

# Nieder- und Mittelspannungsanlagen durch Infrarot-Thermografie richtig untersuchen



S. Krüll; Tabarz/Thür.

Die Infrarot- (IR-) Messung für die Überprüfung der elektrischen Anlagen hat sich in den letzten Jahren durch ihre Wirtschaftlichkeit, Vielseitigkeit, und der hohen Aussagekraft zu einem festen Bestandteil der Jahresinspektion entwickelt. Durch die Vielzahl von sehr preiswert angebotenen Infrarot - Kameras wird der Markt momentan von Dienstleistern überschwemmt, welche mit dieser Technik und unzureichendem Fachwissen Elektroanlagen billig untersuchen wollen. Leider kann durch Billiganbieter und schlechte Arbeit die Technik in Verruf kommen. Der VdS hat aus diesem Grund Richtlinien erarbeitet und führt Zertifizierungen durch, um die gewohnten hohen Qualitätsanforderungen auch weiterhin zu gewährleisten.

## 1. Infrarot-Thermografie

Thermovisionmessungen an elektrischen Schaltanlagen aller Spannungsebenen werden von den Energieversorgungsunternehmen bereits seit vielen Jahren durchgeführt. Sie gelten als klassisches Verfahren der technischen Diagnostik. Regelmäßige Kontrollen mit leistungsfähigen Infrarot (IR) - Systemen gewährleisten eine hohe Verfügbarkeit der elektrischen Anlagen und damit der Stromversorgung. Auch in vielen Industriebetrieben, Büro- und Verwaltungsgebäuden, Krankenhäusern, Hotels usw. ist diese Maßnahme zu einem festen Bestandteil der zustandsbezogenen Jahresinspektion geworden. Es empfiehlt sich auch, diese Messungen vor Ablauf von Gewährleistungen durchzuführen. Die regelmäßigen IR- Messungen stellen darüber hinaus einen vorbeugenden Brandschutz dar, der von vielen Brandschutzversicherungen durch eine Senkung der Versicherungsbeiträge honoriert wird.

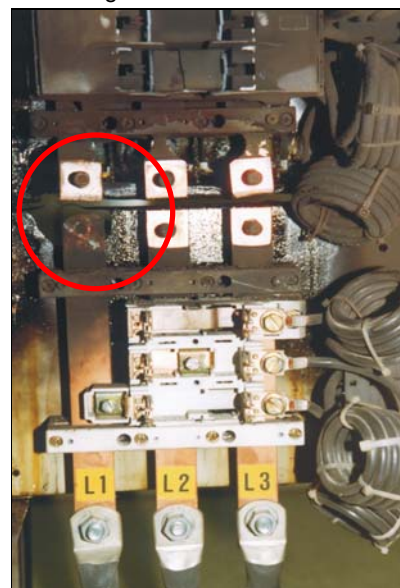
## 2. Zweck und Nutzen

- Dokumentation von Anlagenzuständen und potentiellen Risiken
- Früherkennung von Schwachstellen und Schäden
- Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und -zuverlässigkeit
- Reduzierung der Brand- und Unfallgefahren (Bild 1)

Durch den VdS (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Büro Schadenverhütung) wird die Thermografie in elektrischen Anlagen durch die VdS 2858 näher beschrieben. Danach sind elektrische Anlagen vom Betreiber regelmäßig zu prüfen (wiederkehrende Prüfungen), z.B. gemäß:

- Technischer Prüfverordnung des jeweiligen Bundeslandes,
- BGV A3 (Unfall- Verhütungs- Vorschrift (UVV) der Berufsgenossenschaften,
- DIN VDE 0105, Feststellung des „ordnungsgemäßen Zustandes der elektrischen Anlage“,

- Feuerversicherungs- Klausel (Klausel 3602), die zusätzlich eine Prüfung nach den Sicherheitsvorschriften der Feuerversicherungen verlangt.



**Bild 1** Zu solch einem Brand muss es nicht erst kommen

Die Thermografie kann die vorgenannten wiederkehrenden Prüfungen nicht ersetzen. Sie ist auch kein Ersatz für die notwendigen Sichtkontrollen, Funktionsprüfungen, Strommessungen usw., die im Rahmen der wiederkehrenden Prüfungen durchgeführt werden müssen. Sie stellt jedoch eine hilfreiche, ergänzende Messmethode dar und ermöglicht insbesondere Untersuchungen und Bewertungen des Anlagenzustandes, die bislang nur schwer oder mit hohem Aufwand möglich waren. Ein großer Vorteil ist, dass die Messungen bei laufendem Betrieb (unter Spannung) durchgeführt werden können. Thermografie gehört heute zum Stand der Sicherheitstechnik.

### 3.1. Qualifikationen und Technik

Der Prüflingenieur zur Überprüfung von Elektroanlagen sollte Berufserfahrungen aufweisen, unabhängig sein (kein Betriebspersonal) und muss die Elektrofachkraft nach DIN VDE 1000-10 nachweisen. Er sollte die Zertifizierung zur Untersuchung von Elektroanlagen Stufe 2 nach DIN EN 473 besitzen, da nur diese zum selbständigen Arbeiten ohne Anleitung berechtigt. Weiterhin ist ein Nachweis zum VdS anerkannten Sachverständigen zur Untersuchung elektrischer Anlagen empfehlenswert und wird von Versicherungen immer mehr gefordert. Nur diese Voraussetzungen führen zu einer hohen Fachkompetenz bei der Messung und Beurteilung thermischer Erwärmungen, welche oft auch bauteilbedingt und normal sind. Da sich die Betreiber elektrischer Anlagen auf die Messungen und Prüfberichte verlassen müssen, sollten generell diese Schulungszertifikate angefordert werden.

