

Thermographische Inspektion von Hochspannungsanlagen : periodische visuelle und infrarotgestützte Kontrollen erhöhen die Betriebssicherheit

Autor(en): **Moor, Willy / Florin, Christian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **85 (1994)**

Heft 7

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-902554>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eine periodische Kontrolle von Hoch- und Niederspannungsanlagen mit thermographischen Methoden unterstützt in sicherer und höchst rationeller Art die vorbeugende Instandhaltung. Schwachstellen an unter Spannung stehenden Anlageteilen entwickeln sich in den meisten Fällen schleichend. Mit einer modernen Infrarot-Gerätetechnik erkennt aber erfahrenes Messpersonal sogenannte Hot spots frühzeitig. Betriebsausfälle, Sachschäden und Brandausbrüche mit oft hohen Folgeschäden lassen sich vermeiden.

Thermographische Inspektion von Hochspannungsanlagen

Periodische visuelle und infrarotgestützte Kontrollen erhöhen die Betriebssicherheit

■ Willy Moor und Christian Florin

Die Darstellung der Wärmestrahlung mittels thermographischer Messverfahren ermöglicht die Beurteilung des Zustandes von Hochspannungsanlagen. Solche Thermogramme lassen erkennen, welche Anlageteile wo und mit welcher Intensität Wärme abstrahlen, geben also Auskunft über ihre Temperatur. Thermogramme sind daher ein Werkzeug zur Schadensverhütung und erlauben eine zerstörungsfreie Diagnose von komplexen Anlagen. Mit Routineinspektionen können Schäden und Ausfälle verhütet und mit gezielten Messungen Schwachstellen lokalisiert werden. Thermogramme werden auch auf anderen Gebieten benutzt, so zur Klassierung von Energieverlusten im Bausektor, zur Beurteilung von Umweltschäden (Deponien, Gewässer, Wälder usw.) oder zur Diagnose in der medizinischen Anwendung (siehe Kasten).

Die thermographische Messung

Physikalische Grundlagen der Thermographie

Thermographische Methoden zur Temperaturbestimmung oder zur Feststellung von Temperaturunterschieden beruhen auf der Tatsache, dass jeder Körper, entsprechend seiner Temperatur, elektromagnetische Strahlung aussendet. Das Emissions-

spektrum, das heisst die Intensität der Strahlung als Funktion ihrer Wellenlänge, wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben (Bild 1). Nach diesem Gesetz nimmt die Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers mit seiner Temperatur stark zu. Zudem verschiebt sich die Wellenlänge der maximalen Strahlungsintensität mit steigender Temperatur gegen den von unserem Auge wahrnehmbaren (sichtbaren) Bereich. Aus Bild 1 erkennt man, dass im betrachteten Temperaturbereich die ausgesandte Strahlung hauptsächlich im Infrarot(IR)-Bereich und nur ein ganz kleiner Teil im sichtbaren Bereich liegt. Diese Tatsache wird beispielsweise bestätigt beim Erhitzen eines Eisenstabes, welcher ab etwa 500°C zu glühen beginnt, also sichtbares (rotes) Licht aussendet, und bei noch höheren Temperaturen noch stärker und heller leuchtet. Tatsächlich strahlt der

Weitere Einsatzbereiche von Infrarotkameras

- Gebäudeuntersuchung auf Energieverluste
- Gebäudeuntersuchung auf Feuchteschäden
- Ortung von Leitungssystemen
- Ortung von Leckstellen
- Medizin
- Deponieuntersuchungen
- Gewässerverschmutzung
- Wald- und Flurschäden
- industrielle Anwendungsbereiche
- Brandbekämpfung

Adresse der Autoren:
Willy Moor und Christian Florin, Ing. HTL,
Flir AG, Arsenalstrasse 40, 6010 Kriens.

