

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 94 (2003)  
**Heft:** 19

**Artikel:** Beitrag zur Detektion von Isolationsschäden an Leitungen der Luftfahrttechnik  
**Autor:** Hörzt, Frank / Koenig, Dieter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857599>

### **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:** 29.03.2025

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

# Beitrag zur Detektion von Isolations-schäden an Leitungen der Luftfahrttechnik

## Untersuchungen von Methoden zur zerstörungsfreien Isolationsprüfung und zur Zustandsbewertung von Leitungsbündeln in der Frühphase der Schädigung

Im nachfolgend vorgestellten Forschungsprojekt<sup>1)</sup> wurde untersucht, ob montage- oder betriebsbedingte Schwachstellen in der Isolierung einzelner Leitungen eines Bordnetzes – etwa Risse oder Schnitte – durch Erfassung von Entladungserscheinungen unterhalb der Durchschlagsspannung geschädigter Leitungsisolierungen erkannt und lokalisiert werden können. Die Untersuchungen beruhen auf der klassischen Teilentladungsmessung bei kurzen Leitungen mit Hybridisolierung, wobei Art, Lage und Anordnung einer künstlich eingebrachten Vorschädigung der Leitungen sowie die Frequenz der Prüfspannung variiert wurden. In einem weiteren Schritt wurden orientierende Untersuchungen mit Lichtwellenleitern zur Vorentladungsdetektion durchgeführt.

Einwandfreie Leitungsverbindungen sind in der Luftfahrttechnik für einen fehlerfreien und sicheren Betrieb unumgänglich. Bei den in Bündeln verlegten Versorgungsleitungen eines Flugzeuges kann es sowohl während der Fertigung und der Montage, aber auch durch elektrische, klimatische, chemische und mechanische

den Verlegungslängen auszugehen. Die ungeschirmten Einzelleiter besitzen aus Gewichts- und Kostengründen äusserst dünne Isolierschichten im Mikrometerbereich. Bei der Installation werden die

verlegten Leitungen verschiedenen Durchgangs- und Isolationstests unterzogen. Allerdings werden die in Bündeln installierten Leitungen bei der Wartung der Flugzeuge nach Norm DIN EN 3475 [1] lediglich einer Sichtprüfung unterzogen, die gerade in schwer zugänglichen Bereichen der Kabeltrassen eine Detektion von insgesamt nur annähernd 20% der Isolationsfehler ermöglicht [2].

Weitere in der Literatur behandelte und vorgestellte Prüfverfahren zur Ortung und Detektion von Isolationsschäden in Flugzeugbordnetzen, die nur im Falle eines bereits eingetretenen Fehlers und dadurch nicht als Prävention durchgeführt werden, sind

- die Reflektometrie, welche auf dem Abgleich eines eingespeisten Sinus- bzw. Rechtecksignals mit dem am Leitungsende reflektierten Signal beruht. Hierzu existieren die Verfahren *Time domain reflectometry* (TDR), *Standing wave reflectometry* (SWR) und *Frequency domain reflectometry* (FDR).
- die Widerstandsmessung. Hierbei wird eine Gleichspannung ( $U < 28\text{ V}$ ) in das Bordnetz eingespeist. Durch Messung

Frank Hörtz, Dieter Koenig

Einflüsse im Betrieb zu einer Beschädigung einzelner Aderisolierungen kommen. In Verbindung mit weiteren Belastungsfaktoren wie wechselnden Temperaturen, Betaugung und Vibration führt dies zu einem sehr komplexen klimatischen und mechanischen Belastungsbild der Isolierung und im ungünstigsten Fall zum Versagen der Isolationsfähigkeit mit schwerwiegenden Folgen wie beispielsweise Flugzeugabstürze.

In einem Passagierflugzeug befinden sich durchschnittlich einige hundert Kilometer Leitungsbündel verschiedener Querschnitte. Mit zunehmender elektronischer Flugsteuerung, dem so genannten «fly by wire»-System, ist von ansteigen-

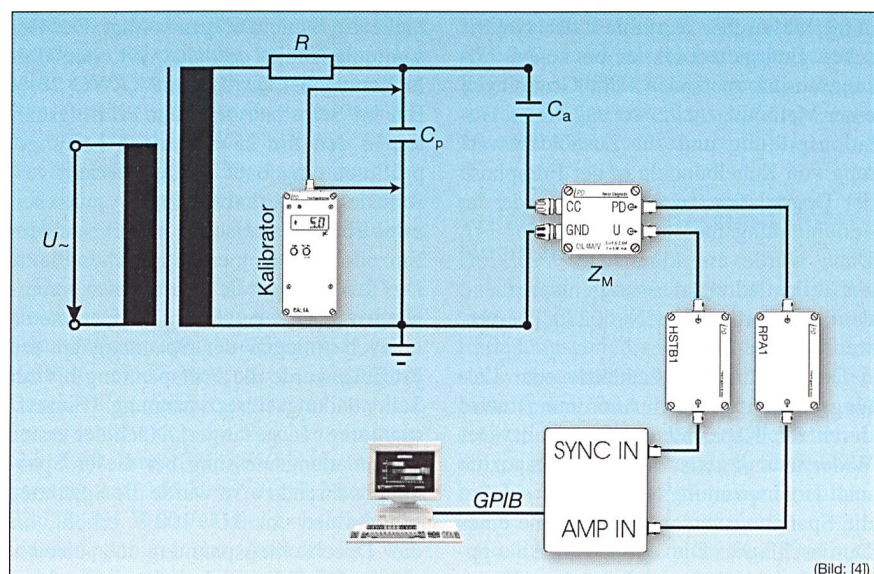


Bild 1 Schematische Darstellung des verwendeten Teilentladungsmesskreises

$C_p$ : Koppelkapazität;  $C_p$ : Prüfling (Einfachleiter oder Leitungsbündel, je nach Anordnung);  $R$ : Widerstand zum Schutz der Spannungsversorgung bei Durchschlag;  $Z_M$ : Ankopplungsvierpol



des Stromflusses kann der Widerstand der Messstrecke ermittelt und mit den bekannten Widerstandsbelägen der installierten Leitung verglichen werden. Dabei müssen allerdings am Ende der Übertragungsstrecke angeschlossene Geräte kurzgeschlossen werden. Korrodierte Steckverbindungen, die als Kontaktübergangsstellen zu sehen sind, führen zudem zu einer Verfälschung der Messergebnisse.

Alle Messverfahren können allerdings lediglich schwerwiegende Fehler der späten Degradationsphase<sup>2)</sup> der Isolierung – wie z.B. einen Leitungskurzschluss – detektieren. Schädigungen der Isolierung in der frühen Degradationsphase, wie z.B. Schnitte und Risse, werden nicht festgestellt [3].

