

# Langzeitverhalten von Aluminium-Kupfer-Verbindungen in der Elektroenergietechnik

Schneider, R. (1); Löbl, H. (1); Großmann, S. (1); Schoenemann, T. (2); Holdis, M. (3)

Die in einem Kraftwerk erzeugte elektrische Energie wird über metallische Leiter zu den Verbrauchern übertragen. Dabei werden, wegen ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit, Aluminium und Kupfer eingesetzt. Aus technologischen und energetischen Gründen ist die Länge dieser Übertragungsleitungen begrenzt. Dadurch können an den Netzknotenpunkten, z. B. in Umspannwerken oder in Schaltanlagen, elektrische Bimetallverbindungen (Al/Cu-Verbindungen) entstehen, die die Lebensdauer der einzelnen Betriebsmittel maßgebend bestimmen. Wird bei der Auslegung oder der Montage dieser elektrischen Verbindungen das Langzeitverhalten nicht beachtet, kann es zu deren Überbeanspruchung kommen und damit zu einer beschleunigten Alterung. Dies kann zu einem vorzeitigen Ausfall der Verbindungen führen.

**B**erühren sich zwei stromführende Leiter, so entsteht eine elektrische Verbindung. Die entscheidende physikalische Größe zum Bewerten einer solchen Verbindung ist deren elektrischer Widerstand. Dieser ist abhängig von der Geometrie der Verbindung, vom eingesetzten Leitermaterial, von der Verbindungskraft und von der Verbindungstemperatur.

In der Elektroenergietechnik werden verschiedene Verbindungsarten, wie z. B. Schrauben- oder die Steckverbindungen eingesetzt. Die einfachste, die sich damit auch gut für Grundlagenuntersuchungen eignet, ist die Stromschienenverbindung, bei der die Verbindungskraft durch Schrauben erzeugt wird (Bild 1).

Die bei der Montage entstehende Überlappungsfläche  $A_s$  (scheinbare Verbindungsfläche) steht dabei nur zu einem geringen Teil für die Stromübertragung zur Verfügung. Durch die Oberflächenrauheit kommt es nur an einigen Stellen zu einer direkten Berührung zwischen den beiden Kontaktpartnern. Die Summe aller Berührungsflächen wird als mechanisch tragende Verbindungsfläche  $A_1$  bezeichnet. Diese unterteilt sich in die isolierende Fläche  $A_i$  (fremdschichtbehaftet) und die wahre Verbindungsfläche  $A_w$ , über die der elektrische Strom übertragen werden kann. Die wahre Verbindungsfläche

$A_w$  wird weiter unterteilt in die metallische  $A_m$  und die quasimetallische Verbindungsfläche  $A_q$ . Die einzelnen wahren Berührungsstellen werden als Mikrokontakte bzw. a-Spots bezeichnet [1], [2].

Altert eine elektrische Verbindung, so wird ihr elektrischer Gesamtwiderstand mit der Zeit größer. Als mögliche Ursachen dafür wird die Abnahme der Anzahl bzw. der Größe der Mikrokontaktflächen gesehen.

Zurzeit sind fünf Alterungsmechanismen bekannt [3]: Kraftabbau, Fremdschichtbildung, Elektromigration, Reibkorrosion und Interdiffusion.

Beim Kraftabbau nimmt die Verbindungskraft durch Kriech- oder Relaxationsvorgänge mit der Zeit ab. Dadurch wird die Fläche, wie auch die Anzahl der Mikrokontakte geringer und der Verbindungswiderstand nimmt zu.

Bei der Fremdschichtbildung wachsen am häufigsten Oxidschichten (Al-Leiter:  $Al_2O_3$ , Cu-Leiter:  $CuO$ ,  $Cu_2O$ ) in den Mikrokontakt hinein, so dass die stromtragende Fläche  $A_w$  kleiner und damit der elektrische Widerstand größer werden.

Elektromigration liegt dann vor, wenn Atome aus Bereichen hoher Stromdichten in Bereiche niedriger Stromdichten transportiert werden. Im Mikrokontakt, wo sehr hohe Stromdichten auftreten, kommt es dadurch zu einer Lochbildung, die zu

einer kleineren wahren Kontaktfläche führt. Dieser Alterungsmechanismus tritt vor allem bei einer Gleichstrombelastung auf, da im Gegensatz zu Wechselstrom sich hier die Stromrichtung nicht ändert.

