftgefüllten Kammern. Die erste Kammer umgibt den Transformator, die zweite ist stirnseitig als Luftkanal angeflanscht: Sie nimmt einen Luft-Wasser-Wärmetauscher sowie die erforderlichen Lüfter auf. Für größere Einheiten mit höheren Verlustleistungen können gleichartige Luftkanäle spiegelbildlich auf der gegenüberliegenden Stirnseite oder auch an den Gehäuse-längsseiten vorgesehen werden. Beide Luftkammern sind oben und unten über ausreichend bemessene Luftein- und Luftaustrittsöffnungen miteinander verbunden.

Geschlossene Kreisläufe

Die vom Transformator im Betrieb erwärmte, nach oben steigende Kühlluft wird von Ventilatoren abgezogen, im Luftkanal durch den Kühler gedrückt und dann, optimal rückgekühlt, unten wieder den Transformatorwicklungen zugeführt. Luftleitsysteme sorgen für eine optimale

Verteilung der Kühlluft auf alle Wicklungen und Phasen des Transformators. Das im Wärmetauscher benötigte Kühlwasser, welches die Wärmeverluste aufnimmt, kann relativ einfach durch ein Rohrleitungssystem abgeführt und an geeigneter Stelle vom Aufstellungsort rückgekühlt werden.

Diese beiden geschlossenen Kühlkreisläufe ermöglichen den uneingeschränkten Dauerbetrieb des Transformators unter Einhaltung seiner zulässigen und lebensdauerbestimmenden Betriebstemperaturen. Über die Gehäuseoberflächen werden in der Regel weniger als 10 % der Verlustwärme abgestrahlt; über 90 % werden an den Wasserkreislauf abgeführt. Das Eindringen von verschmutzter oder aggressiver Umgebungsluft in das Gehäuseinnere wird nahezu vollständig verhindert.

Fällt die Luft- oder Wasserzirkulation aus, kann der Transformator für einen begrenzten Zeitraum mit etwa 20 % seiner Nennleistung betrieben werden, da das Gehäuse die dann noch entstehende Trafo-Verlustwärme selbst abstrahlen kann. Die Ventilatoren und Kühler lassen sich zu Wartungszwecken unkompliziert von außen ausbauen bzw. wieder montieren.



3.000-kVA-GFAFOL-Doppelstock-Stromrichtertransformator-ADWF 6,60/2x2,20 kV für eine Ölbohrplattform in der Nordsee

Sicher überwacht

Aus Sicherheitsgründen sind die Kühler in Doppelrohrbauweise ausgeführt und besitzen darüber hinaus eine Leckageüberwachung. Diese sendet im Fall einer Undichtigkeit des inneren Rohrsystems ein Signal an die ober- bzw. unterspannungsseitige Schaltanlage und schützt so den Transformator rechtzeitig durch allseitiges Freischalten vor einem Wassereinbruch unter anliegender Spannung.

Darüber hinaus wird die Temperatur des GFAFOL mit Pt100- oder PTC-Sensoren überwacht; die Kontrolle des äußeren Kühlwasserkreislaufs erfolgt in der Regel anlagenseitig. Um bei Trafostillstand den Niederschlag von Kondenswasser innerhalb des geschlossenen Gehäuses zu verhindern, sind im Inneren Stillstandsheizungen eingebaut, die sich thermo-/hygrostatgesteuert selbstständig zu- oder abschalten. Lüftersteuerung und Systemüberwachung sind in einem angebauten Steuer-schrank untergebracht und lassen sich von dort an einen übergeordneten Kontrollstand auf der Anlage anbinden.

Lebensdauergewinn durch Übergang von der Kühlungsart AFWF (Air Forced – Water Forced) zu ADWF (Air Forced Directed – Water Forced)

Mit der Kühlungsart ADWF*) beschreitet Siemens einen neuen Weg bei Gießharztransformatoren. Analog zu Öltransformatoren hoher Leistung mit beispielsweise der Kühlungsart ODWF ergibt sich durch die gerichtete Kühlung „D“ gemäß IEC 60076-2 eine Absenkung der Hot-Spot-Temperatur um etwa 5 K. Hinsichtlich der Auslegung der GFAFOL-Transformatoren könnte dadurch die mittlere Wicklungstemperatur entsprechend um 5 K erhöht werden. Siemens setzt jedoch auf zusätzliche Sicherheit: Die höhere thermische Ausnutzungsmöglichkeit des Isolationsmaterials bleibt als Reserve erhalten, was theoretisch nahezu eine Halbierung der Alterungsgeschwindigkeit bedeutet und rechnerisch die thermische Lebensdauer annähernd verdoppelt. Dies führt zu einer weiteren Reduzierung der bereits exzellenten Werte zur Ausfallrate (< 0,1 %) bzw. zur Steigerung der MTBF (mean time between failures, > 1.100 Jahre) der GFAFOL-Gießharztransformatoren.

