

Hochspannungsanlagen durch Infrarot-Thermografie optimal untersuchen

S. Krüll; Tabarz/Thür.

Seit vielen Jahren führen turnusmäßig durchgeführte Infrarotuntersuchungen in allen Spannungsebenen der Energieversorgungsunternehmen, wie auch in Industriebetrieben, zu einer wesentlichen Erhöhung der Versorgungssicherheit. Jedoch nur durch gutes Fachpersonal und die richtige Wahl der Infrarot-Kameratechnik führen diese Untersuchungen zu dem erhofften Erfolg. Es ist wie überall - Qualität hat ihren Preis.

1. Infrarot-Thermografie

Durch regelmäßige Kontrollen mit leistungsfähigen Infrarot (IR)- Systemen wird seit vielen Jahren erreicht, dass eine hohe Verfügbarkeit der elektrischen Anlagen und damit der Versorgungssicherheit gewährleistet ist. Als klassisches Verfahren der technischen Diagnostik ist die Thermovisionmessung zu einem festen Bestandteil der zustandsbezogenen Jahresinspektionen geworden. Es gibt kein anderes Messverfahren, bei dem in solch kurzer Zeit so viele Schaltanlagen mit all ihren Trennern, Wandlern, Leistungsschaltern, Verschraubungen, Seilen oder anderweitigen Verbindungen untersucht werden können. Da thermische Erwärmungen bei der Stromübertragung den meisten Verschleißerscheinungen, Materialermüdungen oder Seilbrüchen vorausgehen, hat man durch diese Messung eine sehr große Sicherheit zur Erkennung für eine Vielzahl von Fehlern.

Autor

Dipl.- Ing. Sönke Krüll ist Geschäftsführer vom Ingenieurbüro Industrie Thermografie Krüll D - 99891 Tabarz/Thür. www.ITK-MESSTECHNIK.de Tel.: 03 62 59 / 50 991

An einem Tag können je nach Größe mehrere Umspannwerke untersucht werden.

Somit sind die thermografischen Messungen trotz der hohen Kamerakosten sehr wirtschaftlich. Für die Versorgungssicherheit ist eine ein- bis zweijährige turnusmäßige Überprüfung der Mittel- und Hochspannungsanlagen ausreichend. Sie ist jedoch stark vom Belastungszustand der Anlagen abhängig. Werden jedoch Anlagenteile ausgewechselt bzw. Wartungen durchgeführt, wo Verbindungen an Transformatoren, Seilklemmen oder anderweitigen Verschraubungen bewegt wurden oder generell auch nach dem Neubau, so ist es sinnvoll, direkt nach dieser Maßnahme eine Thermografie durchzuführen. Hier treten die häufigsten Fehler auf.

Da eine gute Technik nach wie vor sehr teuer ist und Erfahrungen vorhanden sein sollten, greifen die meisten Energieversorgungsunternehmen bei diesen Messungen auf qualifizierte und zertifizierte Ingenieurbüros zurück.

2. Zweck und Nutzen

- Dokumentation von Anlagenzuständen und potentiellen Risiken
- Früherkennung von Schwachstellen und Schäden
- Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit und -zuverlässigkeit
- Vermeidung von Folgeschäden
- Reduzierung der Brand- und Unfallgefahren

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.

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 vorgenannten 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 also unter Spannung durchgeführt werden können. Thermografie gehört heute zum Stand der Sicherheitstechnik.

3. Thermografiesysteme

Heutige hochleistungsfähige Thermografiesysteme liefern detailgetreue, temperaturkalibrierte Bilder und sind auf Grund ihres geringen Gewichtes und der guten Handhabbarkeit vielfältig einzusetzen. Anders als bei älteren IR-Kameras sind die Kameras der neuen Generation ungekühlt. Als FPA-Detektor (Focal Plane Array) wird ein ungekühlter Mikrobolometer eingesetzt, der durch eine vorgeschaltete Optik das IR- Bild erzeugt, welches durch die Vielzahl der Messpunkte bald Fotoqualität erreicht. Von -40°C bis +2.000°C und einer Bildwiederholfrequenz bis zu 50Hz können die zu

messenden Gegenstände erfasst werden. Auch Messungen an bewegten Objekten sind mit heutigen IR-Kamerasystemen möglich. Ähnlich wie beim Fotoapparat können durch verschiedene Optiken auch entfernte Anlagenteile untersucht werden. Hier gibt es jedoch keinen veränderlichen Zoom, sondern feste Brennweiten, da jedes Objektiv zusammen mit der IR-Kamera kalibriert werden muss. Die gespeicherten digitalen Wärmebilder werden mit spezieller Software kundenspezifisch ausgewertet.

