



Dissertation

Sebastian König

Korrektur der Ungleichförmigkeit von Infrarotkameras mittels der Datenreferenzmethode

ISSN 2941-1297
ISBN 978-3-944659-46-6

DOI 10.7795/110.20250521

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dissertationen

PTB-Diss-14

Braunschweig, Mai 2025

Sebastian König

**Korrektur der Ungleichförmigkeit
von Infrarotkameras mittels der
Datenreferenzmethode**

ISSN 2941-1297

ISBN 978-3-944659-46-6

DOI 10.7795/110.20250521

Empfohlene Zitierweise/recommended citation

König, S., 2025. *Korrektur der Ungleichförmigkeit von Infrarotkameran*
mittels der Datenreferenzmethode. Dissertation, Technische Universität
Dresden. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.
PTB-Bericht Diss-14. ISBN 978-3-944659-46-6.
Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/110.20250521>

Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de

Technische Universität Dresden

**Korrektur der Ungleichförmigkeit von Infrarotkameran
mittels der Datenreferenzmethode**

M. Eng.

Sebastian König

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Hagen Malberg
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach
Gutachter: Prof. Dr. Michael Vollmer
Weiteres Mitglied: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Walter Czarske

Tag der Einreichung: 30.10.2024
Tag der Verteidigung: 24.03.2025

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Herrn Dr. -Ing. Jörg Hollandt
Herrn Berndt Gutschwager
Herrn Dr. Ingmar Müller
Herrn Dr. Richard Dieter Taubert
Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Mir ist bekannt, dass die Nichteinhaltung dieser Erklärung zum nachträglichen Entzug des akademischen Grades Doktoringenieur führen kann.

Dresden, den 30.07.2024

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	VII
1. Einleitung	1
2. Ziele der Arbeit.....	3
3. Grundlagen.....	5
3.1. Wärmestrahlung.....	5
3.2. Strahlungsquellen.....	6
3.2.1. Hohlraumstrahler	6
3.2.2. Flächenstrahler	9
3.2.3. Zusammenfassung.....	12
3.3. Detektion von Infrarotstrahlung	13
3.4. Infrarotkameras.....	15
3.4.1. Infrarotoptiken	16
3.4.2. Infrarotdetektoren.....	17
3.5. Rauschgrößen.....	20
3.5.1. Thermisches Rauschen	20
3.5.2. Stromrauschen	20
3.5.3. Strahlungsrauschen	21
3.5.4. Temperaturfluktuationsrauschen.....	21
3.6. IR-Kamerakenngößen.....	22
3.6.1. Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera	22
3.6.2. Rauschäquivalente Temperaturdifferenz (NETD).....	23
3.6.3. Linearität.....	23
4. Die Datenreferenzmethode (DRM).....	24
4.1. Ungleichförmigkeit der Kameraelemente von IR-Sensorarrays.....	24
4.2. Stand der Technik bei Korrekturverfahren zur Ungleichförmigkeit.....	25
4.2.1. Referenzbasierte Methoden	26
4.2.2. Szenenbasierte Methoden.....	28
4.3. Grundlagen der Datenreferenzmethode	29
4.3.1. Mathematischer Algorithmus der DRM	31
4.3.2. DRM bei der Verwendung von Strahlungstemperaturen	35
4.4. Beispiel	37

4.4.1.	Theoretisches Beispiel: Strahler mit homogener Strahlungstemperatur und Kamera mit inhomogener Empfindlichkeit	37
4.4.2.	Praktisches Beispiel: Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahler und MCT-IR-Kamera	42
4.4.3.	Zusammenfassung	44
5.	Der Einfluss von Störgrößen auf das Ergebnis der DRM	45
5.1.	Festlegung der Simulationsparameter	45
5.2.	Einfluss der Positioniergenauigkeit	46
5.3.	Einfluss einer nicht-linearen Kamerakennlinie	54
5.4.	Einfluss des zeitlichen Rauschens in der Strahlungstemperaturmessung	57
5.4.1.	Auswirkungen von weißem zeitlichem Rauschen auf die DRM	57
5.4.2.	Simulationen zum weißen zeitlichen Rauschen im DRM-Algorithmus	59
5.4.3.	Methoden zur Reduktion der Auswirkung von weißem zeitlichem Rauschen	63
5.5.	Einfluss einer Drift in der Temperaturmessung	66
5.5.1.	Auswirkungen von Driftvorgängen auf die DRM	66
5.5.2.	Simulationen zu zeitlichen Driftvorgängen der Strahlungstemperatur	68
5.5.3.	Methoden zur Reduktion der Auswirkung von Driftprozessen	70
5.6.	Unsicherheitsbudget	73
6.	Praktische Anwendungen der Datenreferenzmethode	77
6.1.	Messplatz und IR-Kameras	77
6.1.1.	Kamera-Kalibriermessplatz	77
6.1.2.	IR-Kameras	79
6.2.	Messtechnische Charakterisierung der IR-Kameras	81
6.2.1.	Bestimmung der Ungleichförmigkeit	81
6.2.2.	Bestimmung der IETD	83
6.3.	Anwendung der DRM bei verschiedenen Kameratypen	85
6.3.1.	Gekühlte temperaturstabilisierte Kameras	85
6.3.2.	Ungekühlte nicht-temperaturstabilisierte Mikrobolometer-Kamera	88
6.4.	Anwendung der DRM bei ausgewählten Strahlungsquellen	94
6.4.1.	Homogenitätsbestimmung der Strahldichte einer großflächigen Ulbricht-Kugel	94
6.4.2.	Homogenitätsbestimmung der Strahlungstemperaturverteilung von Körpertemperaturreferenzstrahlern	101
6.4.3.	In-situ-Regelung eines Flächenstrahlers	103
7.	Zusammenfassung	106

Abkürzungsverzeichnis

CGPM	Conférence Générale des Poids et Measures
DRM	Datenreferenzmethode
FPA	Focal Plane Array
FPN	Fixed-Pattern-Noise
IETD	Inhomogenitätsäquivalente Temperaturdifferenz
ITS	Internationale Temperaturskala
ITS-90	Internationale Temperaturskala 1990
LAVRAS	Large Aperture Variable Radiance Source
MCT	Quecksilber-Cadmium-Tellurid (mercury cadmium telluride)
NETD	rauschäquivalente Temperaturdifferenz
NUC	Ungleichförmigkeitskorrektur
PRT	Platinwiderstandsthermometer (platinum resistance thermometer)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PTR	Physikalisch-Technische Reichsanstalt
ROI	Region of Interest
RT	Strahlungsthermometer (radiation thermometer)
SSE	Size of Source Effect
SPRT	Standard-Platinwiderstandsthermometer
TPW	Tripelpunkt von Wasser
TRT	Transfer-Strahlungsthermometer (transfer radiation thermometer)

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Variablen

Symbol	Beschreibung	Maßeinheit
A	strahlende Fläche	m^2
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
E	Bestrahlungsstärke	$W \cdot m^{-2}$
Δf	Bandbreite	Hz
I	elektrischer Strom	A
l	Länge	m
L	Strahldichte	$W (m^2 sr)^{-1}$
M	spezifische Ausstrahlung	$W (m^2 \mu m)^{-1}$
n	Brechungsindex	-
n_{Stoff}	Stoffmenge	mol
O	Ausgangssignal des Dunkelstroms	-
p	Druck	$N m^{-2}$
P_s	Strahlungsleistung	W
r	Radius/Abstand	m
R	Widerstand	Ω
S	Signal	-
T	absolute Temperatur	K
T_{BB}	Strahlertemperatur	K
T_{TPW}	Temperatur des Tripelpunkts von Wasser	K
T_U	Umgebungstemperatur	K
ΔT	Temperaturdifferenz	K
\tilde{U}_{BB}	Rauschspannung bei Umgebungstemperatur	V
\tilde{U}_R	Effektivwert der Sensorrauschspannung	V
$U_{R, \text{eff}}$	Rauschspannung im Leerlauf	V
ΔU_s	Signaldifferenz	V
V	Volumen	m^3
α	Winkel	$^\circ$
β	Winkel	$^\circ$
ε	Emissionsgrad	-
λ	Wellenlänge	μm
ν	Frequenz	Hz
Ω	Raumwinkel	$^\circ$
Φ	Strahlungsfluss	W
τ	Transmissionsgrad	-

Konstanten

Symbol	Beschreibung	
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum:	$c_0 = 299.792.458 \text{ m/s}$
c_1	Erste Strahlungskonstante:	$c_1 = 2 \pi h c_0^2 = 1,191042869(53) \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2 \text{ sr}^{-1}$
c_2	Zweite Strahlungskonstante:	$c_2 = h n c_0 k_B^{-1} = 1,4387752(25) \cdot 10^{-2} \text{ m K}$
e	Elementarladung:	$e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
h	Plancksches Wirkungsquantum:	$h = 6,626070040(81) \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
k_B	Boltzmann-Konstante:	$k_B = 1,38064903 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
R_m	Universelle Gaskonstante:	$R_m = 8,31446261815326 \text{ J/mol K}$
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante:	$\sigma = 5,670374419 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

1. Einleitung

Die Temperatur ist im Alltag, in der Wissenschaft und Technik sowie in der Meteorologie und der Medizin von fundamentaler Bedeutung, so dass sie neben der Zeit, die am häufigsten gemessene physikalische Größe ist [1]. Die quantitative Messung von Temperaturen und Temperaturdifferenzen gemäß der Internationalen Temperaturskala bezeichnet man als Thermometrie [2].

Man unterscheidet in der Thermometrie zwischen berührenden und berührungslosen Temperaturmessverfahren. Die berührungslose Temperaturmessung beruht auf der quantitativen Messung der vom Messobjekt ausgesandten Wärmestrahlung. Diese Wärmestrahlung wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz und dem materialabhängigen Emissionsgrad des Messobjektes bestimmt. Die berührungslose Temperaturmessung wird deshalb auch Strahlungsthermometrie genannt. Wesentliche Vorteile der Strahlungsthermometrie sind, dass sie mit typischen Messzeiten von wenigen Millisekunden sehr schnell ist und die Temperatur des Messobjekts praktisch nicht beeinflusst.

Die schnelle, genaue und kontinuierliche Überwachung und Steuerung der Betriebs- bzw. Prozesstemperatur hat bei vielen technischen Geräten und industriellen Produktionsprozessen entscheidende Bedeutung. Mit der Strahlungsthermometrie kann so an bewegten Objekten, zum Beispiel an Produktionserzeugnissen auf Förderbändern, die Temperatur überwacht und geregelt werden [3]. In der Erdfernerkundung erlaubt die Strahlungsthermometrie die großflächige Bestimmung von Land- und Wasseroberflächentemperaturen und leistet einen wichtigen Beitrag zur Klimaforschung [4]. In der Medizin hat das Ohrthermometer zur strahlungsthermometrischen Bestimmung der Körpertemperatur das langsamere Berührungsthermometer abgelöst.

In der technischen Anwendung der Strahlungsthermometrie unterscheidet man zwischen der punktförmigen, nicht orts aufgelösten Temperaturmessung mittels eines Strahlungsthermometers und der „flächenförmigen“, orts aufgelösten Temperaturmessung mittels einer Thermografiekamera. Sowohl Strahlungsthermometer als auch Thermografiekameras liefern dabei zeitaufgelöste Temperaturmessungen. Die erreichbare Zeitauflösung ergibt sich dabei insbesondere aus der für den Nachweis der Temperaturstrahlung verwendeten Detektortechnik. Es kommen sowohl thermische Detektoren als auch Halbleiterdetektoren zum Einsatz. Einen umfangreichen Überblick über den Aufbau, die Entwicklung und die Anwendung von Thermografiekameras gibt [5]. Aufbau und Wirkungsweise von thermischen Strahlungsempfängern, wie sie in Strahlungsthermometern und Thermografiekameras eingesetzt werden, werden in [6] umfassend erläutert.

In der industriellen Anwendung überwiegt zurzeit noch der Einsatz der kostengünstigeren Strahlungsthermometer zur Mess- und Regelungstechnik. In der Erdfernerkundung kommen bereits nahezu ausschließlich bildgebende Thermografiekameras zum Einsatz. In den letzten Jahren hat jedoch der Einsatz von Thermografiekameras auch im industriellen Bereich deutlich zugenommen, da diese durch die Entwicklung des Mikrobolometerarrays als Strahlungsempfänger in ihrem Preis/Leistungs-Verhältnis eine sehr deutliche Verbesserung erfahren haben und diese Entwicklung sich auch noch weiter fortsetzt.

In den 60er und 70er Jahren wurden die ersten Infrarotdetektoren in mechanisch-optisch scannenden Thermografiekamerasystemen eingesetzt [7]. Dabei verwendete man Einzel- oder Zeilendetektoren

verwendet. Die einfallende Wärmestrahlung wurde über einen oder zwei Infrarotspiegel auf den oder die Detektoren gelenkt. Durch eine Drehung des Spiegels konnte eine Szene abgescannt werden und die Teilbilder wurden zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Dieses Prinzip war jedoch langsam und verschleißanfällig. Deshalb wurden in den 80er Jahren durch Materialverbesserungen und leistungsstärkere Rechentechnik 2-dimensionale, starrende Infrarot-Detektormatrizen (engl: Focal Plane Arrays - FPAs) produziert [7]. Durch den Einsatz von FPAs war kein mechanisch bewegter Spiegel mehr nötig und die betrachtete Szene konnte direkt abgebildet werden.

Es werden zwei Arten von Infrarot-Detektoren unterschieden: thermische Detektoren und Photonendetektoren (Halbleiterdetektoren). Bei thermischen Detektoren führt der detektierte Strahlungsfluss zu einer Temperaturänderung des Detektormaterials, welches in Abhängigkeit vom Detektortyp über verschiedene physikalische Prozesse in ein Spannungssignal umgewandelt wird. Bei den Photonendetektoren generiert ein einfallendes Photon freie Ladungsträger, welche direkt gemessen werden können. Im Gegensatz zu den thermischen Detektoren, welche in der Regel ohne Kühlung auskommen, müssen Photonendetektoren für ein gutes Signal/Rausch-Verhältnis meist gekühlt werden, was zu komplexeren Kamerasystemen und höheren Herstellungskosten führt. Jedoch wurde ungekühlten Infrarot-FPAs vor 1992 kaum Beachtung geschenkt. Sie kamen nur in Spezialanwendungen zum Einsatz. Die Defektivität und damit die Temporauflösung der ungekühlten 2-dimensionalen Detektoren war unzureichend und die Abmessungen der Detektoren zu groß. Mit den ungekühlten FPAs von Texas Instruments [8] und Honeywell [9] im Jahr 1992 ändert sich dieser Sachverhalt grundlegend. Sie entwickelten einen leistungsstarken Detektortyp mit einer verbesserten Auflösung und Empfindlichkeit. Seitdem werden ungekühlte Infrarot-FPAs stetig weiterentwickelt, indem z.B. der Pixelabstand verringert und die Zahl der Pixel auf dem Array erhöht wird. Eine Marktanalyse im Jahr 2016 ergab, dass der weltweite Markt für ungekühlte Thermografiekameras von 0,68 Mio. Kameras im Jahr 2016 auf 6,4 Mio. Kameras im Jahr 2025 steigen wird [10].

Die verbesserte Verfügbarkeit und die geringeren Kosten von IR-Kameras eröffnen völlig neue Anwendungsbereiche, zum Beispiel in Kraftfahrzeugen zur Unterstützung der Nachtsicht des Fahrers und dem autonomen Fahren, zur Überwachung von sicherheitsrelevanten Bereichen, zur Körpertemperaturkontrolle auf Flughäfen, zur Integration in Mobiltelefonen und zur Hotspot-Erkennung in elektrischen Schaltschränken [11].

Ein wesentlicher Aspekt in der zukünftigen Anwendung von Thermografiekameras ist, dass sie sich zunehmend von einem rein bildgebenden System zu einem messenden System weiterentwickelt haben. Mit der technischen Weiterentwicklung von Thermografiekameras sind auch ungekühlte Kameras, basierend auf Mikrobolometerarrays als verwendete FPAs, in der Lage, ortsaufgelöste Temperaturmessungen quantitativ durchzuführen. Das bedeutet, dass man für das erhaltene Messergebnis einen Vertrauensbereich angeben kann, der auf einer Unsicherheitsbetrachtung des Messgerätes und des Messverfahrens beruht. Die dafür unbedingt notwendige radiometrische Charakterisierung der Kamera ist jedoch ungleich komplexer als bei einem punktförmig messenden Strahlungsthermometer [12]. Die vorliegende Arbeit soll dazu einen Beitrag leisten.

2. Ziele der Arbeit

Bei der berührungslosen Temperaturmessung gewinnen bildgebende Thermografiekameras gegenüber den punktförmig messenden Strahlungsthermometern zunehmend an Bedeutung, da sie immer leistungsfähiger und preiswerter werden. Während Thermografiekameras zurzeit noch überwiegend zur qualitativen Temperaturmessung verwendet werden, z.B. bei Wartungs-, Überwachungs-, Sicherheits- und Energieeinsparungsanwendungen, ist ein klarer Trend erkennbar, dass sie zunehmend auch zur quantitativen Überwachung und Steuerung der Temperaturregelung in industriellen Produktionsprozessen eingesetzt werden. Dafür ist eine umfassende messtechnische Charakterisierung und radiometrische Kalibrierung von Thermografiekameras die notwendige und entscheidende Grundlage. Sie ist bei Thermografiekameras weitaus aufwändiger als bei punktförmig messenden Strahlungsthermometern.

Die für die radiometrische Kalibrierung von Thermografiekameras verwendete Messtechnik basiert ganz wesentlich auf großflächigen Temperaturstrahlern mit bekannter Strahlungstemperatur [13]. Die zeitliche Stabilität und räumliche Homogenität dieser Strahler, die als Hohlraum- oder Flächenstrahler realisiert werden, bestimmen wesentlich die erreichbare Genauigkeit und den zeitlichen Aufwand des Kalibrierprozesses.

Mit der Datenreferenzmethode [14] [15] wird in dieser Arbeit ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, Thermografiekameras auch an inhomogenen Strahlungsquellen zu kalibrieren, so dass die Anforderungen an den verwendeten Kalibrierstrahler deutlich abnehmen können, ohne dass sich die erreichbare Unsicherheit der Kalibrierung damit verschlechtert.

Ziel dieser Arbeit ist eine umfassende quantitative Untersuchung und Weiterentwicklung der Datenreferenzmethode bezüglich der damit erreichbaren Kalibrierunsicherheit von Thermografiekameras. Dazu werden sowohl gekühlte als auch ungekühlte Thermografiekameras untersucht, um die Möglichkeiten und Grenzen der Datenreferenzmethode an verschiedenen Kameratypen in verschiedenen Spektral- und Temperaturbereichen zu quantifizieren. Der wesentliche Beitrag der Datenreferenzmethode im Kalibrierprozess ist die verbesserte Bestimmung der Ungleichförmigkeit des Ansprechverhaltens der Thermografiekamera über das beobachtete Bildfeld nahezu unabhängig von der Qualität der räumlichen Temperaturhomogenität des verwendeten Kalibrierstrahlers. Für ein besseres theoretisches Verständnis des Kalibrierprozesses mittels der Datenreferenzmethode sollen Modelle zur Fehlerfortpflanzung, für die auf die verschiedenen Kameratypen angepassten Ungleichförmigkeitskorrekturen entwickelt werden.

Die PTB betreibt einen Messplatz zur messtechnischen Charakterisierung und Kalibrierung von Thermografiekameras [16] [17]. Dieser entspricht im vollen Umfang den Anforderungen der Technischen Richtlinien [18], [19] und [20] und ermöglicht eine streng auf die Internationale Temperaturskala von 1990 (ITS-90) rückführbare Kalibrierung von Thermografiekameras. In Vorarbeiten wurde dieser Messplatz zur automatisierten Anwendung der Datenreferenzmethode bei der messtechnischen Charakterisierung von Thermografiekameras erweitert [21] [22]. Im Rahmen dieser Arbeit soll mit diesem Messplatz an den oben genannten Thermografiekameras eine Bestimmung aller relevanten technischen Spezifikationen für die quantitative Temperaturmessung gemäß den Technischen Richtlinien des VDI/VDE unter Anwendung der

Datenreferenzmethode stattfinden. Die durchgeführten Arbeiten erfolgen im engen Austausch mit den VDI/VDE-Fachausschüssen für „Strahlungsthermometrie“ und „Temperaturmessung mit Wärmebildkameras“ und die dabei erzielten Ergebnisse fließen in die Technischen Richtlinien VDI/VDE 5585 ein. Insgesamt soll mit der hier durchgeführten Arbeit eine umfassende quantitative Bewertung des Nutzens der Datenreferenzmethode für die messtechnische Charakterisierung und Kalibrierung von Thermografiekameras erfolgen.

3. Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die berührungslose Messung von Oberflächentemperaturen dargestellt. Dabei werden die relevanten physikalische Größen und Zusammenhänge sowie wichtige Geräte und Apparaturen erläutert.

3.1. Wärmestrahlung

Jeder Körper, dessen Temperatur höher als die des absoluten Nullpunkts ist, emittiert Wärmestrahlung. Die Entstehung dieser elektromagnetischen Strahlung ist auf entgegengesetzt geladene Teilchen, die sich relativ zueinander bewegen, sogenannte schwingende Dipole, zurückzuführen. Unter idealisierten Bedingungen (Schwarzer Körper) lässt sich die spektrale spezifische Ausstrahlung $M_\lambda(\lambda)$ einer Oberfläche bei einer absoluten Temperatur T , emittiert bei einer Wellenlänge λ , mit dem Planckschen Strahlungsgesetz beschreiben:

$$M_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}, \quad (3.1)$$

wobei $M_\lambda(\lambda)$ die spektrale spezifische Ausstrahlung, c_1 die erste Strahlungskonstante, c_2 die zweite Strahlungskonstante, λ die Wellenlänge und T die absolute Temperatur ist (Definition c_1 und c_2 auf Seite VII). Abbildung 3.1 veranschaulicht das Plancksche Strahlungsgesetz bei unterschiedlichen Temperaturen.

