

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Physikalische Grundlagen</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Wärmelehre, Thermodynamik</b>	<b>7</b>
1.1.1. Temperatur, Atommodell von Bohr	7
1.1.2. Grundgesetze und Zusammenhänge der Wärmelehre	8
1.1.2.1. Aggregatzustände	8
1.1.2.2. Spezifische Wärmekapazität	10
1.1.2.3. Hauptsätze der Thermodynamik	11
1.1.3. Wärmeübertragung - Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung	12
1.1.3.1. Wärmeleitung (in festen Körpern)	12
1.1.3.2. Konvektion (Wärmeströmung, Wärmeübergang)	15
1.1.3.3. Wärmestrahlung	16
1.1.3.4. Wärmestrahlung - wichtige Begriffe und Definitionen	18
<b>1.2. Eigenschaften des idealen Strahlers</b>	<b>19</b>
1.2.1. Physikalisches Modell des schwarzen Körpers	19
1.2.2. Plancksches Strahlungsgesetz	20
1.2.3. Wiensches Verschiebungsgesetz	21
1.2.4. Lambertsches Kosinusetz	22
<b>1.3. Fotometrisches Grundgesetz</b>	<b>23</b>
<b>1.4. Tatsächliche Messbedingungen und Besonderheiten</b>	<b>27</b>
1.4.1. Messanordnung der berührungslosen Temperaturmessung / Thermografie	27
1.4.2. Eigenschaften realer Messobjekte	27
1.4.3. Zusammenhänge zwischen Emission, Absorption, Reflexion und Transmission	35
1.4.4. Einfluss der Übertragungsstrecke	36
1.4.5. Wellenlängenbereiche der Messsysteme	37
<b>1.5. Pyrometrische (thermografische) Grundgleichung</b>	<b>39</b>
<b>2. Messtechnische Betrachtung</b>	<b>41</b>
<b>2.1. Optische Gesetze</b>	<b>41</b>
2.1.1. Gaußsche Optik (paraxiale Optik)	41
2.1.2. Grundtypen und Eigenschaften optischer Linsen	41
2.1.2.1. Sammellinsen	41
2.1.2.2. Optische Abbildung bei Sammellinsen	43
2.1.3. Gesetzmäßigkeiten optischer Systeme	45
2.1.3.1. Brennweite, Feldblende, Aperturblende	45
2.1.3.2. Tiefenschärfe	47
2.1.4. Fotometrisches Grundgesetz bei Messsystemen mit Sammellinsen	49
2.1.5. Optische Abbildungsfehler	50
2.1.6. Minderung der Strahlstärke zum Linsenrand hin	53
2.1.7. Auflösungsgrenze durch Beugung (Diffraktion)	54
<b>2.2. Signalverarbeitung, Signaldigitalisierung</b>	<b>57</b>
2.2.1. Erzeugung zeitdiskreter Signalfolgen aus kontinuierlichen Signalen	57
2.2.2. Erzeugung diskreter Pegelwerte durch Quantisierung analoger Signale	57
2.2.3. Zweidimensionale Rasterung - geometrische Diskretisierung	58
<b>3. Aufbau und Eigenschaften von Strahlungsthermometern</b>	<b>60</b>
<b>3.1. Infrarot-Thermometer und Pyrometer</b>	<b>60</b>
3.1.1. Grundlegende Arten von Strahlungsthermometern	61
3.1.2. Komponenten der Strahlungsthermometer	63
3.1.2.1. Pyrometeroptiken - Messfläche (Messfleck) und Lasermarker	63
3.1.2.2. Pyrometeroptiken - Infrarot-durchlässige Linsenmaterialien	66
3.1.2.3. Detektoren in Strahlungsthermometern	68
3.1.3. Besondere Strahlungsthermometer	77
<b>3.2. Thermografische Systeme - bildgebende Infrarot-Thermometer</b>	<b>80</b>
3.2.1. Wärmestrahlung detektierende Instrumente ohne Temperaturmessung	80
3.2.2. Kategorisierung der radiometrischen Wärmebildkameras	82
3.2.3. Vor-Ort-Auswertefunktionen mobiler Thermokameras	87
3.2.4. Grundlegender Aufbau radiometrischer bildgebender Systeme	88