Da solch ein hochwertiges Thermografiesystem mit verschiedenen Optiken ca. 60.000,- EURO kostet, ist es wie schon erwähnt meist kostengünstiger, diese Messungen einzukaufen. Dienstleistungsfirmen, welche diese Untersuchungen an Hochspannungsanlagen durchführen sind i.d.R. Elektrofachkräfte. Sie kommen neben verschiedenen Qualifikationen nicht umhin, sich für solch eine teure Technik zu entscheiden. Dies wiederum sollte Energieversorgungsunternehmen bei der Vergabe von Aufträgen veranlassen, sich genau über die bei der Messung eingesetzte Technik zu informieren, da es leider immer mehr Firmen gibt, die IR- Technik einsetzen, welche nicht zur Untersuchung von Hochspannungsanlagen geeignet ist.

3.1. Qualifikationen und Technik

Der Prüflingenieur zur Überprüfung von Hochspannungsanlagen 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 "Sachverständigen für Elektrothermografie" beim VdS oder dem VATH empfehlenswert und wird von den Versicherungen und dem Energieversorgungsunternehmen (EVU) oft 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 EVU's auf die Messungen und Prüfberichte verlassen müssen, sollten generell diese Schulungszertifikate angefordert werden.

Der Einsatz der berührungslosen IR-Messung zur thermischen Überprüfung von Hochspannungsanlagen 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 die Messentfernungen maximal bis 3 m betragen. Ab einer Spannungsebene von 110kV 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 ThermoCAM 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, welcher eine Ausdehnung von 13 mm nicht unterschreitet. 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 weggeschnitten; die Pixel der Digitalkamera oder die Messpunkteanzahl bei einer IR- Kamera werden zahlenmäßig nicht mehr. Man erhält nur ein höher gerastertes Bild.

Auch 12° Objektive verringern natürlich die geometrische Auflösung, aber auch bei Spannungsebenen ab 220kV oder wenn Seilverbinder an 110kV Überspannungen durch die große Messentfernung und den relativ kleinen Messobjekten thermisch untersucht werden müssen, sind diese Objektive ungeeignet. Auch sollten die Anzahl der Messpixel bei den IR- Kameras möglichst hoch sein, wenn Anlagenteile in großen Entfernungen untersucht werden müssen. Grundsätzlich sind die Auflösungen nicht mit einer Digitalkamera zu vergleichen. Diese messenden Bildpunkte der IR- Detektoren können je nach Kameratyp sehr stark schwanken. Ältere oder auch preiswerte IR- Kameras haben oft nur 140 x 140 = 19.600 Bildpunkte oder weniger. IR- Kameras der neuesten Generation sind ungekühlte Mikrobolometer Kameras. Ihr IR- Detektor besitzt bei hochwertigen Kameras eine Auflösung von 320x240 = 76.800 bis 307.200 Bildpunkte (640x480). Bei dieser Vielzahl von Messpunkten steigt natürlich die Auflösung und Schärfe eines jeden IR- Bildes.

Viele der heute angebotenen preisgünstigen IR- Kameras haben oft nur eine geringe Anzahl von messenden Bildpunkten und keine oder unzureichende Möglichkeit entsprechende Teleobjektive einsetzen zu können.

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

(oder Klappmonitor) anzuschließen, wie das Bild 1 zeigt. Über den Griff am LCD- Monitor sollten sich alle Kamera-



1 getrennter Aufbau von Monitor und IR- Kamera

funktionen steuern lassen. Dies hat den Hintergrund, dass sich gerade gießharzisierte Mittelspannungs- aber natürlich auch Niederspannungsanlagen durch den oft vorhandenen Berührungsschutz nur untersuchen lassen, wenn die IR- Aufnahmen über dem Berührungsschutz hinweg durchgeführt werden können. Auch bei luftisolierten Mittelspannungsanlagen verdeckt der Leistungsschalter die eigentlichen Kontaktstellen. Durch die getrennte Bauweise von IR- Kamera und Monitor ist es jedoch trotzdem möglich, diese Anlagen fachgerecht untersuchen zu können, da so das IR-Bild immer begutachtet werden kann, obwohl die Kamera weit weg vom Körper gehalten werden muss. Bei einem starren System ist dies unmöglich.

Ebenso sind die schon erwähnten mittlerweile recht kostengünstigen IR- Kameras, welche schon unter 1.000,- EURO angeboten werden, ungeeignet, um Hochspannungsanlagen untersuchen zu wollen. Diese Kameras besitzen, neben vielen anderen Nachteilen, nur einen kleinen auf der Oberseite der Kamera befindlichen Bildschirm. Werden die IR- Kameras bei Sonnenschein verwendet, so ist auf diesem Bildschirm fast nichts mehr zu erkennen und eine Untersuchung von Freiluftanlagen wird unmöglich. Neben einem Okular, welches bei Sonnenschein unerlässlich ist, sollten die Kameras auch einen Schutzgrad von IP 54 aufweisen um den Einsatz bei allen Witterungsbedingungen garantieren zu können.