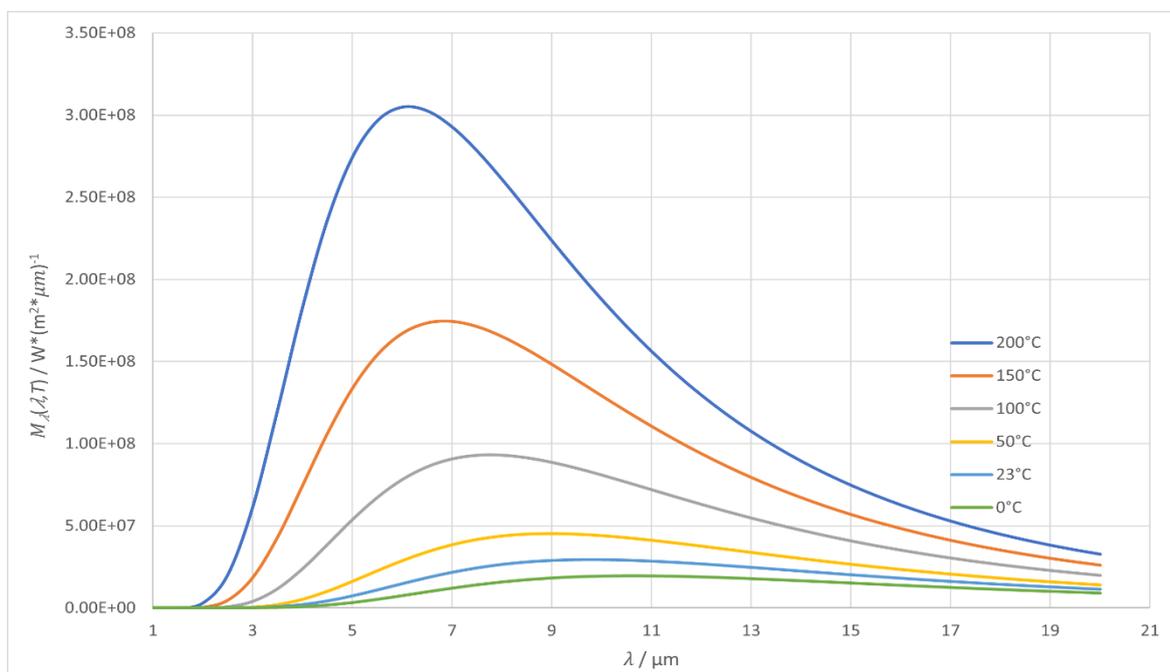


Abbildung 3.1: Wellenlängenabhängigkeit der spektralen spezifischen Ausstrahlung $M_\lambda(\lambda)$ für den gesamten Halbraum und unterschiedliche Oberflächentemperaturen nach dem Planckschen Strahlungsgesetz gemäß Gl. (3.1).

3.2. Strahlungsquellen

Kirchhoff nahm an, dass die Fähigkeit eines Körpers, Strahlung zu absorbieren gleich seiner Fähigkeit ist, Strahlung zu emittieren, solange der Körper sich im thermischen Gleichgewicht befindet. Um die Fähigkeit eines Körpers, Wärmestrahlung zu emittieren, zu quantifizieren, wurde das Konzept des Emissionsvermögens eingeführt. Das Emissionsvermögen wird durch den Emissionsgrad ε ausgedrückt und beschreibt die Fähigkeit einer realen Oberfläche, Wärmestrahlung zu emittieren, im Verhältnis zu einem idealen schwarzen Körper. Somit ist der maximale Wert, den der Emissionsgrad einer realen Oberfläche erreichen kann, eins. Diesem Wert wird sich zwar durch die stetige Weiterentwicklung von technischen Wärmestrahlungsquellen angenähert, jedoch kann er in der Praxis nicht vollständig erreicht werden. Es gibt verschiedene Größen, die den Emissionsgrad eines Materials beeinflussen. Unter Anderem hängt er von der Wellenlänge, der Oberflächentemperatur, der Oberflächenrauigkeit und dem Beobachtungswinkel ab. Laut dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz ist der Reflektionsgrad ρ einer undurchsichtigen strahlenden Fläche:

$$\rho = 1 - \varepsilon. \quad (3.2)$$

Ein Körper emittiert also nicht nur Wärmestrahlung, sondern reflektiert zusätzlich noch Strahlung, die auf ihn trifft. An Gleichung (3.2) ist zu erkennen, dass der Einfluss der reflektierten Umgebungsstrahlung mit zunehmenden Emissionsgrad eine kleiner werdende Rolle spielt. Dies ist ein Grund, warum Strahlungsquellen mit möglichst hohem Emissionsgrad in der Strahlungsthermometrie eingesetzt werden [5].

In der Strahlungsthermometrie werden überwiegend zwei Gruppen von technischen Strahlungsquellen eingesetzt. Zum einen die Hohlraumstrahler, die in der Regel einen hohen Emissionsgrad von deutlich über 0,9 bis zu 0,999 besitzen, jedoch durch eine relativ kleine Apertur (i. d. R. < 80 mm) begrenzt sind. Die zweite Gruppe sind Flächenstrahler, die sich durch eine große strahlende Fläche auszeichnen, deren Emissionsgrad jedoch geringer als der von Hohlraumstrahlern ist. Die Variation des Emissionsgrads von Flächenstrahlern ist groß und reicht von 0,9 bis hin zu 0,99. Es gibt noch weitere Typen von Wärmestrahlern wie Wolfram-Bandlampen, die in der Strahlungsthermometrie eingesetzt werden. Wolfram-Bandlampen werden insbesondere in der Hochtemperatur-Strahlungsthermometrie verwendet. In den folgenden Abschnitten werden deshalb nur die beiden Hauptgruppen, Hohlraumstrahler und Flächenstrahler, näher erläutert.

3.2.1. Hohlraumstrahler

Im Temperaturbereich von ca. 200 K bis 1235 K sind Wärmerohr-Hohlraumstrahler sehr gut geeignete Schwarzkörper-Strahlungsquellen. Der Hohlraum wird von einem doppelwandigen Rohr gebildet, dessen verschlossener Innenraum mit einer kleinen Menge eines Arbeitsmediums gefüllt ist. Dieses Arbeitsmedium und der Druck, dem das Wärmerohr standhält, bestimmen den nutzbaren Temperaturbereich des Wärmerohr-Hohlraumstrahlers. Die eingestellte Temperatur und der damit verbundene Gasdruck im Wärmerohr führen dazu, dass sich die flüssige und die gasförmige Phase des Arbeitsmediums im Gleichgewicht befinden. Die Aufrechterhaltung dieses Gleichgewichtszustands führt zu einer homogenen Temperaturverteilung über das gesamte Wärmerohr, indem an einer etwas heißeren Stelle im Hohlraum das flüssige Arbeitsmedium verstärkt verdampft und somit, aufgrund der benötigten Verdampfungswärme, die Temperatur an dieser Stelle sinkt. An etwas kälteren Stellen kondensiert das Arbeitsmedium, welches sich in

der gasförmigen Phase befindet, und erhöht somit dort die Temperatur durch die freiwerdende Kondensationswärme [28]. Der Wärmerohreffekt umfasst einen begrenzten Temperaturbereich, welcher vom Druck im Rohr und vom Siedepunkt des jeweiligen Arbeitsmediums abhängig ist. Mit Hilfe des Wärmerohreffekts lässt sich auch in ausgedehnten Hohlraumstrahlern mit großer Apertur (typisch bis 60 mm) eine sehr gute Temperaturhomogenität erzielen. Wärmerohr-Hohlraumstrahler, deren Temperatur mit Platinwiderstandsthermometern bestimmt und geregelt wird, gehören damit zu den besten Schwarzkörperstrahlern, die sich technisch realisieren lassen. Sie werden an metrologischen Staatsinstituten für die Darstellung und Weitergabe der Strahlungstemperatur verwendet-

Der Temperaturbereich von 200 K bis 1235 K wird meist mit vier verschiedenen Arbeitsmedien realisiert:

- Im Bereich von 200 K bis 320 K kommt in der PTB Ammoniak als Arbeitsmedium zum Einsatz. Die Innenseiten des Wärmerohrs sind mit einer speziellen Beschichtung bedeckt, welche einen Emissionsgrad von $> 0,95$ besitzt [29]. Um die Bildung von Kondensation zu vermeiden, muss der Hohlraum unterhalb vom Taupunkt mit trockenem Stickstoff gespült werden.
- Im Temperaturbereich von 320 K bis 540 K wird Wasser als Wärmerohrmedium verwendet. Der Emissionsgrad der Wandbeschichtung liegt in diesem Temperaturbereich bei etwa 0,9.
- Den Temperaturbereich von 540 K bis 920 K deckt das Arbeitsmedium Cäsium und von 770 K bis 1235 K das Arbeitsmedium Natrium ab.

Aufgrund der hohen Temperaturen bestehen die Innenwände dieser Wärmerohre aus oxidiertem Inconel, das einen Emissionsgrad von etwa 0,8 besitzt. In Tabelle 3.1 sind die Wärmerohre, Temperaturbereiche, Wandemissionsgrade und Gesamtemissionsgrade der am IR-Kamera-Messplatz der PTB Berlin verwendeten Hohlraumstrahler zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Temperaturbereiche, Wandemissionsgrade und Gesamtemissionsgrade der am IR-Kamera-Messplatz der PTB Berlin verwendeten Wärmerohr-Hohlraumstrahler.

Hohlraumstrahler-Typ	Temperaturbereich in °C	Durchmesser der Blende in mm	ϵ_{Wand}	$\epsilon_{\text{Hohlraum}} (k = 1)$
Ammoniak-Wärmerohr	- 60 bis 50	75	$0,939 \pm 0,015$	$0,99965 \pm 0,00023$
Wasser-Wärmerohr	50 bis 270	60	$0,88 \pm 0,04$	$0,99973 \pm 0,00006$
Cäsium-Wärmerohr	270 bis 650	40	$0,70 \pm 0,009$	$0,99922 \pm 0,00017$
Natrium-Wärmerohr	500 bis 962	40	$0,72 \pm 0,009$	$0,99930 \pm 0,00015$

Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch die Ausführung eines Wärmerohrstrahlers der PTB Berlin. Das Wärmerohr mit einem kegelförmigen Hohlraumboden von 120° Öffnungswinkel liegt in einem Arbeitsrohr, welches sich wiederum in einem Rohrofen mit einer bifilaren Heizwicklung und einer störstrahlungsarmen Gleichstrom-Leistungsversorgung befindet. Der Mantel des Rohrofens ist ein doppelwandiger, wassergekühlter Edelmantel. Die bifilare Heizwicklung beheizt das Arbeitsrohr und ist durch eine Keramik-Isolation vom Edelmantel getrennt. Die Temperatur der Heizwicklung wird durch einen separaten Sensor auf eine zeitliche Stabilität von weniger als 0,1 K geregelt. Die Temperatur des Wärmerohres wird mit einem Standard-Platinwiderstandsthermometer (SPRT) gemessen und in einer den Sollwert der Heizwicklung beeinflussenden Schleife geregelt. Das SPRT befindet sich unmittelbar unterhalb des Bodens des Hohlraumstrahlers und wird

durch das Wärmerohr an den Boden herangeführt. Die Kombination aus Regelkreis und hoher thermischer Masse ermöglicht eine zeitliche Temperaturstabilität von bis zu 10 mK. Zur Erhöhung des Gesamtemissionsgrads des Hohlraums und zur Verminderung von Konvektion kann die Öffnung des Wärmerohres mit kreisförmigen Blenden kleineren Durchmessers versehen werden.

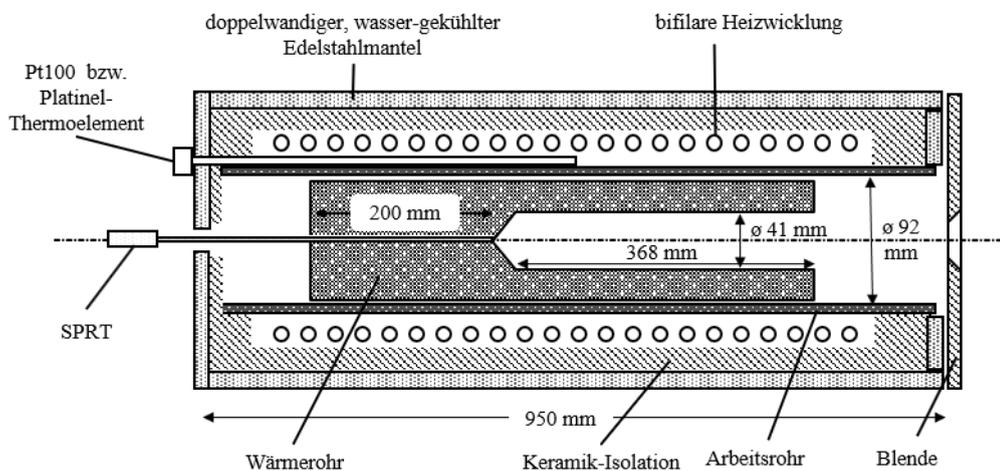


Abbildung 3.2: Querschnitt eines Wärmerohr-Hohlraumstahlers der PTB Berlin mit einem SPRT zur Messung der Hohlraumtemperatur [17].

Ein wesentlicher Vorteil der Wärmerohr-Hohlraumstahler ist, dass sehr hohe Emissionsgrade erzielt werden (Tabelle 3.1) und eine sehr hohe Isothermie im Innern des Hohlraums erreicht wird. Die Bestimmung des effektiven Emissionsgrades eines Wärmerohr-Hohlraumstrahlers erfolgt bei Kenntnis des Wandemissionsgrads über mathematische Modelle. In diesen Modellen kommen meist Monte-Carlo-Simulationen oder die Mehrfachreflexionsmethode zur Anwendung [30]. Eine einfache Abschätzung zur Bestimmung des Emissionsgrads eines Hohlraumstrahlers wurde von Bauer und Bischoff aufgestellt [27]. Der effektive Emissionsgrad eines zylindrischen Hohlraumstrahlers mit flachem Boden hängt dabei von dessen Geometrie ab:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = 1 - \frac{1 - \varepsilon_{\text{Wand}}}{\varepsilon_{\text{Wand}}} \frac{1}{\left(1 + \frac{l^2}{r^2}\right)} \quad (3.3)$$

In Gleichung (3.3) steht $\varepsilon_{\text{Wand}}$ für den Emissionsgrad der Wärmerohrwand, l für die Länge und r für den Radius des Hohlraumstrahlers. In Abbildung 3.3 wird die Veränderung des effektiven Emissionsgrads durch geometrische Effekte und für unterschiedliche Wandemissionsgrade nach Gl. (3.3) dargestellt. Dabei wird nur das Verhältnis zwischen der Länge und dem Radius des zylindrischen Hohlraums des Strahlers berücksichtigt. Der Boden des Hohlraums ist flach. Es zeigt sich, dass bei höheren Verhältnissen von l/r der Wandemissionsgrad eine zunehmend kleinere Rolle spielt.

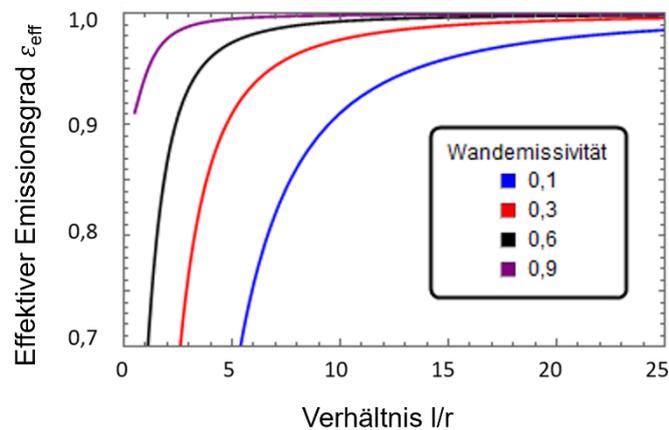


Abbildung 3.3: Veränderung des effektiven Emissionsgrads durch geometrische Effekte nach Bauer und Bischoff gemäß Gl. (3.3) für eine Wandemissivität.

3.2.2. Flächenstrahler

Flächenstrahler besitzen im Vergleich zu Hohlraumstrahlern ein geringeres Emissionsvermögen und ihre Temperaturhomogenität über die gesamte strahlende Fläche ist im Allgemeinen ebenfalls geringer. Dafür lassen sich mit Flächenstrahlern größere strahlende Flächen erzeugen, als es die Aperturen von Hohlraumstrahlern ermöglichen. Das Emissionsvermögen eines Flächenstrahlers wird durch das lokale Emissionsvermögen der Oberfläche der strahlenden Fläche bestimmt. Deshalb wird die Oberfläche im Allgemeinen mit einer Farbe mit hohem Emissionsgrad beschichtet. Um den Emissionsgrad weiter zu erhöhen, kann die Oberfläche der strahlenden Fläche zusätzlich strukturiert werden. So können Emissionsgrade oberhalb von 0,98 erreicht werden.

In Abbildung 3.4 ist beispielhaft für das oben Gesagte der jeweilige effektive Emissionsgrad eines Flächenstrahlers berechnet. Dabei wurde eine strahlende Fläche von 140 mm im Durchmesser angenommen. Beschichtet ist die Oberfläche mit der Farbe Nextel. Die Oberflächenstruktur des Strahlers wurde für drei unterschiedliche Fälle simuliert. Im ersten Fall ist die Oberfläche unstrukturiert und lediglich mit der Farbe Nextel beschichtet. In den anderen beiden Fällen ist die Oberfläche zusätzlich mit 5 mm hohen Kegeln strukturiert. Es handelt sich dabei einmal um Kegel mit einem Winkel von 30° und einmal um Kegel mit einem Winkel von 60°. Zur Vereinfachung wird die Temperaturverteilung über die Oberfläche und innerhalb der Kegel als isotherm betrachtet. Aufgetragen ist für alle drei Fälle der effektive Emissionsgrad des Strahlers über die Wellenlänge im Bereich von 3 μm bis 14 μm . Es ist zu erkennen, dass der effektive Emissionsgrad des Flächenstrahlers durch einfache Strukturierung deutlich erhöht werden kann.

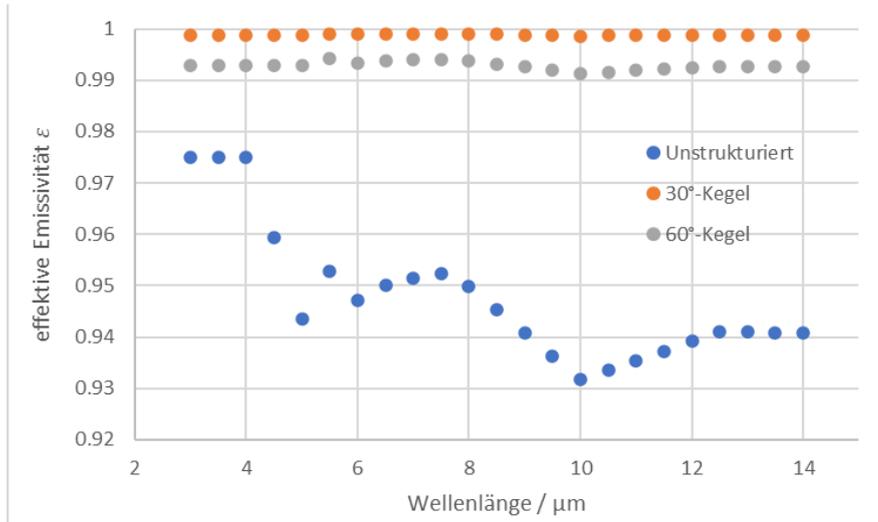


Abbildung 3.4: Berechnete effektive Emissivität eines Flächenstrahlers für verschiedene, mit Nextel beschichtete Oberflächen. Simuliert wurde die Messung mit einem Strahlungsthermometer mit einem Öffnungswinkel von 5° aus einer Entfernung von 406 mm, bezogen auf die Oberfläche des Strahlers.

Abbildung 3.5 zeigt die aus dem unterschiedlichen Emissionsgrad resultierenden Temperaturunterschiede in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur bei einer Umgebungstemperatur von 23°C und einer Wellenlänge von $10\ \mu\text{m}$. Es werden die unstrukturierte Oberfläche und die Oberfläche mit 30° -Kegeln verglichen. Auch in dieser Darstellung der resultierenden Temperaturdifferenzen zeigen sich die deutlichen Vorteile einer strukturierten gegenüber einer unstrukturierten Strahleroberfläche. In beiden Darstellungen wird die Messung mit einem Strahlungsthermometer (Radiation Thermometer (RT)) mit einem Öffnungswinkel von 5° aus einer Entfernung von 406 mm, bezogen auf die Oberfläche des Strahlers, simuliert.

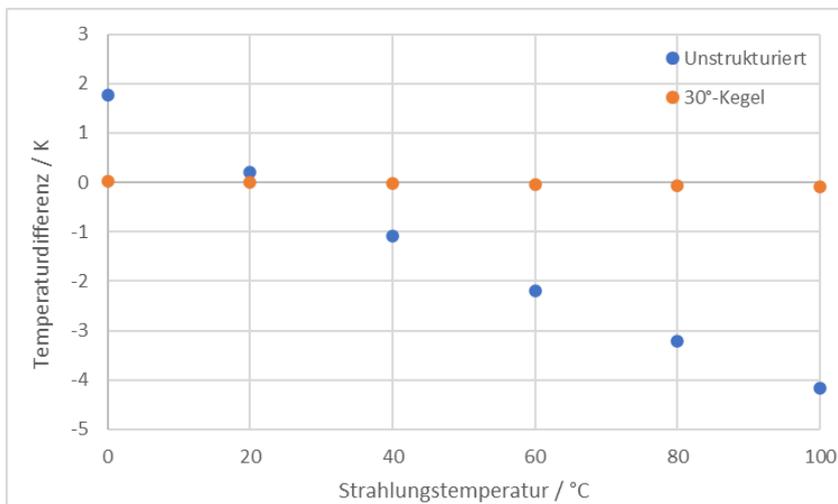


Abbildung 3.5: Aus dem Emissionsgradunterschied berechnete Temperaturdifferenzen der Strahlungstemperatur bei unterschiedlichen Oberflächentemperaturen eines mit Nextel beschichteten Flächenstrahlers mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturierungen bei $10\ \mu\text{m}$ Wellenlänge und einer Umgebungstemperatur von 23°C . Simuliert wurde für die Berechnung die Messung mit einem Strahlungsthermometer mit einem Öffnungswinkel von 5° aus einer Entfernung von 406 mm, bezogen auf die Oberfläche des Strahlers.

Das spektrale Emissionsvermögen eines Flächenstrahlers zeigt im Allgemeinen Variationen als Funktion der Wellenlänge, die durch den spektralen Gang des Emissionsgrads der Oberflächenbeschichtung des Strahlers verursacht werden, und der Position auf seiner emittierenden Oberfläche, die im Allgemeinen durch Temperaturvariationen über die Strahleroberfläche verursacht werden. Solange die Strahlungstemperatur nahe der Umgebungstemperatur liegt, können IR-Kameras oft zufriedenstellend unter Verwendung eines Flächenstrahlers kalibriert werden, da in diesem Fall die Strahlungstemperatur wenig durch Konvektions- und Wärmeverlusteffekte beeinflusst wird und die Reflektion der Raumtemperaturstrahlung Emissionsgrade von deutlich kleiner als eins teilweise kompensieren kann. Besonders für die wichtige Ermittlung der Ungleichförmigkeit im Ansprechverhalten eines IR-Kamerasystems und der daraus resultierenden Korrektur der Ungleichförmigkeit eines Bildes ist ein Flächenstrahler, welcher das gesamte Gesichtsfeld der IR-Kamera ausfüllt, wichtig.