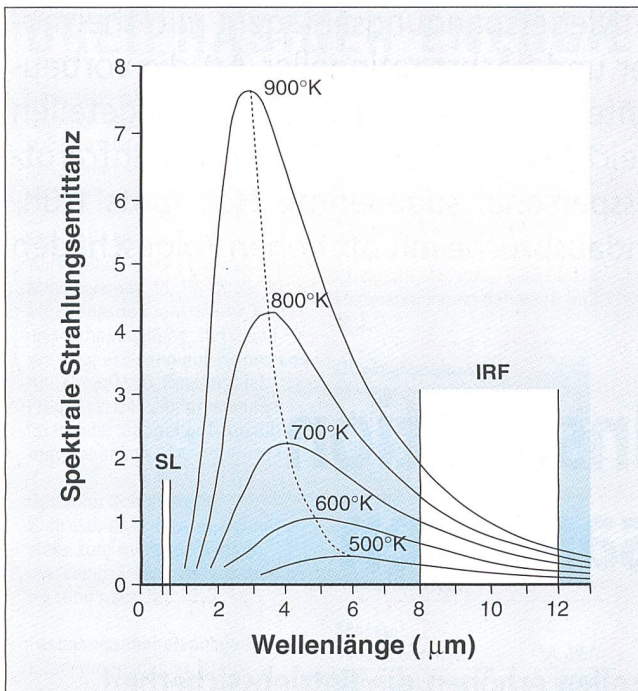


Bild 1 Strahlungsverteilung eines schwarzen Körpers

Das für spezifische Temperaturen dargestellte Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der Strahlungsemission eines schwarzen Körpers und seiner absoluten Temperatur. Für reale Körper sind die Intensitäten mit dem sogenannten Emissionsfaktor (≤ 1) zu korrigieren.

SL sichtbares Licht
IRF Infrarot-Fenster 8-12 µm; in diesem Bereich arbeiten verschiedene der unten erwähnten Infrarotgeräte

Eisenstab bereits bei viel tieferen Temperaturen, hier allerdings vorwiegend in Form von längerwelliger (unsichtbarer) IR-Strahlung (auch Wärmestrahlung genannt).

Die Thermographie benützt nun diese Zusammenhänge, um aus der IR-Strahlung eines Körpers seine Temperatur berührungsfrei zu messen. IR-Strahlung ist für das menschliche Auge unsichtbar, ihre Intensität kann aber mit geeigneten Geräten, das heisst mit IR-Geräten, genau gemessen werden. In Analogie zur Fotografie, welche die «Lichtverteilung» aufzeichnet, dient die Thermographie zur Aufzeichnung der «Temperaturverteilung». Während normale optische Geräte die Objekte aufgrund des von ihnen zurückgestreuten sichtbaren Lichtes, welches normalerweise von einer fremden Lichtquelle stammt (Sonne, Scheinwerfer, Foto-Blitzgerät usw.), abbilden, stellen Infrarotgeräte die Gegenstände aufgrund der von diesen selbst ausgestrahlten IR-Strahlung dar (z.B. Nachtsichtgeräte; sie brauchen also keine Beleuchtung); Helligkeitsunterschiede auf thermographischen Bildern bedeuten also Unterschiede in der Temperatur der abgebildeten Objekte.

Für quantitativ korrekte Messungen von Oberflächentemperaturen sind aber weitere Faktoren zu berücksichtigen, welche in der obigen vereinfachten Darstellung nicht erwähnt wurden. So ist zu beachten, dass die Kurven nach Bild 1 nur für sogenannte schwarze Körper gelten. Für die normalerweise vorkommenden Objekte sind die Kurven aus Bild 1 mit einem empirisch zu bestimmenden, wellenlängenabhängigen Emissionsfaktor $E(\lambda) \leq 1$ zu korrigieren.

Bei thermographischen Messungen muss daher gleichzeitig die materielle Zusammensetzung der Messobjekte berücksichtigt werden. Auf weitere Einflussgrößen, welche bei Messungen zu berücksichtigen sind, wird im letzten Kapitel dieses Artikels eingegangen.

Geräte der Thermographie

Die moderne Thermographie nutzt ein breites Gerätespektrum für die verschiedensten Wellenlängen und mit unterschiedlicher Auflösung und Optik: Es reicht vom kleinen, portablen Hand- oder Stativ-Wärmebildsystem bis zum Hochlei-

stungsscanner, welcher vorwiegend vom Helikopter oder Flugzeug aus eingesetzt wird. Allen Fällen ist gemeinsam, dass die Geräte die Wärmestrahlung mittels hochsensibler Sensoren in ein sichtbares Bild umwandeln.

Der Hochleistungsthermalscanner: Einen Thermalscanner moderner Bauart zeigt Bild 2. Dieser ermöglicht eine hohe geometrische Auflösung mit über 200 000 Bildpunkten (und damit Temperaturpunkten) pro Bild. Aufnahmedistanzen auch über 500 m ergeben immer noch äusserst präzise Wärmebilddaten. Eine hohe Bildfolge von 50 Bildern pro Sekunde ermöglicht weitflächige komplexe Anlagen und Übertragungsleitungen über Hunderte von Kilometern in rationeller Art zu erfassen und aufzuzeichnen. Der Einsatz des Thermalscanners erfolgt vorwiegend aus dem Helikopter, aus langsam fliegenden Flächenflugzeugen oder ab topographisch günstig gelegenen Kamerastandorten.

