Das induktive Streufeld des Transformators

Autor(en): **Kegel, Reinhard**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **99 (2008)**

Heft 22-23

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-855910

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Das induktive Streufeld des Transformators

Feldberechnungen im räumlichen Fernbereich

Die Isolinie von 1 μT liegt bei Verteil- und Hochspannungstransformatoren meist im Fernbereich des magnetischen Feldes. Dies vereinfacht die Berechnung der Isolinien wesentlich, das Feld kann entsprechend einfach simuliert werden. Allerdings müssen die Anschlüsse der Ober- und Unterspannung berücksichtigt werden, denn diese verursachen starke Zusatzfelder. Diese können nur sehr aufwendig berechnet werden. Entsprechend verlässt man sich hier auf Messungen ähnlicher Transformatortypen.

Seit Inkrafttreten der NIS-Verordnung[1)] stehen im Vordergrund die physikalisch korrekten digitalen Nachbildungen der Betriebsmittel wie der Verteil- oder Hochspannungstransformatoren. Hier interessieren insbesondere die parasitären Streufelder und die Form der Isolinien des Feldes [3, 4].

Reinhard Kegel

Für eine beliebige Stromverteilung, die sich auf ein endliches Volumen beschränkt, verschwindet der Einfluss der inneren Struktur auf das äussere Feld für grosse Entfernungen. Umgekehrt, je kleiner der Abstand $r < R$ zur Stromverteilung ist, desto grösser ist der Einfluss der inneren Struktur. Diese Tatsache macht man sich bei der Multipolentwicklung zunutze. Das Feld wird im Aussenraum für $r > R$ in eine Reihe zerlegt. Die Komplexität der Reihenelemente nimmt zu, während ihr Einfluss in grossen Abständen abnimmt, sodass oft nur die ersten Elemente berücksichtigt werden müssen. Die Multipolreihe konvergiert im Aussenraum der Stromverteilung gegen die exakte Lösung des Potenzials [1, 4].

Die Multipolentwicklung einer Stromverteilung

Die Multipolentwicklung kann in beliebigen Koordinatensystemen durchgeführt werden; am häufigsten sind dabei kartesische und Kugelkoordinaten. Der Vorteil der kartesischen Entwicklung ist die Beschränkung auf reelle Zahlen. Bei den Feldern von Transformatoren vereinfachen sich aber die Berechnungen, wenn man die Greenfunktion nach einer Kugelflächenfunktion entwickelt und somit in Kugelkoordinaten rechnet.

Beschränkt man sich auf grosse Abstände vom Transformator, also $r > R$, und schliesst magnetische Monopole bei den Spulenwicklungen aus, fallen in der Reihenentwicklung die höheren Glieder weg [4]. Das magnetische Potenzial U besteht dann also nur noch aus Thermen mit $1/r^2$, alle höheren Therme wie $1/r^3$ fallen weg.

Mithilfe der Kugelflächenfunktionen kann nun die magnetische Flussdichte durch Gradienten gebildet werden:

$$\underline{\vec{B}}\ (r,\vartheta,\varphi) = -\frac{\mu_0}{4\cdot\pi}\cdot\nabla\underline{U}\,(r,\vartheta,\varphi) \text{ für } r > R_0 \qquad (1)$$

Verläuft ein Dipol in Richtung der z-Achse, ergibt sich eine magnetische Flussdichte von

$$\underline{\vec{B}} = \begin{pmatrix} \underline{B}_r \\ \underline{B}_\vartheta \\ \underline{B}_\varphi \end{pmatrix} = \frac{\mu_0\cdot\underline{m}_z}{4\cdot\pi\cdot r^3}\cdot\begin{pmatrix} 2\cdot\cos\vartheta \\ \sin\vartheta \\ 0 \end{pmatrix} \qquad (2)$$

Dabei stellt $\underline{m}_z$ der resultierende, komplexe Momentenvektor des Dipolmoments dar, wobei der Betrag definiert ist durch eine Leiterschleife mit dem komplexen Strom I, dem Radius R sowie der Fläche $R^2\cdot\pi$. Für die Berechnung des Fernfeldes werden nun die Dipolmomente der drei Transformatorschenkel mit unterschiedlicher Phasenlage überlagert, was zu einer Feldverteilung wie in Bild 1 führt. Diese Isolinien sind messtechnisch in einer Vielzahl von Veröffentlichungen bestätigt worden [2, 3, 4] und lassen sich im Wesentlichen nach Gleichung (2) bestimmen.