Während bei Flugzeugneufertigungen weiter gehende Massnahmen zur Vermeidung von Isolationsschäden wie zusätzliche Isolationsschläuche oder die Verwendung von Lichtwellenleitern zur Informationsübertragung oder für Diagnosezwecke getroffen werden können, besteht für bestehende Flugzeuge dringender Bedarf für ein Detektions- und Ortungsverfahren, das während der Wartungsarbeiten oder in optimierter Form auch online leitungsgebunden ein schnelles Erkennen und Orten eventuell vorhandener Isolationsschäden ermöglicht.

## Teilentladungsmessung zur Detektion von Schäden der Leitungsisolierung

Wegen zum Teil erheblicher Nachteile der zuvor beschriebenen Verfahren ist die Motivation gegeben, durch die Anwendung klassischer Verfahren der elektrischen Energietechnik einen neuen Lösungsansatz zu finden. Um Grundlagen einer Methodik zur zerstörungsfreien Isolationsprüfung und zur Zustandsbewertung von Kabelbündeln in der Frühphase der Degradation zu schaffen, wurde die Teilentladungsmessung eingesetzt [4]. Dazu wurde ein klassischer Prüfkreis zur Teilentladungsmessung entsprechend dem Standard DIN EN 60270 [5] verwendet (Bild 1).

Der Prüfling (Einfachleiter oder Leitungsbündel, je nach Anordnung) wird durch die Kapazität  $C_p$  dargestellt. Der Widerstand  $R$  zwischen Koppelkapazität und Hochspannungsversorgung schützt die Spannungsversorgung im Falle eines Durchschlages. Die durch den Ankopplungsvierpol  $Z_M$  ausgekoppelten Entladungen werden über die Verstärkereinheit RPA1 in den Verstärkereingang «Amp in» der Auswerteeinheit eingespeist. Pa-

Anordnung		$l$ [mm]	Abstand $d$ [mm]	Frequenz $f$ der Prüfspannung [Hz]
1 ungeschädigter spannungsführender Leiter auf Metallplatte		0	0	50...400
2 ungeschädigter spannungsführender Leiter gegen geschädigter Leiter auf Erdpotenzial		3	Dicke der Isolierung eines Leiters	50...400
3 geschädigter spannungsführender Leiter gegen ungeschädigten Leiter auf Erdpotenzial		3	Dicke der Isolierung eines Leiters	50...400
4 geschädigter spannungsführender Leiter gegen geschädigten Leiter auf Erdpotenzial		3	Dicke der Isolierung zweier Leiter	50...400, 1000
5 geschädigter spannungsführender Leiter gegen Metallplatte im Abstand $d$		3 bis 6	2,5	50...400

(Tabelle: Frank Hörtz)

Tabelle Untersuchte Anordnungen mit den Prüfparametern  $l$  (Schädigungslänge),  $d$  (Abstand Leiter/Leiter bzw. Leiter/Platte) und  $f$  (Frequenz der Prüfspannung)

Abstand  $d$ : Abstand  $d$  zwischen zwei Leitern (Anordnungen 2 bis 4) oder zwischen einem Leiter und einer Metallplatte (Anordnung 1 und 5). Bei den Anordnungen 2 und 3 entspricht der Abstand zwischen den zwei Leitern der Dicke der Isolierung eines Leiters, da die Isolierung ausserhalb des geschädigten Bereiches noch vorhanden ist (siehe gestrichelte Linie). Somit ist der Abstand  $d$  bei der Anordnung 4 doppelt so gross wie in den Anordnungen 2 und 3.

Frequenz  $f$ : die Frequenz der angelegten Hochspannung (Sinusspannung).

Schädigungslänge  $l$ : Die Schädigung wird künstlich durch das Entfernen der Isolierung über den gesamten Umfang des Leiters für die Länge  $l$  eingebracht (Bild 2). Die Schädigungslänge wurde im Bereich von  $l = 3...6$  mm variiert.

parallel hierzu wird mit der Verstärkereinheit HSTB1 die Spannung gemessen, so dass eine synchronisierte Darstellung der Teilentladungen zum Spannungsverlauf möglich ist.

Der parallel zum Prüfling  $C_p$  dargestellte Kalibrator ermöglicht die Kalibrierung des Messkreises. Der Grundstörpegel des Kreises beträgt 0,8 pC bei  $U = 8$  kV.

Für die Untersuchungen wurden isolierte Einzelleiter mit einer Hybridisolierung aus den Materialien PTFE/PI/PTFE<sup>3)</sup> eingesetzt, wobei die Isolierungsdicke pro Schicht 65  $\mu$ m beträgt. Der Gesamtquerschnitt des Cu/Ag-Leiters mit Isolierung beträgt 0,5 mm<sup>2</sup> (AWG 20<sup>4)</sup>. Ein im Selbstbau erstellter Prüflingshalter, in den die 25 cm langen Leitungsprüflinge eingebaut werden, erlaubt verschiedene Prüfanordnungen zwischen zwei Einzelleitern sowie zwischen einem Einzelleiter und einer metallischen Platte. Die Tabelle zeigt die untersuchten Anordnungen und die gewählten Prüfparameter.

Nach Anlegen der Spannung an den Prüfling wurde die Prüfspannung bis zur Teilentladungseinsetzspannung (Einsetzspannung)  $U_e$  gesteigert. Nach der ersten Teilentladungsmessung bei dieser Spannung während  $t = 5$  s wurde die Spannung schrittweise um  $\Delta U = 100$  V erhöht, bis die Durchschlagspannung  $U_d$  erreicht wurde. Die Teilentladungen wurden hierbei während  $t = 5$  s bei den einzelnen Spannungswerten aufgenommen. Für jede Anordnung wurden fünf identische

Prüflinge untersucht und statistisch bewertet.

## Einsetz- und Durchschlagspannung der verschiedenen Anordnungen

In Bild 3a ist die Einsetzspannung  $U_e$  und Durchschlagspannung  $U_d$  des unter Spannung stehenden und direkt auf einer geerdeten Metallplatte liegenden ungeschädigten Leiters über ein Frequenzband von 50 bis 400 Hz aufgetragen<sup>5)</sup>.

