

# Restnutzungsdauer – Diagnose von elektrischen Verbindungen

Dirk Fricke • Ralf-Dieter Rogler • Helmut Löbl

**Anders als bei bisherigen Infrarot-Diagnoseverfahren, die ausschließlich die Verbindungsübertemperatur zur Bewertung der elektrischen Verbindungen benutzen, ist es mit Hilfe moderner Infrarotmesstechnik möglich, die Übertemperaturen der Verbindungen ohne Unterbrechung der Energieversorgung zu messen. Das patentierte Relite-Verfahren erlaubt mit Hilfe eines Wärmenetzes und des Alterungsmodells, die Restnutzungsdauer einer Verbindung aus deren Übertemperatur zu bestimmen.**

An elektrotechnischen Anlagen und Geräten dürfen vorgegebene Grenztemperaturen während der gesamten Betriebsdauer nicht überschritten werden. Die elektrischen Widerstände der Verbindungen nehmen während der Betriebszeit zu – die Verbindungen altern. Die Verbindungen erwärmen sich durch die zunehmenden Verlustleistungen immer stärker. Werden die Anlagen über viele Jahre ohne Inspektionen betrieben, können an den stromdurchflossenen Verbindungen Temperaturen auftreten, die einen zuverlässigen Betrieb der Anlage gefährden. Die Energieversorgungsunternehmen wollen jedoch uneingeschränkt Elektroenergie liefern und ungewollte Unterbrechungen des Elektroenergie-transportes ausschließen. Deshalb müssen die Anlagen regelmäßig inspiziert und ggf. gewartet werden.

ditionen Temperaturen auftreten, die einen zuverlässigen Betrieb der Anlage gefährden. Die Energieversorgungsunternehmen wollen jedoch uneingeschränkt Elektroenergie liefern und ungewollte Unterbrechungen des Elektroenergie-transportes ausschließen. Deshalb müssen die Anlagen regelmäßig inspiziert und ggf. gewartet werden.

## Übertemperaturen unterbrechungsfrei messen

Mit Hilfe der Infrarot-Messtechnik ist es möglich, die Übertemperaturen der Verbindungen ohne Unterbrechung der Elektroenergieversorgung zu messen. Aus der Übertemperatur der Verbindung können der Verbindungswiderstand und die Restnutzungsdauer nicht bestimmt werden, wenn wichtige Umgebungseinflüsse, die Geometrie der Verbindung und die Alterungsgeschwindigkeit – abhängig vom Belastungsstrom – unberücksichtigt bleiben. Das bisherige Infrarot-Diagnoseverfahren verwendet ausschließlich die Verbindungsübertemperatur zur Bewertung der elektrischen Verbindungen. Die Methode ist für eine langfristige zustandsabhängige Instandhaltungsstrategie nicht anwendbar.

## Lösung: Verbindung bewerten und Restnutzungsdauer ermitteln

Die entscheidende messbare Größe an einer unter Spannung stehenden elektrischen Verbindung ist deren Temperatur. Sie wird von der Verlustleistung und dem Wärmeübertragungs- und -speicherungsvermögen der Verbindung bestimmt.

Der Alterungszustand der Verbindung wird bewertet, indem aus der Verbindungsübertemperatur der Verbindungswiderstand und daraus die Restnutzungsdauer der Verbindung ermittelt werden.

Eine bewährte Methode, den Widerstand aus der Verbindungsübertemperatur zu bestimmen, ist die thermische Abbildung der Verbindung in einem Wärmenetz.

Aufgrund der Analogie zwischen dem thermischen und dem elektrischen Strömungsfeld können thermische Vorgänge mit Wärmenetzen, bestehend aus Leistungsquellen, Wärmewiderständen und Wärmekapazitäten, beschrieben werden [1]. Mit dem Netzwerk wird der Verbindungswiderstand  $R_V$  aus den Verläufen sowie den Verteilungen der Wärmeströme und der Temperaturen berechnet. Das dimensionslose Verhältnis von Verbindungswiderstand und Widerstand eines gleich langen Leiterabschnitts ist der Gütefaktor  $k_u$ . Er wird zur allgemeingültigen

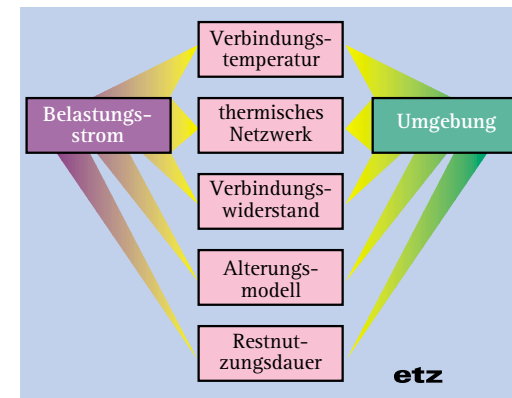


Bild 1. Die Relite-Methode

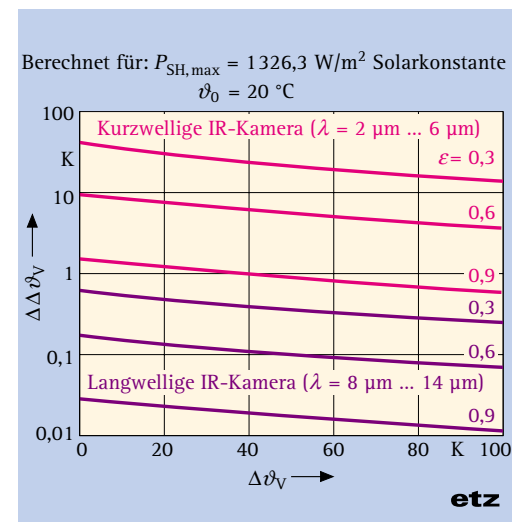
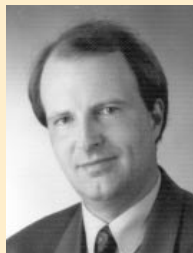


