

# 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	Außenwanddecke 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 Außenwanddecke – 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	Außenverkleidung 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 Innenwärmedämmungen _____	168
7.4.1	Ertüchtigung von Außenwänden eines denkmalgeschützten Gebäudes mit Innenwärmedämmung _____	168
7.4.2	Innenwärmedämmung mit kapillaraktiven Baustoffen _____	171
7.4.3	Innenwärmedämmung 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 Außenwanddecke _____	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