Die FSI-Kamera: Ein tragbares Wärmebildsystem, ähnlich einer normalen Video-

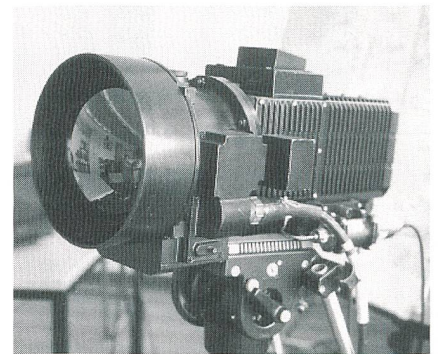


Bild 2 Hochleistungsthermalscanner JR18

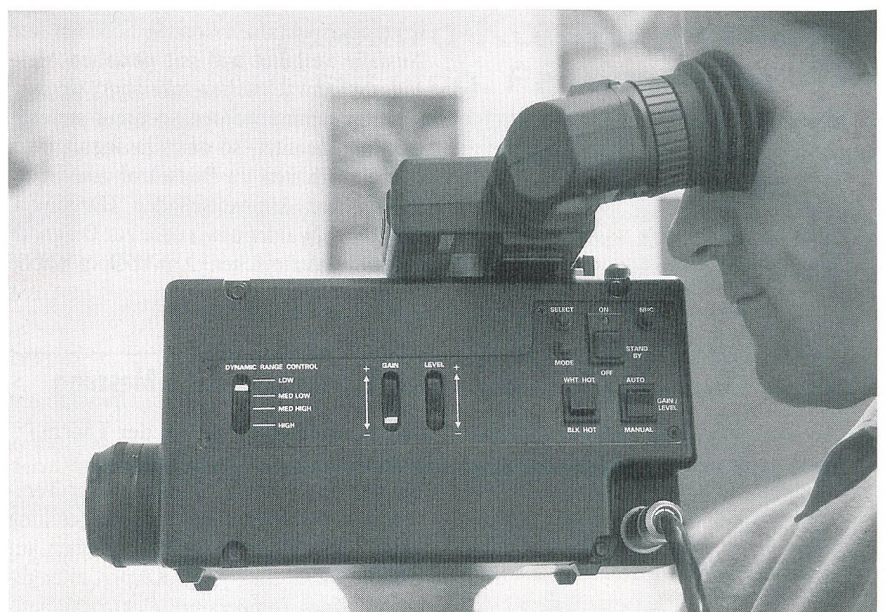


Bild 3 FSI-Kamera

kamera, zeigt das Bild 3. Solche Focal plane Array-Kameras enthalten kein Abtastsystem mehr. Die gesamte Objektszene wird direkt und ohne Zeilensprung auf einem Array von 320x240 Sensoren abgebildet. Ein Minikühler ersetzt die Stickstoffkühlung und ermöglicht eine stete Einsatzbereitschaft. Das Infrarotbild wird als Videosignal (PAL) bereitgestellt.

Beispiele thermographischer Kontrollen an HS-Anlagen

Hot spots in elektrischen Anlagen sind untrügliche Hinweise, dass sich eine Störung anbahnt. Lose Schraubenverbindungen, hohe Übergangswiderstände, Schäden an Isolationen und Dielektrika machen sich unter Belastung durch lokale Wärmeentwicklung bemerkbar.

Durch thermographische Messungen werden solche Schwachstellen sichtbar, so dass vorbeugende Massnahmen getroffen werden können, bevor es zu einem unliebsamen Ausfall kommt. In der Praxis stellt man oft aufgrund elektrischer Messdaten fest, dass irgendwo in einem Strang etwas nicht normal ist, kann aber den Fehlerort nicht ohne weiteres eruieren; mit Thermographie lässt sich dieser meist relativ einfach finden.

Für Hochspannungsanlagen im Betrieb gilt «Zutritt verboten», und es ist praktisch auch nicht möglich, im Hochspannungsbereich Temperaturfühler mit entsprechenden Messleitungen einzusetzen. Ganz abgesehen von Isolationsproblemen stellt sich die Problematik der grossen Abmessungen. Die Thermographie erlaubt eine berührungslose Abtastung und kann über Distanzen von mehr als hundert Metern eingesetzt werden.