Die Strahlungstemperatur eines Flächenstrahlers weist auf im Allgemeinen für größere Winkel zur Flächennormalen eine signifikante Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel [31]. Abbildung 3.6 zeigt die Winkelabhängigkeit des gerichteten Emissionsvermögens einer mit Nextel beschichteten Oberfläche als Funktion des Beobachtungswinkels bei einer Wellenlänge von $10\ \mu\text{m}$, gemessen am Emissionsgradmessplatz der PTB [32]. Ein Winkel von 0° repräsentiert den senkrechten Beobachtungsfall zur Oberfläche. Diese Variation des Emissionsgrads aufgrund des Beobachtungswinkels wirkt sich unmittelbar auf die gemessene Strahlungstemperatur aus. Abbildung 3.7 zeigt diese Strahlungstemperaturunterschiede auf Grund des Beobachtungswinkels bei einer Oberflächentemperatur von $100\ ^\circ\text{C}$ und einer Umgebungstemperatur von $23\ ^\circ\text{C}$. Diese Darstellung sollte unter dem Aspekt betrachtet werden, dass eine Aufnahme einer IR-Kamera aus Strahlen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln besteht. In beiden Darstellungen wird die Messung mit einem Strahlungsthermometer mit einem Öffnungswinkel von 5° aus einer Entfernung von $406\ \text{mm}$, bezogen auf die Oberfläche des Strahlers, durchgeführt.

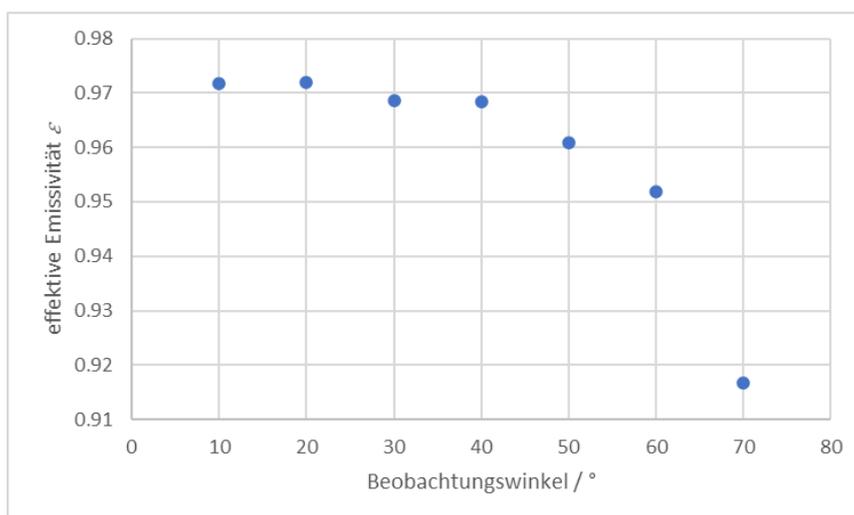


Abbildung 3.6: Berechnete effektive Emissivität eines Flächenstrahlers unter Beobachtungswinkeln von 10° bis 70° zur Flächennormale einer mit Nextel beschichteten Oberfläche bei einer Wellenlänge von $10\ \mu\text{m}$.

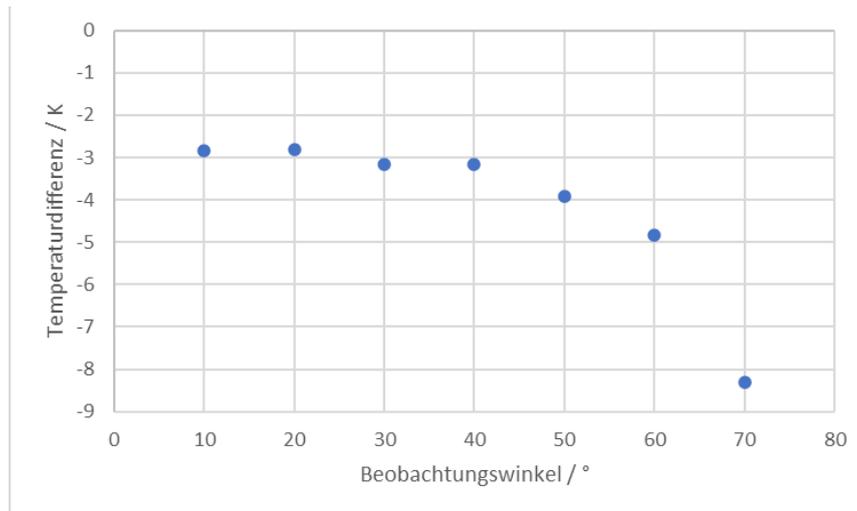


Abbildung 3.7: Berechnete Strahlungstemperaturdifferenz eines Flächenstrahlers unter Beobachtungswinkeln von 10° bis 70° zur Flächennormale einer mit Nextel beschichteter Oberfläche bei einer Wellenlänge von $10\ \mu\text{m}$, einer Oberflächentemperatur von $100\ ^\circ\text{C}$ und einer Umgebungstemperatur von $23\ ^\circ\text{C}$.

3.2.3. Zusammenfassung

Zur Charakterisierung und Kalibrierung von IR-Kamera werden sowohl Wärmerohr-Hohlraumstrahler als auch Flächenstrahler eingesetzt. Wärmerohr-Hohlraumstrahler sind sehr hochwertige und zeitlich stabile Infrarotstrahlungsquellen mit sehr kleinen Unsicherheiten in der Darstellung der Strahlungstemperatur mit Bezug auf die Internationale Temperaturskala (ITS-90). Ihre Emissionsgrade liegt meist sehr nahe bei eins. Ein Nachteil dieser Strahlertypen sind die, in der Praxis realisierbaren, relativ geringen Aperturgrößen von typischerweise kleiner als 60 mm Durchmesser.

Bei der Kalibrierung und Charakterisierung einer IR-Kamera kann mit ihnen im Allgemeinen nicht das gesamte Gesichtsfeld gleichzeitig ausgeleuchtet werden. Das große Gesichtsfeld einer IR-Kamera benötigt eine Strahlungsquelle mit ausreichend großer strahlender Fläche. Flächenstrahler besitzen im Allgemeinen die benötigt großen emittierenden Flächen. Der Emissionsgrad und die zeitliche Stabilität der Strahlungstemperatur von Flächenstrahlern ist in der Regel jedoch geringer als bei Wärmerohr-Hohlraumstrahlern. Die räumliche Homogenität der lokalen Strahlungstemperatur eines Flächenstrahlers nimmt mit steigender Temperaturdifferenz zur Raumtemperatur ab. Verwendet man einen Flächenstrahler zur Bestimmung und Korrektur der Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera, so ist die Qualität der Korrektur immer begrenzt durch die Homogenität dieses Flächenstrahlers. Methoden, die eine von der Strahlungstemperaturhomogenität eines Flächenstrahlers unabhängige Bestimmung und Korrektur der Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera ermöglichen, sind deshalb sehr wichtig für die hochwertige metrologische Charakterisierung von IR-Kameras. Die in dieser Arbeit untersuchte Datenreferenzmethode ist eine dieser Methoden.

3.3. Detektion von Infrarotstrahlung

Die vom Objekt ausgesandte Wärmestrahlung wird in den meisten Anwendungsfällen der berührungslosen Temperaturmessung in einer atmosphärischen Umgebung detektiert. In der industriellen Anwendung der Strahlungsthermometrie erfolgt die Detektion der Wärmestrahlung aber auch unter Vakuum oder speziellen Schutzgasen. Die in der Luft enthaltenen Gase absorbieren die Infrarotstrahlung teilweise und wirken dabei wie ein Filter. Besonders stark absorbierende Bestandteile der Luft sind Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Distickstoffmonoxid. Ihr Absorptionsverhalten ist deutlich wellenlängenabhängig und somit ergeben sich Spektralbereiche, in denen die Absorption der Luft für infrarote Strahlung besonders hoch ist, und Bereiche, in denen die Transmission der Luft besonders hoch ist. Die besonders gut transmittierenden Spektralbereiche der Atmosphäre werden „atmosphärischen Fenster“ genannt.

Die Entwicklung von Detektormaterialien hat sich insbesondere auf die Wellenlängenbereiche der drei atmosphärischen Fenster von 1,2 μm bis 2,4 μm (kurzwelliges Infrarot -NIR), von 3 μm bis 5 μm (mittleres Infrarot - MIR) und von 8 μm bis 14 μm (langwelliges Infrarot -LIR) konzentriert. Die atmosphärische Transmission ist in diesen Bereichen am höchsten. Abbildung 3.8 zeigt die atmosphärischen Fenster im Wellenlängenbereich von 1 μm bis 15 μm . Des Weiteren liegt das Emissionsmaximum eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur $T \approx 300\text{ K}$ bei einer Wellenlänge $\lambda \approx 10\ \mu\text{m}$, was diesen Bereich für viele Anwendungen besonders attraktiv macht. Im Umkehrschluss kann die Absorptionsfähigkeit von Gasen genutzt werden, um diese in der Luft mit speziellen Spektrometern zu detektieren.

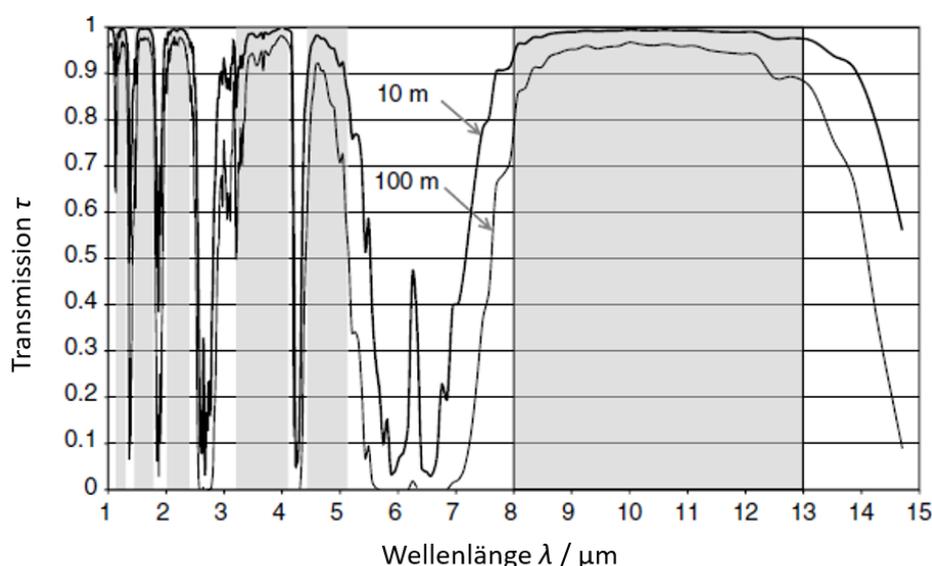


Abbildung 3.8: Atmosphärische Fenster für Infrarotstrahlung im Bereich von 0 μm bis 15 μm nach [13].

Eine strahlende Fläche A emittiert einen Strahlungsfluss Φ in den Raumwinkel Ω und kann somit durch die spektrale Strahldichte L_λ beschrieben werden [13]

$$L_\lambda(\lambda, T) = \frac{d^3\Phi}{dA \cos \alpha d\Omega d\lambda} \quad (3.4)$$

Dabei ist dA ein Flächenelement der strahlenden Fläche, α der Winkel zwischen der Normalen des Flächenelements und des Raumwinkelements $d\Omega$. Abbildung 3.9 veranschaulicht die Winkelbeziehung aus Gleichung (3.4).

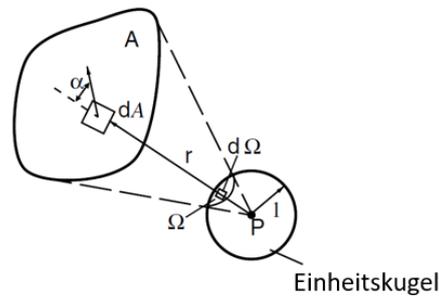


Abbildung 3.9: Berechnung des Raumwinkels nach [13].

Das photometrische Grundgesetz Gl. ((3.5)) beschreibt die Abhängigkeit eines Flächenelements dA_2 eines Empfängers (Detektors) von der abgegebenen Strahlungsleistung eines Flächenelements dA_1 eines Senders (Strahlers):

$$d^2\Phi_{12} = L_1 \frac{dA_1 \cos \beta_1 dA_2 \cos \beta_2}{r^2} \quad (3.5)$$

Das Flächenelement dA_1 befindet sich dabei auf der Fläche A_1 , welche eine Strahldichte von L_1 abgibt. r ist der Abstand der beiden Flächenelemente zueinander und die Winkel β_1 und β_2 beschreiben den jeweiligen Winkel zwischen der Normalen der Fläche und r [13]. Abbildung 3.10 stellt die beiden Flächen und die jeweiligen Winkel dar.

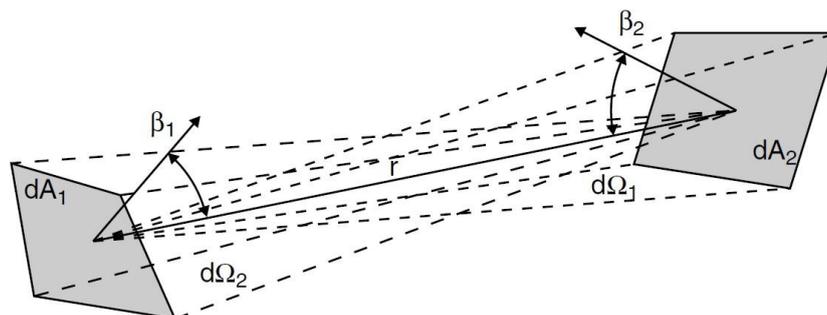


Abbildung 3.10: Darstellung der Geometrie zum photometrischen Grundgesetz nach [13].

3.4. Infrarotkameras

Die grundlegende Aufgabe einer Infrarot-Kamera ist es, die örtliche Strahldichte der beobachteten Infrarotstrahlung in ein Falschfarbenbild umzuwandeln. Dieses Bild repräsentiert die Infrarotstrahlungsverteilung eines Objekts oder einer Szene. Moderne IR-Kameras erzeugen orts- und zeitaufgelöste, strahldichteproporcionale Messwerte. IR-Kameras werden in Anlehnung an das atmosphärische Fenster, in dem sie empfindlich sind, in NIR-, MWIR- und LWIR-Kameras unterteilt.

Abbildung 3.11 zeigt am Beispiel einer ungekühlten Mikrobolometer-Kamera den schematischen Aufbau einer IR-Kamera. Die Wärmestrahlung der beobachteten Szene wird mit einer Optik auf den Detektor der Kamera abgebildet. Das Material, aus dem die Optik gefertigt ist, bestimmt den Spektralbereich, in dem die Optik eine hohe Transmission aufweist. Die Optik besitzt im Allgemeinen zusätzlich eine Antireflexionsbeschichtung für den Spektralbereich, in dem die Kamera arbeitet. Hinter der Optik kann sich ein Filter befinden, welcher den Wellenlängenbereich weiter einschränkt, um ggf. schmalbandiger messen zu können. Anschließend haben einige Kameramodelle einen in den Strahlengang einschwenkbaren Shutter. Mit dem Shutter kann die eingehende Strahlung unterbrochen werden, um Korrekturmechanismen durchzuführen. Bei Mikrobolometer-Kameras ist die Verwendung eines Shutters zur Erzeugung eines homogenen Strahldichtebildes auf dem Detektor eine häufige Methode zum Korrigieren des Kamerabildes (Abgleich). Manche Modelle besitzen auch einen eingebauten Chopper, um die Strahlung modulieren zu können. Nach dem Shutter/Chopper trifft die Strahlung auf das Detektorarray und wird in ein elektrisches Signal umgewandelt, das von der Kameraelektronik verarbeitet wird. Es gibt verschiedene Sensoren und Controller, die je nach Gerät sehr unterschiedlich ausfallen können. Die wichtigsten Elemente werden im Laufe dieses Unterabschnitts kurz behandelt.

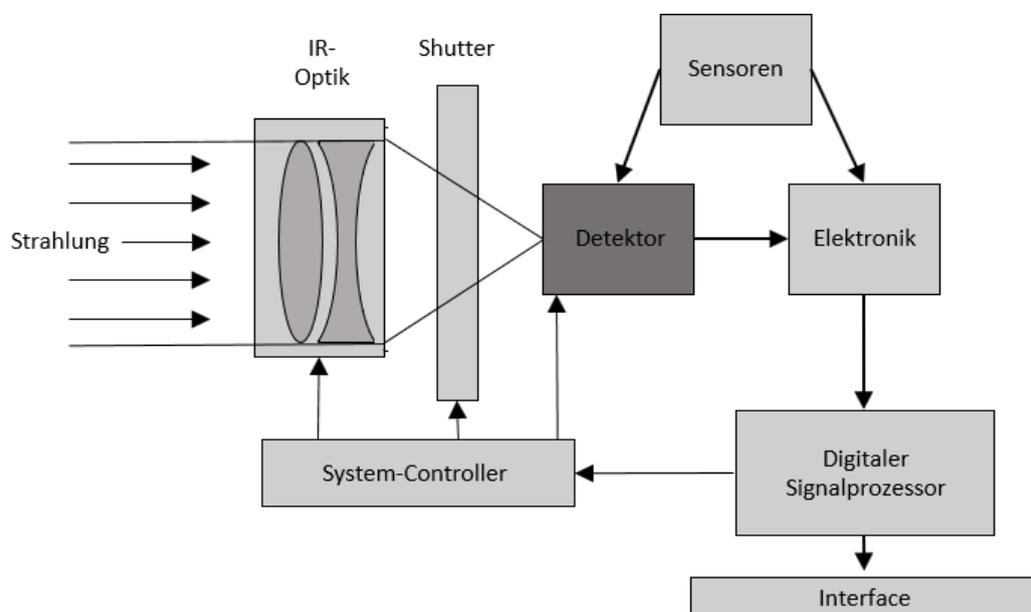


Abbildung 3.11: Schematischer Aufbau einer Infrarot-Kamera am Beispiel einer ungekühlten Mikrobolometer-Kamera.

3.4.1. Infraroptiken

Zunächst trifft die Strahlung auf die Infraroptik der Kamera. Die Optik mit ihrer an den Arbeitsbereich angepassten Vergütung und ggf. ein zusätzliches Infrarotfilter begrenzen die einfallende breitbandige Strahlung spektral, sodass nur noch ein Teil der einfallenden Wärmestrahlung auf die Sensormatrix abgebildet wird. Genauere Ausführungen zu IR-Filtern finden sich in [34] und [35]. Die Optik bestimmt auch das Gesichtsfeld (Field of View - FOV) der IR-Kamera.

Als optische Materialien finden im kurzwelligen Bereich (1,2 μm bis 2,4 μm) Quarzgläser und im mittel- und langwelligen Bereich (3 μm bis 5 μm und 8 μm bis 14 μm) hauptsächlich Germanium und Silizium Verwendung [33]. Bei Messungen im langwelligen Bereich wird vermehrt Germanium eingesetzt, weil es bessere Transmissionseigenschaften als Silizium besitzt, dazu zählen die hohe Transparenz oberhalb von 12 μm und außerdem weist Germanium im Gegensatz zu Silizium keine temperaturabhängige Absorptionsbande bei 9 μm auf.

Mit Hilfe von Antireflexbeschichtungen lassen sich die Transmissionseigenschaften der Optiken deutlich verbessern. Abbildung 3.12 zeigt die Transmission eines Silizium-Fensters ohne Beschichtung und mit einer Antireflex-Beschichtung für den Bereich von 3 μm bis 5 μm .

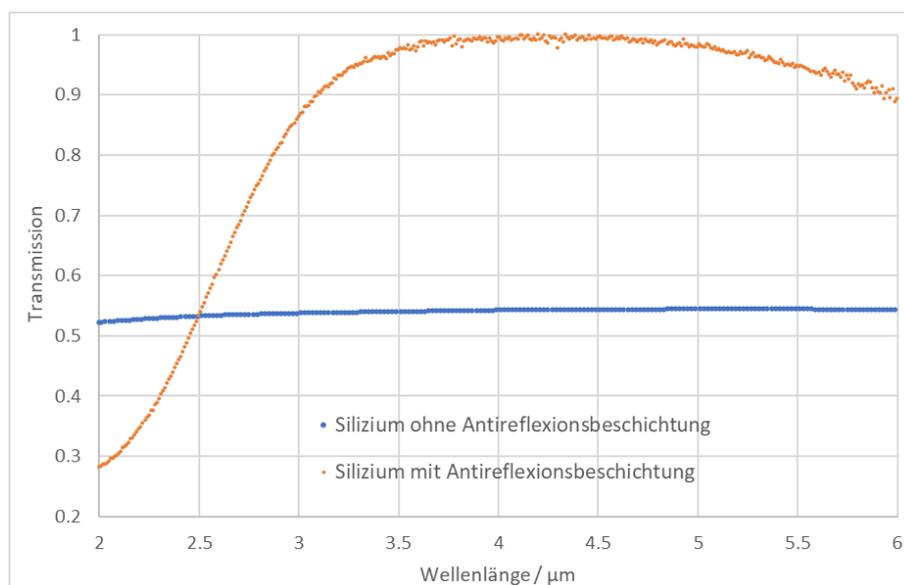


Abbildung 3.12: Transmission eines Siliziumfensters ohne Beschichtung und mit einer Antireflexbeschichtung für den Bereich von 3 μm bis 5 μm .

Sowohl das optische Material als auch das verwendete Detektormaterial müssen an den Messbereich der IR-Kamera angepasst sein. Der Brechungsindex n und die Abbildungsqualität einer Optik müssen so gewählt sein, dass die Strahlung möglichst abbildungsfehlerfrei auf die Detektorelemente des Detektorchips abgebildet wird, ohne dass dabei das Detektorarray über- oder unterstrahlt wird.

Hochwertige Infraroptiken sind ein wesentlicher Kostenfaktor bei IR-Kameras. Bei preiswerten IR-Kameras müssen von den Herstellern aus Kostengründen Kompromisse zwischen Abbildungsqualität und Kamerakosten eingegangen werden. Die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) der Optik ist dabei ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Die MTF beschreibt das Verhältnis zwischen dem Bildkontrast und dem

Objektcontrast und ist ein Maß für die Unterscheidbarkeit von Strukturen im Bild [6].

3.4.2. Infrarotdetektoren

Infrarotdetektoren werden traditionell mit der Erfassung von IR-Strahlung und später mit der Erzeugung von Falschfarbenbildern aus Temperaturunterschieden verbunden. Dabei kommen unterschiedlichste Materialien und Detektorkonzepte zum Einsatz. Infrarotdetektoren können in zwei Kategorien eingeteilt werden, die sich nach ihrem Wirkprinzip unterscheiden. Die erste Gruppe sind die Quantendetektoren (Photonendetektoren, Halbleiterdetektoren), welche das Prinzip des inneren photoelektrischen Effekts nutzen, für dessen Erklärung Albert Einstein im Jahr 1921 den Nobelpreis erhielt [36]. Die zweite Gruppe sind thermische Detektoren, welche eine Temperaturänderung des Detektormaterials in ein elektrisch auswertbares Signal umwandeln. Beide Gruppen werden im Laufe dieses Abschnitts kurz erläutert. Eine ausführliche Darstellung, insb. von thermischen Detektoren, findet sich in [6]. Eine dritte Gruppe von Infrarotdetektoren sind die Strahlungsfelddetektoren, die direkt auf das Strahlungsfeld reagieren. Diese Detektorart wurde 1970 entwickelt, konnte jedoch bei technischen Anwendungen bisher keine entscheidende Rolle einnehmen [37].

