Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik

Band: 94 (2003)

Heft: 24-25

Artikel: Entwurf und experimentelle Untersuchung einer neuartigen störmagnetfeldarmen Mittelspannungsversorgung

Autor: Hörtz, Frank / König, Dieter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857627

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Entwurf und experimentelle Untersuchung einer neuartigen störmagnetfeldarmen Mittelspannungsversorgung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Entwurf und den experimentellen Untersuchungen eines trikoaxialen gasisolierten Rohrgasleiters für die Mittelspannungsversorgung von Linearbeschleuniger-Komponenten der Hochenergiephysik, der im geplanten Tesla[1)]-Linearbeschleuniger des Deutschen Elektronen-Synchrotrons[2)] (DESY) in Hamburg zur Anwendung kommen soll. Dabei steht die besondere Forderung der Minimierung des magnetischen 50-Hz-Störfeldes ausserhalb des dazu genutzten leitungsgebundenen Versorgungssystems im Vordergrund des Interesses. Neben der Einhaltung vorgegebener Grenzwerte und der Erfüllung zuständiger Normen kann anhand der durch Simulation berechneten und im Experiment ermittelten thermischen, magnetischen und dielektrischen Daten gezeigt werden, dass dem Einsatz einer solchen elektrischen Energieversorgung unter technischen Aspekten nichts entgegensteht.

Die Bereitstellung elektrischer Energie für die öffentliche Versorgung im Drehstromsystem kann durch verschiedene Energieübertragungs- und -verteilungssysteme erfolgen, deren Anwendbarkeit von diversen Einflussfaktoren eingeschränkt wird. So ist der Einsatz von Freileitungen in Ballungsgebieten einerseits wegen der Beeinflussung des Landschaftsbildes auf Grund strenger Umweltauflagen, aber auch wegen des meist vorherrschenden Platzmangels zunehmend problematisch. Auch die Verwendung von Kabelanlagen, die bei grossen Übertragungsleistungen technisch aufwändig zu gestalten sind, ist durch die begrenzte Übertragungsleistung bei langen Übertragungsstrecken eingeschränkt.

Frank Hörtz, Dieter König

Eine sinnvolle Alternative bieten unterirdische Leitungen in Form von gasisolierten Leitern, da sie eine hohe Übertragungsleistung aufweisen und keine störende Beeinflussung der Landschaft darstellen [1]. Zwar sind diese mit einem Vielfachen an Errichtungskosten verbunden, jedoch rechtfertigen manche Projekte einen solchen Aufwand, wenn zudem das Magnetfeld in der Umgebung der Energieversorgungsanlage stark reduziert werden soll.

So gewinnen angesichts der geforderten sehr niedrigen Grenzwerte streufeldarme Energieübertragungslösungen in der Zukunft mehr und mehr an Bedeutung. Dies gilt beispielsweise für die Energieversorgung in der Schweiz, wo ein extrem niedriger Grenzwert von 1 µT (Effektivwert) für neu errichtete Anlagen mit Nennspannungen von über 1 kV diskutiert wird [2]. Auch in anderen Ländern gibt es Empfehlungen, Mindestabstände bei öffentlichen Gebäuden einzuhalten, so dass die dort herrschende Magnetfeldstärke bestimmte Grenzwerte nicht überschreitet. Diese diskutierten bzw. gültigen Vorsorgewerte der öffentlichen Energieversorgung können – bei ausreichendem Abstand zu den zu schützenden Objekten – durch derzeit bekannte einpolige oder tripolare gasisolierte Leitersysteme eingehalten werden, da sie im Vergleich zu Kabeln und Freileitungen verminderte magnetische Streufelder besitzen.

Anders verhält es sich hingegen bei Anwendungsgebieten, bei denen Magnetfelder in unmittelbarer Umgebung zur Energieversorgung möglichst vollständig zu vermeiden sind. Hierzu zählt neben speziellen computertechnischen Einrichtungen beispielsweise die Medizintechnik. Entsprechende Anforderungen erge-

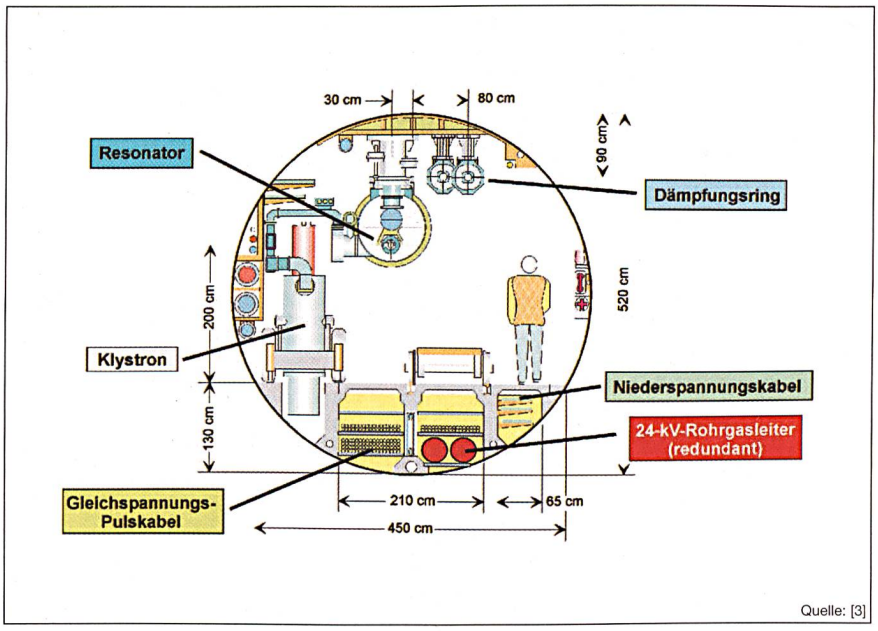


Bild 1 Tunnelquerschnitt des geplanten Linearbeschleunigers Tesla

ben sich aber auch bei Experimenten der Hochenergiephysik in Teilchenbeschleunigern, bei denen hohe elektrische Leistungen im Beschleunigertunnel übertragen und verteilt werden müssen. Folglich fordern solche Anwendungsgebiete eine äusserst magnetfeldarme Energieversorgung, wie dies im nachfolgenden Kapitel gezeigt wird.