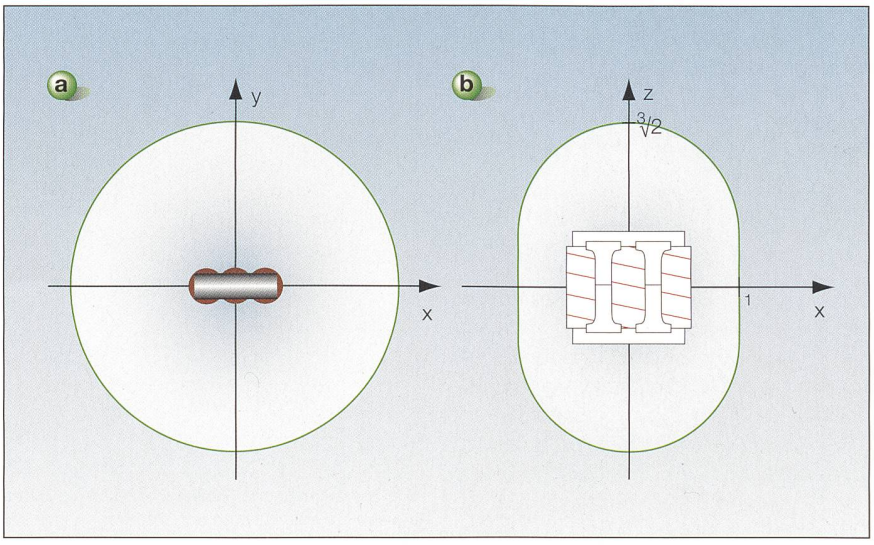


Bild 1 Radienverhältnis bei konstanter magnetischer Flussdichte.

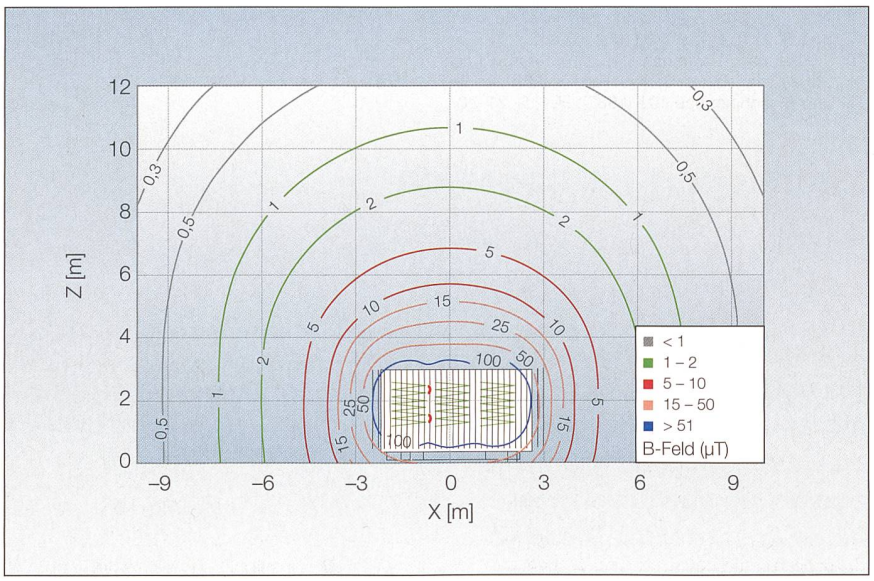


Bild 2 Als Näherung eingestelltes magnetisches Streufeld des 40-MVA-Transformators in der X0Z-Darstellung.
Dieser Isolinien-Kurvenverlauf muss stets durch eine messtechnische Nachkontrolle geprüft werden. Der Isolinienverlauf entspricht dem Bild 1b, also einem Dipolfeld nach Gleichung (2).