Bild 2. Messfehler abhängig von der Sonnen- und Himmelsstrahlung

Dr.-Ing. Ralf-Dieter Rogler (35), VDE, wurde an der TU Dresden promoviert. Er ist seit drei Jahren selbstständig im Ingenieurbüro Theta auf den Fachgebieten Infrarotdiagnose an Verbindungen und Erwärmungsberechnung elektrotechnischer Geräte tätig.  
E-Mail: info@theta-dresden.de, www.theta-dresden.de

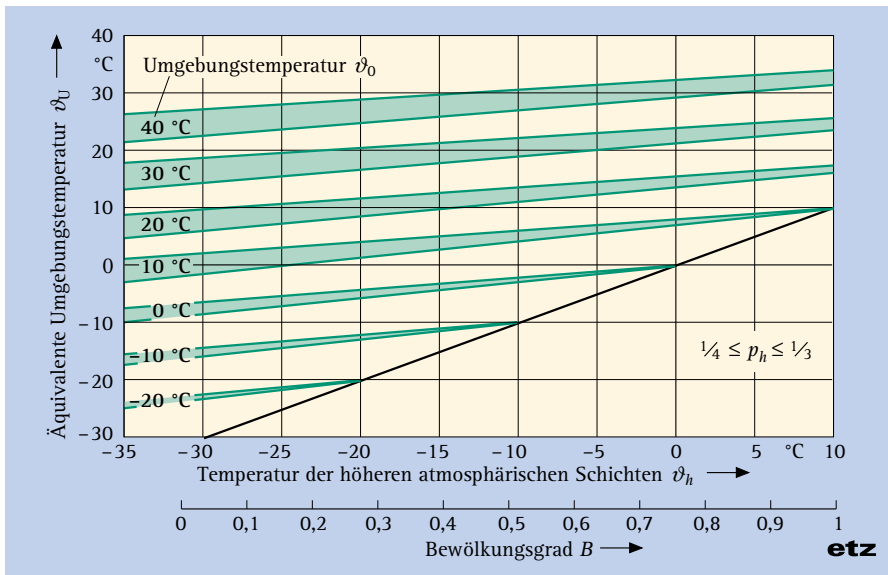


Dipl.-Ing. Dirk Fricke (37) hat Elektrotechnik im Schwerpunkt Elektrische Energietechnik an der Universität Hannover studiert. Er ist Ingenieur bei der Siemens AG in Erlangen und dort im Bereich I&S zuständig für den Bereich Messverfahren zur Zustandsermittlung von Energieverteilungsanlagen.  
E-Mail: dirk.fricke@siemens.com



Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Helmut Löbl (57), VDE, ist seit 1968 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberassistent am Institut für Hochspannungs- und Hochstromtechnik der TU Dresden. Schwerpunkte seiner Arbeit sind die Stromtragfähigkeit und Erwärmung elektrotechnischer Geräte und Anlagen und das Langzeitverhalten elektrischer Verbindungen der Elektroenergietechnik.  
E-Mail: loeb1@ehhn1.et.tu-dresden.de





**Bild 3.** Äquivalente Umgebungstemperatur – abhängig von der Bewölkung

Beschreibung des Zustands einer Verbindung verwendet.

Aus Langzeituntersuchungen ist bekannt, dass die Alterung von z. B. Stromschienenverbindungen bei Temperaturen  $< 70\text{ °C}$  bis  $100\text{ °C}$  wesentlich durch chemische Reaktionen zwischen dem Leitermaterial und der Umgebung bestimmt werden [2]. Es ist möglich, diese Alterung mit den Grundlagen der Reaktionskinetik zu beschreiben und den Verlauf des Gütefaktors der Verbindung zu extrapolieren. Dabei werden das Leitermaterial, die Konstruktion und die bisherige Strombelastung berücksichtigt. Wird der Grenzgütefaktor erreicht, wird die Verbindung als ausgefallen betrachtet. Die vom Diagnosezeitpunkt bis zu diesem Augenblick verbleibende Zeit wird als Restnutzungsdauer  $\Delta t_R$  bezeichnet. Mit Hilfe des Wärmenetzes und einem Alterungsmodell kann die Restnutzungsdauer einer Verbindung aus deren Übertemperatur bestimmt werden [3–4]. Diese Methode wird als „Relite“ (Residual Life Time) bezeichnet

net (Bild 1). Die Methode wurde an der TU Dresden [5] entwickelt und wird von der Siemens AG [6] als deutsches und europäisches Patent gehalten [7–8].

### Temperaturmessung mit der Infrarot-Kamera

Werden die Messfehler einer Infrarot-Kamera minimiert bzw. kompensiert, kann die Übertemperatur der Verbindung auf  $\Delta\Delta\vartheta_V < 3\text{ K}$  berührungslos bestimmt werden.