*) Die Aufnahme der Kühlungsart ADWF in die IEC 60076 ist derzeit in Planung.



5.000-kVA-GEAFOL-Doppelstock-Stromrichtertransformator-ADWF 13,80/2x0,72 kV für eine Ölbohrplattform in der Nordsee (vor und nach dem Einbau in das Schutzgehäuse)

GEAFOL ADWF-IP44: Die Vorteile steigen mit der Leistung

Kostenvorteile mit System

Der Systemvergleich auf der folgenden Seite zeigt, welche Kosten- und Raumeinsparpotenziale die Ausführung GEAFOL ADWF-IP44 im Vergleich zur herkömmlichen AN-Bauweise besitzt. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Wasserkühlung deutlich effizienter ist als die Luftkühlung. Zudem steigt der Kühlluftbedarf mit der Leistung stark an, so dass deren Heranführung und Abführung technisch immer aufwändiger wird. Dies verstärkt sich um so mehr, wenn Schallschutzmaßnahmen aufgrund der bewegten Luftmassen erforderlich werden.

So benötigt ein GEAFOL ADWF-IP44 statt der schon eingangs erwähnten 6.000 m³/h Kühlluft (bei Ausführung GEAFOL AN-IP23) bei gleicher Leistung von 3.500 kVA lediglich ca. 8 m³/h Kühlwasser, die im Vergleich zu bedeutend komplexeren Luftkanälen mit großem Durchmesser viel einfacher durch ein kompaktes Wasserleitungsnetz transportiert werden können.

Kleiner, leichter, leistungsstärker

Zudem lässt sich durch die forcierte Kühlung die AN-Bauleistung des Transformators um bis zu 50 Prozent reduzieren, was sich über die resultierende Gewichtsersparnis und die Abmessungen in den Baukosten des Transformators widerspiegelt. Selbstverständlich müssen in diesen Vergleich auch die Kosten für das Gehäuse inklusive Kühler, Leckageüberwachung, Lüfter, Luftleitungssystem und Schaltschrank einbezogen werden. Hinzu kommen die unvermeidbaren Aufwendungen für das externe Kühlsystem. Auf den reinen Transformator bezogen bietet der GEAFOL ADWF-IP44 ab einer Leistung von etwa 3.500 bis 4.000 kVA jedoch im Allgemeinen einen mit der Leistung steigenden Kostenvorteil gegenüber AN-IP23. Einen ungefähren Vergleich zeigt die nachstehende Tabelle für drei ausgewählte, typische Beispiele:

**3-Phasen-GEAFOL-Verteiltransformator 1.600 kVA – 11,00 ± 2x2,5 %/0,42 kV – 60 Hz
6 % u_z – Dyn11 – 95 K Wicklungsübertemperatur – Onshoreaufstellung – Standardzubehör**

Nennleistung	1.600 kVA	
Kühlungsart	AN	ADWF
Schutzklasse Gehäuse	IP23	IP44
Anbauart Gehäuse	freistehend	gemeinsamer Grundrahmen
Gesamtverluste P ₀ + Pk ₁₂₀	15 kW	18,5 kW
Kühlmittelbedarf je Stunde	3.000 m ³ Luft	4 m ³ Wasser / 400 m ³ Luft
Gesamtgewicht	4.000 kg	3.750 kg
Außenabmessungen Gehäuse LxBxH	2.100x1.500x2.300 mm	2.300x1.500x2.100 mm
Kosten	100 %	135 %

**3-Phasen-GEAFOL-Doppelstock-Stromrichtertransformator 3.500 kVA – 11,00 ± 2x2,5 %/2x0,72 kV – 60 Hz
8 % u_z – Dd0 Dy11 – 95 K Wicklungsübertemperatur – Schiffsausführung – Standardzubehör**

Nennleistung	3.500 kVA	
Kühlungsart	AN	ADWF
Schutzklasse Gehäuse	IP23	IP44
Anbauart Gehäuse	freistehend	gemeinsamer Grundrahmen
Gesamtverluste P ₀ + Pk ₁₂₀	28 kW	35 kW
Kühlmittelbedarf je Stunde	6.000 m ³ Luft	8 m ³ Wasser / 600 m ³ Luft
Gesamtgewicht	7.500 kg	6.000 kg
Außenabmessungen Gehäuse LxBxH	2.700x1.600x3.000 mm	2.600x1.600x2.700 mm
Kosten	100 %	100 %

**3-Phasen-GEAFOL-Verteiltransformator 10.000 kVA – 22,00 kV ± 2x2,5 %/6,30 kV – 60 Hz
8 % u_z – Dyn11 – 95 K Wicklungsübertemperatur – Schiffsausführung – Standardzubehör**