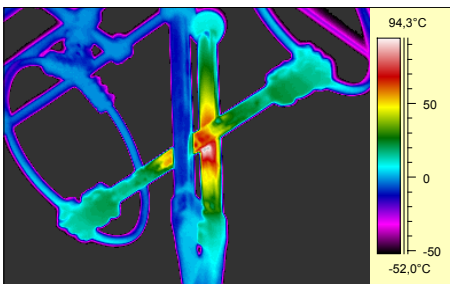
Das Strahlungsmaximum der Sonne liegt bei 0,47µm also im Bereich des sichtbaren Lichtes. Aus diesem Grund sind Reflexionen durch Sonnenstrahlung und somit Fehlmessungen bei kurzwelligen IR- Kameras eher möglich, da diese nahe dem Spektralbereich dieser Kurzwellenkameras liegen, welche im Bereich von 3-5µm arbeiten. Gerade bei der Untersuchung von Außenanlagen, wo oft die Sonnenstrahlung die Messungen behindern, sind langwellige IR- Systeme den kurzwelligen vorzuziehen, da eine Langwellenkamera im Wellenlängenbereich von 7,5-13 µm arbeitet und somit weit oberhalb des Strahlungsmaximums der Sonne liegt. Mit einer langwelligen Kamera, welche

die heutigen Mikrobolometerkameras in der Regel sind, treten somit weniger Reflexionen auf, welche zu Fehlinterpretationen bei der Klassifizierung von thermischen Schwachstellen führen können.

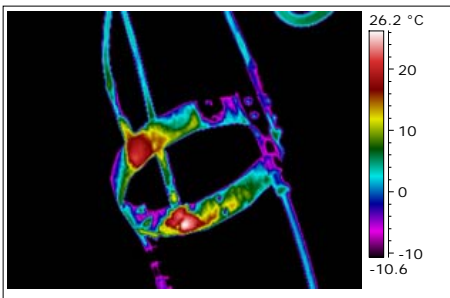
Eine IR- Kamera zur Untersuchung von Elektroanlagen muss Temperaturen bis 500°C erfassen können. Viele IR-Kameras, welche für den Baubereich konzipiert wurden, sind nur in der Lage Temperaturen bis ca. 80°C zu messen. Anhand verschiedener Beispiele soll nachfolgend die Notwendigkeit des Einsatzes von Teleobjektiven und anderer Techniken belegen, die bei der Untersuchung von Hochspannungsanlagen benötigt werden.

4. Beispiele für IR- Messungen

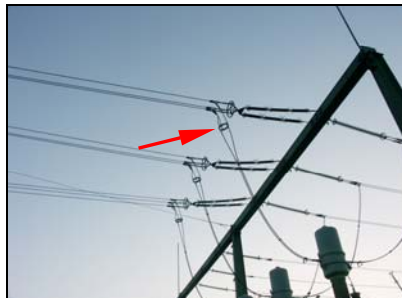
4.1. 380kV Scherentrenner und Ringverbinder



2 und 3 Heißstelle am Hauptkontakt eines 380 kV Scherentrenners

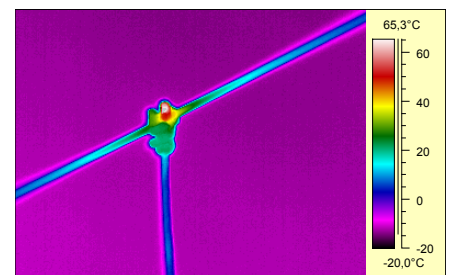
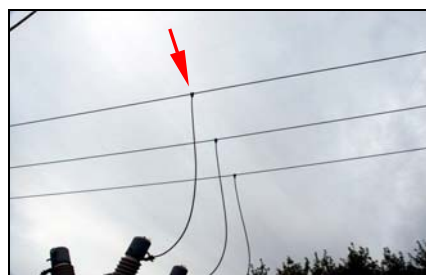
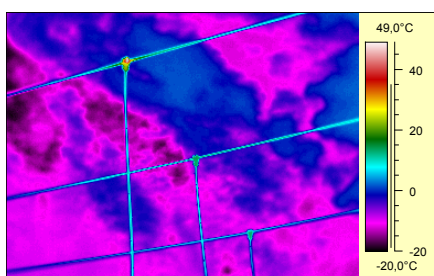