Während sich die Einsetzspannung  $U_e$  der in der Tabelle dargestellten Anordnung 1 für das geprüfte Frequenzband als frequenzunabhängig erwies, konnte bei der Durchschlagspannung eine geringe Abnahme mit steigender Frequenz ermittelt werden. Da bei dieser Anordnung der Durchschlag im Wesentlichen durch die Feststoffisolierung bestimmt wird, wird diese Frequenzabhängigkeit im Mechanismus des Wärmedurchschlages vermutet. Hierbei erhöhen dielektrische Verluste im Isolierstoff die Temperatur des Dielektrikums, was schliesslich zum Durchschlag der Anordnung führt. Da diese den Durchschlag verursachenden

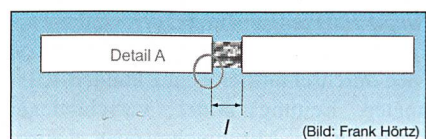


Bild 2 Schädigungslänge  $l$  der definiert vorgeschädigten Leiter



dielektrischen Verluste proportional zur Kreisfrequenz  $\omega$  sind, steigen mit zunehmender Frequenz die dielektrischen Verluste, was zu einer höheren Erwärmung und somit zur Senkung der Durchschlagspannung führt. Entsprechende Ergebnisse konnten für andere Isolierstoffe der Hochspannungstechnik bereits in [6] ermittelt werden.

Für die Anordnungen 2 bis 5 konnte keine Frequenzabhängigkeit der Einsetz- und Durchschlagspannung festgestellt werden. In Bild 3b sind diese Grössen für die in der Luftfahrt übliche Frequenz von  $f = 400$  Hz dargestellt.

Auf Grund der grösseren Strecke der Gasisolierung im Bereich der Schädigung des Leiters ergibt sich bei den Anordnungen 2 und 3 eine höhere dielektrische Festigkeit und somit eine höhere Durchschlagspannung bei  $f = 400$  Hz als bei Anordnung 1. Bei Anordnung 4 sind Einsetzspannung (2 kV) und Durchschlagspannung (2,2 kV) annähernd identisch. Dies kann durch die sehr kleine Distanz der beiden Leiter begründet werden. Um dieses Phänomen in Anordnung 5 zu vermeiden, ist ein Mindestabstand von  $d = 2,5$  mm zwischen dem geschädigten Leiter und der geerdeten Platte notwendig. Dadurch lässt sich eine Differenz der Einsetz- zur Durchschlagspannung auf knapp 1 kV herstellen, was die eigentliche Teilentladungsmessung in diesem Spannungsfenster erlaubt.

Da beim vorliegenden Forschungsprojekt eine Spanne von Schlagweiten<sup>6)</sup> von 0,35 mm bis 2,5 mm durchlaufen wird, ist für die Durchschlagsspannung  $U_d$  das Paschengesetz<sup>7)</sup> zu berücksichtigen. Für homogene Anordnungen und konstante Temperatur ist  $U_d$  direkt proportional zum Produkt aus Druck  $p$  und Elektrodenabstand  $s$ . In Näherung gilt dies auch für quasi-homogene Anordnungen, wie sie hier untersucht werden.

Bild 4 zeigt die Durchschlagspannungen für die Anordnungen 4 und 5 anhand der Paschenkurve. Trägt man für Anordnung 4 das Produkt aus Prüfdruck (1 bar) und Schlagweite (zweimal die Isolierstoffdicke von je 0,175 mm) in der Abszisse der Paschenkurve ein ( $p \cdot s = 0,35$ ), so erhält man eine theoretische Durchschlagspannung in Luft von  $U_d = 2$  kV. Berücksichtigt man noch den Schwaigerschen Ausnutzungsfaktor<sup>8)</sup> der Anordnung ( $\eta = 0,88$ ), so errechnet sich ein theoretischer Wert von 1,76 kV. Die vorliegende Abweichung zu der gemessenen Durchschlagspannung von 2,1 kV kann in einem etwas grösseren Abstand der beiden Leiter begründet liegen, der die Dicke der Isolierung zweier Leiter überschreitet. Bei Anordnung 5 ergibt sich das

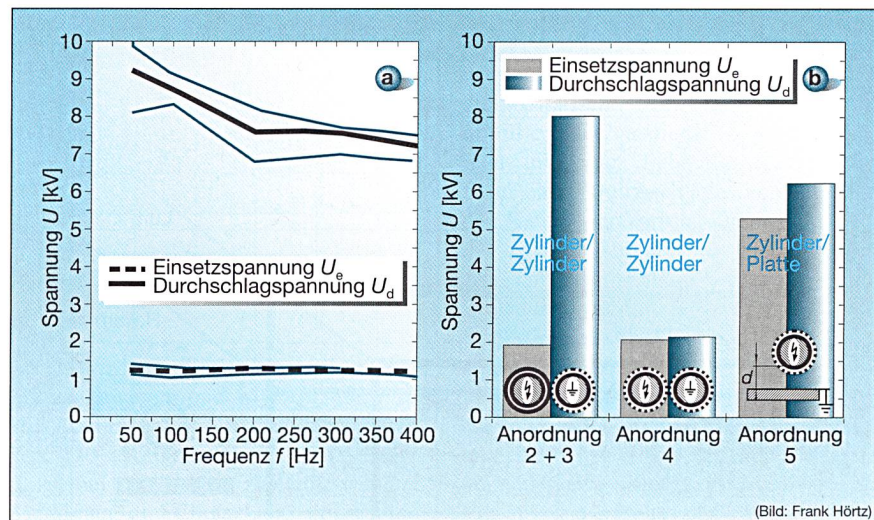


Bild 3 Einsetz- und Durchschlagspannung der verschiedenen Anordnungen

3a: Anordnung 1; Die dünn eingezeichneten Linien zeigen die Spanne der an den fünf Prüflingen bei der Messung aufgenommenen Minimal- und Maximalwerte.

3b: Anordnungen 2 bis 5 ( $f = 400$  Hz), arithmetischer Mittelwert aus jeweils fünf Prüflingen; Anordnungen in Quer- und Längsschnitt

Produkt  $p \cdot s$  aus dem Umgebungsdruck mit 1 bar und dem Abstand Leiter/Platte (2,5 mm) zu  $2,5 \text{ mm} \cdot \text{bar}$ . Daraus lässt sich aus dem Paschendiagramm eine theoretische Durchschlagspannung von 9 kV bestimmen. Mit einem Schwaigerschen Ausnutzungsfaktor für diese Anordnung von  $\eta = 0,65$  erhält man mit einem rechnerischen Wert von 5,85 kV annähernd die Durchschlagspannung aus Bild 3 für diese Anordnung.

### Teilentladungseinsatz unter Helium

Bei einem möglichen späteren Einsatz eines Prüfverfahrens für existierende Bordnetze der Luftfahrt muss die verwendete Prüfspannung kleiner als 1 kV sein, um Sekundärschäden an weiteren Betriebsmitteln im Bordnetz zu vermeiden [7]. Um dieses Ziel mit dem Mittel der Absenkung der Einsetzspannung der Entladungen zu erreichen, wurden Untersuchungen mit dem Isoliertgas Helium durchgeführt.