Quantendetektoren

Quantendetektoren wandeln die absorbierte elektromagnetische Strahlung direkt in eine Änderung der elektrischen Energieverteilung des Halbleiters um, indem die Konzentration der freien Ladungsträger geändert wird. Dieser Prozess wird innerer photoelektrischer Effekt genannt [36] [38]. Halbleiter besitzen eine klassische Bandstruktur mit einem Valenz- und einem Leitungsband (die Bänder werden auch Energieniveaus genannt). Zwischen beiden Bändern gibt es eine Energielücke, in der sich keine Ladungsträger befinden. Zur Änderung der elektrischen Energieverteilung muss durch Absorption von Licht ein Elektron vom Valenzband ins Leitungsband gehoben werden. Dafür muss das absorbierte Lichtteilchen mindestens die Energie aufweisen, welche zum Überwinden der Bandlücke erforderlich ist.

Es gibt je nach Halbleitermaterial unterschiedliche Anregungsprozesse, welche im Folgenden nur genannt werden. Beim intrinsischen Photoeffekt entsteht ein Elektronen-Loch-Paar beim Überwinden der Bandlücke in einem Halbleiter. Beim extrinsischen Photoeffekt werden die Halbleitermaterialien dotiert und somit Zwischenbänder innerhalb der Bandlücke geschaffen. So wird weniger Energie benötigt, um ein Elektron-Loch-Paar zu bilden. Bei Quantentopfdetektoren (engl. QWIP quantum well infrared photodetectors) werden unterschiedliche Halbleitermaterialien mit unterschiedlicher Bandlücke in sehr dünnen Schichten gestapelt. So können Lichtteilchen effektiver absorbiert und zur Bildung von Elektron-Loch-Paaren genutzt werden. Eine genauere Beschreibung der Anregungsprozesse ist in [2, S. 83-97] gegeben. Quantendetektoren zeigen in ihrem Absorptionsverhalten je nach Detektormaterial eine ausgeprägte selektive Wellenlängenabhängigkeit. Sowohl ihr Signal-Rausch-Verhältnis als auch ihre Reaktionszeit ist in ihrem optimalen Einsatzbereich besser als bei thermischen Detektoren. Jedoch müssen Quantendetektoren für den Nachweis von Infrarotstrahlung gekühlt werden. Die Kühlung erfolgt häufig mit Stirling-Kühlern, welche die IR-Kameras, in denen die Detektoren verbaut sind, größer, schwerer, und teurer machen [39].

Thermische Detektoren

Durch die Absorption von Infrarotstrahlung erfahren thermische Infrarotdetektoren eine Temperaturänderung. Diese Temperaturänderung wird in ein elektrisch auswertbares Ausgangssignal

umgewandelt. Dabei kommen verschiedene physikalische Wirkprinzipien zum Einsatz. Jedoch ist der grundsätzliche Aufbau aller thermischen Infrarotdetektoren ähnlich. Die einfallende Strahlung wird von einem Detektor, d. h. der Absorberfläche des Detektors, absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die einzelnen Detektorelemente sind dabei thermisch gut isoliert, um die absorbierte Energie möglichst verlustarm in Wärme umzuwandeln. Die erzeugte Temperaturänderung ist dabei direkt proportional zur absorbierten Energie. Das bedeutet, dass thermische Detektoren eine wellenlängenunabhängige Nachweisempfindlichkeit haben, wenn das verwendete Absorbermaterial wellenlängenunabhängig absorbiert – also ein grauer bzw. schwarzer Absorber ist.

Die thermischen Detektoren werden in zwei Arten eingeteilt. Die erste Art sind die Energiewandler, welche thermoelektrische Wandlungseffekte nutzen. Beispielhaft sind hierbei die Thermoelemente zu nennen, welche den Seebeck-Effekt (Entstehung einer elektrischen Spannung in einem Stromkreis unter Verwendung zweier unterschiedlichen Materialien [40]) und die pyroelektrischen Detektoren, welche den gleichnamigen pyroelektrischen Effekt (Ladungstrennung durchs Temperaturänderungen) nutzen. Die zweite Art sind die parametrischen Wandler, welche durch ihre Temperaturänderung ein elektrisches Signal modulieren. Diese Kategorie benötigt eine Hilfsenergiequelle.

Folgende physikalische Abhängigkeiten werden unter anderem von den Vertretern der parametrischen Wandler ausgenutzt: die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur, die Abhängigkeit des Drucks in einem geschlossenen Volumen von der Temperatur, die Abhängigkeit der mechanischen Spannung von der Temperatur und die Abhängigkeit der Diodenflussspannung von der Temperatur. Dieser Absatz wurde in Anlehnung an das Kapitel 6: Thermische Infrarotsensoren [13] geschrieben.

Vergleich von Quanten- und thermischen Detektoren

Im Gegensatz zu den meisten Quantendetektoren für Infrarotstrahlung arbeiten thermischen Detektoren typischerweise bei Raumtemperatur. Sie besitzen im Vergleich zu den Quantendetektoren in der Regel eine geringe Empfindlichkeit und eine langsame Reaktionszeit, aber sie sind preiswerter und einfacher in der Handhabung [39]. Tabelle 3.2 stellt die Vor- und Nachteile der beiden Detektortypen qualitativ gegenüber. Die Wahl des richtigen Detektors hängt immer von der Messaufgabe ab. Wie in Abbildung 3.13 dargestellt, liefern thermische Detektoren bei konstanter einfallender Strahlungsleistung ein wellenlängenunabhängiges Signal. Dagegen steigt bei Quantendetektoren das Signal mit zunehmender Wellenlänge an, bis die Cut-off-Frequenz erreicht ist und keine Ladungsträger mehr ins Leitungsband angehoben werden können. Bei einem konstanten Photonenfluss wiederum liefern Quantendetektoren ein konstantes wellenlängenunabhängiges Signal bis zur Cut-off-Frequenz, während thermische Detektoren zeigen eine Wellenlängenabhängigkeit.

Tabelle 3.2: Vergleich von Quanten- und thermischen Detektoren nach [41].

Parameter	Quantendetektor	Thermischer Detektor
Spektrale Empfindlichkeit	Schmalbandig, selektiv	Breitbandig, flach
Sensitivität/Dedektivität	Hoch	Niedrig
Reaktionszeit	Kurz	Lang
Betriebstemperatur	Gekühlt	Umgebungstemperatur
Kosten	Hoch	Niedrig
Systemanforderungen	Kühlsystem	Optischer Chopper (häufig)

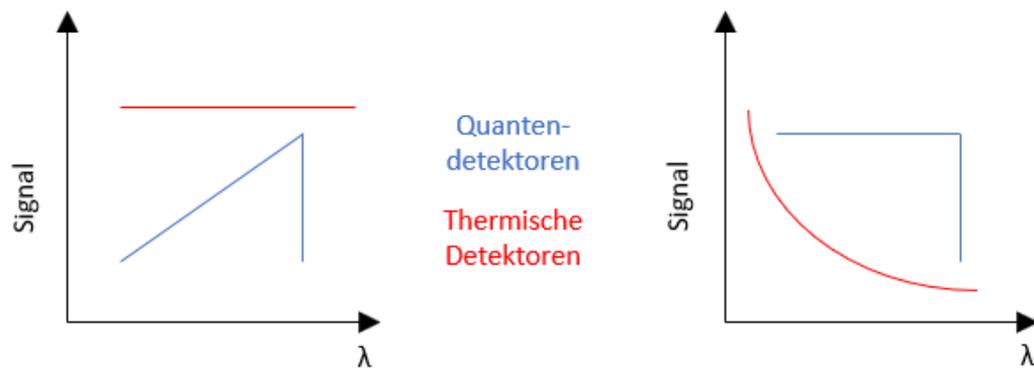


Abbildung 3.13: Wellenlängenabhängiges Signal eines Quantendetektors (blau) und eines thermischen Detektors (rot) bei konstanter einfallender Strahlungsleistung (links) und bei konstantem Photonenfluss (rechts) nach [2]

3.5. Rauschgrößen

In der Praxis wird jedes Messsignal von der Umgebung, z. B. durch die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchtigkeit oder den Luftdruck, mehr oder weniger stark beeinflusst. Ändern sich die Umgebungsparameter, hat dies Auswirkungen auf das Messsignal und kann sich die Messunsicherheit erhöhen.

Bei der radiometrischen Temperaturmessung wirken sich insbesondere Änderungen der Umgebungstemperatur T_U auf die Messunsicherheit aus [23]. Gründe sind unter anderem der Wärmeaustausch zwischen der Umgebung und dem Kameragehäuse, wodurch die Temperatur des Kamerarinnenraums und des Sensors verändert werden kann. Eine Änderung der Sensortemperatur hat direkten Einfluss auf den Arbeitspunkt und somit auf das Messsignal. Eine Änderung des Kamerarinnenraums führt außerdem zur Änderung der Störstrahlung bzw. Umgebungsstrahlung, welche jedes Detektorelement vom Kamerarinnenraum detektiert. Eine Änderung der Umgebungstemperatur wirkt sich außerdem auf das Messsignal aus, das die Kamera über ihre Optik empfängt. Eine kontinuierliche Änderung der Umgebung kann auch zu einer zeitlichen Drift im Messsignal führen. Diese ist neben dem Rauschen des Messsignals eine zweite wesentliche Störgröße, deren direkte Auswirkung auf die Datenreferenzmethode in dieser Arbeit betrachtet wird.

Zeitliches, normalverteiltes Rauschen im Messsignal kann kamerabedingte und kameraunabhängige Ursachen haben. Diese sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Begonnen wird mit den kamerabedingten Rauschprozessen, die unter anderem auf die Ausleseelektronik zurückzuführen sind.

3.5.1. Thermisches Rauschen

Freie Ladungsträger führen in einem Widerstand willkürliche Bewegungen ähnlich der Brownschen Bewegung aus. Diese willkürlichen Bewegungen bewirken Spannungsänderungen an den Elektroden des Widerstandes. Das daraus resultierende, messbare stochastische Signal wird als thermisches oder Widerstandsrauschen bezeichnet. Die spektrale Rauschleistung ergibt sich zu:

$$S_{R,th} = 4k_B T \quad (3.6)$$

mit der absoluten Temperatur T und der Boltzmann-Konstanten k_B . Das thermische Rauschen ist normalverteiltes weißes Rauschen [6].

3.5.2. Stromrauschen

Beim Überwinden einer Potenzialbarriere durch Ladungsträger kommt es durch die Energieverteilung der einzelnen Ladungsträger zu einer unterschiedlichen Wahrscheinlichkeit des Potenzialübertritts. Diese Variation der Wahrscheinlichkeit wird Strom- bzw. Schrotrauschen genannt. Solche Potentialübergänge treten bspw. bei pn-Übergängen auf. Das Stromrauschen berechnet sich zu:

$$S_{Strom}(f) = 2qI \quad (3.7)$$

mit der Ladung q und dem Strom I . Stromrauschen ist Poisson-verteiltes weißes Rauschen [6]. Zeitlich normalverteiltes Rauschen ist nicht nur von der jeweiligen IR-Kamera abhängig, sondern besitzt zusätzlich kameraunabhängige Rauschkomponenten.

3.5.3. Strahlungsrauschen

Das Aussenden von Photonen eines schwarzen Strahlers ist annähernd Poisson-verteilt und kann mit

$$\sigma^2 = \tilde{n} \left[\frac{\frac{h\nu}{e^{k_B T}}}{e^{k_B T} - 1} \right] \quad (3.8)$$

beschrieben werden, wobei \tilde{n} die erwartete Anzahl der Photonen ist. Der rechte Teil der Gleichung ist der Bosonen-Faktor, welcher sich aus der Wahrscheinlichkeit für den Energiezustand von Bosonen, zu denen Photonen gehören, ergibt. Strahlungsrauschen ist weißes Rauschen [6].

3.5.4. Temperaturfluktuationsrauschen

Die Voraussetzung zur Emission von Photonen ist eine Temperatur eines Körpers von über 0 K. Die Temperatur eines Körpers ist die mittlere kinetische Energie pro Teilchen und Bewegungstyp. Beide Größen unterliegen einer zeitlichen Fluktuation, sodass selbst im thermischen Gleichgewicht Temperaturschwankungen um einen konstanten Mittelwert (der Temperatur T) auftreten. Die Varianz dieser Temperaturschwankungen ist:

$$\overline{(\Delta T)^2} = \frac{k_B T^2}{c_{th}} \quad (3.9)$$

c_{th} ist die spezifische Wärmekapazität des Körpers und k_B die Boltzmann-Konstante. $\overline{\Delta T}$ ist der Effektivwert der Temperaturänderung. Temperaturfluktuationsrauschen ist weißes Rauschen [6].

3.6. IR-Kamerakenngrößen

Im folgenden Abschnitt werden kurz die für diese Arbeit wichtigsten Kenngrößen von IR-Kameras vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf der Beschreibung der Kenngrößen gemäß gängiger Literatur. In der praktischen Arbeit mit IR-Kameras ist die Ermittlung der Kenngrößen gemäß der Literatur in manchen Fällen schwer realisierbar. Deshalb werden im Kapitel 6.2 die Kenngrößen praxisnäher gemäß den Festlegungen der VDI/VDE-Richtlinie 5585 Blatt 1 „Technische Temperaturmessung, Temperaturmessung mit Thermografiekameras: Messtechnische Charakterisierung“ bestimmt und angewendet. Diese Arbeit lieferte damit dem VDI/VDE-Fachausschuss zur Erstellung des Blatts 2 „Technische Temperaturmessung, Temperaturmessung mit Thermografiekameras: Kalibrierung“ wichtige Resultate und praktische Erfahrungen an kommerziellen Kameras [18].

3.6.1. Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera

Der Anzeigewert jedes Detektorelements einer IR-Kamera beinhaltet auf Grund der in Abschnitt 3.5 beschriebenen Rauscheinflüsse eine Messunsicherheit. Diese Messunsicherheit ist für jedes Detektorelement individuell und die Ursachen können sehr vielfältig sein, wie z. B. auf Grund von Toleranzen beim Herstellungsprozess oder verursacht durch Elemente der IR-Kamera. Durch die Variation der Messunsicherheit jedes Detektorelements ergibt sich eine Variation des Anzeigewerts bei vollkommen homogener Ausleuchtung der IR-Kamera über das gesamte Kamerabild. Diese Variation der Anzeigewerte wird Ungleichförmigkeit der IR-Kamera genannt. Die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera wird in der Literatur mit Hilfe der inhomogenitätsäquivalenten Temperaturdifferenz *IETD* beschrieben. Die *IETD* ist die räumliche Standardabweichung der Anzeigewerte der Detektorelemente innerhalb eines Bildes:

$$IETD = \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (U_{m,n} - \langle U \rangle)^2} \quad (3.10)$$

mit den Indikatoren, für die Detektorelemente m und n , der Spannung $U_{m,n}$ jedes Detektorelements und dem Mittelwert $\langle U \rangle$ aller Spannungen der Detektorelemente [12].

Die Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera wird von den Kameraherstellern messtechnisch ermittelt und über Korrekturverfahren bestmöglich korrigiert. In der Regel wird eine IR-Kamera dabei vor einem Flächenstrahler bei verschiedenen Referenztemperaturen abgeglichen. Jedoch ermöglichen diese Korrekturen auf Grund der oben genannten Rauscheinflüsse kein komplett fehlerfreies Bild. Zusätzlich ist die Qualität der messtechnischen Bestimmung an einer Referenzquelle stark von der Kenntnis der Strahlungstemperatur- bzw. Strahldichte-Verteilung der Quelle abhängig, wobei die Homogenität der Strahldichte der Quelle ein begrenzender Faktor ist. Die Korrektur der Ungleichförmigkeit kann bei dieser direkten Ungleichförmigkeitsbestimmung in der Regel nicht besser sein als die Temperaturhomogenität der verwendeten Strahlungsquelle. In Kapitel 4 werden, neben der DRM, verschiedene Korrekturmethode vorgestellt, die eine Bestimmung der Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera unabhängig von der Strahldichtehomogenität der verwendeten Strahlungsquelle ermöglichen.

3.6.2. Rauschäquivalente Temperaturdifferenz (NETD)

Die Temporaufösung einer IR-Kamera ist ebenfalls abhängig von den Rauschgrößen des Messprozesses und wird mit der *NETD* (noise-equivalent temperature difference) ausgedrückt. Die *NETD* drückt die Temperaturdifferenz ΔT einer Objektoberfläche aus, welche ein Signal-Rausch-Verhältnis von eins am Sensorausgang erzeugt. Das bedeutet, dass die *NETD* die minimal unterscheidbare Oberflächentemperaturdifferenz angibt, die von einer IR-Kamera bestimmt werden kann. Beschrieben wird die *NETD* über:

$$NETD = \frac{U_R}{\Delta U_a} \Delta T, \quad (3.11)$$

wobei U_R die Rauschspannung und ΔU_a die Änderung der Ausgangsspannung ist [12].

Die Gesamt-*NETD* einer IR-Kamera ergibt sich durch die quadratische Addition der *NETD* und der *IETD*:

$$NETD_{gesamt} = \sqrt{NETD^2 + IETD^2}. \quad (3.12)$$

3.6.3. Linearität

Die direkte Proportionalität zwischen Eingangs- und Ausgangssignal einer IR-Kamera wird Linearität genannt. Für die radiometrische Charakterisierung und Kalibrierung von IR-Kameras ist der Zusammenhang zwischen eingehender IR-Strahlung auf Grund der Oberflächentemperatur des Messobjekts und Ausgangssignal (Ausgangsspannung) bei unterschiedlichen Strahlungstemperaturen entscheidend. Im Idealfall besteht, wie in Abbildung 3.14 dargestellt, ein linearer Zusammenhang zwischen den beobachteten Strahldichten und ausgegebenen Signalen der IR-Kamera. Wenn in dieser Arbeit von Linearität gesprochen wird, ist der Zusammenhang zwischen eingehenden Strahldichten und ausgegebenen Signalen (Anzeigewerten) der IR-Kamera gemeint.

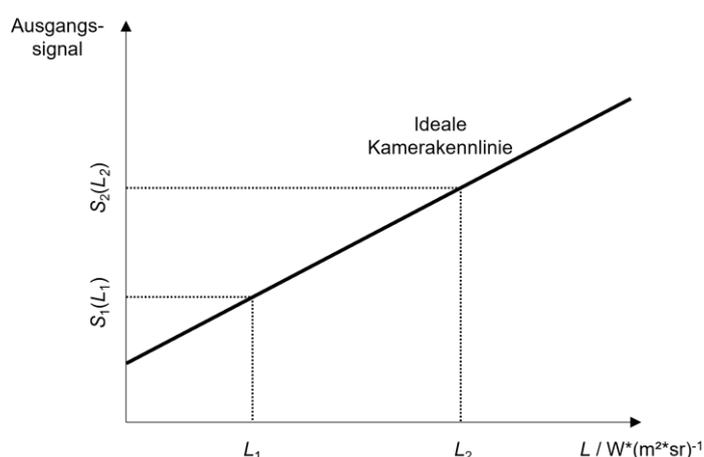


Abbildung 3.14: Ideal lineare Kamerakennlinie.

4. Die Datenreferenzmethode (DRM)

4.1. Ungleichförmigkeit der Kameraelemente von IR-Sensorarrays

Ein typischer Infrarotbildsensor einer IR-Kamera basiert auf einem sogenannten Focal Plane Array (FPA), einer zweidimensionalen Anordnung von Strahlungsdetektoren [24]. Bei der Produktion der Focal Plane Arrays kommt es zu Toleranzen. Daraus resultiert eine Variation in den angezeigten Werten der einzelnen Strahlungsdetektoren bei völlig homogener Ausleuchtung des Arrays. Die Ursachen für diese Variation in den Anzeigewerten sind vielfältig und müssen nicht nur das Array selbst, sondern können auch durch andere Elemente der IR-Kamera bedingt sein. Zum Beispiel können sie durch Unterschiede in der Substratdotierung des Arrays oder in der Größe der einzelnen Detektoren auftreten. Weitere Ursachen können ein übermäßiger Dunkelstrom, welcher eine Überhöhung des Detektorsignals verursacht, bildabhängige Hysteresen, welche zu Schlieren im Bild führen, Staub auf den optischen Komponenten, welcher zum Beispiel zu Beugungserscheinungen hervorruft und Temperaturschwankungen der IR-Kamera, welche zu Schwankungen des Dunkelstroms führen, sein. Andere Ursachen, wie zum Beispiel die Vignettierung, Striping und schlechte Bildelemente, wurden in verschiedenen Veröffentlichungen dargestellt [25] [26] [27] [28]. Es ist deshalb unmöglich, ein vollkommen homogen arbeitendes FPA herzustellen. Somit besitzt jedes Sensorelement eine etwas andere Antwort auf denselben Stimulus [29]. Beim Beobachten einer völligen homogenen Strahlungsverteilung kommt es dadurch zu Unterschieden in den Anzeigewerten der einzelnen Bildelemente einer IR-Kamera. Dieses inhomogene Ansprechen des FPAs über seine Fläche wird auch Musterrauschen oder Fixed-Pattern-Noise (FPN) genannt. Bei einer IR-Kamera wird von der „Ungleichförmigkeit“ der IR-Kamera gesprochen.

Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft die Mittelung von 100 Aufnahmen einer hochwertigen Quecksilber-Cadmium-Tellurid (**m**ercury **c**admium **t**elluride) (MCT-)IR-Kamera eines hochwertigen Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers bei 100 °C. Durch die Bauweise des Hohlraumstrahlers lässt sich eine sehr homogene Temperaturverteilung auf dem Boden des Strahlers erzeugen, die deutlich besser als +/- 100 mK ist. Die Kamera verwendet Korrekturdaten zum Ausgleichen ihrer Ungleichförmigkeit, die in der Regel vom Hersteller ermittelt und in der Kamera hinterlegt worden sind. Die dargestellte Aufnahme zeigt dennoch eine deutliche Struktur auf dem Boden des Strahlers, welche Differenzen von deutlich mehr als 100 mK aufweist. Des Weiteren sind Bildelemente zu erkennen, welche kein normales Ansprechverhalten zeigen. Bildelemente mit einem deutlich abweichenden Ansprechverhalten werden umgangssprachlich „tote Pixel“ genannt.

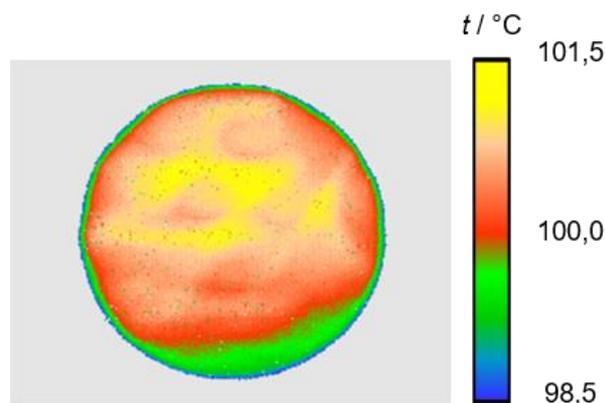


Abbildung 4.1: Aufnahme einer MCT-IR-Kamera eines Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers mit einer Homogenität in der Temperaturverteilung von < 100 mK bei 100 °C. Apertur des Strahlers 600 mm, Abstand zwischen Kamera und Apertur 150 mm.