4 und 5 Heißstelle am 380 kV Ringverbinder zur Freileitung



Scherentrenner werden im Regelfall als Sammelschientrenner verwendet. Die häufigsten Fehlerquellen dieser Scherentrenner befinden sich an den Hauptkontakten, hervorgerufen durch einen ungenügenden Kontaktdruck, falsche Justage, Verschmutzungen, oder Einbranderscheinungen an den Kontaktflächen. Die Bilder 2 und 3 zeigen einen solchen 380kV Scherentrenner mit einer starken Erwärmung am Hauptkontakt. Solche Erwärmungen können so hoch sein,

noch digital 2-fach gezoomt. Ein Zoom ist jedoch erst ab einer Kameraauflösung von 640x480 Bildpunkten zu empfehlen, da bei geringeren Detektorauflösungen die IR- Bilder zu sehr gepixelt werden. Wird der Zoom zu groß, werden auch IR- Bilder mit den modernsten 640x480 Bildpunktkameras unansehnlich. Generell gilt, dass die Optik die Vergrößerung bringen sollte und nicht der digitale Zoom, da man hier schnell an die Grenzen kommt.



6 und 7 links 110kV T- Klemme mit 24° Objektiv und Foto 8, rechts dieselbe T- Klemme mit 7° Teleobjektiv aufgenommen.

- Ursache Bruch der Federscheibe -

dass ganze Trenner zerstört werden. Die Bilder 4 und 5 zeigen einen Ringverbinder von einem 380kV-Schaltfeld zu einem Freileitungseil. Diese Ringverbinder oder auch andere Überspannungsklemmen sind oft 20m entfernt und die zu messenden Schraubverbindungen im Vergleich dazu sehr klein. Ohne 7° Teleobjektiv und einer guten thermischen Auflösung der IR- Kamera ist hier meist nichts zu machen. Bei 20m Entfernung, einer Detektormatrix von 480x320 Bildpunkten und einem 7° Objektiv liegt das kleinste zu messende Objekt bei 18,6mm. Bei eine Detektormatrix von 640x480 Bildpunkten und 7° Teleobjektiv bei der gleichen Messentfernung kann das kleinste zu messende Objekt nur noch 9,3mm groß sein.

Das IR- Bild 4 ist mit einem 7° Teleobjektiv aufgenommen worden und dann

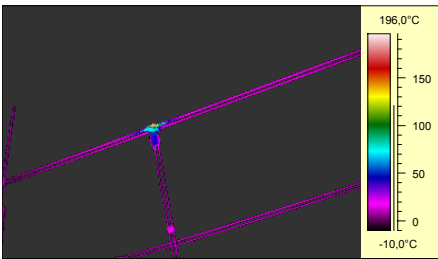
4.2. 110kV T- Klemmen

Werden ungeeignete Objektive verwendet, so kommt es oft zu Fehlmessungen in der Temperaturbestimmung wie die beiden unteren IR- Bilder 6 und 7 belegen. Die IR- Aufnahme 7 zeigt eine T- Klemme einer Überspannungsverbindung, welche mit einem 24° Normalobjektiv aufgenommen wurde. Die größte gemessene Temperatur wird mit +49,0°C an der T- Klemme bestimmt. Es ist zu erkennen, dass die Klemme über dem Leistungsschalter des Leiters L1 fehlerhaft ist. Erst mit dem Teleobjektiv wird sichtbar, was die Ursache dieser Erwärmung ist. Neben der genauen Zuordnung der Erwärmungsursache (hier rechte obere Schraubverbindung) zeigt das IR- Bild 7 der selben T- Klemme mit einem 7° Teleobjektiv eine weitaus größere gemessene Temperatur von +65,3°C an, obwohl die beiden dargestellten IR- Bilder wieder die selbe Klemme darstellen. Die Temperaturdifferenz beträgt in diesem Beispiel 16,3 K.

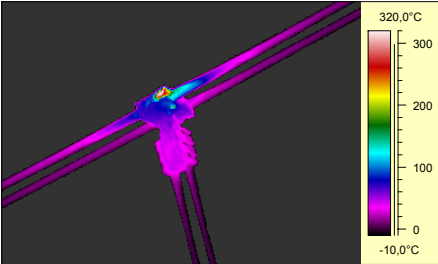
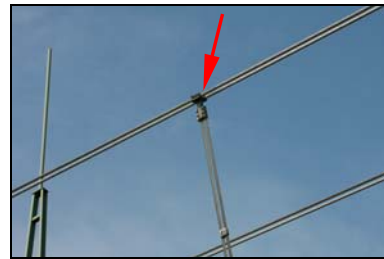
Noch krasser wird die Messung der Temperaturdifferenzen an den Beispielen der Bilder 9 bis 12 auf der nächsten Seite. An dieser T- Klemme, ebenfalls an einer 110kV Überspannungsverbindung ist mit einem 7° Teleobjektiv eine von ihren Ausmaßen sehr kleine aber prägnante Übertemperatur von +320°C zu messen.