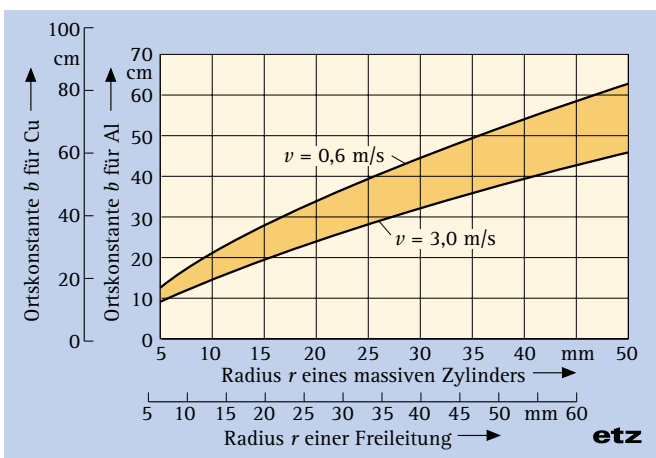
In der Hochspannungstechnik muss eine hochauflösende Infrarot-Kamera mit einem thermischen Öffnungswinkel von  $\alpha_\vartheta < 4,5\text{ mrad}$  verwendet werden, um bei Entfernungen von  $l \approx 10\text{ m}$  zwischen der Kamera und der Verbindung die Verbindungstemperatur mit der vorgegebenen Genauigkeit messen zu können.

Die Verbindungstemperatur kann nur bestimmt werden, wenn die Emissionszahl  $\varepsilon$  der Oberfläche der Verbindung bekannt ist. Dieser Wert kann für die unterschiedlichen Materialien aus Tabellen

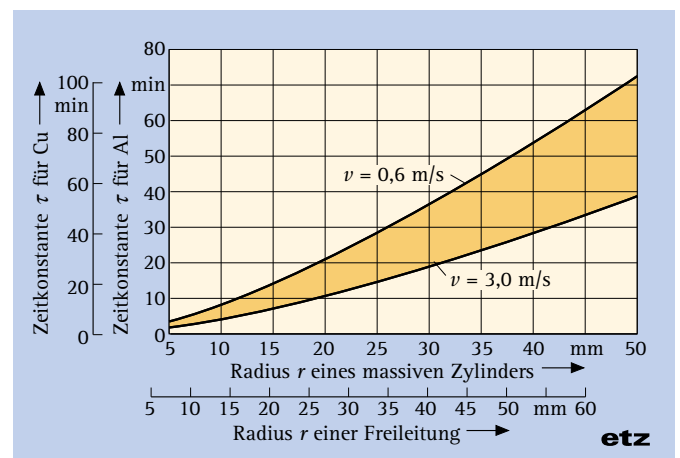
entnommen oder für oxidierte Aluminiumoberflächen aus der Betriebszeit der Verbindung bestimmt werden [9].

Um den Einfluss der umgebenden Atmosphäre auf die Messung der Temperatur zu minimieren, messen die Detektoren der Infrarot-Kameras die empfangene Strahlungsleistung in den Infrarot-Fenstern der Wellenlängen  $\lambda = 2\text{ }\mu\text{m} \dots 6\text{ }\mu\text{m}$  oder  $\lambda = 8\text{ }\mu\text{m} \dots 14\text{ }\mu\text{m}$ , in denen die Atmosphäre für Entfernungen von wenigen 10 m nahezu diatherm ist. Der durch das Infrarot-Fenster einfallende Anteil der Sonnen- und Himmelsstrahlung führt dazu, dass die Kamera eine höhere als die tatsächlich vorhandene Verbindungstemperatur misst. Der Messfehler ist bei kurzwellig arbeitenden Kameras so groß, dass diese bei direkter Sonneneinstrahlung nicht eingesetzt werden können. Für langwellige Kameras ist der Einfluss der Sonnen- und Himmelsstrahlung auf die gemessene Verbindungstemperatur bei Emissionszahlen  $\varepsilon > 0,3$  wegen des deutlich größeren Frequenzabstands zum Sonnenlicht vernachlässigbar klein (Bild 2).

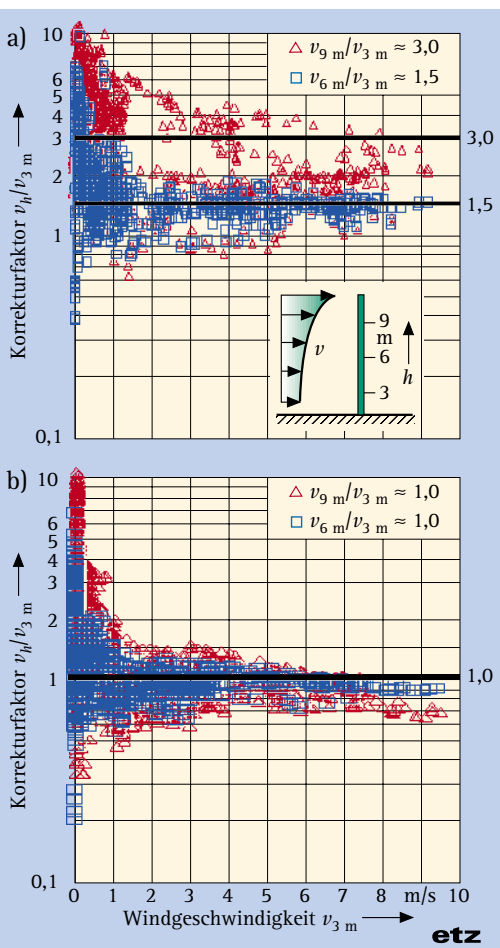
Steht die Verbindung mit unterschiedlich warmen Körpern in der Umgebung im Strahlungsaustausch, muss die bei der Messung wirksame Umgebungstemperatur ermittelt werden, um unzulässige Messfehler bei Verbindungsoberflächen mit kleinen Emissionszahlen  $\varepsilon$  zu vermeiden. Das gilt besonders bei der Diagnose in Freiluftanlagen, da dort der zum Himmel gerichtete Teil der Verbindung die Strahlung des deutlich kühleren Himmels reflektiert. Die äquivalente Umgebungstemperatur  $\vartheta_{\text{U}}$  ergibt sich aus der Umgebungstemperatur  $\vartheta_0$ , der Temperatur der höheren Luftschichten von  $\vartheta_{\text{h}} = -40\text{ °C} \dots 10\text{ °C}$ , die abhängig vom Bewölkungsgrad  $B$  ist, und dem Anteil der Verbindungsoberfläche  $p_h$ , in dem sich die höheren atmosphärischen Schichten reflektieren. Wird die Messung nicht mit



