

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 98 (2007)
Heft: 15

Artikel: Strommessung mit induktiven Stromsensoren
Autor: Fräger, Carsten
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857463>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.03.2025

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

Strommessung mit induktiven Stromsensoren

Genauigkeitsverbesserung bei der Strommessung durch Elimination des negativen Einflusses von Fertigungsstreuungen

Leistungselektronische Schaltungen benötigen zur einwandfreien Funktion Sensoren zur exakten Strommessung. So können etwa moderne Frequenzumrichter und Servoantriebe nur mit genau geregelten Ausgangsströmen die angeschlossenen Motoren mit exakt dem Drehmoment betreiben, das für die Produktionsmaschine erforderlich ist. Hierbei müssen sowohl Wechsel- als auch Gleichströme bei hohen Betriebsspannungen sicher erfasst werden. Daher sind Sensoren mit ausreichender Spannungsisololation zur Steuerelektronik erforderlich. Der folgende Beitrag zeigt, wie der Strom mit induktiven Sensoren gemessen werden kann und durch welche Massnahmen sich die Genauigkeit induktiver Sensoren verbessern lässt.

Für drehzahlveränderliche elektrische Antriebe werden heute meistens Frequenz- und Servoumrichter eingesetzt. Sie dienen dazu, den Elektromotor mit genau dem

Carsten Fräger

Strom zu versorgen, der für die Antriebsaufgabe erforderlich ist.

Die Umrichter bestehen aus dem leistungselektronischen Teil und dem Steuerungsteil, der für die Ansteuerung der Leistungsbauteile, die Regelung, die Überwachung und die Kommunikation mit überlagerten Steuerungen zuständig ist (Bild 1).

Für die Regelung der Ausgangsströme und zur Überwachung des Gerätes auf Kurzschluss ist eine Messung der Ausgangsströme erforderlich. Dabei tritt der gesamte Frequenzbereich von Gleichstrom bis zur höchsten Wechselrichterausgangsfrequenz auf.

Da die Leistungselektronik mit hoher Spannung arbeitet – z.B. Gleichspannung im Zwischenkreis bis zu 800 V bei einer Netzspannung von 400 bis 480 V –, die Steuerelektronik mit ihren externen Steuerungen aber auf Kleinspannungsniveau, ist eine galvanische Trennung zwischen Leistungselektronik und Steuerelektronik nötig.

Dies bedeutet, dass nicht nur die Ansteuerung der Leistungshalbleiter, beispielsweise durch optoelektronische Koppler, galvanisch getrennt erfolgen muss, sondern dass auch die Strommessung entsprechende Isolierungen verlangt.

Verschiedene Verfahren zur Strommessung

Konventionelle Stromwandler, bei denen der zu messende Strom in der Messspule einen Strom induziert, eignen sich für die Messung nicht, da sie keine Gleichströme messen können. Heute werden im Wesentlichen die nachfolgend beschriebenen Verfahren zur Strommessung eingesetzt.

Messung über Shunt

Der Strom wird durch den Spannungsabfall an einem Shunt gemessen. Da die Shunts auf hohem Spannungsniveau liegen und der Spannungsabfall über dem Shunt sehr klein ist, geschieht dies in der Regel durch eine kleine Messelektronik auf hohem Spannungspotenzial, welche die Messwerte optoelektronisch auf die galvanisch getrennte Steuerelektronik überträgt. Dies hat zur Folge, dass die Steuerelektronik für die verschiedenen Spannungsniveaus getrennt werden muss und auch entsprechende getrennte Versorgungsspannungen zur Verfügung stehen müssen.

Messung mit Hallensensor

Der Strom kann andererseits durch einen Stromsensor mit Hallensensor gemessen werden. Bild 2 zeigt Stromwandler in einem Stromrichter. Ein Eisenkern wird vom zu messenden Strom durchflossen und magnetisiert. Die Magnetisierung wird mit einem Hallensensor gemessen. Ein Kompensationsstrom in einer Spule auf dem gleichen Eisenkern wirkt der Magnetisierung durch den zu messenden Strom entgegen. Der Kompensationsstrom wird durch einen Regler so geregelt, dass sich der Fluss im Eisenkern zu null ergibt. Die Größe des Kompensationsstroms ist dann der Messwert für den eigentlichen Strom. Für eine exakte Messung ist eine driftarme Auslegung des Kompensationsstromreglers und der Hallensensorik erforderlich.