Dadurch kann auf Grund des im Vergleich zu Luft verhältnismässig grossen Sekundäronisierungskoeffizienten<sup>9)</sup>  $\gamma$  von Helium eine wesentlich niedrigere Durchschlagspannung erreicht werden. So verschiebt sich das Paschenminimum von Luft von 330...350 V ( $p \cdot d = 7,3 \text{ bar} \cdot \mu\text{m}$ ) auf 155 V ( $p \cdot d = 53,2 \text{ bar} \cdot \mu\text{m}$ , Bild 4) [8]. Dadurch sinkt ebenfalls die Einsetzspannung der Anordnung, wodurch Teilentladungen gegebenenfalls weit unter einer Prüfspannung von 1 kV detektiert werden könnten. Dies würde – falls auf Grund der Teilentladungen auf

eine vorliegende Fehlstelle geschlossen werden kann – auch eine Messung in bestehenden Bordnetzen ermöglichen.

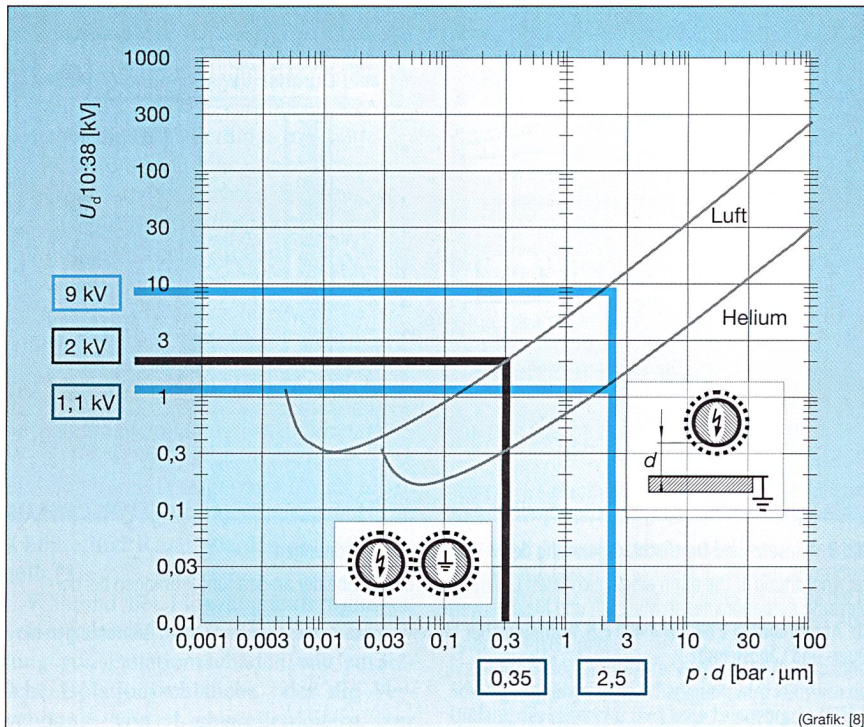
Dazu wurde die Anordnung 5 ( $d = 2,5$  mm,  $l = 6$  mm) bei 50 Hz und bei 400 Hz untersucht. Bis zum Scheitelpunkt der Durchschlagspannung von  $U_d = 0,6$  kV konnten allerdings keine Entladungen erfasst werden. Bild 4 zeigt die Überprüfung dieser Durchschlagspannung anhand der Paschenkurve für Helium. Auf der Abszisse ist das Produkt aus Druck und Abstand ( $2,5 \text{ bar} \cdot \text{mm}$ ) eingetragen. Für Helium führt dies zu einer theoretischen Durchschlagspannung der Anordnung von 1,1 kV. Berücksichtigt man auch hier den Schwaigerschen Ausnutzungsfaktor der Anordnung mit  $\eta = 0,65$ , so erhält man mit einem rechnerischen Wert von 0,72 kV annähernd die gemessene Durchschlagspannung von  $U_d = 0,6$  kV.

### Teilentladungsmessung unter Normalluft

Um eine spätere Detektion von Isolationsschäden zu ermöglichen, müssen Entladungsphänomene, die von der Fehlstelle ausgehen, vorliegen. Diese wären mittels der Teilentladungsmessung als äussere Teilentladungen zu detektieren, die in den Spannungsmaxima ( $\varphi = 90^\circ$  bzw.  $\varphi = 270^\circ$ ) der Prüfspannung auftreten.

Lediglich bei einem der fünf Prüflinge der Anordnung 5 konnten solche Entladungen detektiert werden. Sie sind in Bild 5 in Abhängigkeit der Phasenlage der Prüfspannung dargestellt. Die Anzahl





**Bild 4** Durchschlagspannung in Abhängigkeit der Paschenkurve für Luft und Helium  
Schwarze Linie: Anordnung 4 gemäss Tabelle; blaue Linie: Anordnung 5 gemäss Tabelle.

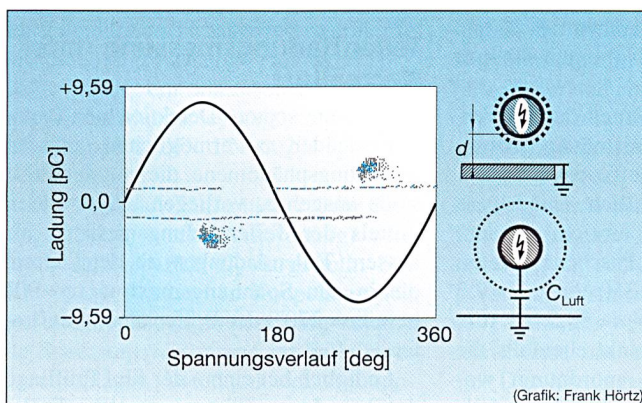
der Impulse (5–7) und ihre Ladungen (2–3 pC) liegen nur unwesentlich höher als der Grundstörpegel des Messkreises.

Variationen der Schädigungslänge  $l$  haben gezeigt, dass diese weder auf die Einsetz- und Durchschlagspannung noch auf das Teilentladungsmuster dieser Anordnung einen Einfluss hat.

Anordnung 5 lässt mit dem gewählten Versuchsaufbau nur Messungen mit einem Abstand des Leiters zur Gegenelektrode – der geerdeten metallischen Platte – von 2,5 mm zu (Tabelle). Wird ein geringerer Abstand gewählt, so liegen Einsetz- und Durchschlagspannung so dicht beieinander, dass keine Teilentladungen detektiert werden können. Wählt

man einen grösseren Abstand, so reicht die Spannungshöhe des gewählten Prüfkreises bei einer Frequenz von 400 Hz nicht aus, um die Durchschlagspannung zu erreichen.