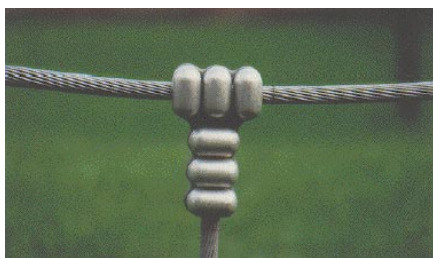
**Bild 4.** Ortskonstante



**Bild 5.** Zeitkonstante



**Bild 6.** Windgeschwindigkeit abhängig vom Aufstellungsort  
 a) Windoffene Aufstellung  
 b) Windgeschützte Aufstellung



**Bild 7.** T-Abzweigklemme

der äquivalenten Umgebungstemperatur  $\vartheta_u$ , sondern mit der Umgebungstemperatur  $\vartheta_0$  durchgeführt, ist die gemessene Temperatur der Verbindung kleiner als die tatsächliche (Bild 3), da die höheren atmosphärischen Schichten in der Regel kälter als die direkte Umgebung sind.

### Widerstandsbestimmung mit dem Wärmenetz

Der Gütefaktor der Verbindung wird mit dem Wärmenetz abhängig vom Belastungsstrom, von der Umwelt und der Konstruktion der Verbindung berechnet.

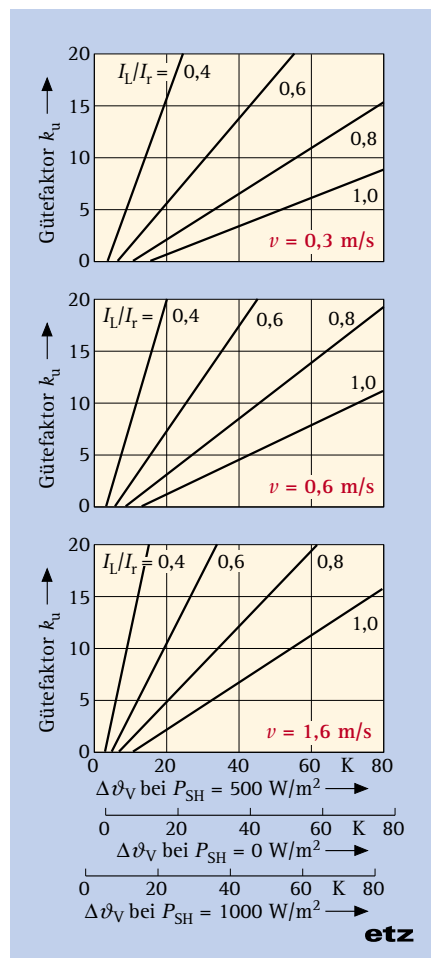
Die Verbindung sowie die angeschlossenen Leiter und Geräte werden in Ab-

schnitte unterteilt, für die die Stromwärmeverluste, die Leistung der Sonnen- und Himmelsstrahlung, die Wärmewiderstände durch Leitung, Strahlung und Konvektion sowie das Wärmespeichervermögen bestimmt werden.

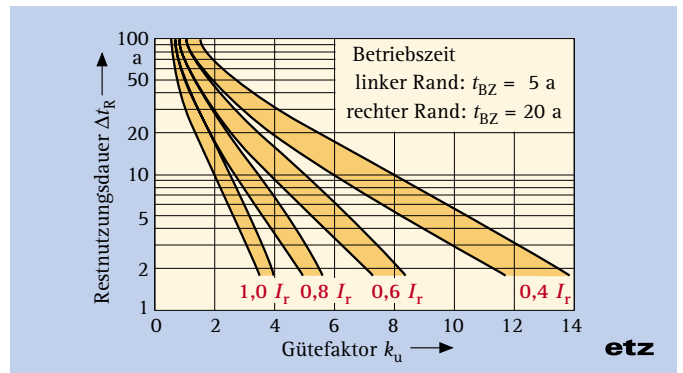
Die Länge der Abschnitte bei kreisrunden Querschnitten der Verbindung und des Leiters wird vom Radius  $r$  des jeweiligen Abschnitts und dem zu erwartenden axialen Temperaturgradienten bestimmt. Die Länge beträgt entlang der Verbindung und für den ersten Abschnitt des Leiterseils neben der Verbindung  $l_1 \approx r$ . Die Abschnittslänge  $l_n = f(n)$  kann mit größerer Entfernung von der Inhomogenität, d. h. von der Verbindung, immer größer gewählt werden.

Mit Hilfe der Ortskonstante  $b$  (Bild 4) wird entschieden, wie weit die an die Verbindung angeschlossenen Leiter und Geräte nachgebildet werden müssen, um deren Einfluss auf die Temperatur der Verbindung zu berücksichtigen. Die Nachbildung geschieht über eine Gesamtlänge der dreifachen Ortskonstante der angeschlossenen Leiter und Geräte.