Zu Reibkorrosion kommt es, wenn sich die Kontaktpartner gegeneinander wiederholt um Mikrometer bis Millimeter verschieben können (z. B. in Bimetallverbindungen durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten).

Interdiffusion tritt in Bimetallverbindung (z. B. Al-Cu-Verbindungen) auf und kann deren Lebensdauer entscheidend beeinflussen.

Alle Alterungsmechanismen sind temperaturabhängig, wobei höhere Temperaturen zu einer schnelleren Alterung führen.

## Interdiffusion in Bimetallverbindungen

Werden zwei unterschiedliche Metalle miteinander verbunden, kommt es zu einem zeit- und temperaturabhängigen Konzentrationsausgleich, d. h. die Atome des Metalls A diffundieren in das Metall B und umgekehrt. Unterschieden wird dabei zwischen Volumen- und Grenzflächendiffusion; bei der Volumendiffusion diffundieren die Atome im Bereich des ungestörten Kristallgitters und bei der Grenzflächendiffusion an Fehlstellen (z. B. Versetzungen und Korngrenzen) im

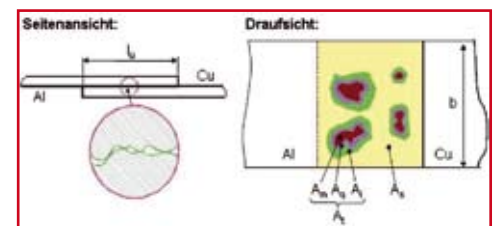
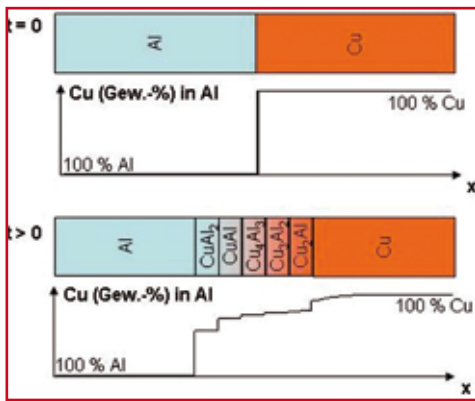


Bild 1: Verbindungsflächen einer Stromschienenverbindung [1]



**Bild 2: Schematische Darstellung der Phasenbildung im System Al-Cu**

Metall [4]. Grundsätzlich laufen beide Prozesse parallel ab, jedoch dominiert die Grenzflächendiffusion bei den relativ niedrigen Temperaturen (Grenztemperatur:  $\vartheta_{Gr} \approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) im Bereich der Elektroenergietechnik [5]. Durch die Diffusion der Atome entstehen bei vielen Metallpaarungen an ihren Berührungspunkten intermetallische Phasen. In Bild 2 sind schematisch die intermetallischen Phasen dargestellt, die im System Al-Cu entstehen. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  haben beide Metalle an der Übergangsfläche 100 %. Abhängig von der Zeit und der Temperatur erfolgt die Diffusion der Atome ins jeweils andere Metall. Intermetallische Phasen sind in der Regel härter und spröder als die Metalle selbst (Tabelle 1). Bilden sie sich direkt im Mikrokontakt, kann es bei Versatzbewegungen zu einem Aufbrechen der Kontakte kommen. Außerdem haben die intermetallischen Phasen einen höheren spezifischen elektrischen Widerstand als

die eigentlichen Metalle, was auch zu einem höheren Verbindungswiderstand führt [5]. In Tabelle 1 sind die Härte und der spezifische elektrische Widerstand der intermetallischen Phasen im Vergleich zu den beiden Metallen Aluminium und Kupfer gegenübergestellt.

Es müssen nicht immer alle in einem System möglichen intermetallischen Phasen entstehen. Das ist z. B. abhängig von der Zeit, der Temperatur, der Aktivierungsenergie oder der Atommenge.