Mit einem Normalobjektiv ist diese Fehlerstelle entsprechend IR- Bild 9 auch zu erkennen. Die Temperatur wird durch die große Messentfernung und die geringen Ausmaße des Übertemperaturbereiches um 124°C zu niedrig gemessen. Der Grund dafür ist wieder in der eingangs erwähnten geometrischen Auflösung (IFOV) der IR- Kameras zu suchen. Man kann keine kleinen Objekte in großen Entfernungen mit ungeeigneten Objektiven oder gar IR- Kameras mit einer geringen Bildpunktanzahl genau messen wollen. Dies muss unweigerlich zu Fehlmessungen und Falschinterpretationen führen.

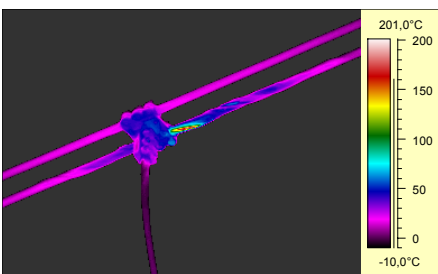
Ein weiteres Beispiel, wo man ohne richtige Technik den thermischen Fehler mit größter Sicherheit kaum gefunden hätte, zeigen die beiden Bilder 13 und 14. Ebenfalls eine 110kV T- Klemme an einer weit entfernten Überspannung. Die Untersuchung des Umspannwerkes wurde bei direkter



9 und 10 IR-Bild und Foto einer 110kV T-Klemme, aufgenommen mit einem 24° Normalobjektiv



11 und 12 IR-Bild und Foto einer 110kV T-Klemme identisch der Klemme im Bild 10 und 11 jedoch aufgenommen mit einem 7° Teleobjektiv



13 und 14 IR-Bild und Foto eines Aderbruchs an einem 110kV Überspannungsseil aufgenommen mit einem 7° Teleobjektiv



Sonneneinstrahlung vorgenommen. Die hohe Temperatur von +201°C ist nur an einer Ader des Leiterseils zu messen, deren Durchmesser unter 4 mm liegt. Durch den kleinen Durchmesser der einzelnen Ader des Seiles bedingt, ist diese sehr kleine Fehlerstelle in einer großen Entfernung in ihrer thermischen Ausdehnung sehr gering. Mit einer preiswerten IR-Kamera ohne Okular und ohne Teleobjektiv wäre dieser Fehler auf einem LCD-Monitor bei einer sehr hellen Umgebung und der sehr großen Messentfernung wohl kaum erkannt worden. Die Ursache der thermischen Auffälligkeit liegt im Bruch der äußeren Seiladern.

4.3. Beseitigung der Fehlerstellen

Größtenteils treten die Erwärmungen durch eine Erhöhung der Übergangswiderstände innerhalb der Verbindungen auf. Es gibt auch Bauteile mit hohen Temperaturen, welche durch eine falsche Wahl des Materials hervorgerufen werden. Das IR-Bild 15 zeigt eine solche 110kV Seilklemme an einer Überspannung. Die Erwärmung der Seilklemmen aus Temperguss wird durch Wirbelstrombildung hervorgerufen. Um diese Erwärmung zu beseitigen, kommt nur ein Austausch der Seilklemmen in Frage.

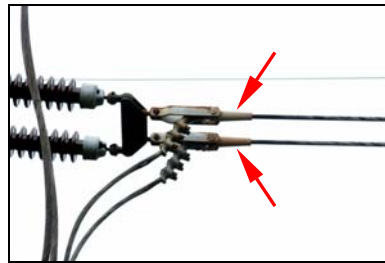
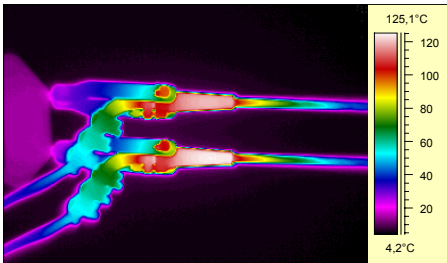
Im IR-Bild 17 wird ein Flachanschluss an einer 380kV Leistungsschalterverbindung dargestellt. Durch die große Entfernung wäre diese detaillierte Aufnahme ohne Teleobjektiv ebenfalls