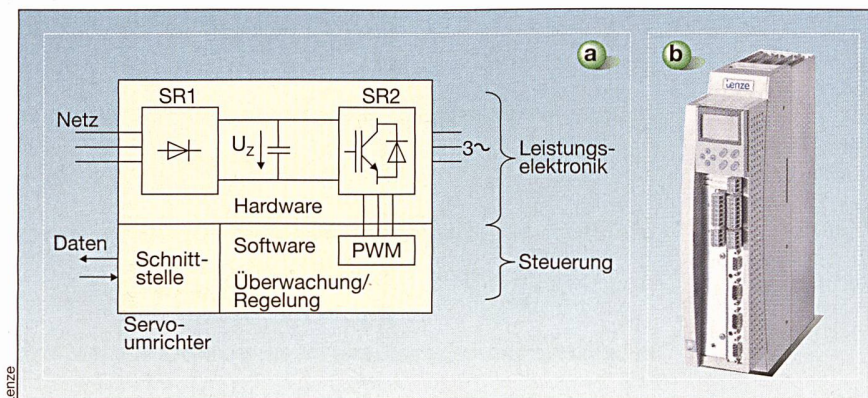


Bild 1 Servoumrichter.

Bild 1a: Schematische Darstellung; Bild 1b: Ansicht einer Steuerelektronik.
SRx: Spannungsgregler; PWM: Pulsweitenmodulation; U_z : Spannung des Zwischenkreises.

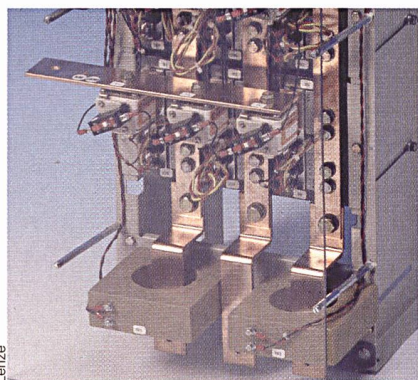


Bild 2 Stromwandler in einem Stromrichter.

Messung mit Transduktoren

Ein anderer Weg ist die Verwendung von Transduktoren als Stromsensoren. Bei diesen rein induktiven Stromsensoren wird die Sättigungsabhängigkeit des Eisens ausgenutzt, in dem der zu messende Strom das Eisen magnetisiert. Abhängig vom Strom ändert sich die Sättigung des Eisenkerns und damit auch die Induktivität einer Messspule auf dem gleichen Eisenkern. Die Induktivität der Messspule ist damit ein Mass für den gemessenen Strom. Für eine ausreichende Genauigkeit muss die Sättigungskennlinie genau bekannt sein und darf nur geringen Fertigungstoleranzen unterliegen. Dadurch wird der Transduktor hinsichtlich des Magnetkreises aufwendig, hat aber grosse Vorteile hinsichtlich Robustheit und galvanischer Trennung.

Genauigkeitsverbesserung bei induktiven Stromsensoren

Auch zur Gleichstrommessung wird bei Transduktoren das Sättigungsverhalten von Eisen ausgenutzt. Der in der Primärwicklung fließende Strom magnetisiert das Kernmaterial, dessen Permeabilität mit zunehmender Sättigung abnimmt. Dies bedeutet, dass auch die Induktivität einer Spule auf dem Kern mit zunehmender Sättigung abnimmt. Über eine Kennlinie, die den Zusammenhang zwischen Induktivität der Messspule und dem zu messenden Strom beschreibt, wird der Strom bestimmt. Voraussetzung ist dabei allerdings, dass das Sättigungsverhalten des Kerns genau bekannt ist.

Die Induktivität der Messspule ist proportional der reversiblen Permeabilität¹⁾ des ferromagnetischen Kerns für ein kleines überlagertes Magnetfeld. Bild 3 zeigt die reversible Permeabilität μ_{rev}/μ_0 für ein überlagertes Feld mit der Frequenz 4 kHz. Die reversible Permeabilität nimmt von $\mu_{rev}/\mu_0 = 1800$ bei kleinen Induktionen auf $\mu_{rev}/\mu_0 = 1000$ bei höheren Induktionen ab, weist bei höheren Induktionen aber nur noch geringe Änderungen auf. Für die Ermittlung

der Kurven wurde das in [1, 2] beschriebene Verfahren eingesetzt, mit dem in [3, 4] das Verhalten ferromagnetischer Stoffe in Elektromotoren und Drosseln für den Betrieb an Umrichtern untersucht wurde.