Die Dicke einer intermetallischen Phase und somit deren Wachstum hängt vom Interdiffusionskoeffizienten ab, der für jede Phase unterschiedlich ist. Dieser ist auch stark temperaturabhängig, so dass bei hohen Temperaturen die Interdiffusion schneller abläuft und damit die intermetallischen Phasen schneller wachsen. Je dicker eine intermetallische Phase ist, desto größer ist ihr Einfluss auf den Verbindungswiderstand [6].

### Reibkorrosion (Fretting)

Die beispielsweise durch mechanische Erschütterungen oder unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der verbundenen Leiter verursachten wiederholten Versatzbewegungen können die Mikrokontakte in elektrischen Verbindungen zerstören. Der durch die Versatzbewegungen entstehende Abrieb, bestehend aus Oxidpartikeln und/ oder aus Bruchstücken von intermetallischen Phasen, dringt in die wahre Kontaktfläche ein und verkleinert diese.

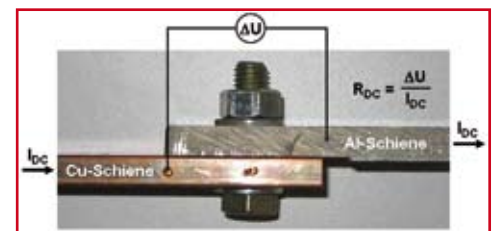
Phase	Cu in Gew.-%	Al in Gew.-%	Chemische Zusammensetzung	Härte in $\text{kg/mm}^2$	spez. el. Widerstand in $\mu\Omega \text{ cm}$
Cu	100	0	Cu	42	1,75
$\chi_2$	80	20	$\text{Cu}_2\text{Al}$	35	14,2
$\delta$	78	22	$\text{Cu}_3\text{Al}_2$	180	13,4
$\xi_2$	75	25	$\text{Cu}_4\text{Al}_3$	624	12,2
$\eta_2$	70	30	$\text{CuAl}$	648	11,4
$\theta$	55	45	$\text{CuAl}_2$	413	8,0
Al	0	100	Al	38	2,9

**Tabelle 1: Intermetallische Phasen und deren physikalische Eigenschaften im Al-Cu-System [5]**

Der Verbindungswiderstand kann durch das Aufbrechen der Mikrokontakte um einige Größenordnungen zunehmen [3], [7].

### Untersuchungen an unbeschichteten Al/Cu-Stromschienen

Das Langzeitverhalten von Al/Cu-Verbindungen wurde an Stromschienenverbindungen mit einer scheinbaren Kontaktfläche von  $(50 \times 50) \text{ mm}^2$  untersucht. Der elektrische Widerstand wurde dabei mit einem Mikroohmmeter in regelmäßigen Zeitabständen gemessen. Die Leiter wurden mit einer Schraube (M12) mit einem Anzugsmoment von 60 Nm verspannt (Bild 3).

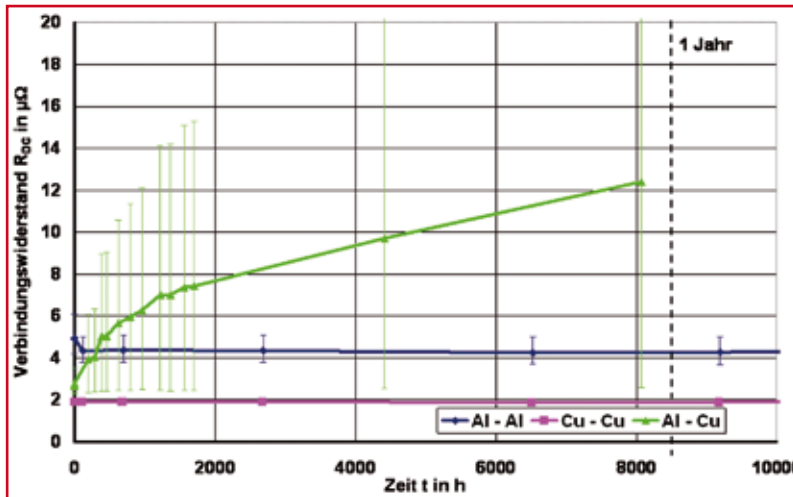


**Bild 3: Messung des elektrischen Widerstandes einer geschraubten Al/Cu-Stromschienenverbindung ( $R_{dc}$  – Gleichstromwiderstand)**

Die Verbindungsflächen wurden vor der Montage mit Spiritus gereinigt und mit einer sauberen und fettfreien Drahtbürste bearbeitet, um die Oberflächenrauigkeit zu erhöhen und um die Oxidschichten zu entfernen. Um eine höhere statistische Sicherheit zu erreichen, wurde jeder Versuch aus sechs bis zehn gleichen Verbindungen aufgebaut.