nicht möglich gewesen und eine genaue Zuordnung der Schwachstelle könnte nicht erfolgen. Die thermische Schwachstelle besaß zum Zeitpunkt der Messung eine Temperatur von +230°C bei nur 14% der Nennlast. Rechnet man diese Temperatur auf den Grenzstrom hoch, so ergäbe sich eine theoretische Temperatur von ungefähr +2.600°C. Diese hohe Temperatur würde jedoch nie erreicht, da das Aluminium des Flachanschlusses bereits bei ca. 600°C schmelzen würde. Durch den Einsatz ungeeigneter Messtechnik wäre es hier wieder zu Fehlmessungen mit fatalen Folgen für das Energieversorgungsunternehmen gekommen. Mit einem IR-System, welches keine hohen Temperaturen erfassen kann, könnte die Temperatur gar nicht erst gemessen werden und ohne geeignetes Teleobjektiv oder nur mit einem kleinen Bildschirm bei starker Sonneneinstrahlung hätte man den Fehler wahrscheinlich auch wieder nicht erkannt. Jede nicht erkannte thermische Fehlerstelle im Hochspannungsbereich kann zu schwerwiegenden Schäden und großflächigen Stromausfällen führen. Meistens hängen an solch einer Hochspannungsverbindung große Versorgungsgebiete mit Städten und Betrieben. Wie abhängig der Mensch von einer kontinuierlichen Energieversorgung ist bemerkt man meist erst, wenn diese Energie z.B. durch die Einwirkung von Naturgewalten auf einmal nicht mehr

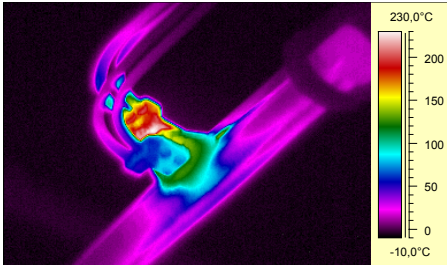
zur Verfügung steht. Bei allen Messungen in der Energieversorgung lastet eine sehr hohe Verantwortung auf dem Messingenieur und das beauftragende Energieversorgungsunternehmen muss sich stets voll auf die Messungen verlassen können. Da dies den EVU's bekannt ist, verlangt man in der Regel auch das schon erwähnte Zertifikat nach DIN EN 473 Stufe 2 und den Nachweis zum VdS Sachverständigen für Elektrothermografie oder den Sachverständigen für Elektrothermografie Stufe 2 (IT 2 Elektro).

Alle hier dargestellten sehr starken Temperaturanstiege an Verbindungsstellen haben oft einen banalen Hintergrund. Ihre Ursachen sind im Reißen von Schraubverbindungen, dem Bruch von Federscheiben oder Federn, der Zersetzung von Druckscheiben oder dem ungenügenden Anzugsdrehmoment von Schraubverbindungen zu suchen.

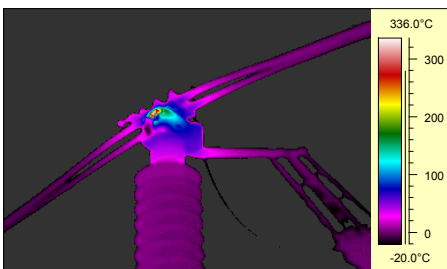
Wichtig bei allen thermischen Fehlern ist es, die Verschraubung nicht nur einfach anziehen zu wollen. Dies führt in der Regel zu keiner Beseitigung der Heißstelle. Werden zwei Strombahnen, wie z.B. der Flachanschluss in dem IR-Bild 17 mit einer Kraft aufeinander gedrückt, so ergeben sich auf Grund der Rauheiten auf den Verbindungsflächen nur mikroskopisch kleine, die Kraft übertragende Mikrokontakte, über die der Strom von einer Leiterfläche zur anderen übertragen werden kann. 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 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), sollten sie zur Verhinderung der Wassereindringung in die Kontaktfläche mit einem säurefreien Fett bestrichen und zusammengefügt werden. Nur ein Nachziehen der Schraubverbindungen bringt also keine Verkleinerung des Übergangswiderstandes. Der Gütefaktor k_u gibt das Verhältnis des Verbindungswiderstandes R_v zum Widerstand R_l des homogenen Leiters gleicher Länge l_0 (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



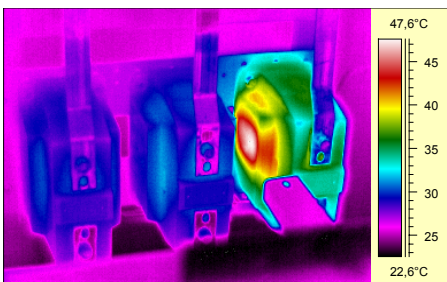
15 und 16 IR- Bild und Foto einer 110kV Seilabspannung aus Temperguss, aufgenommen mit einem 7° Teleobjektiv - Erwärmung durch Wirbelströme