In der Anwendung für Stromsensoren wird die Hauptinduktion durch den zu messenden Strom erzeugt. Das überlagerte Wechselfeld wird von einer Sensorspule erzeugt, die von der Auswerteelektronik gespeist und ausgewertet wird.

Die Sättigungsabhängigkeit der Permeabilität eignet sich vorrangig zur Strommessung im unteren und mittleren Bereich der Induktion. Im oberen Bereich ist der Zusammenhang nicht mehr so eindeutig und ausgeprägt.

Mit dem gleichen Verfahren wurden die Ummagnetisierungsverluste für das überlagerte Wechselfeld ermittelt. Hier zeigt sich, dass die Verluste mit der Induktion des Hauptfeldes zunehmen. Diese Abhängigkeit ist besonders bei hohen Induktionen

ausgeprägt. Damit eignet sich die Verlustbetrachtung besonders bei hohen Induktionen bzw. Strömen.

Die Sättigung des Kerns führt noch zu weiteren Effekten, die für die Strommessung ausgenutzt werden können: Mit zunehmender Sättigung nimmt die Verzerrung der Induktion zu. Das heisst, bei sinusförmigem Zeitverlauf der Feldstärke enthält der Zeitverlauf der Induktion Anteile mit vielfacher Frequenz der Feldstärke. Besonders ausgeprägt sind die Anteile mit 2- und 3-facher Frequenz des Stroms in der Sensorspule.

Dieser Zusammenhang ist in Bild 4 ersichtlich. In der Grafik sind die Induktionen der Oberschwingungen in Abhängigkeit von der Induktion des Hauptfeldes durch den zu messenden Strom dargestellt. Die Feldstärke aufgrund des Sensorspulenstroms ist konstant. Die Induktionen mit 2- und 3-facher Frequenz des Messspulenstroms steigen von 0,02 T bei einer Grund-

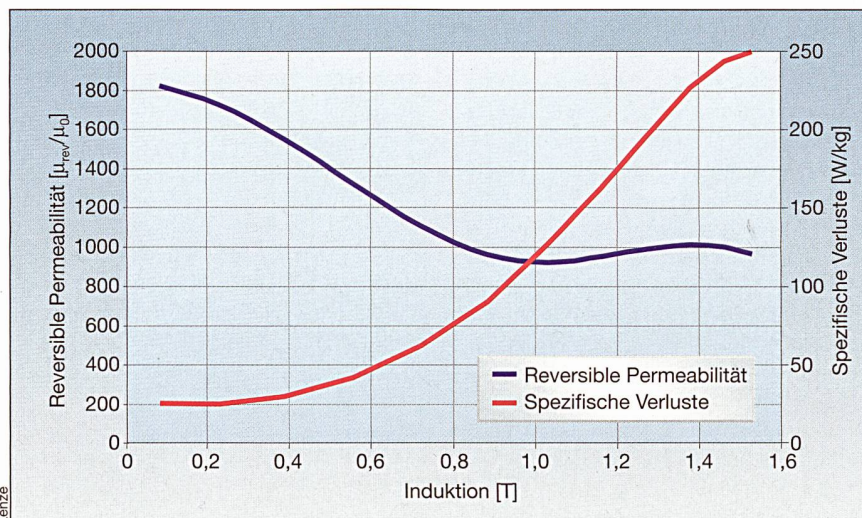


Bild 3 Sättigungsabhängigkeit der reversiblen Permeabilität und der spezifischen Verluste.