Nennleistung	10.000 kVA	
Kühlungsart	AN	ADWF
Schutzklasse Gehäuse	IP23	IP44
Anbauart Gehäuse	freistehend	gemeinsamer Grundrahmen
Gesamtverluste P ₀ + Pk ₁₂₀	55 kW	65 kW
Kühlmittelbedarf je Stunde	11.000 m ³ Luft	15 m ³ Wasser / 1.000 m ³ Luft
Gesamtgewicht	18.500 kg	16.000 kg
Außenabmessungen Gehäuse LxBxH	3.500x2.200x3.900 mm	3.500x2.200x3.500 mm
Kosten	100 %	85 %

Vergleich verschiedener Bauleistungen AN-IP23 gegen ADWF-IP44 (alle Werte sind Circa-Angaben)

Im Einsatz auf hoher See: GEAFOL ADWF



Jeweils 26 GEAFOL-Stromrichter- und Verteiltransformatoren 3.500 und 4.000 kVA für 5 Tiefsee-Bohrschiffe



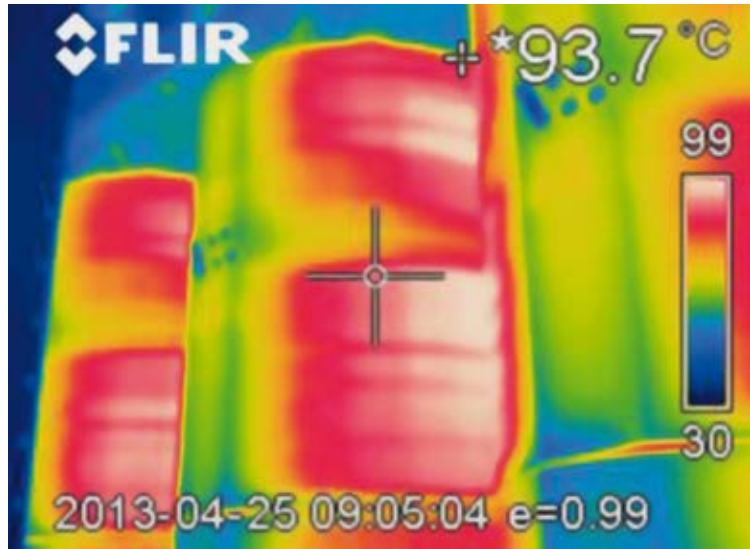
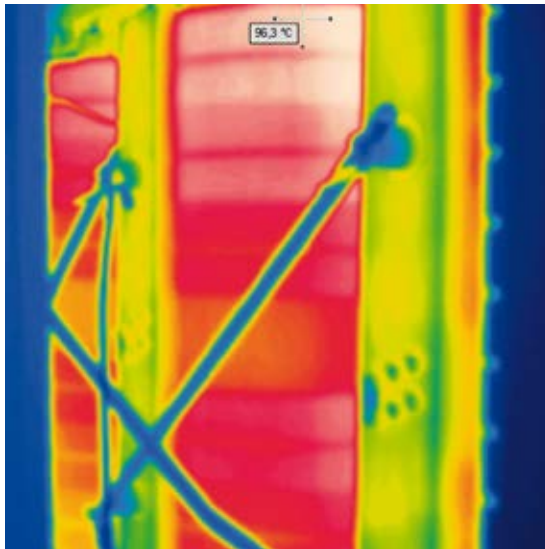
Die derzeit größten und treibstoffsparendsten Containerschiffe der Welt: 2 x 4.400 kVA-Transformatoren ADWF für die Triple-E-Klasse



2.400 kVA GEAFOL-Vierwicklungs-Stromrichtertransformator ADFW für eine Bohrinsel in der Nordsee



Die weltweit größte FPSO zur Erdgasförderung und Verflüssigung im Bau – mit 11 GEAFOL-Transformatoren ADFW von 6.300 bis 20.000 kVA



Lage der Hotspot-Temperatur in den Wicklungen bei vergleichbaren Transformatoren AN-gekühlt (links) und ADWF-gekühlt (rechts) – dadurch ergibt sich eine erhöhte Leistungsreserve

Typische Einsatzgebiete für GEAFOLE ADWF-IP44

Der GEAFOLE: Vielseitigkeit ist seine Stärke

Der Einsatz von GEAFOLE-Transformatoren im luft-/wasser-gekühlten Gehäuse ist vor allem bei erschwerten Aufstellungs- und Umgebungsbedingungen sinnvoll. Darunter sind vor allem Aufstellungsorte zu verstehen, an denen die Wärmeabfuhr über Kühlluft schwierig auszuführen ist, z. B. in stark verschmutzter oder chemisch aggressiver Atmosphäre, in kühlungstechnisch ungünstigen Transformatorenräumen sowie bei Anforderungen nach erhöhter Schutzklasse aufgrund der Personensicherheit. Deshalb eignet sich der GEAFOLE ADWF-IP44 besonders für die Aufstellung im Inneren von Ölbohrplattformen, in Schiffen jeglicher Art unterhalb der Wasserlinie, in Chemieanlagen, in sehr warmen Innenräumen oder bei unterirdischen Anwendungen (etwa im Bergbau, in Tunneln oder Entwässerungsanlagen etc.).