17 und 18 IR- Bild und Foto eines 380kV Flachanschlusses an einer Leistungsschalterverbindung, aufgenommen mit einem 7° Teleobjektiv



19 und 20 IR- Bild und Foto eines 110kV Pantographentrenners, aufgenommen mit einem 24° Normalobjektiv



21 und 22 IR- Bild und Foto eines 20kV Stromwandlers, aufgenommen mit einem 45° Weitwinkelobjektiv

mehr als 30 Jahren haben sollen, muss der Gütefaktor $k_u < 1,5$ betragen. Es gibt Bestrebungen, anhand des Gütefaktor k_u eine Lebensdauerberechnung der Verbindung durchzuführen. Diese Lebensdauerberechnung funktioniert allerdings nur, wenn der Belastungsstrom mindestens 35% des Bemessungsstromes beträgt und keine ungeplanten Veränderungen zwischen den Strombahnen zu verzeichnen sind. Bei den normalen Überprüfungen reichen 10% Nennlaststrom aus. Die Bilder 6 bis 14 und 17 bis 22 zeigen, dass eine Lebensdauerberechnung durch unvorhersehbare Ereignisse oft gar nicht möglich ist. Die Fehlerstellen der Bilder 9 bis 14 wurden in einem Umspannwerk lokalisiert, welches erst neu errichtet wurde. Im ersten Jahr wurden in diesem Umspannwerk keine thermischen Fehlerstellen gefunden. Im zweiten Jahr wurde die Fehlerstelle entsprechend der IR- Bilder 9 bzw. 11 lokalisiert und im dritten Jahr die

Fehlerstelle des Aderbruches an der T-Klemme der Überspannung entsprechend des IR- Bildes 13. Im IR- Bild 9 bzw. 11 ist ein starker Anpressdruckverlust durch den Bruch eines Teiles die Ursache der Erwärmung. Diese Ereignisse konnten nicht vorhergesehen oder durch ein noch so ausgeklügeltes Rechenverfahren erfasst werden und eine Lebensdauerberechnung wäre fehlgeschlagen. Die beiden Bilder 19 und 20 zeigen einen 110kV Pantographentrenner, dessen Einschlagkontakt sich auf 336°C erwärmt hat. Dies ist eine sehr hohe Temperatur bei einer während der Messung vorhandenen 50% - igen Nennlast des Trenners. Bei einer Hochrechnung auf Nennlast würde die Temperatur theoretisch bis auf ca. 700°C ansteigen. Der Sammelschienenrenner wurde sofort außer Betrieb genommen. Eine gebrochene Andruckfeder war die Ursache für diese starke Erwärmung. Auch hier wäre eine

Lebensdauerberechnung unmöglich gewesen.

Einen Fehler im Inneren eines 20kV Stromwandlers zeigt das IR- Bild 21. Bedingt durch die Innenraumanlage war hier sehr wenig Platz vorhanden und die Aufnahme musste mit einem 45° Weitwinkelobjektiv gespeichert werden. Da die Thermografie oft eine vergleichende Messung ist, macht es sich häufig erforderlich, alle 3 Leiter darzustellen, um die Schwachstelle richtig beurteilen zu können. Die gemessene Temperatur von 47,6°C ist normalerweise nicht kritisch. Bei diesem rechten Wandler ist jedoch ein schneller Austausch anzuraten, da durch den Vergleich der 3 Leiter deutlich die starke Temperaturerhöhung des Wandlers am Leiter L3 im IR- Bild zu erkennen ist. Diese Fehlerstelle wäre weder durch eine Sichtkontrolle, noch durch ein Nachziehen der Schraubverbindung zu erkennen gewesen. Durch die in Gießharz ausgeführte Stromwandlerart, besteht hier die große Gefahr, dass er irgendwann explodieren wird.

5. Leitungsbefliegungen

Freileitungen im 110, 220 oder 380kV Bereich werden turnusmäßig einer Sichtkontrolle unterzogen. Wegen den großen Leitungslängen von oft mehreren hundert Kilometern fliegt das Energieversorgungsunternehmen diese meist ab. Neben der Sichtkontrolle werden dann öfters ebenfalls Infrarotmessungen durchgeführt. Lose und defekte Verbindungen an den Seilen können somit ebenfalls rechtzeitig lokalisiert werden.

Die Firma PERGAM-SUISSE AG aus der Schweiz hat hierzu eine neues 4-Achsen stabilisiertes System entwickelt, durch welches die Inspektion der Freileitungen noch effektiver wird. Eine hochauflösende Infrarotkamera mit 640x480 Pixel mit 12°- Optik und eine hochauflösende Sichtkamera speichern kontinuierlich die Infrarot- und Sichtbilder auf Festplatten. Die GPS- Daten werden ebenfalls mit aufgezeichnet, wodurch die später einlesbaren Daten in Google Earth ein genaues Bild der geflogenen Strecke wiedergeben.