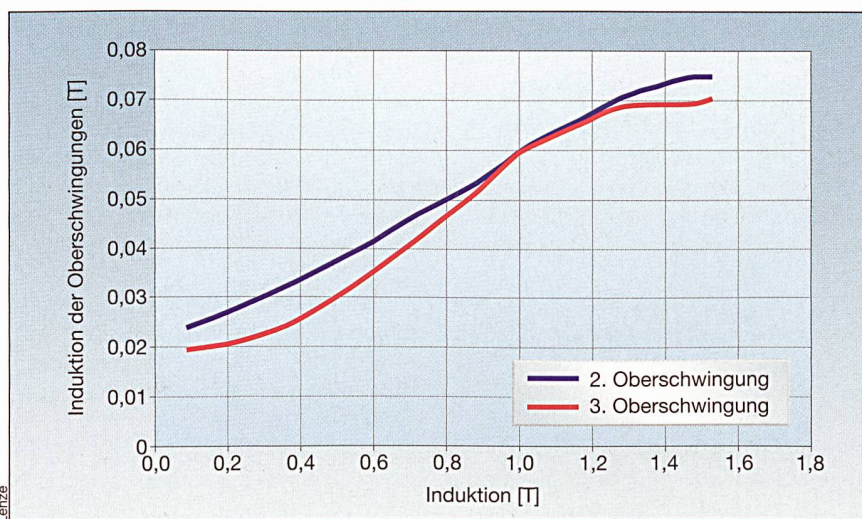


Bild 4 Sättigungsabhängigkeit der Oberschwingungen in Abhängigkeit von der Hauptfeldinduktion bei konstanter Feldstärke des Messstroms.

articles spécialisés

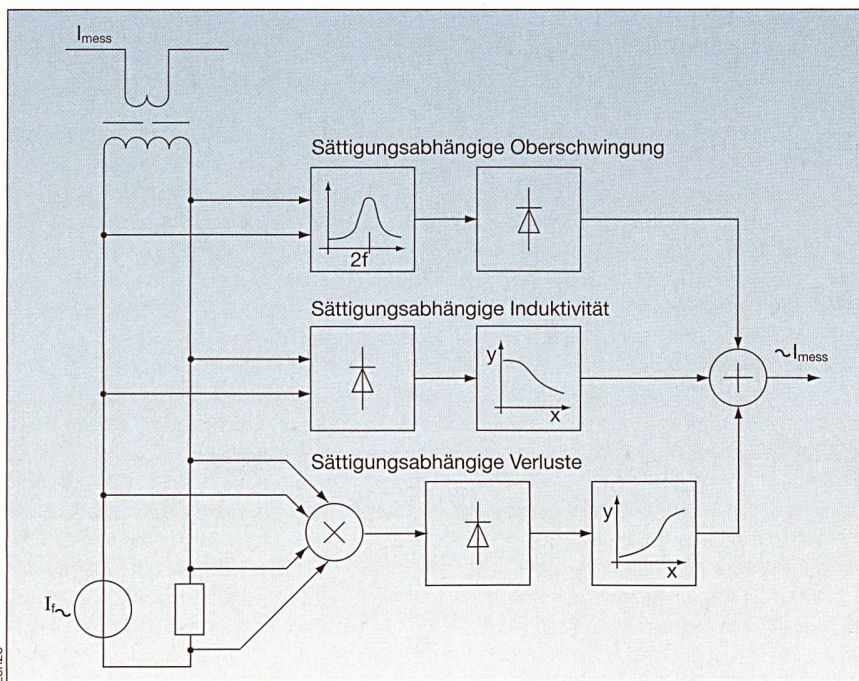


Bild 5 Prinzipschaltbild der Strommessung.

feldinduktion von 0,2 T auf 0,07 T bei einer Grundfeldinduktion von 1,4 T an. Dabei ist für die 2-fache Frequenz der Anstieg über einen weiten Bereich linear. Die Induktionen finden sich als induzierte Spannung in der Sensorwicklung wieder. Durch Filtern der Spannung der Sensorwicklung wird das Signal für die 2-fache bzw. 3-fache Frequenz gewonnen und in einen Strom, der zur Grundfeldinduktion gehört, umgerechnet.

Bild 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Strommessung mit der Auswerteelektronik zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Sättigungseffekte.

Die Kombination der Auswertung von Sättigungsabhängigkeit der Permeabilität, Hystereseverluste und Oberschwingungen führte zum besten Ergebnis.

Kompensationsverfahren eliminiert negativen Einfluss von Fertigungsstreuungen

Die oben beschriebenen Verfahren setzen die Kenntnis der Permeabilität, der Hystereseverluste oder der Oberschwingungen in Abhängigkeit von der Induktion voraus. Diese Abhängigkeiten unterliegen jedoch Fertigungsstreuungen.

