

Einführung zu den Thermografie- Prinzipien



AMERICAN TECHNICAL PUBLISHERS, INC.
ORLAND PARK, ILLINOIS 60467-5756



Einführung zu den Thermografie-Prinzipien enthält in Industrie und Gewerbe häufig verwendete Verfahren. Die konkreten Verfahren variieren je nach Aufgabe und müssen von einer qualifizierten Person durchgeführt werden. Um maximale Sicherheit zu gewährleisten, sind die speziellen Herstellerempfehlungen, Versicherungsbestimmungen, speziellen Einsatzort- und Betriebsverfahren, geltenden Bundes-, Landes- und kommunalen Bestimmungen sowie alle Vorschriften der zuständigen Behörden zu beachten. Der Inhalt ist als Bildungsmaterial für den Anwender gedacht. Weder American Technical Publishers, Inc. noch Fluke Corporation noch The Snell Group übernehmen irgendeine Haftung für Ansprüche, Verluste oder Schäden (einschließlich Sach- und Personenschäden), die durch das Vertrauen auf die Richtigkeit dieser Informationen entstehen.

© 2009 American Technical Publishers, Inc. Fluke Corporation und The Snell Group.
Alle Rechte vorbehalten.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 – 09 – 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Gedruckt in den Niederlanden

ISBN 978-0-8269-1535-1





INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG ZUR INFRAROT-THERMOGRAFIE UND ZU WÄRMEBILDKAMERAS	1
	<i>Infrarot-Thermografie • Geschichte der Infrarottechnologie • Funktionsprinzip von Wärmebildkameras</i>	
2	THERMOGRAFIE UND RENTABILITÄT	9
	<i>Fehlersuche</i>	
3	SCHULUNG UND SICHERHEIT	13
	<i>Qualifikation und Zertifizierung von Thermografieexperten • Sicherheit am Arbeitsplatz • Normen und schriftliche Inspektionsverfahren</i>	
4	THEORIE FÜR PRAXISANWENDUNGEN	19
	<i>Grundlagen der Thermodynamik • Wärmeübertragungsarten • Genauigkeit von Temperaturmessungen</i>	
5	FARBWÄRMEBILDER VON ANWENDUNGEN	29
6	THERMOGRAFIE-ANWENDUNGEN	45
	<i>Elektrische Anwendungen • Elektromechanische und mechanische Anwendungen • Prozessanwendungen • Gebäudediagnose</i>	
7	INSPEKTIONSMETHODEN	57
	<i>Vergleichsthermografie • Basisthermografie • Thermische Trenddarstellung</i>	
8	ANALYSE, BERICHTERSTATTUNG UND DOKUMENTATION	61
	<i>Inspektionsanalyse • Berichterstattung und Dokumentation</i>	
9	THERMOGRAFIE-RESSOURCEN	63
	<i>Ressourcen</i>	
10	WEITERE VERWANDTE TECHNOLOGIEN	65
	<i>Optische und akustische Inspektion • Elektrische Analyse • Luftultraschallerfassung • Schwingungsanalyse • Schmierölanalyse • Verschleißpartikelanalyse</i>	
	INDEX	67



Einführung zu den Thermografie-Prinzipien, erstellt in Zusammenarbeit mit Fluke Corporation und The Snell Group, soll als Einführung zu den Funktionsprinzipien und Verfahren von Wärmebildkameras dienen. Wärmebildkameras sind inzwischen unverzichtbare Werkzeuge für die Fehlersuche, die Aufdeckung von Mängeln bei der vorbeugenden Instandhaltung und als Diagnosegeräte für Elektriker und Techniker in industriellen, Prozess- und gewerblichen Anwendungen geworden. Sie sind auch ein wichtiges Werkzeug für Serviceanbieter in der Gebäudediagnose- und Inspektionsbranche. *Einführung zu den Thermografie-Prinzipien* behandelt die grundlegende Theorie, Funktion und Anwendung von Wärmebildkameras.

Zusätzliche Informationen zu den Prinzipien der Messgeräte, Fehlersuche, Instandhaltung und Gebäudeanwendungen von Fluke Corporation finden Sie im Internet unter www.fluke.com/thermography, von The Snell Group unter www.thesnellgroup.com und von American Technical Publishers, Inc. unter www.go2atp.com.

Der Herausgeber



EINFÜHRUNG ZUR INFRAROT-THERMOGRAFIE UND ZU WÄRMEBILDKAMERAS

Wärmebildkameras funktionieren auf der Grundlage von Prinzipien der Infrarot-Thermografie. Wärmebildkameras werden als kostensparende und oft gewinnbringende Messgeräte für die Fehlersuche, Instandhaltung und Inspektion von elektrischen Anlagen, mechanischen Systemen und Gebäudehüllen eingesetzt.

INFRAROT-THERMOGRAFIE

Infrarot-Thermografie ist die Wissenschaft der Nutzung elektronisch-optischer Geräte zur Erfassung und Messung von Strahlung und deren Korrelation zur Oberflächentemperatur. *Strahlung* ist die Bewegung von Wärme, die sich als Strahlungsenergie (elektromagnetische Wellen) ohne direktes Übertragungsmedium fortpflanzt. Bei der modernen Infrarot-Thermografie wird die Strahlung mit elektronisch-optischen Geräten erfasst und gemessen und mit der Oberflächentemperatur des untersuchten Bauwerks bzw. der untersuchten Anlage in Beziehung gesetzt.

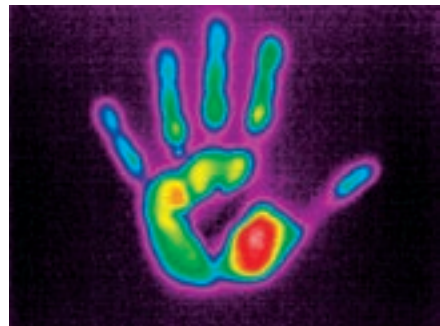
Menschen sind schon immer in der Lage gewesen, Infrarotstrahlung zu erfassen. Die Nervenendungen in der menschlichen Haut können auf Temperaturdifferenzen von nur $\pm 0,009\text{ }^{\circ}\text{C}$ reagieren. Für die zerstörungsfreie thermische Beurteilung sind die extrem reizempfindlichen menschlichen Nervenendungen allerdings nicht gut geeignet.

Selbst wenn Menschen zum Beispiel die thermischen Fähigkeiten von Tieren besäßen, die warmblütige Beute im Dunkeln finden können, wären immer noch bessere Wärmeerfassungsgeräte erforderlich. Da Menschen Grenzen bei der körperlichen Wärmeerfassung gesetzt sind, sind besonders wärmeempfindliche mechanische und elektronische Geräte entwickelt worden. Diese Geräte werden standard-

mäßig für die thermische Inspektion zahlloser Anwendungen verwendet.

GESCHICHTE DER INFRAROT-TECHNOLOGIE

Die wörtliche Bedeutung von „infrarot“ ist „jenseits von Rot“. Damit wird beschrieben, welchen Platz diese Wellenlänge im Spektrum der elektromagnetischen Strahlung einnimmt. Der Begriff „Thermografie“ ist von Stammwörtern abgeleitet, die „Temperaturbild“ bedeuten. Die Wurzeln der Thermografie gehen auf den deutsch-britischen Astronomen Sir Wilhelm Herschel zurück, der im Jahr 1800 Experimente mit Sonnenlicht durchführte.



Das Wärmebild der von einer Hand auf die Oberfläche einer gestrichenen Wand übertragenen Restwärme kann mit einer Wärmebildkamera problemlos erfasst werden.

Herschel entdeckte die Infrarotstrahlung, indem er Sonnenlicht durch ein Prisma leitete und mit einem empfindlichen Quecksilberthermometer die Temperatur der verschiedenen Farben maß. Herschel entdeckte, dass die Temperatur jenseits des roten Lichts höher wurde. Diesen Bereich bezeichnete er als „dunkle Wärme“. Diese Region des elektromagnetischen Spektrums wird heute als Infrarotwärme bezeichnet und als elektromagnetische Strahlung eingeordnet.

Zwanzig Jahre später entdeckte der deutsche Physiker Thomas Seebeck den thermoelektrischen Effekt. Dies führte zur Erfindung des Thermovervielfachers, einer frühen Version des Thermoelements, durch den italienischen Physiker Leopoldo Nobili im Jahr 1829. Diese einfache Kontakteinrichtung basiert auf der Prämisse, dass sich die Spannungsdifferenz zwischen zwei verschiedenartigen Metallen in Abhängigkeit von der Temperatur ändert. Nobilis Kollege, Macedonio Melloni, verfeinerte den Thermovervielfacher zu einer Thermosäule (eine Reihenanordnung von Thermovervielfachern) und fokussierte thermische Strahlung so darauf, dass damit die Erfassung von Körperwärme aus einem Abstand von 9,1 Metern (30 Fuß) möglich war.

Im Jahr 1880 erfasste der amerikanische Astronom Samuel Langley mit einem Bolometer die Körperwärme einer Kuh aus einer Entfernung von 304 Metern (1000 Fuß). Statt der Messung einer Spannungsdifferenz wird bei einem Bolometer die Änderung des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit von der Temperaturänderung gemessen. Der Sohn von Sir Wilhelm Herschel, Sir John Herschel, konnte 1840 mit einem als Evaporograph bezeichneten Gerät das erste Infrarotbild erstellen. Das Wärmebild entstand dabei durch die differenzielle Verdampfung eines dünnen Ölfilms und wurde durch über den Ölfilm reflektiertes Licht sichtbar gemacht.

Eine *Wärmebildkamera* ist ein Gerät, das Wärmemuster im Infrarotspektrum erkennt, ohne

dass ein direkter Kontakt mit der entsprechenden Anlage besteht. **Siehe Abbildung 1-1.** Frühe Versionen von Wärmebildkameras wurden als fotoleitfähige Detektoren bezeichnet. Von 1916 bis 1918 experimentierte der amerikanische Erfinder Theodore Case mit fotoleitfähigen Detektoren, um ein Signal durch direkte Interaktion mit Photonen statt durch Erwärmung zu erzeugen. Das Ergebnis war ein schnellerer fotoleitfähiger Detektor mit höherer Empfindlichkeit. In den 1940er und 1950er Jahren wurde die Thermografiertechnologie für eine wachsende Anzahl militärischer Anwendungen weiterentwickelt. Deutsche Wissenschaftler entdeckten, dass die Gesamtleistung durch die Kühlung des fotoleitfähigen Detektors gesteigert werden konnte.

Erst ab den 1960er Jahren wurde die Thermografie auch für nichtmilitärische Anwendungen genutzt. Obwohl frühe Thermografiesysteme unhandlich waren, nur eine langsame Datenerfassung ermöglichten und eine niedrige Auflösung hatten, wurden sie für industrielle Anwendungen wie die Inspektion von großen elektrischen Übertragungs- und Verteilungsanlagen eingesetzt. Nach kontinuierlichen Fortschritten bei militärischen Anwendungen in den 1970er Jahren konnten die ersten tragbaren Systeme für Anwendungen wie Gebäudediagnose und zerstörungsfreie Prüfung von Materialien hergestellt werden.

TECHNIKTIPP

Bei den ursprünglichen Wärmebildkameras wurden die Wärmebilder über Schwarz-Weiß-Elektronenstrahlröhren (Cathode Ray Tube, CRT) sichtbar gemacht. Dauerhafte Aufzeichnungen waren mithilfe von Fotos oder Magnetband möglich.

Wärmebildkameras

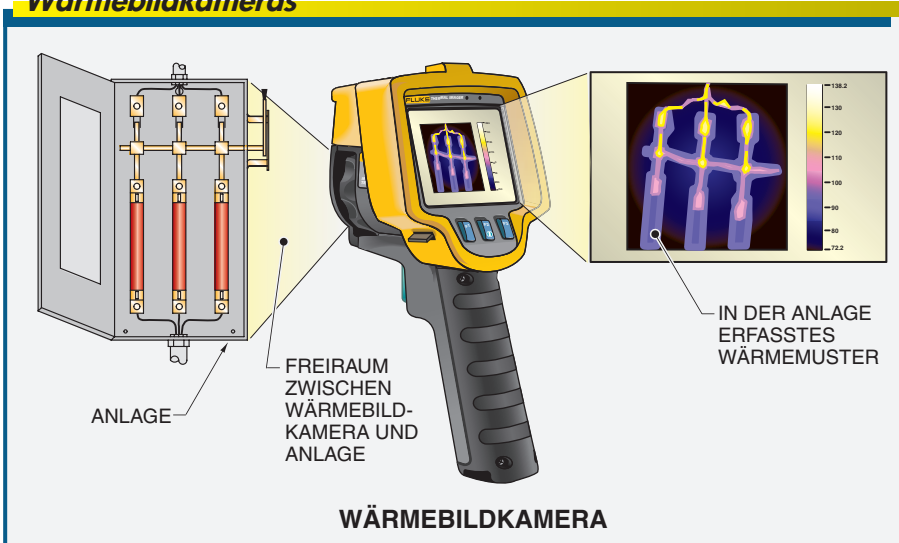


Abbildung 1-1. Eine Wärmebildkamera ist ein Gerät, das Wärmemuster im Infrarotspektrum erkennt, ohne dass ein direkter Kontakt mit der entsprechenden Anlage besteht.

In den 1970er Jahren waren Thermografiesysteme bereits haltbar und zuverlässig, die Bildqualität war jedoch im Vergleich mit modernen Wärmebildkameras noch mangelhaft. Zu Beginn der 1980er Jahre war die Thermografie für medizinische Zwecke, in der allgemeinen Industrie und für Gebäudeuntersuchungen bereits weit verbreitet. Thermografiesysteme wurden so kalibriert, dass vollständig radiometrische Bilder entstanden, damit in allen Bildbereichen radiometrische Temperaturen gemessen werden konnten. Ein *radiometrisches Bild* ist ein Wärmebild, das Temperaturmessungsberechnungen für verschiedene Punkte im Bild enthält.

Zuverlässige, verfeinerte Wärmebildkammerakühler ersetzen das zuvor für die Kühlung von Wärmebildkameras verwendete komprimierte oder verflüssigte Gas. Zudem wurden kostengünstigere pyroelektrische Vidikon-Thermografiesysteme (PEV) auf Röhrenbasis entwickelt und in großem Umfang produziert. Obwohl sie nicht auf dem radiometrischen Prinzip beruhen, waren

PEV-Thermografiesysteme leicht und tragbar und konnten ohne Kühlung betrieben werden.

In den späten 1980er Jahren wurde vom Militär ein neues Gerät mit der Bezeichnung Bolometermatrix (FPA) für den kommerziellen Markt freigegeben. Eine *Bolometermatrix (FPA)* ist eine Bilderfassungseinrichtung, die aus einer in der Regel rechteckigen Matrix aus Infraroterfassungsdetektoren besteht und in der Brennebene eines Objektivs angeordnet ist. **Siehe Abbildung 1-2.**

Dies war eine erhebliche Verbesserung gegenüber den ursprünglichen gescannten Detektoren, die eine bessere Bildqualität und räumliche Auflösung ermöglichte. Typische Matrizen moderner Wärmebildkameras bieten Auflösungen zwischen 16×16 und 640×480 Pixel. Ein *Pixel* in diesem Sinne ist das kleinste unabhängige Element einer Bolometermatrix, das Infrarotenergie erfassen kann. Für spezielle Anwendungen sind Matrizen mit Auflösungen von mehr als 1000×1000 Pixeln verfügbar.

Die erste Zahl stellt die Anzahl der vertikalen Spalten, die zweite die Anzahl der auf dem Bildschirm angezeigten horizontalen Zeilen dar. Eine Matrix von 160×120 entspricht z. B. insgesamt 19.200 Pixeln ($160 \text{ Pixel} \times 120 \text{ Pixel} = 19.200 \text{ Gesamtpixel}$).

Bolometermatrizen

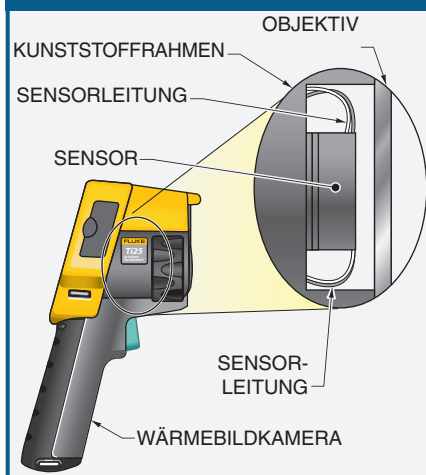


Abbildung 1-2. Eine Bolometermatrix (FPA) ist eine Bilderfassungseinrichtung, die aus einer in der Regel rechteckigen Matrix von Infraroterfassungsdetektoren besteht und in der Brennebene eines Objektivs angeordnet ist.

Seit dem Jahr 2000 ist die Entwicklung der FPA-Technologie mit verschiedenen Detektoren weiter vorangetrieben worden. Eine *Langwellen-Wärmebildkamera* ist eine Wärmebildkamera, die Infrarotenergie in einem Wellenlängenband zwischen $8 \mu\text{m}$ und $15 \mu\text{m}$ erfasst. Ein *Mikron* (μm) ist eine Längenmaßeinheit, die einem Tausendstel eines Millimeters ($0,001 \text{ m}$) entspricht. Eine *Mittelwellen-Wärmebildkamera* ist eine Wärmebildkamera, die Infrarotenergie in einem Wellenlängenband zwischen $2,5 \mu\text{m}$ und $6 \mu\text{m}$ erfasst. Sowohl die Lang- als auch die Mittelwellen-Thermografiesysteme sind inzwischen als vollständig radiometrische Versionen verfügbar, oft mit Bildfusion und Temperaturauflösungen von $0,05^\circ\text{C}$ ($0,09^\circ\text{F}$) oder darunter.

Die Kosten dieser Systeme sind in den letzten 10 Jahren um einen Faktor von mehr als 10 gefallen. Gleichzeitig hat sich die Qualität erheblich verbessert. Zudem hat die Verwendung von Computersoftware für die Bildverarbeitung stark zugenommen. Bei fast allen im Handel erhältlichen modernen Infrarotsystemen kommt Software zur Analyse und Berichterstellung zum Einsatz. Berichte können schnell erstellt und über das Internet versendet oder in einem gebräuchlichen Format, z. B. PDF, auf verschiedenen Arten von digitalen Speichergeräten abgelegt werden.

FUNKTIONSPRINZIP VON WÄRMEBILDKAMERAS

Es ist nützlich, ein allgemeines Verständnis vom Funktionsprinzip von Thermografiesystemen zu haben, da Thermografieexperten unbedingt darauf achten müssen, dass die Geräte innerhalb der entsprechenden Grenzwerte betrieben werden. Auf diese Weise wird die genauestmögliche Erfassung und Analyse von potenziellen Problemen ermöglicht. Der Zweck einer Wärmebildkamera ist es, die vom Messobjekt abgegebene Infrarotstrahlung zu erfassen. **Siehe Abbildung 1-3.** Ein *Messobjekt* ist ein Objekt, das mit einer Wärmebildkamera untersucht werden soll.

Die Optik der Wärmebildkamera fokussiert die Infrarotstrahlung auf einen Detektor. Die entsprechende Reaktion, in der Regel eine Spannungs- oder Widerstandsänderung, wird von der Elektronik im Thermografiesystem ausgewertet. Das von der Wärmebildkamera erzeugte Signal wird in ein elektronisches Bild (Thermogramm) auf einem Display-Bildschirm angezeigt. Ein *Thermogramm* ist das auf einem Display-Bildschirm dargestellte elektronisch bearbeitete Bild eines Messobjekts. Die verschiedenen Farbtöne entsprechen der Verteilung der Infrarotstrahlung auf der Oberfläche des Messobjekts. Dieser einfache Prozess ermöglicht dem Thermografieexperten die Betrachtung des Thermogramms, das der von der Oberfläche des Messobjekts abgegebenen Strahlungsenergie entspricht.

Messobjekte

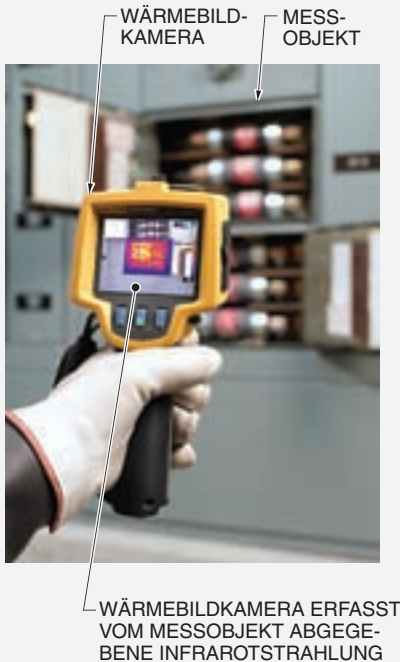
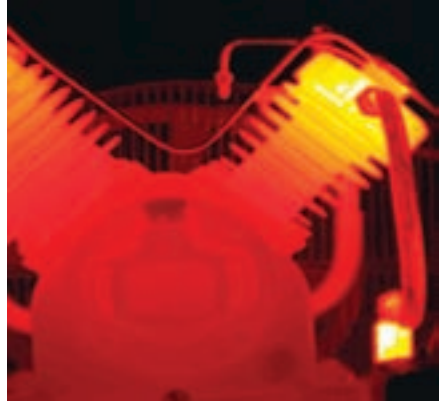


Abbildung 1-3. Ein Messobjekt ist ein Objekt, das mit einer Wärmebildkamera untersucht werden soll. Der Zweck einer Wärmebildkamera ist es, die vom Messobjekt abgegebene Infrarotstrahlung zu erfassen.

Wärmebildkamera-Komponenten

Typische Wärmebildkameras bestehen aus mehreren Komponenten: Objektiv, Objektivdeckel, Display, Detektor und Verarbeitungselektronik, Bedienelemente, Datenspeichergeräte sowie Software für die Datenverarbeitung und Berichterstellung. Diese Komponenten können je nach Typ und Modell des Thermografiesystems abweichen. **Siehe Abbildung 1-4.**



Ein Thermogramm ist das auf einem Display-Bildschirm dargestellte, elektronisch bearbeitete Bild eines Messobjekts. Die verschiedenen Farbtöne entsprechen der Verteilung der Infrarotstrahlung auf der Oberfläche des Messobjekts.

Objektive. Wärmebildkameras sind mit mindestens einem Objektiv ausgestattet. Das Objektiv fokussiert die Infrarotstrahlung auf einem Infrarotdetektor. Der Detektor reagiert entsprechend und erstellt ein elektronisches (thermisches) Bild bzw. Thermogramm. Das Objektiv einer Wärmebildkamera dient zum Sammeln und Fokussieren der auf dem Detektor auftreffenden Infrarotstrahlung. Die Objektive der meisten Langwellen-Wärmebildkameras bestehen aus Germanium (Ge). Durch dünne Antireflexionsbeschichtungen wird die Durchlässigkeit der Objektive verbessert.

TECHNIKTIPP

Um Ansatzpunkte für die Energieeinsparung zu finden, nutzen Stadtverwaltungen und staatliche Behörden Infrarot-Luftaufnahmen von entsprechend angepassten militärischen Luftaufnahme-Wärmekarten. Gemeinden, Anwohner und Unternehmen können sich auf diese Weise über Wärmeverluste ihrer Gebäude informieren.

Wärmebildkameras



Abbildung 1-4. Typische Wärmebildkameras bestehen aus mehreren gebräuchlichen Komponenten: Objektiv, Objektivdeckel, Display, Bedienelemente und Griff mit Trageschleufe.



Wärmebildkameras sind in der Regel mit einer Tragetasche für das Messgerät, die Software und anderes relevantes Zubehör für den mobilen Einsatz ausgestattet.

Displays. Das Wärmebild wird auf dem LCD-Display der Wärmebildkamera angezeigt. Das LCD-Display muss groß und hell genug sein, um unter den verschiedensten Beleuchtungsbedingungen vor Ort leicht ablesbar sein. Auf dem Display werden oft auch Informationen wie Akkuladung, Datum, Uhrzeit, Messobjekttemperatur (in °F, °C oder K), Sichtbild und eine Farbspektrumlegende mit Temperaturbezug angezeigt. **Siehe Abbildung 1-5.**

Detektor und Verarbeitungselektronik. Der Detektor und die Verarbeitungselektronik dienen der Umwandlung der Infrarotenergie in verwertbare Informationen. Die vom Messobjekt ausgehende Wärmestrahlung wird auf dem

typischerweise aus Halbleitermaterial bestehenden Detektor fokussiert. Die Wärmestrahlung erzeugt eine messbare Reaktion des Detektors. Diese Reaktion wird in der Wärmebildkamera elektronisch zu einem Wärmebild verarbeitet und auf dem Display angezeigt.

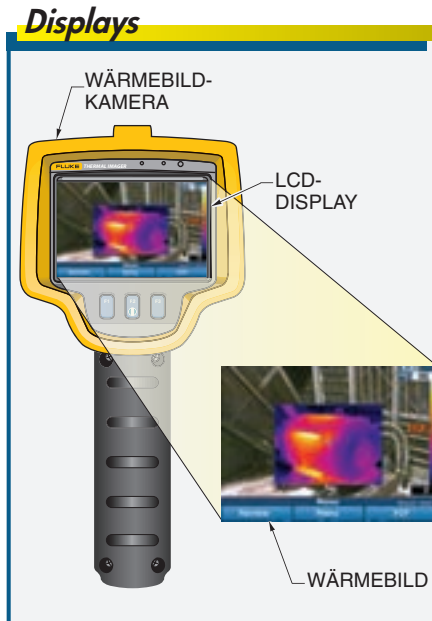


Abbildung 1-5. Das Wärmebild wird auf dem LCD-Display der Wärmebildkamera angezeigt.

Bedienelemente. Über die Bedienelemente können verschiedene Einstellungen zur Verfeinerung des auf dem Display angezeigten Wärmebilds vorgenommen werden. Variablen wie Temperaturbereich, thermische Messspanne und Pegel, Farbpaletten und Bildfusion lassen sich elektronisch anpassen. Oft ist auch die Einstellung des Emissionsgrads und der reflektierten Hintergrundtemperatur möglich. **Siehe Abbildung 1-6.**

Bedienelemente



Abbildung 1-6. Wichtige Variablen wie Temperaturbereich, thermische Messspanne und Pegel sowie andere Einstellungen können mit den Bedienelementen angepasst werden.

Datenspeichergeräte. Elektronische digitale Dateien mit Wärmebildern und den zugehörigen Daten werden auf verschiedenen Arten von Speicherkarten oder Speicher- und Übertragungsgeräten gespeichert. Viele Infrarot-Bildgebungs-

systeme ermöglichen auch die Speicherung von ergänzenden Sprach- oder Textdaten sowie eines mit einer integrierten Kamera für sichtbares Licht aufgenommenen entsprechenden Sichtbilds.

Datenverarbeitungs- und Berichterstellungssoftware. Die Software der meisten modernen Thermografiesysteme ist leistungsfähig und benutzerfreundlich. Digitale Wärme- und Sicht-

bilder werden auf einen PC geladen, wo sie mit verschiedenen Farbpaletten angezeigt und alle radiometrischen Parameter und Analysefunktionen weiter angepasst werden können. Die verarbeiteten Bilder werden anschließend in Berichtsvorlagen eingefügt und ausgedruckt, elektronisch gespeichert oder über das Internet an Kunden gesendet.



THERMOGRAFIE UND RENTABILITÄT

Thermografie kann durch die Verwendung von Wärmebildkameras für viele kritische Funktionen in gewerblichen und industriellen Umgebungen genutzt werden, z. B. für die Fehlersuche an und Instandhaltung von Geräten sowie die Inspektion von Gebäudehüllen. Wärmebildkameras galten in der Vergangenheit als teuer. Die mit der Instandhaltung und unvorhergesehenen Stillstandzeiten einer Anlage verbundenen Kosten können jedoch beim Einsatz von Wärmebildkameras für die vorbeugende und vorausschauende Instandhaltung erheblich verringert werden.

FEHLERSUCHE

Bei der Fehlersuche in gewerblichen und industriellen Anlagen kommt der Infrarot-Thermografie eine wichtige Funktion zu. Hinweise auf einen kritischen Anlagenzustand sind oft bestimmte anormale Betriebsbedingungen oder Anzeigen. Dies kann ein unmittelbar wahrnehmbarer Zustand sein, z. B. spürbare Schwingungen, ein Geräusch oder ein Temperaturmesswert. Bei nicht unmittelbar wahrnehmbaren Zuständen kann die Bestimmung der Problemursache jedoch schwierig oder unmöglich sein.

Eine *Wärmesignatur* ist ein Falschfarbenbild der von einem Objekt ausgestrahlten Infrarotenergie bzw. Wärme. Der Vergleich der Wärmesignatur eines normal funktionierenden Anlagenteils mit einem wegen anormaler Betriebsbedingungen untersuchten Anlagenteil ist ein hervorragendes Mittel zur Fehlersuche. **Siehe Abbildung 2-1.** Der Hauptvorteil der Infrarot-Thermografie ist, dass Messungen schnell und zerstörungsfrei durchgeführt werden können. Da Wärmebildkameras keinen Kontakt mit dem Messobjekt erfordern, kann die Anlage bzw. Komponente während der Messung in Betrieb bleiben.

Auch wenn ein anomales Wärmebild vom Thermografieexperten nicht vollständig inter-

pretiert werden kann, ist damit die Bestimmung möglich, ob weitere Messungen erforderlich sind. Zum Beispiel können Elektromotoren problemlos inspiziert und Unregelmäßigkeiten der Lager und Verbinder festgestellt werden. Wenn ein Motorlager erheblich wärmer als das Motorgehäuse ist, deutet das auf mögliche Schmierungs- oder Ausrichtungsprobleme hin. Ein Ausrichtungsproblem kann auch vorliegen, wenn eine Seite des Verbinders wärmer als die gegenüberliegende Seite ist. **Siehe Abbildung 2-2.**



Ein heißer Lagerdeckel deutet auf ein potenzielles Problem bei der Ausrichtung oder Schmierung hin. Auch Probleme mit dem Motor oder der Anlage, an die der Motor angeschlossen ist, können die Ursache sein.

Wärmesignaturen

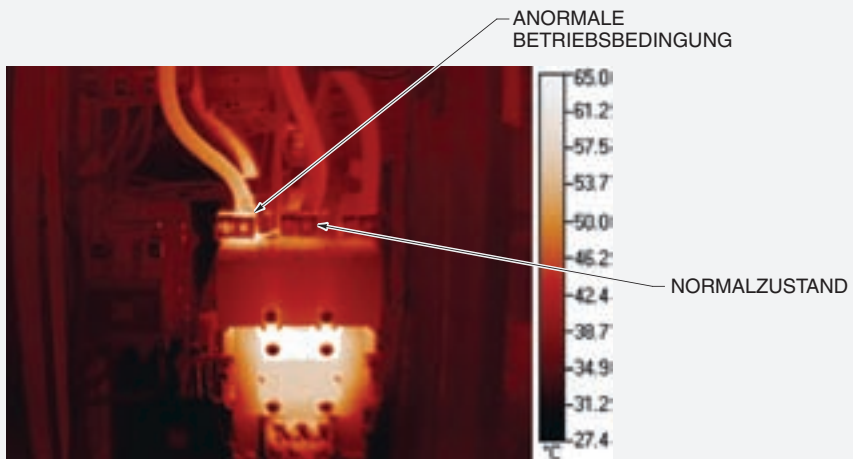


Abbildung 2-1. Über die Wärmesignatur von Betriebsmitteln kann schnell auf normale bzw. anormale Betriebsbedingungen geschlossen werden.

Fehlersuche an Motorlagern



Abbildung 2-2. Wenn ein Motorlager erheblich wärmer als das Motorgehäuse ist, deutet das auf mögliche Schmierungs- oder Ausrichtungsprobleme hin.

Der Schlüssel zur erfolgreichen Fehlersuche mithilfe der Thermografie liegt in einem guten Verständnis der grundlegenden Anforderungen zur Erfassung potenzieller Probleme bzw. anormaler Betriebsbedingungen von Anlagenteilen. Zum Beispiel ist die Verwendung einer Wärmebildkamera zur Fehlersuche bei einem stromlosen elektrischen Trennschalter nicht sinnvoll, weil potenzielle Probleme (überhitzte Bereiche) nur dann sichtbar werden, wenn der Trennschalter Strom führt. Ebenso erfordert eine erfolgreiche Fehlersuche an einem Kondensatabscheider dessen Beobachtung in einem vollständigen Arbeitszyklus.

Eine genaue Einschätzung, welche Bedingungen für die Fehlersuche an einem bestimmten Anlagenteil erforderlich sind, ist nicht immer einfach. Neben Erfahrung im Bereich der Thermografie ist auch ein fundiertes Wissen über Variablen, wie z. B. Wärmeübertragung, Radiometrie, Verwendung der Kamera und Gerätefunktion-

sowie -ausfall, für eine erfolgreiche Fehlersuche erforderlich. *Radiometrie* ist die Erfassung und Messung elektromagnetischer Strahlungsenergie speziell im Infrarotbereich des Spektrums.

Vorbeugende Instandhaltung

Die *vorbeugende Instandhaltung* umfasst planmäßige Arbeiten, die erforderlich sind, um Geräte in einem optimalen Betriebszustand zu erhalten. Durch die vorbeugende Instandhaltung werden Gerätefehlfunktionen und -ausfälle minimiert und gleichzeitig eine optimale Produktionseffizienz und optimale Sicherheitsbedingungen in der Anlage gewährleistet. Das Ergebnis ist eine Verlängerung der Nutzungsdauer, die Verringerung der Stillstandzeiten und die Verbesserung der Gesamtbetriebseffizienz. Vorbeugende Instandhaltungsarbeiten und ihre Häufigkeit für jedes Anlagenteil werden in Herstellerspezifikationen, Gerätehandbüchern, Fachzeitschriften und durch die Erfahrung der Arbeitsausführenden bestimmt.

Für vorbeugende Instandhaltungsprogramme ist eine Strategie mit umfassendem Verständnis des Betriebszustands der Geräte durch zustandsbasierte Beurteilung und Überwachung von entscheidender Bedeutung. Vorbeugende Instandhaltungsprogramme mit zustandsbasierter Beurteilung und Überwachung der Geräte sind mit Thermografiegeräten besser durchführbar. Die Auswertung von Gerätewärmebildern macht Reparatur-/Austauschentscheidungen effektiver, verringert die Gesamtkosten und erhöht Gerätezuverlässigkeit. Wenn ein Anlagenteil für die Produktion vollständig funktionsfähig sein muss, kann die Produktionsleitung sicher sein, dass das Teil für die geplante Aufgabe zur Verfügung steht.

Die Instandhaltung umfasst komplexe, mit speziellen Methoden ausgeführte Aktivitäten. In den letzten Jahren wurde festgestellt, dass viele der alten Methoden oft mehr Probleme verur-

sachen als lösten. Zudem war die Rentabilität nicht immer optimal.

Vorausschauende Instandhaltung

Vorausschauende Instandhaltung ist die Überwachung von Verschleißzuständen und Gerätekennwerten unter Zugrundelegung einer festgelegten Toleranz zur Prognose möglicher Fehlfunktionen oder Ausfälle. Es werden Gerätebetriebsdaten gesammelt und analysiert, um Trends bezüglich der Leistung und der Bauteilkennwerten bestimmen zu können. Reparaturen werden nach Bedarf durchgeführt.

Die vorausschauende Instandhaltung erfordert oft erhebliche Investitionen in Überwachungseinrichtungen und Personalschulungen. Sie kommt meist bei teuren oder kritischen Betriebsmitteln zur Anwendung. Die mit den Überwachungseinrichtungen erfassten Daten werden regelmäßig analysiert, um festzustellen, ob die Werte innerhalb akzeptabler Toleranzen liegen. **Siehe Abbildung 2-3.** Instandhaltungsverfahren werden durchgeführt, wenn Werte außerhalb der akzeptablen Toleranzen liegen. Im Anschluss an die Durchführung der Instandhaltungsverfahren werden die Geräte genau überwacht. Falls das Problem wieder auftritt, werden die Anwendung und die Konstruktion der entsprechenden Geräte analysiert und je nach Bedarf Änderungen vorgenommen.

Bei erfolgreichen vorausschauenden Instandhaltungsprogrammen kann die vorbeugende Instandhaltung in der Regel verringert werden. Bestimmte Instandhaltungsarbeiten, z. B. Schmierung und Reinigung, werden nicht nach einem festen Zeitplan durchgeführt, sondern wenn tatsächlich Bedarf dafür besteht. Die Thermografie kann zur Bestimmung des Gerätetzustands genutzt werden. Wenn der Zustand fraglich ist, kann sie zur Überwachung von Geräten dienen, bis ein entsprechender Instandhaltungszeitraum verfügbar ist.

Eine Abnahmeprüfung wird bei der Erstinspektion von Geräten oder beim Austausch eines

Bauteils durchgeführt, um den Ausgangszustand dieser Geräte festzustellen. Der Ausgangszustand dient zur Überprüfung der Herstellerleistungsspezifikationen oder für zu einem späteren Zeitpunkt durchzuführende Vergleiche. Abnahmeprüfungen von neuen oder instandgesetzten Geräten sind entscheidend für die Kosteneffizienz vorbeugender Instandhaltungsprogramme.

Die Thermografie wird zur Dokumentation des zum Zeitpunkt der Abnahme aktuellen Gerätezustands verwendet, z. B. bei der Installation einer neuen Antriebssteuerung, eines Dachs, einer Dampfleitung oder einer Gebäudeisolierung. Mit einem Wärmebild kann bestimmt werden, ob die Installation ordnungsgemäß durchgeführt wurde. Wird ein Installationsfehler erkannt, kann dieser

umgehend behoben bzw., falls eine umgehende Instandsetzung nicht möglich ist, bis zur Reparatur überwacht werden.

Unabhängig von den im jeweiligen Unternehmen durchgeführten Instandhaltungsprogrammen ist der Einsatz der Thermografie bzw. von Wärmebildkameras vorteilhaft. Bei der Verwendung für die Fehlersuche und Instandhaltung verringern sich die Geräteausfälle, und die Betriebszeit wird verlängert. Weitere wichtige Vorteile sind eine hohe Rentabilität von Investitionen in die Zuverlässigkeitsinstandhaltung, Kosteneinsparungen durch geringeren Zeitbedarf und insgesamt weniger Frustration der Instandhaltungstechniker.

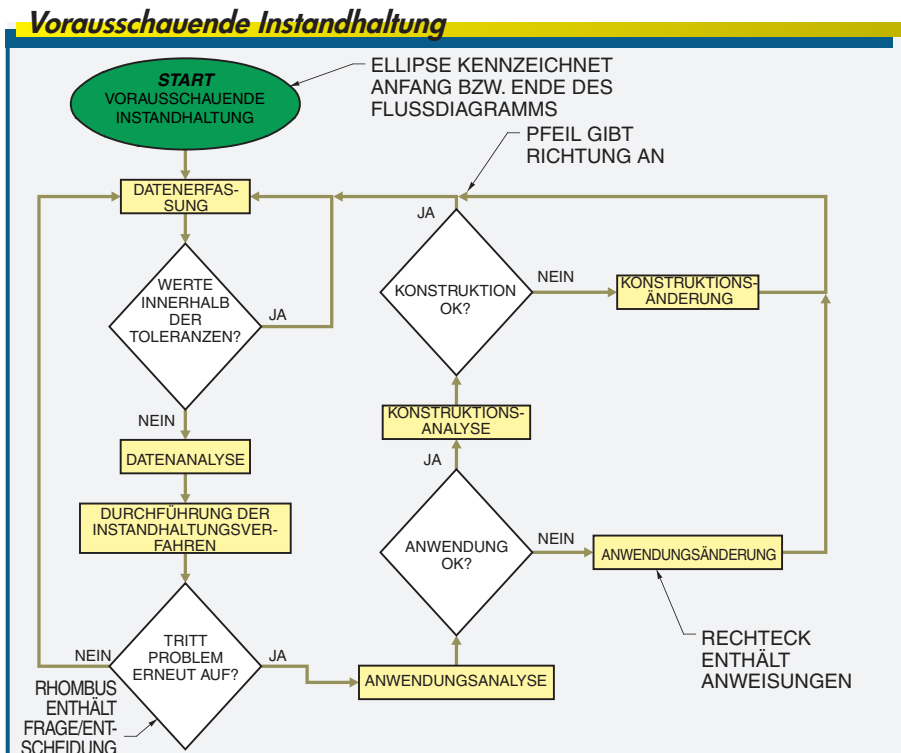


Abbildung 2-3. Vorausschauende Instandhaltung kommt meist bei teuren oder kritischen Betriebsmitteln einer Anlage zur Anwendung.



SCHULUNG UND SICHERHEIT

Wärmebildkameras können für eine Vielzahl von Aufgaben in gewerblichen und industriellen Umgebungen eingesetzt werden. Viele dieser Aufgaben können in Gefahrenbereichen liegen, z. B. in Verbindung mit stromführenden elektrischen Betriebsmitteln und in großer Höhe. Für die sichere und effiziente Durchführung der erforderlichen Aufgaben ist die ordnungsgemäße Schulung in der Handhabung von Wärmebildkameras und der Implementierung von Sicherheitsregeln notwendig. Die Schulung basiert auf verschiedenen schriftlichen Normen und Verfahren.

QUALIFIKATION UND ZERTIFIZIERUNG VON THERMOGRAFIEEXPERTEN

Die Bedienung einer modernen Wärmebildkamera ist relativ leicht erlernbar. In der Regel sind dazu nur eine grundlegende Schulung und entsprechende praktische Übungen erforderlich. Die richtige Auswertung von Wärmebildern ist jedoch oft schwieriger. Dazu ist nicht nur ein entsprechendes Hintergrundwissen bezüglich der Thermografie-Anwendung erforderlich, sondern es müssen auch zusätzliche, umfangreichere Schulungen durchgeführt werden und praktische Erfahrungen mit Wärmebildkameras vorliegen.

Um eine hohe Rentabilität der Thermografie zu gewährleisten, ist die Qualifikation und Zertifizierung von Thermografieexperten von großer Bedeutung. Unabhängig von der konkreten Anwendung der Technologie basiert die Qualifikation von Thermografieexperten auf Schulung, Erfahrung und Messungen in einer von drei Zertifizierungskategorien. **Siehe Abbildung 3-1.**

Die Zertifizierung von Thermografieexperten ist eine Investition, die sich in der Regel sehr gut auszahlt. Zertifizierte Mitarbeiter gewährleisten nicht nur qualitativ hochwertigere Inspektionen, sondern liefern auch technisch konsistentere

Ergebnisse. Bei nicht zertifizierten Thermografieexperten ist die Wahrscheinlichkeit teurer und gefährlicher Fehler höher. Diese Fehler haben oft schwerwiegende Folgen, z. B. ungenaue Empfehlungen hinsichtlich der Kritikalität von festgestellten Problemen oder Probleme werden überhaupt nicht erkannt. Neben einer adäquaten Qualifikation sind schriftliche Inspektionsverfahren ebenfalls für die Erzielung qualitativ hochwertiger Ergebnisse wichtig.

ZERTIFIZIERUNGSEBENEN FÜR THERMOGRAFIEEXPERTEN	
STUFE 1	Qualifiziert für die Erfassung von qualitativ hochwertigen Daten und die Sortierung der Daten auf der Grundlage von schriftlichen Gut/Schlecht-Kriterien
STUFE 2	Qualifiziert für die Einrichtung und Kalibrierung von Geräten, die Auswertung von Daten, die Erstellung von Berichten und die Überwachung von Personal der Ebene 1
STUFE 3	Qualifiziert für die Entwicklung von Inspektionsverfahren, die Auswertung entsprechender Codes und die Programmleitung einschließlich der Beaufsichtigung oder eigenen Durchführung von Schulungen und Prüfungen

Abbildung 3-1. Es gibt drei Zertifizierungsebenen für Thermografieexperten.

In den USA erfolgt die Zertifizierung durch den Arbeitgeber entsprechend den Normen der American Society for Nondestructive Testing. Die *American Society for Nondestructive Testing (ASNT)* ist eine Organisation, die zur Schaffung einer sicheren Umwelt beiträgt. Sie unterstützt Berufszweige im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung und fördert zerstörungsfreie Prüfungstechnologien durch Veröffentlichungen, Zertifizierungen, Forschungsarbeiten und Konferenzen. Außerhalb der USA erfolgt die Zertifizierung in allen Ländern durch eine zentrale Zertifizierungsbehörde, die die Normen der International Organization for Standardization erfüllt. Die *International Organization for Standardization (ISO)* ist eine nichtstaatliche, internationale Organisation, die nationale Normungseinrichtungen aus mehr als 90 Ländern umfasst.

Bei beiden Modellen basiert die Zertifizierung auf der entsprechenden Schulung gemäß den Angaben in den Dokumenten der relevanten Normen. Weiterhin wird ein Mindestmaß an Erfahrung vorausgesetzt, und es sind bestimmte schriftliche und praktische Prüfungen abzulegen.

TECHNIKTIPP

Vor der eigentlichen Durchführung einer thermografischen Inspektion sollte der Thermografieexperte die geplante Inspektionsroute „trocken“ durchgehen, um eine hohe Effizienz und die Einbeziehung möglicher Sicherheitsfragen zu gewährleisten.

SICHERHEIT AM ARBEITSPLATZ

Zu jedem Zertifizierungsprogramm gehört auch das Bewusstsein für die potenziellen Gefahren der Thermografie und für die zur Gewährleistung der Sicherheit am Arbeitsplatz erforderlichen Verfahren und Fertigkeiten. Sichere Arbeitsverfahren basieren zum großen Teil auf gesundem Menschenverstand, jedoch gelten für bestimmte Anwendungen oft

besondere Vorsichtsmaßnahmen. Zum Beispiel besteht für Thermografieexperten, die elektrische Anlagen untersuchen, eventuell ein größeres Risiko einer Lichtbogen-Explosion.

In vielen Fällen werden stromführende Einrichtungen untersucht, bei denen unmittelbar nach dem Öffnen des Gehäuses ein Phase-zu-Phase- oder Phase-zu-Masse-Lichtbogen ausgelöst werden kann. Bei einem *Lichtbogen* handelt es sich um eine Entladung bei äußerst hoher Temperatur, die durch einen Spannungsüberschlag in der Luft ausgelöst wird. Die Temperaturen eines Lichtbogenüberschlags können 19.427 °C erreichen.

Eine *Lichtbogen-Explosion* ist eine Explosion, die stattfindet, wenn die elektrische Betriebsmittel umgebende Luft ionisiert und leitend wird. Die Gefahr einer Lichtbogen-Explosion ist bei elektrischen Anlagen mit Spannungen ab 480 V am größten.

Eine *Lichtbogenschutzgrenze* ist der empfohlene Abstand, ab dem persönliche Schutzausrüstung erforderlich ist, um Verbrennungen durch Lichtbogenüberschlag zu verhindern. **Siehe Abbildung 3-2.** Zu reparierende Stromkreise sind immer freizuschalten. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass in der Nähe befindliche Stromkreise innerhalb der Lichtbogenschutzgrenze noch unter Spannung stehen. Aus diesem Grund müssen Barrieren, z. B. Isolierdecken, sowie die entsprechende persönliche Schutzausrüstung für den Schutz vor Lichtbogenüberschlag verwendet werden. Die Folgen einer Lichtbogen-Explosion sind jedoch oft tödlich und weitgehend. Sicherheit hat immer Vorrang.

Wenn die Abdeckung oder die Tür zu einem Gehäuse nicht geöffnet wird, wird das Risiko einer Lichtbogen-Explosion zwar minimiert, die meisten Vorteile der Thermografie sind damit jedoch ebenfalls nicht nutzbar, da die Sicht durch die Gehäuseabdeckungen behindert wird. **Siehe Abbildung 3-3.** Viele Gehäuse sind jedoch inzwischen mit speziellen Infrarotfenstern ausgestattet. Dadurch wird das Lichtbogenüberschlagsrisiko verringert, und gleichzeitig können gute Ergebnisse erzielt werden.

Lichtbogenschutzgrenzen				
Nennwerte (Spannung, Bereich, Phase-zu-Phase*)	Annäherungsgrenze		Eingeschränkte Annäherungsgrenze (für versehentliche Bewegungen)	Verbotene Annäherungsgrenze
	Freiliegende bewegliche Leiter	Freiliegende feste Stromkreisteile		
0 bis 50	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend	nicht zutreffend
51 bis 300	3,05 m	1,07 m	Kontakt vermeiden	Kontakt vermeiden
301 bis 750	3,05 m	1,07 m	30,5 cm	2,54 cm
751 bis 15.000	3,05 m	1,53 m	66 cm	18 cm

* in V

Abbildung 3-2. Eine Lichtbogenschutzgrenze ist der empfohlene Abstand, ab dem persönliche Schutzausrüstung erforderlich ist, um Verbrennungen durch Lichtbogenüberschlag zu verhindern.



Abbildung 3-3. Wenn Gehäuse von elektrischen Betriebsmitteln geöffnet werden müssen, sind Verfahren zur Minimierung des Lichtbogenüberschlagsrisikos sorgfältig zu entwickeln, zu implementieren und einzuhalten. Wenn Gehäuse geöffnet werden müssen, sind entsprechende Verfahren zur Minimierung des Lichtbogenüberschlagsrisikos sorgfältig zu entwickeln, zu implementieren und einzuhalten. National Fire Protection Agency (NFPA) 70E ist eine von mehreren Normen, die bei der Entwicklung derartiger Verfahren nützlich sein können.

Routinemäßige Inspektionen elektrischer Anlagen können von einem Team wesentlich sicherer und effektiver ausgeführt werden. Das Team kann aus zwei Personen bestehen, z. B. dem Thermografieexperten und einer qualifizierten Person, die die Gehäuse öffnet, Lasten misst und das Gehäuse sicher verschließt, wenn die Arbeiten abgeschlossen sind. Eine *qualifizierte Person* ist eine Person mit Kenntnissen und Fertigkeiten bezüglich der Konstruktion und Bedienung von elektrischen Betriebsmitteln und mit entsprechender Sicherheitsschulung.

Gebäudeuntersuchungen sind in der Regel weniger mit Risiken behaftet. Allerdings gibt es auch hier Risiken, z. B. beim Betreten von Zwischendecken und Dachböden. Vorsicht ist auch geboten, wenn Bauarbeiten im Gange sind.

Thermografieexperten in industriellen Umgebungen müssen sich immer dessen bewusst sein, dass weitere Gefahren bestehen, z. B. potenzielle Stolper- und Fallgefahren sowie Gefahren beim Einsteigen in enge und umschlossene Räume. In vielen Umgebungen kann auch helle Kleidung erforderlich sein. Auf Dächern müssen Vorsichtsmaßnahmen gegen Fallgefahren ergriffen werden, nicht nur am Dachrand, sondern auch bei einfachen Höhenänderungen und bei strukturell schwachen Dachflächen. Arbeiten auf Dächern dürfen nicht allein ausgeführt werden.

Weiterhin sind im Dunkeln besondere Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen. Thermografieexperten können beim Betrachten eines Wärmebilds auf dem hellen Display eines Thermographiesystems

vorübergehend nachtblind werden. *Nachtblindheit* ist ein Zustand, der auftritt, wenn die Augen des Thermografieexperten für die Betrachtung des hellen Displays angepasst sind und dadurch dunkle Objekte schlecht wahrnehmen können.

Unfälle passieren in der Regel dann, wenn Arbeiten schlecht geplant werden oder wenn sich die Art der geplanten Arbeiten ändert, aber der Plan nicht entsprechend angepasst wird. Es ist immer ein Plan für sicheres Arbeiten zu entwickeln und einzuhalten. Wenn sich die Umstände ändern, muss erneut überprüft werden, ob der Plan geändert werden muss.

Die *Occupational Safety and Health Administration (OSHA)* ist eine US-Regierungsbehörde, die gemäß dem US-amerikanischen Arbeitsschutzgesetz von 1970 gegründet wurde, das die Arbeitgeber dazu verpflichtet, für ihre Mitarbeiter eine sichere Arbeitsumgebung zu schaffen. OSHA fordert z. B., dass Arbeitsbereiche keine Gefahren beinhalten dürfen, die erheblichen Schaden verursachen können. Die OSHA-Bestimmungen werden von der Regierung der USA durchgesetzt. Pläne für sicheres Arbeiten können innerhalb der OSHA-Richtlinien entwickelt werden.



Thermografische Inspektionen von elektrischen Hochstromanlagen müssen in einem sicheren Abstand von der Anlage durchgeführt werden.

NORMEN UND SCHRIFTLICHE INSPEKTIONSVERFAHREN

Schriftliche Inspektionsverfahren sind für qualitativ hochwertige Ergebnisse unerlässlich. Beispielsweise wäre das Backen eines Kuchens ohne Rezept wesentlich schwieriger. Schriftliche Inspektionsverfahren können auch als „Rezepte für den Erfolg“ bezeichnet werden.

Das Erstellen dieser „Erfolgsrezepte“ ist zwar zunächst mit Aufwand verbunden, muss aber nicht schwierig sein. In der Regel ist es sinnvoll, eine kleine Gruppe von Mitarbeitern einzubeziehen, die über entsprechende Erfahrung im Inspektionsprozess verfügen, damit verschiedene Standpunkte, Fachgebiete und Zuständigkeiten vertreten sind. Wenn die Entwicklung eines schriftlichen Inspektionsverfahrens abgeschlossen ist, muss dieses von zertifizierten Mitarbeitern gründlich getestet und regelmäßig überprüft werden, um zu gewährleisten, dass es auch weiterhin praxisbewährte Methoden enthält.

Es gibt viele Inspektionsnormen, die als Grundlage für einfache schriftliche Inspektionsverfahren dienen können. Zum Beispiel haben verschiedene Expertenausschüsse gemeinsam mit der ISO und der American Society of Testing Materials (ASTM) International eine Reihe von einschlägigen Normen entwickelt. *American Society of Testing Materials (ASTM) International* ist ein technischer Verband und wichtiger Entwickler von freiwilligen Normen, damit in Zusammenhang stehenden technischen Informationen und Dienstleistungen für die Förderung der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit. ASTM International trägt auch zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Produkten, Materialien und Dienstleistungen bei.

Diese Normen helfen bei der Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Infrarotsystemen. Darüber hinaus enthalten sie praxisbewährte Methoden für Inspektionen von Gebäudeisolierungen, Luftlecks, elektrischen und mechanischen Anlagen, Dächern und Autobahnbrücken-Fahrbahnen.

Auch von anderen Normungsorganisationen in einzelnen Ländern herausgegebene zusätzliche Normen können verwendet werden. Zum Beispiel haben viele dieser Organisationen Normen zur elektrischen Sicherheit herausgegeben, die direkt für die Arbeit von Thermografieexperten bei der Inspektion von elektrischen Anlagen gelten.

Durch die Vielzahl der verfügbaren Wärmebildkameras und die breite Preisspanne ist die

Infrarottechnologie heute sehr einfach zugänglich. Organisationen, die in die Entwicklung solider Thermografieprogramme mit Inspektionsverfahren und qualifiziertem Personal investieren, haben jedoch einen entscheidenden Vorteil. In der Regel ergeben sich daraus auch langfristige Vorteile, die anderen Organisationen möglicherweise fehlen. **Siehe Abbildung 3-4.**

Wärmebildkameras



FÜR ALLGEMEINE
INSTANDHALTUNG,
FEHLERSUCHE UND
GRUNDLEGENDE INSPEKTIONEN



FÜR SPEZIELLE, KOMPLEXE ODER
INTENSIVE ANWENDUNGEN, DIE
ERWEITERTE ERFASSUNGS- UND
ANALYSEFUNKTIONEN ERFORDERN

Abbildung 3-4. Für die verschiedenen Anwendungs- und Inspektionsarten werden unterschiedliche Wärmebildkameras angeboten.



THEORIE FÜR PRAXISANWENDUNGEN

Theorie und Wissenschaft der Thermodynamik basieren auf den unterschiedlichen Wärmeübertragungseigenschaften verschiedener Materialien. Den mit Wärmebildkameras durchgeführten Messungen liegen die Prinzipien der elementaren Thermodynamik zugrunde. Techniker müssen bei der Untersuchung von verschiedenen Strukturen, Geräten und Materialien die Grenzen der Thermografie und von Wärmebildkameras kennen.

GRUNDLAGEN DER THERMODYNAMIK

Die Thermodynamik ist die Wissenschaft von der thermischen Energie (Wärme) und deren Übertragung, Umwandlung und Auswirkung auf alle Stoffe. Beim Einsatz moderner Infrarotgeräte sind Kenntnisse der Grundlagen der Wärmeübertragung und der Strahlungsphysik von entscheidender Bedeutung. Moderne Geräte sind zwar leistungsfähig, aber nicht in der Lage, selbstständig zu denken. Der Wert moderner Geräte hängt von der Fähigkeit des Thermografieexperten ab, Daten zu interpretieren. Dazu ist ein praktisches Verständnis der Grundlagen der Wärmeübertragung und der Strahlungsphysik erforderlich.

Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Energie kann in verschiedenen Formen vorliegen. Ein Kohlekraftwerk wandelt zum Beispiel durch Verbrennung die chemische Energie von fossilen Brennstoffen in thermische Energie um. Diese wiederum wird in einem Turbogenerator in mechanische Energie bzw. Bewegung und anschließend in elektrische Energie umgewandelt. Während dieser Umwandlungen geht keine Energie verloren (die Nutzung wird allerdings schwieriger).

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik ist ein wissenschaftliches Gesetz, das besagt, dass bei der Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärme oder von Wärme in Arbeit der Betrag von Arbeit

und Wärme immer äquivalent ist. Ein Vorteil für Thermografieexperten ist die Tatsache, dass Wärme bzw. thermische Energie ein Nebenprodukt fast aller Energieumwandlungen ist. Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet, sondern lediglich verändert werden.

Die Temperatur ist ein Maß für die relative Wärme oder Kälte eines Körpers im Vergleich mit einem anderen Körper. Unbewusst stellen wir Vergleiche mit unserer Körpertemperatur oder der Umgebungslufttemperatur und mit den Siede- und Gefrierpunkten von Wasser an.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass bei einer Temperaturdifferenz zwischen zwei Objekten thermische Energie von den wärmeren Bereichen (höhere Energie) zu den kühleren Bereichen (niedrigere Energie) übertragen wird, bis ein thermisches Gleichgewicht erreicht ist. Eine Wärmeübertragung verursacht entweder eine Elektronenübertragung oder stärkere atomare bzw. molekulare Schwingungen. Das ist von großer Bedeutung, da diese Effekte bei der Temperaturmessung gemessen werden.

WÄRMEÜBERTRAGUNGSARTEN

Wärmeenergie kann auf eine von drei Arten übertragen werden: Leitung, Konvektion oder Strahlung. Jede dieser Arten kann im stationären

Zustand oder im Übergangszustand (transient) beschrieben werden. Während einer stationären Übertragung ist die Übertragungsgeschwindigkeit konstant und erfolgt im Zeitablauf in der gleichen Richtung. Zum Beispiel gibt eine vollständig erwärmte Maschine bei konstanter Belastung Wärme mit konstanter Geschwindigkeit an ihre Umgebung ab. In Wirklichkeit gibt es keinen perfekten stationären Wärmefluss. Es gibt immer geringfügige Übergangsfuktuationen. Aus praktischen Gründen werden diese aber in der Regel vernachlässigt.

Leitung ist die Übertragung von thermischer Energie durch direkten Kontakt von einem Objekt zu einem anderen Objekt. *Konvektion* ist die Übertragung von Wärme, wenn zwischen warmen und kühlen Bereichen von Luft, Gas oder Flüssigkeiten Moleküle transportiert werden und/oder Ströme zirkulieren. *Strahlung* ist die Bewegung von Wärme, die sich als Strahlungsenergie (elektromagnetische Wellen) ohne direktes Übertragungsmedium fortpflanzt. Wenn sich eine Maschine erwärmt oder abkühlt, wird Wärme transient übertragen. Das Verständnis dieser Beziehungen ist wichtig für Thermografieexperten, weil die Übertragung von Wärme oft eng mit der Temperatur eines Objekts im Zusammenhang steht.

Konzept der Wärmekapazität

Wärmekapazität ist die Fähigkeit von Material, Wärme zu absorbieren und zu speichern. Wenn Wärme mit verschiedenen Geschwindigkeiten und/oder in verschiedenen Richtungen übertragen wird, wird sie als im Übergangszustand befindlich (transient) bezeichnet.

Wenn sich verschiedene Materialien im Übergangszustand befinden, werden bei ihrer Temperaturänderung zudem verschiedene Energiebeträge ausgetauscht. Zum Beispiel wird zur Änderung der Lufttemperatur in einem Raum sehr wenig Energie im Vergleich mit dem Energiebedarf für die Temperaturänderung des

gleichen Volumens Wasser in einem Schwimmbad benötigt. Die Wärmekapazität gibt an, wie viel Energie für die Temperaturänderung eines bestimmten Materials benötigt wird. Die Geschwindigkeit dieser Änderung hängt auch davon ab, wie die Wärme übertragen wird.

Die Wärmekapazität, also das, was als Beziehung zwischen Wärme und Temperatur bezeichnet wird, kann zwar manchmal verwirren, für den Thermografieexperten aber auch vorteilhaft sein. Zum Beispiel kann der Flüssigkeitsstand in einem Tank aufgrund der unterschiedlichen Wärmekapazitäten der Luft und der Flüssigkeit bestimmt werden. Wenn sich der Tank im Übergangszustand befindet, können die beiden Materialien oft verschiedene Temperaturen haben.

Leitung

Leitung ist die Übertragung von thermischer Energie durch direkten Kontakt von einem Objekt zu einem anderen Objekt. Wärmeübertragung durch Leitung findet hauptsächlich in Festkörpern und zum Teil in Flüssigkeiten statt. Wärmere Moleküle übertragen dabei ihre Energie auf benachbarte kühlere Moleküle. Wärmeübertragung durch Leitung ist z. B. beim Berühren einer warmen Tasse Kaffee oder einer kalten Dose mit einem Softdrink zu spüren.

Die Geschwindigkeit der Wärmeübertragung hängt von der Leitfähigkeit des Materials und der Temperaturdifferenz (ΔT oder Delta Temperatur) zwischen den Objekten ab. Formaler werden diese einfachen Beziehungen durch das Fouriersche Gesetz beschrieben. Wenn man z. B. Handschuhe trägt, wird beim Anheben einer Tasse mit heißem Kaffee sehr viel weniger Wärme ausgetauscht als mit bloßer Hand. Eine warme Tasse Kaffee überträgt nicht so viel Wärme wie eine heiße Tasse Kaffee, weil die Temperaturdifferenz geringer ist. In ähnlicher Weise wird bei der Übertragung von Energie mit gleicher Geschwindigkeit, aber über eine größere Fläche, mehr Energie übertragen.

Ein *Leiter* ist ein Material, das Wärme gut leitet. Metalle sind in der Regel gute Wärmeleiter. Auch die Leitfähigkeit von Metallen kann jedoch je nach Art des Metalls unterschiedlich sein. Zum Beispiel leitet Eisen weniger gut als Aluminium. Ein *Isolator* ist ein Material, das Wärme schlecht leitet. Schlecht leitende Materialien werden als Isolatoren bezeichnet. Oft handelt es sich dabei um Materialien, die kleine Lufteinschlüsse enthalten und so die Energieübertragung verlangsamen, z. B. Schaumstoffisolierung oder übereinander getragene Kleidung. **Siehe Abbildung 4-1.**

Konvektion

Konvektion ist die Übertragung von Wärme, wenn Strömungen zwischen warmen und kühlen Flüssigkeitsregionen vorliegen. Konvektion tritt in Flüssigkeiten und Gasen auf. Dabei spielt die Massenbewegung von Molekülen bei unterschiedlichen Temperaturen eine Rolle. Eine Gewitterwolke ist z. B. Konvektion im großen Maßstab. Große warme Luftmassen steigen auf, kühle Luft sinkt nach unten. In einem kleineren

Maßstab kann Konvektion beobachtet werden, wenn z. B. die in eine Tasse mit heißem Kaffee gegossene kalte Kondensmilch auf den Tassenboden sinkt.

Die konvektive Wärmeübertragung hängt zum Teil auch von der Flächen- und Temperaturdifferenz ab. Zum Beispiel überträgt ein Motorkühler eines großen Motors wegen seiner größeren Fläche mehr Wärme als der eines kleinen Motors. Weitere Faktoren, die die konvektive Wärmeübertragung beeinflussen, sind die Geschwindigkeit einer Flüssigkeit, die Fließrichtung der Flüssigkeit und der Oberflächenzustand eines Objekts. Ein durch Staub blockierter Motorkühler überträgt Wärme weniger effizient als ein sauberer Kühler. Wie bei der Wärmeleitung können die meisten Menschen diese Beziehungen gut nachvollziehen. Formal werden sie durch das Newtonsche Abkühlungsgesetz beschrieben. Freie oder natürliche Konvektion tritt auf, wenn wärmere Flüssigkeiten aufsteigen und kühlere absinken, z. B. in den Kühlrohren von Öltransformatoren. **Siehe Abbildung 4-2.**

Isolatoren

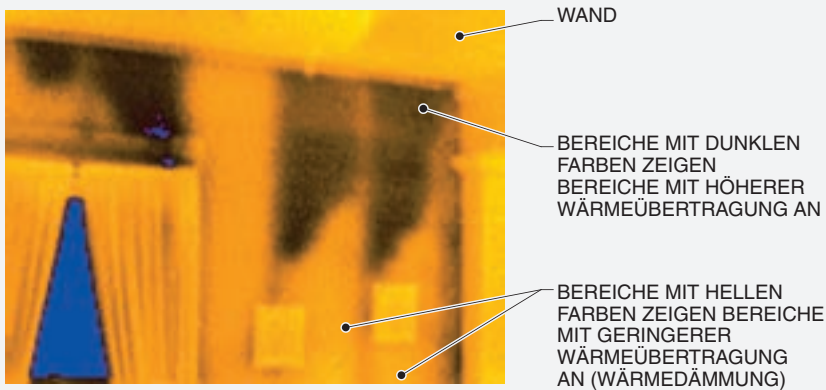
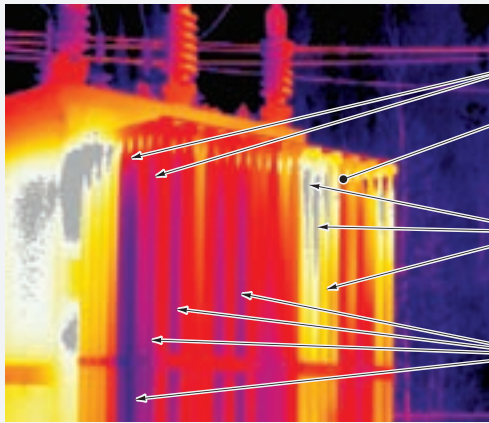


Abbildung 4-1. Um die Wärmeübertragung zu kontrollieren, werden Isolatoren in Wände eingebaut. Durch mangelhaft eingebaute Wärmedämmung wird die Wärmeübertragung nicht in ausreichendem Maße begrenzt.

Natürliche Konvektion



KÜHLROHRE

ÖLTRANSFORMATOR
(GEKÜHLT DURCH NATÜRLICHE KONVEKTION DURCH UMLAUF DES WARMEN ÖLS IN DEN KÜHLROHREN)

BEI NORMALEN UMLAUFMUSTERN BEFINDET SICH WARMES ÖL (HELLER) OBEN UND KÜHLES ÖL (DUNKLER) IM UNTEREN BEREICH DER ROHRE

DUNKEL GEFÄRBTE ROHRE ZEIGEN BEREICHE MIT GERINGER ODER OHNE ÖLUMLAUF AN

Abbildung 4-2. Freie oder natürliche Konvektion tritt auf, wenn warmes Öl aufsteigt und kühleres Öl absinkt, z. B. in den Kühlrohren von Öltransformatoren.

Wenn die Konvektion erzwungen wird, z. B. mit einer Pumpe oder einem Lüfter, werden die natürlichen Beziehungen im Allgemeinen außer Kraft gesetzt, da die erzwungene Konvektion recht leistungsfähig sein kann. Wenn Wind weht, frieren wir eher, d. h., Körperwärme wird schneller abgeführt, als wenn kein Wind weht. Wind hat auch starken Einfluss auf die Temperatur von mit Thermografiesystemen untersuchten Objekten.

Strahlung

Strahlung ist die mit Lichtgeschwindigkeit zwischen Objekten erfolgende Übertragung von Energie (einschließlich Wärme). Da kein Übertragungsmedium erforderlich ist, kann Strahlung auch im Vakuum erfolgen. Ein Beispiel für elektromagnetische Energie ist, an einem kühlen Tag die Sonnenwärme zu spüren.

Elektromagnetische Energie ist Strahlung in Form von Wellen mit elektrischen und magnetischen Eigenschaften. Elektromagnetische Energie kann in verschiedenen Formen vorkommen,

z. B. als Licht, Funkwellen und Infrarotstrahlung. Der Hauptunterschied zwischen diesen Formen ist die Wellenlänge. Während das normale Sehvermögen die Wellenlängen des sichtbaren Lichts erfasst, erfassen Wärmebildkameras die Wellenlängen von ausgestrahlter Wärme (oder Infrarotstrahlung). Jede Wellenlänge repräsentiert einen anderen Teil des elektromagnetischen Spektrums.

Die Stefan-Boltzmann-Gleichung beschreibt die Beziehungen bezüglich der Wärmeübertragung durch Strahlung. Alle Objekte strahlen Wärme aus. Wie bei der Wärmeleitung und der Konvektion hängt der Nettobetrag der ausgestrahlten Energie von Flächen- und Temperaturdifferenzen ab. Je wärmer ein Objekt ist, desto mehr Energie strahlt es aus. Wenn sich z. B. ein Herdbrenner erhitzt, strahlt er mehr Energie ab, als wenn er kühl ist.

Wärmestrahlung ist die Übertragung von Wärme mittels elektromagnetischer Wellen. Der Hauptunterschied zwischen diesen Wellen ist

ihre Wellenlänge. Während elektromagnetische Strahlung (Licht) für das menschliche Auge sichtbar ist, lässt sich Wärmestrahlung nur durch Thermografiesysteme sichtbar machen. Das *elektromagnetische Spektrum* ist der Bereich aller Arten von elektromagnetischer Strahlung auf der Grundlage der Wellenlänge. **Siehe Abbildung 4-3.**

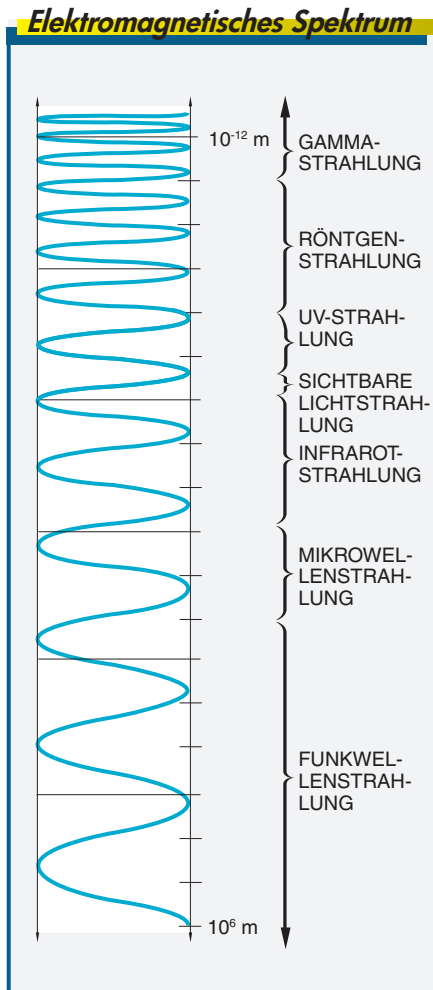


Abbildung 4-3. Das elektromagnetische Spektrum ist der Bereich aller Arten von elektromagnetischer Strahlung auf der Grundlage der Wellenlänge.

Konzept der Energieerhaltung

Licht und Infrarotstrahlung verhalten sich bei der Interaktion mit verschiedenen Materialien ähnlich. Infrarotstrahlung wird von einigen Oberflächenarten reflektiert, z. B. von der metallischen Abschirmung unter einem Herdbrenner. Bei einigen Oberflächen, z. B. an glänzenden Metallen, können mit Wärmebildkameras Reflexionen warmer und kalter Objekte sichtbar gemacht werden. Diese werden als „thermische Spiegel“ bezeichnet. In einigen Fällen wird Infrarotstrahlung durch eine Oberfläche übertragen, z. B. durch das Objektiv eines Infrarot-Bildgebungssystems. Infrarotstrahlung kann auch von einer Oberfläche absorbiert werden, z. B. durch eine Hand in der Nähe eines heißen Herdbrenners. In diesem Fall kommt es zu einer Temperaturänderung und dadurch zur Abstrahlung von mehr Energie von der Oberfläche.

Transmission ist der Durchgang von Strahlungsenergie durch ein Material oder eine Struktur. Infrarotstrahlung kann auch von einer Oberfläche absorbiert werden. Dadurch ändert sich die Temperatur, und es wird mehr Energie von der Oberfläche des Objekts abgestrahlt. *Absorption* ist das Auffangen von Strahlungsenergie. *Emission* ist die Aussendung von Strahlungsenergie. Obwohl ein Infrarot-Thermografiesystem reflektierte, transmittierte, absorbierte und ausgesendete (emittierte) Strahlung anzeigen kann, wird die Oberflächentemperatur nur von absorbierte und emittierte Energie beeinflusst. **Siehe Abbildung 4-4.**

TECHNIKTIPP

Der Typ und die Richtung von Strahlungsreflexionen wird durch die Rauheit einer Oberfläche bestimmt. Eine glatte Oberfläche wird als *spiegelnder Reflektor*; eine raue oder gemusterte Oberfläche als *diffuser Reflektor* bezeichnet.

Reflexion, Transmission, Absorption und Emission

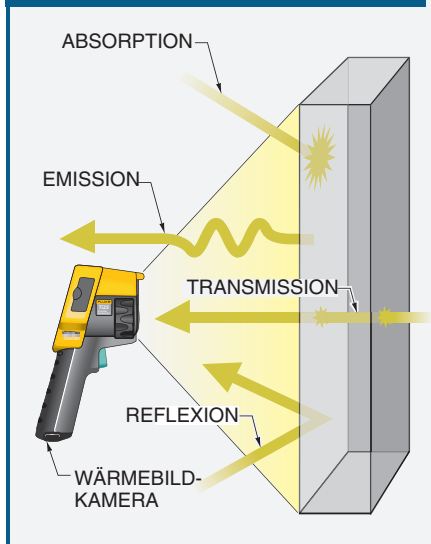


Abbildung 4-4. Strahlung kann reflektiert, transmittiert, absorbiert oder emittiert werden.

Zudem hängt die von einer Oberfläche abgestrahlte Wärmemenge davon ab, wie effizient die Oberfläche Energie aussendet. Bei den meisten nichtmetallischen Materialien wie lackierte Oberflächen oder menschliche Haut ist die Energieausstrahlung effizient. Das heißt, mit zunehmender Temperatur strahlen sie wie ein Herdbrenner wesentlich mehr Energie aus.

Bei anderen Materialien (meistens unlackierte oder wenig oxidierte Metalle) ist die Energieausstrahlung weniger effizient. Wenn eine blanken Metalloberfläche erhitzt wird, erhöht sich die Strahlungswärmeübertragung vergleichsweise nur wenig. Mit den Augen oder einem Thermografiesystem ist die Unterscheidung zwischen einer kühlen und einer warmen blanken Metalloberfläche nur schwer möglich. Blanke Metalle haben in der Regel einen geringen Emissionsgrad (niedrige Emissionseffizienz). Der Wert des Emissionsgrads liegt zwischen 0,0 und 1,0. Eine

Oberfläche mit einem Emissionsgrad von 0,10 (ein typischer Wert für blankes Kupfer) strahlt im Vergleich mit der menschlichen Haut (Emissionsgrad 0,98) nur wenig Energie aus.

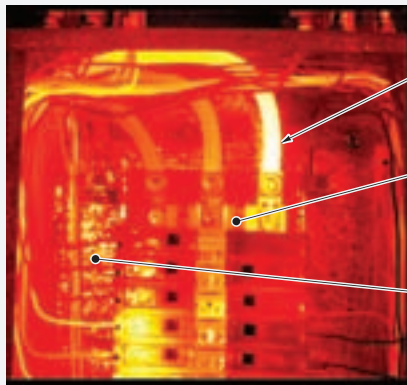
Eines der Probleme bei der Verwendung einer Wärmebildkamera ist die Darstellung von Energie, die normalerweise für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. Das kann manchmal verwirrend sein. Oberflächen mit niedrigem Emissionsgrad, z. B. Metalle, verfügen nicht nur über eine ineffiziente Energieausstrahlung, sondern reflektieren auch ihre thermische Umgebung. Wenn eine Oberfläche mit einem Thermografiesystem untersucht wird, enthält das entsprechende Bild eine Kombination aus emittierter und reflektierter Infrarotstrahlung. Um das angezeigte Bild richtig interpretieren zu können, muss der Thermografieexperte wissen, welche Energie emittiert und welche Energie reflektiert wird.

Der Materialemissionsgrad kann von mehreren anderen Faktoren beeinflusst werden. Neben dem Materialtyp kann der Emissionsgrad auch vom Oberflächenzustand, von der Temperatur und von der Wellenlänge abhängen. Der effektive Emissionsgrad eines Objekts kann auch vom Bildwinkel abhängen. **Siehe Abbildung 4-5.**

Die Charakterisierung des Emissionsgrads der meisten Materialien, die keine glänzenden Metalle sind, ist unproblematisch. Viele Materialien sind bereits charakterisiert worden. Ihre Emissionsgradwerte sind in entsprechenden Emissionsgradtabellen zu finden. Emissionsgradwerte sind lediglich als Richtschnur zu verwenden. Da der genaue Emissionsgrad eines Materials von diesen Werten abweichen kann, müssen qualifizierte Thermografieexperten auch wissen, wie der tatsächliche Wert gemessen werden kann. **Siehe Abbildung 4-6.**

Hohlräume, Lücken und Löcher strahlen thermische Energie mit höherer Geschwindigkeit als die sie umgebenden Oberflächen aus. Das Gleiche gilt für sichtbares Licht. Die Pupille des menschlichen Auges ist schwarz, da es sich um einen Hohlraum handelt, und das eintretende Licht

Emissionsgrad



ISOLIERTER LEITER MIT
HOHEM EMISSIONSGRAD
(EMITTIERTE WÄRME)

EMISSIONSGRAD ABHÄNGIG
VON MATERIALTYP,
OBERFLÄCHENZUSTAND,
TEMPERATUR UND
WELLENLÄNGE

RÜCKWAND
MIT NIEDRIGEM
EMISSIONSGRAD
(REFLEKTIERTE WÄRME)

Abbildung 4-5. Der Emissionsgrad kann vom Materialtyp, vom Oberflächenzustand, von der Temperatur und von der Wellenlänge beeinflusst werden.

<i>Emissionsgrade gebräuchlicher Werkstoffe</i>	
Material	Emissionsgrad*
Aluminium, poliert	0,05
Beton	0,54
Farbe, durchschnittlich, auf Ölbasis	0,94
Glas	0,92
Gummi	0,93
Gusseisen, rauer Guss	0,81
Isolierband, schwarzer Kunststoff	0,95
Kupfer, poliert	0,01
Kupfer, schwarz oxidiert	0,88
Lack, Bakelit	0,93
Papier, schwarz, matt	0,94
Porzellan, glasiert	0,92
Stahl, stark oxidiert	0,88
Stahl, verzinkt	0,28
Teerpappe	0,92
Wasser	0,98
Ziegel, feuerfest, rau	0,94
Ziegel, unverputzt	0,85

* Die Emissionsgrade fast aller Werkstoffe gelten für eine Temperatur von 0 °C, weichen bei Raumtemperatur aber nicht erheblich ab.

Abbildung 4-6. Die Emissionsgradwerte vieler gebräuchlicher Materialien sind in entsprechenden Emissionsgradtabellen zu finden.

wird absorbiert. Wenn eine Oberfläche das gesamte Licht absorbiert, wird sie als „schwarz“ bezeichnet. Der Emissionsgrad eines Hohlraums geht gegen 0,98, wenn er siebenmal tiefer als breit ist.

Oberflächentemperatur

Da i. d. R. nur die Oberflächentemperaturmuster der meisten Objekte sichtbar sind (da sie undurchsichtig sind), muss der Thermografieexperte diese Muster interpretieren und analysieren und sie mit den internen Temperaturen und Strukturen des Objekts in Beziehung setzen. Zum Beispiel werden bei einer Hausaußenwand verschiedene Temperaturmuster angezeigt. Die Aufgabe des Thermografieexperten ist es aber, diese Muster mit der Struktur und den thermischen Daten des Hauses in Einklang zu bringen. Um dies akkurat tun zu können, muss ein grundlegendes Verständnis vorhanden sein, wie Wärme von verschiedenen Komponenten und Materialien in der Wand befördert wird.

Bei kaltem Wetter wird Wärme aus dem Inneren des Hauses durch die Wandstruktur

zur Außenfläche übertragen. Zwischen der Oberfläche und der Umgebung bildet sich dann ein thermisches Gleichgewicht aus. An diesem Punkt betrachtet der Thermografieexperte diese Oberfläche mit einer Wärmebildkamera und muss das angezeigte Bild interpretieren. Diese Beziehungen können oft recht komplex sein, lassen sich aber in vielen Fällen durch gesunden Menschenverstand und Beachtung der Grundlagenwissenschaft verstehen.

Emissionsgrad

Unlackierte und wenig oxidierte Metalle sind mit einer Wärmebildkamera schwer darzustellen, weil sie wenig emittieren und viel reflektieren. Diese Faktoren müssen unabhängig davon, ob nur die thermischen Muster betrachtet oder tatsächliche radiometrische Temperaturmessungen durchgeführt werden, beachtet werden. Bei vielen Wärmebildkameras können Korrekturen bei Emissionsgrad und thermischer Hintergrundstrahlung vorgenommen werden. Für viele Materialien gibt es Emissionsgrad-Korrekturtabellen.

Diese können zwar für das Verständnis des Materialverhaltens sinnvoll sein, in der Realität können bei der Korrektur der meisten Oberflächen mit niedrigem Emissionsgrad jedoch unannehmbar große Fehler auftreten. Oberflächen mit niedrigem Emissionsgrad sollten modifiziert werden, z. B. durch Abdecken mit Isolierband oder Farbe, um den Emissionsgrad zu erhöhen. Dadurch werden sowohl die Interpretation als auch die Messung genauer und praktikabel.

GENAUIGKEIT VON TEMPERATURMESSUNGEN

Die Genauigkeit moderner Infrarot-Messgeräte ist relativ hoch. Beim Betrachten mäßig warmer Oberflächen mit hohem Emissionsgrad innerhalb der Messauflösung eines Systems

beträgt die Genauigkeit in der Regel $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ bzw. 2 % des Messwerts (kann jedoch je nach Wärmebildkameramodell variieren). Zudem hat die Infrarottechnologie wegen der höheren Genauigkeit der Messungen einen erheblichen Wert, da Infrarot-Messgeräte keinen Kontakt mit dem Messobjekt erfordern.

Da Temperaturmessungen auf der Erfassung von Infrarotstrahlung basieren, wird die Genauigkeit der Temperaturmessungen in der Regel durch die folgenden Faktoren verringert:

- Emissionsgradwerte unter 0,6
- Temperaturschwankungen von $\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Durchführung von Messungen außerhalb der Systemauflösung (Messobjekt zu klein oder zu weit entfernt)
- Gesichtsfeld

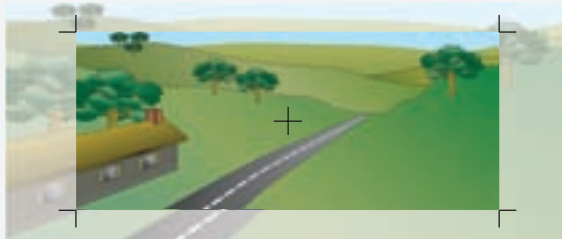
Gesichtsfeld (FOV)

Das *Gesichtsfeld (FOV)* ist eine Spezifikation, die die Größe des sichtbaren Wärmebilds definiert. Den größten Einfluss auf das FOV hat das Objektiv (unabhängig von der Matrixgröße). Unabhängig vom verwendeten Objektiv liefern große Matrizen jedoch mehr Details im Vergleich zu schmalen Matrizen. Für einige Anwendungen, z. B. Arbeiten an Freiluft-Umspannwerken oder in einem Gebäude, ist ein großes FOV sinnvoll. In einem Gebäude können kleinere Matrizen ausreichend Details liefern. Bei der Arbeit an Umspannwerken kommt es jedoch mehr auf Details an. **Siehe Abbildung 4-7.**

Momentanes Gesichtsfeld (IFOV)

Das *momentane Gesichtsfeld (IFOV)* ist eine Spezifikation für die Beschreibung der Fähigkeit einer Wärmebildkamera zur Auflösung räumlicher Details (räumliche Auflösung). Das IFOV wird in der Regel als Winkel in Milliradianen (mRad) angegeben. Bei der Projektion vom

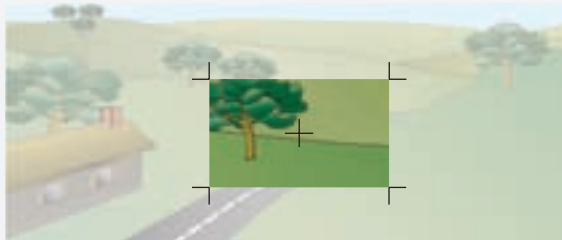
Gesichtsfeld (FOV)



WEITES FOV - WEITWINKELOBJEKTIV



STANDARD-FOV - STANDARDOBJEKTIV



ENGES FOV - TELEOBJEKTIV

Abbildung 4-7. Das Gesichtsfeld (FOV) ist eine Spezifikation, durch die die Fläche des sichtbaren Wärmebilds bei Verwendung eines bestimmten Objektivs definiert wird.

Detektor durch das Objektiv gibt das IFOV die Größe eines Objekts an, das bei einem bestimmten Abstand sichtbar ist.

Das *IFOV-Maß* ist die Messauflösung einer Wärmebildkamera, mit der das kleinste Objekt angegeben wird, das bei einem bestimmten Abstand messbar ist. **Siehe Abbildung 4-8.** Es wird als Winkel (in mRad) angegeben, ist aber in der Regel um den Faktor 3 größer als das IFOV. Das hängt damit zusammen, dass die Wärmebildkamera zur Messung eines Messob-

jekts mehr Informationen über dessen Strahlung benötigt als zu dessen Erfassung. Es ist wichtig, die räumliche Auflösung und Messauflösung des jeweiligen Systems zu kennen und damit zu

TECHNIKTIPP

Alle Wärmebildkamera-Messobjekte strahlen im Infrarotspektrum messbare Energie ab. Bei Erwärmung des Messobjekts wird mehr Energie abgestrahlt. Sehr heiße Messobjekte strahlen so viel Energie ab, dass diese sogar mit bloßem Auge wahrgenommen werden kann.

arbeiten. Andernfalls können ungenaue Daten bzw. Ergebnisse die Folge sein.

Umwelteinflüsse

Der Wert einer Oberflächenmessung kann sich trotz hoher Genauigkeit erheblich verringern, wenn der Temperaturgradient zwischen betrachteter Oberfläche und interner Wärmequelle groß ist, z. B. bei internen Fehlverbindungen in ölgefüllten elektrischen Betriebsmitteln. Der Thermografieexperte kann auf der Oberfläche keine große Änderung erkennen, wenn sich die interne Verbindung ändert. Erstaunlicherweise haben auch Objekte wie elektrische Schraubverbindungen häufig einen großen Gradienten, selbst

über kurze Entfernungen. Daher müssen bei der Interpretation eines Wärmebilds immer auch die internen Bedingungen einbezogen werden.

Eine ähnliche Wertverringering tritt auf, wenn die externen Einflüsse auf die Oberflächentemperatur erheblich oder unbekannt sind. Das kann z. B. beim Betrachten des flach geneigten Dachs eines Gebäudes bei der Untersuchung hinsichtlich des Eindringens von Feuchtigkeit bei starkem Wind der Fall sein. Die Feuchtigkeit ist nicht sichtbar. Die charakteristische Wärmesignatur ist oft nicht mehr vorhanden. Feuchte Oberflächen können auch bei Verdampfung und bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt problematisch sein.

Räumliche Auflösung und Messauflösung

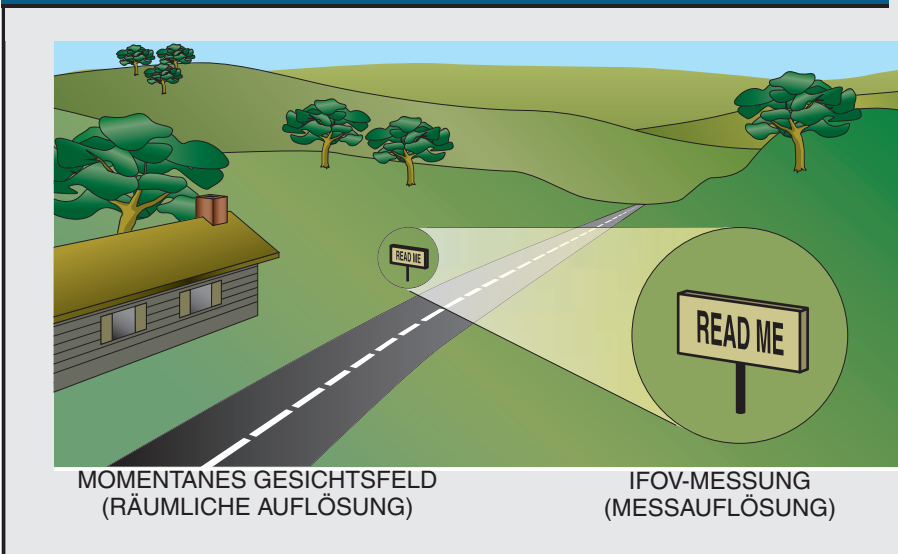


Abbildung 4-8. Das IFOV-Maß ist die Messauflösung einer Wärmebildkamera, mit der das kleinste Objekt angegeben wird, das bei einem bestimmten Abstand messbar ist. IFOV ist dem Sehen eines Schilds in der Ferne ähnlich, während die IFOV-Messung dem Lesen des Schilds ähnelt, entweder weil es näher oder weil es größer ist.



FARBWÄRMEBILDER VON ANWENDUNGEN

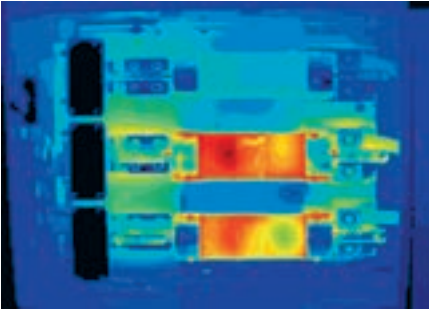


Abbildung 5-1. Der „Hot Spot“ (überhitzte Zone) auf dem Wärmebild zeigt nicht immer das Hauptproblem an. Die obere Sicherung ist möglicherweise durchgebrannt. Die Sicherung in der Mitte ist evtl. ebenfalls problembehaftet.

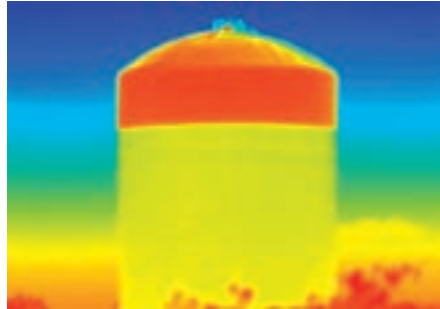


Abbildung 5-2. Unter geeigneten Bedingungen kann der Flüssigkeitsstand in einem Vorratstank auf einfache Weise erfasst werden.

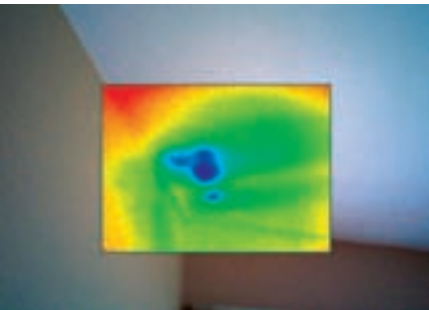


Abbildung 5-3. Ein blauer (oder dunkler) Punkt im Wärmebild zeigt einen Bereich unerwarteter Feuchtigkeit an einer Decke.

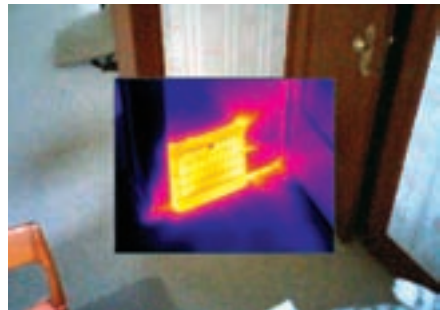


Abbildung 5-4. Die helleren, wolkigen Wärmemuster in diesem Bild-im-Bild-Wärmebild (BIB) eines Klimaanlagen-Lüftungsgitters deuten auf übermäßige Luftleckage in den Kanal- und Rohrverbindungen hin.

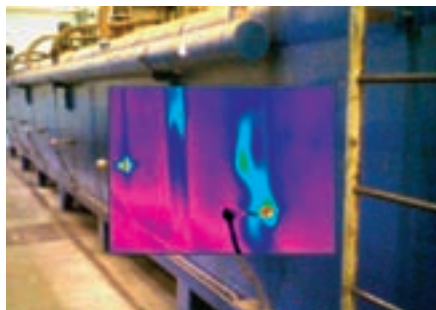


Abbildung 5-5. Unerwartete Wärmemuster an einem Glühofen können auf einen Zerfall der Feuerfestauskleidung hinweisen.



Abbildung 5-6. Beim Umlüftermotor auf der rechten Seite dieses Glühofens liegt möglicherweise ein Problem vor, da er heißer als die anderen Motoren ist.

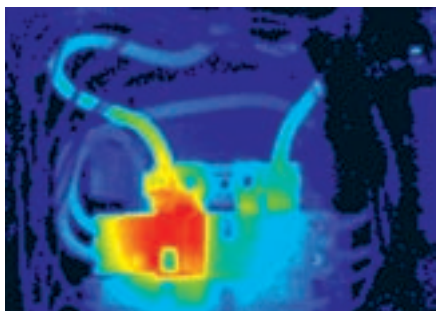


Abbildung 5-7. Eine hochohmige Verbindung bzw. eine Fehlfunktion eines Bauteils in einem Leistungsschalter im Wohnbereich ist im Gegensatz zum Sichtbild im Wärmebild klar erkennbar.

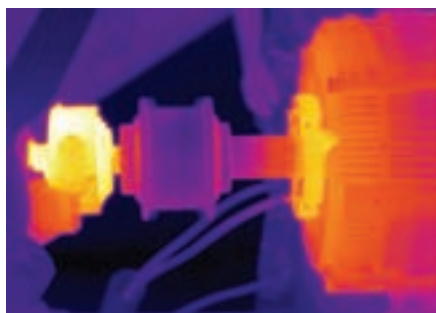


Abbildung 5-8. Während das Wärmebild eines Motors mit Kupplung auf beiden Seiten Wärmemuster zeigt, die auf ein Kupplungsalignierungsproblem hinweisen, ist dies im Sichtbild nicht erkennbar.

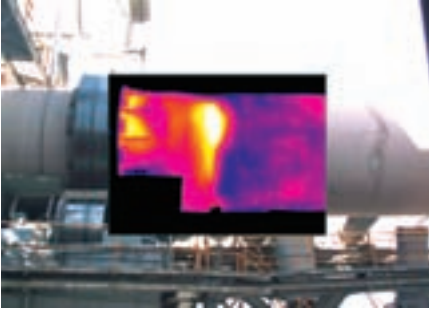


Abbildung 5-9. Mithilfe der Thermografie kann das Feuerfestmaterial im Zeitverlauf überwacht werden, sodass die Erkennung von Problembereichen in Zementöfen und anderen verfahrenstechnischen Anlagen möglich ist.

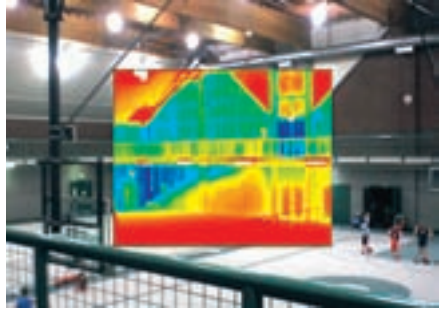


Abbildung 5-10. Mithilfe der Thermografie können verborgene Gebäudekonstruktionen und andere Merkmale sichtbar gemacht werden, z. B. eine Erdberme an der Außenseite dieser Sporthalle.

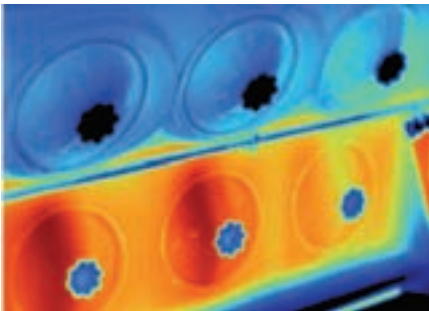


Abbildung 5-11. Eine Fehlzündung in einem Zylinder eines dieselelektrischen Kraftwerks zeigt unterschiedliche, kühlere Wärmemuster als bei normal arbeitenden Zylindern.



Abbildung 5-12. Mit Wärmebildkameras können große Gebäude und Anlagen untersucht werden, um unerwartete thermische Abweichungen zu finden, die auf potenzielle Probleme hindeuten.

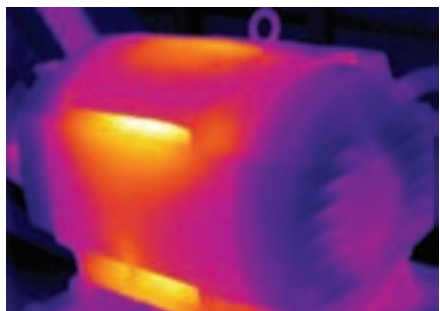


Abbildung 5-13. Das Wärmebild eines normal arbeitenden Motors in einer Lüftungsanlage zeigt die Ableitung von Wärme über die Entlüftungsöffnungen.

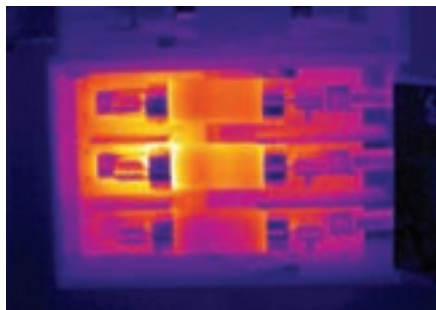


Abbildung 5-14. Der helle Bereich des Sicherungsblocks deutet darauf hin, dass hier ein zu hoher Widerstand oder ein internes Problem mit der mittleren Phase vorliegt.

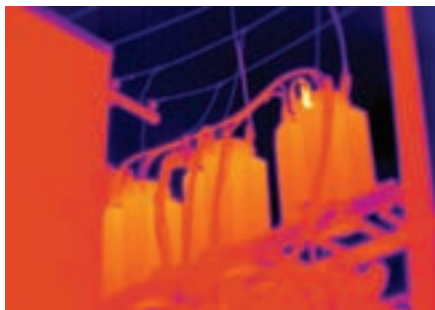


Abbildung 5-15. Eine heiße Durchführung und Anzapfung an einem hochliegenden Transformator ist ein deutliches Zeichen für ein Problem.



Abbildung 5-16. Eine hochohmige Verbindung an einem Überbrückungsleiter (möglicherweise durch Korrosion verursacht) kann erhebliche Folgen haben, wenn die Last weiter erhöht wird.

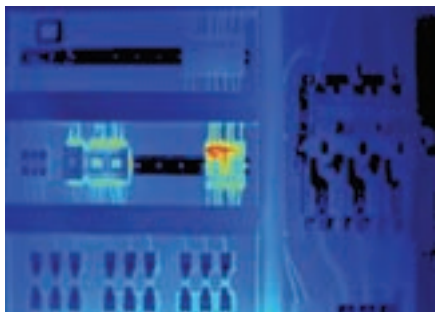


Abbildung 5-17. Durch die Verwendung einer Wärmebildkamera kann ein Problem mit einer internen Komponente einer Antriebssteuerung auf einfache Weise erfasst werden.

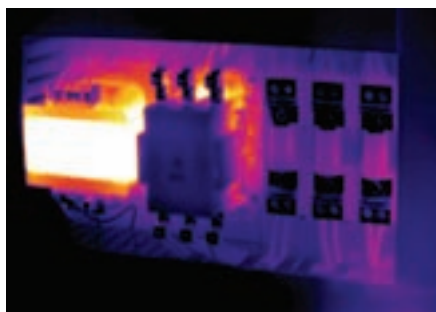


Abbildung 5-18. Eine eventuelle unsymmetrische Last an der Sicherung ganz rechts wird möglicherweise übersehen, wenn der Pegel und die Messspanne des Bilds nicht entsprechend angepasst werden.



Abbildung 5-19. Wenn entsprechende Kenntnisse von mechanischen Anlagen vorhanden sind, kann ein Techniker oft viele Fehlersuch- und Instandhaltungsarbeiten durchführen.

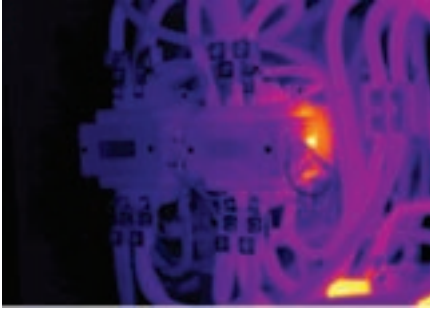


Abbildung 5-20. Beim Vergleich ähnlicher Bauteile unter ähnlichen Lastbedingungen wird ein potenzielles internes Problem sichtbar.

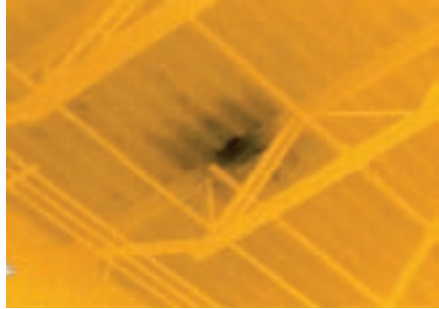


Abbildung 5-21. Mit Wärmebildkameras kann eine feuchte Dämmschicht in Verbindung mit einem Wasserleck an einem flach geneigten Dach erfasst werden. Wenn die Bedingungen entsprechend günstig sind und die Oberschicht des Metaldachs gestrichen ist, ist die Erfassung derartiger Signaturen evtl. von innen möglich.



Abbildung 5-22. Sättigungsfarben und Farbalarme innerhalb einer Graustufenpalette können nützlich sein, um festzustellen, welche Heißwasser- und Dampfventile offen sind und ordnungsgemäß funktionieren.

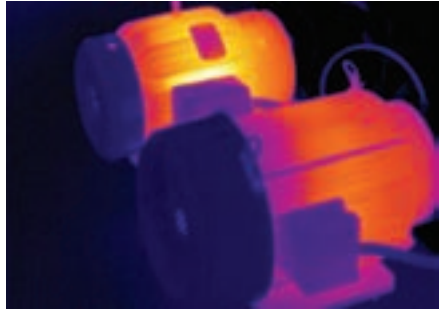


Abbildung 5-23. Obwohl zwei verschiedene Motor/ Pumpe-Paarungen unterschiedliche Wärmemuster zeigen, können beide Muster akzeptable Betriebsbedingungen signalisieren.

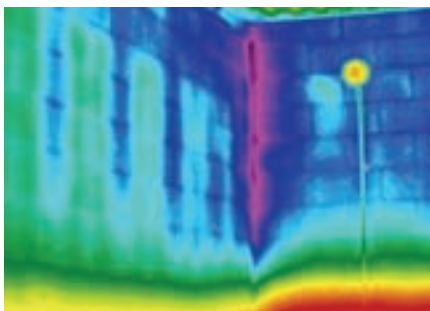


Abbildung 5-24. Wärmemuster in Blockmauerwerk zeigen das Eindringen von Feuchtigkeit an der Verbindungsstelle von zwei Wänden sowie unerwartete Unregelmäßigkeiten in der Konstruktion.

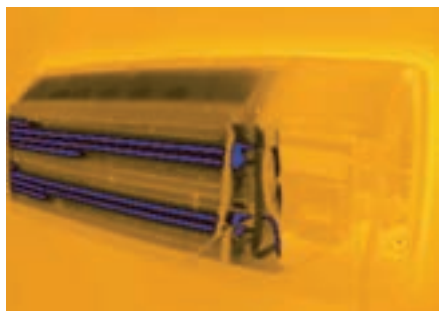


Abbildung 5-25. Die dunklen Bereiche zeigen den Transport von Kälteflüssigkeit durch die Kühlregister einer handelsüblichen Fenster-Klimaanlage.

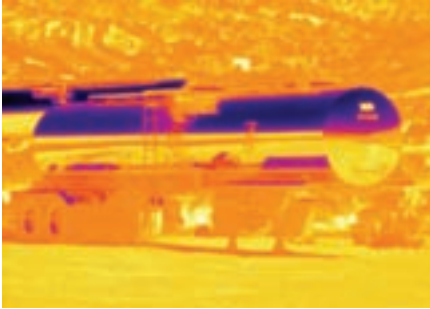


Abbildung 5-26. Die Auswirkungen von Materialien mit niedrigem Emissionsgrad auf Thermografiesysteme werden diesem Bild eines metallverkleideten Tanklastzugs deutlich. Das Metall reflektiert die Kühle des wolkenlosen Himmels und die von der Erde ausgestrahlte Wärme an einem sonnigen Tag.

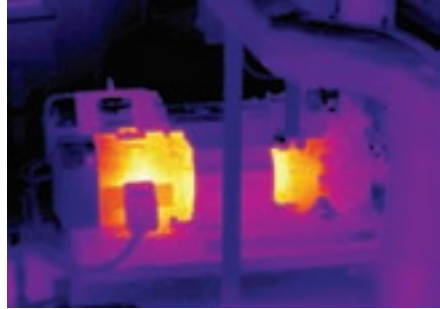


Abbildung 5-27. Mithilfe der Thermografie kann festgestellt werden, ob bestimmte Geräte ordnungsgemäß funktionieren. Das Wärmebild eines Motors mit angeschlossener Pumpe im Hintergrund zeigt, dass sie unerwartet nicht in Betrieb sind.

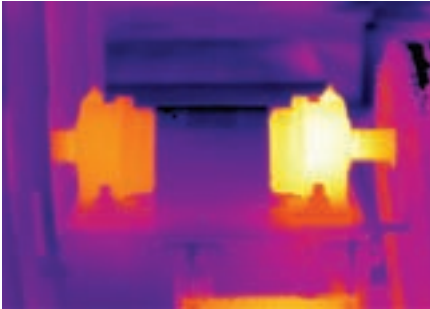


Abbildung 5-28. Der rechte Lagerdeckel dieses Klimageräts ist erheblich wärmer als der andere, was auf potenzielle Schmierungs-, Ausrichtungs- oder Riemenprobleme hinweist.

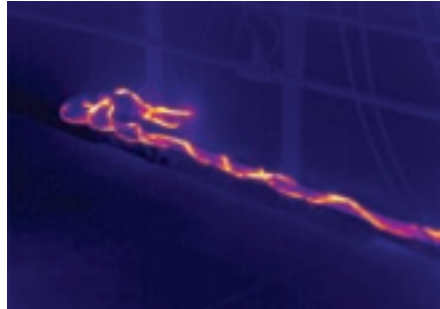


Abbildung 5-29. Die Thermografie kann sogar für Anwendungen wie die Fehlersuche an einem Heizdraht einer Wasserleitung für den Außenbereich verwendet werden, die bei kaltem Wetter nicht gefrieren darf.



Abbildung 5-30. Alle Objekte auf der Erde strahlen Infrarotenergie ab, auch kalte Gletscher auf Berggipfeln.

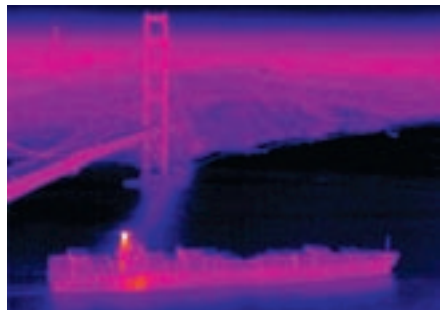


Abbildung 5-31. Ein bei Nacht aufgenommenes Wärmebild eines Containerschiffs zeigt, dass der Abgasschornstein und der Motorraum auch aus weiter Entfernung erfasst werden können.

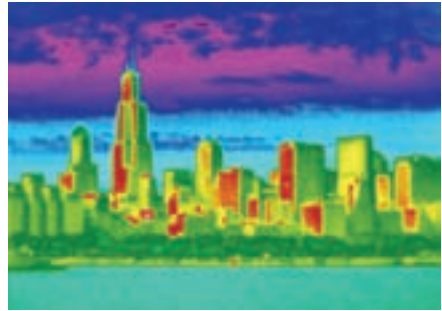


Abbildung 5-32. An einem dunstigen Spätsommertag sind die Details der Skyline der Stadt oder des Himmels im Sichtbild nicht klar erkennbar. Mit Thermografie können die Details sowie die verschiedenen Wolkenarten am Himmel jedoch deutlich sichtbar gemacht werden.

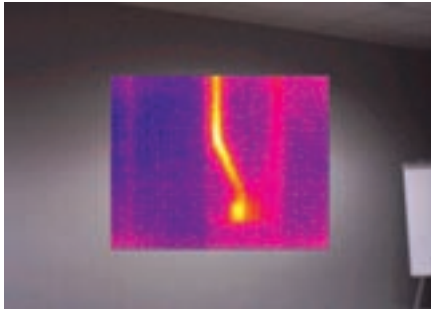


Abbildung 5-33. Selbst geringfügige Oberflächentemperaturunterschiede können schwer wiegende Probleme anzeigen, z. B. bei einem gemeinsamen Neutralleiter bzw. bei nicht ordnungsgemäßer Nullpunktterdung einer Beleuchtungsanlage. Dadurch kann das Kabelrohr in der Wand so stark erhitzt werden, dass Feuergefahr bestehen kann.

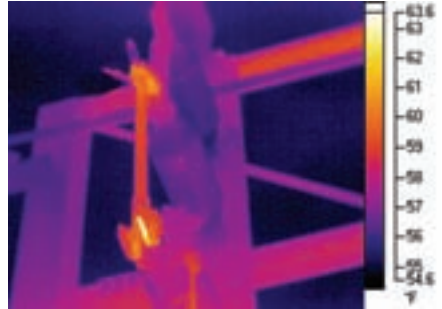


Abbildung 5-34. Die Lokalisierung von Problemen wie heiße Sperrklinken und Gelenkenden eines Hochspannungstrennschalter kann unter günstigen Bedingungen wie angemessene Last und wenig oder kein Wind einfach sein.

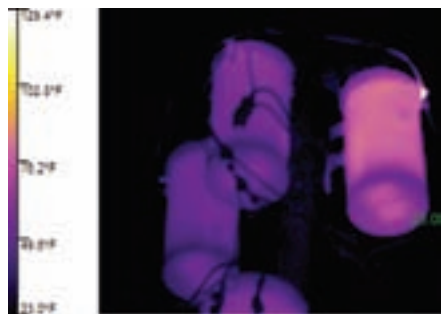


Abbildung 5-35. Manche Probleme können mit einer Wärmebildkamera auch aus großer Entfernung (links) erfasst werden. Wenn eine detailliertere Analyse erforderlich ist, muss mit einem Teleobjektiv gearbeitet oder ein geringerer Abstand zur Anlage gewählt werden (rechts).

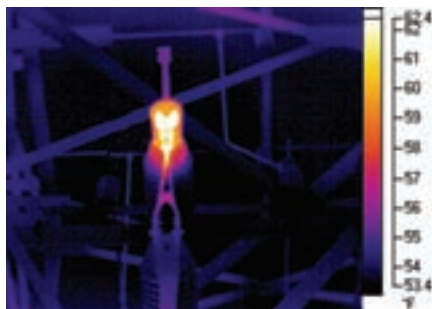


Abbildung 5-36. Die Aufheizung eines Trennschalters durch ungewöhnlich hohen Widerstand stellt oft ein schwer wiegendes und teures Problem dar, weil selbst bei relativ niedrigen Temperaturen Schäden verursacht werden können.

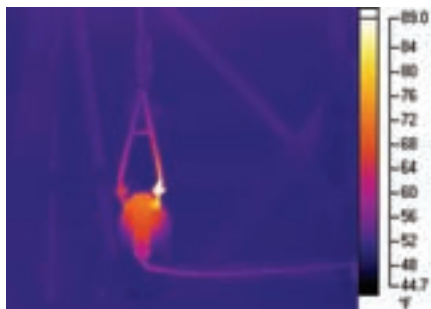


Abbildung 5-37. Da bei vielen Trennschaltern parallele Stromverlaufswege vorhanden sind, kann der „Hot Spot“ die Signatur einer normalen Verbindung und die kühlere Seite den eigentlichen Problembereich darstellen.

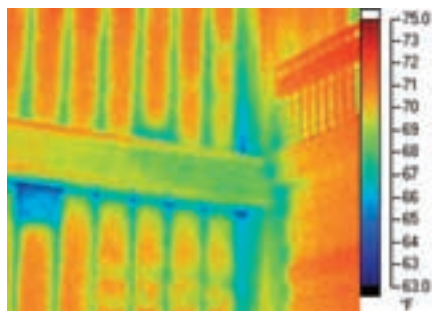


Abbildung 5-38. Ein kleiner Abschnitt fehlender Glasfaserisolierung in einem Gebäude kann ungewöhnliche Luftlecks entlang der Kanten anderer Bereiche verursachen.

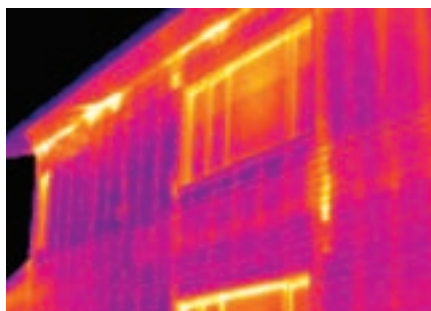


Abbildung 5-39. Durch mangelhafte Luftabdichtung kann warme Luft die Glasfaserisolierung umgehen, wie dies in vielen Bereichen dieses Geschäftsgebäudes der Fall ist.



Abbildung 5-40. Ein Transformator auf einem erhöhten Geräterahmen, der wärmer als die anderen Transformatoren erscheint, kann ein Zeichen für ein potenzielles Problem sein.

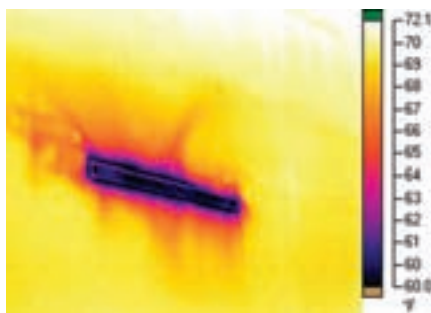


Abbildung 5-41. Klimatisierte Luft kann durch die Verbindungsstellen der Klimakanäle in die Wand hinter einem Diffusor gelangen.

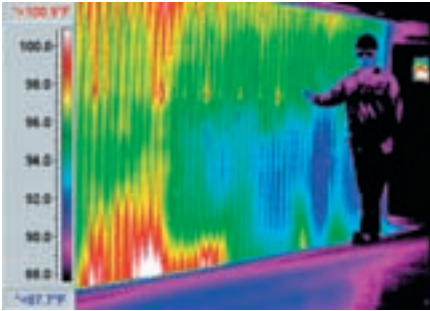


Abbildung 5-42. Die warmen Bereiche auf der Oberfläche eines Kessels können durch den Zerfall der Feuerfestauskleidung, Luftlecks oder eine Kombination von beiden verursacht werden.

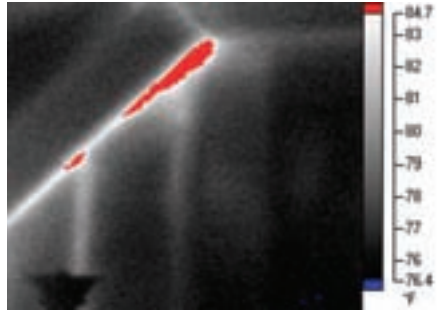


Abbildung 5-43. Die rote „Sättigungspalette“ zeigt deutlich die mangelhafte Passung der Glasfaserisolierung in einer schrägen Decke.



Abbildung 5-44. Ein Sicherungshalter in einer Antriebssteuerung ist ungewöhnlich warm.

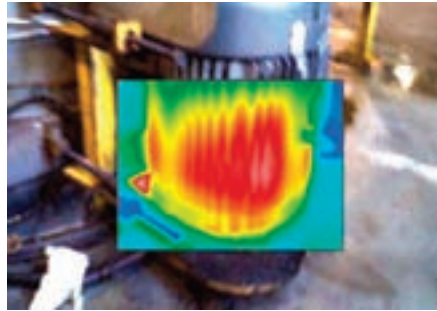


Abbildung 5-45. Die Temperatur eines Motorgehäuses kann schnell überprüft werden, um festzustellen, ob normale Funktion vorliegt.

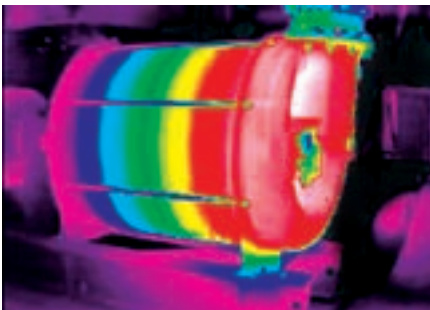


Abbildung 5-46. Dieser mehrstufige Kompressor funktioniert gut, wie an der Temperaturerhöhung jeder Stufe sichtbar ist.

G McIntosh



Abbildung 5-47. Mit Thermografie kann dokumentiert werden, ob eine Heizung in einem Schaltschrank normal funktioniert, um Kondensationsprobleme zu minimieren.



Abbildung 5-48. Anhand des Wärmebilds der Außenansicht eines Gebäudes können Problembereiche aufgezeigt werden, z. B. Abschnitte mit fehlender Isolierung.



Abbildung 5-49. Bereiche mit fehlender Isolierung werden bei kaltem Wetter als warme Stellen an der Außenseite des Gebäudes sichtbar.

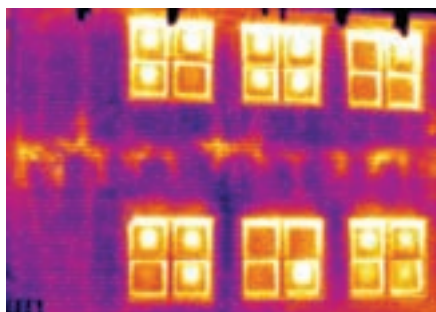


Abbildung 5-50. Warme Stellen in der Mitte des Doppelglasfensters können auf Verluste des isolierenden Argongases hinweisen, das normalerweise den Spalt zwischen den beiden Fensterscheiben füllt.

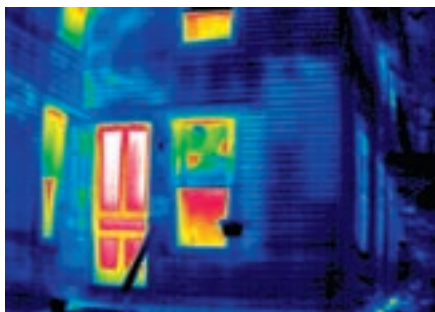


Abbildung 5-51. Mithilfe der Thermografie können Probleme wie fehlende oder beschädigte Isolierung dokumentiert werden.

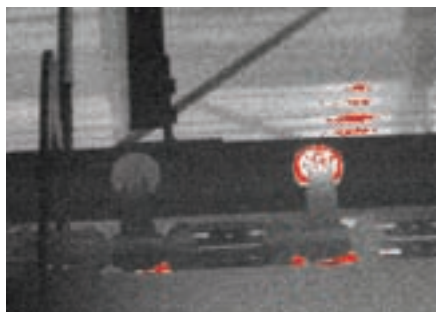


Abbildung 5-52. Ein ungewöhnlich warmes Lager einer Deckenlaufkatze kann zu erhöhtem Stromverbrauch und im Laufe der Zeit zur Kettendehnung führen.

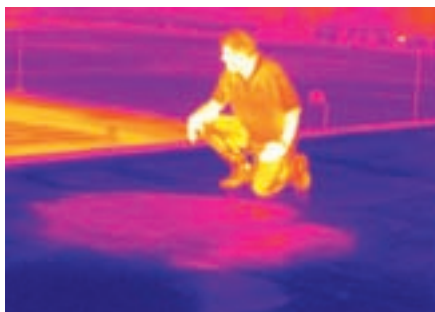


Abbildung 5-53. Ein Bereich feuchter Dachisolierung wird am frühen Abend, wenn die Bedingungen für die Erstellung von Wärmebildern optimal sind, als warme Stelle auf dem Dach angezeigt.

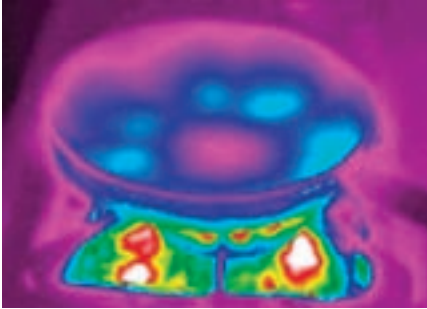


Abbildung 5-54. Eine Gusseisenpfanne mit ihrer speziellen Wärmesignatur beim Erhitzen.

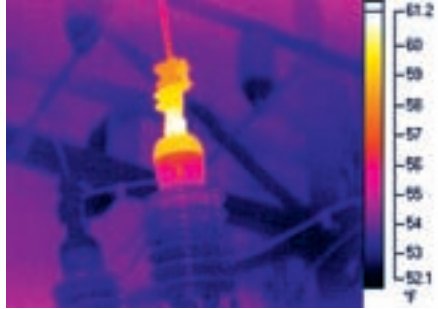


Abbildung 5-55. Der helle Bereich eines Öltrennschalters zeigt, dass die interne Verbindung zwischen Durchführungskappe und Durchführungsstab ungewöhnlich heiß ist.

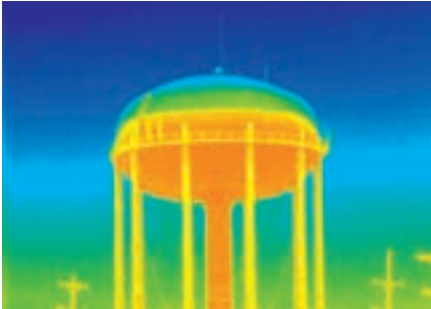


Abbildung 5-56. Der helle Bereich zeigt den Wasserstand in einem kommunalen Wasserspeicher an.

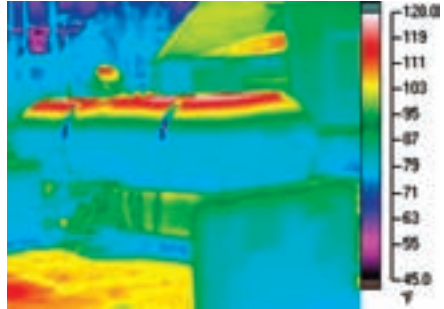


Abbildung 5-57. Mit einer Wärmebildkamera lässt sich der Stand des flüssigen Propan in einem Vorratstank leicht darstellen.

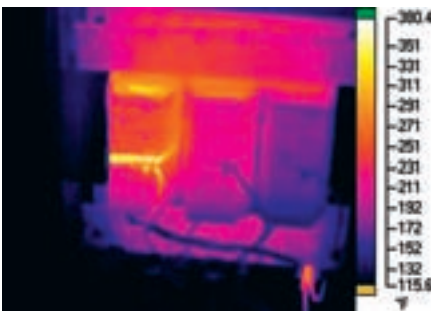


Abbildung 5-58. Die Wärmesignatur eines trockenen Drehstromtransformators zeigt, dass die Primärverbindung zur linken Phase ungewöhnlich warm ist.

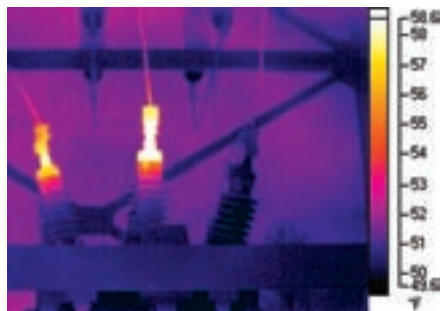


Abbildung 5-59. Zwei der sechs Durchführungskappen eines Öltrennschalters sind ungewöhnlich heiß und befinden sich in einem Zustand, der ohne Entdeckung und Reparatur hohe Kosten verursacht hätte.



Abbildung 5-60. Ein ordnungsgemäß funktionierender Kondensatabscheider muss auf der Dampfseite wärmer als auf der Kondensatseite sein, wie es in diesem Bild der Fall ist.



Abbildung 5-61. Flüssigkeitsstände in Vorratsstanks können bei optimalen Bedingungen mit einer Wärmebildkamera gut dargestellt werden.

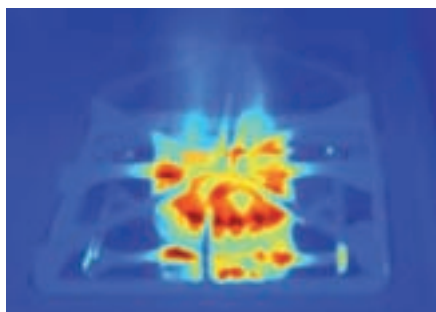


Abbildung 5-62. Obwohl ein Herdbrenner warm erscheint, ist die Flamme in einem Langwellen-Wärmebild kaum sichtbar.



Abbildung 5-63. Die vielen warmen Bereiche an der vorderen Außenwand eines Geschäftsgebäudes werden durch mangelhaft installierte Glasfaserisolierung verursacht.

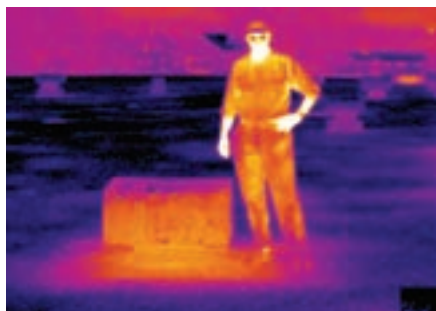


Abbildung 5-64. Neben feuchter Isolierung können viele Objekte auf einem Dach warme Signaturen haben, z. B. die Ablufthaube einer Klimaanlage.

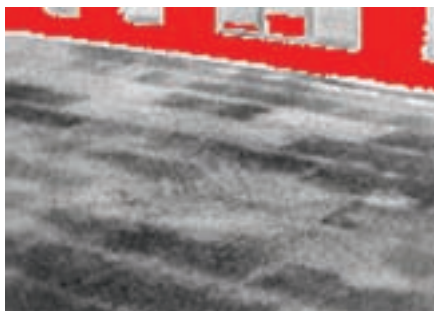


Abbildung 5-65. Wärmesignaturen von einlagig abgedichteten Dächern mit Schaumstoffisolierung können subtiler als Signaturen von Bitumendächern sein.

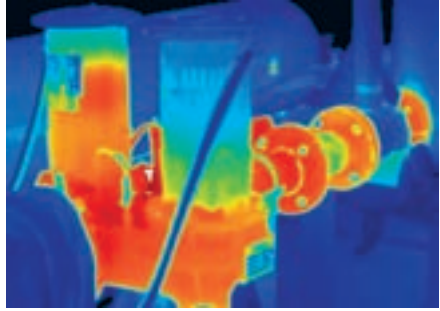
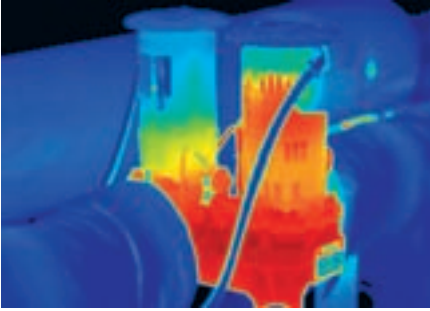


Abbildung 5-66. Eine Wärmesignatur kann zur Bestimmung der Funktion der einzelnen Stufen einer zweistufigen Pumpe dienen.



Abbildung 5-67. Ein gegen ein Deckenfördersystem reibender Riemen erzeugt einen Hot Spot in der Wärmesignatur. Der Riemen ist wegen eines in der Nähe befindlichen verschlissenen Rollenlagers falsch ausgerichtet. Erhöhte Reibung trug schließlich zur Überhitzung eines Antriebsmotors bei.

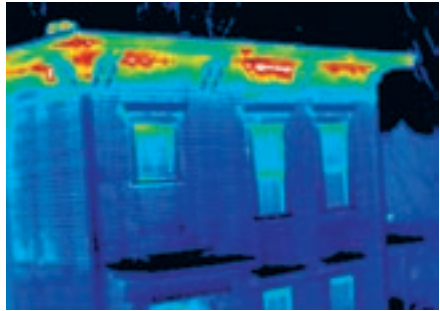


Abbildung 5-68. Übermäßiger Wärmeverlust kann durch warme Luft verursacht werden, die die Isolierung umgeht. Dadurch können in vielen Gebäuden erhebliche und kostenintensive Probleme verursacht werden, auch wenn Isolierung vorhanden ist.



Abbildung 5-69. Mangelhaft installierte, lose eingefüllte Isolierung in einem vorhandenen Wandhohlraum kann sich setzen und ihren Zweck weniger gut erfüllen als ursprünglich vorgesehen war.



Abbildung 5-70. Die menschliche Nase ist oft kälter als andere Körperteile, weil sie weniger stark durchblutet ist und stärker durch Konvektion gekühlt wird.

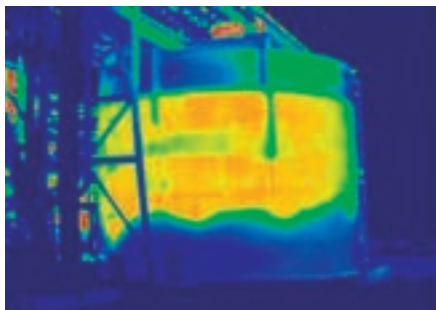


Abbildung 5-71. Sowohl die Flüssigkeits- als auch die Schlammpegel in einem Tank sind oft erfassbar, wenn sich ein Tank im thermischen Übergangszustand befindet.

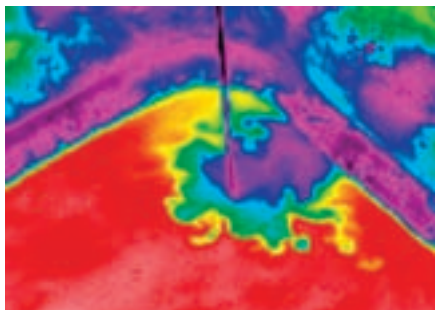


Abbildung 5-72. Wenn kaltes Wasser in ein mit warmem Wasser gefülltes Becken läuft, findet Wärmeübertragung durch Konvektion statt.



Abbildung 5-73. Der vergoldete Dom eines Regierungsgebäudes reflektiert den relativ kalten Himmel.

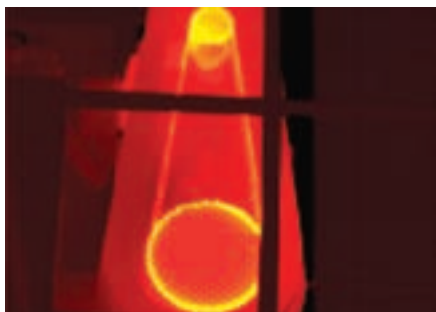


Abbildung 5-74. Die hellen Bereiche auf dem Wärmebild eines Riemmentriebs deuten aller Wahrscheinlichkeit nach auf mangelhafte Ausrichtung hin.

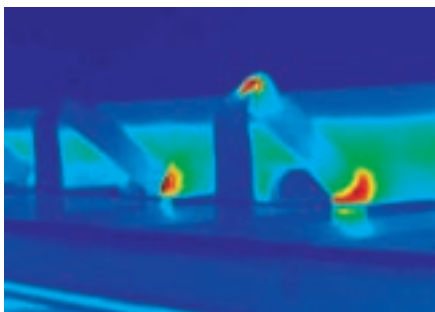


Abbildung 5-75. Die roten Bildbereiche zeigen mehrere übermäßig erhitzte Förderbandrollenlager.

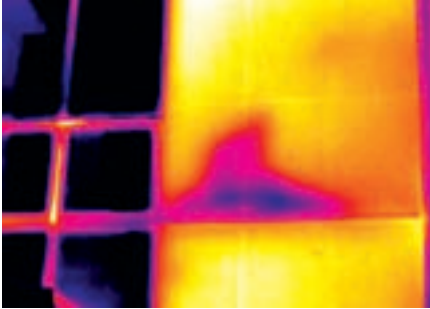


Abbildung 5-76. Wenn die Steinfassade von Geschäftsbauten von Feuchtigkeit durchdrungen wird, können Schäden verursacht werden.

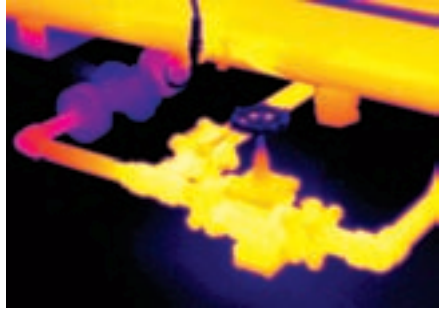


Abbildung 5-77. Dieses Wärmebild zeigt ein normal funktionierendes offenes Hydraulikventil.

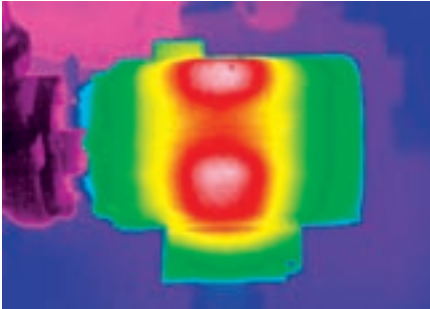


Abbildung 5-78. Das Wärmemuster eines normal funktionierenden Pumpenmotors hat eine gleichmäßige Wärmesignatur.

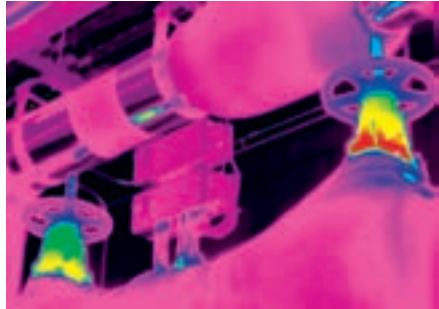


Abbildung 5-79. Helle Bereiche zeigen, wo Wärme von nicht isolierten Abschnitten eines Dampfsystems in der Nähe der Ventile entweicht.

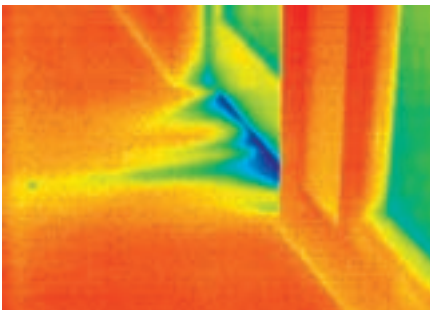


Abbildung 5-80. Unter einer Eingangstür entweichende kühle Luft hinterlässt ein feines, fingerähnliches Muster auf dem Flurboden.



Abbildung 5-81. Der rechte Stecker einer Gruppe von Computerservern zeigt ein Wärmemuster, das auf eine hochohmige Verbindung oder ein internes Verkabelungsproblem hindeutet.

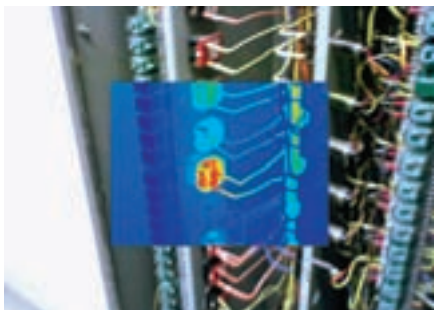


Abbildung 5-82. Der helle Bereich weist auf eine mögliche hochohmige Verbindung oder auf einen Bauteilausfall in einem Beleuchtungssteuerschrank hin.

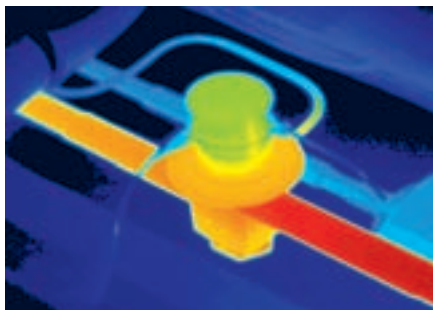


Abbildung 5-83. Die verschiedenen Farben auf beiden Seiten dieser Rohrkondensatoreinheit mit Bypass-Ventil zeigen eine ordnungsgemäße Funktion an.



Abbildung 5-84. Dieses Wärmebild zeigt, dass der rechte Transformator einen internen Defekt haben könnte.

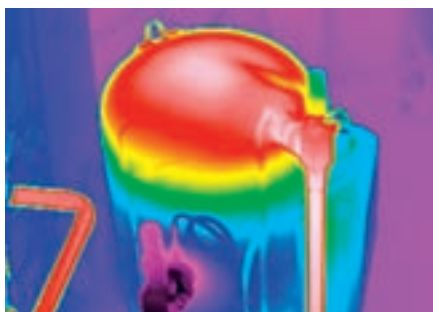


Abbildung 5-85. Ein Wärmebild eines normal funktionierenden Klimakompressors kann große Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Abschnitten und Bauteilen zeigen.

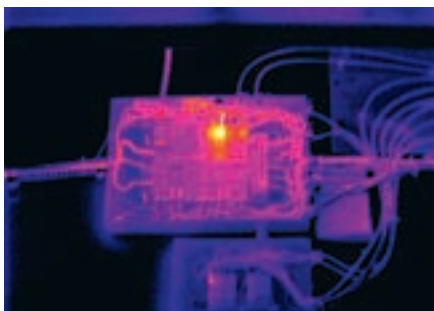


Abbildung 5-86. Thermografie kann bei der Verfolgung der Wärmeentwicklung von hochohmigen Verbindungen in Niederspannungssteueranlagen nützlich sein.

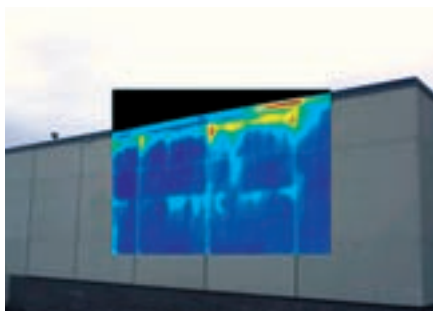


Abbildung 5-87. Bei Dächern mit mangelhafter Entwässerung kann Feuchtigkeit in die Betonblöcke und die Fassade von Gebäuden eindringen.



THERMOGRAFIE-ANWENDUNGEN

Thermografie kann für Anwendungen wie die Überprüfung von elektrischen und verfahrenstechnischen Anlagen sowie für die Gebäudediagnose eingesetzt werden. Zu elektrischen Anlagen zählen Motoren, Verteilungsanlagen und Umspannanlagen. Zu verfahrenstechnischen Anlagen gehören automatisierte Fertigungs- und Montageanlagen. Zur Gebäudediagnose zählen die Überprüfung von Dächern auf Feuchtigkeit, Inspektionen der Gebäudedämmung auf Luftleckage und die Feuchtigkeitserkennung. Die Dämmung umfasst Materialien in Wänden, Decken und Fußböden der thermischen Gebäudehülle.

ELEKTRISCHE ANWENDUNGEN

Wärmebildkameras werden hauptsächlich für die Inspektion der Intaktheit elektrischer Einrichtungen eingesetzt, weil die entsprechenden Messverfahren berührungslos sind und schnell ausgeführt werden können. Die meisten Thermografie-Aufgaben an elektrischen Einrichtungen sind qualitativ, d. h., es werden die Wärmesignaturen ähnlicher Bauteile verglichen. Eine Wärmesignatur ist eine Momentaufnahme der zu einem bestimmten Zeitpunkt von einem Objekt abgegebenen, oder emittierten, Wärme. Bei elektrischen Dreiphasensystemen ist dies relativ einfach, da die Phasen unter normalen Bedingungen fast immer leicht verständliche Wärmesignaturen haben.

Thermografie ist besonders effektiv, weil Geräteausfälle oft klar erkennbare Wärmesignaturen haben. Zudem können thermische Ausnahmen auch dann augenscheinlich werden, wenn Sichtprüfungen (wenn überhaupt) sehr wenige Informationen liefern. Eine *thermische Ausnahme* ist ein ungewöhnlicher oder verdächtiger Zustand von Geräten. Obwohl thermische Ausnahmen nicht immer erfassbar sind und die Grundursache nicht immer bekannt ist, ist die durch hohe elektrische Widerstände erzeugte Wärme in der Regel der Vorläufer elektrischer Defekte.

Wenn eine oder mehrere Phasen oder Bauteile unterschiedliche Temperaturen aufweisen und die Ursache dafür nicht mit dem normalen Lastausgleich im Zusammenhang stehen, kann eine thermische Ausnahme vorliegen. Zum Beispiel führt ein ungewöhnlich hoher Widerstand an einem Verbindungspunkt zur Erwärmung. Im defekten und damit spannungslosen Zustand können Komponenten jedoch kühler erscheinen.

Durch einen offenen Schaltschrank ist der Thermografieexperte verschiedenen Gefahren ausgesetzt. Stromschlag spielt hierbei in der Regel keine Rolle, da Thermografie berührungslos ist. Das Risiko einer Lichtbogen-Explosion ist jedoch höher, besonders oberhalb von 480 V.

Durch das Öffnen einer Tür kann z. B. ein Lichtbogenüberschlag ausgelöst werden, wenn die Verriegelung defekt ist oder Objekte wie Schädlinge oder Staub und Rückstände innerhalb des Gehäuses aufgewirbelt werden. Auf diese Weise kann ein Phase-zu-Masse-Lichtbogen entstehen. Wenn ein Lichtbogen einmal ausgelöst wurde, kann dieser innerhalb von weniger als einer halben Sekunde Temperaturen von mehr als 16.650 °C erreichen. Schaltschränke, die unter Spannung stehende elektrische Betriebsmittel enthalten, dürfen nur von entsprechend autorisiertem und geschultem Personal geöffnet werden.

Thermografieexperten müssen alle Anstrengungen unternehmen, um das Risiko einer Lichtbogen-Explosion zu minimieren. Detaillierte Anforderungen zur Minimierung der Gefahr von Lichtbogen-Explosionen werden von entsprechenden internationalen Entscheidungsgremien bereitgestellt. Diese Anforderungen umfassen Schulungen zu Risiken, Verfahren zur Durchführung von Inspektionen und die Erörterung der erforderlichen persönlichen Schutzausrüstung (PSA). Die persönliche Schutzausrüstung soll potenzielle Verletzungen durch die hohen Temperaturen eines Lichtbogenüberschlags verhindern und umfasst in der Regel Schutzeinrichtungen für die Augen, den Kopf, die Haut und die Hände. **Siehe Abbildung 6-1.**

Die Techniken für die Inspektion elektrischer Anlagen basieren auf gesundem Menschenverstand, Technologie und bewährten Instandhaltungsverfahren. Wenn irgend möglich, sollten die Bauteile und Geräte unter Spannung gesetzt und direkt mit einer

Wärmebildkamera betrachtet werden.

Gelegentlich müssen Inspektionen auch indirekt durchgeführt werden, z. B. bei gekapselten Motoranschlusskästen oder gekapselten Deckenschienenverteilern. Obwohl dies in einigen Situationen eine notwendige Alternative sein kann, z. B. bei einem Deckenschienenverteiler, wird es nicht als normales Verfahren empfohlen. Wenn es nicht möglich ist, ein Gehäuse zu öffnen, kann es sein, dass die Daten der thermografischen Inspektion selbst nicht die notwendigen Details liefern können.

Der Zugang zu einigen Geräten kann so schwierig und/oder so gefährlich sein, dass andere Inspektionsmaßnahmen erforderlich sind. Als zusätzliche Inspektionsmethoden kommen die Verwendung eines Betrachtungsfensters oder eines Infrarotsichtfensters in Frage, um das Innere des Schaltschranks oder Gehäuses darstellen zu können. Weitere Technologien wie Luftultraschall können ebenfalls genutzt werden.

Persönliche Schutzausrüstung (PSA)

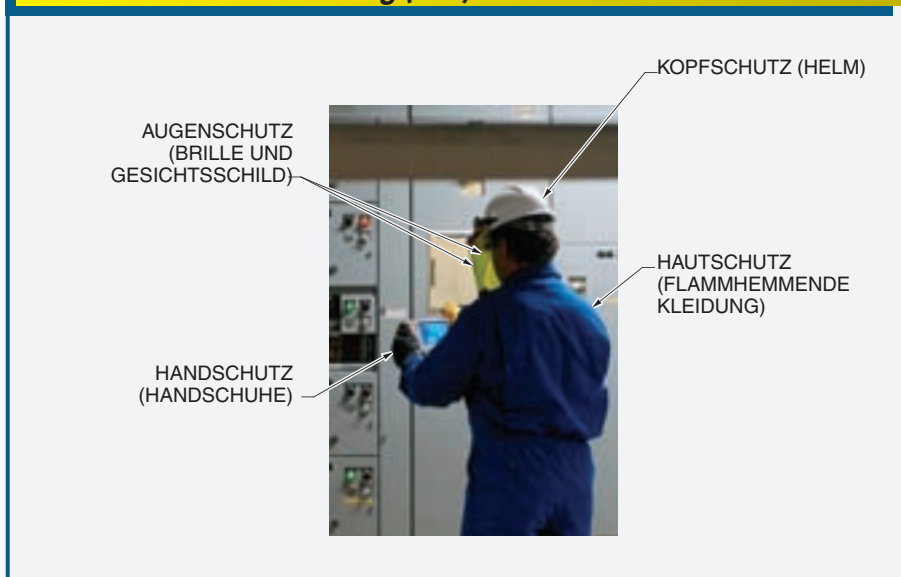


Abbildung 6-1. Persönliche Schutzausrüstung soll potenzielle Verletzungen durch die hohen Temperaturen und anderen Gefahren eines Lichtbogenüberschlags verhindern und umfasst in der Regel Schutzeinrichtungen für die Augen, den Kopf, die Haut und die Hände.

Um zu gewährleisten, dass alle Bauteile und Geräte sichtbar sind, ist die sorgfältige Anordnung eines Infrarotsichtfensters erforderlich. Ein *Infrarotsichtfenster* ist eine in Schaltschränken eingebaute Vorrichtung für die Übertragung von Infrarotenergie zur Betrachtung mit einer Wärmebildkamera. Infrarotsichtfenster können oft die Anwendung der Thermografie ermöglichen, ohne dass Gehäusetüren oder Abdeckungen geöffnet werden müssen. **Siehe Abbildung 6-2.**

Infrarotsichtfenster

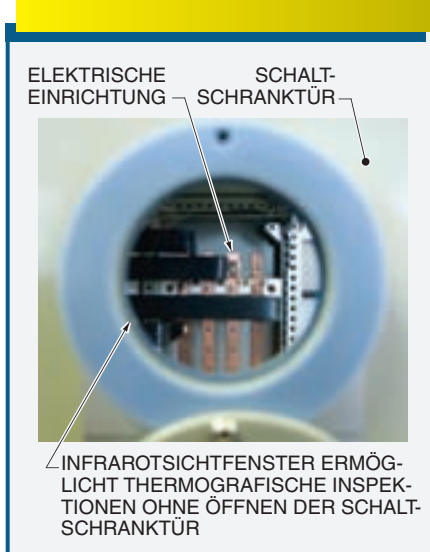


Abbildung 6-2. Ein Infrarotsichtfenster dient zur Übertragung von Infrarotenergie zur Wärmebildkamera, ohne dass die Gehäusetüren oder Abdeckungen geöffnet werden müssen.

Eventuell können auch Einrichtungen zur Erfassung von Luftultraschall eingesetzt werden. *Luftultraschall* ist ein durch eine fehlerhafte elektrische Verbindung erzeugtes Geräusch. Das Geräusch ist vom menschlichen Gehör nicht wahrnehmbar, kann aber mit speziellen Abhörgeräten erfasst werden. Auch Mikrolichtbögen in einer Verbindung erzeugen in der Regel eine

erfassbare Luftultraschallsignatur durch einen Riss oder eine kleine Öffnung im Gehäuse.

Während einer Inspektion gilt die Aufmerksamkeit insbesondere elektrischen Verbindungen bzw. elektrischen Kontaktpunkten. Elektrische Verbindungen und Kontaktpunkte sind empfindlich gegenüber durch ungewöhnlich hohen Widerstand verursachte Wärme. Dies ist die Hauptquelle von Systemausfällen.

Auch elektrische Stromunsymmetrien zwischen den Phasen können erfasst werden. Häufig werden diese als normal angesehen, z. B. in Lichtstromkreisen. Sie können jedoch sehr kostspielige Ausfälle anderer Teile der elektrischen Anlage verursachen, z. B., wenn einem Elektromotor eine Phase fehlt oder bei überlasteten Stromkreisen.

Obwohl der Einsatz von Wärmebildkameras für elektrische Anwendungen weit verbreitet ist, erfolgt die Verwendung oft uneffektiv und unsachgemäß. Potenzielle Probleme können übersehen oder nach ihrer Lokalisierung vom Thermografieexperten falsch verstanden werden. Außer dem Ausmaß des Problems können viele Faktoren die durch ein Thermografiesystem dargestellte Oberflächentemperatur beeinflussen. Zudem ist für das Verhältnis zwischen Wärme und Ausfallhäufigkeit (insbesondere im Zeitablauf) nicht immer ein ausreichendes Verständnis vorhanden.

Es ist bekannt, dass sich die Temperatur einer elektrischen Verbindung mit der Last ändert. Die Wärmeabgabe einer hochohmigen Verbindung ist vorhersagbar (I^2R), die erreichbare Temperatur ist allerdings weit weniger gut vorhersagbar. Aus diesem Grund wird in einigen Normen empfohlen, Inspektionen mit einer Mindestlast von 40 % oder, wenn möglich, mit der höchsten Normallast durchzuführen. Besonderes Augenmerk muss Unregelmäßigkeiten von nur leicht belasteten Einrichtungen gelten, bei denen die Last in Zukunft aller Wahrscheinlichkeit nach zunehmen wird.

Wenn Gehäuse nicht problemlos geöffnet und erhitzte Bauteile (wie bei einem gekapselten Deckenschienenverteiler) nicht direkt betrachtet werden können, ist der Temperaturgradient zwischen dem Problem und der betrachteten Oberfläche in der Regel sehr groß. Der *Temperaturgradient* ist die Differenz zwischen der tatsächlichen Temperatur an der Problemquelle und der an der mit der Wärmebildkamera betrachteten Oberfläche erfassten oder gemessenen Temperatur. Eine Oberflächen-Wärmesignatur von lediglich 2,8 °C an einem gekapselten Schienenverteiler kann auf einen internen Defekt hindeuten. Ölgefüllte Einrichtungen, z. B. Trans-



Zur Verringerung von Blendeffekten auf dem Display stehen abnehmbare Sonnenblenden für Wärmebildkameras zur Verfügung.

formatoren, haben ähnliche oder noch größere Temperaturgradienten.

Bei Inspektionen im Freien bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 8 km/h ist besondere Vorsicht geboten. Zum Beispiel sollte die Darstellung überhitzter Gerätebereiche mit der Darstellung verglichen werden, wenn kein Wind weht. Manche Unregelmäßigkeiten können bei höheren Windgeschwindigkeiten unter die Erfassungsschwelle abkühlen. Ähnliche Einflüsse können in einer Anlage auftreten, wenn Schaltschränke längere Zeit offen gelassen werden, bevor die Inspektion durchgeführt wird. Gute Inspektionsverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die Durchführung der Inspektion nach

Öffnen eines Schaltschranks so schnell und sicher wie möglich erfolgt.

Auch das Betrachten eines Bilds auf einem Anzeigebildschirm im Freien kann oft problematisch sein. Die Beleuchtungsbedingungen können Blendeffekte verursachen und so die Erkennbarkeit von erfassten Details und Nuancen erschweren. Geräteinspektionen im Freien müssen nicht unbedingt nachts durchgeführt werden. Allerdings kann auch helles, sonniges Wetter durch Sonnenerwärmung widersprüchliche Bilder liefern. Dies gilt besonders für dunkle Bauteile wie keramische Hochspannungsisolatoren.

Die Erfassung zuverlässiger thermischer Daten einer elektrischen Anlage ist nicht immer so einfach, wie es zunächst erscheint. Selbst korrekte thermische Daten können von Thermografieexperten falsch verwendet werden, wenn die Priorisierung der Testergebnisse nicht ordnungsgemäß gehandhabt wird. Zum Beispiel ist die Temperatur oft kein zuverlässiger Indikator der Schwere eines Problems, weil sie durch viele Faktoren verändert werden kann. Dennoch glauben viele Thermografieexperten fälschlicherweise, je wärmer eine Problemkomponente ist, desto schwerwiegender sei das Problem im Vergleich mit anderen, kühleren Bauteilen.

In ähnlicher Weise kann fälschlicherweise angenommen werden, dass kein Problem vorliegt, wenn ein Bauteil oder Anlagenteil nicht übermäßig heiß ist. Bei der Erfassung und Interpretation thermischer Daten muss mit Umsicht vorgegangen werden, um die Vorteile der Thermografie voll nutzen zu können.

Statt die Prioritäten ausschließlich in Abhängigkeit von der Temperatur zu setzen, ist es sinnvoller zu bedenken, wie alle Parameter mit dem Problembauteil zusammenwirken und diese beeinflussen. Dies kann auf einfache Weise mit Messgeräten oder formaler durch die Grundursachen-Fehleranalyse unter Verwendung von technischen Analysegeräten erfolgen. Die ordnungsgemäße Durchführung thermischer

Inspektionen von Elektroanlagen bietet große Vorteile. Erfolgreiche Unternehmen sind in der Lage, ungeplante Stillstandszeiten durch elektrische Defekte praktisch zu eliminieren.

ELEKTROMECHANISCHE UND MECHANISCHE ANWENDUNGEN

Elektromechanische und mechanische Inspektionen werden für eine Vielzahl von Geräten durchgeführt. Die Thermografie hat sich als sehr wertvoll für die Inspektion von Geräten wie Motoren, umlaufende Anlagen und Maschinen und Kondensatabscheider erwiesen. Bei den meisten dieser Anwendungen werden qualitative Ergebnisse geliefert. Das aktuelle Wärmebild wird in der Regel mit einem vorherigen Wärmebild verglichen. Festgestellte Unterschiede durch geänderte Gerätezustände werden dann festgehalten. Ein Thermografieexperte muss über ein solides Wissen in der Wärmeübertragung verfügen, um Funktion und Fehlfunktionen von Geräten verstehen zu können.

Motoren werden thermisch untersucht, weil sie sehr empfindlich gegenüber Überhitzungen sind und entsprechend häufig ausfallen. Zum Beispiel entsteht durch die falsche Ausrichtung und Unsymmetrie von Motoren in der Regel Überhitzung. Zwar ist es sinnvoll, die Oberflächentemperatur des Motorgehäuses zu beobachten, Änderungen der internen Motortemperatur sind aber nicht immer sofort offensichtlich. Es kann nützlich sein, Wärmebilder eines Motors im Zeitablauf zu erstellen oder diese mit Motoren zu vergleichen, die unter ähnlichen Bedingungen arbeiten. Dadurch können z. B. Motoren erkannt werden, die mit Staub zugesetzt sind oder die nur mit einer Phase laufen und zu warm werden.

Die Wärmesignatur von Motorlagern kann ebenfalls für Inspektionen genutzt werden. Wenn z. B. Motorlager wesentlich wärmer als der Motor sind, deutet das auf ein mögliches Problem hin, das genauer untersucht werden

sollte. In ähnlicher Weise sollten normal funktionierende Motorkupplungen und Wellenlager Wärmesignaturen haben, die sehr dicht an der Umgebungstemperatur liegen. **Siehe Abbildung 6-3.** Es ist sinnvoll, Thermografie mit weiteren Untersuchungen zu kombinieren, z. B. mit Schwingungs- oder Motorstromkreisanalyse.

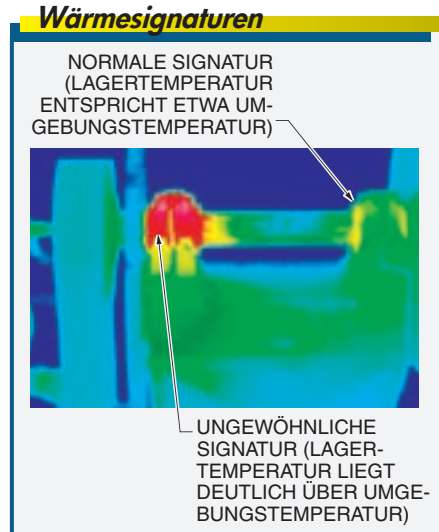


Abbildung 6-3. Normal funktionierende Motorkupplungen und Wellenlager sollten Wärmesignaturen haben, die sehr dicht an der Umgebungstemperatur liegen.

Die Thermografie hat sich für die Inspektion von mit niedriger Drehzahl umlaufenden Anlagen, bei denen andere Untersuchungsmethoden nicht sinnvoll oder zuverlässig sind (z. B. Förderbänder), als besonders wertvoll erwiesen. Auch komplexere Einrichtungen wie Turbinen, Getriebe und Wärmetauscher können mit Wärmebildkameras untersucht werden. Dazu muss jedoch oft mehr in die Erstellung von Ausgangswerten für Messdaten investiert werden, bevor die Ergebnisse nachfolgender Inspektionen von Nutzen sein können.

PROZESSANWENDUNGEN

Thermografische Inspektionen werden häufig zur Überwachung von Einrichtungen verwendet, die für hohe Temperaturen konzipiert sind (feuerfeste Einrichtungen). Zum Beispiel können Instandhaltungstechniker thermische Daten nutzen, um den Zustand der Isolierung zu beurteilen oder um Oberflächentemperaturen zu berechnen, die zu Ausfällen führen können.

Eine *Basisinspektion* ist eine Inspektion, mit der ein Bezugspunkt geschaffen werden soll, wie bestimmte funktionstüchtige Einrichtungen unter normalen Betriebsbedingungen arbeiten. Eine *Trendinspektion* ist eine nach der Basisinspektion durchgeführte Inspektion. Mit ihr werden Vergleichsbilder erstellt. Die Überwachung von Trends im Zeitablauf liefert diagnostische und vorausschauende Informationen. Dadurch wird der Thermografieexperte in die Lage versetzt, Unterschiede oder Ähnlichkeiten zu vergleichen, durch die auf die Geräteleistung geschlossen werden kann.

Basisinspektionen müssen zuerst durchgeführt werden. Anschließend sind kontinuierlich Trendinspektionen vorzunehmen. Die Häufigkeit dieser Inspektionen hängt davon ab, welche Folgen ein Ausfall oder Defekt hat und in welchem Zustand sich die entsprechenden Einrichtungen befinden. Durch die Überwachung von Trends wird die vorbeugende Instandhaltung wesentlich leistungsfähiger, und unvorhergesehene Stillstandszeiten und teure Ausfälle werden verringert.

Alle Arten von Wärmedämmung können durch die Beobachtung der Veränderung der Oberflächen-Wärmesignatur untersucht werden. Zu diesen Wärmedämmungsarten gehören Isolierungen für Dampfleitungen, Produktleitungen und Rohrleitungsnetze sowie Begleitheizungen an Prozessleitungen (Dampf und elektrisch). Leider sind viele Arten von Isolierungssystemen mit unlackierten Metallverkleidungen versehen,

sodass die Thermografie hier erheblich an Wert einbüßen kann. Bei unlackierten Metallverkleidungen lassen sich Wärmesignaturen wegen des geringen Emissionsgrads und der starken Reflexionen nur schwer bestimmen.

Eine häufige Anwendung der Thermografie ist die Bestimmung bzw. Bestätigung der Füllstände von Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen in Behältern, z. B. in Vorrattanks und Silos. **Siehe Abbildung 6-4.** Obwohl die meisten Behälter mit entsprechenden Instrumenten zur Bestimmung des Füllstands ausgestattet sind, liefern diese wegen Funktionsstörungen oft ungenaue Daten, oder die Daten müssen unabhängig bestätigt werden.

TECHNIKTIPP

Kondensatabscheider und die meisten Ventile zeigen bei normaler Funktion deutliche Temperaturunterschiede zwischen den verschiedenen Geräten. Natürlich gibt es viele verschiedene Arten von Kondensatabscheidern und Ventilen, die jeweils geringfügig unterschiedliche Wärmesignaturen haben können. Aus diesem Grund ist es wichtig, diese sorgfältig zu untersuchen und ihre normale Funktion zu verstehen.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Temperatur dieser Materialien während eines transienten Wärmeflusszyklus ändert, hängt vom Modus, mit dem die Wärme übertragen wird, und den unterschiedlichen Wärmekapazitäten der Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase im Tank ab. Bei Gasen geht die Temperaturänderung am schnellsten vor sich. Zum Beispiel kann der gasgefüllte Teil eines großen Außentanks durch die Sonne innerhalb weniger Minuten messbar erwärmt werden. Feststoffe, Flüssigkeiten und schwimmende Materialien ändern ihre Temperatur im Temperaturzyklus mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Sogar Tanks in Innenbereichen können thermische Änderungen zeigen, anhand derer sich verschiedene Füllstände bestimmen lassen.

Flüssigkeitsstände in Tanks



Abbildung 6-4. Eine häufige Anwendung der Thermografie ist die Bestimmung bzw. Bestätigung der Füllstände von verschiedenen Stoffen in Behältern, z. B. in Vorrattanks und Silos.

Bei nicht isolierten Tanks kann ein qualifizierter Thermografieexperte oft den Füllstand finden. Wenn Isolierung vorhanden ist, kann es sein, dass die Wärmesignaturen erst nach längerer Zeit erscheinen oder ein gewisses Maß an Verstärkung notwendig wird. Die Bestimmung von Materialfüllständen in einem Behälter kann durch den Einsatz einfacher aktiver Verfahren wie die Anwendung von Wärme oder das Hervorrufen von Kühleffekten durch Verdampfung erleichtert werden. Zum Beispiel können Füllstände oft bestimmt werden, indem der Tank mit Wasser besprüht wird und einige Minuten gewartet wird, bis sich die Temperatur der Tankaußenfläche ändert. Der niedrige Emissionsgrad von reflektierenden Metallisolierschichten kann durch das Anbringen vertikaler Farbstreifen oder eines Klebebands verändert werden. Die Füllstände können dann auf einfache Weise abgelesen werden.

GEBÄUDEDIAGNOSE

Die Thermografie wird seit langem für verschiedene Anwendungen aus dem Bereich der Diagnose von Wohn- und Geschäftsgebäuden eingesetzt. Dazu gehören Dachfeuchtigkeitsinspektionen, Gebäudeisolierungsinspektionen bezüglich Energie- und Luftdichtheit und Feuchtigkeitserkennung. Wie auch bei anderen Thermografieanwendungen sind für eine erfolgreiche Arbeit entsprechende Kenntnisse der Wärmeübertragungstheorie und Gebäudekonstruktion erforderlich. Inspektionen von Geschäftsgebäuden können komplizierter als Inspektionen von Wohngebäuden sein.

Dachfeuchtigkeitsinspektionen

Aus verschiedenen Gründen im Hinblick auf Konstruktion, Installation und Instandhaltung treten bei den meisten flach geneigten Dächern ein bis zwei Jahre nach dem Bau erhebliche Probleme auf. Ein *flach geneigtes Dach* ist ein Flachdach eines Geschäftshauses, das zur Ableitung des Niederschlags leicht geneigt ist. Es besteht aus einer lastaufnehmenden Decke, auf der eine starre Isolierung und eine wasserdichte Membran aufgebracht werden.

Schäden durch Undichtigkeiten sind nicht unerheblich. Noch kostenintensiver sind jedoch Langzeitschäden durch nicht unmittelbar sichtbare eingeschlossene Feuchtigkeit. Nach dem Eindringen in das Dachsystem führt die eingeschlossene Feuchtigkeit zum Zerfall und vorzeitigen Ausfall des Dachsystems. Durch das Auffinden und den Austausch von feuchter Isolierung wird die unter der Oberfläche eingeschlossene Feuchtigkeit eliminiert, und die Lebensdauer des Dachs kann erheblich über die durchschnittlich erwartete Standzeit hinaus verlängert werden.

Dachfeuchtigkeitsinspektionen mit einer Wärmebildkamera sind zerstörungsfrei. **Siehe Abbildung 6-5.** Feuchte Isolierung hat eine höhere Wärmekapazität als trockene Isolierung. Nach einem warmen, sonnigen Tag kann z. B. ein Dach an einem klaren Abend ohne Wind schnell abkühlen. Durch die schnelle Dachabkühlung bleibt feuchte Isolierung länger warm als trockene Isolierung.

Sobald diese Muster erkennbar sind, können große Dachbereiche relativ schnell untersucht werden. Dabei werden Muster festgehalten, die auf feuchte Isolierung schließen lassen. Bei Bedarf kann Feuchtigkeit in einem feuchten Bereich mit herkömmlicheren Untersuchungsmethoden bestätigt werden. Diese Methoden sind jedoch zeitaufwendig oder nicht zerstörungsfrei. Unter günstigen Bedingungen kann die Inspektion bis lange in die Nacht hinein vorgenommen werden.

Die auf der Wärmebildkamera angezeigte Wärmesignatur und der Zeitpunkt hängen vom Zustand und Typ der Dachisolierung ab. Für flach geneigte Dächer in der Regel verwendete absorbierende Isolierungen wie Glasfaser, Holzfaser und Bläherlit liefern eindeutige Wärmesignaturen. Bei den oft für einlagig abgedichtete Dächer verwendeten, nicht absorbierenden Schaumstoffplattenisolierungen ist die Untersuchung schwieriger. Das hängt damit zusammen, dass hier wenig Wasser absorbiert wird. Viele einlagig abgedichtete Dächer sind zudem mit einer schweren Steinschicht belastet, durch die die Wärmesignatur beeinträchtigt werden kann.

Wärmesignaturen werden nicht nur von der unter der Oberfläche vorhandenen Feuchtigkeit, sondern auch von vielen anderen Bedingungen beeinflusst. Die Dachoberfläche muss trocken sein. Andernfalls wird die Sonnenerwärmung durch Verdampfung verringert. Dichte abendliche Wolken können die Abkühlung verringern, und durch zu starken Wind können alle Wärmesignaturen getilgt werden.

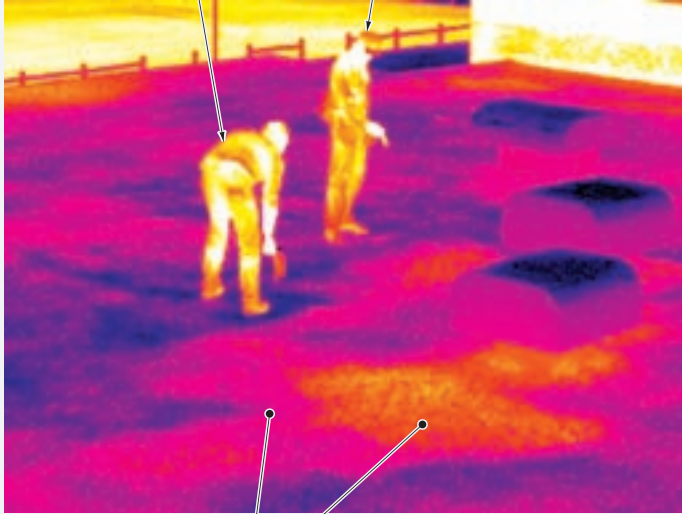
Auch die Dachkonstruktion und die physikalischen Bedingungen haben Einfluss auf die Wärmesignatur. Zum Beispiel kann eine nach Westen gerichtete Brüstungsmauer noch lange in die Nacht Wärme an das Dach abgeben. Zusätzliches Dachkies hält die Wärme länger, und vor kurzem reparierte Dachabschnitte können anders als andere Abschnitte dargestellt werden. Das Wissen um diese Einflüsse und deren Auswirkungen auf die Wärmesignatur ist von großer Bedeutung für erfolgreiche Inspektionen.

Idealerweise werden Dächer kurz nach ihrer Errichtung untersucht, um eine Basiswärmesignatur erstellen zu können. Eine weitere Inspektion ist nach potenziellen Beschädigungen sinnvoll, z. B. nach starkem Hagelschlag, Wirbelstürmen und Orkanen. Wenn unvermeidliche Undichtigkeiten auftreten, kann eine schnelle nachfolgende Infrarotinspektion bei der Bestimmung der genauen Lage und des Umfangs der

Dachfeuchtigkeitsinspektionen

TECHNIKER MARKIERT
DACH MIT FARBE

THERMOGRAFIEEXPERTE MIT
WÄRMEBILDKAMERA



MIT DER WÄRMEBILDKAMERA ERFAS-
TE MUSTER KÖNNEN ZUR BESTIM-
MUNG DES VORHANDENSEINS VON
FEUCHTIGKEIT VERWENDET WERDEN

Abbildung 6-5. Dachfeuchtigkeitsinspektionen sind zerstörungsfrei und lassen sich mit einer Wärmebildkamera problemlos durchführen.

Isolierungsbeschädigung helfen.

Die Sicherheit spielt bei Dachinspektionen eine große Rolle. Dacharbeiten dürfen nie allein ausgeführt werden. Thermografieexperten sind besonders gefährdet, weil ihre Augen durch das helle Display nicht an die auf den meisten Dächern vorhandenen ungünstigen Lichtbedingungen angepasst sind. Dieser Zustand wird als Nachtblindheit bezeichnet. Eine vorausgehende visuelle Inspektion des Dachs bei Tageslicht ist notwendig, um potenzielle Gefahren erkennen und den Dachzustand erfassen zu können.

Inspektionen der Gebäudedämmung

Die Thermografie ist ideal für die Bestimmung des Vorhandenseins und der Leistungsfähigkeit der Wärmedämmung geeignet. Sie wird häufig von Energieberatern, Generalunternehmern und Wohnhausprüfern angewendet. Innerhalb von Gebäuden werden Wärmedämmungen hauptsächlich zur Beeinflussung der Wärmeübertragung (Verstärkung oder Verringerung) verwendet. Wenn eine Dämmung fehlt, beschädigt ist oder nicht wirkt wie geplant, erhöhen sich sowohl der Energieverbrauch als auch die

Instandsetzungskosten, während i. d. R. gleichzeitig der Wohnkomfort des Gebäudes sinkt.

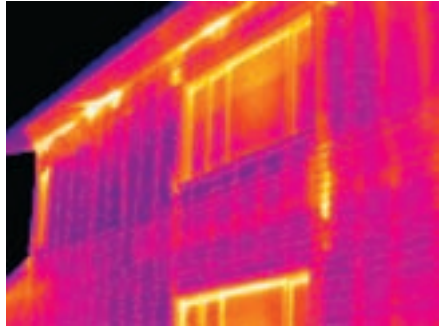
Die Verringerung eines zu hohen Energieverbrauchs ist wichtig, eine gut geplante thermografische Inspektion kann aber auch das Wohlbefinden der Bewohner verbessern und gleichzeitig den Energiebedarf senken helfen. Thermografische Inspektionen fördern oft weitere Probleme zutage, z. B. Wasserlecks oder Kondensation von Feuchtigkeit, Eisbildung auf dem Dach und das Zufrieren von Rohrleitungen. Durch Thermografie kann auch die Luftzirkulation von klimatisierten Räumen und die Anordnung von Schallisolierung überprüft werden.

Wärmedämmungsprobleme können in der Regel erfasst werden, wenn der Temperaturunterschied zwischen den Innenräumen und der Außenseite eines Gebäudes mindestens 10 °C beträgt. Zum Beispiel erscheint die Wärmesignatur während der Heizsaison bei fehlender Wärmedämmung an den Innenwänden kühler und außen wärmer. Während der Kühlsaison ist das Gegenteil der Fall. Es ist von Vorteil, die Art der Wärmedämmung zu kennen, da jede Wärmedämmung ihre ganz spezielle Wärmesignatur und Zeitkonstante haben kann.

Bei den meisten thermografischen Inspektionen ist das Arbeiten innerhalb und außerhalb des Gebäudes erforderlich. Starker Wind und direkte Sonneneinstrahlung können die Außenarbeiten jedoch schwierig oder unmöglich machen. Derartige Bedingungen haben auch Auswirkungen auf die Innenräume, sind wegen ihrer indirekten Wirkung allerdings oft weniger deutlich wahrnehmbar. Bei Inspektionen während der Kühlsaison kann es erforderlich sein, nur die Innenräume zu erfassen oder Außenarbeiten am Abend durchzuführen. Unter optimalen Bedingungen kann ein geschulter, qualifizierter Thermografieexperte bei ordnungsgemäßer Anwendung einer Wärmebildkamera fehlende, beschädigte oder unwirksame Wärmedämmung sowie die Lage des Gebälks meist problemlos bestimmen.

Erfassung von Luftleckagen

Luftlein- und -austritte am Gebäude sind für fast die Hälfte der Kosten für Heizung, Belüftung und Kühlung verantwortlich. Luftleckagen werden in der Regel durch Druckunterschiede im Haus verursacht. Druckunterschiede können durch Wind verursacht werden. Aber auch die in jedem Gebäude vorhandenen Konvektionskräfte und die durch Klimaanlage verursachten Druckunterschiede können die Ursache sein.



Mithilfe der Thermografie können Wärmeverluste in Gebäuden in Bereichen wie Fenstern, Traufen und mangelhaft isolierten Wänden überprüft werden.

Durch die Druckunterschiede wird Luft durch die vielen im Haus vorhandenen Durchbrüche gedrückt. Durchbrüche zur thermischen Hülle, z. B. ein Kabel- oder Rohrkanal, sind oft klein und unauffällig. Die *thermische Hülle* ist der umschlossene Raum, der in einem Gebäude beheizt, belüftet oder gekühlt werden muss.

In der Regel ist für die Erfassung von Luftleckagen nur eine geringe Temperaturdifferenz von 3 °C zwischen innen und außen erforderlich. Die Luft selbst ist unsichtbar, während ihr Temperaturmuster an der Oberfläche des Gebäudes oft eine charakteristisch „zarte“ Thermosignatur

aufweist. **Siehe Abbildung 6-6.** Während der Heizsaison sind Wärmesignaturen in der Regel als kalte Streifen an den inneren Gebäudeflächen oder warme „Blüten“ an der Außenseite sichtbar, wo erhitzte Luft austritt. Luftbewegungen können auch in Gebäudehohlräumen, sogar Innen- oder isolierten Außenwänden vorhanden sein.

Gebäudeoberfläche Temperaturmuster

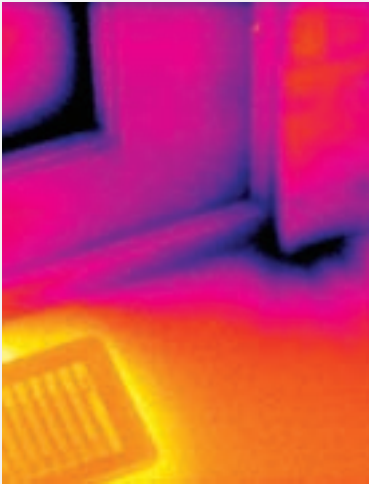


Abbildung 6-6. Temperaturmuster von Luftleckagen zeigen oft eine charakteristische „wolkenartige“ Wärmesignatur.

Durch das bewusste Erzeugen eines Druckunterschieds im Gebäude können Luftleckagemuster verstärkt, gerichtet und quantifiziert werden. Dies lässt sich mit einer Klimaanlage oder einem Gebläse bewerkstelligen.

Feuchtigkeitserkennung

Feuchtigkeit verursacht in Gebäuden oft die Zersetzung von Baustoffen. Der Eindringpunkt ist in der Regel eine strukturelle Verbindung oder Fuge, z. B. ein nicht ordnungsgemäß funktionierender Wandanschluss oder eine anderweitige Dichtung. Feuchtigkeit kann auch durch Kondensation entstehen. Kondensation wird in der Regel durch warme, feuchte Luft verursacht, die aus dem Gebäude in kühlere Gebäudehohlräume gelangt. Weitere Feuchtigkeitsquellen sind Hochwasser, Grundwasser und Undichtigkeiten von Rohrleitungen und Sprinklersystemen.

Bei allen genannten Beispielen ist die Wärmesignatur der Feuchtigkeit oft klar und eindeutig, insbesondere unter den richtigen Bedingungen (Verdampfung von Feuchtigkeit aus der feuchten Oberfläche). In diesem Fall wird die Oberfläche als kalt dargestellt. Feuchte Baustoffe sind jedoch auch leitfähiger und haben während eines thermischen Übergangszustands im Vergleich zu trockenen Baustoffen eine größere Wärmekapazität. In dieser Situation sind die Wärmesignaturen möglicherweise nicht immer klar oder eindeutig. Es ist mit Sorgfalt zu prüfen, ob unter den jeweiligen Bedingungen vorhandene Feuchtigkeit tatsächlich sichtbar gemacht wird. Zum Beispiel wird die ergänzende Verwendung eines Feuchtigkeitsmessgeräts empfohlen, um bei der Erfassung eines Bereichs, in dem ein Fehler vermutet wird, durch die Wärmebildkamera eine Bestätigung zu haben.

Geschäftsgebäudeinspektionen

Während die Inspektion von Wohngebäuden nicht allzu schwierig ist, sind Inspektionen von großen Geschäftsgebäuden oft komplizierter. Das Verständnis großer Gebäude zahlt sich jedoch oft in erheblichem Maße aus und rechtfertigt in der Regel eine gründliche Inspektion und Analyse. Es ist wichtig, dass die Details der Gebäudekonstruktion bekannt sind und dem

Thermografieexperten vollständig zur Verfügung gestellt werden, damit dieser die komplexen Interaktionen zwischen den Gebäudekomponenten voll verstehen kann.

Luftleckagen, Wassereinbruch und Kondensation sind die am häufigsten im Zusammenhang mit Geschäftsgebäuden anzutreffenden Probleme. Eine Wärmebildkamera ist ein leistungsfähiges Werkzeug für die Fehlersuche und die zahlreichen, in großen Gebäuden vorkommenden Probleme. Bei großen Gebäuden sollte die Untersuchung möglichst während ihrer Errichtung stattfinden, d. h., wenn die einzelnen Stockwerke abgeschlossen, isoliert und fertig ausgestattet werden. Auf diese Weise können Entwurfs- und Konstruktionsprobleme erkannt und korrigiert werden, bevor das gesamte Gebäude fertig gestellt und belegt ist.



INSPEKTIONSMETHODEN

Thermografieexperten nutzen drei Hauptmethoden zur Durchführung von Inspektionen mit Wärmebildkameras. Dies sind die Vergleichs-, die Basis- und die Trendmethode. Welche Methode jeweils verwendet wird, hängt vom untersuchten Gerätetyp und vom erforderlichen Datentyp ab. Jede Methode kann zum Erfolg führen, wenn sie für die geeignete Anwendung benutzt wird.

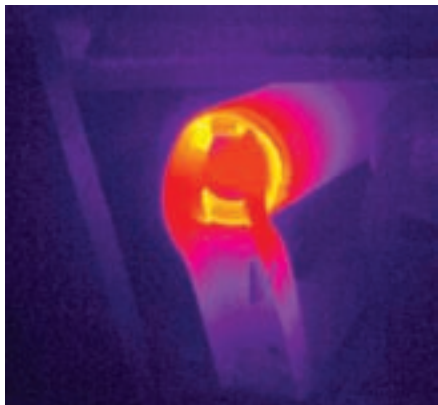
VERGLEICHSTHERMOGRAFIE

Thermografieexperten haben eine Reihe von Methoden zur Erweiterung der Nutzung dieser Technologie entwickelt. Die grundlegende Methode für viele thermische Anwendungen ist die Vergleichsthermografie. Die *Vergleichsthermografie* ist ein von Thermografieexperten verwendeter Prozess für den Vergleich ähnlicher Bauteile unter ähnlichen Bedingungen zur Beurteilung des Zustands des untersuchten Geräts.

Wenn die Vergleichsthermografie sachgerecht und korrekt angewendet wird, geben die Unterschiede zwischen den beurteilten Geräten oft Hinweise auf den Zustand. Die quantitative Thermografie erfordert im Vergleich zur qualitativen Thermografie ein vollständigeres Verständnis der Variablen und Beschränkungen, die Einfluss auf die radiometrische Messung haben. *Quantitative Thermografie* ist Thermografie unter Einbeziehung radiometrischer Temperaturen. *Qualitative Thermografie* ist Thermografie ohne Einbeziehung radiometrischer Temperaturen.

Bevor mit der Inspektion begonnen wird, ist unbedingt die akzeptable Fehlertoleranz festzulegen. Anschließend muss sorgfältig darauf hingearbeitet werden, dass diese Grenzen eingehalten werden. Für das Verständnis der quantitativen Thermografie sind grundlegende praktische

Schulungen zur Wärmeübertragung und fortgeschrittene Fertigkeiten im Umgang mit der Wärmebildkamera unbedingt erforderlich. Die Thermografie ist zum großen Teil vergleichende Arbeit. Durch den Vergleich des betreffenden Objekts mit einem ähnlichen Objekt lässt sich ein Problem oft einfach erfassen. Schulung und Erfahrung sind für diesen Prozess von grundlegender Bedeutung, da unter Umständen viele weitere Variablen beachtet werden müssen.



Bei der qualitativen Thermografie werden in der Regel keine radiometrischen Temperaturen einbezogen. Es werden die Wärmesignaturen ähnlicher Bauteile verglichen und gegenübergestellt.

Damit die Vergleichsthermografie effektiv durchgeführt werden kann, muss der Thermografieexperte alle Variablen mit Ausnahme einer einzigen Variablen vom Vergleich ausschließen. Zu oft wird diese einfache, aber unbedingt notwendige Anforderung wegen der komplexen Umstände einer Inspektion oder der mangelhaften Arbeitsgewohnheiten des Thermografieexperten nicht erfüllt. Dadurch können Daten uneindeutig oder irreführend sein. Die verschiedenen Einflüsse auf die beobachteten Wärmesignaturen müssen sorgfältig durchdacht werden.

Zum Beispiel kann auf einem Wärmebild eines Dreiphasen-Trennschalters eine Phase wärmer als die anderen dargestellt werden. **Siehe Abbildung 7-1.** Wenn die drei Phasen symmetrisch belastet sind, resultiert eine ungleichmäßige Erwärmung aller Wahrscheinlichkeit nach aus einer hochohmigen Verbindung. Wenn jedoch eine Lastmessung mit einem Digitalmultimeter durchgeführt wird und zum Beispiel einen Wert von 30/70/30 A aufweist, ist das Muster sehr wahrscheinlich auf asymmetrische elektrische Phasen zurückzuführen.

Vergleichsthermografie

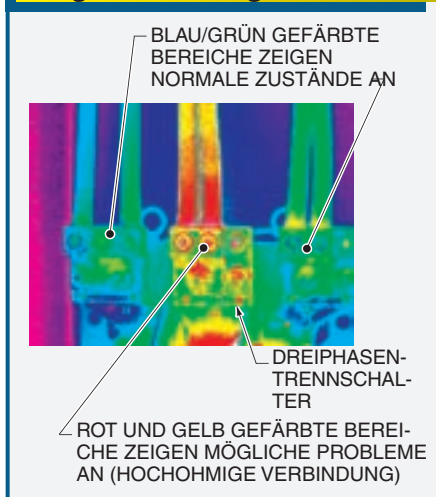


Abbildung 7-1. Die Vergleichsthermografie kann für einen Dreiphasen-Trennschalter verwendet werden und eine Phase wärmer als die anderen darstellen.

Die Wärmebildkamera selbst kann kein Bild im engeren Sinne „lesen“. Die richtige Interpretation erfordert eine Kombination aus Fertigkeiten, Erfahrung und Beharrlichkeit des Thermografieexperten beim korrekten Einsatz des Systems, oft zusammen mit anderen Daten. Natürlich kann die falsche Diagnose einer Ausnahme zu Schäden oder zum Verlust wertvoller Einrichtungen führen.

Bei der Vergleichsthermografie ist es nützlich, so viel wie möglich über das betrachtete Objekt zu wissen. Dieses Wissen umfasst die Konstruktion, die grundlegende Bedienung, bekannte Fehlermechanismen, die Richtung des Wärmeflusses oder die Funktion des Objekts in der Vergangenheit. Da dieses Wissen oft nicht ohne weiteres zur Verfügung steht, muss der Thermografieexperte in der Lage sein, dem Geräteigentümer oder dem Instandhaltungstechniker klare, einfache Fragen zu stellen.

Noch wichtiger als das Stellen von Fragen ist das aufmerksame Zuhören des Thermografieexperten. Viele Thermografieexperten haben hier Schwächen, sodass die Qualität ihrer Arbeit darunter leidet. Kommunikationsfertigkeiten sind für einen Thermografieexperten so wichtig wie technische Fertigkeiten, besonders beim Umgang mit ungewohnten Geräten oder Materialien.

BASISTHERMOGRAFIE

Eine Basisinspektion ist eine Inspektion, mit der ein Bezugspunkt geschaffen werden soll, wie bestimmte funktionstüchtige Einrichtungen unter normalen Betriebsbedingungen arbeiten. Es ist wichtig zu bestimmen, welche Gerätezustände normal bzw. erwünscht sind. Diese Zustände können dann als Basissignatur verwendet werden, mit der spätere Bilder verglichen werden. Die Basissignatur stimmt oft mit der inhärenten Struktur des betrachteten Objekts überein oder ist mit dieser auf irgendeine Weise verwandt. Nachdem zum Beispiel ein Motor installiert

und in Normalbetrieb gesetzt wurde, werden alle Unterschiede in der Thermosignatur wahrscheinlich durch aufeinanderfolgende Wärmebilder angezeigt. **Siehe Abbildung 7-2.**

Basisthermografie

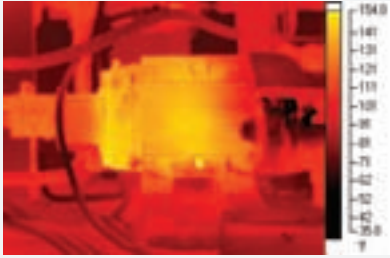


Abbildung 7-2. Viele Unterschiede der Wärmesignatur des Motors werden bei nachfolgenden thermografischen Inspektionen sichtbar.

THERMISCHE TREND-DARSTELLUNG

Eine weitere Methode der thermografischen Inspektion wird als thermische Trenddarstellung bezeichnet. Die *thermische Trenddarstellung* ist ein von Thermografieexperten verwendeter Prozess zum Vergleich von Temperaturverteilungen im gleichen Bauteil im Zeitverlauf. Die thermische Trenddarstellung wird insbesondere für die Untersuchung mechanischer Einrichtungen in großem Umfang genutzt, bei denen normale Wärmesignaturen zu komplex sein können. Sie ist auch nützlich, wenn sich die Wärmesignaturen zur Erfassung von Defekten im Zeitverlauf oft nur langsam verändern. Zum Beispiel kann die thermische Trenddarstellung für die Überwachung der Funktion einer feuerfesten

(hochtemperaturfesten) Isolierung in einem speziellen Eisenbahnwaggon im Zeitverlauf verwendet werden, um die optimale Planung der Stillstandszeiten für die Instandhaltung zu bestimmen. **Siehe Abbildung 7-3.**

Ein Thermografieexperte muss unbedingt alle Variablen verstehen, die für die untersuchte Einrichtung eine Rolle spielen. Thermografieexperten müssen die Funktionsprinzipien verschiedener Systeme verstehen und Fehlersuchfertigkeiten entwickeln. Wenn Daten sorgfältig erfasst und Änderungen verstanden werden, können diese Methoden einen sehr genauen und nützlichen Funktionstrend offenbaren. Es ist jedoch zu bedenken, dass die Trenddarstellung die Zukunft lediglich impliziert, aber keine Vorhersage liefert.

Thermische Trenddarstellung

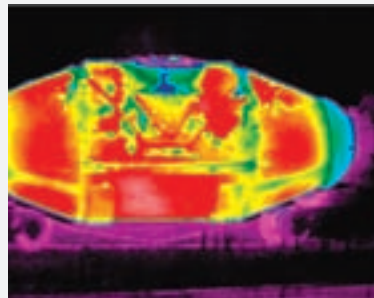
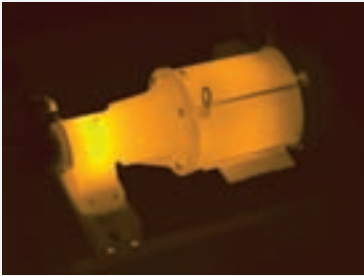


Abbildung 7-3. Die thermische Trenddarstellung wird für die Untersuchung von Hochtemperatureinrichtungen genutzt, bei denen normale Wärmesignaturen zu komplex sein können, z. B. bei diesem Torpedowagen (mit geschmolzenem Metall gefüllt), und im Zeitverlauf möglicherweise nur Isolierungsdefekte anzeigen.

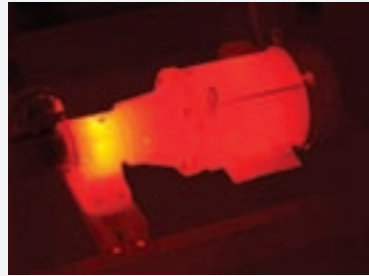
Farbpaletten

Farbpaletten

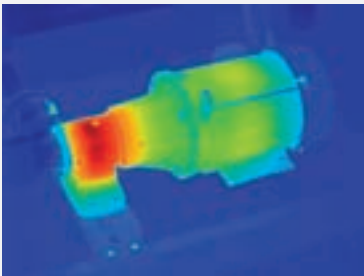
Eine *Palette* ist ein Farbschema, das zur Darstellung der thermischen Abweichungen und Muster in einem Wärmebild dient. Unabhängig davon, ob es sich um die Untersuchung oder Analyse handelt, ist das Ziel die Auswahl einer Palette, die das Problem optimal verdeutlicht. Idealerweise ist eine Wärmebildkamera zu wählen, die dem Anwender die Auswahl oder Änderung der gewünschten Farbpalette sowohl der Kamera als auch der Software erlaubt. Zum Beispiel können bestimmte Anwendungen möglicherweise besser unter Verwendung einer einfarbigen Palette betrachtet und analysiert werden (z. B. Graustufen oder Bernstein). Andere Situationen können einfacher zu analysieren und erklären sein, wenn eine Farbpalette wie Eisen oder Blau/Rot oder eine Farbpalette mit hohem Kontrast verwendet wird. Eine breite Auswahl verfügbarer Farbpaletten gibt dem Thermografieexperten mehr Flexibilität bei der thermografischen Inspektion, Analyse und Berichterstattung.



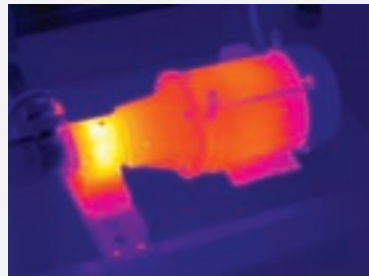
BERNSTEIN



HEISSES METALL



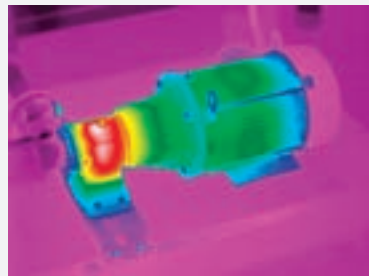
BLAU/ROT



EISEN



GRAUSTUFEN



HOHER KONTRAST



ANALYSE, BERICHTERSTATTUNG UND DOKUMENTATION

Neben der Fähigkeit zum ordnungsgemäßen Umgang mit einer Wärmebildkamera hat der Thermografieexperte die Aufgabe, die Ergebnisse der untersuchten Einrichtungen zu analysieren, zu berichten und zu dokumentieren. Für diese Aufgaben stehen spezielle Analysewerkzeuge zur Verfügung.

INSPEKTIONSANALYSE

Der Erfolg der Thermografie ist in hohem Maße davon abhängig, ob der Thermografieexperte in der Lage ist, eine Inspektion richtig durchzuführen, ihre Grenzen zu erkennen, alle relevanten Daten zu erfassen und die Ergebnisse ordnungsgemäß zu interpretieren. Die dafür entscheidenden Variablen können verschieden und zahlreich sein. Thermografieexperten müssen daher ordnungsgemäß geschult und für die Durchführung von thermografischen Inspektionen qualifiziert sein.

Thermografen können eine Zertifizierung der Stufen I, II oder III besitzen, wobei Stufe I die niedrigste und Stufe III die höchste Zertifizierungsstufe darstellt. In einem formalen Thermografieprogramm ist ein gemäß Ebene I zertifizierter Thermografieexperte dafür qualifiziert, Daten zu sammeln, muss aber unter der Aufsicht eines gemäß Ebene II zertifizierten Thermografieexperten arbeiten. Thermografieexperten gemäß Ebene II sind dafür qualifiziert, Daten zu interpretieren und Berichte zu erstellen. Für ein formales Thermografieprogramm müssen schriftliche Inspektionsverfahren vorhanden sein, die in der Regel auf Industrienormen basieren und mit der Unterstützung eines gemäß Ebene III zertifizierten Thermografieexperten entwickelt wurden.

BERICHTERSTATTUNG UND DOKUMENTATION

Nach der korrekten Beurteilung der thermischen Daten kann es erforderlich sein, die Ergebnisse in Form eines schriftlichen Berichts klar zu kommunizieren.

Als Teil des Berichterstattungsprozesses kann es weiterhin erforderlich sein, den Kunden über die inhärenten Grenzen der Thermografie-technologie und den Wert von thermografischen Inspektionen aufzuklären. Berichte enthalten oft vorgeschriebene Maßnahmen zur Korrektur aller während der thermografischen Inspektion erkannten Probleme.

Ein Thermografieexperte liefert in der Regel auch zusätzliche Informationen, wie die genaue Lage des Problems, Diagnose und Vorschläge für entsprechende Korrekturmaßnahmen. Der Thermografieexperte liefert im Zusammenhang mit einer thermografischen Inspektion entscheidende Informationen, die mit weiteren Informationen von anderen Inspektionen oder Prüfungen, der Instandhaltungs- oder Reparaturplanung und der Kostenanalyse kombiniert werden, bevor eine erfolgreiche Schlussfolgerung erreicht ist. Aus diesem Grund sind gute kommunikative Fertigkeiten ebenso wichtig wie gute technische Fertigkeiten.

Berichte können in vielen verschiedenen Stilen verfasst werden und enthalten eine Vielzahl von Daten. Ein Bericht muss jedoch mindestens die folgenden Informationen enthalten:

- Name des Thermografieexperten
- Fabrikat, Modell und Seriennummer der Wärmebildkamera
- Relevante Umgebungsbedingungen, z. B. Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit und Umgebungslufttemperatur

- Systembedingungen wie Last und Tastgrad
- Identifizierung und Lage der untersuchten oder geprüften Einrichtungen und Bauteile
- Liste der nicht untersuchten oder geprüften kritischen Einrichtungen sowie Erläuterungen für ihre Nichtberücksichtigung
- Instrument-Parametereinstellungen wie Emissionsgrad und Hintergrundeinstellungen
- Wärmebilder und dazu passende Sichtbilder aller untersuchten oder geprüften Einrichtungen und Bauteile
- Einen Abschnitt mit der Anforderung eines Nachfolge-Infrarotbilds zur Dokumentation der Gerätereparatur

Die Darstellung der Dokumentation muss darüber hinaus so erfolgen, dass der Bericht dadurch nicht überfrachtet wird, sondern die wichtigen Informationen klar und effizient präsentiert werden. Die besten thermografischen Inspektionsberichte bieten einen natürlichen Datenfluss, der die Wärme- und Sichtbilder sinnvoll unterstützt. **Siehe Abbildung 8-1.**

Es kann sinnvoll sein, mehrere verschiedene Berichtsvorlagen zu nutzen. Zum Beispiel kann eine einfache Berichtsvorlage zur Dokumentation erfolgreicher Reparaturen von thermisch untersuchten oder geprüften Einrichtungen verwendet werden. Für besondere thermografische Inspektionskategorien ist die Nutzung spezieller Berichtsvorlagen möglich.

Wenn ein Thermografiebericht erstellt wird, sind je nach Bedarf zusätzliche Kopien jedes Berichts an die entsprechenden Leistungsträger weiterzuleiten. Die Kopien können in Papier- oder elektronischer Form erstellt werden. Elektronische Berichte sind vor dem Versenden zu speichern und zu sperren (z. B. im PDF-Format), um eine Manipulation der Inspektions- und Messanalyse zu verhindern.

Thermografische Messungen und Inspektionen können oft noch intensiver genutzt werden, wenn eine Kategorisierung und Spezifizierung

einzelner Probleme erfolgt. Zum Beispiel können Informationen mit Bezug zu Problemen mit einer bestimmten Gerätemarke oder einem bestimmten Prozess angegeben und gespeichert werden. Zu einem späteren Zeitpunkt kann dann der Abruf erfolgen, und die Probleme können als für bestimmte Geräte typisch identifiziert werden, um zukünftige Anwender zu unterstützen.

Neben der ordnungsgemäßen Handhabung einer Wärmebildkamera muss ein erfolgreicher Thermografieexperte in der Lage sein, die Ergebnisse durch eine entsprechende Berichterstattung zu analysieren und dokumentieren. Dies ist erforderlich, um einen guten Ruf bezüglich Qualität und beständiger Arbeit aufzubauen und zu wahren. Die Berichterstattung liefert die bestmöglichen Empfehlungen, die sich aus der Inspektion ergeben.

Thermografische Berichterstattung und Dokumentation



SICHTBILD



WÄRMEBILD

Abbildung 8-1. Thermografische Inspektionsberichte enthalten in der Regel Wärmebilder und entsprechende Sichtbilder zu Referenzzwecken.



THERMOGRAFIE-RESSOURCEN

Ressourcen können zur Gewinnung zusätzlicher Informationen über die Thermografie und über Wärmebildkameras dienen, z. B. zu Geräteaktualisierungen, Sicherheitsfragen, Schulungsseminaren, Schulungswerkzeugen, Normen und professionellen Organisationen. Diese Ressourcen sind sowohl elektronisch als auch im Druckformat verfügbar.

RESSOURCEN

Eine Vielzahl von Informationen über die Thermografie und über Wärmebildkameras steht angehenden Anwendern über verschiedene Ressourcen zur Verfügung. In industriellen, gewerblichen und Gebäudediagnose-Anwendungen wird diese Technologie seit mehr als 40 Jahren angeboten. Viele Experten, z. B. Instandhaltungstechniker und Elektriker, haben jedoch noch keine tief gehenderen Kenntnisse über diese Technologie und die Vorteile der Thermografie und von Wärmebildkameras.



Als Ressourcen werden u. a. schriftliche Materialien von verschiedenen Normungsorganisationen angeboten.

Durch die Entwicklung neuer Informationen hat die Anwendung der Thermografie in den letzten Jahren stark zugenommen. Bitte beachten Sie, dass einige Informationen zur Thermografie, insbesondere im Internet veröffentlichte Informationen, möglicherweise nicht genau oder sachlich richtig sind. Es wird dringend empfohlen, die Grundlagen aus Veröffentlichungen wie dieser sowie den unten angegebenen Quellen zu erlernen. Weiterhin wird empfohlen, durch kritisches Lesen weiter gehendere Informationen aus unbekannten Quellen zu erlernen. Die entsprechenden Ressourcen beinhalten Normen, Online-Ressourcen, Bücher und andere Druckschriften sowie Berufsorganisationen und Fachverbände.

Normen

Eine *Norm* ist eine von Branchenexperten entwickelte, akzeptierte Referenz oder Methode. Normen enthalten verschiedene akzeptable Kriterien für die Arbeitsausführung. Obwohl die Einhaltung einer Industrienorm freiwillig sein kann, ist es üblich und sinnvoll, genehmigte, anerkannte Normen einzuhalten. Normen werden auf der Grundlage von Beiträgen verschiedener Branchenexperten erstellt und von verschiedenen Organisationen angeboten. **Siehe Abbildung 9-1.** Sie können eine wertvolle Ressource für konkrete, detaillierte Informationen zu verschiedenen Aspekten der Thermografie sein.

Online-Ressourcen

Eine *Online-Ressource* ist eine Ressource, die den Anwendern ausschließlich über eine Internet-Verbindung zur Verfügung steht. Diese Ressourcen bieten eine Vielzahl von Lehrmaterial für Studenten, Thermografieexperten und Techniker. Ergänzende Informationen sind in der Regel von Geräteherstellern, Normungsorganisationen, aus Lemmaterialien und von Berufsorganisationen und Fachverbänden erhältlich. Zum Beispiel können Online-Ressourcen ein Live-Forum enthalten, in dem sich erfahrene Vertreter von Geräteherstellern mit Geräteanwendern zum Thema Fehlersuche austauschen oder Geräteempfehlungen geben können.

Bücher und Druckschriften

Bücher und Druckschriften sind Papierquellen, die zur technischen Referenz dienen. Sie sollen das Wissen von Thermografie- und Infrarottechnologie-Anwendern zu Mess- und Inspektionszwecken erweitern. Es werden mehrere Bücher und Druckschriften angeboten.

Berufsorganisationen und Fachverbände

Eine *Berufsorganisation* bzw. ein *Fachverband* ist eine Organisation, die Informationen und Schulungen im Bereich der Thermografie bereitstellt, indem sie diese veröffentlicht bzw. veranstaltet oder an ihnen mitwirkt. Thermografieexperten und Technikern wird empfohlen, verschiedenen Berufsorganisationen oder Fachverbänden beizutreten und sich an deren Arbeit zu beteiligen. Eine derartige Mitgliedschaft ermöglicht es den Anwendern, sich über die neuesten Technologien, Trends und Veränderungen in der Branche auf dem Laufenden zu halten. Die Mitarbeit in einer Berufsorganisation oder einem Fachverband bietet neue Möglichkeiten und

hilft bei der Aneignung von Wissen über Thermografieprozesse und die neuesten Geräte und Mess-/Inspektionstechniken.

Normungsorganisationen	
American Society for Nondestructive Testing (ASNT)	
1711 Arlingate Lane PO Box 28518 Columbus, OH 43228, USA 614-274-6003	www.asnt.org
ASTM International (ASTM)	
100 Barr Harbor Drive PO Box C700 West Conshohocken, PA 19428, USA +1-610-832-9598	www.astm.org
Canadian Standards Association (CSA)	
5060 Spectrum Way Suite 100 Mississauga, ON L4W 5N6, USA	www.csa.ca
Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)	
1828 L Street NW Suite 1202 Washington, DC 20036, USA +1-202-785-0017	www.ieee.org
International Electrotechnical Commission (IEC)	
3, rue de Varembe' PO Box 131 CH-121 Genf 20 Schweiz	www.iec.ch
International Organization for Standardization (ISO)	
1, ch. de la Voie-Creuse Case postale 56 CH-1211 Genf 20, Schweiz +41 22 749 01 11	www.iso.org
National Fire Protection Association (NFPA)	
1 Batterymarch Park Quincy, MA 02169, USA +1-617-770-3000	www.nfpa.org

Abbildung 9-1. Normen sind akzeptierte Referenzen oder Methoden, die von Branchenexperten entwickelt worden sind und von verschiedenen Organisationen angeboten werden.



WEITERE VERWANDTE TECHNOLOGIEN

Neben der Thermografie werden auch weitere verwandte Technologien und Analysemethoden für die Inspektion von und Fehlersuche an gewerblichen und industriellen Anlagen, Geräten und Bauteilen verwendet. Zu diesen Methoden gehören die optische und akustische Inspektion, die elektrische Analyse, die Ultraschallanalyse, die Schwingungsanalyse, die Schmierölanalyse und die Verschleißpartikelanalyse. Diese Methoden können allein zur Fehlersuche an Geräten oder zur Überprüfung der Messergebnisse im Anschluss an den Einsatz von Wärmebildkameras genutzt werden.

OPTISCHE UND AKUSTISCHE INSPEKTION

Die optische und akustische Inspektion ist die Analyse des Auftretens von Problemen und Geräuschen von Betriebsmitteln zur Bestimmung von Bauteilen, an denen möglicherweise Instandhaltungs- oder Reparaturarbeiten durchgeführt werden müssen. **Siehe Abbildung 10-1.** Die optische und akustische Inspektion ist das einfachste an einer Anlage vorgenommene vorausschauende Instandhaltungsverfahren und erfordert weder Werkzeuge noch Geräte. Sie ist am effektivsten, wenn der geschulte Instandhaltungstechniker ein potenzielles Problem klar erkennen kann. Ungewöhnliche Betriebseigenschaften werden festgehalten, und die Einrichtung wird für die erforderliche Instandhaltung eingeplant.

Eine Sichtprüfung kann mithilfe von Verfahren wie der Farbeindringprüfung zur Feststellung feiner Risse in einer metallenen Oberfläche angewandt werden. Das Metall wird vollständig gereinigt und mit Farbe besprüht, die sich dann in kleinen Brüchen oder Vertiefungen auf der Metalloberfläche sammelt. Überschüssige Farbe wird entfernt, um kleine Risse oder Vertiefungen unter der Oberfläche sichtbar zu machen.

Optische und akustische Inspektion



Abbildung 10-1. Instandhaltungstechniker führen regelmäßig optische und akustische Inspektionen durch und überprüfen dabei das Erscheinungsbild und die Geräusche der Betriebsmittel.

ELEKTRISCHE ANALYSE

Die elektrische Analyse ist eine Analysemethode, bei der elektrische Überwachungseinrichtungen für die Beurteilung der zum Betrieb von elektrischen Geräten bereitgestellten Netzqualität und der von elektrischen Geräten erbrachten Leistung verwendet werden. **Siehe Abbildung 10-2.** Die installierten elektrischen Überwachungseinrichtungen können zur Messung von Mindest- und Höchstspannungen, Phase-zu-Phase-Spannungs-

schwankungen, Spannungsverlusten und Strömen dienen. Auch die Beurteilung der zum Betrieb von empfindlichen elektronischen Geräten bereitgestellten Netzqualität ist damit möglich.

Elektrische Analyse



Abbildung 10-2. Bei der elektrischen Analyse werden elektrische Überwachungseinrichtungen für die Beurteilung der zum Betrieb von elektrischen Geräten bereitgestellten Netzqualität verwendet.

Eine der häufigsten Anwendungen der elektrischen Analyse wird für **Elektromotoren und Stromkreise** genutzt. Die *Motorstromkreisanalyse (MCA)* ist eine elektrische Analysemethode für Motoren und Stromkreise, die entweder online (unter Spannung) oder offline (spannungslos) durchgeführt werden kann. Beide Prüfmethoden ermöglichen die frühzeitige Erkennung von Defekten bzw. Fehlern in der Stromversorgung von Motoren, Motorstromkreisen und Motorantriebssträngen.

LUFTULTRASCHALLERFASSUNG

Die Luftultraschallerfassung dient zur Geräteanalyse. Dabei werden hochfrequente Geräusche zur besseren Erkennung möglicher Geräteprobleme verstärkt. Ein empfindliches Abhörgerät wandelt diese Geräusche, die vom Menschen normalerweise nicht wahrgenommen werden können, in vom Menschen wahrnehmbare Signale um. Diese Signale können u. a. auf eine übermäßige Erwärmung elektrischer Verbindungen, Lecks in Luft- und Dampfsystemen, Reibung an Lagern sowie viele andere Anlagenprobleme hinweisen.

SCHWINGUNGSANALYSE

Schwingungsanalyse ist die Überwachung einzelner Bauteilschwingungseigenschaften zur Bestimmung des Gerätezustands. Verschlossene Teile verursachen häufig Geräteausfälle. Darüber hinaus erzeugen sie Schwingungen oder Geräusche, die isoliert werden können. Die Schwingungsanalyse ist die am meisten verbreitete Überwachungstechnik für umlaufende Anlagen und Maschinen.

SCHMIERÖLANALYSE

Die *Schmierölanalyse* ist ein Verfahren der vorausschauenden Instandhaltung, mit dem Säuren, Schmutz, Kraftstoffe und Verschleißpartikel im Schmieröl nachgewiesen werden können. Diese Substanzen werden untersucht, um eine Prognose zu einem möglichen Geräteausfall erstellen zu können. Die Schmierölanalyse wird nach Zeitplan durchgeführt. Einer Maschine wird eine Ölprobe entnommen, um den Zustand des Schmiermittels und der beweglichen Teile bestimmen zu können. Die Proben werden in der Regel an ein auf die Schmierölanalyse spezialisiertes Unternehmen gesendet.

VERSCHLEISSPARTIKELANALYSE

Bei der *Verschleißpartikelanalyse* werden die im Schmieröl vorhandenen Verschleißpartikel untersucht. Während bei der Schmierölanalyse der Zustand des Schmieröls entscheidend ist, konzentriert sich die Verschleißpartikelanalyse auf die Größe, Häufigkeit, Form und Zusammensetzung der von verschlissenen Teilen abgesonderten Partikel. Der Gerätezustand wird durch die Überwachung von Verschleißpartikeln beurteilt. Normaler Verschleiß entsteht, wenn Geräteteile regelmäßig miteinander in Kontakt sind. Eine Erhöhung der Häufigkeit und Größe von Verschleißpartikeln im Schmieröl deutet auf ein verschlissenes Teil oder einen sich anbahnenden Defekt hin.



Einführung zu den Thermografie-Prinzipien

INDEX

A

Absorption 23
American Society for Nondestructive Testing
(ASNT) 14
American Society of Testing Materials (ASTM)
International 16
Arbeitsplatzsicherheit 14–16
ASNT 14
ASTM 16

B

Basisinspektion 50
Basisthermografie 58–59, 59
Bedienelemente* 7
Berichterstattung und Dokumentation 61–62, 62
Berichterstellungssoftware 8
Berufsorganisation 64
Bolometermatrix (FPA) 3–4, 4
Bücher zum Thema Thermografie 64

C

Case, Theodore 2

D

Dachfeuchtigkeitsinspektionen 52–54, 53
Datenspeichergeräte 7–8
Datenverarbeitungssoftware 8
Detektor und Verarbeitungselektronik 6–7
Display 7
Display* 6

E

elektrische Analyse 65–66, 66
elektrische Thermografie-Anwendungen 45–49
elektromagnetische Energie 22
elektromagnetisches Spektrum* 23
elektromechanische Inspektionen 49
Emission 23, 24
Emissionsgrad 25, 26
Energie 19
Erfassung von Luftleckagen 54–55, 55
erster Hauptsatz der Thermodynamik 19

F

Feuchtigkeitserkennung 55
flach geneigtes Dach 52
Flüssigkeitsstand 50–51, 51
FOV 26, 27

G

Gebäudediagnose 51
Erfassung von Luftleckagen 54–55, 55
Dachfeuchtigkeitsinspektionen 52–54, 53
Feuchtigkeitserkennung 55
Geschäftsgebäudeinspektion 55
Isolierungsinspektion 53
Gebäudeisolierungsinspektion 53
Genauigkeit von Temperaturmessungen 26
Umwelteinflüsse 28
Gesichtsfeld (FOV) 26, 27
momentanes Gesichtsfeld (IFOV) 26–27
Geschäftsgebäudeinspektion 55
Gesichtsfeld (FOV) 26, 27

H

Herschel, Sir John 2
Herschel, Sir William 1–2

I

IFOV 26
IFOV-Messung 27, 28
Infrarotsichtfenster* 47
Infrarot-Thermografie 1
Geschichte der 1–4
Inspektion. **Siehe** thermografische Inspektion
Inspektionsanalyse 61
Inspektionsberichte 61–62, 62
Inspektionsverfahren 16–17
Instandhaltungstechniker 65
International Organization for Standardization
(ISO) 14
ISO 14
Isolator 21
Isolierungsinspektion 53

K

Konvektion 21–22, 22

L

Langwellen-Wärmebildkamera 4
Leiter 21
Leitung 20–21
Lichtbogen-Explosion 14
Lichtbogenschutzgrenze 14, 15
Lichtbogenüberschlag 14
Luftultraschall 47

M

Materialfüllstand 50–51, 51
MCA 66
mechanische Inspektionen 49
Melloni, Macedonio 2
Messobjekt 4, 5
Mikron (μm) 4
Mittelwellen-Wärmebildkamera 4
momentanes Gesichtsfeld (IFOV) 26–27
Motorinspektion 49
Motorstromkreisanalyse (MCA) 66

N

Nachtblindheit 16
Nobili, Leopoldo 2
Norm 63
 Organisationen 64
Normen 16–17

O

Oberflächentemperatur 25–26
Objektiv 5, 6
Occupational Safety and Health Administration (OSHA) 16
Online-Ressource 64
optische und akustische Inspektion* 65
OSHA 16

P

persönliche Schutzausrüstung (PSA)* 46
Pixel 3–4
Prozessanwendungen 50–51
PSA* 46
pyroelektrisches Vidikon (PEV) 3

Q

Qualifikation von Thermografieexperten 13, 13–14
qualifizierte Person 15
qualitative Thermografie 57
quantitative Thermografie 57

R

radiometrisches Bild 3
Reflexion 24
Ressourcen 63–64

S

Schaltschränke 15
Schmierölanalyse 66
Schwingungsanalyse 66
Seebeck, Thomas 2
Sicherheit am Arbeitsplatz 14–16
Software 8
Stefan-Boltzmann-Gleichung 22
Strahlung 1, 20, 22–23, 24

T

Temperatur 19
Temperaturgradient 48
thermische Ausnahme 45
thermische Hülle 54
thermische Trenddarstellung* 59
Thermodynamik 19
Thermografie
 qualitative Thermografie 57
 quantitative Thermografie 57
 Vergleichsthermografie 57–58, 58
Thermografie-Anwendungen
 elektrische Anwendungen 45–49
 elektromechanische Anwendungen 49
 mechanische Anwendungen 49
Thermografieexperte
 Dokumentationspflichten 61–62
 Zertifizierung 61
Thermografie-Ressourcen 63–64
thermografische Inspektion
 Basisthermografie 58–59, 59
 elektrische Anwendungen 45–49
 elektromechanische Anwendungen 49
 Gebäudediagnose 51–56
 mechanische Anwendungen 49
 Prozessanwendungen 50–51
 optische und akustische Inspektion* 65
Thermogramm 4–5
Transmission 23, 24
Trendinspektion 50

U

Ultraschallanalyse 66
Umwelteinflüsse 28

V

Verarbeitungssoftware 8
Vergleichsthermografie 57–58, 58
Verschleißpartikelanalyse 66

W

Wärmebildkamera 2, 3, 6, 17
 Bedienung 4, 5
 Entwicklung von 2–4
 Komponenten 5–8
Wärmekapazität 20
Wärmesignatur 9, 49
Wärmestrahlung 22–23
Wärmeübertragung 19–20

Z

zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 19