Das in Abbildung 4.1 dargestellte Beispiel zeigt die Wichtigkeit der Korrektur der Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera sowohl für die qualitative als insbesondere auch für die quantitative Thermografie. Ohne diese Korrektur entstehen schnell Fehlinterpretationen von Strahlungstemperaturverteilungen und absoluten Temperaturbestimmungen. Unzureichend korrigierte Kameras können durchaus, wie in diesem Beispiel, Messfehler im einstelligen Prozentbereich hervorrufen.

4.2. Stand der Technik bei Korrekturverfahren zur Ungleichförmigkeit

Die Bildverfälschung und Messungenauigkeit von IR-Kameras aufgrund ihrer Ungleichförmigkeit im Ansprechverhalten (FPN) kann mit Hilfe von Korrekturverfahren zur sogenannten Ungleichförmigkeitskorrektur (NUC-Methoden) minimiert werden. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Ansätze, welche den Einfluss der Ungleichförmigkeit reduzieren sollen.

Der erste Ansatz beschreibt referenzbasierte Methoden, bei der Referenzquellen mit bekannter Strahlungstemperatur zum Einsatz kommen. Diese Methoden sind einfach zu implementieren und bietet zuverlässige Aussagen, werden jedoch durch zeitliche Driften des Anzeigewertes beeinflusst [29]. Die Qualität einer referenzbasierten Methode hängt darüber hinaus entscheidend von der Qualität der verwendeten Referenzquelle ab. Unsicherheit und Inhomogenität in der Strahlungstemperatur der Referenzquelle werden direkt auf die Ungleichförmigkeitskorrektur der Kamera übertragen.

Der zweite Ansatz beschreibt szenenbasierte Methoden, zu denen auch die in dieser Arbeit verwendete Methode gehört. Szenenbasierte Methoden benötigen in der Regel wohldefinierte Randbedingungen, ansonsten sind sie anfällig für Geisterbilder.

4.2.1. Referenzbasierte Methoden

Referenzbasierte Methoden benötigen Referenzquellen zur Durchführung der Korrektur. Zu den referenzbasierten Methoden gehören die Ein-Punkt- und Zwei-Punkt-Korrekturen, welche zu den klassischsten NUC-Methoden zählen [30]. Dabei wird die IR-Kamera an einer bzw. an zwei Referenztemperaturen abgeglichen. Das Ausgangssignal $S_{i,j}(L)$ eines Detektorelements (i,j) lässt sich wie folgt beschreiben:

$$S_{i,j}(L) = r_{i,j} \cdot L(T, \lambda) + o_{i,j}. \quad (4.1)$$

Es besteht eine lineare Abhängigkeit zur detektierten Strahldichte $L(T, \lambda)$. Die Geradengleichung wird durch den Anstieg bzw. die Steigung r als Empfindlichkeit des Detektorelements und den Offset o als Achsenabschnitt beschrieben. Mit Hilfe der NUC sollen alle Detektorsignale $S_{NUC,i,j}(L)$ einer Normkennlinie $S_{Norm,i,j}(L)$ folgen. Die Normkennlinie wird in der Regel durch Mittelung aller Detektorkennlinien ermittelt:

$$S_{Norm,i,j}(L) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1; j=1}^{M,N} S_{i,j}(L). \quad (4.2)$$

Abbildung 4.2 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Kennlinien von zwei Detektorelementen und des Normdetektorelements. Die jeweilige Kennlinie wird durch ihren Anstieg r (Empfindlichkeit bzw. Ansprechverhalten, engl. Responsivity) und ihren Offset o beschrieben.

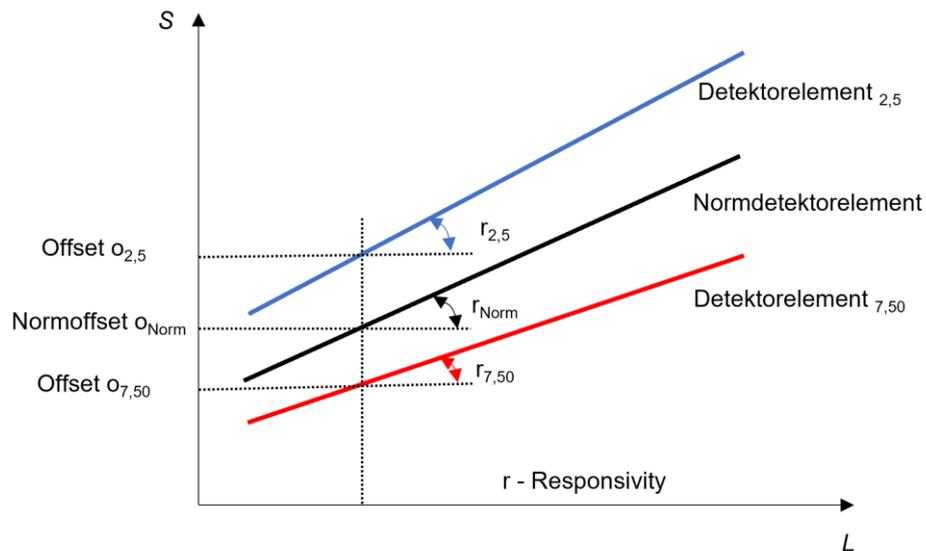


Abbildung 4.2: Kennlinien zweier Detektorelemente und des Normdetektorelements.

Der lineare Zusammenhang zwischen der detektierten Strahldichte $L(T, \lambda)$ und dem Ausgangssignal $S_{i,j}(L)$ erlaubt die Ableitung einer Signaldifferenz $\Delta S_{i,j}(L)$ zwischen Ausgangssignal $S_{i,j}(L)$ und der Normkennlinie $S_{Norm,i,j}(L)$ als Geradengleichung mit dem Anstieg $a_{i,j}$ und dem Achsenabschnitt $b_{i,j}$ für jedes Detektorelement:

$$\Delta S_{i,j}(L) = S_{i,j}(L) - S_{Norm,i,j}(L) = a_{i,j} \cdot S_{i,j}(L) - b_{i,j}. \quad (4.3)$$

Zur Bestimmung der Koeffizienten $a_{i,j}$ und $b_{i,j}$ werden mindestens zwei unterschiedliche Ausgangssignale S_1

$S_{i,j}(L_1)$ und $S_{i,j}(L_2)$ bei zwei unterschiedlichen Strahldichten $L_1(T_1, \lambda)$ und $L_2(T_2, \lambda)$ benötigt. Mit Hilfe der daraus berechneten Signaldifferenzen $\Delta S_{1 i,j}$ und $\Delta S_{2 i,j}$ lassen sich die Koeffizienten bestimmen:

$$a_{i,j} = \frac{\Delta S_{1 i,j} - \Delta S_{2 i,j}}{S_{1 i,j}(L_1) - S_{2 i,j}(L_2)}, \quad (4.4)$$

$$b_{i,j} = \Delta S_{1 i,j} - \frac{\Delta S_{1 i,j} - \Delta S_{2 i,j}}{S_{1 i,j}(L_1) - S_{2 i,j}(L_2)} \cdot S_{2 i,j}(L_2). \quad (4.5)$$

Daraus ergeben sich aus $a_{i,j}$ und $b_{i,j}$ die Korrekturkoeffizienten $c_{i,j}$ und $d_{i,j}$ und somit für die korrigierten Detektorsignale $S_{NUC i,j}(L)$ folgende Berechnungsvorschrift:

$$S_{NUC i,j}(L) = S_{Norm i,j}(L) = c_{i,j} \cdot S_{i,j}(L) + d_{i,j} \quad (4.6)$$

mit

$$c_{i,j} = 1 - a_{i,j} \quad (4.7)$$

und

$$d_{i,j} = -b_{i,j}. \quad (4.8)$$

Bei Detektoren mit linearer Kennlinie erzielt die Zwei-Punkt-Korrektur gute Ergebnisse. Sobald die Detektorkennlinie in einem Bereich eine ausgeprägte Nichtlinearität aufweist, kommt es zu größeren Abweichungen und Fehlern. Insbesondere Quantendetektoren weisen zum Teil größere Nichtlinearitäten auf. Bei diesen Detektoren ist eine gute Korrektur der Kennlinie mittels dieser Methode deshalb nur in der Nähe der Referenztemperaturen gegeben.

Komplexere Korrekturmethode, wie z.B. die Multi-Punkt-Methode, sind eine Erweiterung der Zwei-Punkt-Korrektur und werden an mehreren Referenzpunkten durchgeführt [31]. So können Nichtlinearitäten besser kompensiert werden.

Das Maß der Korrektur an Referenzquellen ist stark von der Kenntnis der Strahlungstemperatur- bzw. Strahldichte-Verteilung der Quelle abhängig und auch die Homogenität der Strahlungsleistung der Quelle ist ein begrenzender Faktor. Die Korrektur der Ungleichförmigkeit kann nicht besser sein als die Temperaturhomogenität der verwendeten Strahlungsquelle, sodass in der Realität stets eine Restunsicherheit im Kamerabild verbleiben wird, weil keine Strahlungsquellen mit perfekt homogener Temperaturverteilung existieren. Die Korrekturmechanismen setzen für alle Detektorelemente ein identisches Signal voraus, welches in der Realität bei immer größer werdenden Gesichtsfeldern der IR-Kameras besonders für hohe Strahlungstemperaturen auf Grund von Konvektion zu den Rändern des Strahlers schwer realisierbar ist. Der Einsatz von Ulbrichtkugeln kann hier ein Lösungsansatz sein, wie in Unterabschnitt 6.3.1 dargelegt wird.

4.2.2. Szenenbasierte Methoden

Szenenbasierte Methoden benötigen in der Regel keine besonderen Referenzquellen und können teilweise in den normalen Kamerabetrieb integriert werden. Einige Methoden basieren auf der Annahme, dass die Rahmenbedingungen über einen definierten Zeitraum als konstant angesehen werden können. Sie gehen davon aus, dass alle Parameter des Detektors über einen bestimmten Zeitraum konstant und die Detektorkennlinie unverändert bleiben. Somit ergeben sich konstante Randbedingungen bei zeitlich aufeinander folgenden Messungen und es kann von gleichen Messergebnissen ausgegangen werden. Durch Driften z.B. der Detektortemperatur können bei diesen Methoden Geisterbilder entstehen, in denen Artefakte auftreten, welche durch den Algorithmus verursacht werden und keinen Bezug zur aufgenommenen Szene besitzen. In jüngerer Zeit werden szenenbasierte NUC-Methoden immer häufiger eingesetzt, weil der Aufwand der Implementierung gegenüber den referenzbasierten Methoden deutlich geringer ist und sie nicht durch die Qualität des Referenzstrahlers limitiert sind. Das mündet in einer Vielzahl von verschiedenen Methoden, von denen im Folgenden eine Auswahl dargestellt ist.

Scribner et al. zeigen in [32] erste Ansätze für die Implementierung von neuronalen Netzwerken, welche die Veränderung der Detektorparameter bei der NUC berücksichtigen.

Hardie et al. beschreiben eine Methode zur Korrektur der Ungleichförmigkeit, in der eine bewegte Szene über einen längeren Zeitraum beobachtet wird und anschließend mit Hilfe einer Bewegungsabschätzung die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera abgeschätzt wird. Laut der Veröffentlichung können geringe Ungleichförmigkeiten gut detektiert werden, jedoch stößt die Methode bei stärkeren Ungleichförmigkeiten an ihre Grenzen [33].

Orżanowski beschreibt die Verwendung eines Shutter zur Korrektur der Ungleichförmigkeit [34]. Diese Methode wird prinzipiell schon lange angewendet. Der Shutter gibt allen Detektorelementen theoretisch ein einheitliches Signal vor, welches für den Abgleich benutzt wird. Orżanowski berücksichtigt bei seiner Methode allerdings zusätzlich noch Einflüsse, welche vom Kameragehäuse und von der Infraroptik verursacht werden. Die Methode ermöglicht eine gute Kompensation des Detektor-Offsets, der zeitlichen Drift und der Beseitigung von Abschattungseffekten in der Optik.

Scribner et al. beschreiben in [35] zwei Methoden, wovon die erste Methode auf der Anwendung eines Hochpassfilters basiert und die zweite Methode ein neuronales Netzwerk verwendet. Die Vorteile der ersten Methode sind, dass niederfrequentes Rauschen eliminiert und das örtliche Rauschen auf das Level des zeitlichen Rauschens gedrückt wird. Jedoch kann diese Methode nur im Offset-Betrieb angewendet werden und es erfordert eine Bewegung in der aufgezeichneten Szene. Die zweite Methode hat den Vorteil, dass sowohl die Gain- als auch die Offset-Koeffizienten kontinuierlich aktualisiert werden und das örtliche Rauschen auf das Niveau des zeitlichen Rauschens minimiert wird. Nachteilig ist allerdings, dass die Implementierung aufwändige Multiprozessor-Architekturen erfordert und es dadurch zu Problemen der Netzwerkstabilität kommen kann.

Vera und Torres erweitern die zweite Methode in [35] und entwickeln das neuronale Netz weiter. Durch die Anwendung von kleinen Mittelungsfenstern im Bild lässt sich die Leistungsfähigkeit des Netzwerkes verbessern und die Schätzung der Verstärkungs- und Offset-Parameter wird verbessert [36].

Coelho et al. beschreiben die Ungleichförmigkeit einer Kamera als ein optisches Objekt, welches sich in einer unendlichen Bildtiefe befindet. Wird eine Reihe von Bildern derselben Szene aus verschiedenen Positionen aufgenommen, kann der Bildsatz verwendet werden, um eine digitale Refokussierung auf alle nahen gelegenen Objekte in der Szene zu erreichen. Bei diesem Ansatz wird die Ungleichförmigkeit als Folge der

Defokussierung herausgefiltert [37]. Zuo et al. verwenden eine Methode zur Ermittlung der Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera, bei der zwei, zueinander verschobene Aufnahmen über einen mathematischen Algorithmus ausgewertet werden [38]. Die Aufnahmen sind dabei sowohl horizontal als auch vertikal zueinander verschoben, sodass sich trotzdem eine überlappende Fläche ergibt (Abbildung 4.3).

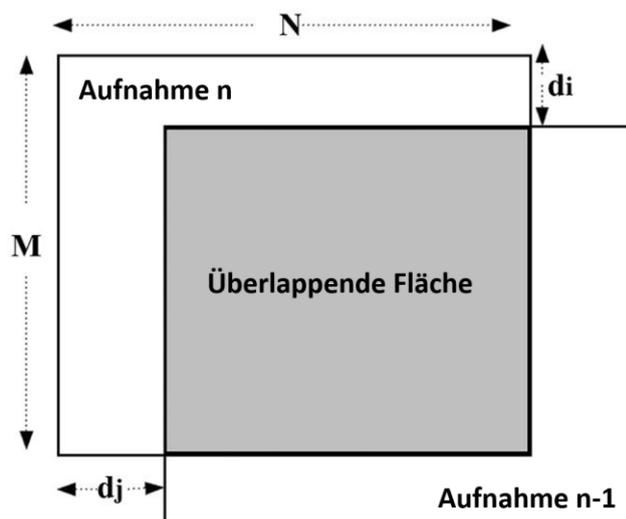


Abbildung 4.3: Überlappende Fläche zweier gegeneinander verschobener Aufnahmen zur Ermittlung der Ungleichförmigkeit von IR-Kameras aus [38].

In [38] wird eine Methode vorgeschlagen, bei der angenommen wird, dass zwei Detektoren, welche nacheinander die Strahlung auf derselben Position eines Objekts messen, das gleiche Signal liefern sollten, solange die Strahlung des Objekts zeitlich konstant ist. Es wurde gezeigt, dass die erzielten Ergebnisse vergleichbar zu anderen gängigen Methoden (z.B. [35]) sind. Der Vergleich der Signalwerte unterschiedlicher Detektoren, welche nacheinander den gleichen Strahlungswert messen, bildet auch die Grundlage der in dieser Arbeit angewendeten Datenreferenzmethode.

4.3. Grundlagen der Datenreferenzmethode

Die Datenreferenzmethode (DRM) ist ein an der PTB entwickeltes Verfahren zur Ermittlung und Korrektur der Ungleichförmigkeit von zweidimensional auflösenden Kameras. Das Verfahren beruht auf einer planvollen horizontalen und vertikalen Verschiebung der Kamera vor einer Strahlungsquelle und der aufeinander folgenden Aufnahme mehrerer (mindestens drei) versetzter Bilder der Strahlungsquelle. Die DRM gehört zu den szenenbasierten Methoden und benötigt keine Referenzquellen. Als Ergebnis liefert die DRM sowohl die Ungleichförmigkeit des eingesetzten IR-Kamera-Systems als auch die Strahlungsverteilung der betrachteten Strahlungsquelle. Für die Ermittlung der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera werden relative Informationen des Ansprechverhaltens der einzelnen Detektorelemente, bezogen auf ein frei wählbares Referenzdetektorelement, verwendet, die sich aus den versetzten Bildaufnahmen ergeben. Der zugrunde liegende mathematische Algorithmus ist umfassend in [14] [15] beschrieben. Im Folgenden wird eine kurze

Übersicht zur DRM gegeben.

Zur Anwendung der DRM werden zunächst drei Aufnahmen mit einer IR-Kamera aufgenommen (Abbildung 4.4a). Die erste Aufnahme wird im Folgenden als Primärbild (P) bezeichnet. Anschließend wird die IR-Kamera in Richtung der Zeilen des Detektorarrays (horizontal) verschoben oder geschwenkt, sodass die folgende Aufnahme ein Bild mit einem definierten Spaltenversatz zum ersten Bild ergibt. Der Versatz der beiden Aufnahmen muss mindestens ein Bildelement oder ein ganzzahliges Vielfaches davon betragen. Die zweite Aufnahme wird Spaltenversatzbild (S) genannt.

Als nächstes wird die IR-Kamera, ausgehend vom Primärbild, um denselben Versatz in Richtung der Spalten des Detektorarrays (vertikal) verschoben oder geschwenkt. Das sich ergebende Bild wird Zeilenversatzbild (Z) genannt. Beide Aufnahmen (S und Z) müssen zwingend den gleichen Versatz zu P haben. In der praktischen Anwendung hat sich gezeigt, dass es von Vorteil ist, eine abschließende vierte Aufnahme an der Position des Primärbilds zur Analyse des zeitlichen Verhaltens der Instrumente aufzunehmen.

Abbildung 4.4a illustriert den Effekt der Verschiebungen bzw. Schwenkung der IR-Kamera. In diesem Beispiel ist ein Bild eines Schneemanns dargestellt. Dieses Bild ist zusätzlich mit einer Struktur (grau) überlagert, welche die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera symbolisiert. Beim ersten Bild (P) ist die Kamera vor dem Schneemann positioniert und macht eine Aufnahme des Schneemanns. Das Bild beinhaltet das betrachtete Objekt (Schneemann) und die Ungleichförmigkeit (graue Struktur). Anschließend wird die Kamera entlang der Detektorreihen des Sensors horizontal verschoben und die Szene erneut aufgenommen. Es entsteht das Bild S. Auf diesem Bild ist eine Änderung der Position des Schneemanns in Bezug auf das Bild P in horizontaler Richtung entgegen der Versatzrichtung zu erkennen. Die graue Struktur befindet sich an der gleichen Stelle wie in der ersten Aufnahme. Für die dritte Aufnahme wird die Kamera ausgehend von Bild P entlang der Spalten des Sensors um denselben Versatz bewegt. Es entsteht das Bild Z. In dieser Aufnahme ist die Änderung der Position des Schneemanns in Bezug auf das Bild P in vertikaler Richtung entgegen der Versatzrichtung zu erkennen. Die graue Struktur befindet sich wiederum an der gleichen Stelle wie in der ersten Aufnahme. Durch die unterschiedliche Reaktion der Abbildung der Quelle (Schneemann) und der Kameraeffekte (graue Struktur) auf die Verschiebung der Kamera können beide Größen rechnerisch voneinander getrennt werden. Abbildung 4.4 b zeigt das Ergebnis der DRM. Aus den Aufnahmen P, S und Z können zwei Informationen extrahiert werden, die graue Struktur, welche die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera symbolisiert, und der Schneemann, der den Inhalt der aufgenommenen Szene darstellt.

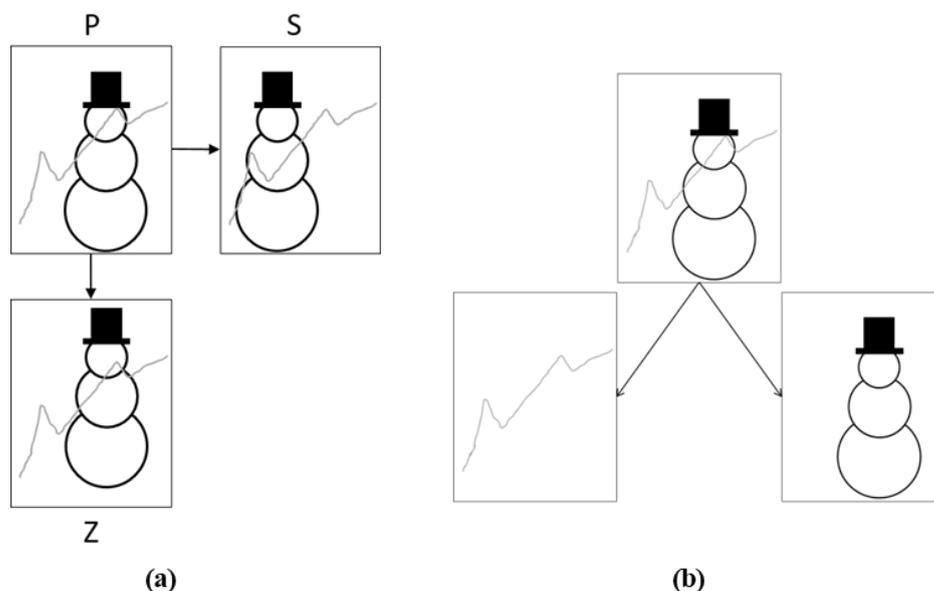


Abbildung 4.4: Beispielhafte Darstellung der Funktionsweise der DRM. a) Grundaufnahmen P, S und Z in der DRM. b) Trennung von Inhalten der Szene (Schneemann) und Eigenschaften der Kamera (graue Struktur). Erläuterungen im Text.

Es gibt vier Ausführungen (Varianten) der DRM, welche sich in ihren Eingangsparametern und im Ablauf der Berechnungen unterscheiden.