Der Einsatz der berührungslosen IR-Messung zur thermischen Überprüfung von Elektroanlagen erfordert neben dem Kenntnisstand über den Aufbau der Schaltanlagen, der Erfahrung und der Wahl des entsprechenden Emissionswertes für die zu messende Oberfläche die Möglichkeit, entsprechende Objektive für verschiedenste Messaufgaben einsetzen zu können. Ein Standardobjektiv besitzt je nach Kameratyp einen Öffnungswinkel von 20° bis 24°. Diese Normalobjektive sind für Anlagenuntersuchungen im Nieder- und Mittelspannungsbereich einsetzbar, wo geringe Messentfernungen vorhanden sind. Bei höheren Spannungsebenen werden die Messabstände so groß, dass für eine exakte Überprüfung dieser Schaltanlagen 20° bzw. 24° Objektive nicht mehr ausreichend sind. Dies erklärt sich aus der geometrischen Auflösung IFOV (Instantaneous Field Of View) einer jeden IR-Kamera. Bei einer Messentfernung von 10 m beträgt diese geometrische Auflösung, z.B. der ThermaCAM PM 695 mit einem 24° Objektiv 13 mm.

Es ist also nur möglich einen Fehler in 10 m Entfernung exakt in seiner Temperatur zu messen, wenn die Fehlerstelle mindestens 13 mm groß ist. Setzt man jetzt ein 7°-Teleobjektiv ein, so verbessert sich diese geometrische Auflösung auf 3,8 mm. Man kann mit einem Teleobjektiv also bedeutend kleinere Fehlerstellen lokalisieren und in ihrer Temperatur exakt bestimmen. Auch ein eventueller digitaler Zoom kann den Fehler bei einer Messung an kleinen Messobjekten in großen Entfernungen nicht beheben. Bei jedem digitalen Zoom werden die Randbereiche wie bei der Fotografie weg geschnitten; die Pixel der Digitalkamera oder die Messpunkteanzahl bei einer IR-Kamera werden zahlenmäßig nicht erhöht. Man erhält nur ein stärker gerastertes Bild.

Auch 12° Objektive verringern natürlich die geometrische Auflösung, sind aber ungeeignet, wenn man relativ kleine Messobjekte bei größeren Messentfernungen thermisch untersuchen muss. Ebenfalls sollte die Anzahl der Messpixel bei den IR-Kameras möglichst hoch sein, wenn man Anlagenteile in großen Entfernungen untersucht.

Grundsätzlich lassen sich die Auflösungen nicht mit einer Digitalkamera vergleichen. Diese messenden Bildpunkte der IR-Detektoren können je nach Kameratyp sehr stark schwanken. Ältere IR-Kameras sind gekühlte Scanner-Kameras, welche scannerbedingt eine Auflösung von nur 140 x 140 = 19.600 Bildpunkten aufweisen. Mit den älteren Kameras hat man früher natürlich auch Elektroanlagen untersucht. Aber gerade durch die geringe Bildpunktanzahl waren auch hier Wechselobjektive bei größeren Messentfernungen zwingend erforderlich.

IR-Kameras der heutigen Generation sind ungekühlte Mikrobolometer Kameras. Ihr IR-Detektor besitzt bei hochwertigen Kameras eine Auflösung von 320 x 240 = 76.800 Bildpunkten, bei ganz neuen Modellen sogar 640 x 480 = 307.200 Bildpunkte. Da jeder Bildpunkt ein Messpunkt ist, steigt bei dieser Vielzahl von Messpunkten natürlich die Auflösung und Schärfe eines jeden IR-Bildes und somit die Möglichkeit, auch feine Strukturen sicher zu erfassen und genau messen zu können.

Die meisten der heute angebotenen preisgünstigen IR-Kameras haben nur eine geringe Anzahl von messenden Bildpunkten und keine oder unzureichende Möglichkeiten, Objektive wechseln zu können. Selbst bei kleinen Messentfernungen und dünnen Kabeln können diese Bildpunktanzahlen nicht mehr ausreichen, um Fehlerstellen zu lokalisieren. Daher stellt der VdS auch Mindestanforderungen an die Kameratechnik. Personen, welche Elektroanlagen untersuchen, erhalten trotz bestandener Prüfung kein Zertifikat

vom VdS, wenn sie die Mindestanforderungen an die Kameratechnik nicht nachweisen können.