Die Erwärmung der Verbindungen erfolgt entweder in einem Wärmeschrank oder durch den elektrischen Strom (AC). Die Verbindungen wurden jeweils bei einer Temperatur von  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  gealtert.

Zum Messen des elektrischen Widerstandes wurden die Verbindungen auf Raumtemperatur abgekühlt. Durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Kupfer kann es bei der Abkühlung bzw. Erwärmung in der Verbindung zu einer Verschiebung



**Bild 4: Verlauf der Verbindungswiderstände  $R_{dc}$  von unbeschichteten Stromschienenverbindungen bei einer Auslagerungstemperatur von 140 °C**

in den Mikrokontakten kommen, die z. B. Reibkorrosion unterstützt oder ermöglicht.

Zum Vergleich wurden zusätzlich zu den Al/Cu-Verbindungen auch Al/Al- und Cu/Cu-Stromschienenverbindungen untersucht (Bild 4).

Die Verbindungswiderstände der Al/Al- und Cu/Cu-Stromschienenverbindungen bleiben bei einer Versuchsdauer von einem Jahr konstant. Die Spannweiten bei den gemessenen Verbindungswiderständen zu einem Messzeitpunkt sind sehr gering. Die Cu/Cu-Verbindungen haben durch den geringeren spezifischen elektrischen Widerstand des Kupfers ( $\rho_{Al(Leg)} = 0,03951 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ;  $\rho_{Cu} = 0,01768 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) bei gleichem Querschnitt einen kleineren Verbindungswiderstand als die Al/Al-Verbindungen.

Im Vergleich dazu werden die Verbindungswiderstände der Al/Cu-Verbindungen schnell größer und die Spannweite ist bei diesen Verbindungen sehr hoch. Im Mittel hat sich der Verbindungswiderstand bei

Al/Cu-Verbindungen innerhalb eines Jahres verfünffacht. Je größer der Verbindungswiderstand ist, desto größer ist auch die Verlustleistung bzw. die Verbindungstemperatur. Ab einer bestimmten materialabhängigen Temperatur tritt eine Entfestigung der Metalle auf und die Verbindung wird zerstört.

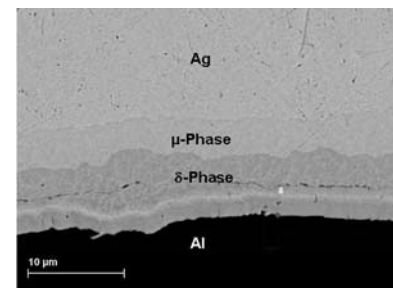
### Untersuchungen an beschichteten Al/Cu-Stromschienen

In den Anlagen der Elektroenergie-technik kann man nicht grundsätzlich auf Al/Cu-Verbindungen verzichten. Um diese Verbindungen langzeitstabil zu gestalten, werden die Kontaktflächen in der Regel beschichtet. Es gibt viele Beschichtungsmaterialien, wobei Silber und Zinn am häufigsten verwendet werden. Vorteile der Beschichtung sind: Durch eine geringe Härte des Beschichtungsmaterials gegenüber dem Grundmaterial können sich mehr bzw. größere Mikrokontakte ausbilden. Außerdem bilden sich unter normalen Umweltbedingungen dünnere Fremdschichten, die keinen nennenswerten Einfluss auf das Widerstandsverhalten der Verbindungen haben.

Bei Bimetallverbindungen sollten vorzugsweise beide Kontaktpartner gleich beschichtet werden. Grundsätzlich muss auf das physikalische bzw. chemische Verhalten von Beschichtungsmaterial zu Grundmaterial geachtet werden. Zwischen z. B.

Silber und Kupfer entstehen keine intermetallischen Phasen. Diese Materialkombination ist unkritisch und wird deshalb in der Praxis oft eingesetzt. Dagegen entstehen bei der Materialkombination Aluminium und Silber zwei intermetallische Phasen, die einen deutlich höheren spezifischen elektrischen Widerstand als die beiden Grundmaterialien haben (Tabelle 2).