Die Zeitkonstante  $\tau$  wurde für Leiter und Verbindungen berechnet. Sie ist ein



**Bild 8.** Bestimmung des Gütefaktors aus der Verbindungsübertemperatur

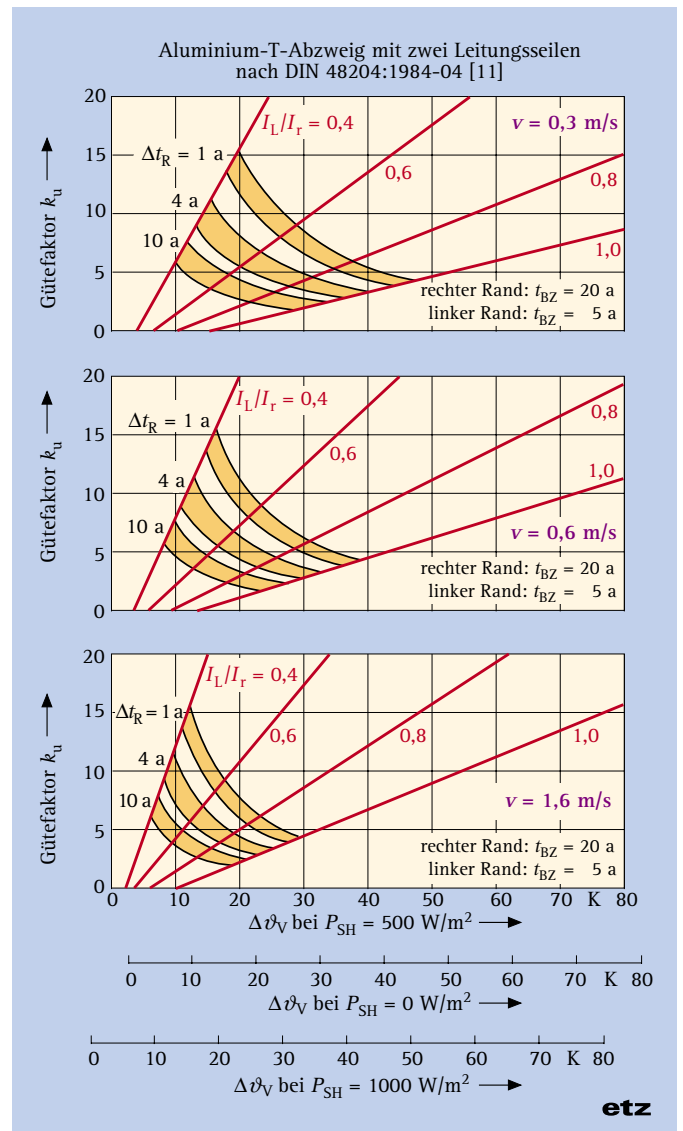


**Bild 9.** Bestimmung der Restnutzungsdauer aus dem Gütefaktor für Al-Al-Verbindungen

Maß für die Zeitverzögerung zwischen der Belastungs- und der Temperaturänderung (Bild 5).

Der Fehler bei der Bestimmung des Gütefaktors wird im Wesentlichen von denjenigen

Fehlern bestimmt, die bei der Messung der Verbindungsübertemperatur  $\Delta\vartheta_V$ , des Belastungsstroms  $I_L$ , der Windgeschwindigkeit  $v$  sowie der Sonnen- und Himmelsstrahlung  $P_{SH}$  auftreten.



**Bild 10.** Bestimmung der Restnutzungsdauer aus der Verbindungsübertemperatur

## Formelzeichen

$\alpha_{\vartheta}$	thermischer Öffnungswinkel
$A_V$	Verbindungsfläche
$A_I$	Leiteroberfläche
$B$	Bewölkungsgrad
$b$	Ortskonstante
$\Delta t_R$	Restnutzungsdauer
$\Delta \vartheta$	Übertemperatur
$\Delta \vartheta_V$	Übertemperatur der Verbindung
$\Delta \Delta \vartheta_V$	Messfehler Übertemperatur der Verbindung
$\varepsilon$	Emissionszahl
$k_u$	Gütefaktor
$l$	Entfernung
$l_1$	erster Abschnitt des Leiterseils neben der Verbindung
$I_L$	momentaner Belastungsstrom
$I_r$	Bemessungsstrom
$\lambda$	Wellenlänge
$\rho_h$	Anteil der Verbindungsfläche, der den höheren atmosphärischen Schichten zugewandt ist
$P_{SH}$	Leistung der Sonnen- und Himmelsstrahlung
$r$	Radius
$r_a$	Engstellenradius
$R_V$	Verbindungswiderstand
$S$	Lastwechsel
$s_F$	Fremdschichtdicke
$t_{BZ}$	Betriebszeit
$\tau$	Zeitkonstante
$\vartheta_0$	Umgebungstemperatur
$\vartheta_h$	Temperatur der höheren Luftschichten
$\vartheta_U$	äquivalente Umgebungstemperatur
$v$	Windgeschwindigkeit

Die mittleren Belastungsströme in den Netzen der Hochspannungstechnik betragen in der Vergangenheit ca. 30 % der Bemessungsströme der installierten Leiter. Bei der Infrarot-Diagnose muss die Belastung aber mindestens 35 % des Bemessungsstroms  $I_r$  der Leiter betragen, um die Übertemperaturen der Verbindungen aussagefähig bewerten zu können.