Aufnahmen mit einer Nachtsichtkamera liessen keine Erfassung der Vorentladungen zu. Dies liegt in der geringen Anzahl und Entladungshöhe der Teilentladungen und damit der äusserst geringen Leuchtkraft begründet. Durch die Aufnahmen mit einer Schnellbildkamera konnte jedoch der Ort des ersten Durchschlages festgestellt werden, was – wenn auch nur begrenzt – einen Rückschluss auf den Ort der Vorentladungen zulässt. Bild 6a zeigt die Seitenansicht der Anordnung des Hochspannung führenden, vorgeschädigten Leiters (Schädigungslänge  $l = 6$  mm) im Abstand  $d = 3$  mm zur geerdeten Metallplatte (Gegenelektrode). Wie aus Bild 6b ersichtlich ist, tritt der erste Durchschlag an den Isolierungskanten am Ende der Schädigung auf. Diese Aussage wird durch



**Bild 5** Teilentladungsmuster für Anordnung 5 mit Bild der Anordnung und Ersatzschaltbild der wirksamen Kapazität

$l = 3$  mm;  $U_{\text{test}} = 5,5$  kV.

Berechnungen der elektrischen Feldstärke der Anordnung gestützt. Bild 7 zeigt das Feldbild und die Feldstärkeverteilung<sup>10)</sup> bei Nennspannung. Bei höheren Spannungen als der Nennspannung der Leitungen ändert sich zwar die absolute Höhe der elektrischen Feldstärke, die qualitative Verteilung bleibt allerdings gleich.

Wie Bild 7a und Berechnungen mit einem Schädigungswinkel  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  zeigen, hat eine Schädigung mit einem Schädigungswinkel  $\alpha > 90^\circ$  keinen nennenswerten Einfluss auf die Feldverteilung der maximalen Feldstärken, die in diesem Fall bei der kleinsten Distanz zwischen dem spannungsbelasteten Prüfling und der geerdeten Metallplatte auftritt. Wird  $\alpha < 90^\circ$  gewählt (in Bild 7b:  $\alpha = 45^\circ$ ), so wird die Feldverteilung zwischen Leiter und Platte durch die Isolierung beeinträchtigt. Die maximalen Feldstärken treten nun auf Grund der Verringerung des Abstandes zwischen metallischem Leiter und geerdeter Platte durch die Isolierung an den Kanten der Isolierung auf. Eine weitere Verringerung des Schädigungswinkels ( $\alpha \rightarrow 0$ , Riss in der Isolierung) bringt bezüglich der Feldstärke keine Änderung: die höchste Feldstärke herrscht dann nach wie vor an den Kanten der Isolierung im Schädigungsbereich. Die gleiche Feldverteilung liegt bei einer Schädigung der Leitungsisolierung in Längsrichtung vor. Auch hier treten die maximalen Feldstärken an den Isolierungskanten auf, welche die Schädigung begrenzen (Detail A in Bild 2). Gestützt durch die Aufnahmen mit der Schnellbildkamera werden diese Stellen als Entladungsstellen der Anordnung 5 vermutet.

### Überprüfung weiterer Detektionsmöglichkeiten

Auf Grund der eingeschränkten Detektionsmöglichkeiten mit Hilfe der klassischen Teilentladungsmessung wurden ergänzende orientierende Untersuchungen durchgeführt, um (Vor-)Entladungen mit alternativen Detektionsmethoden zu erkennen. Hierzu wurde zunächst die Modellanordnung «Spitze–Platte» gewählt, die geschirmt<sup>11)</sup> aufgestellt wurde. Die Prüfspannung wurde bis zum Durchschlag gesteigert, während zur Durchschlagserkennung die nachfolgend beschriebenen Detektoren verwendet wurden.

### Kunststofffaser-Lichtwellenleiter

Der Lichtwellenleiter wurde in unmittelbarer Nähe des Durchschlagorts positioniert. Der Vergleich der eingespeis-



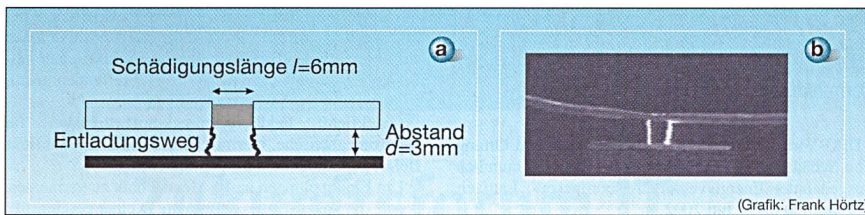


Bild 6 Schnellbildkameraaufnahme für Anordnung 5  
6a: Anordnung Leiter/Platte ( $d = 3 \text{ mm}$ ,  $l = 6 \text{ mm}$ ); 6b: Ort des ersten Durchschlages ( $U_{\text{test}} = 7 \text{ kV}$ ,  $f = 400 \text{ Hz}$ )

ten zur ausgesendeten Lichtleistung sollte ermöglichen, sowohl Druckänderungen auf den Lichtwellenleiter (die zu einer Verringerung des Ausgangssignals führen) als auch radial eingestreuete Lichtimpulse (die zu einer Erhöhung des Ausgangssignals führen) festzustellen. Zwar treten beide Phänomene beim Durchschlag der Anordnung auf, doch konnte keiner der Effekte mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik erfasst und ausgewertet werden. Gründe dafür liegen in der vergleichsweise geringen Druckentwicklung und der hohen Dämpfung der Kunststofffaser bzw. in der geringen Verstärkung der Signale. Durch die Verwendung von Glaslichtwellenleitern könnte allerdings die Faserdämpfung verringert und durch leistungsfähigere elektronische Verstärker der Signalpegel angehoben werden. Dies könnte es ermöglichen, Entladungsphänomene zu detektieren.

### Rechteckige Leiterschleife, die um den Durchschlagort angeordnet ist

Dieses Messprinzip nutzt die durch den Durchschlag der Spitze-Platte-Anordnung entstehende induktive Kopplung in einer rechteckigen Leiterschleife, die die Anordnung umgibt. Auf Grund des hohen Stromgradienten wird in die Leiterschleife eine Spannung induziert, die an den Enden der Leiterschleife als Spannungsfall gemessen werden kann. Da dieses Phänomen allerdings einen Durchschlag voraussetzt, kann sie nicht zur Vorentladungsdetektion dienen. Folglich wurden in diese Richtung keine weiteren Parameterstudien unternommen.