Für weitere Untersuchungen zum Widerstandsverhalten der intermetallischen Phasen wurden Al-Stromschienen galvanisch versilbert und bei 180 °C ausgelagert. Nach 5.500 Stunden wurde ein Querschliff angefertigt und die Probe mittels Rasterelektronenmikroskop analysiert (Bild 5).



**Bild 5: Silberbeschichtete Aluminiumstromschiene mit intermetallischen Phasen nach einer Auslagerung von 5.500 Stunden bei 180 °C**

Wie in der Literatur beschrieben, haben sich beide möglichen intermetallischen Phasen gebildet, deren Dicken mehrere Mikrometer betragen.

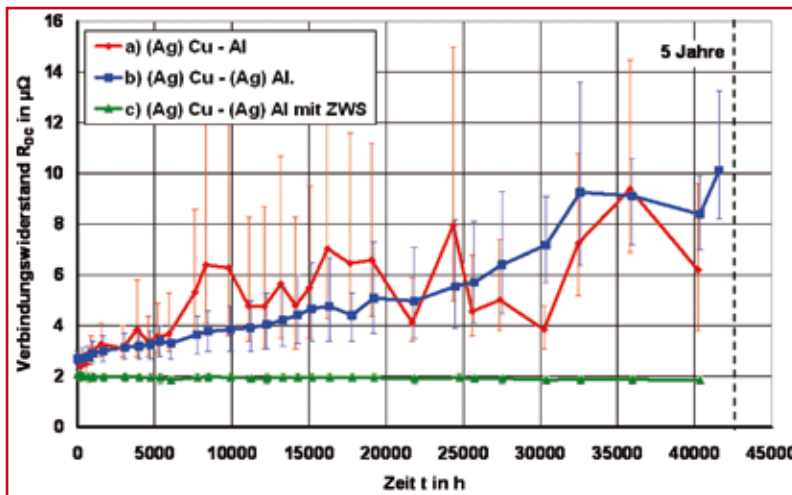
Entstehen bzw. wachsen diese intermetallischen Phasen in die Mikrokontakte hinein, kann das einen großen Einfluss auf den elektrischen Verbindungswiderstand haben.

Um im System Ag-Al die Interdiffusion zu unterbinden, müssen Diffusionssperren in Form von Zwischenschichten (ZWS) eingebracht werden. Diese Zwischenschichten (z. B. Nickel) verhindern den Atomaustausch zwischen Aluminium und Silber. Oft reicht es aus, wenn die Zwischenschichten nur wenige Mikrometer dick sind.

Zur Untersuchung des elektrischen Widerstandes von Verbindungen mit beschichteten Kontaktflächen wurden ebenfalls Stromschienenver-

Phase	Al in Gew.-%	Ag in Gew.-%	spez. el. Widerstand in $\mu\Omega \text{ cm}$
Al	100	0	2,9
$\delta$	11-15	85-89	28
$\mu$	8	92	39
Ag	0	100	1,6

**Tabelle 2: Intermetallische Phasen im Ag-Al-System [8]**



**Bild 6: Verlauf der Verbindungswiderstände  $R_{dc}$  von verschieden beschichteten Stromschienenverbindungen bei einer Auslagerungstemperatur von 105 °C [9] und 140 °C**

bindungen verwendet. Die Versuche wurden analog zu den unbeschichteten Stromschienenverbindungen aufgebaut.

Folgende Materialkombinationen wurden untersucht:

- a) versilbertes Kupfer – Aluminium,
- b) versilbertes Kupfer – versilbertes Aluminium,
- c) versilbertes Kupfer – versilbertes Aluminium mit Zwischenschichten.

Die Verbindungen wurden bis 25.000 Stunden bei 105 °C und danach bei 140 °C im Wärmeschrank gelagert. Wird keine Zwischenschicht eingesetzt und damit das Silber direkt mit dem Aluminium kontaktiert (Fall a und b), ist ein schneller und großer Anstieg und eine große Spannweite der Einzelwerte der gemessenen Widerstände zu beobachten (Bild 6). Wird hingegen eine Zwischenschicht verwendet (Fall c), bleibt der Verbindungswiderstand konstant, da die Zwischenschicht vermutlich als Diffusionssperre wirkt und sich dadurch keine intermetallischen Phasen zwischen dem Aluminium und dem Silber bilden können.