- Zwei Ausführungen berechnen als erstes die korrigierte relative Strahlungsverteilung des Objekts und daraus die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera.
- Zwei weitere Ausführungen berechnen zunächst die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera und daraus mit Hilfe des Primärbilds P die korrigierte relative Strahlungsverteilung des Objekts.
- Je eine der zwei Ausführungen mit gleicher Rechenabfolge arbeitet entweder mit strahldichteproportionalen Werten oder mit Strahlungstemperaturen als Eingangsgröße.

Die ermittelte Ungleichförmigkeit und die ermittelte Strahlungsverteilung können einerseits in Strahlungstemperaturdifferenzen oder andererseits als relative Verteilung der Empfindlichkeit der Bildelemente der Kamera und als relative Verteilung der Strahldichte der Objektpunkte des Strahlers angegeben werden.

4.3.1. Mathematischer Algorithmus der DRM

Im Folgenden wird exemplarisch eine Variante der DRM näher betrachtet, welche mit strahldichteproportionalen Größen als Eingangsgröße arbeitet und eine korrigierte relative Verteilung der Strahlung des Objekts ausgibt. Die folgende Beschreibung baut auf den Publikationen [14] und [15] auf. Die mathematischen Zusammenhänge der DRM werden im Folgenden beispielhaft anhand von 5x5-Matrizen dargelegt, also an einem Array mit 25 Einzeldetektoren. Dabei bilden die Matrizen P, S und Z die Eingangswerte und beinhalten strahldichteproportionale Werte. Die Eingangsmatrizen sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Jedes Element der Matrizen wird mit den Indizes i für die Zeilen ($i = 1 \dots n$) und j für die Spalten ($j = 1 \dots m$) beschrieben.

Für die Anwendung der DRM ist es notwendig, dass mögliche Offset-Werte der Bildelemente der IR-Kamera korrigiert sind und die IR-Kamera bei der Anwendung der DRM bei der Berechnung von Strahlungstemperaturdifferenzen kalibriert ist. Abbildung 4.5 zeigt den allgemeinen Ablauf der DRM in Form eines Flussdiagramms. Die einzelnen Berechnungsschritte werden im Folgenden erläutert.

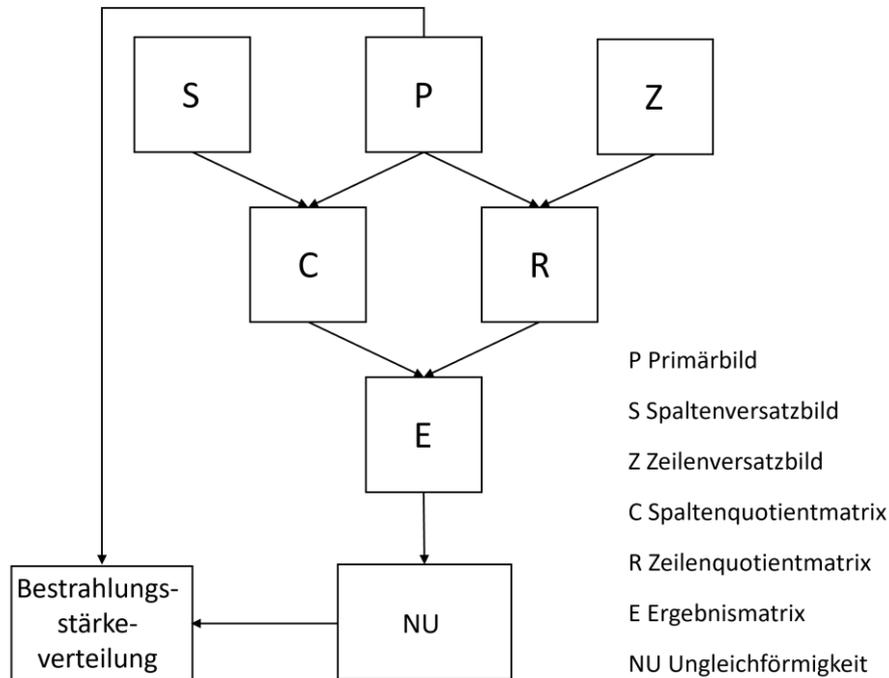


Abbildung 4.5: Allgemeines Vorgehen bei der DRM zur Korrektur der Ungleichförmigkeit von IR-Kameras. Erklärung der einzelnen Berechnungsschritte im Text.

Tabelle 4.1: P, S und Z als 5x5-Matrizen als Eingangsgrößen der DRM. In allen Matrizen sind die Elemente rot markiert, welche an derselben Position auf dem Objekt messen

P				
P _{1;1}	P _{1;2}	P _{1;3}	P _{1;4}	P _{1;5}
P _{2;1}	P _{2;2}	P _{2;3}	P _{2;4}	P _{2;5}
P _{3;1}	P _{3;2}	P _{3;3}	P _{3;4}	P _{3;5}
P _{4;1}	P _{4;2}	P _{4;3}	P _{4;4}	P _{4;5}
P _{5;1}	P _{5;2}	P _{5;3}	P _{5;4}	P _{5;5}

S				
S _{1;1}	S _{1;2}	S _{1;3}	S _{1;4}	S _{1;5}
S _{2;1}	S _{2;2}	S _{2;3}	S _{2;4}	S _{2;5}
S _{3;1}	S _{3;2}	S _{3;3}	S _{3;4}	S _{3;5}
S _{4;1}	S _{4;2}	S _{4;3}	S _{4;4}	S _{4;5}
S _{5;1}	S _{5;2}	S _{5;3}	S _{5;4}	S _{5;5}

Z				
Z _{1;1}	Z _{1;2}	Z _{1;3}	Z _{1;4}	Z _{1;5}
Z _{2;1}	Z _{2;2}	Z _{2;3}	Z _{2;4}	Z _{2;5}
Z _{3;1}	Z _{3;2}	Z _{3;3}	Z _{3;4}	Z _{3;5}
Z _{4;1}	Z _{4;2}	Z _{4;3}	Z _{4;4}	Z _{4;5}
Z _{5;1}	Z _{5;2}	Z _{5;3}	Z _{5;4}	Z _{5;5}

Das Detektorelement $P_{2,2}$ misst ein strahldichte proportionales Signal an der Stelle x auf dem betrachteten Objekt. Nach der horizontalen Verschiebung wird das Signal an derselben Stelle x auf dem Objekt vom Detektorelement $S_{2,1}$ detektiert. Nach der vertikalen Verschiebung wird der Wert erneut gemessen, jetzt jedoch von Detektorelement $Z_{1,2}$. Somit ergeben sich jeweils immer drei Messwerte für ein und dieselbe Position auf dem Objekt. Diese Signalwerte können anschließend ins Verhältnis gesetzt werden. Dazu wird aus P und S eine Spaltenquotientenmatrix C (Column) nach der folgenden Rechenvorschrift gebildet, wobei zunächst eine frei wählbare Bezugsspalte (B) gewählt werden muss.

$$c_{i,j} = \begin{cases} s_{i,j}/p_{i,j+1} & \text{für alle } c_{i,j} \text{ mit } j < B \\ 1 & \text{für alle } c_{i,j} \text{ mit } j = B \\ p_{i,j}/s_{i,j-1} & \text{für alle } c_{i,j} \text{ mit } j > B \end{cases} . \quad (4.9)$$

Analog wird aus P und Z eine Zeilenquotientenmatrix R (Row) gebildet, wobei nun eine Bezugszeile (b) gewählt wird, welche ebenfalls frei wählbar ist.

$$r_{i,j} = \begin{cases} z_{i,j}/p_{i+1,j} & \text{für alle } r_{i,j} \text{ mit } i < b \\ 1 & \text{für alle } r_{i,j} \text{ mit } i = b \\ p_{i,j}/z_{i-1,j} & \text{für alle } r_{i,j} \text{ mit } i > b \end{cases} . \quad (4.10)$$

Tabelle 4.2 zeigt C und R für das betrachtete Beispiel. In C weisen alle Elemente einer Zeile ein relatives Verhältnis, bezogen auf das Element der Bezugsspalte, in ihrer Zeile auf. Analog dazu weisen alle Elemente einer Spalte in R ein relatives Verhältnis, bezogen auf das Element der Bezugszeile, in ihrer Spalte auf.

Tabelle 4.2: Spaltenquotientenmatrix C mit frei wählbarer Bezugsspalte und Zeilenquotientenmatrix R mit frei wählbarer Bezugszeile.

C				
$C_{1;1}$	$C_{1;2}$	1	$C_{1;4}$	$C_{1;5}$
$C_{2;1}$	$C_{2;2}$	1	$C_{2;4}$	$C_{2;5}$
$C_{3;1}$	$C_{3;2}$	1	$C_{3;4}$	$C_{3;5}$
$C_{4;1}$	$C_{4;2}$	1	$C_{4;4}$	$C_{4;5}$
$C_{5;1}$	$C_{5;2}$	1	$C_{5;4}$	$C_{5;5}$

R				
$R_{1;1}$	$R_{1;2}$	$R_{1;3}$	$R_{1;4}$	$R_{1;5}$
$R_{2;1}$	$R_{2;2}$	$R_{2;3}$	$R_{2;4}$	$R_{2;5}$
1	1	1	1	1
$R_{4;1}$	$R_{4;2}$	$R_{4;3}$	$R_{4;4}$	$R_{4;5}$
$R_{5;1}$	$R_{5;2}$	$R_{5;3}$	$R_{5;4}$	$R_{5;5}$

Es ist vorteilhaft, sowohl die Bezugsspalte als auch die Bezugszeile mittig zu positionieren, weil es so in alle Richtungen die gleiche Anzahl an Berechnungsschritten zum Rand des Detektors bzw. des Bildes gibt. Das minimiert den Unsicherheitsbeitrag von eventuell auftretenden korrelierten Störgrößen. Die Gründe dafür werden in Kapitel 5 detailliert erläutert. Aus den gebildeten Quotienten-Matrizen ergibt sich eine Ergebnismatrix E mit einem definierten Bezugspunkt, welcher sich aus dem Kreuzungspunkt von Bezugsspalte und Bezugszeile ergibt. Zunächst werden die Elemente der Bezugsspalte und -zeile der Ergebnismatrix ermittelt (Tabelle 4.3):

$$e_i = b_j, = B = 1 \quad \text{für } i = b, j = B \quad (4.11)$$

$$e_{i=b, j=B+y} = e_{i=b, j=B+y-1} \cdot c_{i=b, j=B+y} \quad \text{für } 1 \leq y \leq m - B \quad (4.12)$$

$$e_{i=b, j=B-y} = e_{i=b, j=B-y+1} \cdot c_{i=b, j=B-y} \quad \text{für } 1 \leq y \leq B \quad (4.13)$$

$$e_{i=b+x, j=B} = e_{i=b+x, j=B+y} \cdot r_{i=b+x, j=B} \quad \text{für } 1 \leq x \leq n - b \quad (4.14)$$

$$e_{i=b-x, j=B} = e_{i=b-x+1, j=B} \cdot r_{i=b-x, j=B} \quad \text{für } 1 \leq x \leq b \quad (4.15)$$

ermittelt. Die Elemente der Bezugsspalte und -zeile werden aufeinander aufbauend berechnet. Anschließend werden die vier Quadranten der Ergebnismatrix E nach dem folgenden Schema mit Werten gefüllt:

$$e_{i,j} = (c_{i,j} \cdot e_{i,j+1} + r_{i,j} \cdot e_{i+1,j})/2 \quad \text{für } j < B \text{ und } i < b \quad (4.16)$$

$$e_{i,j} = (c_{i,j} \cdot e_{i,j+1} + r_{i,j} \cdot e_{i-1,j})/2 \quad \text{für } j < B \text{ und } i > b \quad (4.17)$$

$$e_{i,j} = (c_{i,j} \cdot e_{i,j-1} + r_{i,j} \cdot e_{i+1,j})/2 \quad \text{für } j > B \text{ und } i < b \quad (4.18)$$

$$e_{i,j} = (c_{i,j} \cdot e_{i,j-1} + r_{i,j} \cdot e_{i-1,j})/2 \quad \text{für } j > B \text{ und } i > b \quad (4.19)$$

Jedes Element der Ergebnismatrix weist ein, bezogen auf das Referenzelement, relatives Verhältnis auf. Die Ergebnismatrix E gibt die Ungleichförmigkeit der Kamera als Faktoren wieder.

Tabelle 4.3: Ergebnismatrix E als Ergebnis aus den Matrizen C und R von **Tabelle 4.2**.

E-Zwischenschritt					E				
		E _{1;3}			E _{1;1}	E _{1;2}	E _{1;3}	E _{1;4}	E _{1;5}
		E _{2;3}			E _{2;1}	E _{2;2}	E _{2;3}	E _{2;4}	E _{2;5}
E _{3;1}	E _{3;2}	1	E _{3;4}	E _{3;5}	E _{3;1}	E _{3;2}	1	E _{3;4}	E _{3;5}
		E _{4;3}			E _{4;1}	E _{4;2}	E _{4;3}	E _{4;4}	E _{4;5}
		E _{5;3}			E _{5;1}	E _{5;2}	E _{5;3}	E _{5;4}	E _{5;5}

Wird nun die Berechnungsformel für Detektor E_{1;1} aufgestellt, ergeben sich die folgenden Abhängigkeiten:

$$E_{1;1} = (C_{1;1} \cdot E_{1;2} + R_{1;1} \cdot E_{2;1})/2 \quad (4.20)$$

$$E_{1;1} = (C_{1;1} \cdot (C_{1;2} \cdot E_{1;3} + R_{1;2} \cdot E_{2;2})/2 + R_{1;1} \cdot (C_{2;1} \cdot E_{2;2} + R_{2;1} \cdot E_{3;1})/2)/2 \quad (4.21)$$

$$E_{1;1} = (C_{1;1} \cdot (C_{1;2} \cdot R_{1;3} \cdot E_{2;3} + R_{1;2} \cdot (C_{2;2} \cdot E_{2;3} + R_{2;2} \cdot E_{3;2})/2)/2 + R_{1;1} \cdot (C_{2;1} \cdot (C_{2;2} \cdot E_{2;3} + R_{2;2} \cdot E_{3;2})/2) + R_{2;1} \cdot C_{3;1} \cdot E_{3;2})/2)/2 \quad (4.22)$$

$$E_{1;1} = (C_{1;1} \cdot (C_{1;2} \cdot R_{1;3} \cdot R_{2;3} \cdot 1 + R_{1;2} \cdot (C_{2;2} \cdot E_{2;3} \cdot 1 + R_{2;2} \cdot C_{3;2} \cdot 1)/2)/2 + R_{1;1} \cdot (C_{2;1} \cdot (C_{2;2} \cdot R_{2;3} \cdot 1 + R_{2;2} \cdot C_{3;2} \cdot 1)/2) + R_{2;1} \cdot C_{3;1} \cdot C_{3;2} \cdot 1)/2)/2 \quad (4.23)$$

In Formel (4.23) besitzt E_{1;1} lediglich Abhängigkeiten von Elementen der Matrizen R und C. Diese können

wiederum mit den Gleichungen (4.9) und (4.10) nach den Eingangsmatrizen P, S und Z aufgelöst werden. Damit ergibt sich:

$$E_{1,1} = \frac{1}{2} \frac{S_{1,1}}{P_{1,2}} \left[\frac{S_{1,2} Z_{1,3} Z_{2,3}}{P_{1,3} P_{2,3} P_{3,3}} + \frac{1}{2} \frac{Z_{1,2}}{P_{2,2}} \left(\frac{S_{2,2} Z_{2,3}}{P_{2,3} P_{3,3}} + \frac{Z_{2,2} S_{3,2}}{P_{3,2} P_{3,3}} \right) \right] + \frac{1}{2} \frac{Z_{1,1}}{P_{2,1}} \left[\frac{Z_{2,1} S_{3,1} S_{3,2}}{P_{3,1} P_{3,2} P_{3,3}} + \frac{1}{2} \frac{S_{2,1}}{P_{2,2}} \left(\frac{S_{2,2} Z_{2,3}}{P_{2,3} P_{3,3}} + \frac{Z_{2,2} S_{3,2}}{P_{3,2} P_{3,3}} \right) \right]. \quad (4.24)$$

Die Gleichung (4.24) zur Berechnung des Eckdetektorelements $E_{1,1}$ dieser kleinen 5x5-Matrix verdeutlicht sehr gut, dass das Eckdetektorelement eine vom gewählten Referenzelement ausgehende Abhängigkeit von allen Detektorelementen seines Quadranten besitzt. Die Anzahl der Abhängigkeiten steigt mit zunehmender Anzahl von Detektorelementen. Durch die starke Verschachtelung kann es zu Fehlerfortpflanzungen hin zu den äußeren Detektorelementen kommen. Eine genauere Betrachtung erfolgt in Kapitel 5.

4.3.2. DRM bei der Verwendung von Strahlungstemperaturen

Wie schon am Anfang des Kapitels erwähnt, können zur Anwendung der DRM nicht nur strahldichteproporcionale Signale, sondern auch Strahlungstemperaturverteilungen als Eingangswerte verwendet werden. Bei der Verwendung von Strahlungstemperaturen verändert sich der vorab beschriebene Algorithmus insofern, dass die Eingangsmatrizen nicht ins Verhältnis gesetzt werden, sondern die jeweilige Differenz aus den Aufnahmen gebildet wird; ansonsten werden die Berechnungsschritte analog durchgeführt. Die Ergebnismatrix beinhaltet bei dieser Anwendung Strahlungstemperaturdifferenzen, die auf den gewählten Bezugspunkt bezogen werden. Jedoch beziehen sich die berechneten Ergebnisse nur auf die verwendete Strahlungstemperatur des Referenzpunkts und sind für abweichende Strahlungstemperaturen mit Unsicherheiten behaftet. Um diese Unsicherheiten zu minimieren, müssen die Strahlungstemperaturen in strahldichteproporcionale Werte umgerechnet werden, deshalb ergeben sich weitere Berechnungsschritte. Abbildung 4.6 zeigt das beschriebene Vorgehen bei der Verwendung von Strahlungstemperaturverteilungen als Eingangsgröße bei der DRM. Die folgende Beschreibung baut auf den Publikationen [14] und [15] auf. Zunächst wird die DRM bis zum Erhalt der Ergebnismatrix durchgeführt, anschließend wird mit Hilfe der erhaltenen Ergebnismatrix eine neue Primärmatrix p_1 berechnet:

$$p_{1\ i,j} = p_{i,j} - e_{i,j}. \quad (4.25)$$

Die Ergebnismatrix beinhaltet die ersten errechneten Korrekturwerte, welche nun auf die Primärmatrix angewendet wurden. Diese Korrekturwerte gelten nur für die jeweils ermittelte Strahlungstemperatur eines Bildelementes und müssen in Korrekturfaktoren umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt über die Bestimmung der resultierenden Strahldichten L_λ mit Hilfe der Planck-Funktion bei einer Schwerpunktwellenlänge λ :

$$L_\lambda = \frac{c_1}{\pi \Omega_0 \lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{n \lambda T}\right)} - 1}, \quad (4.26)$$

mit $\Omega_0 = 1$ sr. Dabei sind Ω_0 der Raumwinkel und c_1 und c_2 die Strahlungskonstanten. Damit wird es möglich, die Ungleichheit des Übertragungsverhaltens des Bildaufnahmesystems (in erster Näherung) mit Gültigkeit

für einen weiten Messbereich der Strahlungstemperatur zu korrigieren.

Für die Berechnung können die beiden ersten Terme der Planck-Funktion entfallen, da jeweils die Verhältnisse der resultierenden Strahldichten gebildet werden. Somit ergibt sich ein strahldichte-proportionaler Wert:

$$X_{\lambda} = \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{n\lambda T}\right)} - 1}. \quad (4.27)$$

Für die Primärmatrix P und die Matrix P₁ ergibt sich:

$$X_{\lambda}(p_{i,j}) = \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{n\lambda T(p_{i,j})}\right)} - 1}; \quad (4.28)$$

$$X_{\lambda}(p_{1\ i,j}) = \frac{1}{e^{\left(\frac{c_2}{n\lambda T(p_{1\ i,j})}\right)} - 1}; \quad (4.29)$$

woraus die Korrekturfaktoren $k_0(p_{i,j})$ berechnet werden können:

$$k_0(p_{i,j}) = \frac{X_{\lambda}(p_{i,j})}{X_{\lambda}(p_{1\ i,j})}. \quad (4.30)$$

Die Korrekturfaktoren werden auf die berechneten Strahldichten von Gleichung (4.26) für P, S und Z angewendet:

$$L_{k_1,\lambda}(p_{i,j}) = \frac{L_{\lambda}(p_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}; \quad (4.31)$$

$$L_{k_1,\lambda}(s_{i,j}) = \frac{L_{\lambda}(s_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}; \quad (4.32)$$

$$L_{k_1,\lambda}(z_{i,j}) = \frac{L_{\lambda}(z_{i,j})}{k_0(p_{i,j})}. \quad (4.33)$$

Die so korrigierten Strahldichten werden anschließend über die inverse Planck-Gleichung (4.34) zurück in Strahlungstemperaturen umgewandelt.

$$T_{\lambda} = \frac{c_2}{n\lambda \ln(c_1 / (L_{\lambda}(p_{i,j}) \pi \Omega_0 n^2 \lambda^5 + 1))}. \quad (4.34)$$

Es ergeben sich die korrigierten Matrizen P_{k1} , S_{k1} und Z_{k1} , welche als Eingangsgrößen für einen erneuten DRM-Zyklus fungieren. Diese Iteration kann so lange durchgeführt werden, bis die Differenz zwischen dem

errechneten Primärbild des aktuellen Iterationsschritts und dem Primärbild des vorherigen Iterationsschritts kleiner als ein vorab definierter Grenzwert ist. In der praktischen Anwendung haben sich drei Berechnungszyklen als ausreichend erwiesen.

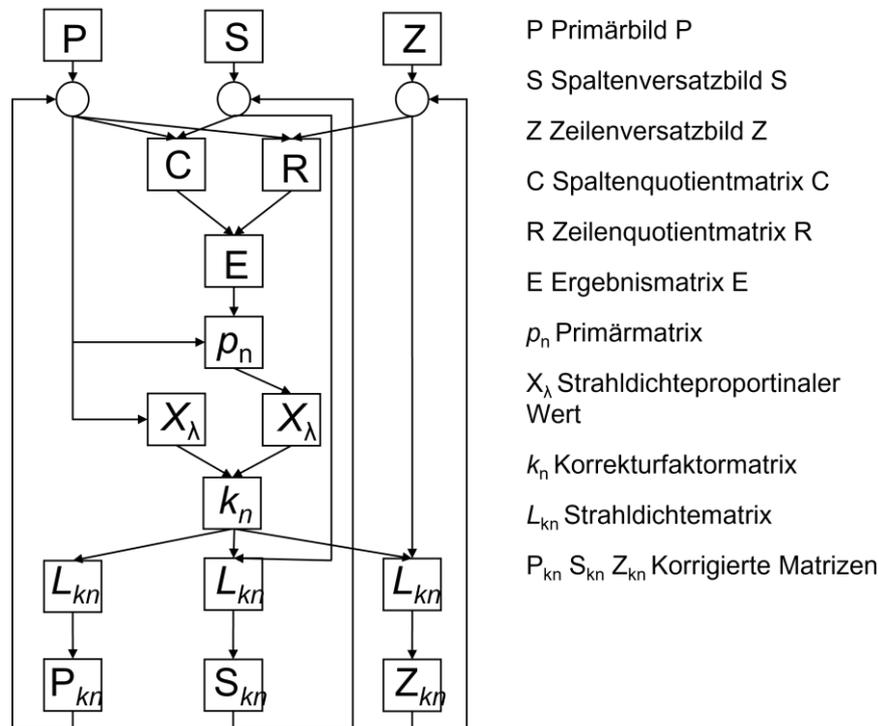


Abbildung 4.6: Allgemeines Vorgehen bei der Verwendung von Strahlungstemperaturen als Eingangsgrößen bei der DRM zur Korrektur der Ungleichförmigkeit von IR-Kameras. Erklärung der einzelnen Berechnungsschritte im Text.