3.2.5. Bildaufnahmeprinzipien thermografischer Systeme	89
3.2.6. Matrixdetektoren moderner thermografischer Systeme	92
3.2.6.1. Thermische Detektoren	92
3.2.6.2. Photonendetektoren (Quantendetektoren)	97
3.2.6.3. Detektoren für radiometrische Thermografiesysteme - Zusammenfassung	104
3.2.7. Auslesetechniken bei Infrarot-Matrixdetektoren	105
3.2.7.1. Zeilenweises Ausleseverfahren	105
3.2.7.2. „Snap-Shot“-Technologie (Moment- oder Simultanaufnahme)	106

3.2.7.3. „Binning“-Technologie (Zusammenschaltung benachbarter Detektorpixel)	107
3.2.8. Kühltechnologien für Photonendetektoren	109
3.2.8.1. Kühlung mit Flüssigstickstoff	109
3.2.8.2. Stirling-Kühlung	110
3.2.8.3. Peltier-Element (thermoelektrische Kühlung)	113
3.2.9. Objektive und Vorsatzlinsen für Thermokameras	114
3.2.9.1. Linsenmaterialien für thermografische Objektive	114
3.2.9.2. Auswirkung des Linsendurchmessers auf die Messfähigkeiten	125
3.2.9.3. Außergewöhnliche Infrarot-Optiken	125
3.2.10. Infrarotfilter für thermografische Systeme	129
3.2.11. Optikabhängige Messfähigkeiten thermografischer Systeme	132
3.2.11.1. Sichtfeld (Bildfläche) von Wärmebildkameras	132
3.2.11.2. Geometrische Auflösung thermografischer Systeme	137
3.2.12. Bildwiederholrate (Bildfrequenz) von Thermokameras	146
3.2.13. Pixelauflösung bei Messsystemen mit Matrixdetektor	147
3.2.13.1. Pixelauflösung erhöhende Verfahren (innerhalb des Kamerabildfeldes)	150
3.2.13.2. Erhöhung der Pixelauflösung durch Montage von Thermogrammen	155
3.2.14. Optische Fokussierung und Schärfentiefebereich	156
3.2.14.1. Fokus und Schärfentiefe bei Thermokameras	156
3.2.14.2. Wärmebilddarstellung verbessernde Verfahren	157
3.2.14.3. Autofokus, Erweiterung des Schärfentiefebereiches	159
3.2.15. Thermische Auflösung radiometrischer Systeme	160
3.2.16. Temperaturmessbereiche	164
3.2.17. Kalibration thermografischer Systeme	168
<b>3.3. Entwicklungsgeschichte der thermografischen Systeme</b>	<b>173</b>
3.3.1. Geschichtlich wesentliche Thermokamerahersteller	173
3.3.1.1. AGA/Agema (Schweden)	176
3.3.1.2. Hughes Aircraft Company (USA)	184
3.3.1.3. JEOL - Japan Electron Optics Laboratory (Japan)	187
3.3.1.4. Inframetrics, Inc. (USA)	189
3.3.1.5. English Electric Valve (Großbritannien)	194
3.3.1.6. I.S.I. Group, Inc. (USA)	197
3.3.1.7. NEC AVIO / Nippon Avionics (Japan)	198
3.3.1.8. Electrophysics Corporation (USA)	203
3.3.1.9. Amber Engineering Inc. (USA)	206
3.3.1.10. Robotron (PGH Elektronik Magdeburg / Fernsehelektronik Berlin) (Deutschland)	209
3.3.1.11. ZEISS (Carl Zeiss Jena, Zeiss Oberkochen, Jenoptik GmbH) (Deutschland)	211
3.3.1.12. LAND Infrared (Großbritannien)	219
3.3.1.13. Raytheon Company (USA)	221
3.3.1.14. FLIR Systems, Inc. (USA)	224
3.3.1.15. Mitsubishi Electric Corporation (Japan)	230
3.3.1.16. Cincinnati Electronics Corporation (USA)	232
3.3.1.17. Mikron Infrared, Inc. (USA)	234
3.3.1.18. Infrared Solutions Inc. (USA)	237
3.3.1.19. FLUKE Corporation (USA)	239
<b>3.4. Aktuelle Entwicklungs- und Markttendenzen</b>	<b>241</b>
3.4.1. Miniaturisierung, Massenproduktherstellung	241