Um den Einfluss solcher Streuungen auf die Messgenauigkeit zu vermeiden, kann ein Kompensationsverfahren wie bei Stromsensoren mit Hallelementen angewendet werden. Der Kern erhält dabei zusätzlich zur Sensorspule eine Steuerspule zur Kompensation des Hauptfeldes des zu messenden Stroms. Der Strom in der Steuerspule

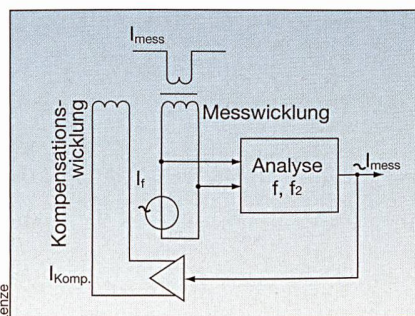


Bild 6 Prinzipschaltbild zur Strommessung mit Kompensationsverfahren.

f: Frequenz der Grundschwingung; f₂: Frequenz der 2. Oberschwingung.

wird nun so geregelt, dass er das Hauptfeld kompensiert. Damit entspricht er dem zu messenden Strom.

Zur Messung der Regeldifferenz wird die 2. Oberschwingung genutzt. Sie hat bei genauer Kompensation die Amplitude null. Aus der Phasenlage zur Grundschwingung kann die Polarität des zu messenden Stroms ermittelt werden. Bild 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer solchen Strommessung.

Auf diese Weise ist eine Strommessung mit hoher Genauigkeit möglich, ohne dass Fertigungsstreuungen das Ergebnis beeinflussen. Lediglich der Kompensationsregler muss für das jeweilige Kernmaterial einmal abgeglichen werden.

Die Vorteile des Verfahrens gegenüber anderen Verfahren sind die hohe Robustheit des Sensors, der Wegfall von Hallensoren und die einfache Integration der gesamten

Auswerteelektronik in die ohnehin notwendige Elektronik zur Steuerung der Leistungselektronik.

Referenzen

- [1] W. Kampczyk: Berechnung von Magnetisierungsvorgängen mithilfe der Néelschen Theorie des Rayleigh-Gesetzes. Zeitung für angewandte Physik 30, H. 1 S. 22–25, 1970.
- [2] S. Kurz, J. Fetzer, G. Lehner: Anwendung der Methode der finiten Elemente und des Vektor-Preisach-Modells zur Berechnung ebener magnetostatischer Felder in hysteresebefahenen Medien. Archiv für Elektrotechnik 76, S. 405–415, 1993.
- [3] C. Fräger: Neuartige Kaskadenmaschine für brushlose Drehzahlstantriebe mit geringem Stromrichteraufwand. Fortschrittsbericht VDI-Reihe 21, Nr. 189, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1995.
- [4] C. Fräger: Eisenverluste machen das Leben schwer – Ferromagnetische Werkstoffe beim Betrieb mit Frequenzumrichtern. Bulletin SEV/VSE Nr. 3/2006, S. 15–17.

Angaben zum Autor

Dr.-Ing. Carsten Fräger ist Leiter Product Management Servotechnik bei Lenze Drive Systems. Er studierte an der Universität Hannover Elektrotechnik. Seit 1989 ist er bei Lenze tätig, Stationen waren die Applikation Servoantriebe, die Motorenentwicklung und die strategische Entwicklung Elektromechanik. 1994 promovierte er an der Universität Hannover zum Thema «Kaskadenmaschine für Antriebe mit geringem Stromrichteraufwand». An der FVA ist er in den Arbeitskreisen Lineartechnik und Direktantriebe tätig. Lenze, D-31763 Hameln, fraeger@lenze.de

¹⁾ Reversible Permeabilität: Die Permeabilität ergibt sich aus dem Quotient der Beträge von Flussdichte und Feldstärke. Eine zeitlich konstante oder sich nur langsam ändernde Vormagnetisierung B₀ bestimmt den Arbeitspunkt. Wird um diese Vormagnetisierung eine Wechselmagnetisierung mit hoher Frequenz im Bereich ΔB angelegt, so wird eine lanzettenförmige Kurve beschrieben. Die Fourieranalyse liefert die zur Wechselmagnetisierung gehörende Induktion mit hoher Frequenz. Der Quotient aus Induktion und Feldstärke für die hohe Frequenz liefert die reversible Permeabilität.