### Zusammenfassung

Bei der elektrischen Energieübertragung vom Erzeuger zum Verbraucher sind elektrische Verbindungen unvermeidbar. Ein Teil der Verbindungen sind Al-Cu-Verbindungen, deren Le-

bensdauer bei unbeschichteten Kontaktflächen viel geringer ist als z. B. bei Al-Al- oder Cu-Cu-Verbindungen. Die Ursache für die schnelle Alterung bei Bimetallverbindungen liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Bildung von intermetallischen Phasen im Mikrokontaktbereich. Zusätzlich kann es durch das Hineinwachsen von Fremdschichten in den Mikrokontakt und durch Versatzbewegungen der Leiter zu einem auch sprunghaften Widerstandsanstieg kommen.

Damit die geforderte Lebensdauer der Betriebsmittel erreicht wird, werden die Kontaktflächen beschichtet. Bei beidseitiger Beschichtung mit dem gleichen Material können keine intermetallischen Phasen direkt im Mikrokontakt entstehen. Mit geeigneten Zwischenschichten kann auch die Bildung von intermetallischen Phasen zwischen dem Grundmetall und der Beschichtung verhindert werden.

Durch die meist weicheren Beschichtungsmaterialien können die Mikrokontakte bei Versatzbewegungen nicht so schnell aufbrechen. Außerdem haben die Fremdschichten, die z. B. auf silberbeschichteten Kontaktflächen entstehen, einen geringeren Einfluss auf das Widerstandsverhalten der gesamten Verbindung, als die Fremdschichten, die sich auf Al- bzw. Cu-Kontaktflächen bilden.

Werden bei Al/Cu-Verbindungen die Kontaktflächen beschichtet, können auch bei hoher Beanspruchung lang-

zeitstabile Verbindungen erreicht werden.

### Literatur

- [1] Bergmann, R.: Zum Langzeitverhalten des Widerstands elektrischer Stromschienenverbindungen; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr.195; Düsseldorf: VDI Verlag 1996
- [2] Holm, R.: Electric Contacts, Theory and Applications; Reprint of the fourth completely rewritten edition 1967, 3rd printing 2000; Springer Verlag
- [3] Schoft, S.: Langzeitverhalten elektrischer Verbindungen unter Berücksichtigung des Kriechens der Leitermaterialien; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 21 Nr. 381; Düsseldorf: VDI Verlag 2008
- [4] Schatt, W.; Horch, H.: Werkstoffwissenschaften; 8 Auflage; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Stuttgart; 1996
- [5] Braunovic, M.; Konchits, V.; Myshkin, N.: Electrical Contacts, Fundamentals, Applications and Technology; CRC Press Taylor & Francis Group; Boca Raton, London, New York
- [6] Schneider, R.; Löbl H.; Großmann S.; Chartouni D.; Schoenemann T.: The effect of Interdiffusion on the long term behaviour of Bimetal Joints; 24th Conference on Electrical Contacts 2008, Saint Malo, pp. 222-227
- [7] Slade, P.G. (Editor): Electrical Contacts, Principles and Applications; CRC Press Taylor & Francis Group; Boca Raton, London, New York, 1999
- [8] Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik; 6 Auflage; Band II Teil 6 (Elektrische Eigenschaften); Berlin, Göttingen, Heidelberg; Springer Verlag; 1957
- [9] Jochim, M.: Langzeitverhalten nicht lösbarer, beschichteter Verbindungen in der Elektroenergie-technik; Fortschr.-Ber. VDI Reihe 6 Nr. 567; Düsseldorf: VDI Verlag 2007

- (1) Ronny Schneider, Helmut Löbl, Steffen Großmann, Technische Universität Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik
- (2) Thomas Schoenemann, ABB Schweiz AG, High Voltage Products
- (3) Markus Hoidis, ABB Schweiz AG, Corporate Research

**M**ETALL-Mini-Abos für Einsteiger!

Abos-Hotline:

05 11/73 04-125