23 kreiselstabilisierte Plattform zur Aufnahme von IR- und Sichtkamera am Helikopter

Das Bild 23 zeigt die am Helikopter angebaute kreiselstabilisierte Plattform. Die Plattform und auch die beiden Kameras sind aus dem Helikopter

mittels Tastatur und Joystick zu steuern.

Eventuelle Fehlerstellen an den Leitungen sind schon bei der Befliegung zu erkennen. Bei den späteren Auswertungen läuft auf einem Rechner das Sichtbild und auch das IR-Bild nebeneinander und eine genaue Zuordnung der Fehlerstellen ist auch im Büro möglich. Unterstützt wird die Fehlerstellenposition durch das GPS-System, deren Daten im Sichtbild eingeblendet werden. Das untere Sichtbild und IR- Bild 24 und 25 sind aus der Videosequenz herausgenommen und zeigen einen 220kV-Freileitungsmast mit 2 Leitungssystemen. Die permanent gespeicherten GPS- Daten ergeben über Google Earth ein genaues Bild der abgeflogenen Strecke. Im Nachhinein ist somit auch exakt zu messen, wie groß der Abstand von der Freileitung zur Kamera gewesen ist. Auf einem Freileitungsmast sind meist 2 Leitungssysteme aufgehängt. Dies bedeutet,

5. Fazit

Unter dem Gesichtspunkt der notwendigen Inspektion von Elektroenergieanlagen und des Brandschutzes sowie der Sicherheit und der Versorgungszuverlässigkeit sind thermografische Messungen von unbestreitbarem Nutzen. Es werden dadurch Zustände sichtbar gemacht, die für das menschliche Auge unsichtbar bleiben würden. Durch die Lokalisierung von Fehlerstellen können rechtzeitig punktgenaue Instandsetzungsmaßnahmen eingeleitet und somit Folgeschäden vermieden werden.

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 sind somit weitestgehend auszuschließen.

höherer Sicherheit und nahezu uneingeschränkter Verfügbarkeit beim Betreiben von elektrischen Anlagen. Um diese hohe Aussagekraft der IR-Messungen in ihrer Messgenauigkeit nicht zu schmälern und um Fehlmessungen zu vermeiden, ist es jedoch unverzichtbar, neben einem hohen Qualifikationsstand der Messingenieur auch eine Technik einzusetzen, welche den Anforderungen gerecht wird. Das Messergebnis muss nachvollziehbar sein und mit einer hohen Genauigkeit erfolgen, um in Grenzfällen jederzeit vor weiteren Schäden reagieren zu können. Nur so können rechtzeitig die notwendigen Gegenmaßnahmen eingeleitet, Folgeschäden verhindert und eine hohe Versorgungssicherheit gewährleistet werden.

Kontinuierliche jährliche Messungen in Energieversorgungsunternehmen von vielen tausenden Schaltfeldern in allen Spannungsbereichen ergaben folgende prozentuale Fehlerhäufigkeiten:

Spannungsebene	Fehlerhäufigkeit
0,4kV	2%
6-30kV	5%
110kV	10%
220kV	15%
380kV	17%

In betrieblichen Elektroanlagen würde diese Statistik anders aussehen, da dort die großen Leistungen über die 0,4kV Spannungsebene abgedeckt werden.



24 und 25 220kV Freileitungsmast im Sicht - und IR- Bild



26 GPS- Daten in Google Earth eingeladen ergeben das genaue Streckenbild der Leitungsbefliegung

dass jedes Leitungssystem einzeln befliegen werden sollte, um den Messabstand möglichst klein zu halten (s. IFOV). Das untere Bild 26 zeigen die GPS- Daten, welche in eine Karte eingeladen wurden. Die blaue Linie zeigt die geflogene Strecke des Helikopters somit sehr gut. In der rechten Bildhälfte des Luftbildes wird ein Umspannwerk sichtbar, in welches die gemessenen Freileitungen führen.

In Produktionsbetrieben entstehen z.B. ca. 35% aller Betriebsbrände durch thermische Überhitzungen elektrischer Anlagen. Bereits nach der zweiten thermografischen Untersuchung sinkt die Ausfallquote um 80%. Darüber hinaus ergeben sich wirtschaftliche Nutzeffekte, die von den Brandschutzversicherungen honoriert werden. Ob in der Energieerzeugung, -weiterleitung oder -verteilung führen turnusmäßige IR- Messungen zu nachweisbar