

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	11
2	Physikalische Grundlagen der Thermografie	12
2.1	Strahlungsgesetze des schwarzen Körpers	13
2.2	Strahlungsgesetze realer Körper	18
2.2.1	Emissionsgrade realer Oberflächen	22
2.2.2	Abhängigkeit des Emissionsgrads von der Beobachtungsrichtung	29
2.2.3	Das Verhalten von Glas und Kunststoffen im Thermogramm	33
2.3	Einflüsse durch die Messumgebung	35
2.3.1	Einfluss der Atmosphäre	35
2.3.2	Einfluss der Umgebungs- und Hintergrundstrahlung – Auswertungsgleichung der Thermografie	38
2.3.3	Auswirkungen von Fehleinschätzungen des Emissionsgrads und der Umgebungsstrahlungstemperatur auf das Thermogramm	45
3	Überblick über Thermografiesysteme	54
3.1	Historische Entwicklung	54
3.2	Kameratechnik und Sensorik	55
3.2.1	Scanner-Thermografiesysteme	56
3.2.2	Focal-Plane-Array-Thermografiesysteme	60
3.3	Beurteilungskriterium zur thermischen Auflösung	64
3.4	Optische Elemente – Linsensysteme	64
3.5	Darstellung der Thermogramme, Speicherung und Verarbeitung	69
3.5.1	Farbskalen und Darstellungsneutralität	69
3.5.2	Zusammensetzen von Einzel-Thermogrammen zu Gesamtthermogrammen	72
3.5.3	Entzerrung des Thermogramms mit Passpunkten	74

4	Vorschriften, Richtlinien und Normen	75
5	Genauigkeiten der in Thermogrammen angegebenen Temperaturen	77
5.1	Einfluss der Wetterrandbedingungen und der Baualtersklasse von Gebäuden	77
5.1.1	Einfluss der instationären Einwirkungen – Durchschlagen von Temperaturänderungen	83
5.1.2	Berechnung der täglichen Schwankungen der Innenoberflächentemperaturen	84
5.1.3	Einfluss von Fehlstellen in Wärmedämmungen	89
5.2	Beispiel zum Einfluss von falsch angenommenen Emissionsgraden und Umgebungsstrahlungen auf das Messergebnis	90
5.2.1	Beispiel einer Innenthermografie	90
5.2.2	Beispiel einer Außenthermografie	92
6	Anwendung der Thermografie im Bauwesen	96
6.1	Grundprinzipien	96
6.1.1	Messvoraussetzungen bei Außen- und Innenthermografien	96
6.2	Thermografie zur Lokalisierung von Wärmebrücken	106
6.2.1	Systematik der Wärmebrücken	106
6.2.2	Stoffbedingte Wärmebrücken	106
6.2.3	Geometrische Wärmebrücken	109
6.2.4	Typische Thermogramme schadenfreier Bauteile	111
6.2.5	Rechnerische Untersuchungsmöglichkeiten von Wärmebrücken	120
7	Praxisbeispiele	128
7.1	Thermografie von Wärmebrücken	128
7.1.1	Außenwandecke mit auskragender Betondecke	128
7.1.2	Ungedämmter Fenstersturz	132
7.1.3	Auskragender Stahlträger ohne thermische Trennung	135
7.1.4	Durch die Wärmedämmebene geführte massive Rundstütze	138
7.1.5	Einbauelement Rollladenkasten	139
7.1.6	Schimmelpilzbildung an einer Außenwandecke – ausführliche Beurteilung	142