Ein weiteres Kriterium für eine erfolgreiche Untersuchung von Elektroanlagen ist die Möglichkeit, an der IR-Kamera während der Messung



**Bild 2** getrennter Aufbau von Monitor und IR-Kamera

einen von der Kamera unabhängigen Monitor anzuschließen, wie das **Bild 2** zeigt. Über den Griff am LCD-Monitor sollten sich alle Kamerafunktionen steuern lassen. Dies hat den Hintergrund, dass sich bei Niederspannungsanlagen oft sehr viele Bauteile in den Schaltschränken befinden - und die lassen sich nur dann fachgerecht untersuchen, wenn die Kamera auch über Kopf gehalten werden kann. Die Kamera über Kopf zu halten und dann noch das IR-Bild zu erkennen - das ist nur möglich, wenn ein separater Monitor vorhanden ist. In vielen Fällen erschwert auch ein vorhandener Berührungsschutz die IR-Messungen. Auch hier ist eine Überprüfung nur möglich, wenn man über oder unter dem Berührungsschutz hinweg messen kann, also nur mit externem Monitor. Genauso verhält es sich bei gießharzisierten (**Bild 2**) oder vielen luftisolierten Mittelspannungsanlagen. Durch den Leistungsschalter sind die eigentlichen Kontaktstellen kaum sichtbar. Eine getrennte Bauweise von IR-Kamera und Monitor ermöglicht es jedoch auch hier, diese Anlagen fachgerecht zu untersuchen. Bei einem starren System ist die Überprüfung unmöglich. Billige IR-Kameras haben i.d.R. keine Möglichkeit, diese externen Geräte anschließen zu können. Ein IR-System zur Untersuchung von Elektroanlagen muss - auch nach den VdS-Richtlinien -, Temperaturen bis 500°C erfassen können. Viele für den Baubereich konzipierte IR-Kameras, können jedoch nur Temperaturen bis ca. 80°C messen. Weiterhin haben billige IR-Kameras nur sehr kleine, nicht schwenkbare Monitore. In Gebäuden kann man eine Messung unter günstigen Bedingungen gerade noch durchführen. Bei viel Licht im Freien oder gar bei Sonneneinstrahlung ist eine Lokalisierung von Fehlern nahezu unmöglich. Verschiedene nachfolgende Beispiele sollen die Notwendigkeit entsprechender Techniken und die hohe Aussagekraft der IR-Messungen belegen.

**Tabelle 1** Temperaturen, welche sich bei Hochrechnung auf Nennlast ergeben würden

Leiter		:	L1	L2	L3
Nennlast	(A)	:	1.000	1.000	1.000
Belastung während der Messung	(A)	:	500	500	500
Belastung in Prozent	(%)	:	50	50	50
maximale Objekttemperatur	(°C)	:	136	35	35
gemessene Übertemperatur	( $\Delta T$ in K)	:	101	-	-
Temperatur bei Nennlast	(°C) ca.	:	300	-	-
Fehlergruppe	(1 - 4)	:	4	-	-

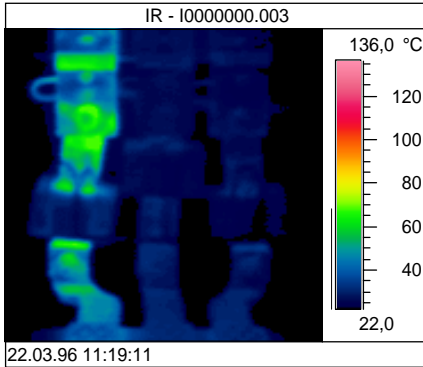
**4.2. Transformatoren**

Im IR- Bild 5 ist eine thermische Schwachstelle eines 20/0,4kV Trafo's zu erkennen. Eine Trafodurchführung weist eine ca. 30°C höhere Temperatur als die anderen 0,4kV Trafokerzen auf. Hier bestand auf Grund des IR- Bildes die Vermutung, dass es sich um eine Fehlerstelle im Inneren des Transformators handelt. Die heiße Stelle war an der Verbindung der Trafodurchführung im Ölbad zu vermuten. Der Transformator muss zur Behebung des Schadens außer Betrieb genommen und geöffnet werden. Nur Fachleute erkennen auf Grund des IR- Bildes und langjähriger Erfahrung die Erwärmungsursache im Inneren des Trafo's und können somit richtige Instandsetzungsmaßnahmen empfehlen.

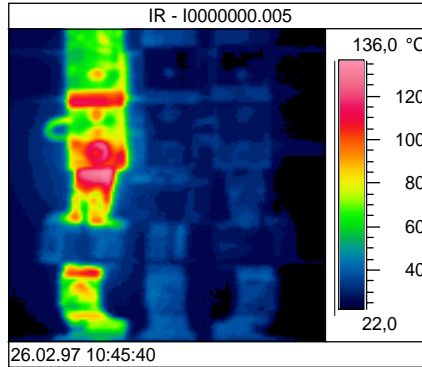
Das Bild 6 zeigt eine derartige Verbindung im geöffneten Zustand eines Transformators, allerdings an einem 110/10kV Trafo (gehört nicht zum IR-Bild 5). Die Schraubverbindung hat sich gelöst und ist sehr stark in Mitteleidenschaft gezogen worden. Ein Kupferband der Dehnungslasche ist schon weggebrannt. Dies hätte zum Ausfall oder zur Zerstörung des Transformators ohne Vorwarnung geführt. Auch diesen Schaden hat eine IR- Messung noch rechtzeitig aufgedeckt, bevor ein unerwarteter Trafoausfall weitere Kosten nach sich gezogen hätte. Sofort im Anschluss an die Messung hat der Prüfer dem Betreiber des Transformators eine Untersuchung des Trafoöles durch eine Öl- Gas- Analyse empfohlen, um weitere Sicherheit bei der Schadensanalyse zu erhalten und die aufwendige Trafoöffnung nicht umsonst durchzuführen. Die rechtzeitige Instandsetzung nach Befund konnte nach Angaben des Betreibers einen Schaden von 0,5- 0,7 Mio. EURO am Großtrafo verhindern.