Innenraumanlagen

Für die Inspektion von Innenraumanlagen sind kleine tragbare Wärmebildsysteme geeignet. Diese Messgeräte werden von einem Operateur getragen. Ähnlich einer Videokamera dient die Infrarotkamera zur Aufnahme der einzelnen Schaltfelder oder Anlagenteile. Ist eine Schachstelle vorhanden, erscheint auf dem Infrarotbild im Monitor eine erhöhte Strahlungsdichte. So zeigt das Bild 4 die Schwachstelle bei einer Trafоеinführung, welche bei einer Belastung von 70% eine Temperaturüberhöhung von +52,9 °C erfährt. Aufgrund dieser Informationen lässt sich die Temperaturüberhöhung für eine 100%ige Belastung hochrechnen. In gleicher Weise zeigt das Bild 5 die Schwachstelle eines Trenners auf, welche bei einer Belastung von 80% zu einer Temperaturüberhöhung der kritischen Stelle von +92,5 °C führt.

Bild 4 Infrarot-Bild der Schwachstelle einer Trafоеinführung

Die Differenztemperatur beträgt: $a-b = 52,9^{\circ}\text{C}$ bei 70% Belastung

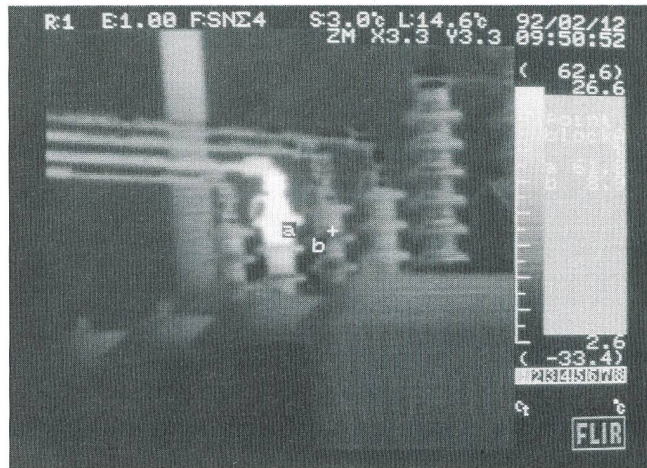
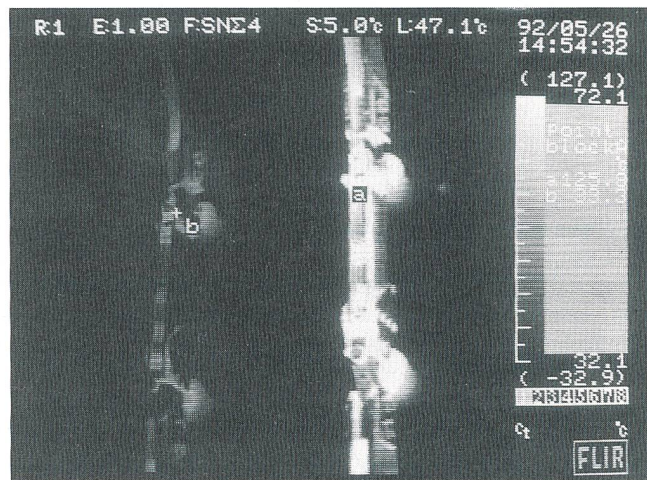


Bild 5 Infrarot-Bild der Schwachstelle eines Trenners

Die Differenztemperatur beträgt: $b-a = 92,5^{\circ}\text{C}$ bei 80% Belastung



Bei solchen Inspektionen, mit entfernten Abdeckungen, ist es sinnvoll, gleichzeitig visuelle und akustische Kontrollen durchzuführen. Verschmutzungen, fehlende Beschriftungen, ungenügende Abdeckungen usw. können gleichzeitig erfasst und in die periodischen Unterhaltsarbeiten eingebunden werden.

Freiluftschaltanlagen

Bei der Inspektion von Freiluftschaltanlagen spielen Umfang und Zugänglichkeit eine wichtige Rolle. Je nach Fall wird der Einsatz eines Thermal-scanners oder aber der kleineren, tragbaren und von Hand eingesetzten Wärmebildsysteme rationeller sein.