3.4.2. Kostengünstige thermografische Werkzeuge für Industrienanwender	248
3.4.3. Hand-gehaltene High-End-Thermokameras für Forschung und Entwicklung	260
3.4.4. Weltspitzenreiter stationärer Thermografiesysteme für zivile Forschung	269
3.4.5. Aktuell bekannte Hersteller von zivilen Thermografiesystemen	275
<b>3.5. Auswahl thermografischer Systeme - Schritt für Schritt</b>	<b>278</b>
<b>3.6. Aufgabenspezifische Auswahlaspekte für Thermografiesysteme</b>	<b>280</b>
<b>4. Praxis der Thermografie</b>	<b>283</b>
<b>4.1. Übersicht der messtechnischen Probleme</b>	<b>283</b>
<b>4.2. Quantitative Bewertung der Messfehler</b>	<b>285</b>
4.2.1. Empfindlichkeitskurve thermografischer Messinstrumente	285
4.2.2. Temperaturmessfehler in Abhängigkeit vom Emissionsgradfehler	285
4.2.3. Temperaturmessfehler durch Falscheinstellung der Umgebungstemperatur	287
4.2.4. Messfehler durch inkorrekte Fokussierung oder Tiefenschärfemangel	289
4.2.4.1. Messfehlergröße durch falsche Fokussierung	289
4.2.4.2. Zusammenhang zwischen Objektstand und Schärfentiefe	290
4.2.4.3. Praktische Hinweise zur korrekten Fokussierung	292
4.2.5. Messfehler im Zusammenhang mit der geometrischen Auflösung	293
4.2.6. Messfehler durch falsche Auswahl des Messbereichs	294

4.2.7. Zusammenhang von Kalibrationsbereich und Temperaturanzeigebereich	300
4.2.8. Messfehler bei dynamischen Prozessen	301
4.2.8.1. Integrationszeit contra relative Bewegungsgeschwindigkeit	301
4.2.8.2. Messung dynamischer Prozesse mit kurzen Zeitkonstanten	303
4.2.9. Sonstige Messfehler und Möglichkeiten derer Minimalisierung	306
<b>4.3. Bestimmung der strahlungsphysikalischen Faktoren</b>	<b>307</b>
4.3.1. Methoden zur Ermittlung der Umgebungstemperatur	307
4.3.2. Verfahren zur Bestimmung des Emissionsgrades	308
4.3.2.1. Vergleich mit berührender Temperaturmessung	308
4.3.2.2. Vergleich zu Fläche oder Objektteil mit bekanntem Emissionsgrad	309
4.3.2.3. Vergleich mit (physikalisch) bekannter Objekttemperatur	310
4.3.2.4. Pixelweise Emissionsgradbestimmung und -korrektur	312
4.3.3. Bestimmung des Transmissionsgrades	315
4.3.4. Ermittlung des Reflexionsgrades	315
<b>4.4. Farbskalen für thermografische Darstellungen</b>	<b>317</b>
4.4.1. Fähigkeiten des menschlichen Auges	317
4.4.2. Die Farbpaletten RGB und CMYK	317
4.4.3. Thermogramm in verschiedenen Farbskalen	318
<b>4.5. Wärmebildauswertung (passive Thermografie)</b>	<b>321</b>
<b>4.6. Kategorien der thermografischen Anwendungen</b>	<b>324</b>
4.6.1. Messungen / Prüfungen mittels passiver Thermografie	324
4.6.2. Auf aktiver Thermografie basierende Prüfverfahren	324
4.6.3. Prozessregelung / Produktionsüberwachung mittels Thermografie	325
4.6.4. Sonstige Anwendungen der Wärmestrahlungsdetektion	325
<b>4.7. Kategorisierung der Anwendungen nach Fachgebieten</b>	<b>326</b>
<b>5. Praxisanwendungen der Thermografie im Detail</b>	<b>327</b>
<b>5.1. Thermografie an Gebäuden und Haustechnik</b>	<b>327</b>
5.1.1. Bauphysikalische Grundlagen	327
5.1.2. Besonderheiten der Bauthermografie	331
5.1.3. Unterschiede zwischen Untersuchungen im Innen- und Außenbereich	331