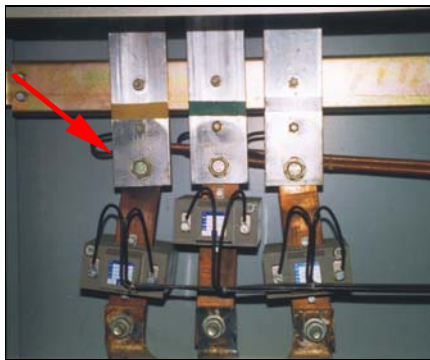
**Bild 6** Schaden an einem 110/10 kV Transformator durch Überhitzung



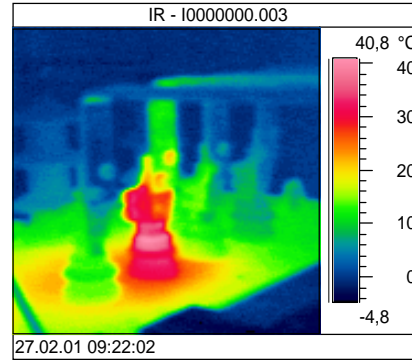
**Bild 3** Temperaturanstieg einer Schienenverbindung innerhalb eines Jahres  
a) maximale Temperatur 68°C im März 1996



b) maximale Temperatur 136°C im Februar 1997



**Bild 4** Originalfoto der im Infrarotbild dargestellten Schwachstelle aus dem Jahre 1997. An dem Aluminium, dem Kupfer oder auch den Schrauben ist keine Erwärmung zu erkennen.



**Bild 5** Thermische Schwachstelle im Transformatorinneren an einem 20/0,4kV Transformator. Bereits das IR- Bild zeigt eine eindeutige Ursache der Erwärmung, welches durch eine Öl- Gas- Analyse nochmals bestätigt wurde.

**4. Beispiele für IR- Messungen**

**4.1. Al- Cu- Schienenverbindung**

Die in den Bildern 3 und 4 gezeigte Fehlerstelle konnte aus betrieblichen Gründen nicht gleich beseitigt werden. So hatte der Prüfer diese Fehlerstelle ein Jahr später nach erneuter turnusmäßiger Kontrolle der gesamten elektrischen Anlage wieder lokalisiert. Nach einem Jahr stieg die Temperatur bei gleichbleibender Belastung auf über das Doppelte (Bild 3).

Bei Hochrechnung auf Nennlast würden sich die in der Tabelle 1 angegebenen Temperaturen ergeben.

Während der Reparatur zeigte sich, dass an den Kontaktflächen der beiden Metalle eine Verfärbung sowie eine voranschreitende Oxidation zu verzeichnen waren. Um den Schaden dauerhaft zu beseitigen, wurden AlCu- Scheiben zwischen die beiden, unterschiedlichen Metalle gelegt, um die in ihrer Spannungsreihe im Periodensystem weit auseinander liegenden Metalle fachgerecht miteinander ver-

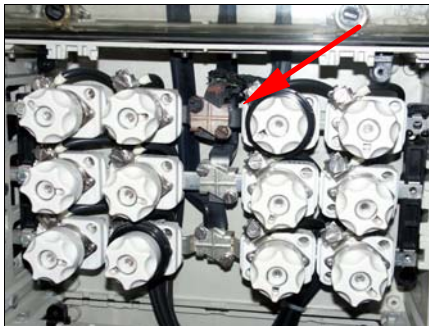
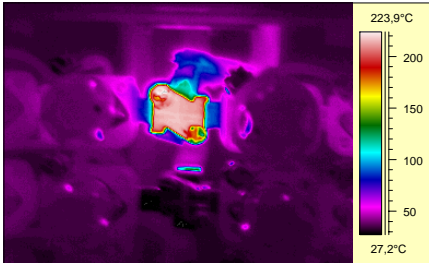
binden zu können. Derartige Spannungsunterschiede führen besonders unter Feuchtigkeitseinwirkungen zu einem galvanischen Element, bei dem der Schaden schon vorprogrammiert ist.

Bei der vorliegenden Schienenverbindung erfasst die berührungslose IR- Messungen zwei in ihrem Emissionswert stark voneinander abweichende Werkstoffe. Unzureichendes physikalisches Fachwissen führt auch hier mit größter Wahrscheinlichkeit zu falschen Messergebnissen.

Oberflächen mit kleinen Emissionswerten lassen die wahren Temperaturen bei den Messungen erheblich kleiner erscheinen, wenn dies nicht entsprechend berücksichtigt wird. Somit stufen unerfahrene Prüfer die Schäden nicht entsprechend ein und veranlassen notwendige Schritte zu deren Beseitigung nicht rechtzeitig.

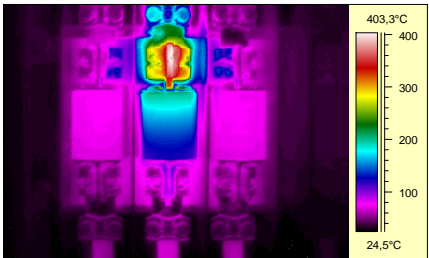
### 4.3. NH- und Schraubsicherungen

Bei den Fehlerstellen in den **Bildern 7 und 8** handelt es sich um Sicherungselemente, in denen das Schadensbild schon weit fortgeschritten ist und die Anlagen kurz vor dem Ausfall oder einem Brand stehen. Das **Bild 7** zeigt einen Sicherungskasten, in dem sich Schraubsicherungen befinden. Der obere Klemmleistenanschluss ist durch die hohen Temperaturen stark oxidiert und die Kabelisolierung verbrannt. Hier haben sich vermutlich die Schraubverbindungen gelöst.