Zusatzfelder durch die Anschlüsse

Durch die ober- und unterspannungsseitigen Anschlüsse werden Zusatzfelder erzeugt, die sich dem Dipolfeld überlagern. Diese Zusatzfelder sind stark von der Last, der Bauart und vom Übersetzungsverhältnis abhängig. Reine Verteiltransformatoren bis 1,8 MVA werden nach den gleichen Bau-Schemata hergestellt wie Leistungstransformatoren. Kleinere Variationen – wie die Dicke der Deckenplatte oder Abmessungen des Wellenöl-Kessels – beeinflussen das magnetische Streufeld im Aussenraum nur gering [2]. Die Grössenordnung liegt bei 5–10%. So weisen beispielsweise die Streufelder von Schweizer Transformatorenherstellern etwas kleinere Streufelder auf als deutsche SGB-Transformatoren. Aus diesem Grund lassen sich die Streufelder von Verteiltransformatoren relativ gut berechnen als komplexe Dipolfelder mit der Formel:

$$B = B_0 \cdot \frac{u_k}{u_{k0}} \cdot \sqrt{\frac{S_n}{S_{n0}}} \cdot \left(\frac{a_0}{a}\right)^x \cdot k_T \qquad (3)$$

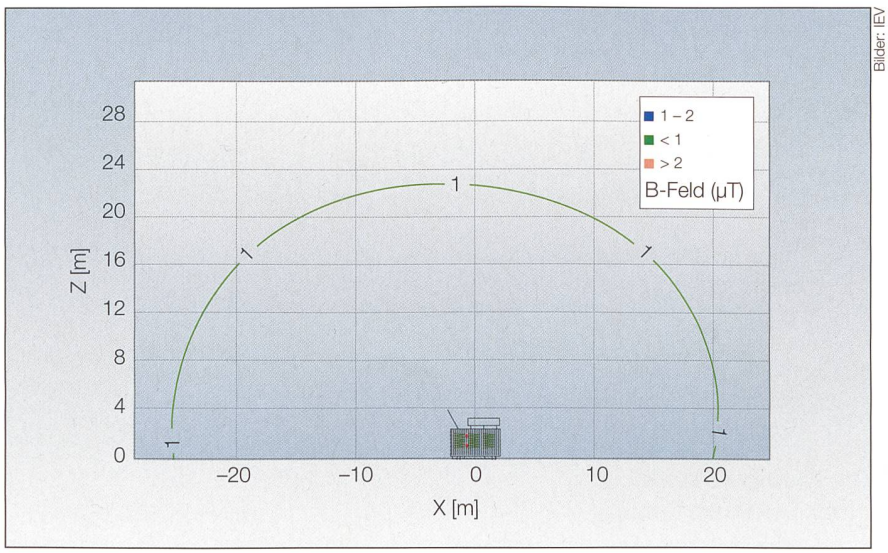
Es bedeutet B_0 die Flussdichte im Abstand a_0 und B die Flussdichte im Abstand a. Der Last- bzw. Korrekturfaktor ist bei Nennlast und bei Transformatortypen gleicher Bauart $k_T = 1$. Der Exponent beträgt $2 < x < 3$, für den Bereich a = 1 bis ca. 10 m beträgt x = 2,8. Für typische Giessharz-Verteiltransformatoren lassen sich die Grössen wie folgt bestimmen: In 3 m Abstand wurden 5 µT gemessen (der Nullpunkt ist der räumliche Mittelpunkt des Transformators). Für diesen Fall gilt dann:

$$B = 5\,\mu T \cdot \frac{u_k}{6\%} \cdot \sqrt{\frac{S_n}{630\,kVA}} \cdot \left(\frac{3m}{a}\right)^{2,8} \cdot k_T \qquad (4)$$

Für Grosstransformatoren ist die Bestimmung des magnetischen Streufeldes wesentlich schwieriger, weil einerseits die magnetische Streuung (Streukanal) von der Stellung des Stufenstellers und andererseits von der häufig wechselnden Bauart abhängt. So werden seit 1980 zwischen Wicklung und Ölkessel in zunehmendem Masse sogenannte Bypass-Bleche eingelegt [5], die den Streufluss gar nicht erst in den Kessel, sondern bereits davor schliessen sollen. Diese Massnahme dient in erster Linie zur Verringerung der Kesselverluste, die bei Transformatoren ab 20 MVA erheblich sein können. Die Kesseldicke nimmt im Bereich mit 3 bis 5 mm zu, und die Deckenplatte weist gegenüber den Verteiltransformatoren zum Teil eine wesentliche höhere Dicke im cm-Bereich auf. Aus diesem Grund ist eine formelmässige Bestimmung des Streuverhaltens von Umspannern hier analytisch nicht mehr möglich und muss durch aktuelle Messungen ergänzt bzw. bestimmt werden.