7.2	Thermografie zur Lokalisierung von Luftundichtigkeiten mit natürlichen Druckdifferenzen	150
7.2.1	Fehlende Luftdichtigkeit im Dachbereich	150
7.2.2	Trennwandanschluss in einer Industriehalle mit unterschiedlichen Temperaturbereichen	152
7.2.3	Außerverkleidung einer Industriehalle aus Trapezblech	154
7.2.4	Ausmauerungen bei Fachwerkgebäuden	155
7.2.5	Luftundichtigkeiten an Fenstern und Türen	156
7.3	Thermografie zur Lokalisierung von Luftundichtigkeiten mit Unterstützung des Differenzdruckverfahrens	157
7.3.1	Luftundichtigkeiten an einem Gebäude in Holzständerbauweise	157
7.3.2	Luftundichtigkeit am Wand-Deckenübergang bei einem Gebäude in Holzständerbauweise	162
7.3.3	Aufdeckung von Luftundichtigkeiten noch während der Bauausführung	164
7.3.4	Kühlhallenkonstruktion mit luftundichten Fugenelementen	166
7.4	Thermografie von Innenwärmédämmungen	168
7.4.1	Ertüchtigung von Außenwänden eines denkmalgeschützten Gebäudes mit Innenwärmédämmung	168
7.4.2	Innenwärmédämmung mit kapillaraktiven Baustoffen	171
7.4.3	Innenwärmédämmung mit Dampfbremse und Mineralwolle	173
7.5	Thermografie zur Lokalisierung von Durchfeuchtungen	174
7.5.1	Durchfeuchtung an einem Paneel-Element	175
7.5.2	Detektion von Feuchtigkeit bei Mauerwerkswänden	176
7.5.3	Feuchtigkeit aus Wasserrohrbruch bei Mauerwerkswänden	177
7.5.4	Durchfeuchtungsschäden an Kelleraußenwänden	179
7.6	Thermografie unter Ausnutzung natürlicher solarer Aufheizvorgänge	182
7.6.1	Auffälligkeiten an einem Wärmedämmverbundsystem	182
7.6.2	Auffinden von Holzfachwerk im Sommer	184
7.6.3	Temperaturverteilung an Stahlträgern eines großflächig verglasten Luftgeschosses	184
7.6.4	Thermografie von Flachdächern	186
7.7	Detektion von Fachwerk- und Rahmenstrukturen	189
7.7.1	Überputztes Holzfachwerk	189
7.7.2	Mit Naturstein bekleidete Rahmenkonstruktion aus Stahlbeton	190
7.7.3	Mit Mauerwerk bekleidete Stahlbetonkonstruktion	192
7.7.4	Historisches Kupferhaus	192

7.8	Thermografie zur Lokalisierung von Konstruktionseinzelheiten	195
7.8.1	Dokumentation des Verlaufs von Heizleitungen	195
7.8.2	Außenwände mit unter Putz verlegten Heizungsleitungen	202
7.8.3	Heizkörperanordnung auf Außenthermogrammen	204
7.8.4	Funktionsüberprüfung bei Deckenheizungssystemen	205
7.8.5	Dokumentation der Funktionsfähigkeit von beheizten Fenster-Rahmenkonstruktionen	206
7.8.6	Traganker bei Dreischichtelementen	207
7.9	Hinterlüftete Konstruktionen	209
7.9.1	Hinterlüftete Außenwandkonstruktion mit Mauerwerk	209
7.9.2	Hinterlüftete Außenwandkonstruktion mit Holzbekleidung	211
7.9.3	Hinterlüftete Außenwandkonstruktion mit Keramikfertigteilen	211
7.9.4	Innenwandkonstruktionen mit Bekleidungen	212
7.9.5	Traganker einer hinterlüfteten Außenwandkonstruktion	213
7.10	Thermografie von Verglasungen	216
7.10.1	Großflächige Verglasungen	216
7.10.2	Verglasungen mit auffälligen Abweichungen	219
7.11	Thermografie zur baubegleitenden Qualitätssicherung	221
7.11.1	Untersuchungen vor und nach einer energetischen Gebäudesanierung	221
7.11.2	Überprüfung eines Gebäudes mit Wärmedämmverbundsystem	224
7.11.3	Schallbrücken bei Reihenhaustrennfugen	226
7.11.4	Fehlende Wärmedämmung und Luftundichtigkeiten an Trockenbauwänden	229
7.11.5	Fehlende Wärmedämmung an einer Außenwandecke	231
7.11.6	Fehlende Wärmedämmung an einer Fensterlaibung	232
8	Nutzung der Thermografietechnik in der Forschung	235
8.1	Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) als Kenngröße für Wärmetransportvorgänge	235
8.2	Betonprobekörper unter zyklischer Beanspruchung	237
8.3	Zugversuch an einem Stahldübel	239
8.4	Überprüfung von Salzwasser auf gleichmäßige Temperaturverteilung in einem Wellenbecken	241
8.5	Untersuchungen zum Einbauverhalten von hochfestem Feinkornbeton	243
8.6	Untersuchungen zur feuchteinduzierten Bewuchsentwicklung auf Außenwandoberflächen	245

9	Thermografie mit Drohnensystemen	249
9.1	Drohnentechnik mit Thermografie	249
10	Spezielle Anwendungsfälle von Thermografien	253
10.1	Verstopfungen in Rohrleitungen	253
10.2	Thermografie von Kunststoffen – kritische Betrachtung	254
10.3	Thermografie an PV-Anlagen	256
11	Zusammenfassung und Kurzleitfaden der Thermogrammerstellung	259
11.1	Allgemeine Voraussetzungen	259
11.2	Durchführung der thermografischen Untersuchung	259
12	Anhang	262
12.1	Nomenklatur	262
12.1.1	Größen	262
12.1.2	Abkürzungen	263
12.2	Danksagung	264
12.3	Literaturverzeichnis	264
12.4	Stichwortverzeichnis	271