**Bild 7** Klemmleistenanschluss

Im **Bild 8** ist der Federkontakt der NH-Sicherung im Laufe der Zeit so stark ermüdet, dass die Klemmkraft nicht mehr ausreicht um die elektrische Leistung zu übertragen. Der Übergangswiderstand steigt so sehr an, dass es bis zum Glühen der Anlagenteile kommen kann. Bei dieser Sicherung sind es schon über 400°C. Durch die starke Erwärmung lässt die Federkraft der Sicherungsklemmung immer mehr nach, der Übergangswiderstand wird größer und die Anlage fällt im ungünstigsten Fall aus.

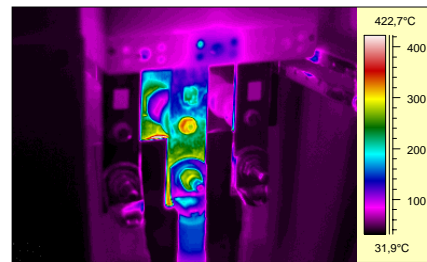


**Bild 8** NH - Sicherung

Im ungünstigen Fall werden die brennbaren Isolationen oder Teile in der unmittelbaren Umgebung in Brand gesetzt und es kommt zu einem Betriebsbrand. Somit ist es auch sehr gut nachzuvollziehen, warum die Brandschutzversicherungen hier so große Risiken in der Brandentstehung sehen.

### 4.4. Leistungsschalteranschlüsse

Am unteren Anschluss des Leistungsschalters (**Bild 9**) hätte schon eine Sichtkontrolle den Fehler aufgespürt. Aber werden regelmäßig alle elektrischen Anlagen einer Sichtkontrolle unterzogen? Oft ist es in den Schaltschränken dunkel. Es gibt sehr viele elektrische Anlagen und für derartige Begehungen bleibt keine Zeit. Die Elektroabteilungen sind unterbesetzt, und man ist kaum in der Lage die ständig anstehenden Arbeiten und Reparaturen zu bewältigen, um die Produktion am Laufen zu halten. Kein Einzelfall- und oft leider die Regel in Produktionsbetrieben. Um so wichtiger sind die regelmäßigen Kontrollen der Elektroanlagen durch IR- Untersuchungen.



**Bild 9** Leistungsschalteranschluss

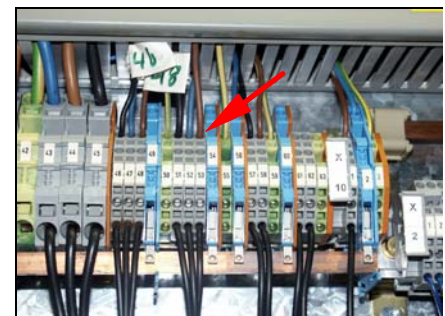
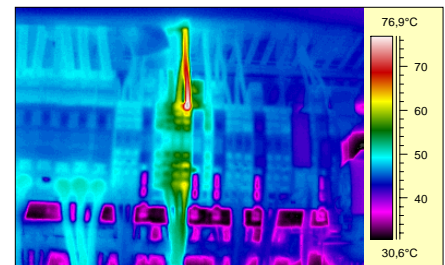
Am unteren Anschluss vom Leiter L2 des Leistungsschalters im **Bild 9** ist das Kupfer schon stark verfärbt. Dauerlauf eines Kompressors hat den Schraubanschluss auf eine Temperatur von fast 423°C ansteigen lassen, obwohl er bei der Montage mittels Drehmomentenschlüssel angezogen wurde. Die Ursache der starken Erwärmung kurz nach der Inbetriebnahme ist banal: Weil die Bohrungen in den Kabelschuhen zu klein waren, hat man diese bei der Montage aufgebohrt. Da Kupfer beim Bohren stark "schmiert", kommt es an der Austrittsstelle des Bohrers zu einer Gratbildung. Dieser Grat wurde nicht gewissenhaft entfernt. So fließt der Strom an diesem Leistungsschalter trotz fest angezogener Verschraubungen nur über den kleinen Querschnitt der Gratfläche.

Diese kleine Querschnittsfläche des Grates führt bei hohem Stromfluss zu einer sehr starken Erwärmung. Wahrscheinlich wird es zum Wegschmelzen oder einer starken Verformung des Grates gekommen sein. Auf einmal ist nun die Schraube locker, obwohl diese bei der Montage fest angezogen war. Ist die Temperatur an den Bauteilen so weit angestiegen, wie man es hier sieht, muss man das ganze Bauteil auswechseln, da eine starke Oxidschicht den Übergangswiderstand deutlich erhöht - auch im Inneren des Leistungsschalters. Ein weiteres Betreiben des Leistungsschalters wäre sehr riskant und der nächste Ausfall sicher.

### 4.5. Klemmleisten

Oft sind es nur Kleinigkeiten, die zum Ausfall der Anlagen oder einem Brand führen. Der im **Bild 10** dargestellte heiße Kabelanschluss an der Klemmleiste wäre bei einer Sichtkontrolle nicht aufgefallen, da sich die Kunststoffummantelung noch nicht verfärbt hat. Die Ursache war eine lose Schraubverbindung, welche die Temperatur auf fast 80°C ansteigen ließ. Da solche Fehlerstellen nicht mit dem bloßen Auge sichtbar sind, lassen sich derartige Erwärmungen nur mit der Thermografie messen. Eines der größten Vorteile dieser Messung ist, dass man die Fehlerstellen im Anfangsstadium der Erwärmung entdeckt und eine Beseitigung der fehlerhaften Verbindung meist ohne großen Zeitaufwand möglich ist.