Abhängig von der zeitlichen Änderung des Belastungsstroms  $I_L$  folgt die Verbindungstemperatur der Strom- und Umweltbelastung quasistatisch oder dynamisch. Der theoretische Wert des Übergangs vom quasistatischen in den dynamischen Belastungsfall liegt bei

$$|S_{zul}| = 0,0033 \cdot \frac{\Delta I_L}{\Delta t} \cdot \frac{1}{I_r}$$

Die in Hochspannungsnetzen pro Minute auftretenden mittleren Lastwechsel betragen

$$|S| = 0,004 \cdot \frac{\Delta I_L}{\Delta t} \cdot \frac{1}{I_r}$$

und die Tageshöchstwerte

$$|S_{zul}| = 0,034 \cdot \frac{\Delta I_L}{\Delta t} \cdot \frac{1}{I_r}$$

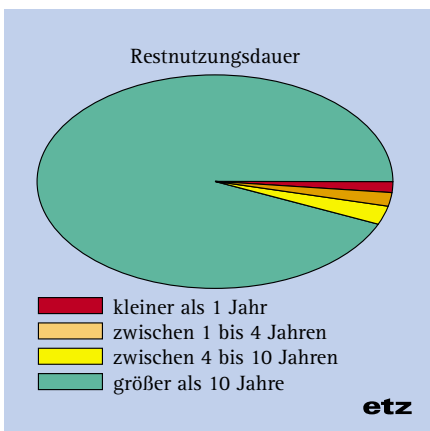
Bei der Messung in Umspannwerken und an Freileitungen ist die Windgeschwindigkeit in der Höhe der Verbindungen nicht immer messbar. Es wurde deshalb ein Zusammenhang erarbeitet,

mit dem die Windgeschwindigkeit  $v$  an den Verbindungen aus der gemessenen Windgeschwindigkeit in einer niedrigeren Höhe berechnet werden kann (Bild 6).

Bei geometrisch ähnlichen Verbindungen mit einem konstanten Verhältnis der Oberflächen von Verbindung und gleichlangem Leiter  $A_V/A_I = \text{const.}$  sind bei statischer Belastung und gleichen Übertemperaturen die Gütefaktoren näherungsweise auch gleich groß. Deshalb können die an einer Bauart gewonnenen Zusammenhänge zwischen der Übertemperatur


**Bild 11.** Messsystem im Einsatz

und dem Gütefaktor der Verbindung auf geometrisch ähnliche Verbindungen übertragen werden. An dem Beispiel T-Abzweigklemme (Ribe 702 107, Fa. Richard Bergner Elektroarmaturen, Schwabach [10], Bild 7) wurde das dynamische Wärmenetz entwickelt und geprüft. Mit dem statischen Wärmenetz wurde mit den Vereinfachungen bezogener Belastungsstrom  $I_L/I_r = 0,4 \dots 1,0$ ; Windgeschwindigkeit  $v = 0,3 \text{ m/s} \dots 1,6 \text{ m/s}$  sowie Sonnen- und Himmelsstrahlung  $P_{SH} = 0 \text{ W/m}^2 \dots 1000 \text{ W/m}^2$  der Zusammenhang zwischen der Übertemperatur der Verbindung und dem Gütefaktor berechnet (Bild 8).


**Bild 12.** Bewertung von Al-Al-Schraubverbindungen

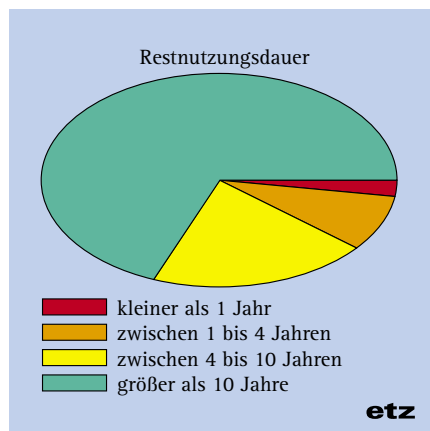
### Bestimmung der Restnutzungsdauer von Verbindungen

Mit dem Alterungsmodell für Verbindungen [2] wird die Restnutzungsdauer abhängig vom diagnostizierten Gütefaktor berechnet. Dabei werden die Betriebszeit, die Materialpaarung und der Aufbau der Verbindung sowie der bisherige und zukünftige Belastungsstrom berücksichtigt.

Die Verbindungen tragen den Strom nicht gleichmäßig über die scheinbare Kontaktfläche verteilt. Nur ein geringer Anteil dieser Fläche, die so genannte wahre Kontaktfläche, ist am Stromübergang beteiligt. An den Engstellen schnüren sich die Stromlinien ein; es entstehen Mikrokontakte. Der zusätzliche Widerstand, der sich aus der Einschnürung ergibt, wird als Engwiderstand bezeichnet.

Die Kontaktflächen bedecken sich nach der Reinigung durch Bürsten oder Schleifen innerhalb weniger Sekunden mit einer einige Ångström dicken Fremdschicht, die die Engstellentemperatur stark beeinflusst. Die Dicke der Fremdschicht zwischen den wahren Kontaktflächen ist nahezu unabhängig von der Kontaktkraft der Verbindung und dem Engstellenradius der wahren Kontaktflächen.

Verbindungen altern zuerst dadurch, dass der Radius  $r_a$  immer kleiner und der Gütefaktor  $k_u$  größer werden. Mit zunehmendem Alter wachsen an den wahren Kontaktflächen die quasimetallischen durchgehenden Fremdschichten bis auf eine Dicke von  $s_F < 100 \text{ Å}$  an. Der Güte-


**Bild 13.** Bewertung von Al-Cu-Anschlüssen

faktor  $k_u$  nimmt zu, bis die Verbindung die Grenztemperatur erreicht und ausfällt.