4.4. Beispiel

4.4.1. Theoretisches Beispiel: Strahler mit homogener Strahlungstemperatur und Kamera mit inhomogener Empfindlichkeit

Im Folgenden wird eine Kombination aus Strahler und Kamera betrachtet, bei der der Strahler eine ideal homogene Temperatur aufweist und für die Kamera eine vorgegebene Ungleichförmigkeit angenommen wird. Dazu soll der Algorithmus einer Variante der DRM, welche mit strahldichteproportionalen Werten als Eingangswerten arbeitet, verwendet werden. Theoretisch ist eine Anwendung der DRM an einem homogenen Strahler nicht nötig, weil sich die Ungleichförmigkeit direkt ergibt. Jedoch ist sie zur Einführung des Algorithmus ein gutes Beispiel. Der Strahler besteht aus einer 15 x 15- Matrix und erzeugt eine völlig homogene Bestrahlungsstärke E von 100 W/m² auf den Detektorelementen der Kamera. Die IR-Kamera bekommt in diesem Beispiel eine fiktive Ungleichförmigkeit mit verschiedenen Strukturen, welche als Faktoren den aufgenommenen Bildern überlagert werden (Tabelle 4.4). Es wurden unterschiedliche Strukturen gewählt, um die Auswirkungen auf die DRM zu untersuchen.

Tabelle 4.4: Normierte Ungleichförmigkeitsmatrix einer IR-Kamera. Inhomogenitäten sind zur besseren Orientierung dunkel hinterlegt.

1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	1	1	1	1	1	1	1,5	1	1,5	1	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1	1,5	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1	1,5	1	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabelle 4.5: Matrix P als Ergebnis (multiplikative Überlagerung) der homogenen Bestrahlungsstärke E und der Kamerainhomogenität NU von Tabelle 4.4. Sie dient zusammen mit den Aufnahmen S und Z als Eingangsgrößen für die DRM.

100	200	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
200	200	200	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	200	100	100	100	100	100	100	150	100	150	100	150	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	150	150	150	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	150	150	100	150	150	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	150	150	150	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	150	100	150	100	150	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	200	200	200	100	100	100	100	100	100	100	200	100	100	100
100	200	100	100	100	100	100	100	100	100	100	200	100	100	100
100	200	200	200	100	100	100	100	100	100	100	200	100	100	100
100	100	100	200	100	100	100	100	100	100	100	200	100	100	100
100	200	200	200	100	100	100	100	100	100	100	200	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Das Kamerabild zeigt eine Überlagerung der detektierten Bestrahlungsstärkeverteilung und der Inhomogenitäten der IR-Kamera. Deshalb werden die Matrizen E und NU multipliziert und es ergibt sich die Matrix P (Tabelle 4.5).

Für die DRM muss die IR-Kamera vor der Strahlungsquelle verschoben oder geschwenkt werden, so dass die aufgenommenen Bilder um mindestens ein Detektorelement oder ein ganzzahliges Vielfaches versetzt voneinander sind. Der auf P bezogene Versatz von S muss entlang der Zeilen des FPAs und der von Z entlang

der Spalten des FPAs erfolgen. Beide Aufnahmen S und Z müssen den gleichen Versatz zu P haben. In diesem Beispiel handelt es sich um einen vollkommen homogenen Strahler. Deshalb zeigen die versetzten Aufnahmen S und Z eine gleichförmige und nur versetzte Verteilung gegenüber P und werden nicht zusätzlich gezeigt. Die drei Aufnahmen P, S und Z dienen als Eingangsgrößen für die DRM. Nach dem in Tabelle 4.5 beschriebenen Schema ergeben sich die Quotientenmatrizen C (Tabelle 4.6) und R (Tabelle 4.7).

Tabelle 4.6: Oberer rechter Quadrant der Quotientenmatrix C. a) Rechenvorschrift und Ergebnisse, b) daraus folgende Elemente.

a)

C						
$P_{1;9}/S_{1;8} =$ 100/100 = 1	$P_{1;10}/S_{1;9} =$ 100/100 = 1	$P_{1;11}/S_{1;10} =$ 100/100 = 1	$P_{1;12}/S_{1;11} =$ 100/100 = 1	$P_{1;13}/S_{1;12} =$ 100/100 = 1	$P_{1;14}/S_{1;13} =$ 100/100 = 1	$P_{1;15}/S_{1;14} =$ 100/100 = 1
$P_{2;9}/S_{2;8} =$ 100/100 = 1	$P_{2;10}/S_{2;9} =$ 100/100 = 1	$P_{2;11}/S_{2;10} =$ 100/100 = 1	$P_{2;12}/S_{2;11} =$ 100/100 = 1	$P_{2;13}/S_{2;12} =$ 100/100 = 1	$P_{2;14}/S_{2;13} =$ 100/100 = 1	$P_{2;15}/S_{2;14} =$ 100/100 = 1
$P_{3;9}/S_{3;8} =$ 150/100 = 1.5	$P_{3;10}/S_{3;9} =$ 100/150 = 0.67	$P_{3;11}/S_{3;10} =$ 150/100 = 1.5	$P_{3;12}/S_{3;11} =$ 100/150 = 0.67	$P_{3;13}/S_{3;12} =$ 150/100 = 1.5	$P_{3;14}/S_{3;13} =$ 100/150 = 0.67	$P_{3;15}/S_{3;14} =$ 100/100 = 1
$P_{4;9}/S_{4;8} =$ 100/100 = 1	$P_{4;10}/S_{4;9} =$ 150/100 = 1.5	$P_{4;11}/S_{4;10} =$ 100/100 = 1	$P_{4;12}/S_{4;11} =$ 100/100 = 1	$P_{4;13}/S_{4;12} =$ 100/150 = 0.67	$P_{4;14}/S_{4;13} =$ 100/100 = 1	$P_{4;15}/S_{4;14} =$ 100/100 = 1
$P_{5;9}/S_{5;8} =$ 150/100 = 1.5	$P_{5;10}/S_{5;9} =$ 100/100 = 1	$P_{5;11}/S_{5;10} =$ 100/150 = 0.67	$P_{5;12}/S_{5;11} =$ 150/100 = 1.5	$P_{5;13}/S_{5;12} =$ 100/100 = 1	$P_{5;14}/S_{5;13} =$ 100/150 = 0.67	$P_{5;15}/S_{5;14} =$ 100/100 = 1
$P_{6;9}/S_{6;8} =$ 100/100 = 1	$P_{6;10}/S_{6;9} =$ 150/100 = 1.5	$P_{6;11}/S_{6;10} =$ 100/100 = 1	$P_{6;12}/S_{6;11} =$ 100/100 = 1	$P_{6;13}/S_{6;12} =$ 100/150 = 0.67	$P_{6;14}/S_{6;13} =$ 100/100 = 1	$P_{6;15}/S_{6;14} =$ 100/100 = 1
$P_{7;9}/S_{7;8} =$ 150/100 = 1.5	$P_{7;10}/S_{7;9} =$ 100/150 = 0.67	$P_{7;11}/S_{7;10} =$ 150/100 = 1.5	$P_{7;12}/S_{7;11} =$ 100/150 = 0.67	$P_{7;13}/S_{7;12} =$ 150/100 = 1.5	$P_{7;14}/S_{7;13} =$ 100/150 = 0.67	$P_{7;15}/S_{7;14} =$ 100/100 = 1

b)

C						
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1.5	0.67	1.5	0.67	1.5	0.67	1
1	1.5	1	1	0.67	1	1
1.5	1	0.67	1.5	1	0.67	1
1	1.5	1	1	0.67	1	1
1.5	0.67	1.5	0.67	1.5	0.67	1

Tabelle 4.7: Oberer rechter Quadrant der Quotientenmatrix C. a) Rechenvorschrift und Ergebnisse, b) daraus folgende Elemente.

a)

R						
$P_{1;9}/Z_{1;8} =$ 100/100 = 1	$P_{1;10}/Z_{1;9} =$ 100/100 = 1	$P_{1;11}/Z_{1;10} =$ 100/100 = 1	$P_{1;12}/Z_{1;11} =$ 100/100 = 1	$P_{1;13}/Z_{1;12} =$ 100/100 = 1	$P_{1;14}/Z_{1;13} =$ 100/100 = 1	$P_{1;15}/Z_{1;14} =$ 100/100 = 1
$P_{2;9}/Z_{2;8} =$ 100/150 = 0.67	$P_{2;10}/Z_{2;9} =$ 100/100 = 1	$P_{2;11}/Z_{2;10} =$ 100/150 = 0.67	$P_{2;12}/Z_{2;11} =$ 100/100 = 1	$P_{2;13}/Z_{2;12} =$ 100/150 = 0.67	$P_{2;14}/Z_{2;13} =$ 100/100 = 1	$P_{2;15}/Z_{2;14} =$ 100/100 = 1
$P_{3;9}/Z_{3;8} =$ 150/100 = 1.5	$P_{3;10}/Z_{3;9} =$ 100/150 = 0.67	$P_{3;11}/Z_{3;10} =$ 100/100 = 1	$P_{3;12}/Z_{3;11} =$ 100/150 = 0.67	$P_{3;13}/Z_{3;12} =$ 150/100 = 1.5	$P_{3;14}/Z_{3;13} =$ 100/100 = 1	$P_{3;15}/Z_{3;14} =$ 100/100 = 1
$P_{4;9}/Z_{4;8} =$ 100/150 = 0.67	$P_{4;10}/Z_{4;9} =$ 100/100 = 1	$P_{4;11}/Z_{4;10} =$ 150/100 = 1.5	$P_{4;12}/Z_{4;11} =$ 100/100 = 1	$P_{4;13}/Z_{4;12} =$ 100/150 = 0.67	$P_{4;14}/Z_{4;13} =$ 100/100 = 1	$P_{4;15}/Z_{4;14} =$ 100/100 = 1
$P_{5;9}/Z_{5;8} =$ 150/100 = 1.5	$P_{5;10}/Z_{5;9} =$ 100/100 = 1	$P_{5;11}/Z_{5;10} =$ 100/150 = 0.67	$P_{5;12}/Z_{5;11} =$ 100/100 = 1	$P_{5;13}/Z_{5;12} =$ 150/100 = 1.5	$P_{5;14}/Z_{5;13} =$ 100/100 = 1	$P_{5;15}/Z_{5;14} =$ 100/100 = 1
$P_{6;9}/Z_{6;8} =$ 100/150 = 0.67	$P_{6;10}/Z_{6;9} =$ 150/100 = 1.5	$P_{6;11}/Z_{6;10} =$ 100/100 = 1	$P_{6;12}/Z_{6;11} =$ 150/100 = 1.5	$P_{6;13}/Z_{6;12} =$ 100/150 = 0.67	$P_{6;14}/Z_{6;13} =$ 100/100 = 1	$P_{6;15}/Z_{6;14} =$ 100/100 = 1
$P_{7;9}/Z_{7;8} =$ 150/100 = 1.5	$P_{7;10}/Z_{7;9} =$ 100/100 = 1	$P_{7;11}/Z_{7;10} =$ 150/100 = 1.5	$P_{7;12}/Z_{7;11} =$ 100/100 = 1	$P_{7;13}/Z_{7;12} =$ 150/100 = 1.5	$P_{7;14}/Z_{7;13} =$ 100/100 = 1	$P_{7;15}/Z_{7;14} =$ 100/100 = 1

b)

R						
1	1	1	1	1	1	1
0.67	1	0.67	1	0.67	1	1
1.5	0.67	1	0.67	1.5	1	1
0.67	1	1.5	1	0.67	1	1
1.5	1	0.67	1	1.5	1	1
0.67	1.5	1	1.5	0.67	1	1
1.5	1	1.5	1	1.5	1	1

Aus den gebildeten Quotientenmatrizen C und R ergibt sich die Ergebnismatrix E mit einem definierten Bezugspunkt, welcher sich aus der Bezugsspalte und der Bezugszeile ergibt (Tabelle 4.8).

Dazu werden zunächst die Elemente der Bezugsspalte und der Bezugszeile der Ergebnismatrix ermittelt. Anschließend werden die vier Quadranten gefüllt. Die Ergebnismatrix E von Tabelle 4.8 zeigt nun die Ungleichförmigkeit der Bildelemente des Bildaufnahmesystems zum Bezugspunkt der Ergebnismatrix E.

Tabelle 4.8: Berechnete Ungleichförmigkeitsmatrix E. Werte normiert auf den Bezugspunkt (hell). Dunkel: Reproduzierte Struktur der vorgegebenen Ungleichförmigkeit der Kamera.

E

1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	1	1	1	1	1	1	1,5	1	1,5	1	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1	1,5	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1,5	1	1,5	1	1,5	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

In dem sehr einfachen Beispiel entspricht E der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera.

In diesem ersten Beispiel wurde ein Strahler mit einer völlig homogenen Strahldichtevertellung angenommen, der eine völlig homogene Bestrahlungsstärkeverteilung auf dem Detektorarray erzeugt. Solche Strahler stehen in der Regel nicht zur Verfügung, besonders wenn größere Gesichtsfelder von IR-Kameras simultan ausgeleuchtet werden sollen. In diesem Beispiel hatte der Referenzpunkt in der Ungleichförmigkeitsverteilung der IR-Kameras einen Faktor von eins. Die DRM liefert relative Verteilungen in Bezug auf diesen Referenzpunkt. Deshalb sollte bei praktischen Anwendungen der DRM dieser Referenzpunkt vor einem hochwertigen Strahler kalibriert werden. Fehler im Anzeigewert des Referenzpunktes bei einer Kameraaufnahme würden sich bei der Angabe von absoluten Werten auf alle anderen Bildelemente übertragen.

4.4.2. Praktisches Beispiel: Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahler und MCT-IR-Kamera

Es soll hier noch einmal die Messung der IR-Kamera am Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahler aus Abbildung 4.1 betrachtet werden. Mit diesem Messaufbau wurden drei zueinander verschobene Aufnahmen getätigt und die DRM durchgeführt. Abbildung 4.7 zeigt die ermittelte Ungleichförmigkeit der verwendeten IR-Kamera als Strahlungstemperaturdifferenzenbild (a), die errechnete Strahlungstemperaturverteilung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahler (b) und zum Vergleich die Originalaufnahme von Abbildung 4.1 (c). Die

Bilder 4.7 (a) und (b) sind auf ein Referenzbildelement im Zentrum der Aufnahme normiert. In der errechneten Ungleichförmigkeit (Abbildung (a)) sind die Strukturen zu erkennen, welche sind in der originalen Aufnahme (c) gezeigt haben. Im rechten Teil des Bildes (a) außerhalb der Apertur des Strahlers zeichnen sich zusätzliche Strukturen ab. Die Ursache dieser Strukturen sind Rauschprozesse, weil sich die Umgebungstemperatur knapp unterhalb des Messbereichs der IR-Kamera befunden haben. Die Auswirkungen von Rauschprozessen werden detailliert im Kapitel 5 behandelt.

(a)

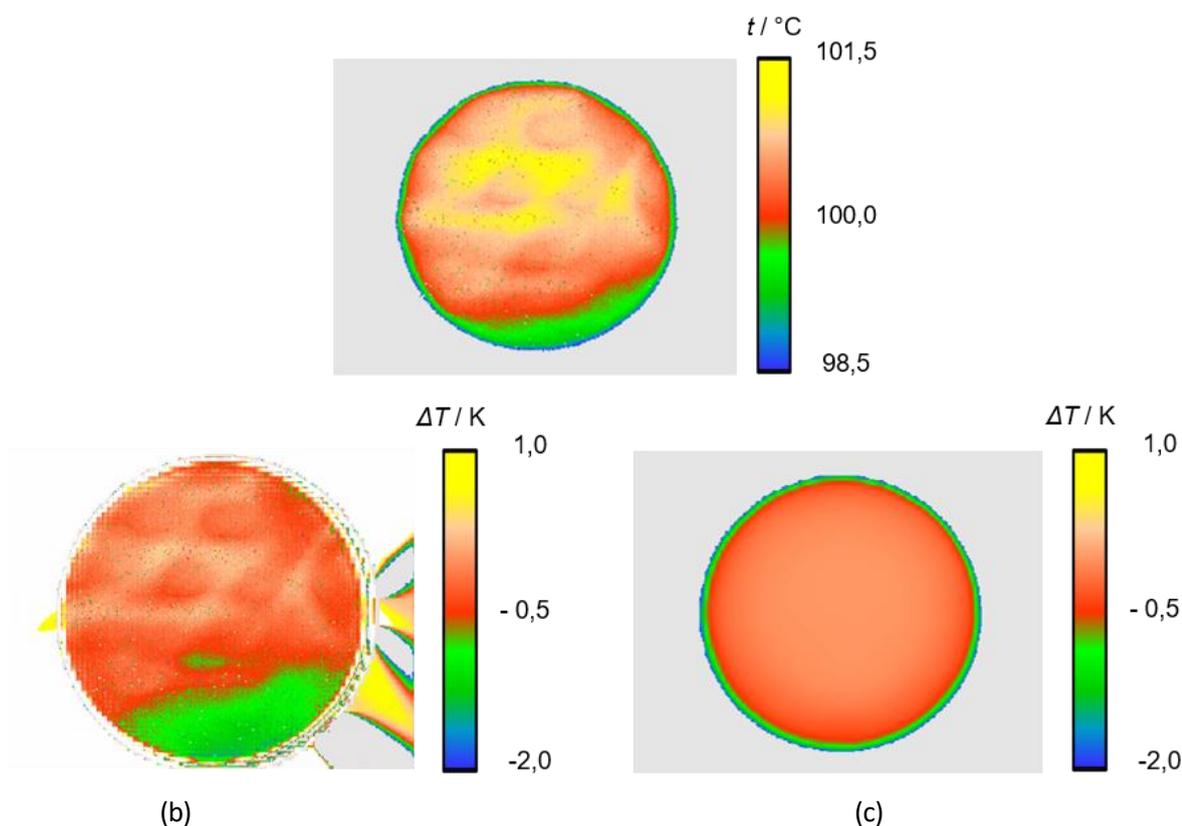


Abbildung 4.7: (a) Originalaufnahme der Kamera von Abbildung 4.1, (b) berechnetes Differenzbild der Ungleichförmigkeit der verwendeten IR-Kamera von Abbildung 4.1 beim Betrachten eines Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahler bei 100 °C nach Anwendung der DRM. Apertur des Strahlers 60 mm, Abstand zwischen Kamera und Apertur 150 mm, (c) berechnete Strahlungstemperaturverteilung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers.

Es ist zu erkennen, dass die ermittelte Strahlungstemperaturverteilung am Boden des Strahlers nach Anwendung der DRM und somit nach der Korrektur der Ungleichförmigkeit deutlich homogener ist. Die Strukturen aus Abbildung 4.1 sind nicht länger zu erkennen. In beiden Aufnahmen wurde in einem Feld von 100 x 100 Bildelementen um das Zentrum sowohl die maximalen Strahlungstemperaturdifferenz als auch die Standardabweichung der Strahlungstemperatur von 99% der Anzeigewerte ermittelt und in Tabelle 4.9 gegenübergestellt. Die maximale Strahlungstemperaturdifferenz liegt nach der Anwendung der DRM in dem erwarteten Bereich unter 100 mK. Die Standardabweichung, welche in dieser Arbeit (bei homogenen

Strahlungsquellen) als Maß zur Einschätzung der Ungleichförmigkeit verwendet wird, hat sich um einen Faktor von 26 verringert.

Tabelle 4.9: Vergleich der ermittelten maximalen Strahlungstemperaturdifferenz und der Standardabweichung der Strahlungstemperatur in einem Feld von 100 x 100 Bildelementen im Zentrum der Aufnahmen vor (Abbildung 4.1) und nach (Abbildung 4.7b) Anwendung der DRM. Strahlungstemperatur von 100 °C. Betrachtet wurden 99 % der Anzeigewerte.

Parameter	Ohne DRM	Mit DRM
Max. Strahlungstemperaturdifferenz [K]	1,183	0,082
Standardabweichung der Strahlungstemperatur [K]	0,416	0,016

4.4.3. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Größe der Ungleichförmigkeit UN von Infrarotkameras und deren Ursachen beschrieben. Grundsätzlich lassen sich zwei Methoden zur Korrektur der Ungleichförmigkeit unterscheiden, die referenzbasierten und die szenenbasierten Methoden. Zu letzteren gehört die Datenreferenzmethode, die in dieser Arbeit angewendet wurde. Bei dieser werden drei zueinander verschobene Aufnahmen einer IR-Kamera benötigt werden. Der mathematische Algorithmus wurde beschrieben und anhand eines Beispiels gezeigt, dass sich vorgegebene Ungleichförmigkeiten aus einer Aufnahme extrahieren lassen. In einem Anwendungsbeispiel wurde die Wichtigkeit der Korrektur der Ungleichförmigkeit dargelegt, in dem sich die Standardabweichung, welche als Maß für die Einschätzung der Homogenität von Strahlungstemperaturverteilungen verwendet wird, um einen Faktor von 26 verringert hat. Damit wurde das große Potenzial der DRM für die Korrektur der Ungleichförmigkeit von IR-Kameras gezeigt.

5. Der Einfluss von Störgrößen auf das Ergebnis der DRM

In diesem Kapitel soll der Einfluss von realen und damit nicht idealen messtechnischen Bedingungen und nicht idealen Kameraeigenschaften auf das Ergebnis der DRM untersucht werden. Diese nicht idealen Bedingungen bei der Anwendung der DRM werden hier als Störgrößen bezeichnet. Der Einfluss der Störgröße wird zunächst theoretisch betrachtet bzw. simuliert.

In Abschnitt 5.1 wird betrachtet, welche Auswirkung eine nicht ideale Verschiebung der Kamera vor der Strahlungsquelle hat. Hierbei handelt es sich um eine nicht ideale messtechnische Bedingung für die DRM. Abschnitt 5.2 beschreibt dann den Einfluss einer nicht linearen Detektorkennlinie der einzelnen Detektorelemente des Kameraempfängers auf den Geltungsbereich der DRM. Es handelt sich hier um eine nicht ideale Kameraeigenschaft. In Abschnitt 5.3 wird schließlich der Einfluss des zeitlichen Rauschens des Messsignals auf die DRM betrachtet. Das Rauschen der Messwerte der einzelnen Detektorelemente der Kamera beruht sowohl auf dem Rauschen der beobachteten Strahlungsquelle als auch auf Rauschprozessen innerhalb der Kamera. Hier überlagern sich nicht ideale messtechnische Bedingungen mit nicht idealen Kameraeigenschaften. Welche Rauschquelle den Rauschprozess dominiert, hängt stark von der verwendeten Strahlungsquelle und dem verwendeten Kameratyp ab.