### Weitere Detektionsmöglichkeiten

Neben den hier ansatzweise untersuchten Verfahren kann eine Detektion auch mit im Lichtwellenleiter integrierten Bragg-Gittern<sup>[2]</sup> durchgeführt werden [9]. Eine weitere Detektionsmöglichkeit bieten Glasfaser-Lichtwellenleiter, in deren Oberfläche die vom Lichtbogen ausgehende Strahlung radial eindringt und durch die Effekte der Rayleigh-Strahlung<sup>[3]</sup> und des Macrobending<sup>[4]</sup> in gerichtete Strahlung umgesetzt wird.

Diese wird am Ende des Lichtwellenleiters bewertet und in ein Signal zur Ansteuerung von Schaltgeräten umgesetzt [10]. Voraussetzung hierzu ist allerdings bei den beiden zuletzt erwähnten Methoden die Einwirkung eines Störlichtbogens, der gerade durch geeignete Detektionsmaßnahmen vermieden werden soll.

### Zusammenfassung

Zur Detektion Isolierstoff-spezifischer Schwachstellen, die an Entladungen in Gasspalten erkennbar sind, wurden Teilentladungsmessungen an Hybridisolierungen von in der Luftfahrt verwendeten Leitungen durchgeführt, die die Bestimmung der maximalen «elektrischen» Belastbarkeit der untersuchten Isoliermaterialien und der verschiedenen Isolierstoffsysteme ermöglichen. Aufgezeichnet wurden hierbei die Teilentladungseinsetzspannung sowie die Teilentladungsstärke als Funktion der angelegten Wechselspannung, der Netzfrequenz sowie verschiedener Leiteranordnungen.

Im Falle der «klassischen» Teilentladungsmessung konnten Entladungsphänomene nur für einen sehr schmalen Gültigkeitsbereich der untersuchten Parameter detektiert werden. Lediglich für die Anordnung «geschädigter spannungsführender Leiter gegen geerdete Metallplatte

im Abstand  $d$ » konnten Entladungen für einen definierten Abstand festgestellt werden. Diese Entladungen treten – wie elektrostatische Simulationsrechnungen mithilfe von *Quickfield*<sup>[10]</sup> sowie Aufnahmen mit einer Schnellbildkamera im Falle eines Durchschlages zeigten – an den Kanten der Vorschädigung auf.

Für die restlichen vier untersuchten Anordnungen (Tabelle) konnten keine Entladungen ermittelt werden, die einen Rückschluss auf die Schädigungsstelle zulassen.

Die Untersuchungen zeigten zudem, dass die Frequenz der Prüfspannung im untersuchten Bereich von 50...1000 Hz keinen nachweisbaren Einfluss auf die Einsetz- und Durchschlagspannungen bei Anordnungen mit beschädigten Leitern und Gasspalt besitzt.

Bei orientierenden Untersuchungen konnte durch Einsatz von Helium als Isoliergasmedium die Durchschlagsspannung der Anordnungen zwar gesenkt werden, doch unterschieden sich in den untersuchten Anordnungen Durchschlag- und Entladungseinsetzspannung nur so geringfügig, dass eine generelle Detektierung von Entladungen vor dem Auftreten des Durchschlages nicht möglich war.

Diese Befunde sowie das Ergebnis weiterer Detektionsmöglichkeiten in Form von Lichtwellenleitern lassen es als nicht sinnvoll erscheinen, weitere Untersuchungen im Hinblick auf Vorentladungsphänomene – auch auf optischer, akustischer oder chemischer Grundlage – durchzuführen, da offenbar die physikalische und/oder chemische Basis als Grundlage eines zerstörungsfreien Fehlererkennungsverfahrens hierfür nicht ausreicht. Damit scheinen zur Schwachstellen- bzw. Fehlererkennung offenbar lediglich Verfahren geeignet zu sein, die mit hoher Feldstärke und damit zerstörend wirken.

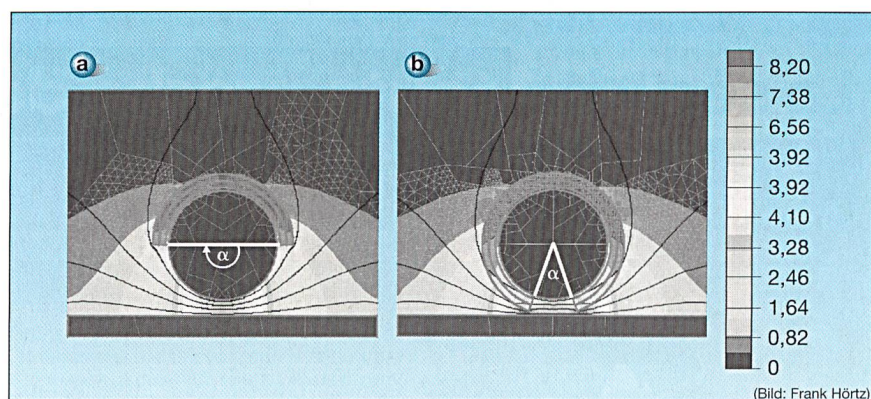


Bild 7 Simulation der elektrischen Feldstärke bei einer Spannungsbeanspruchung mit  $U_A = 208 \text{ V}$ , Maximalfeld  $8,2 \text{ kV/cm}$

7a: Schädigungswinkel  $\alpha$  der Isolierung:  $180^\circ$ ; 7b: Schädigungswinkel  $\alpha$  der Isolierung:  $45^\circ$



## Referenzen

- [1] DIN EN 3475: 02-1993: Elektrische Leitungen für Luftfahrzeuge. Prüfverfahren, Teil 201: Sichtprüfung.
- [2] K. Adams: Ticking faults aging wire time bomb. Internetrecherche, letzter Aufruf: Januar 2003, [http://www.iasa.com.au/folders/Safety\\_Issues/Aircraft\\_Wire/Aging%20Wire2.html](http://www.iasa.com.au/folders/Safety_Issues/Aircraft_Wire/Aging%20Wire2.html)
- [3] C. Furse, R. Haupt: Down to the Wire. IEEE Spectrum, Februar 2001, S. 34-39.
- [4] D. König, Y. N. Rao: Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik. VDE-Verlag, Berlin Offenbach, 1993.
- [5] DIN VDE 0434: 03-2001: Hochspannungs-Prüftechnik, Teilentladungsmessungen (IEC 60270: 2000). Deutsche Fassung EN 60270: 2001.
- [6] N. Hardt, D. König: Prüfung von Isoliermaterialien mit hoher Spannung bei Frequenzen im kHz-Bereich. Highvolt Kolloquium 1999, Cottbus, 11./12. Mai 1999, Tagungsband, S. 77-82.
- [7] DIN 29 576: 10-1987: Elektrische Bordnetze für Luftfahrzeuge. Teil 2: Prüfung der im Luftfahrzeug verlegten elektrischen Leitungen.
- [8] A. Küchler: Hochspannungstechnik. VDI Verlag, Düsseldorf 1996.
- [9] M. Trutzel et al.: Investigation of Fiberoptic Bragg Grating Sensors for Applications in the Aviation Industry. OFS-13, S. 624-627.
- [10] A. Klaus: Optische Störlichtbogendetektion in luftisolierten Mittelspannungs-Schaltanlagen. Dissertation TU Ilmenau, 2001.