5.1.4. Empfohlene Mess- und Klimabedingungen für die Bauthermografie	332
5.1.5. Mit Bauthermografie nachweisbare Gebäudefehler	335
5.1.5.1. Lokalisierung von Wärmebrücken und Wärmedämmfehlern	336
5.1.5.2. Thermografische Untersuchung verdeckter Bauelemente	346
5.1.5.3. Kontrolle der Wärmedämmung von Dächern und Dachausbauten	352
5.1.5.4. Winddichtheitsprüfung und Luftleckageortung	354
5.1.5.5. Nachweis der Gebäudeaufheizung durch Sonneneinstrahlung	360
5.1.5.6. Aufdecken von Problemen an Türen und Fenstern	362
5.1.5.7. Nachweis von Wasser- und Wasserdampfschäden	370
5.1.5.8. Lokalisierung gebäudetechnischer Rohrleitungen und Leckagen	379
5.1.5.9. Thermografische Kontrolle von Kühlhäusern / Kühlkammern	385
5.1.5.10. Thermografische Inspektion von Flachdächern	387
5.1.5.11. Überprüfung sonstiger Gebäudeelemente	388
5.1.6. Wärmebildkamera für Bauthermografie	389
5.1.7. Spezialsoftware zur thermografischen Bewertung von Gebäuden	390
5.1.8. Bestimmung des U-Wertes durch Thermografie	393
5.1.8.1. Ermittlung des U-Wertes durch Wärmestrommessung	393
5.1.8.2. Bestimmung des U-Wertes durch wärmetechnische Berechnung	394
5.1.8.3. Berechnung des U-Wertes anhand Oberflächentemperaturmessung	394
<b>5.2. Thermografie an elektrischen Geräten und Anlagen</b>	<b>397</b>
5.2.1. Hintergrundinformationen zu elektrischen Anlagen	397
5.2.2. Wichtige grundlegende Hinweise	398
5.2.3. Messschwierigkeiten und Lösungsvorschläge im Detail	398
5.2.4. Geometrische Auflösung in der Praxis	402
5.2.5. Typische Temperaturgrenzwerte	403
5.2.6. Abschätzung der bei Nennlast zu erwartenden Erwärmung	404
5.2.7. Empfohlene Messbedingungen für Außenmessungen	406
5.2.8. Wärmebildkamera für Elektrothermografie	416
<b>5.3. Unterstützung der Maschinenwartung durch Thermografie</b>	<b>417</b>
5.3.1. Thermografisch auffindbare maschinentechnische Probleme	417
5.3.2. Wichtige grundlegende Hinweise	418
5.3.3. Messschwierigkeiten und Lösungsvorschläge im Detail	418
5.3.4. Empfohlene Messbedingungen für Außenmessungen	419
5.3.5. Typische Temperaturgrenzwerte	419
5.3.6. Wärmebildkamera für Maschinenwartung	422

<b>5.4. Untersuchung von Industrieanlagen und Wärmedämmungen</b>	<b>423</b>
5.4.1. Thermografisch auffindbare anlagentechnische Fehler	423
5.4.2. Wichtige grundlegende Hinweise	424
5.4.3. Messschwierigkeiten und Lösungsvorschläge im Detail	424
5.4.4. Empfohlene Messbedingungen für Außenmessungen	425
5.4.5. Weitere praktische Hinweise	425
5.4.6. Wärmebildkamera für Industriethermografie	433
<b>5.5. Thermografie im Hüttenwesen und in der Metallverarbeitung</b>	<b>434</b>
5.5.1. Thermografisch auffindbare Probleme in der Metallurgie	434
5.5.2. Wichtige grundlegende Hinweise	435
5.5.3. Messschwierigkeiten und Lösungsvorschläge im Detail	435
5.5.4. Empfohlene Messbedingungen und Geräteausstattung	437
5.5.5. Thermografie in der Schwerindustrie	438
5.5.5.1. Gießverfahren - Öfen, Tiegel, Pfannen und Transportbehälter	438
5.5.5.2. Abkühlvorgang beim Stranggießen	439
5.5.5.3. Schmieden und Pressen	439
5.5.5.4. Walzen und Ziehen von Stahl	440
5.5.5.5. Gussüberwachung, Schlackeerkenennung	441