Mit dem Thermal-scanner lassen sich zuverlässige Inspektionen von Freiluftanlagen im Ausmass von 500x500 m in weniger als einer Stunde durchführen. Das Datenmaterial wird zu nachträglichem Auswertungszweck als Videoband gespeichert. Die kurze Messzeit ermöglicht eine Gesamtinspektion unter quasistationären Betriebsbedingungen. Schwachstellen können auf einfache Weise lokalisiert werden.

Wird ein tragbares Wärmebildsystem zur Inspektion vorgezogen, so können

gleichzeitig andere visuelle Kontrollen miteinbezogen werden. Der zeitliche Aufwand ist erheblich grösser als bei einer Inspektion mittels Hochleistungsthermalscanner. Das Bild 6 zeigt, wie auf diese Weise die Schwachstelle eines Schwenktrenners mit einer Temperaturüberhöhung von +27,8 °C (bei 50% Belastung) eindeutig lokalisiert werden kann.

Freileitungen

Für die Inspektion einer Freileitung wird vorteilhaft mit einem Hochleistungsscanner operiert. Sofern möglich, erfolgt die Inspektionsmessung entweder mit Geländefahrzeugen (bei befahrbarer Umgebung) oder mit einem Helikopter. Die Bilder werden laufend aufgezeichnet, örtlich zugewiesen (Numerierung, panchromatische Aufnahmen oder GPS-Positionierung) und im nachhinein detailliert ausgewertet.

Rationellerweise wird bei einem Helikoptereinsatz die visuelle Zustandskontrolle, insbesondere der Freileitungsmasten, miteinbezogen. Dies erspart nicht nur erhebliche Personal- und Transportkosten, sondern bietet auch die wesentlich günstigere Perspektive, als vom Boden aus,

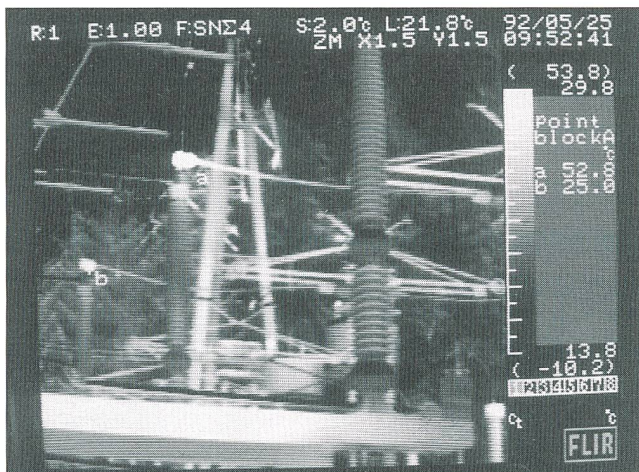


Bild 6 Infrarot-Bild der Schwachstelle eines Schwenktrenners
Die Differenztemperatur beträgt: $a-b = 27,8^{\circ}\text{C}$ bei 50% Belastung

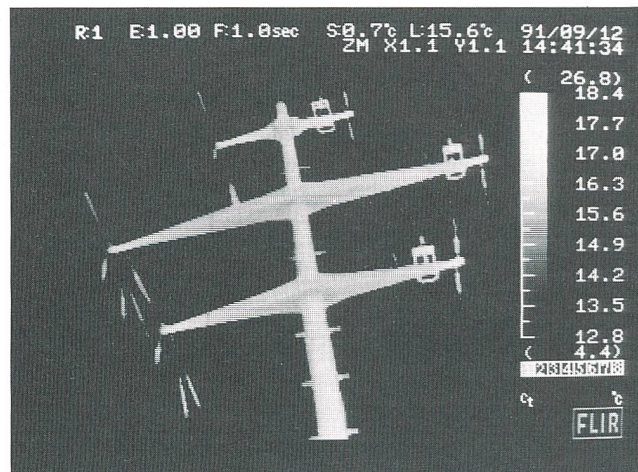


Bild 7 Infrarot-Bild eines Freileitungsmastes
Die Aufnahme erfolgte bei bedeckter Wetterlage. Die Freileitung war bei der Messung mit über 75% belastet. Keine Schwachstellen

und stellt so eine umfassendere Kontrolle sicher. Visuell werden abgebrochene Erdungslitzen und Vogelschutzbesen, Aus-sinterungen, Längsrisse und andere Beton-schäden an den Masten oder Mängel an den Auslegern festgestellt. Korrosionsschäden, behindernde Bäume und Sträucher, am Mast befestigte Weidezäune, fehlende Warntafeln und andere Beschädigungen werden im gleichen Arbeitsgang festge-stellt und protokolliert. Durch den geringen Abstand vom Masten zum Helikopter kann für die gleichzeitige thermographische Kontrolle das kleine Wärmebildsystem ein-gesetzt werden, was insbesondere in fla-chem Gelände den Einsatz von Kleinheli-koptern ermöglicht.