Für Al-Al- und Al-Cu-Verbindungen sind die Parameter der Alterungsgleichung zur Berechnung des Verlaufs des Verbindungswiderstands bekannt. Die Alterungsgleichung wird beispielhaft für T-Abzweigklemmen, die in der energetischen Elektrotechnik eingesetzt werden, berechnet. Die Restnutzungsdauer  $\Delta t_R$  ergibt sich aus der Zeit bis zum Erreichen des Grenzgütefaktors. Die Restnutzungsdauer  $\Delta t_R$  wird für die Kontaktpaarung Al-Al und Al-Cu abhängig vom bezogenen Belastungsstrom  $I_L/I_r = 0,4 \dots 1,0$  und von der Betriebszeit der Verbindung  $t_{BZ} = 5 \text{ a} \dots 20 \text{ a}$  berechnet.

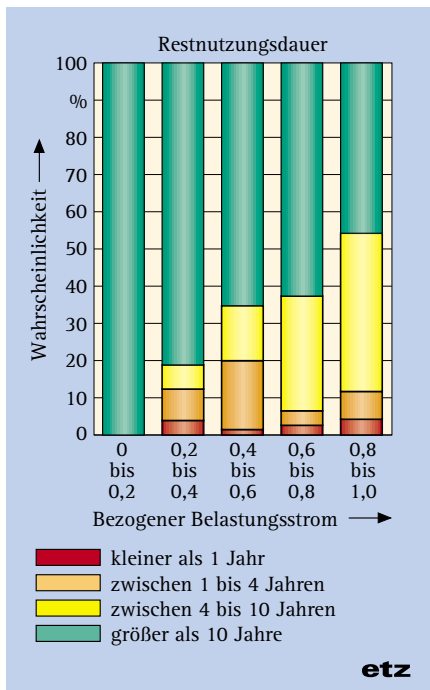
Es zeigt sich, dass Al-Al-Verbindungen selbst bei Belastung mit dem Bemessungsstrom der Leiterseite über Jahrzehnte betrieben werden können (Bild 9). Al-Cu-Verbindungen sind nur mit Belastungsströmen  $< 60 \%$  des Bemessungsstroms der angeschlossenen Leiter mehrere Jahrzehnte langzeitstabil.

### Beispiel für ein Relite-Bewertungsdiagramm

Die Restnutzungsdauer der Verbindungen wird aus der gemessenen Übertemperatur nach dem beschriebenen Verfahren bestimmt. Dabei werden der Gütefaktor mit dem Wärmenetzmodell und die Restnutzungsdauer mit dem Alterungsmodell berechnet. Unter Beachtung der Randbedingungen:

- bezogener Belastungsstrom  $I_L/I_r = 0,4 \dots 1,0$ ,
- Windgeschwindigkeit  $v = 0,3 \text{ m/s} \dots 1,6 \text{ m/s}$ ,


**Bild 14.** Bewertung von versilberten Trennschalterkontakten



**Bild 15.** Wahrscheinlichkeit der Restnutzungsdauergruppen abhängig vom bezogenen Belastungsstrom

- Sonnen- und Himmelsstrahlung  
 $P_{SH} = 0 \text{ W/m}^2 \dots 1000 \text{ W/m}^2$ ,
- Betriebszeit der Verbindung  
 $t_{BZ} = 5 \text{ a} \dots 20 \text{ a}$ ,
- Kontaktpaarung Al-Al,
- Restnutzungsdauer von  $\Delta t_R = 1 \text{ a} \dots 10 \text{ a}$ , wurde für die T-Abzweigklemme Ribe 702 107 (Bild 10 u. 11) das entsprechende Relite-Bewertungsdiagramm erarbeitet. Weiterhin stehen für Kontaktsysteme und Geräteanschlüsse an Trennschaltern, für Kerb-, Pressverbinder und Schalenstromklemmen sowie Geräteanschlüsse an Durchführungen von Transformatoren im Bereich von Mittel- und Hochspannungsanlagen anwendungsbereite Relite-Diagramme zur Verfügung.

### Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ausführungen sollen mit den aus einer praktischen Aufgabe gezogenen Schlussfolgerungen abgeschlossen werden. Es wurden ca. 700 elektrische Verbindungen und Kontakte in einer 6-kV-Innenraumstation einer Chemiefabrik untersucht. Das Dreifach-Sammelschienensystem mit ca. 30 Zu- und Abgängen war bereits über 20 Jahre im Einsatz. Die Abgänge bestanden im Wesentlichen aus  $800 \text{ mm}^2$  und  $2400 \text{ mm}^2$  Aluminiumstromschiene.

Für jede einzelne Verbindung, bzw. jeden einzelnen Kontakt wurde aus der Umgebungstemperatur  $\vartheta_0$ , dem momentanen und dem zu erwartenden Belastungsstrom  $I_L$  und der mit einer Infrarot-

Kamera gemessenen Übertemperatur  $\Delta\vartheta$  die Restnutzungsdauer bestimmt.

Die Umweltparameter Windgeschwindigkeit und Sonnen- und Himmelsstrahlung konnten zu Null angenommen werden. Zur übersichtlichen Bewertung wurden insgesamt vier Alterungsklassen definiert:

- Restnutzungsdauer  $> 10 \text{ a}$ ,
- Restnutzungsdauer zwischen  $4 \text{ a}$  und  $10 \text{ a}$ ,
- Restnutzungsdauer zwischen  $1 \text{ a}$  und  $4 \text{ a}$ ,
- Restnutzungsdauer  $< 1 \text{ a}$ .