## Angaben zu den Autoren

Dipl.-Ing. **Frank Hörtz**, geb. 1974 in Worms, begann 1994 sein Studium der Elektrischen Energietechnik an der TU Darmstadt. Seit 1999 ist er dort wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik. Seine Forschungsschwerpunkte sind auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrtleitungen die Entwicklung einer Materialtestmethode sowie die Erarbeitung von Methoden zur Detektion von Schädigungen der Isolierung.

TU Darmstadt, FG Hochspannungstechnik, D-64283 Darmstadt, [thoertz@yahoo.de](mailto:thoertz@yahoo.de)

Prof. **Dieter Koenig**, geb. 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 seit seiner Versetzung in den Ruhestand dort weiterhin wissenschaftlich tätig ist. Professor Koenig ist Mit-

glied bei CIGRE, VDE und ETG sowie Fellow-Mitglied verschiedener IEEE-Gesellschaften.

TU Darmstadt, FG Hochspannungstechnik, D-64283 Darmstadt, [dikoenig@hrz1.tu-darmstadt.de](mailto:dikoenig@hrz1.tu-darmstadt.de)

<sup>1</sup> DFG-Vorhaben KO 741/25-1 «Detektion und Ortung von Schäden in der Isolierung von Leitungen räumlich ausgedehnter Energieversorgungsnetze». Laufzeit 1. Juli 2000 bis 1. Juli 2002

<sup>2</sup> Degradation: Verschlechterung.

<sup>3</sup> PTFE: Polytetrafluorethylen (Teflon); PI: Polyimid.

<sup>4</sup> AWG: American Wire Gauge (Angabe des Querschnitts). AWG 20 entspricht einem Querschnitt von 0,5 mm<sup>2</sup>; es kann sich dabei um Daten- oder Energieversorgungskabel handeln.

<sup>5</sup> Aufgetragen ist der arithmetische Mittelwert aus jeweils fünf gleich aufgebauten Prüflingen.

<sup>6</sup> Schlagweite: kürzeste Entfernung zwischen zwei Elektroden, die gegeneinander Potenzial führen.

<sup>7</sup> Paschengesetz: beschreibt die Abhängigkeit der Gasdurchschlagsspannung von Druck und Schlagweite.

<sup>8</sup> Schwaigerscher Ausnutzungsfaktor: Homogenitätsgrad. Er gibt das Verhältnis der homogenen Feldstärke eines Plattenkondensators zur höchsten Feldstärke der zu bewertenden Anordnung an.

<sup>9</sup> Sekundäronisierungskoeffizient: dieser Koeffizient beschreibt das Verhältnis der Zahl der durch positive Ionen ausgelösten freien Elektronen an der Kathode einer gasisolierten Anordnung zur Zahl der auftretenden positiven Ionen.

<sup>10</sup> Quickfield: Feldberechnungs-Softwarepaket für elektromagnetische, thermische sowie für mechanische Belastungssimulationen ([www.quickfield.de](http://www.quickfield.de)).

<sup>11</sup> Um Einkopplungen in die Messtechnik zu vermeiden, wurde die Spitze-Platte-Anordnung in einer geschirmten Kabine, die entsprechende Messtechnik ausserhalb der Kabine installiert.

<sup>12</sup> Bragg-Gitter: Faser-Bragg-Gitter sind optische Filter, die sich im Kern von Lichtwellenleitern in Form von Singlemode-Glasfasern mit einem Durchmesser von 125 µm befinden. Sie bestehen aus einer Vielzahl von winzigen, äquidistant entfernt liegenden Reflexionsstellen mit lokal veränderter Brechzahl des Glases, die durch Einwirkung von Laserstrahlen auf UV-empfindliches germaniumdotiertes Quarzglas unter Verwendung einer Phasenmaske erzeugt werden.

<sup>13</sup> Rayleigh-Strahlung: Streustrahlung, bei der das Photon in einen beliebigen Raumwinkel reflektiert wird.

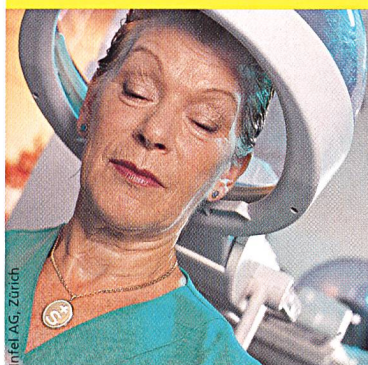
<sup>14</sup> Macrobending: Makrobiegungen. Darunter sind alle makroskopischen axialen Abweichungen einer LWL-Faser von einer geraden Linie zu verstehen.

## Contribution à la détection des défauts d'isolement sur les lignes électriques en technique aéronautique

### Développement d'une méthode de contrôle non destructif d'isolement et d'évaluation de l'état des faisceaux de câbles à un stade précoce d'endommagement

Le projet de recherche présenté était destiné à examiner si les points faibles dus au montage ou au service dans l'isolement de certaines lignes d'un réseau de bord – ruptures et coupures par exemple – pourraient être décelés et localisés par la mesure des phénomènes de décharge en dessous de la tension disruptive. Les essais sont basés sur la mesure classique de décharge partielle sur lignes courtes à isolement hybride, en faisant varier le type, l'emplacement et la disposition d'un début de dommage artificiel des lignes de même que la fréquence de la tension d'essai. Dans une seconde étape, il a été effectué des examens d'orientation au moyen de fibres optiques pour détecter les débuts de décharge.

## La sécurité toute proche de nous



L'origine des produits n'est pas une question de hasard. Ils portent un label.