Andererseits konnte nachgewiesen werden, dass in einiger Entfernung vom Transformator sich grundsätzlich ein sogenanntes Dipolfeld ergibt, das mit etwa der dritten Potenz abnimmt. Der Nachweis wurde in [2, 3] und theoretisch mit Gleichung (2) erbracht.

Da auch das Zusatzfeld wesentlich von Polmittenabständen der Rohrsammelschienen bzw. der Kabeltrasse abhängig ist, variiert das Zusatzfeld stark. Im vorliegenden Fall wird das Gesamtfeld mit einem Radius von etwa 7,5 m (Bild 2) auf etwa 24 m vergrössert (Bild 3). Weist beispielsweise die Schaltgruppe des Verteil- bzw. Hochspannungstransformators die Kennziffer 5 auf, so muss diese Phasenverschiebung mit 150° zwischen Ober- und Unterspannung im Rahmen der digitalen Nachbildung phasengerecht nachgebildet werden, da sonst das Gesamtfeld nicht korrekt nachgebildet wird.



Bilder: IEV

Bild 3 Magnetische Flussdichte inklusive Zusatzfeld der Anschlüsse.
Darstellung der magnetischen Gesamtflussdichte B eines 40-MVA-Hochspannungstransformators mit dem Übersetzungsverhältnis 120,8 zu 18 kV bei Volllast. Durch das Zusatzfeld wurde das räumliche Gesamtfeld nahezu verdreifacht.

Zusammenfassung

Das magnetische Streufeld von Verteilungs- und Hochspannungstransformatoren weisen in der Draufsicht kreisförmige und im Querschnitt elliptisch geformte Isolinien auf (Bild 1). Der Betrag der magnetischen Ersatzflussdichte lässt sich näherungsweise für Verteilungstransformatoren bis 1,8 MVA formelmässig angeben. Für grössere Transformatoren ist die Bestimmung der magnetischen Ersatzflussdichte nur noch messtechnisch möglich.

Wer die Berechnungen dieses Artikels nachvollziehen will, findet im Downloadbereich von www.technik-forum.ch eine ausführliche Version (Suche nach «Kegel» im Download).

Referenzen

[1] R. Kegel: Numerische Berechnung und Kompensation von Eigenschwingungen in Spannungswandlern – Der Messwandler als EMV-Breitband-Messsystem – 8. Symposium Maritime Elektronik, Universität Rostock, 1995.

[2] Friedrich Alber: Verteilungstransformatoren und EMV, ETZ, Bd 115 (1994), H. 20.

[3] W. Hadrian: Leitungen, Transformatoren und Schaltanlagen als Störquellen, Elektrotechnik und Maschinenbau 101 (1983), H. 1, S. 21–28.

[4] W. Hadrian: Der Transformator als Feldquelle – Theoretische Grundlagen und messtechnischer Befund, Elektrie, Berlin 45 (1991), H. 6, S. 235–237.

[5] M. Kubusch: Berechnung der Verluste ebener elektromagnetischer Abschirmungen und abgeschirmter Eisenteile von Transformatoren, Elektrie 39 (1985), H. 8, S. 300–303.

Angaben zum Autor

Reinhard Kegel, Prof. Dr.-Ing., ist seit 1990 Professor für Energieversorgung und EMV an einer norddeutschen Hochschule und Hauptgesellschafter der Firma IEV GmbH in Lübeck, Deutschland. Seit dieser Zeit wurden von der IEV GmbH mehrere wissenschaftliche Feldberechnungsprogramme für elektrische Anlagen über 1 kV entwickelt, seit 1998 auch speziell für die NIS-Verordnung. Mit dieser Software (Copperfield) können magnetfeldarme Freileitungen und Transformatorenstationen dreidimensional konstruiert, gebaut und auf Einhaltung der NISV geprüft werden.

Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit IEV GmbH, D-23562 Lübeck, iev@iev.de

[1] Verordnung über nicht ionisierende Strahlung, SR 814.710.

Résumé

Le champ de fuite inductif du transformateur

Calculs sur le terrain dans la zone d'action lointaine. Dans le cas des transformateurs de distribution et haute tension, l'isoligne de 1 μT est généralement située dans la zone lointaine du champ magnétique. Cela simplifie considérablement le calcul des isolignes étant donné qu'il est possible de simuler facilement le champ. Néanmoins, il faut tenir compte des raccords de sur- et sous-tension qui provoquent des champs supplémentaires considérables. Et leur calcul est très complexe. Aussi se fie-t-on ici à des mesures de transformateurs de type similaire.

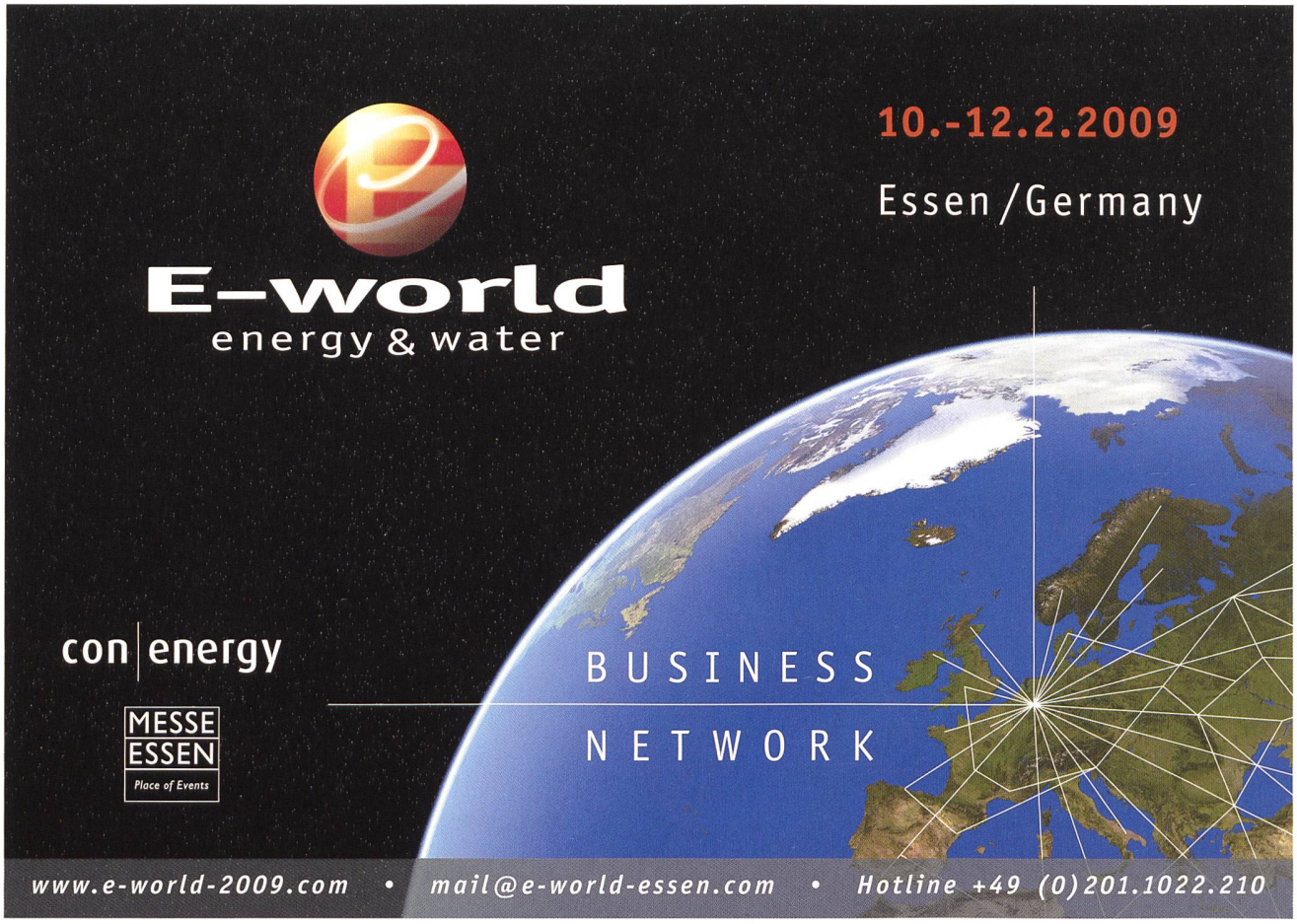
Warum stösst Ökostrom auf Widerstand?