Die letzte Gruppe repräsentiert den klassischen Hotspot, bei dem sofort instandgesetzt werden muss. Aus der Sicht der Verbindungs- und Kontaktarten wurden vereinfacht drei Gruppen gebildet:

- geschraubte Verbindungen zwischen Stromschiene untereinander und Stromschiene mit Kabelanschlüssen aus Al-Al (Bild 12),
- geschraubte Geräteanschlüsse an Leistungsschaltern, Trennschaltern und Stromwandlern aus Al-Cu (Bild 13),
- gesteckte Trennschalterkontakte, silberbeschichtet (Bild 14).

Die geringsten Fehler treten bei den Al-Al-Verbindungen (i. d. R. Verbindungen zwischen Stromschiene und Kabelanschlüssen) auf. Ungefähr 12 % der Geräteanschlüsse (i. d. R. Al-Cu-Kombinationen) haben eine Restnutzungsdauer, die kleiner als vier Jahre ist. Die Anzahl der Fehler ist signifikant höher durch die generell problematischere Kombination von Al-Cu gegenüber Al-Al.

Die Gruppe der Trennschalterkontakte ist die kritischste Gruppe. Ungefähr 18 % der untersuchten Kontakte haben eine Restnutzungsdauer kleiner als vier Jahre. Diese Tatsache resultiert aus den kleineren Kontaktkräften und dem fundamental anderen Alterungsverhalten von Steckverbindungen gegenüber Schraubverbindungen. Zieht man den auf den Bemessungsstrom bezogenen Belastungsstrom in die Auswertung mit ein, können folgende, verallgemeinerbare Schlussfolgerungen gezogen werden (Bild 15):

- Die Wahrscheinlichkeit, Hotspots zu finden, ist in erster Näherung unabhängig vom Belastungsstrom, sofern dieser größer als 20 % des Bemessungsstroms ist (roter Balken).
- Die Restnutzungsdauer nimmt mit der Höhe des Belastungsstroms deutlich ab.
- Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Kontakte und Verbindungen nimmt mit der Höhe des Belastungsstroms zu. Vorausgesetzt, alle zum Messzeitpunkt festgestellten Hotspots werden instandgesetzt, betrüge die Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlage innerhalb der nächsten vier Jahre bei Belastung mit 90-prozentigem Bemessungsstrom

12 % und innerhalb der nächsten zehn Jahre ungefähr 55 %.

Die Quantität der Schlussfolgerungen bezieht sich ausschließlich auf die untersuchte Station. Qualitativ können die Aussagen jedoch verallgemeinert werden. Mit diesem Verfahren kann, ausgehend von den elektrischen Verbindungen und Kontakten, die Restnutzungsdauer der elektrischen Anlage bestimmt werden.

Der Zeitpunkt einer notwendigen Instandhaltung kann festgelegt und damit kann zu einer langfristigen und zustandsorientierten Instandhaltung übergegangen werden. Die Zuverlässigkeit der Anlagen nimmt trotz geringer werdender Wartungskosten zu.

### Literatur

- [1] Böhme, H.: Mittelspannungstechnik. Berlin: Verl. Technik, 1992
- [2] Bergmann, R.: Zum Langzeitverhalten des Widerstandes elektrischer Verbindungen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996
- [3] Rogler, R.-D.: Infrarotdiagnose an Verbindungen der energetischen Elektrotechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999
- [4] Rogler, R.-D.; Löbl, H.; Schmidt, J.: A Diagnostic System for Live Electrical Joints in Power Transmission Systems. ETEP Eur. Trans. on Electr. Power 7 (1997) H. 5, S. 331-336
- [5] www.tu-dresden.de
- [6] www.energie-dienstleistungen.de
- [7] Löbl, H.; Böhme, H.; Grossmann, S.; Rogler, R.-D.; Bergmann, R.; Bürkner, J.: Verfahren zur Kontaktanalyse an Elektroanlagen. DPA-Patentschrift DE4442070, 25.11.1994
- [8] Löbl, H.; Böhme, H.; Grossmann, S.; Rogler, R.-D.; Bergmann, R.; Bürkner, J.: Verfahren zur Kontaktanalyse an Elektroanlagen. EPA-Patentschrift EP0714031, 25.11.1994
- [9] Rigdon, W. S.: Emissivity of Weathered Conductors After Service in Rural and Industrial Environments". AIEE Trans. P. III 81 (1963) H. 2, S. 891-896
- [10] www.ribe.de
- [11] DIN 48204:1984-04 Leitungsseile – Aluminium-Stahl-Seile. Berlin: Beuth

### E-Mail – der direkte Weg zur Redaktion

Dipl.-Ing. Ronald Heinze (Chefredakteur)  
[ronald.heinze@vde-verlag.de](mailto:ronald.heinze@vde-verlag.de)

Dipl.-Ing. Ralph Hermsdorf (Redakteur)  
[ralph.hermsdorf@vde-verlag.de](mailto:ralph.hermsdorf@vde-verlag.de)

Dipl.-Ing. Michael Kreienberg (Redakteur)  
[michael.kreienberg@vde-verlag.de](mailto:michael.kreienberg@vde-verlag.de)

Brigitte Feege (Layout)  
[brigitte.feege@vde-verlag.de](mailto:brigitte.feege@vde-verlag.de)

Carmen Ruh (Sekretariat)  
[etz-redaktion@vde-verlag.de](mailto:etz-redaktion@vde-verlag.de)