Bei diesen kleinen Kabelquerschnitten zeigt es sich auch, wie wichtig es ist, Kamertechniken mit einer hohen Anzahl von Bildpunkten zu verwenden. Die anfangs erwähnten Billig-Kameras können solche Erwärmungen an Kabeln geringen Querschnitts nicht erfassen, oder sie messen zu niedrige Temperaturen. Wie schnell sich dann die Fehlerstellen erwärmen können, zeigt **Bild 3**.



**Bild 10** Kabel auf Klemmleiste

## 4.6. Schienensysteme

Bild 11 zeigt ein fehlerhaftes BD-System. Solche Stromschienensysteme sind in Betrieben häufig anzutreffen, weil sie eine variable Stromzuführung für Maschinen gewährleisten. Da diese Systeme jedoch in 3 - 4m Höhe angebracht werden und oft über Maschinen verlaufen, sind sie sehr schwer zugänglich. In diesem Fall ist eine turnusmäßige Überprüfung mittels IR-Kamera ebenfalls sehr anzuraten, um die Fehlerstellen nicht erst beim Brand oder dem Ausfall des BD-Systems zu entdecken. Auch eine Sichtkontrolle ist hier nur bedingt möglich. Die BD-Systeme erfordern ebenfalls hochwertige IR-Kamerasysteme mit Wechselobjektiven, um diese fachgerecht untersuchen zu können.

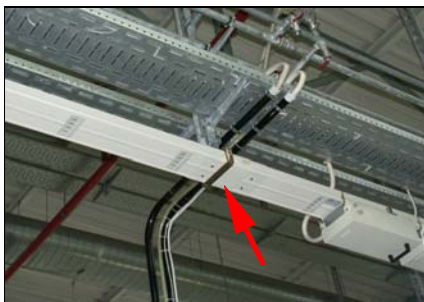
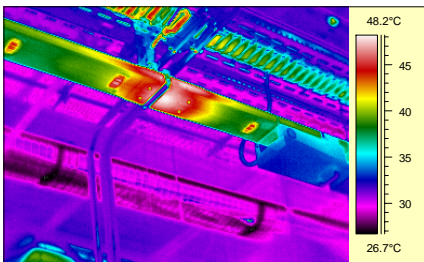


Bild 11 defektes BD- System

## 4.7. Mittelspannungsanlagen

In Mittelspannungsanlagen treten immer wieder Fehler auf, die auf unzulässige Erwärmungen zurückzuführen sind. Mittelspannungsanlagen gestatten im laufenden Betrieb außer einer Sichtkontrolle keine weitere Inspektion. Inspektion und Wartung erfordern i.d.R. die Freischaltung. Fallen infolge einer Havarie Schaltanlagenteile aus, so betrifft der Ausfall meist ganze Betriebsteile oder sogar das gesamte Werk.

Daher sollte man besonders die Mittelspannungsschaltanlagen einer turnusmäßigen thermografischen Prüfung unterziehen. Blechgekapselte Anlagen lassen sich jedoch nur messen, wenn diese geöffnet werden können. Es gibt auch Schaltzellen, welche in eingeschaltetem Zustand nicht zu öffnen sind, die jedoch ein IR-Schauglas haben. Durch dieses Schauglas kann man dann mit der IR-Kamera durchmessen. Eine Nachrüstung dieser Schaltzellen mit IR-Schaugläsern ist ebenfalls möglich (ca. 150,- EUR je Stück).

Einen Fehler im Inneren eines 20kV Stromwandlers zeigt das IR- Bild 12. Bedingt durch die Innenraumanlage war hier sehr wenig Platz vorhanden und die

Aufnahme musste mit einem 40° Weitwinkelobjektiv gespeichert werden. Da die Thermografie an Elektroanlagen oft eine vergleichende Messung ist, muss man häufig alle 3 Leiter temperaturmäßig erfassen, um die Schwachstelle richtig beurteilen zu können. Die gemessene Temperatur von 47,6°C ist normalerweise nicht kritisch. Doch bei diesem rechten Wandler ist trotzdem ein schneller Austausch anzuraten, da ein Vergleich der drei Leiter deutlich die starke Temperaturerhöhung des Wandlers am Leiter L3 im Bild 12 erkennen lässt. Diese Fehlerstelle wäre weder durch eine Sichtkontrolle noch durch ein Nachziehen der Schraubverbindungen im stromlosen Zustand zu erkennen gewesen. Durch die in Gießharz ausgeführte Stromwandlerart, besteht hier die große Gefahr, dass er irgendwann explodieren wird.

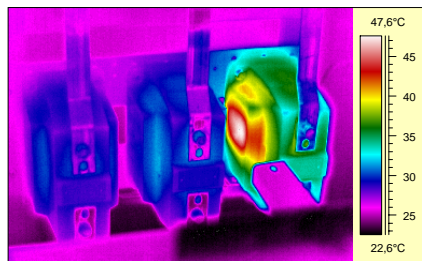


Bild 12 defekter 20 kV Wandler

Bei dem nächsten Beispiel im Bild 13 handelt es sich um eine 10kV Schraubverbindung zwischen dem Abgangstrenner und der Sammelschiene. Derartige thermische Fehler an Schraubverbindungen sind sehr häufig.