**Fiez-vous au signe de sécurité** de l'Inspection fédérale des installations à courant fort (IFIC). Il est la preuve visible que le produit a subi des tests et fait l'objet d'une surveillance de marché. Vous pourrez donc apprécier sa qualité en toute sécurité. Pour plus d'information consultez [www.esti.ch](http://www.esti.ch)



Le signe de conformité SEV apporte en outre la certitude que la fabrication du produit fait l'objet d'une surveillance permanente. Vous trouverez plus d'informations sur le site [www.electrosuisse.ch](http://www.electrosuisse.ch)



Eidgenössisches Starkstrominspektorat  
Inspektorato federale degli impianti a corrente forte  
Inspektorat federal d'implants da current ferm

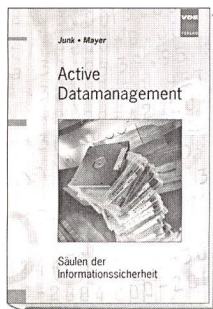
[www.esti.ch](http://www.esti.ch)  
Luppenstrasse 1  
8320 Fehraltorf  
Tél. 01 956 12 12

**La sécurité en toute sécurité**



# Zukunftsforum IT

Innovationen, Trends, Visionen



Junk, K.-P. / Mayer, M.

## Active Data- management

Säulen der Informationssicherheit

2003, 154 S., DIN A5, geb.  
ISBN 3-8007-2682-3  
**18,50 € (D) /**  
**19,- € (A) / 31,50 sFr\***

Datenschutz und Datensicherheitsysteme sind mehr denn je die Voraussetzung, um den richtigen Umgang mit Daten zu gewährleisten, aber auch, um das Vertrauen derer, die mit Daten umgehen, untereinander zu stärken. Schutz bei personenbezogenen Daten ist aber auch eine gesetzliche Pflicht und Aufgabe, die die Unternehmen zu erfüllen haben. Zwei Experten zeigen anhand von realen Beispielen, wie Datenschutzmanagementsysteme praxisbezogen aufgebaut und unter wirtschaftlichen Bedingungen umgesetzt werden können. Dabei werden sowohl rechtliche wie auch IT-spezifische Aspekte berücksichtigt.



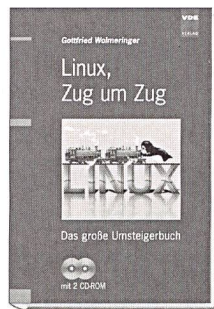
Erbs, H.-E. / Karczewski, S. / Schestag, I.

## Datenbanken

Datenmodelle, Objekte, WWW, XML

2003, 317 S., DIN A5, geb.  
ISBN 3-8007-2721-8  
**24,- € (D) /**  
**24,60 € (A) / 40,50 sFr\***

Datenbanken sind heute alltägliche Hilfsmittel in der Gestaltung von Anwendungssystemen. Das Fachbuch zeigt anhand verschiedener semantischer Datenmodelle, wie man Datenbanken entwirft. Gleichzeitig wird anhand in der Praxis erprobter Datenbanksysteme erklärt, wie Datenbanken zu realisieren sind. Die Neuerscheinung wendet sich an IT-Praktiker, die sich in Entwurf und Realisierung von Datenbanken einarbeiten wollen. Aber auch Ingenieuren in der Praxis und Studierenden ist dieses Buch eine praktische Hilfe beim Einstieg in die Thematik „Datenbank-Technologie“.



Wolmeringer, G.

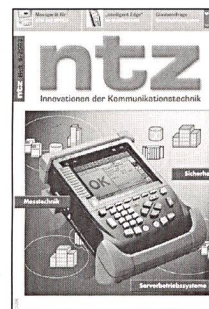
## Linux, Zug um Zug

Das große Umsteigerbuch

2002, 345 S., DIN A5, geb.  
ISBN 3-8007-2617-3  
**30,- € (D) /**  
**30,70 € (A) / 50,40 sFr\***

mit 2 CD-ROM 

Die dominierenden Betriebssysteme für Personalcomputer sind mehr und mehr von Linux bedrängt worden. Im Bereich Internetserver wird der Markt ohnehin bereits von UNIX-Derivaten beherrscht, zu denen Linux zählt. Für viele Nutzer steht deshalb ein Umstieg von Windows zu Linux fest. Der Autor stellt drei konkrete Systemkonfigurationen vor: Den Einzelplatzrechner, das kleine Büro und das LAN. Für alle drei zeigt er einen sicheren und einfachen Weg des Wechsels. Werkzeuge wie GNOME und GIMP werden erläutert. Servicekomponenten machen das Buch zur Referenz. Mit Live Eval-CD!



ntz

## Innovationen der Kommunikations- technik

Hrsg.: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. Organ des VDE und der Informationstechnischen Gesellschaft im VDE (ITG)  
Jahresabonnement 2004: 90,90 €

Die ntz erscheint monatlich.

Sie bietet in ihrer Kombination aus fundierter technischer und wirtschaftlicher Berichterstattung über den sich rasch wandelnden Markt der Telekommunikation (neue Techniken, neue Dienste, Liberalisierung ...) und aus der Welt der Datenetze (LAN, WAN, Internet ...) den umfassenden Überblick über das Marktgeschehen. Sie ist deshalb für ihre Leser eine solide Entscheidungsgrundlage für zukunfts-sichere Investitionen. Die ntz ist auch auf CD-ROM als Elektronisches Zeitschriftenarchiv erhältlich: Preis: 10,50 €.

Bestellungen über den Buchhandel bzw. direkt beim Verlag. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten. \* = Persönliche VDE-Mitglieder erhalten bei Bestellung unter Angabe der Mitgliedsnummer 10 % Rabatt.

VDE  
VERLAG

VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach

Postfach 12 01 43 · 10591 Berlin · Telefon: (030) 34 80 01-0 · Fax: (030) 341 70 93

E-Mail: [vertrieb@vde-verlag.de](mailto:vertrieb@vde-verlag.de) · [www.vde-verlag.de](http://www.vde-verlag.de)

Werb-Nr. 030912



# Unfall-Prävention in Ihrem Betrieb erspart den Hilferuf.

**144**  
NOTRUFNUMMER

**Wussten Sie**, dass Betriebe mit vorbildlicher Arbeitssicherheit belohnt werden? Denn weniger Unfälle bewirken geringere Ausfallstunden, niedrigere Kosten und damit tiefere Prämien. Wenn Sie folglich alles tun, um Unfälle zu vermeiden, ersparen Sie sich manchen Hilferuf.

**Erfolgreiche Prävention.** Die Suva unterstützt Verbände und Betriebe bei der Umsetzung der ASA-Branchenlösungen, bei Ausbildungskursen, Aktionen und Kampagnen, persönlichen Schutzausrüstungen und beim Schadenmanagement. Trio, das Prämienmodell der Suva ist unternehmergerecht, risikobezogen und solidarisch.

**Haben Sie Fragen?** Ihre Suva-Agentur gibt Ihnen gerne Auskunft. Telefon 0848 820 820 oder [www.suva.ch](http://www.suva.ch)

**suvaRisk**

Sicher versichert