GEAFOLE nach Maß

Wie beim konventionellen GEAFOLE üblich, bietet Siemens auch in der Ausführung GEAFOLE ADWF-IP44 in enger Zusammenarbeit mit dem Gehäusehersteller eine Vielzahl kundenspezifischer Detaillösungen an:

- **Materialbeschaffenheit der Kühler:**
Anpassung an die chemische Zusammensetzung des Kühlwassers einschl. evtl. Frostschutzzusätze, Edelstahlkühler und seewasserbeständige Kühler
- **Betriebsdruck des Kühlers:**
neben standardmäßigen 0,6 MPa (6 bar) Betriebsdruck auch Wärmetauscher für höhere Wasserdrücke (z. B. 1,2 MPa Betriebsdruck/1,8 MPa Prüfdruck)
- **Technische Daten der Lüfter:**
Phasenzahl, Nennspannung und Nennfrequenz gemäß Kundenanforderungen, ggf. weitere Sonderausführungen
- **Schutzklasse des Gehäuses:**
IP54 alternativ zur Standardausführung IP44
- **Druckentlastungsöffnungen** für die Gehäuse im Fehlerfall
- **Zugang zum Transformator:**
über verschraubte Blenden oder Türen, auf Wunsch abschließbar oder mit Sicherheitsverriegelung (Interlock-System)
- **Thermographische Überwachung der Leistungsanschlüsse am Transformator:**
thermographische Fenster in den Gehäusewänden



Die Hauptkomponenten – Lüfter und Luft-Wasser-Wärmetauscher (mit Leckageüberwachung)

- **Anordnung von Kühler, Lüfter, Schaltschrank und Leistungskabeleinritten** nach individueller Vereinbarung
- **Art der elektrischen Leistungsanschlüsse:** Kabel oder Sammelschienen, durch antimagnetische Kabeleintrittsplatten, MCT-Rahmen oder freie Öffnungen zum Vergießen nach der Montage, Kabelanschlusskästen oder Steckanschlüsse
- **Vormagnetisierungsvorrichtung:** Zur Reduzierung des Einschaltstromstoßes in schwachen Bordnetzen
- **Korrosionsschutz und Farbton des Gehäuses:** Zusätzlich zu den Standardfarben RAL7032 (kieselgrau) und RAL7035 (lichtgrau) auch Sonderfarbtöne nach Vereinbarung; Pulverbeschichtung, Korrosivitätskategorie bis zu C5M lang nach DIN EN ISO 12944-6 lieferbar
- **Zusätzliche Überwachung der Kühlluft- und Kühlwassertemperatur** (jeweils vor und nach dem Kühler)
- **Warn- und Hinweisbeschilderung** nach Vereinbarung (einschl. Sprache)
- **Marinezertifizierungen:** z. B. ABS, CCS, DNV, GL, LR, RINA oder andere (auch für Kühler)
- **Prüfungen im Werk:** Interne Routineprüfungen nach IEC 60076-1, bei Schiffsausführung auch als Abnahme einschließlich Erwärmungsmessung. Weitere Prüfungen oder Abnahmen nach Vereinbarung.

Weitere Sonderanforderungen können individuell vereinbart werden.

Herausgeber und Copyright © 2014:

Siemens AG
Energy Sector
Freyeslebenstraße 1
91058 Erlangen, Germany

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

Wünschen Sie mehr Informationen,
wenden Sie sich bitte an unser
Customer Support Center.
Tel.: +49 180/524 70 00
Fax: +49 180/524 24 71
(Gebühren in Abhängigkeit vom Provider)

E-Mail: support.energy@siemens.com

Power Transmission Division
Bestell-Nr. E50001-G640-A227-V1 | Printed in Germany |
Dispo 19201 | c4bs-Nr. 7481 |
TH 101-120854 | WÜ | 473013 | WS | 05142.0

Gedruckt auf elementar chlorfrei gebleichtem Papier.

Alle Rechte vorbehalten.

In diesem Dokument genannte Handelsmarken
und Warenzeichen sind Eigentum der Siemens AG
bzw. ihrer Beteiligungsgesellschaften oder der
jeweiligen Inhaber.

Änderungen vorbehalten.

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