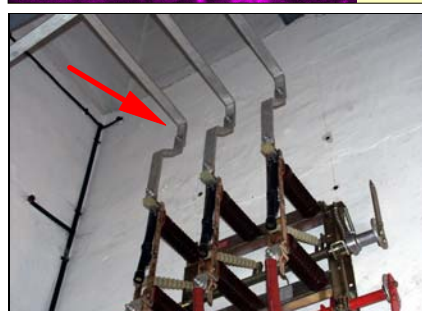
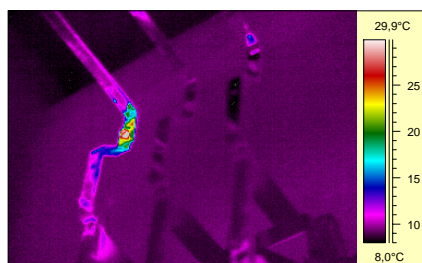


Bild 13 10kV Schraubverbindung

## 5. Beseitigung der Fehlerstellen

Größtenteils treten die Erwärmungen durch eine Erhöhung der Übergangswiderstände innerhalb der Verbindungen auf. Es gibt auch Bauteile mit hohen Temperaturen, die durch eine falsche Wahl des Materials hervorgerufen werden. Überlastungen von Bauteilen stellen ebenfalls eine häufige Fehlerursache dar. Bei der Planung von elektrischen Anlagen legt man diese nach dem zu erwartenden Leistungsbedarf aus. Bei einer späteren Erweiterung der Produktion, oder bei leistungstärkeren Maschinen, wird der Leistungszuwachs in das vorhandene Elektronetz eingebunden, ohne hier große Veränderungen vorzunehmen. Die Kosten für einen Umbau der Elektroanlage spart der Betreiber also häufig ein, obwohl es bei allen Umbauten ebenso notwendig wäre, auch die Elektroanlagen den Leistungen anzupassen.

Alterungen von Bauteilen und Kabeln sind ebenfalls eine nicht zu unterschätzende Ursache von Erwärmungen, Ausfällen und Bränden. Die Alterung der elektrischen Anlagen lässt sich nicht verhindern, aber sie beschleunigt sich noch, wenn die Bauteile ständig mit Nennlast betrieben werden. Oft liegen die Belastungen über den auf dem Typenschild angegebenen maximalen Leistungen. Auch wenn das Bauteil etwas teurer ist, so sollte man doch auf die nächst größere Bauform ausweichen. Die Mehrausgaben hat man mit Sicherheit bald wieder eingespart.

Die Bauteildichte in den Schaltschränken zu verringern bringt eine deutliche Entlastung der gesamten elektrischen Anlagen. Oft sind z.B. Schaltschütze auf Hutschienen dicht an dicht gepackt und berühren sich untereinander, obwohl noch Platz vorhanden wäre. Bei der Planung und Montage sollte man die Bauteile so einbauen, dass sich ungefähr 5mm Luft dazwischen befindet. Auch das stellt eine einfach zu realisierende Maßnahme ohne Mehrkosten dar, um die thermische Belastung der Anlage zu verringern und Fehlern und Ausfällen vorzubeugen.

Wie schon anfangs erwähnt, sollte man vermeiden, unterschiedliche Metalle miteinander verbinden zu wollen (die in ihrer Spannungsreihe im Periodensystem weit auseinander liegen, siehe Bild 3). Jeder hat im Chemieunterricht schon einmal etwas von dem galvanischen Element gehört, bei dem bei Berührung und Feuchtigkeit eine Zersetzung des unedleren Metalles im Laufe der Jahre zu verzeichnen ist. Sollte die Verbindung unterschiedlicher Metalle nicht zu umgehen sein, so sind bei einer Aluminium- Kupfer- Verbindung AlCu-Scheiben einzusetzen.

Viel zu warme Temperaturen von Schaltschränken, Elektroräumen oder Trafoboxen sind ein weiterer Nährboden für thermische Fehler und Bauteil-

fälle. Die Elektroräume und Trafoboxen sollten unter Beachtung des Brandschutzes zumindest belüftet sein. In ganz extremen Fällen wird eine Klimatisierung des gesamten Raumes oder des einzelnen Schaltschranks empfohlen. So tragen Kompensationsanlagen oder Trockentransformatoren sehr zu Erwärmungen der Räume bei. Kalte Elektroräume garantieren die wenigsten thermischen Probleme und Bauteilausfälle.

Bei der Einteilung der Fehlerstellen gibt der VdS eine Klassifizierung vor, um den Betreibern der elektrischen Anlagen die Wertigkeit zu erleichtern und die Fehlerstellen als erstes zu beheben, welche am gefährlichsten eingestuft sind.