Anforderungen an ein Mittelspannungs-Übertragungssystem zur Anwendung in der Beschleunigertechnik

In internationaler Zusammenarbeit plant das Deutsche Elektronen Synchrotron (DESY) den Bau eines 33 km langen Tesla-Linearbeschleunigers für Elektronen und Positronen, der eine neuartige Röntgenquelle beinhaltet. Die bei der Zerstrahlung von Elektronen und Positronen im Kollisionspunkt in der Mitte der Anlage freigesetzte Energie erzeugt bei einer Schwerpunktsenergie des Linearcolliders von 500 GeV eine Energiedichte, wie sie im Universum 10^{-12} s nach dem Urknall bestand [3]. Die Experimente bilden also gewissermassen den Urknall nach und sollen zu einem besseren Verständnis der Vorgänge führen, die bei der Bildung des Kosmos bestimmend waren.

Der Teilchenbeschleuniger Tesla befindet sich aus Abschirmungsgründen in einer unterirdischen Tunnelröhre mit einem Durchmesser von etwa 5 m, die ausgehend vom Gelände des DESY rund 30 m unter der Erde verläuft (Bild 1).

Die Teilchen, die zur Kollision gebracht werden, sind in Pakete (Bunchs) gebündelt, deren Durchmesser einem Tausendstel eines menschlichen Haares entspricht [3]. Bevor sie im Linearbeschleuniger beschleunigt werden, müssen die Bunchs in einem Dämpfungsring «geschrumpft» werden (Bild 1). Magnetische Wechselfelder stören die Dämpfung der Teilchen in den Bunchs und führen zu deren räumlichen Aufweitung. Deshalb müssen die Wechselfelder, die im Gegensatz zu Gleichfeldern nicht ohne grossen technischen Aufwand kompensiert werden können, stark reduziert werden. Die durch das elektrische Energieversorgungssystem im Tunnel verursachten Magnetfelder sollen am Beschleunigerstrahlrohr in rund 2 m Entfernung zum elektrischen Energieversorgungssystem somit nicht grösser als 2 µT sein. Das Erdmagnetfeld mit etwa 47 µT lässt sich dagegen als Gleichfeld kompensieren und stört im Beschleunigerbetrieb nicht.

Entlang des Tunnels sind 9 elektrische Versorgungsstandorte vorgesehen, deren Gesamtleistungsbedarf etwa 180 bis 200 MVA beträgt. Diese sollen direkt durch den Beschleunigertunnel versorgt werden. Hierzu speist die übergeordnete Energieversorgung mit der Betriebsspannung U_m = 123 kV je einen Einspeisepunkt am Anfang, in der Mitte und am Ende des Tunnels. Dadurch ergeben sich insgesamt 4 Speiseabschnitte mit je 45 bis 50 MVA Leistungsbedarf. Die Versorgungsspannung der oberirdischen Energieversorgung wird in den Einspeisepunkten von 123 kV auf U_m = 24 kV für die Tunnelversorgung transformiert. Die im Tunnel verlegte 24-kV-Energieversorgung soll redundant ausgelegt sein, so dass zwei Übertragungssysteme parallel betrieben werden können (Bild 1). Der Nennstrom eines Übertragungssystems ergibt sich auf Grund des Leistungsbedarfs eines Speiseabschnittes zu I_n = 675 A.

Die wesentlichen genannten Anforderungen sind in der Tabelle zusammengefasst.

Anforderung	Geforderter Grenzwert
Energiebedarf pro Speiseabschnitt	45–50 MVA
Betriebsspannung U_m	24 kV
Nennstrom I_n	675 A
Fehlerstromüberlast I_f bei Ausfall eines Systems	1350 A
Grenzwert des magnetischen Feldes in 2 m Abstand	2 µT
Zulässige Verlustleistung	100 W/m
Sonstige Anforderungen	
– Kompakte Bauweise bei wirtschaftlicher Montage	
– Verwendung von Standardkomponenten	
– Gute Zugänglichkeit der einzelnen Komponenten	

Quelle: Hörtz

Anforderungen und geforderte Grenzwerte des elektrischen Energieversorgungssystems des Tesla-Linearbeschleunigers

Vergleichende Studien zur störfeldarmen Energieversorgung – Bewertung möglicher Lösungsansätze

Für die Wahl eines äusserst Raum sparenden, störfeld- und verlustarmen Energieversorgungssystem im Beschleunigertunnel existieren mehrere technische Möglichkeiten (Bild 2), die nachfolgend kurz vorgestellt und auf ihre Anwendbarkeit für die vorliegende Problematik geprüft werden.

Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ)

Die Hochspannungs-Gleichstromübertragung bietet den Vorteil, dass das durch den Stromfluss erzeugte Magnetfeld ein Gleichfeld ist, das durch Zusatzeinrichtungen kompensiert werden kann. Die Drehstrom-Entnahme entlang einer HGÜ-Leitung ist allerdings nur mittels Stromrichter möglich und deshalb aufwändig. Da im vorliegenden Anwendungsfall allerdings einerseits eine Energieübertragung von verschiedenen Einspeisepunkten zu Niederspannungstransformatoren, andererseits aber auch eine Energieverteilung auf einzelne Verbraucher entlang der Beschleunigerstrecke zu entwerfen ist, scheidet diese Variante aus.

Kabelanlage

Kabelanlagen bieten neben einer seit Jahren bewährten Technik eine schnelle

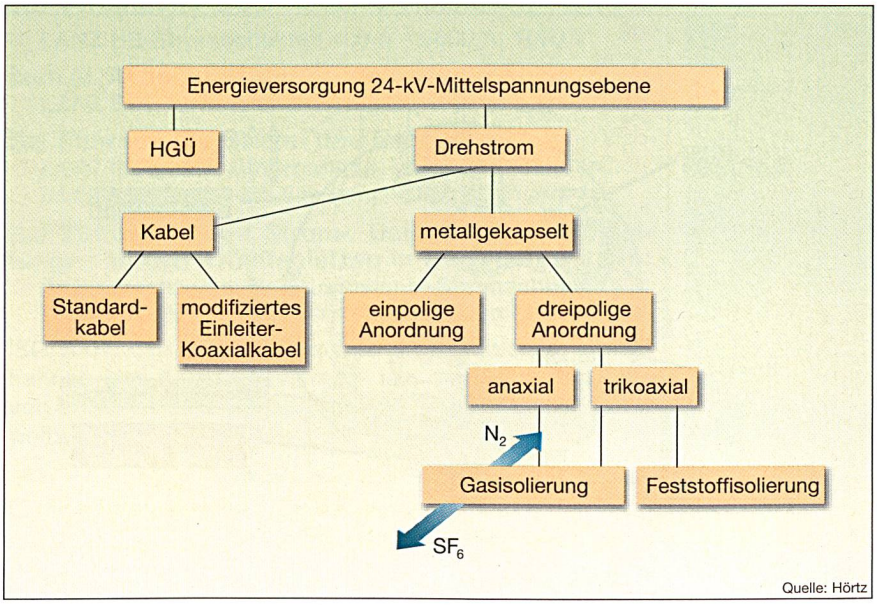


Bild 2 Mögliche Lösungsansätze für eine Energieversorgung in der 24-kV-Mittelspannungsebene
HGÜ: Hochspannungs-Gleichstromübertragung

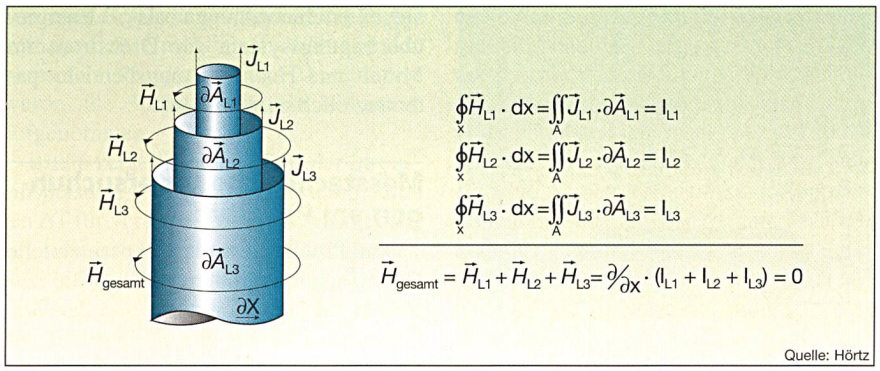


Bild 3 Lage, Richtung und Grösse des Magnetfeldes des trikoaxialen Rohrgasleiters Kogil

Verfügbarkeit. Allerdings konnte bei der Anordnung von zwei Drehstromsystemen in Bündelverlegung in einem feldoptimalen Abstand von d = 50 mm anhand analytischer Berechnungen nachgewiesen werden, dass 300 mm vom Mittelpunkt des Kabelsystems die magnetische Flussdichte annähernd 100 µT bei einer Strombelastung von I = 635 A beträgt. Somit wird bei einer umgekehrt proportionalen Abnahme der Flussdichte mit dem Abstand zur Kabeltrasse der geforderte Grenzwert in zwei Metern Abstand nicht eingehalten [4]. Hierbei wurde bereits eine Minimierung des Feldes durch Phasentausch berücksichtigt. Folglich wären Feldkompensationsmassnahmen notwendig, die zu zusätzlichen Verlusten, höheren Kosten, verschlechterter Zugänglichkeit und erhöhter Wärmeabfuhr führen.

Wird hingegen der Schirm eines konventionellen Einleiter-Starkstromkabels stromtragfähig ausgeführt, so dass jedes Kabel Hin- und Rückstrom eines Stranges führt, kann ausserhalb eines jeden Kabels das magnetische Störfeld weit gehend aufgehoben werden (modifiziertes Einleiter-Koaxialkabel nach Bild 2). Der Nachteil liegt hier allerdings in den dreifach höheren Stromwärmeverlusten der drei parallel verlegten Einzelleitern, die im Mantel entstehen.

Gasisolierter Leiter (GIL)

Der einpolige gasisolierte Leiter besteht aus einem Leiterrohr, das innerhalb eines Mantelrohres angeordnet ist. Wird der gasisolierte Leiter mit beidseitig geerdeter und leitend durchverbundener Kapselung ausgeführt, kann der gesamte Rückstrom im Mantelrohr zur Reduzierung des äusseren Magnetfeldes genutzt werden. Allerdings erreicht nach [5] die magnetische Induktion auf dem GIL der Firma Siemens bei einer Belastung mit 400 kV und 700 A dann noch immer einen Wert von B = 20–25 µT, was den geforderten Grenzwert von 2 µT in 2 m Abstand bei weitem überschreitet. Der Mantelstrom, der zur Reduzierung des Magnetfeldes eingesetzt wird, führt zudem annähernd zur Verdopplung der Verluste [6].

Bei der trikoaxialen Anordnung sind alle drei Leiter des Drehstromsystems konzentrisch «ineinandergeschachtelt», so dass eine achsensymmetrische (koaxiale) Anordnung entsteht (Bild 3). Hierbei erzeugt ebenfalls jeder stromdurchflossene Leiter des Drehstromsystems ein Magnetfeld. Durch die konzentrische Anordnung der zylindrischen Leiter fallen allerdings die Magnetfeldvektoren aller Leiter räumlich im resultierenden Feld H_{gesamt} im homogenen Abschnitt der Anordnung zusammen. Durch die im Gesamtfeld enthaltene Summe der einzelnen Phasenströme, deren Addition auf Grund der Phasenverschiebung null ergibt, heben sich die Magnetfelder der Anordnung vollständig auf (siehe Formel in Bild 3). Diese Kompensation des magnetischen Feldes ist für beliebige Stromhöhen gültig. Je nach Anwendungsgebiet und Übertragungsleistung können bei der trikoaxialen Anordnung die Isolierräume feststoff- oder gasisoliert ausgelegt werden (Bild 2).

Entwurf einer trikoaxialen Leiteranordnung für U_m = 24 kV und I_n = 675 A

Auf Grund der oben erwähnten Vorteile einer trikoaxialen gasisolierten Energieübertragung wurde eine solche als Energieversorgungssystem des Tesla-

Bild 4 Trikoaxialer Rohrgasleiter in Konfiguration I
Bild 4a: Prototyp; Bild 4b: technische Zeichnung

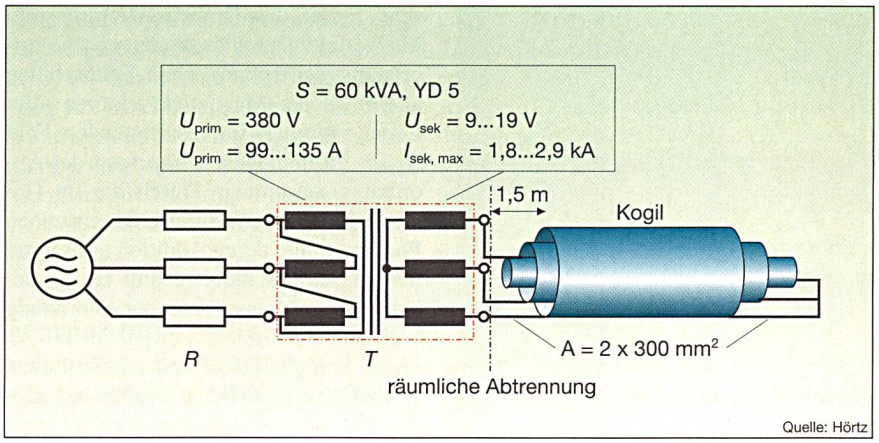


Bild 5 Prinzipschaltbild des Hochstromversuchsstandes zur Temperatur- und Magnetfeldmessung
S = 60 kVA, YD 5; Primärseite des Transformators: U_{prim} = 380 V; I_{prim} = 99–135 A; Sekundärseite des Transformators: U_{sek} = 9–19 V; $I_{sek,max}$ = 1,8–2,9 kA

Beschleunigers an der TU Darmstadt, Fachgebiet Hochspannungstechnik, als *ko*axial *gasi*solierter *L*eiter (Kogil) entwickelt und als Prototyp aufgebaut. Durch Kombination mehrerer Module, die in Originalgrösse gefertigt wurden, kann der Kogil in drei verschiedenen Konfigurationen variiert werden. Auf Grund der Steck- und Schiebetechnik zur Verbindung der Elemente «Ausleitung», «Längsmodul», «Schiebemuffe» und «T-Stück» sind keine mechanischen Arbeiten notwendig, so dass ein schneller und gezielter Austausch einzelner Module möglich ist. Bild 4a zeigt den Prototypen in einer der drei möglichen Konfigurationen mit den Phasenleitern L_1 (innerer Leiter), L_2 (mittlerer Leiter) und L_3 (äusserer Leiter).

Unter Berücksichtigung des optimalen Radienverhältnisses und der Mindestschlagweite zwischen den drei Phasenleitern wurden die Aussenradien mit L_1 = 40 mm, L_2 = 115 mm und L_3 = 175 mm bei einer Wandstärke von 10 mm Aluminium gewählt.

Für die Halterung und Zentrierung der Leiter werden Isolierstützer aus Epoxidharzformstoff verwendet, bei denen man zwischen Schott- und Scheibenstützer unterscheidet (Bild 4b). Während die Scheibenstützer lediglich zur mechanischen Fixierung dienen, übernehmen die verwendeten Schottstützer zudem die Aufgabe der Schottung einzelner Gasräume. Beide sind an ihren zylindrischen Innen- und Aussenflächen mit einer umlaufenden Nut versehen, in die ein leitfähiges Schlauchprofil (Scheibenstützer) bzw. eine Rundschnur (Schottstützer) zur kraftschlüssigen Verbindung zwischen Phasenleiter und Stützer eingelegt wird. Zudem wird dadurch der zwischen Phasenleiter und Stützer entstehende Luftspalt elektrisch «überbrückt», wodurch sich kritische Feldüberhöhung vermeiden lassen. Zur elektrischen Kontaktierung der einzelnen Module dienen radiale Ringspiralkontakte mit elliptischen Windungen, die in einer eingestochenen Rechtecknut eingelegt sind (Bild 4b).

Während bei den bisher bekannten gasisolierten Leitern der Berührungsschutz durch Mantelrohre erreicht wird, kann bei der Anordnung des trikoaxialen Rohrgasleiters auf einen vierten, die restlichen drei Phasenleiter des Drehstromsystems umhüllenden Leiter als Berührungsschutz durch Einsatz der so genannten Aussenleitererdung verzichtet werden. Hierzu fungiert der äusserste Leiter der Anordnung als geerdeter Sternpunktleiter des Drehstromsystems [7]. Voraussetzung hierzu ist die Dreieck-Schaltung der Phasen, so dass der trikoaxiale Rohrgasleiter aus der 123-kV-Ebene über einen Stern-Dreieck-Transformator in der 24-kV-Ebene versorgt wird.

Als Isoliergas wird im Gassystem des Prototyps des Kogil reiner und trockener Stickstoff mit einem maximalen Anteil von χ = 10% SF_6 mit einem relativen Überdruck von Δp = 0,01 MPa verwendet. Hierdurch kann neben der minimalen Steigerung der Durchschlagspannung das Eindringen von Fremdgasen und Schmutzpartikeln auf Grund von allfälligen Undichtigkeiten in den Dichtmanschetten und den Einfüllstutzen behindert werden.

Da der Kogil mit seinen Detaillösungen eine wesentliche Neuentwicklung mit Anwendungschancen in weiteren technischen Bereichen darstellt, wurde in Zusammenarbeit mit DESY die trikoaxiale Leiteranordnung als «Energieübertragungssystem für Drehstrom im Mittel- und Hochspannungsbereich» patentrechtlich geschützt [8].

Messtechnische Untersuchungen am Prototyp

Am Prototyp wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die zur Bestätigung des Konzeptes und der baulichen Ausführung dienen. Wie bei der Entwicklung von fabrikfertigen elektrischen Schaltanlagen wurden hierbei die dielektrischen Untersuchungen (Hochspannung bei niedrigen Strömen), die thermischen Untersuchungen und die Untersuchungen des Magnetfelds mit Nennstrom (Hochstrom bei niedrigen Spannungen) mit hierfür geeigneten Versuchsständen getrennt voneinander durchgeführt.

Bild 5 zeigt schematisch den zur Temperatur- und Magnetfeldmessung aufgebauten dreipoligen Hochstromversuchsstand mit den entsprechenden Abmessungs- und Transformatordaten. Der Primärstrom des eingesetzten Hochstromtransformators (T in Bild 5) wird durch regelbare Widerstände (R) begrenzt, um die erwünschte Nennstromhöhe I_n auf der Sekundärseite einstellen zu können.

Erwärmungsprüfung

Zur Temperaturmessung der Leiter- und Gastemperatur des Prototyps bei Nennstrombelastung wurden Thermoelemente aus den Werkstoffen Nickel-Aluminium (NiAl) und Nickel-Chrom (NiCr) verwendet. Der Versuchsaufbau wurde zunächst 12 Stunden mit einem symmetrischen Strom von I_n = 675 A belastet. Danach wurde die Temperaturmessung um weitere 12 Stunden nach der Strombelastung fortgesetzt, um einen Vergleich

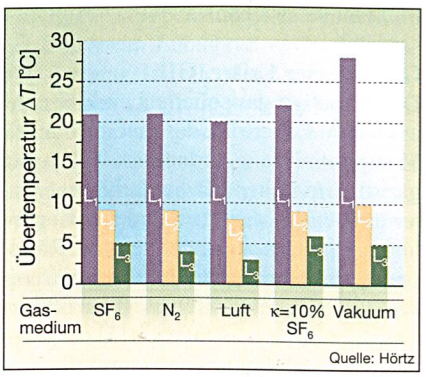


Bild 6 Gemessene Übertemperaturen des Kogil nach 12 Stunden Belastung
I_n = 675 A in Abhängigkeit verschiedener Isoliergasmedien (ϑU = 23 °C)

zwischen Erwärmungs- und Abkühlungsverhalten zu ermöglichen. Während der gesamten Prüfdauer von 24 Stunden wurde alle 30 Sekunden ein Messwert aufgenommen.

Bild 6 zeigt die in der Nähe der Stromeinspeisung ermittelten Übertemperaturen ΔT für verschiedene Isoliergasmedien bei dieser Nennstrombelastung des Kogil. Die Übertemperaturen stellen jeweils die Differenz zwischen gemessener Temperatur des Kogil bei Strombelastung und der ebenfalls mit Thermoelementen gemessenen Umgebungstemperatur θ_U dar.

Der Vergleich der gemessenen Übertemperaturen der verschiedenen Isoliergasmedien zeigt, dass für alle Medien ausser für das Vakuum annähernd die gleichen Temperaturen für den jeweiligen Leiter erreicht werden. Dieser Effekt ist in den minimalen Unterschieden der Wärmewiderstände für die Isoliermedien Luft, N_2 und N_2SF_6 begründet. Auf Grund der Vernachlässigbarkeit der Konvektion im Vakuum kann allerdings der Effekt der hier vorliegenden höheren Leiterübertemperaturen gegenüber den Leiterübertemperaturen bei den Isoliergasen festgestellt werden.

Um das komplexe Erwärmungsverhalten der trikoaxialen Leiteranordnung auch auf Anwendungen mit abweichender Nennstrombelastung und anderen Isoliergasmedien übertragen zu können, wurde ein simulationstechnischer Ansatz der Erwärmung der Leiter sowie des Isoliergases durch die Wärmenetzmethode[3)] parallel zu den oben beschriebenen Messungen durchgeführt. Dabei konnte bei Belastung mit Nennstrom ($I_n = 675$ A) eine gute Übereinstimmung zwischen Simulationsberechnungen und Messungen der Leitertemperatur durch Erwärmungsversuche erreicht werden. Die Differenzen bewegen sich für die Phasenleiter L_2 und L_3 im Wesentlichen im Bereich des Messfehlers der Thermoelemente von etwa 1–2 °C. Bei Phasenleiter L_1 (innerster Leiter) besitzt die Anschlusskontaktierung auf Grund des kleinen Querschnitts den grössten Einfluss, so dass bei diesem Leiter Differenzen zur Simulation von maximal 7 °C zu verzeichnen sind. Auf Grund der geringen Differenz der Leitertemperatur von Messung und Simulation für Nennstrombelastung ($I_n = 675$ A) kann von einer adäquaten Nachbildung des Erwärmungsprozesses durch das in der Simulation verwendete Wärmeersatzschaltbild ausgegangen werden. Somit ist voraussichtlich auch bei einer Strombelastung von $I_f = 1350$ A, was den Ausfall eines der beiden redundanten Übertragungssysteme darstellt, mit einer geringen Abweichung von Simulation und Messung zu rechnen. Nach der durchgeführten Simulationsrechnung wird bei dieser Fehlerstrombelastung unter Voraussetzung blanker Leiter sowie bei einer maximalen Belastung von $I = 1700$ A unter Voraussetzung einer Beschichtung der Leiter mit einem Material mit einer Absorptionszahl von $\varepsilon = 0{,}9$ die nach Norm [9] zulässige Leiterübertemperatur von 75 °C nicht überschritten. Unter der Voraussetzung einer Beschichtung der Aussenfläche der Phasenleiter könnte folglich das Energieübertragungssystem bei Einsatz in der 24-kV-Ebene bei einem Nennstrom von $I = 1700$ A eine maximale Leistung von 70 MW übertragen. Für höhere Belastungsströme ist der Einsatz einer Gasaustauschkühlung des Phasenleiters L_1 denkbar.

Messung des magnetischen Störfeldes

Zur Messung des magnetischen Reststörfeldes des trikoaxialen gasisolierten Leiters bei Nennstrombelastung wurde der gleiche Hochstromkreis wie bei der Erwärmungsprüfung verwendet (Bild 5). Um den Einfluss des vom Hochstromtransformator ausgehenden Magnetfeldes zu verringern, wurde der Transformator vom Prototyp räumlich getrennt. Die Messwertaufnahme erfolgte mit Hilfe eines dreiachsigen Magnetfeldsensors, der zur Erfassung von Gleich- und Wechselmagnetfeldern mit einer Kalibriergenauigkeit von 0,5 % geeignet ist.

Die Messungen wurden an Konfiguration II des Kogil durchgeführt, die aus den beiden Ausleitungen A (Einspeisung) und B (Leiterzusammenschluss) sowie dem Längsrohr besteht (Bild 7). Die Messungen wurden an den eingezeichneten Messebenen 1 bis 41 auf dem Leiter (0 cm) und in 25 cm Abstand (25 cm) durchgeführt. Bild 7 zeigt hierzu die gemessene magnetische Induktion an diesen Messpunkten zum einen «vor» der waagrecht angeordneten Konfiguration sowie «dahinter».

Wie Bild 7 verdeutlicht, herrscht im homogenen Bereich der Anordnung (Messebene 15...35) in ausreichendem Abstand zur Einspeisung und zum Leiterzusammenschluss direkt auf dem Leiter ein Magnetfeld mit einem Maximalwert von 10 µT. Die an Messpunkt 24 aufgenommene Magnetfeldstärke von 2–4 µT direkt auf dem Phasenleiter L_3 (äusserer Leiter) zeigt hierbei, dass die Einhaltung des geforderten Grenzwertes von 2 µT ohne weiteres möglich ist. Das an den Messpunkten «vorne» und «hinten» aufgenommene Feld nimmt zu den Messpunkten in 25 cm Entfernung umgekehrt proportional zum Abstand ab. Richtung Messebene 15 und 35 wurden auf Grund der Einspeisung und des Leiterzusammenschlusses ansteigende Magnetfeldstärken ermittelt. Diese enden bei Messebene 1 und 41 in Maximalwerten von bis zu 1 mT. Aber selbst in diesen inhomogenen Bereichen mit den parasitären Einflüssen der Einspeisung und des Leiterzusammenschlusses wurden in 1,5 Metern Abstand zum Kogil maximal 2 µT erreicht, so dass auch hier der vorgegebene Grenzwert unterschritten wird. Dadurch konnten angestellte Simula-

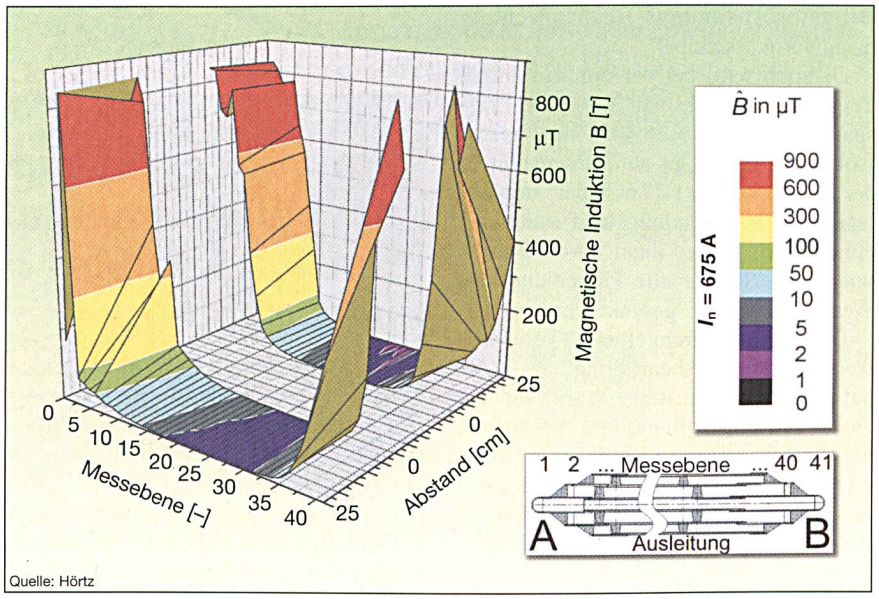


Bild 7 Gemessene magnetische Induktion B der Messebene 0 bis 41 von Konfiguration II (jeweils auf Phasenleiter L_3 und in 25 cm Abstand)

Belastung mit I_n

tionsrechnungen mit den durchgeführten Messungen für den homogenen Bereich der Anordnung weitgehend bestätigt werden.

Dielektrische Untersuchungen

An dielektrischen Untersuchungen wurden neben der Blitzstossspannungs- und Nennstehwechselspannungs-Beanspruchung Teilentladungsmessungen an der Anordnung des Kogil durchgeführt.

Für die Blitzstossspannungs-Beanspruchung wurde hierbei ein verminderter Isolationspegel von $U_{rb} = 95$ kV (Scheitelwert) bei Einsatz in der 24-kV-Ebene gewählt. Dies ist zulässig, da der trikoaxiale Rohrgasleiter kabelähnlich betrieben wird, d.h. es kann von einem Einsatz entsprechend dimensionierter Überspannungsableiter am jeweiligen Ende der Übertragungsstrecke ausgegangen werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bereits das Isoliergas Luft, das von allen verglichenen Medien (Luft, N_2SF_6-Gemisch, reines SF_6) die geringste dielektrische Festigkeit besitzt, beide Polaritäten der Blitzstossbelastung mit dem verminderten Prüfwert das Stehspannungsprüfverfahren B [10] erfüllt[4]. Zudem wurde für den auf Grund des Leiterradius dielektrisch kritischsten Phasenleiter L_1 die minimale theoretische Durchschlagspannung von 134 kV durch die Ermittlung der Durchschlagspannung bei negativem Blitzstoss bestätigt. Folglich sind auch bei einem Isoliergasgemisch von $\kappa = 10\%$ SF_6, das als Isoliermedium im trikoaxialen Rohrgasleiter für den späteren Einsatz vorgesehen ist, keine dielektrischen Schwachstellen bei Blitzstossspannungs-Beanspruchung nach Norm erkennbar.

Dadurch wird bei der durchgeführten Teilentladungsmessung mit einer Prüfspannung von $U_q = 26{,}4$ kV mit diesem Isoliergasgemisch bis auf Phasenleiter L_2 der Konfiguration I (7 pC) der empfohlene [11] Teilentladungswert von 5 pC eingehalten. Dieser kann durch Einsatz von 100% SF_6 für alle Phasenleiter auf Werte kleiner 2 pC gesenkt werden.

Die ebenso durchgeführte Nennstehwechselspannungsbeanspruchung, die auf $U_w = 50$ kV gesteigert und für die Dauer von einer Minute gehalten wurde, hat gezeigt, dass eine Erfüllung der Normen und technischen Empfehlungen mit der aufgebauten Anordnung möglich ist [9].

Zusammenfassung

Da bekannte Energieversorgungssysteme die Anforderungen zum Einsatz in der Beschleunigertechnik aus thermischen, magnetischen oder elektrotechnischen Gesichtspunkten nicht oder nur zum Teil erfüllten, wurde ein dreipoliger, koaxial gasisolierter Leiter (Kogil) unter Berücksichtigung bisher bekannter Vorschläge zur Anwendung in der Beschleunigertechnik entworfen und als Prototyp aufgebaut.

Untersuchungen an diesem Prototyp sowie begleitende Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass die dielektrischen und thermischen Grenzwerte nach Norm und technischen Empfehlungen sowie die Grenzwerte der Restmagnetfeldstärke nach Forderung des DESY von 2 µT in 2 m Entfernung von der Energieversorgung erfüllt werden.

Der Kogil ist dadurch für die Anwendungsproblematik des DESY in der Beschleunigerphysik geeignet, da neben der Einhaltung der geforderten Grenzwerte nach Norm die Anforderungen nach kompakter Bauweise (durch Aussenleitererdung) und gute Zugänglichkeit der Einzelkomponenten (durch Modultechnik) erfüllt sind.

Mögliche weitere Anwendungsgebiete des Kogil sind:

- Alpenkreuzungen, bei denen eine Freileitung vermieden werden soll;
- Neubau und Sanierung von medizintechnischen Anlagen;
- Schiffs-, Berg- und Tunnelbau auf Grund der geringen Brandlast;
- EMV-sensible Geräte und Anlagen (Labor- und Industriebau, Flughafenbau);
- öffentliche Energieversorgung mit niedrigen Grenzwerten.

Referenzen

[1] *G. Hosemann, W. Boeck:* Grundlagen der elektrischen Energietechnik. Berlin Heidelberg. Springer Verlag, 4. Auflage, 1991.

[2] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) – Ergebnisse des Vernehmlassungsverfahrens. Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 23. Dezember 1999, SR 814.710.

[3] Das Linearcollider-Projekt – Innovation für die Zukunft. DESY, 98-Jahrbuch des Forschungszentrums DESY, 3. Jahrgang, Hamburg, 1998, S. 61 bis 78.

[4] *I. O. Vlase, D. König:* Gutachten zur elektromagnetischen Umweltverträglichkeit von Tesla im Hinblick auf die Energieversorgung, Frequenz 50 Hz, und für das Impulskabel, Frequenz bis 10 kHz. Untersuchungsbericht 149 des Fachgebietes Hochspannungstechnik, TU Darmstadt, 2001.

[5] *O. Diessner:* Prinzipien und Prüfkonzeption für gasisolierte Übertragungssysteme (GIL). High Volt Kolloquium 1999, Beitrag 2.3, Cottbus, Mai 1999, S. 91 bis 97.

[6] *H. Koch:* Gasisolierte Übertragungsleitungen der zweiten Generation für das Hochspannungsnetz. e&i, 119. Jg., Heft 1, 2002, S. 1 bis 5.

[7] *F. Schwenkhagen, P. Schnell:* Gefahrenschutz in elektrischen Anlagen. Essen, Verlag W. Girardet, 1957.

[8] Energieübertragungssystem für Drehstrom im Mittel- und Hochspannungsbereich. Deutsche Patentanmeldung (PCT/EP01/13439), Anmeldenummer 10060923.6, Erteilung: 13.11.01, Veröffentlichungstag: 13.06.2002.

[9] DIN VDE 0670 Teil 1000: 1998-10. Gemeinsame Bestimmungen für Hochspannungs-Schaltgeräte-Normen; (IEC 60694: 1996); Deutsche Fassung EN 60694: 1996

[10] DIN VDE 0111 Teil 1: 1996-07. Isolationskoordination – Begriffe, Grundsätze und Anforderungen. (IEC 71-1: 1993), Deutsche Fassung EN 60071-1: 1995.

[11] DIN VDE 0670 Teil 901: 1998-10.Gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen für Bemessungsspannungen von 72,5 kV und darüber; (IEC 60517:1990); Deutsche Fassung EN 60517:1996

Projet et essai expérimental d'une nouvelle alimentation moyenne tension à faibles champs magnétiques perturbateurs

L'article présente le projet et les études expérimentales d'un conducteur tubulaire tricoaxial isolé au gaz pour l'alimentation moyenne tension de composants d'accélérateurs linéaires dans la physique de haute énergie, destinés à l'utilisation dans le futur accélérateur linéaire Tesla du synchrotron électronique allemand (DESY) à Hambourg. L'intérêt se porte essentiellement sur la minimisation du champ magnétique perturbateur à 50 Hz à l'extérieur du système d'alimentation. Outre le respect des limites prescrites et des normes applicables, il peut être démontré, d'après les données thermiques, magnétiques et diélectriques calculées par simulation et déterminées expérimentalement, que rien ne s'oppose à l'utilisation d'une telle alimentation électrique.