5.5.5.6. Form- und Druckguss von Aluminium	441
5.5.6. Wärmebildkamera für Hüttenwesen/Metallurgie	442
<b>5.6. Thermografische Messungen in der Kunststoffindustrie</b>	<b>443</b>
5.6.1. Wellenlängenbereiche für Messungen an Kunststoffen	443
5.6.2. Typische Anwendungen bei der Kunststoffverarbeitung	445
5.6.3. Wichtige grundlegende Hinweise	446
5.6.4. Messschwierigkeiten und Lösungsvorschläge im Detail	446
5.6.5. Wärmebildkamera für die Kunststoffindustrie	449
<b>5.7. Thermografische Messungen an und durch Glas</b>	<b>450</b>
5.7.1. Typische Thermografieanwendungen in der Glasindustrie	450
5.7.2. Wichtige grundlegende Hinweise	451
5.7.3. Messschwierigkeiten und Lösungsvorschläge im Detail	451
5.7.4. Wellenlängenbereich für Messungen an und durch Glas	452
5.7.5. Messung der Glastemperatur (während der Herstellung)	454
5.7.6. Messung der Flammentemperatur	456
5.7.7. Wärmebildkamera für Flammentemperaturmessung	457
5.7.8. Qualitätskontrolle an Leuchtkörpern mittels Thermografie	458
5.7.9. Thermografische Messungen an Glasschmelzöfen	459
5.7.10. Schmelzen von Korund (Aluminiumoxid)	462
5.7.11. Wärmebildkamera für Messungen an und durch Glas	465
<b>5.8. Thermografieanwendungen in der Elektronikindustrie</b>	<b>466</b>
5.8.1. Elektronische Messungen - Allgemeinüberblick	466
5.8.2. Wichtige grundlegende Hinweise	467
5.8.3. Messschwierigkeiten und Lösungsvorschläge im Detail	467
5.8.4. Pixelweise Emissionsgradkorrektur (Praxisanwendung)	468
5.8.5. Anzeigen thermischer Änderungen mittels Differenzwärmebild	471
5.8.6. Messung von Erwärmung und Temperaturschwankungen	472
5.8.7. Beobachtung von Löt- und Schweißtechnologien	474
5.8.8. Messbarkeitsgrenzen aufgrund der geometrischen Auflösung	477
5.8.9. Wärmebildkamera für Messungen in der Elektronikindustrie	479
<b>5.9. Inspektion von Solaranlagen, Photovoltaik-Kraftwerken</b>	<b>480</b>
5.9.1. Messungen an Solarzellen - Allgemeinüberblick	480
5.9.2. Solarzellen, Solarmodule und Solarsysteme	481
5.9.2.1. Funktion der Solarzellen	481
5.9.2.2. Häufigste Arten der Solarzellen	481
5.9.2.3. Konventionelles Design von Solarmodulen	482
5.9.2.4. Weitere Elemente von Solaranlagen und -kraftwerken	484
5.9.3. Typische Fehler von Solaranlagen, Fehlerursachen	485
5.9.4. Prüfung von Solaranlagen durch Elektrolumineszenzaufnahmen	492
5.9.5. Prüfung von Solaranlagen anhand UV-Fluoreszenz	495
5.9.6. Thermografische Prüfung von Solaranlagen - wichtige Hinweise	496
5.9.7. Messschwierigkeiten und Lösungsvorschläge im Detail	497
5.9.8. Messtechnische Aspekte für fluggestützte Aufnahmen	500
5.9.9. Wärmebildkamera für Messungen an Solaranlagen	509

<b>5.10. Zerstörungsfreie Materialprüfung mittels aktiver Thermografie</b>	<b>510</b>
5.10.1. Typische Messanordnungen der aktiven Thermografie	510
5.10.2. Möglichkeiten des Energieeintrages / Objektorregung	511
5.10.3. Theoretischer Hintergrund der aktiven Thermografie	514
5.10.4. Typische mathematische Auswertemethoden	519
5.10.5. Anwendungen der aktiven Thermografie	523
5.10.6. Wärmebildkamera für aktive Thermografie	540