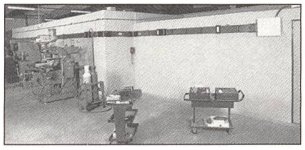
Die aktuelle Umweltdebatte beschäftigt nicht nur Politik, Medien und Öffentlichkeit. Sie beeinflusst in zunehmendem Masse auch die Geschäftsmodelle in der Energiebranche. Die PwC-Studie «Wie verändert sich das Klima im Energiemarkt?» zeigt auf, wie die Versorger an ihrer ökologischen Bilanz arbeiten. Und warum es noch viel Potenzial gibt.

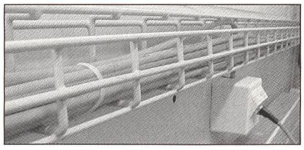
Mehr über die Studie erfahren Sie unter **www.pwc.ch/energie** oder direkt von den Autoren: **ralf.schlaepfer@ch.pwc.com, marc.schmidli@ch.pwc.com**

PRICEWATERHOUSECOOPERS

© 2008 PricewaterhouseCoopers. All rights reserved. PricewaterhouseCoopers refers to the network of member firms of PricewaterhouseCoopers International Limited, each of which is a separate and independent legal entity.







Welche LANZ-Produkte für Neubauten und Nachinstallationen?

Zur Verbindung des Trafo mit der Hauptverteilung:
→ **LANZ HE-Stromschienen** 400 A – 6000 A 1000 V IP 68

Zum el. Anschluss von Maschinen und Anlagen:
→ **LANZ EAE-Stromschienen** 25 A – 4000 A 600 V

Zur Führung von Strom- und Datenkabel:
→ **LANZ C-Kanäle, LANZ G-Kanäle, Gitterbahnen, Flachgitter, LANZ Multibahnen und Weitspann-Mb, Steigleitungen.**

Zur Zuführung von Strom-, Daten- und Telefonleitungen zu Arbeitsplätzen in Büro und Betrieb:
→ **Brüstungskanäle, Brüstungskanal-Stromschienen, Doppelboden-Anschlussdosen und -Durchführungen.**

ISO 9001, CE- und IEC-konforme Stromschienen, Kabelbahnen und Kabelzuführungen sind die Kernkompetenz von LANZ. Beratung, Offerte, rasche preisgünstige Lieferung von lanz oensingen ag CH-4702 Oensingen

☐ **Mich interessieren** .....
..... Bitte senden Sie Unterlagen.

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name / Adresse / Tel. _____

A4

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen
Telefon 062 388 21 21
www.lanz-oens.com
Südringstrasse 2
Fax 062 388 24 24
info@lanz-oens-com

Die neuen NIN-NIV Installationstester für den Elektro-Fachmann

Combi Test 419 für alle NIN-NIV Messungen und
Combi Test 420 mit zusätzlich integrierter Netzanalyse

Alle Messungen werden nach den NIN - NIV Richtlinien durchgeführt.

Combi Test 420
CHF 1550,-
zzgl. MWST

Combi Test 419
CHF 1450,-
zzgl. MWST

Fernbedienung, Software, Strom- sowie Leckstromzange, Luxmeter optional erhältlich

OPTEC GmbH
Grundstrasse 22 • CH-8344 Bäretswil
Telefon 044 979 10 02 • Fax 044 979 10 01
e-mail: info@optec.ch • Internet: www.optec.ch

OPTEC
Technik die zählt ...