Angaben zu den Autoren

Dipl. Ing. **Frank Hörtz**, geboren 1974 in Worms, begann sein Studium der Elektrischen Energietechnik 1994 an der TU Darmstadt. Von 1999 bis August 2003 war er dort wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik und beschäftigte sich hauptsächlich neben Projekten auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrtleitungen mit dem Entwurf und experimentellen Untersuchungen einer neuartigen störmagnetfeldarmen Mittelspannungsversorgung.
TU Darmstadt, FG Hochspannungstechnik,
D-64283 Darmstadt, fhoertz@yahoo.de

Prof. Dr.-Ing. **Dieter König**, geboren 1935 in Waldenburg, nahm nach über zehnjähriger Industrietätigkeit in einem Unternehmen des jetzigen ABB-Konzerns einen Ruf an die TU Darmstadt an, wo er bis 2001 Leiter des Fachgebietes Hochspannungstechnik war und nach seiner Versetzung in den Ruhestand dort weiterhin als wissenschaftlicher Berater tätig ist. Professor König ist Mitglied bei Cigré, VDE und ETG sowie Fellow-Mitglied verschiedener IEEE-Gesellschaften.
TU Darmstadt, FG Hochspannungstechnik,
D-64283 Darmstadt, diekoenig@hrz1.tu-darmstadt.de

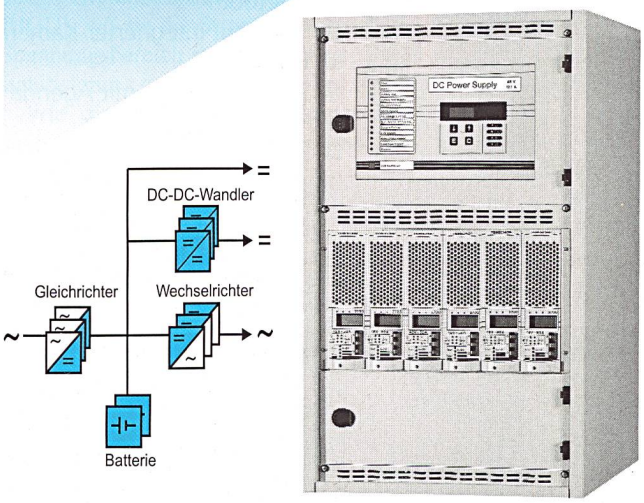
[1] Tesla: TeV-Energy Superconducting Linear Accelerator

[2] DESY: Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY in der Helmholtz-Gemeinschaft ist eines der weltweit führenden Zentren für die Forschung an Teilchenbeschleunigern. DESY ist ein mit öffentlichen Mitteln finanziertes nationales Forschungszentrum und hat zwei Standorte (Hamburg und in Zeuthen/Brandenburg).

[3] Entsprechend der Analogie zwischen dem elektrischen und dem Wärmeströmungsfeld lassen sich die Vorgänge der Wärmeübertragung mit einem Wärmenetzwerk beschreiben. Die Knoten des Netzwerkes sind die Punkte am Betriebsmittel, deren mittlere Temperatur berechnet werden soll. Die in dem Betriebsmittel durch Stromwärmeverluste erzeugte Wärmeleistung wird an den jeweiligen Knoten in das Netzwerk als Wärmequelle eingespeist, wobei die Nachbildung der zwischen diesen Knoten stattfindenden Wärmeübertragungen durch Wärmewiderstände erfolgt. Dabei wird jeder Art der Wärmeübertragung (Leitung, Konvektion, Strahlung) ein entsprechender Wärmewiderstand zugeordnet. Die Berechnung der Temperaturen der Knoten des Netzwerkes erfolgt analog zur elektrischen Netzberechnung.

[4] Die Anordnung wird mit 15 Blitzstossspannungsimpulsen in beiden Polaritäten belastet, wobei bei jeder Polarität maximal zwei Durchschläge erfolgen dürfen.

Energie
koordinieren



Modularität als Zauberwort

Die Entwicklung der Benning-Systeme für die gesicherte Stromversorgung war immer konsequent auf modulare Lösungen ausgerichtet. Für den Anwender ergeben sich daraus drei markante Vorteile:

- Modulare Systeme erfordern bei einem Komponenten-Ausfall keine oder deutlich weniger Sofortinvestitionen.
- Benning-Komponenten sind aufeinander abgestimmt. Gleichrichter, Wechselrichter und DC-DC-Wandler bilden ein einheitliches Betriebssystem. Und die Anlage kann mit dem Bedarf «wachsen».
- Das Überwachungssystem MCU ist in der Lage, alle Komponenten einzubinden. Das ist technisch und wirtschaftlich interessant.

Mit Benning zu sprechen lohnt sich!

BENNING
Benning Power Electronics GmbH
Industriestrasse 6, CH-8305 Dietlikon
Tel. 01 805 75 75, Fax 01 805 75 80
info@benning.ch, www.benning.ch

Heinz Schlüssel
EL. Ing. HTL, Geschäftsführer
Telefon direkt 01 805 75 70
heinz.schluessel@benning.ch

Jetzt gibts das neue Extra-Angebot nur für KMU*: Das Business-Abo NATEL® corporate mit den attraktiven Tarifen und dazu äusserst günstige Handys. Auch die Mitarbeiter lassen sich ins firmeneigene Kommunikationsnetz einbinden und profitieren so ebenfalls von den attraktiven Geräteangeboten. Für weitere Infos: 0800 88 99 11. Sind Sie auf dem richtigen Netz?

High-Quality Network

Für KMU: Neue attraktive Abos, günstige Handys.

Ihre Vorteile mit einem NATEL® corporate Abo:

- Reduzierte Abonnementsgebühren.
- Sammelrechnung: alle Anschlüsse Ihres Unternehmens auf einer Rechnung.
- Kompetenter Service über die Business-Hotline.

Jetzt profitieren!

Ab sofort in jedem Swisscom Shop oder bei Ihrem Fachhändler.

Angebote gültig bis 31.12.2003.

Sony Ericsson T610

NATEL® corporate standard/24 Mte.

CHF 1.–

NATEL® corporate plus/24 Mte.	CHF 1.–
ohne Abonnement	CHF 498.–

- Triband
- GPRS, HSCSD
- Agenda
- MMS mit integrierter Kamera
- Standbyzeit bis 315h
- SAR 0.89 (W/kg)

Sony Ericsson P800

NATEL® corporate executive/24 Mte.

CHF 268.–

NATEL® corporate standard/24 Mte.	CHF 298.–
ohne Abonnement	CHF 848.–

- Bluetooth
- MMS mit integrierter Kamera
- Triband
- Synchronisation mit Agenda
- Freisprecheinrichtung
- SAR 0.64 (W/kg)

PUBLICIS

www.swisscom-mobile.ch/business

swisscom mobile

Go far. Come close.