Abschnitt 5.4 befasst sich mit dem Einfluss einer Drift in der Temperaturanzeige der Messwerte der einzelnen Detektorelemente der Kamera während der Durchführung der DRM. Eine solche Temperaturdrift kann wie das Rauschen seinen Ursprung sowohl in der verwendeten Strahlungsquelle als auch im Ansprechverhalten der Kamera haben. In der Praxis zeigt sich jedoch meist, dass bei der Beobachtung einer hochwertigen Strahlungsquelle mit einer ungekühlten Kamera auf der Basis eines Mikrobolometerarrays die Veränderung des Ansprechverhaltens der Kamera die dominierende Driftquelle ist. In Abschnitt 5.5 wird die Fehlerfortpflanzung im Rechenprozess der DRM mit Hilfe von Simulationsrechnungen nachvollzogen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Entwicklung von Methoden zur Minimierung des Einflusses von Rauschen und Drift auf das Ergebnis der DRM. Die entwickelten Methoden werden vorgestellt und jeweils an einem praktischen Beispiel angewendet.

5.1. Festlegung der Simulationsparameter

Für eine bessere Vergleichbarkeit des Einflusses der unterschiedlichen Störgrößen auf die DRM werden hier vorab typische Simulationsparameter definiert. Dabei soll zwischen zwei verschiedenen IR-Kameratypen, den gekühlten, temperaturstabilisierten und den ungekühlten, nicht temperaturstabilisierten IR-Kameras, unterschieden werden. Die jeweiligen Eingangsparameter für die Simulationen sind in Tabelle 5.1 angegeben und werden wie folgt definiert:

- Die Detektoren bestehen dabei aus einem Array, das 200 x 200 Detektorelemente umfasst.
- Die Inhomogenität des Ansprechverhaltens der Kamera (Kamerainhomogenität) wird als die doppelte Standardabweichung σ einer Normalverteilung um einen Mittelwert definiert, in dem, bei Beobachtung einer völlig homogenen Strahlungsquelle, 95 % der Anzeigewerte aller Detektorelemente liegen.
- Analog dazu wird das zeitliche Temperaturrauschen im Bild einer Kamera als die doppelte Standardabweichung σ_R einer Normalverteilung um einen Mittelwert definiert, in dem 95 % der Anzeigewerte aller Detektorelemente liegen.
- Die zeitliche Drift der Temperaturanzeige wird als die Differenz der über den Detektor gemittelten Temperaturanzeigewerte zweier aufeinanderfolgender Aufnahmen einer Strahlungsquelle mit

konstanter Temperatur definiert. Dabei basiert der für die Simulationen verwendete Referenzwert auf praktischen Erfahrungswerten aus Messungen an verschiedenen Kamerasystemen während der Arbeit.

- Das entscheidende Maß zur Bestimmung der Auswirkung von Störgrößen auf das Ergebnis der DRM ist die nach der Durchführung der DRM verbleibende Ungleichförmigkeit der IR-Kamera. Dafür wird die doppelte Standardabweichung σ_{koriert} der Temperaturdifferenzen, die 95 % der Anzeigewerte des gesamten DRM-korrigierten Kamerabildes erfasst, ermittelt.

In dieser Arbeit wurde eine automatische Positioniereinheit verwendet, so dass maximal 5 s zwischen zwei Aufnahmen lagen. Bei einer manuellen Positionierung können die Zeitabstände zwischen zwei Aufnahmen länger ausfallen. Homogene Strahler werden als Strahlungsquellen definiert, welche über die gesamte strahlende Fläche eine identische Strahlungstemperatur und damit eine konstante Strahldichte aufweisen.

Tabelle 5.1: Simulationsparameter zum Vergleich der beiden Kameratypen.

Parameter	Gekühlte, temperaturstabilisierte IR-Kamera	Ungekühlte, nicht temperaturstabilisierte IR-Kamera
Detektorfläche: Anzahl der Detektorelemente	200 x 200	200 x 200
Kamerainhomogenität $2x \sigma_I$ [mK] bei 100 °C	400	1000
Temperaturrauschen $2x \sigma_R$ [mK] bei 400 °C	100	200
Temperaturdrift während der Aufnahme von 3 versetzten Bildern [mK]	50	200

5.2. Einfluss der Positioniergenauigkeit

Die DRM beruht auf einer Verschiebung oder Schwenkung der IR-Kamera vor einer Strahlungsquelle und der Aufnahme mehrerer Bilder der Strahlungsquelle. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens war im Abschnitt 4.2 gegeben worden. Der Versatz zwischen dem Primärbild und dem Spaltenversatzbild muss identisch zum Versatz zwischen dem Primärbild und dem Zeilenversatzbild sein und mindestens ein Bildelement bzw. ein Vielfaches eines Bildelements betragen. Die Realisierung dieser genauen Verschiebung ist in der Praxis unter Umständen nicht immer möglich. Wird zum Beispiel eine IR-Kamera ohne Optik eingesetzt, um einen parallelen Strahlengang zu untersuchen, so ergibt sich bei einem Pitch von 30 μm auf dem Detektorarray auch ein geforderter Versatz von 30 μm bei einer Verschiebung um ein Bildelement. Dies stellt eine hohe Anforderung an das verwendete Positioniersystem dar.

Typische Temperaturhomogenitäten über die strahlende Fläche, wie sie sich mit IR-Kalibrierstahlern technisch realisieren lassen, werden in der VDI/VDE Richtlinie 3511 Blatt 6 [19] beschrieben. Solche Strahler weisen bei einer strahlenden Fläche von bis zu 400 mm x 400 mm eine typische Strahlungstemperaturhomogenität mit einer maximalen Abweichung von $\pm 0,2$ K bei 100 °C Strahlungstemperatur, bezogen auf den Mittelwert der Strahlungstemperatur, auf. Die Strahlungstemperaturinhomogenität ist über die gesamte strahlende Fläche verteilt und es gibt in der Regel auf Grund von Konvektion und Wärmeleitung keine un stetigen Änderungen in der Strahlungstemperatur. Abbildung 5.1 zeigt eine simulierte, typische Strahlungstemperaturverteilung eines in [19] beschriebenen

Kalibrierstrahlers.

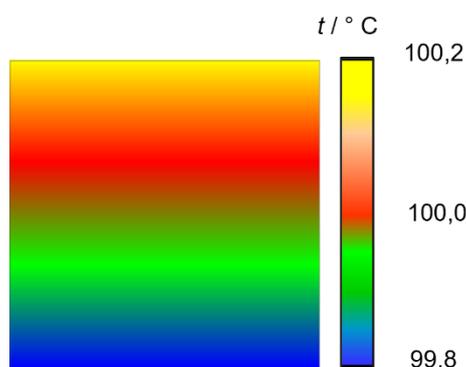


Abbildung 5.1: Simulierte Strahlungstemperaturverteilung eines typischen Kalibrierstrahlers gemäß VDI/VDE Richtlinie 3511 Blatt 4.6 [19], der bei 100 °C betrieben wird und aufgrund von Konvektion einen Temperaturanstieg von unten nach oben aufweist.

Die einzelnen Detektorelemente einer IR-Kamera integrieren über die beobachteten Strahlungstemperaturen, der auf sie projizierten Strahlerteilfläche. Bei einer unpräzisen Verschiebung der Kamera vor dem Strahler würden die drei Detektorelemente, welche im Rahmen der DRM zueinander ins Verhältnis gesetzt werden, jeweils eine um den Fehler des Versatzes abweichende Teilfläche des Strahlers betrachten. Dieser Fall wird an der in Abbildung 5.1 dargestellten Strahlungstemperaturverteilung untersucht. Dazu soll eine IR-Kamera horizontal um 1 Bildelement und vertikal um 1,5 Bildelemente verschoben werden. Die mit kameratypischen Werten simulierte Ungleichförmigkeit der ungekühlten, nicht temperaturstabilisierten IR-Kamera ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die dargestellten Werte repräsentieren die in Tabelle 5.1 festgelegten Grenzen.

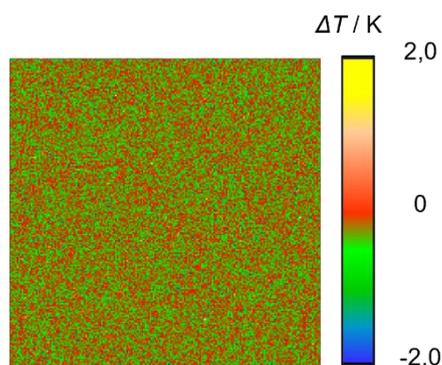


Abbildung 5.2: Mit den Festlegungen aus Tabelle 5.1 simulierte Ungleichförmigkeit einer ungekühlten, nicht temperaturstabilisierten IR-Kamera vor Anwendung der DRM.

Ohne die Anwendung der DRM würde die Kamera mit der in Abbildung 5.1 dargestellten Strahlungstemperaturverteilung des Strahlers abgeglichen werden und anschließend die in Abbildung 5.3 links dargestellte Ungleichförmigkeit ausweisen. In der linken Darstellung ist erkennbar, dass die Ungleichförmigkeit der am Strahler abgeglichenen IR-Kamera das Negativ der Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung des Strahlers ist. Die mit der DRM ermittelte Ungleichförmigkeit der IR-

Kamera ist in Abbildung 5.3 rechts dargestellt. Aufgrund der unpräzisen vertikalen Verschiebung weist sie eine Abweichung von der in Abbildung 5.2 dargestellten tatsächlichen Ungleichförmigkeit auf, welche ausgehend vom Referenzbildelement zum unteren und oberen Rand des Arrays zunimmt.

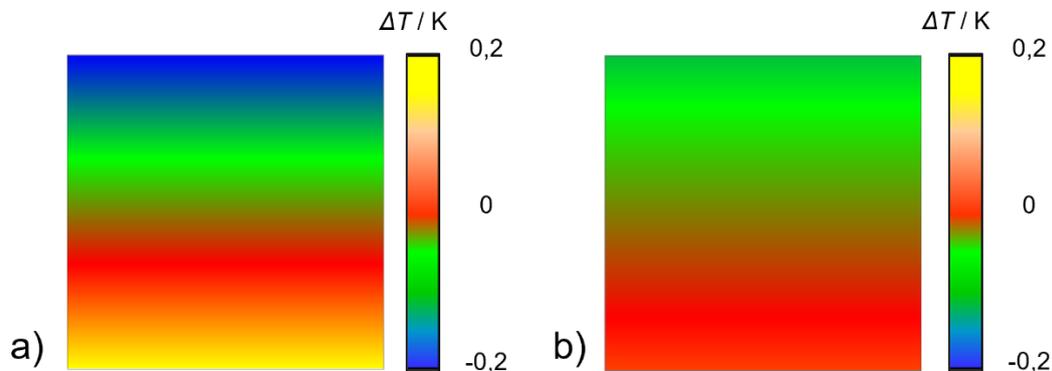


Abbildung 5.3: a) Ungleichförmigkeit der IR-Kamera nach Abgleich mit einem Strahler gemäß Abbildung 5.1 *ohne* Anwendung der DRM. b) Ungleichförmigkeit der IR-Kamera nach Abgleich am selben Strahler *mit* Anwendung der DRM bei ungenauer vertikaler Verschiebung.

Durch die unpräzise Verschiebung kann die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera mit der DRM nicht völlig korrekt ermittelt werden, jedoch ist mit der DRM in Bezug auf einen herkömmlichen Abgleich vor demselben Strahler eine deutliche Verbesserung um einen Faktor 2 erkennbar. Inhomogenitäten des Strahlers in der Größenordnung von $\pm 0,2$ K bei 100 °C Strahlungstemperatur haben bei einer ungenauen Verschiebung der IR-Kamera eine geringfügige Auswirkung auf das Ergebnis der DRM. Mit der DRM lässt sich jedoch auch in diesem Fall die Bestimmung der Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera deutlich verbessern. Es handelt sich bei dem in Abbildung 5.1 simulierten Strahler um einen Strahler, der den in [19] beschriebenen Spezifikationen gerade so gerecht wird. Somit ist die DRM für die ganz überwiegende Anzahl der in der Technik verwendeten Strahlern sehr gut für die Korrektur der Kamerainhomogenität geeignet.

Besitzt der verwendete Kalibrierstrahler eine unzureichend große Apertur, um das gesamte Gesichtsfeld der IR-Kamera vollständig ausleuchten zu können, ergibt sich zum Rand der Aufnahme möglicherweise eine unstetige Strahlungstemperaturänderung. Wird eine IR-Kamera beispielsweise bei einer Strahlungstemperatur von 100 °C in einer Laborumgebung mit 20 °C Raumtemperatur kalibriert, kann sich dadurch zum Rand der Aufnahme eine sprunghafte Strahlungstemperaturänderung von 80 K ergeben. Es soll deshalb im Folgenden untersucht werden, wie sich eine solche extreme und unstetige Änderung der Strahlungstemperatur auf das Ergebnis der DRM bei nicht idealer Verschiebung der Kamera auswirkt. Dazu wird ein IR-Kamerabild mit einer Auflösung von 200×200 Bildelementen simuliert, „aufgenommen“ von einer ungekühlten, nicht temperaturstabilisierten IR-Kamera mit einer Inhomogenität der einzelnen Detektorelemente zueinander von 1000 mK. Die Inhomogenität des Ansprechverhaltens der einzelnen Detektorelemente verteilt sich statistisch über die Detektorfläche und ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

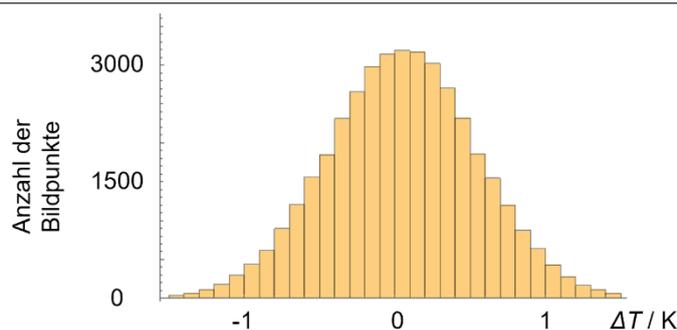


Abbildung 5.4: Histogramm der Ungleichförmigkeit des Ansprechverhaltens der simulierten IR-Kamera, dargestellt in Strahlungstemperaturdifferenzen und bezogen auf ein zentrales Referenzbildelement. 95 % der Werte liegen gemäß Tabelle 5.1 in einem Bereich von +/- 1000 mK um den Mittelwert.

Abbildung 5.5 zeigt Aufnahmen der IR-Kamera mit zwei verschiedenen Temperaturlösungen. Die Darstellung in Abbildung 5.5a besitzt eine geringere und die in Abbildung 5.5b eine höhere Temperaturlösung. Der simulierte Flächenstrahler mit völlig homogener Strahlungstemperaturverteilung erstreckt sich jeweils bis zur Spalte 125 der Aufnahmen. In Abbildung 5.5a wird die Strahlungstemperatur des Flächenstrahlers von 100 °C durch eine gelbe Färbung und die Strahlungstemperatur der Umgebung von 20 °C mit einer blauen Färbung dargestellt. Die detektierte Strahlungstemperatur der Strahlungsquelle endet nach der Bildspalte 125 (125ste Spalte in horizontaler Richtung von links beginnend). Ab Spalte 126 wird eine Raumtemperatur von 20 °C detektiert.

In Abbildung 5.5a mit geringerer Temperaturlösung ist die Strahlungstemperatur beider Flächen zu sehen. Die un stetige Veränderung der Strahlungstemperatur zwischen den Spalten 125 und 126 ist deutlich zu erkennen. Die Darstellung auf der rechten Seite von Abbildung 5.5a mit höherer Temperaturlösung verdeutlicht die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera gemäß Abbildung 5.4, die der gesamten Aufnahme überlagert wurde. Im Bereich der Strahlungsquelle ist die Inhomogenität des Ansprechverhaltens der einzelnen Detektorelemente der Kamera deutlich erkennbar. Würde die Temperaturlösung des Bildes der Raumtemperatur angepasst werden (bspw. 19 °C bis 21 °C), würde sich ein ähnliches Bild für den weiß dargestellten Bereich ergeben.

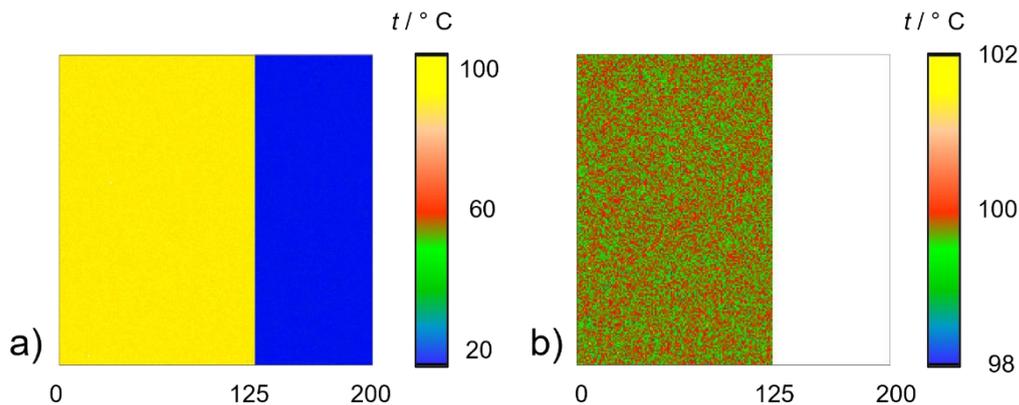


Abbildung 5.5: Simulierte IR-Kameraaufnahme eines idealen Flächenstrahlers, dargestellt mit zwei verschiedenen Temperaturauflösungen. Der in der Simulation beobachtete Flächenstrahler hat eine völlig homogene Strahlungstemperaturverteilung und erstreckt sich jeweils von Spalte 0 bis Spalte 125. Der gesamten Detektorfläche der Kamera wurde eine Ungleichförmigkeit gemäß Tabelle 5.1 und Abbildung 5.4 einer ungekühlten, nicht temperaturstabilisierten IR-Kamera überlagert. a) geringere Temperaturauflösung zur Darstellung der Strahlungstemperatur beider Flächen, b) höhere Temperaturauflösung zur Darstellung der Ungleichförmigkeit der simulierten IR-Kamera im Bereich der Bildspalten 0 bis 125.

Unter der idealisierten Annahme, dass die Änderung der Strahlungstemperatur des Strahlers keine horizontale Ausdehnung besitzt (völlig unstetig ist), erfolgt die Strahlungstemperaturveränderung in der ersten Aufnahme zwischen den Bildelementen 125 und 126. Für die zweite Aufnahme muss die IR-Kamera horizontal um 1 Bildelement verschoben werden. In dieser Betrachtung soll die horizontale Verschiebung nicht exakt 1 Bildelement sein, sondern lediglich 0,5 Bildelemente betragen. Durch diesen unpräzisen Versatz entsteht eine Spalte von Detektorelementen, welche zur Hälfte sowohl über die Fläche mit der Strahlungstemperatur von 100 °C als auch mit der zweiten Hälfte über die Fläche mit der Strahlungstemperatur von 20 °C integrieren. Somit ergibt sich bei der Addition beider Strahldichten für eine Schwerpunktwellenlänge von 10 µm eine Anzeigetemperatur von ungefähr 66 °C. Anschließend wird die IR-Kamera für die dritte Aufnahme vertikal um exakt ein Bildelement verschoben. Als Referenzbildelement wird das zentrale Bildelement der Aufnahme gewählt. Es befindet sich im Bereich von 100 °C, somit ergibt sich ein Referenzwert von 100 °C für alle Bildelemente. Der Referenzwert ist der Anzeigewert des Referenzbildelements.

Die DRM liefert gemäß Abschnitt 4.2 zwei unterschiedliche Darstellungen: zum einen die Strahlungstemperaturverteilung der gemessenen Strahlungsquelle und zum anderen die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera, angegeben jeweils als Strahlungstemperaturdifferenzen, bezogen auf den Wert des Referenzelements. In der Darstellung der als völlig homogen angenommenen Strahlungsquelle ist als Ergebnis der DRM zu erwarten, dass die Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung der Strahlungsquelle auf der linken Seite des Temperaturabfalls einen Wert von 0 K anzeigen (Differenz der Temperatur des jeweiligen Bildelements zur Temperatur des Referenzbildelements: 100 °C - 100 °C = 0 K) und auf der rechten Seite des Abfalls einen Wert von -80 K (20 °C - 100 °C = -80 K). Beide Flächen sollten bei einer perfekten Korrektur der Kamerainhomogenität mit der DRM vollkommen homogene Strahlungstemperaturverteilungen aufweisen.

Abbildung 5.6 zeigt die errechneten Strahlungstemperaturverteilungen der Strahlungsquellen. In der linken

Darstellung ist eine geringe Temperaturauflösung mit einer Skalierung von 0 K bis -34 K und in der rechten eine höhere Temperaturauflösung von 0 K bis -0,1 K gezeigt.

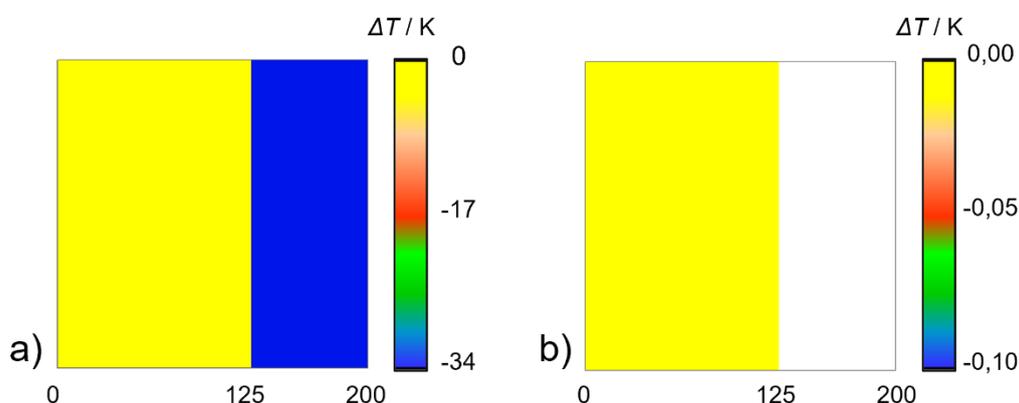


Abbildung 5.6: Bei Anwendung der DRM errechnete Temperaturdifferenzen der Strahlungstemperaturverteilung der völlig homogenen Strahlungsquellen mit unstetiger Änderung der Strahlungstemperatur bei Bildspalte 125 und ungenauer horizontaler Verschiebung der IR-Kamera vor der Strahlungsquelle. a) Geringere Temperaturauflösung zur Darstellung der Strahlungstemperatur beider Flächen. b) