

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

VERBAND DER
ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK
INFORMATIONSTECHNIK

Anwendung der Thermografie
zur Diagnose in der Instandhaltung
Elektroanlagen

Application of thermography
to maintenance diagnostics
Electrical systems

VDI/VDE 2878

Blatt 2 / Part 2
Entwurf / Draft

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich. /
The German version of this standard shall be taken as
authoritative. No guarantee can be given with respect to
the English translation.

Einsprüche bis 2024-09-30

- vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchsportal
<http://www.vdi.de/2878-2>
- in Papierform an
VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik
Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf

Inhalt	Seite
Vorbemerkung.....	2
Einleitung.....	2
1 Anwendungsbereich.....	3
2 Begriffe.....	5
3 Grundlagen des Messverfahrens.....	7
3.1 Randbedingungen und Einflussgrößen bei der Infrarotmessung.....	7
3.2 Einsatzmöglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Thermografie in elektrischen Anlagen.....	14
4 Spezielle Anforderungen bei der Anwendung des Diagnoseverfahrens an elektrischen Anlagen.....	16
4.1 Ausbildungsvoraussetzungen.....	16
4.2 Verwendete Messgeräte.....	17
4.3 Randbedingungen.....	17
4.4 Sicherheitsmaßnahmen.....	20
5 Durchführung des Messverfahrens.....	21
5.1 Einsatzgebiete für das Diagnoseverfahren.....	21
5.2 Festlegung des Untersuchungszyklus.....	30
5.3 Voraussetzungen für die Durchführung des Diagnoseverfahrens.....	32
5.4 Vorgehensweise bei der Durchführung des Diagnoseverfahrens.....	32
6 Auswertung.....	33
6.1 Bewertungsverfahren.....	33
6.2 Mögliche Maßnahmen zur Fehlerbehebung.....	37
7 Dokumentation.....	37
Anhang A Ablaufdiagramm einer thermografischen Untersuchung.....	40
Anhang B Dokumentation der Prüfergebnisse.....	42
Anhang C Beispiele zu Thermografiemessungen an einem dünnen Draht (isolierte Leitung, Ø 1 mm) mit verschiedenen Entfernungen und Objektiven (Strahlungstemperatur des Hintergrunds ca. 23 °C).....	44
Schrifttum.....	45

Contents	Page
Preliminary note.....	2
Introduction.....	2
1 Scope.....	3
2 Terms and definitions.....	5
3 Principles of the measurement method.....	7
3.1 Boundary conditions and parameters for infrared measurements.....	7
3.2 Fields of application and limits to the application of thermography within electrical systems.....	14
4 Special requirements for the application of the diagnostic method on electrical systems.....	16
4.1 Educational requirements.....	16
4.2 Applied measurement instruments.....	17
4.3 Boundary conditions.....	17
4.4 Safety measures.....	20
5 Application of the measurement method.....	21
5.1 Fields of application for the diagnostic method.....	21
5.2 Determination of the examination interval.....	30
5.3 Requirements for the implementation of the diagnostic method.....	32
5.4 Implementation procedure of the diagnostic method.....	32
6 Evaluation.....	33
6.1 Evaluation method.....	33
6.2 Possible measures for fault remedy.....	37
7 Documentation.....	37
Annex A Flow chart of a thermographic examination.....	41
Annex B Documentation of the test results.....	43
Annex C Examples of thermographic measurements on a thin wire (insulated cable, Ø 1 mm) with different distances and lenses (background radiation temperature approx. 23 °C).....	44
Bibliography.....	45

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)
Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Der Inhalt dieser Richtlinie zum Einsatz der Thermografie in der Instandhaltung ist entstanden in einer Zusammenarbeit von Fachleuten aus Wissenschaft, Industrie, Versicherungswirtschaft und öffentlichen Körperschaften. Die einzelnen Blätter der Richtlinienreihe beschreiben den Stand der Technik der Thermografie als Diagnoseverfahren in der Instandhaltung bzw. den Stand der Wissenschaft hierzu in der Bundesrepublik Deutschland. Sie dienen als Orientierung für die Durchführung thermografischer Messungen und als Entscheidungshilfe für die Anwendung in verschiedenen Anwendungsfeldern der Instandhaltung.

Unter Thermografie werden hier bildgebende Verfahren zur orts aufgelösten berührungslosen Strahlungstemperaturmessung mit Kamerasystemen verstanden. Im Gegensatz dazu wird beim Einsatz von Strahlungsthermometern (Pyrometern) die mittlere Temperatur eines durch die optische Anordnung festgelegten Messfelds gemessen. Umfassende Ausführungen zu Pyrometern finden sich in den Richtlinien VDI 3511 Blatt 4.x.

Um den unterschiedlichen Anwendungs- und Einsatzfeldern der Thermografie in der industriellen Praxis gerecht zu werden, wird die Richtlinienreihe in mehrere Blätter mit unterschiedlichen Themengebieten, respektive Detaillierungs- und Spezialisierungsgrade, unterteilt. Die folgenden Themenschwerpunkte werden in einzelnen Blättern behandelt:

Blatt 1 Allgemeine Anforderungen sowie Hinweise für Entscheidungsträger und Verantwortliche

Blatt 2 Elektroanlagen

Blatt 3 Maschinen- und Anlagentechnik

Blatt 4 Gerätetechnik

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

Introduction

The content of this standard on thermography in maintenance was compiled in cooperation with experts from science, industry, insurance, and statutory corporations. The individual parts of this series of standards describe the state-of-the-art of thermography as diagnostic method in maintenance and the current scientific knowledge about it in the Federal Republic of Germany. They serve as a standard for the conduct of thermographic surveys and as decision support for its implementation in different application fields of maintenance

Thermography here means imaging methods for the spatially resolved, contactless measurement of radiation temperature with camera systems. In contrast, when using radiation thermometers (pyrometers), the average temperature of a measuring field defined by the optical arrangement is measured. Comprehensive information on pyrometers can be found in the standards VDI 3511 Part 4.x.

In order to be able to display all the different application/implementation fields of thermography in industry, the series of standards is split into several parts with different topics and different levels of detail. The individual parts deal with the following main topics:

Part 1 General requirements and information for decision makers and managers

Part 2 Electrical systems

Part 3 Machine and plant technology

Part 4 Equipment technology

A catalogue of all available parts of this series of standards and those in preparation as well as fur-

sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter www.vdi.de/2878.

Diese Richtlinie richtet sich an Instandhalter im Bereich elektrischer Anlagen und an Thermografen und Thermografinnen, die Untersuchungen in elektrischen Anlagen durchführen. Die Richtlinie soll einen Überblick über die Anwendungsbereiche, die Grundlagen und die Durchführung des Verfahrens geben. Darüber hinaus wird auf die Auswertung der durchgeführten Messungen und die zu erstellenden Dokumente sowie deren notwendigen Inhalt eingegangen.

Heute stehen preisgünstige Infrarotmesssysteme zur Verfügung, die einfach und unkompliziert bedient werden können, wenngleich die Auswertung der Aufnahmen thermografische Kenntnisse erfordert. Ein Anwendungsgebiet ist die Überprüfung von Energieübertragungs- und -verteilungsanlagen bei Energieversorgungsunternehmen, in Industrie- und Produktionsbetrieben sowie Infrastrukturanlagen. Diese Überprüfungen werden im Regelfall von den entsprechend ausgebildeten und qualifizierten Instandhaltungsabteilungen selbst durchgeführt oder an externe Dienstleister vergeben.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie ist ein Leitfaden für Betreiber von Elektroanlagen mit dem Ziel, die Voraussetzungen für die Thermografie und deren Einsatzbedingungen als Messtechnik in der Inbetriebnahme einschließlich der Instandhaltung dieser Anlagen als Standardmessverfahren, zu erläutern.

Die thermografische Überprüfung von elektrischen Anlagen kann in allen Spannungsebenen eingesetzt werden. Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall werden unterschiedliche Anforderungen an das eingesetzte Messsystem gestellt. Auf diese Anforderungen wird in den weiteren Abschnitten näher eingegangen.

Mit dem Messsystem wird die von der Oberfläche des Prüfobjekts emittierte Strahlung gemessen und die Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Prüfobjekts dargestellt. Anhand der Temperaturverteilung auf der Oberfläche können auffällige Temperaturen am Prüfobjekt ermittelt werden. Auffällige Temperaturen werden z.B. an Stellen festgestellt, an denen bei elektrischen Verbindungsstellen ein erhöhter Übergangswiderstand vorliegt, oder an elektrischen Leitern, die mit einem zu hohen Strom belastet sind.

Des Weiteren kann man auch durch Messungen innerhalb von Schaltschränken Aussagen zum fachgerechten Aufbau und/oder zu der idealen Anordnung von aktiven und passiven Einbauten

ther information, if applicable, can be accessed on the Internet at www.vdi.de/2878.

This standard addresses maintenance engineers in the field of electrical systems and thermographs, who carry out investigations on electrical systems. This standard should give an overview on the application fields, the fundamentals, and the implementation of the procedure. In addition, the analysis of the measurements, the documents, which have to be compiled, as well as the necessary content of these documents are shown.

Nowadays there are cost-effective infrared measurement systems for easy and straightforward operation, although the evaluation of the images requires thermographic knowledge. One field of application is the examination of energy transmission and energy distribution systems of power supply companies, industrial plants and production plants as well as infrastructure facilities. These examinations are normally carried out directly by trained and qualified maintenance departments or they are given to external service providers.

1 Scope

This standard for electrical systems operators aims at explaining the prerequisites for thermography and the application conditions for thermography as measurement technology within the commissioning, including the maintenance of these systems as a standard measurement method.

A thermographic examination of electrical systems can be carried out in all voltage levels. Depending on the individual case of application, there are different requirements for the applied measurement system. These requirements will be discussed in greater detail in the following sections.

The measurement system measures the radiation, which is emitted by the surface of the test object, and it shows the temperature distribution on the surface of the test object. Based on the temperature distribution on the surface, irregular temperatures on the test object can be detected. Irregular temperatures can be detected, e.g., on spots, where the electrical connections show increased contact resistance or on electrical conductors, which are loaded with excessive current.

Furthermore, statements with regard to the professional assembly and/or the ideal position of active and passive enclosures and their optimal interaction can be made by measurements within electri-

und deren optimalem Zusammenspiel treffen. Hier können ungünstige Bauteilabstände oder eine inkorrekte Luftführung zu Überhitzung und damit zum Ausfall der Anlagen führen, insbesondere auch im Hinblick auf die Auswirkungen von Luftströmungen in Verbindung mit Klimatisierungskomponenten. Die thermografische Analyse von solchen Systemen ist somit auch ein Indikator für die richtige Art der Schaltschrank-Klimatisierung und die korrekte Luftführung in solchen Anlagen.

Erhöhte Übergangswiderstände treten an nicht ordnungsgemäß hergestellten Verbindungen oder an gealterten Verbindungen auf. Verbindungen lassen sich in ruhende (z.B. verschraubte, verpresste, vernietet, verschweißte) und in bewegliche Verbindungen (z.B. Schaltkontakte, Trennstellen, Steckverbindungen) unterteilen. Ein erhöhter Übergangswiderstand führt zu einer höheren Verlustleistung an der Verbindungsstelle. Als Folge der höheren Verlustleistung steigt die Temperatur der Verbindungsstelle. Durch die höhere Temperatur steigen der Übergangswiderstand und damit die Verlustleistung an der Verbindung weiter an. Eine höhere Verbindungstemperatur führt zu einer schnelleren Alterung der Verbindung. Im Extremfall kann die Verbindung infolge einer immer weiter ansteigenden Temperatur im Lauf der Betriebszeit ausfallen. Vor dem eigentlichen Ausfall der Verbindung können angrenzende Isolierstoffe bereits in Mitleidenschaft gezogen werden. Die Beschädigung der Isolierstoffe kann einen Kurzschluss an den Betriebsmitteln verursachen und zu einem Störlichtbogen führen, der einen Brand und gegebenenfalls die Zerstörung kompletter Einrichtungen bewirken kann.

Die thermografische Überprüfung von elektrischen Anlagen kann unter verschiedenen Gesichtspunkten eingesetzt werden:

- **Konstruktion/Auslegung/Inbetriebnahme**

Elektrische Anlagen und Betriebsmittel müssen nach den anerkannten Regeln der Technik errichtet werden.

Berechnungen zur Wärmeausbreitung (z.B. mit thermischen Wärmenetzen, FEM-Programmen und CFD-Analysen (Computational Fluid Dynamics)) werden konstruktionsbegleitend durchgeführt und simulieren das Strömungs- und Temperaturverhalten in Schaltschränken. Diese Simulationen können dann durch Infrarotmessungen einfach und schnell auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden.

Im Rahmen der Inbetriebnahme können die Vorgaben des Betreibers durch den Hersteller überprüft werden.

Unfavourable distances between components or an incorrect airflow can lead to overheating and thus, to a failure of the system, in particular with regard to the influence of airflows in connection with cooling components. Therefore, the thermographic analysis of such systems is also an indicator for the correct cooling of electrical enclosures and for the right airflow in such systems.

Connections, which are old and/or not assembled correctly, show excessive contact resistances. Connections can be divided into static (e.g., bolted, pressed, riveted, welded) and mobile connections (e.g., switching contacts, connections, plug connections). An excessive contact resistance leads to a higher power loss at the connection, which leads to a temperature increase of the connection. The contact resistance and, thus, the power loss at the connection is further increased by the higher temperature. A higher connection temperature leads to faster aging of the connections. In extreme cases, a constantly increasing temperature can result in the failure of the connection during the course of operation. Before the actual failure of the connection, adjacent insulation materials can already get affected, too. Damages in the insulation material can trigger short-circuit on the operating equipment and lead to an arch flash, which can cause a fire and possibly the destruction of entire facilities.

The thermographic examination of electrical systems can be applied from various different perspectives:

- **construction/design/commissioning**

Electrical systems and operating equipment have to be constructed in accordance with the recognised engineering standards.

Calculation for heat propagation (e.g., with thermal heating networks, FEM programmes and CFD analysis (computational fluid dynamics)) are carried out during the construction and simulate the flow behaviour and the temperature behaviour in electrical enclosures. By means of infrared measurements, the correctness of these simulations can then be checked easily and quickly.

As part of the commissioning, the operator's specifications can be checked by the manufacturer.

- **Inspektion/Prüfen**
Bei der präventiven Überprüfung von elektrischen Anlagen wird die thermografische Untersuchung der Anlagen in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Bei der regelmäßigen Untersuchung der elektrischen Anlagen können mögliche Schwachstellen bereits erkannt werden, bevor es zu einem Ausfall der Anlagen kommt. Durch die Früherkennung der Schwachstellen können diese planmäßig behoben werden. Die Zuverlässigkeit der Anlage steigt.
- **zustandsorientierte Instandhaltung**
Neben erhöhten Übergangswiderständen an Kontakten und Verbindungen können andere Schäden an Anlagen vorliegen, die einen ordnungsgemäßen Betrieb verhindern. Um Schwachstellen mittels einer thermografischen Untersuchung feststellen zu können, müssen die Oberflächen der zu untersuchenden Prüfobjekte optisch zugänglich sein. Die Betriebsmittel müssen zum Zeitpunkt der Untersuchung eine stationäre Betriebstemperatur erreicht haben und die für die Messung notwendigen Randbedingungen müssen bekannt sein und erfasst werden (siehe Abschnitt 4).
- **Prüfung von Serviceleistung**
Ein weiteres Anwendungsgebiet in der Instandhaltung ist der Einsatz von thermografischen Untersuchungen im Rahmen von Störungseinsätzen. Ist an einer Anlage eine Störung eingetreten, kann die Infrarotkamera genutzt werden, um zu überprüfen, ob die Ursache für die Störung behoben wurde (Reparaturqualität). Zusätzlich kann überprüft werden, ob angrenzende elektrische Betriebsmittel der Anlage durch die Störung in Mitleidenschaft gezogen wurden.

Die Thermografie ist nicht das einzige Verfahren, um Fehlfunktionen oder Schwachstellen an elektrischen Anlagen festzustellen. Zusätzliche Sicherheit erhält man durch begleitende Messmethoden (z.B. Temperaturmessungen, Strommessung, Lufttemperatur, Thermoelemente, Funksensoren auf den Leitungen), für die Dokumentation und Auswertung (z.B. mittels Messwerterfassungssystemen) und Interpretation von Messergebnissen.

- **inspection/examination**
For the preventive examination of electrical systems, the thermographic examination of the systems is carried out periodically. By means of periodic examination of electrical systems, weaknesses can already be detected before there is a failure of the system. By means of early weakness detection, the weaknesses can be corrected systematically. This leads to an increase in the system's reliability.
- **condition-based maintenance**
Besides excessive contact resistances on contacts and connections, there can be different damages, which can prevent the system from functioning properly. In order to be able to detect weaknesses by means of a thermographic examination, optical access to the surfaces of the test objects has to be provided. At the time of the examination, the operating equipment has to have reached a stationary operating temperature and the boundary conditions, which are necessary for the measurement, must be known and recorded (see Section 4).
- **testing of service performance**
Another field of application in maintenance is the application of thermographic examinations within operations relating to malfunctions. In case there is a malfunction within the system, the infrared camera can be used to check if the reason for this malfunction has been eliminated (repair quality). In addition, it can be checked if any adjacent electrical operating equipment of the system has been affected by the malfunction.

Thermography is not the only method to detect malfunctions or weaknesses on electrical systems. Accompanying measurement methods (e.g., temperature measurements, current measurement, air temperature, Wireless sensors on the lines) for the documentation and evaluation (e.g., by means of data acquisition systems) and interpretation of measurement results provide additional security.