<b>5.11. Produktkontrolle, Prozessautomatisierung</b>	<b>541</b>
5.11.1. Überprüfung von Aluminiumzylinderköpfen	541
5.11.2. Überwachung von Drehrohröfen	542
5.11.3. Qualitätskontrolle von Laserschweißnähten	543
5.11.4. Kontrolle der Wärmedämmung an Personenwaggons	544
5.11.5. Brandschutz bei Müllbunkern und Biomassetransporten	545
5.11.6. Überwachung von Umspänn- und Verteilerstationen	547
5.11.7. Verpackungsindustrie - Überprüfung des Produktverschlusses	548
5.11.8. Verpackungsindustrie - Stückzahlkontrolle	548
5.11.9. Kontrolle von Sonnenkollektoren (thermischen Solarkollektoren)	550
<b>5.12. Forschung und Entwicklung</b>	<b>552</b>
5.12.1. Textilindustrielle Forschung und Entwicklung	552
5.12.2. Elektronische Produktentwicklung	554
5.12.3. Entwicklung medizinischer Spezialprodukte	556
5.12.4. Entwicklung von Produkten für extreme Umgebungen	557
5.12.5. Entwicklung und Prüfung von Bremsen und Kupplungen	558
5.12.6. Thermografische Prüfung von aktiven Kfz-Sicherheitssystemen	559
5.12.7. Überwachung / Optimierung von Sonderbearbeitungstechnologien	561
5.12.8. Biologische und medizinische Anwendungen der Thermografie	563
5.12.9. Umwelt- und Klimaforschung, Luftfahrzeug-gestützte Thermografie	577
<b>5.13. Anwendung der Infrarotdetektion ohne Temperaturmessung</b>	<b>581</b>
5.13.1. Rauchdetektion und Gasanalyse	581
5.13.2. Gasdetektion und Lecksuche an Industrie- und Klimaanlage	582
5.13.2.1. Leckprüfung mittels elektrochemischer oder UV/IR-Absorption messender Gasdetektoren	582
5.13.2.2. Gaslecksuche auf Basis von Ultraschalldetektion	583
5.13.2.3. Lecksuche und Gasdetektion mittels Thermografie	584
5.13.3. Wildzählung, Vogelbeobachtung	593
5.13.4. Archäologische Erschließungen	594
5.13.5. Schlechtwetter- und Nachtsichtsysteme für Verkehrsmittel	596
5.13.5.1. Erweiterte Flugsichtsysteme (EVS, EFVS)	596
5.13.5.2. Schlechtwetter- und Nachtsichtsysteme für Schiffe	598
5.13.5.3. Schlechtwetter- und Nachtsichtsysteme für Landfahrzeuge	599
5.13.6. Objektschutz, Grenzschutz, Polizeianwendungen	602
<b>6. Fachliche Aus- und Weiterbildung, Normen und Richtlinien</b>	<b>604</b>
<b>6.1. Grundlagen, Aus- und Weiterbildung</b>	<b>604</b>
6.1.1. Thermografie - auch ohne Grundlagenkenntnisse nutzbar?	604
6.1.2. Tausende „Thermografen“ ohne Ausbildung	606
6.1.3. Thermografische Qualifizierung und Weiterbildung	606
<b>6.2. Europäische Normen, Empfehlungen und Richtlinien</b>	<b>608</b>
6.2.1. Allgemeine - mit der Thermografie zusammenhängende - Normen	608
6.2.2. Normen für die Bewertung elektrotechnischer Geräte und Anlagen	608
6.2.3. Normen für die thermografische Bewertung von Gebäuden	609
6.2.4. Normen für die Thermografie in Maschinenbau und Industrieanlagen	609
6.2.5. Normen für die zerstörungsfreie Materialprüfung	609
6.2.6. Normen für die Personalqualifizierung	609
<b>Anhang</b>	<b>610</b>
Emissionsgradtabellen	610
Literaturverzeichnis	612
Verzeichnis der Abbildungen	641
Verzeichnis der Abbildungsquellen	681
Verzeichnis der Tabellen und derer Quellen	710
Verzeichnis der in den Gleichungen verwendeten Symbole	712
Sachwortverzeichnis	715