Besonders im Mittelspannungsbereich aber auch bei Niederspannungsverbindungen gibt es Flachanschlüsse. Wichtig bei allen thermischen Fehlern ist es, die Verschraubungen an den Flachanschlüssen nicht nur einfach anziehen zu wollen. Dies führt i.d.R. zu keiner Beseitigung der Fehlerstelle. Werden zwei Strombahnen, z.B. die beiden Flachanschlüsse des Leistungsschalters in dem **Bild 9** oder der 10 kV Verbindung im **Bild 13**, mit einer Kraft aufeinander gedrückt, so ergeben sich auf Grund der Rauheiten auf den Verbindungsflächen nur mikroskopisch kleine, die Kraft übertragende Mikrokontakte, über die der Strom von einer Leiterfläche zur anderen übertragen wird. Dabei ergeben sich scheinbare (sichtbar), mechanisch tragende und wahre Kontaktflächen (nicht sichtbar). Nur über die wahren / metallischen und über die quasimetallischen Kontaktflächen, auf denen sich Fremdschichten mit einer Dicke < 2,5nm gebildet haben können, fließt der Strom über die Kontaktflächen. Diese Fremdschichten müssen vor der Verbindung der Kontakte aufgebrochen werden, um den Gütefaktor zu erhöhen. Die Verbindung muss also in jedem Fall geöffnet und beide Kontaktflächen sollten mittels Drahtbürste und ca. 20 bis 30 Bürstenstrichen bearbeitet werden. Ohne dann die Kontaktflächen mit den Fingern zu berühren (evtl. Schweiß und somit wieder Oxidation), sind diese zur Verhinderung der Wassereindringung in die Kontaktflächen mit einem säurefreien Fett zu bestreichen und zusammenzufügen.

Nur ein Nachziehen der Schraubverbindungen verringert also nicht den Übergangswiderstand. Der Gütefaktor  $k_u$  gibt das Verhältnis des Verbindungswiderstandes  $R_v$  zum Widerstand  $R_L$  des homogenen Leiters gleicher Länge  $l_v$  (Überlappungslänge) an. Er ist ein Maß dafür, wieviel mal mehr Verlustleistung in der Verbindung gegenüber dem Leiter erzeugt wird. Bei neu montierten Verbindungen sollte der Gütefaktor ungefähr 1 betragen. Für Verbindungen, die eine Lebensdauer von mehr als 30 Jahren haben sollen, muss der Gütefaktor  $k_u < 1,5$  sein.

## 6. Fazit

Unter dem Gesichtspunkt der notwendigen Inspektion von Elektroenergieanlagen und des Brandschutzes sowie der Sicherheit und der Versorgungszuverlässigkeit sind thermografische Messungen von unbestreitbarem Nutzen. Einer der größten Vorteile der IR- Messung ist, dass man die Untersuchungen bei laufendem Betrieb durchführen kann ohne die Anlagen abschalten zu müssen.

Um thermische Fehler sicher lokalisieren zu können, sollte neben einem geeigneten Infrarotsystem ein Stromfluss an den Bauteilen von mindestens 10% der Nennlast anliegen. Je nach Größe des Betriebes können oft schon an einem Tag alle elektrischen Anlagen untersucht werden, ohne die Produktion zu beeinflussen. Es werden dadurch Zustände sichtbar gemacht, die für das menschliche Auge unsichtbar bleiben würden. Durch die Lokalisierung von Fehlerstellen kann man rechtzeitig punktgenaue Instandsetzungsmaßnahmen einleiten und somit Folgeschäden vermeiden. Rund 35% aller Betriebsbrände entstehen durch thermische Erhitzungen von elektrischen Anlagen. Bereits nach der zweiten thermografischen Untersuchung sinkt die Ausfallquote um 80%.

Darüber hinaus ergeben sich wirtschaftliche Nutzeffekte, welche die Brandschutzversicherungen zusätzlich honorieren. In der Energieerzeugung - weiterleitung oder - verteilung führen turnusmäßige IR- Messungen zu nachweisbar höherer Sicherheit und nahezu uneingeschränkter Verfügbar-

keit beim Betreiben von elektrischen Anlagen.

Um Kosten einzusparen, wurde in den vorangegangenen Jahren eine ereignisorientierte Instandhaltung eingeführt. Doch bald hatte man erkannt, dass die zustandsorientierte Instandhaltung weit mehr Vorteile bietet. Daran hat die IR- Überprüfung einen entscheidenden Anteil. Auch teure Produktionsausfälle durch den Ausfall elektrischer Anlagen oder gar ein Brand, von Elektroanlagen hervorgerufen, sind somit weitgehend auszuschließen.

Auch wenn die moderne Technik eine Vielzahl von Möglichkeiten bietet, so bildet das Bedienpersonal den größten Unsicherheitsfaktor. Jeder Auftrag zur Untersuchung und Bewertung von elektrischen Anlagen sollte nur von qualifizierten und zertifizierten Fachkräften mit einer guten IR- Kamartechnik mit verschiedenen Objektiven durchgeführt werden.

Die Zertifizierung zur Untersuchung von Elektroanlagen Stufe 2 nach DIN EN 473 und die VdS Zertifizierung zum VdS anerkannten Sachverständigen für Elektrothermografie VdS 2859: 2005-01 garantieren diese Qualifikationen. Auch hier ist es wie überall, Qualität hat ihren Preis.

### Autor

Dipl. - Ing. *Sönke Krüll* ist Geschäftsführer der Industrie Thermografie Krüll,  
D - 99891 Tabarz/Thür.  
www.ITK-MESSTECHNIK.de  
Tel.: 03 62 59 / 50 991, Fax: 50 999  
e- mail: itk.s.kruell@t-online.de

### Literatur

VdS Qualifikationslehrgang „Thermografie in elektrischen Anlagen“, Prof. Dr.- Ing. Rogler 2005