Résumé

La mesure de courant au moyen de capteurs inductifs

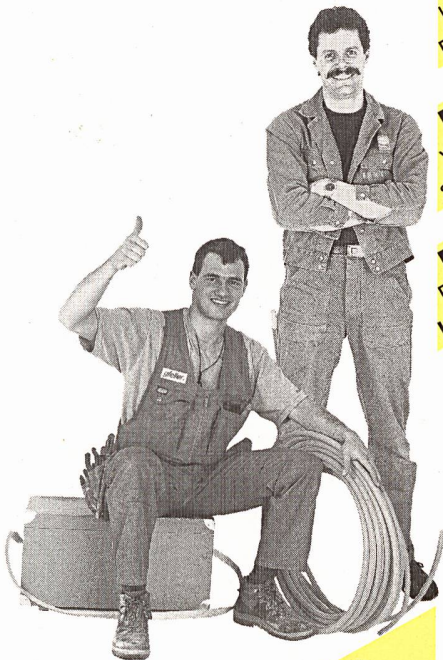
Amélioration de la précision de mesure de courant par élimination de l'influence négative des tolérances de fabrication. Pour fonctionner correctement, les circuits d'électronique de puissance ont besoin de capteurs permettant de mesurer le courant avec précision. C'est ainsi que les convertisseurs de fréquence et systèmes d'asservissement ne peuvent commander les moteurs avec le couple exact nécessaire à la machine de production qu'avec des courants de sortie réglés avec précision. Il s'agit de saisir fiablement les courants tant alternatifs que continus, à des tensions de service élevées. Et cela nécessite des capteurs suffisamment isolés de l'électronique de commande. L'article montre comment on peut mesurer le courant au moyen de capteurs inductifs et améliorer la précision des capteurs inductifs par des mesures appropriées.

PKG
 PKG-versicherte Firmen
 haben gut lachen

PKG Der GAV-
 konforme
 Branchenkenner

PKG Die Kranken-
 versicherung mit den
 stabilen Prämien

PKG Auch für Ihre
 Firma! **Vergleichen**
 kostet nichts...

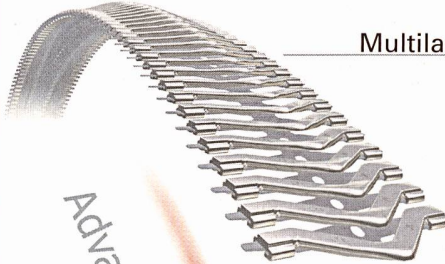


...kann Ihrer Firma aber
 sehr viel bringen!
 Wir beraten Sie gerne.

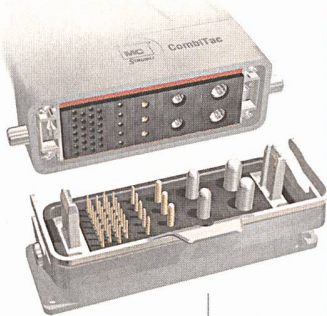


PKG
 Paritätische Krankenversicherung
 für Branchen der Gebäudetechnik
 Postfach 234
 3000 Bern 15
 Telefon 031 940 28 28
 Telefax 031 940 28 29

Multilam *Technology*

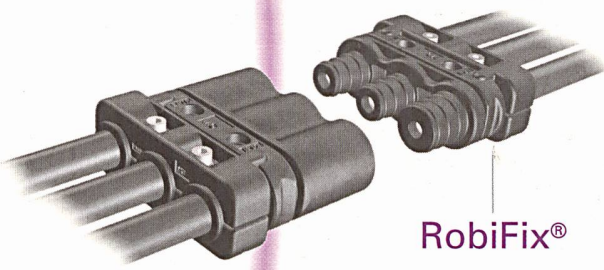


Advanced Contact Technology




CombiTacline


Neu



RobiFix®




Test&Measureline



Besuchen Sie uns:
ineltec.
infrastructure
technology
 4.- 7. Sept. 2007
 Halle 1.1, Stand A02

Multi-Contact AG
 4123 Allschwil
 Tel. 061 306 55 55
 basel@multi-contact.com
 www.multi-contact.com

Multi-Contact


STAUBLI GROUP



**Wo ein Lichtmanager
Teamfähigkeit
demonstriert.**

IM DIALOG MIT DER TECHNOLOGIE

ineltec. Die Technologiemesse für
Gebäude und Infrastruktur.

mch
messe schweiz
marketing live.

4.–7. September 2007 | Messezentrum Basel | Halle 1

ineltec: Hier werden die neusten Trends des Marktes Gebäudetechnologie gezeigt. Informationen zu der Messe und der Sonderpräsentation «Future Building» finden Sie auf der Website.

Erstmals gleichzeitig: go, die Technologiemesse für Automatisierung und Elektronik.

WWW.INELTEC.CH

ineltec.
infrastructure
technology