Erfahrungsgemäss ist es vorteilhaft, par-allel zur Freileitung zu fliegen und jeweils mit dem Heli bis zum nächsten Masten so tief als möglich abzusinken, um dann beim Masten selbst vertikal aufsteigend zu kon-trollieren (Bild 7). Zusätzliche, parallel ge-führte Freileitungen sowie Bäume und Waldpartien können allerdings das Ope-rationsfeld einschränken. Die Erfahrung zeigt, dass die Flugzeit für eine Kontroll-einheit (Flugdistanz zwischen den Masten plus Vertikalflug am Masten) weniger als eine Minute beträgt.

Thermographische Verfahren erfordern grosse Erfahrung

Die Infraroterkundung ist heute, ganz abgesehen vom militärischen Einsatz, in vielen Bereichen etabliert. Nebst dem Ein-satz in der Elektrizitätsindustrie stehen, wie schon erwähnt, der Bausektor, Fernheiz-systeme, Umwelterkundung und Gesamt-energieanalysen für einzelne Gemeinden und Städte im Vordergrund.

Der Einsatz der Infrarottechnik ist aber weitgehend eine Erfahrungswissenschaft.

Dies vor allem deshalb, weil in einem Wär-mebild doch recht viele Faktoren mitspielen und die Erfahrung hilft, die richtigen Mittel einzusetzen und die Bilder richtig zu inter-pretieren. Die zweckmässige Wahl der Mes-sapparatur, die Festlegung des Mess-ablaufes, die Wahl des Spektralbereiches, der Einbezug der erforderlichen thermi-schen und zeitlichen Auflösung, die Berück-sichtigung der Umgebungs- und Fremd-strahlung, Streustrahlung im Übertragungs-medium, Emissionsstrahlung auf der Ob-jektoberfläche sowie Hintergrundstrah-lungseffekte sind Faktoren, die grosse Er-

fahrung erfordern, um schnell und richtig auswerten zu können. Es ist deshalb nahelie-gend, dass sich werkseigene Infrarotequipen vorwiegend auf Routinemessungen konzen-trieren und sich spezialisierte Serviceunter-nehmen für komplexe Aufgaben und gene-relle Beratung auf diesem hilfreichen Nischengebiet anbieten. Sie gewährleisten in Zusammenarbeit mit dem werkseigenen Personal, insbesondere im Falle der gleich-zeitigen visuellen Kontrolle, die optimalen Voraussetzungen, um das Mittel Infrarot-inspektion für die Betriebssicherheit von Hochspannungsanlagen einzusetzen.

Inspection thermographique des installations de haute tension

Des contrôles visuels périodiques à l'aide du rayonnement infrarouge augmentent la sécurité de fonctionnement

Le contrôle périodique des installations de haute et moyenne tension par des métho-des thermographiques est une aide sûre et rationnelle à la maintenance préventive. Les points faibles dans les parties d'installations sous tension se développent dans la majorité des cas de manière furtive. Des appareils à infrarouge modernes permettent de détecter à temps les «Hot spots» et d'éviter ainsi des arrêts, des dommages matériels, des débuts d'incendie souvent suivis d'importants dommages indirects.

Les méthodes thermographiques permettent de mesurer sans contact la température d'un corps grâce à son rayonnement IR (fig. 1). Une grande palette d'appareils travail-lent actuellement sur diverses longueurs d'onde et avec une résolution et un système optique adaptés. La figure 2 donne en exemple un scanner thermique à haute perfor-mance de construction moderne et la figure 3 un système portatif à image obtenue par rayonnement thermique, qui ressemble à une vidéocamera normale. Les images ainsi réalisées présentent les dommages sur les installations électriques le plus souvent comme des points à température accrue donc à intensité spécifique accrue du rayonne-ment. La figure 4, par exemple, montre une introduction défectueuse dans un transfor-mateur qui, chargé à 70%, subit une augmentation de température de $+52,9^{\circ}\text{C}$. De la même manière, les figures 5 et 6 indiquent des points faibles sur des sectionneurs. La figure 7, finalement, montre une prise de vue aux rayons infrarouges d'un pylône de ligne aérienne sur lequel aucun point faible n'a pu être détecté.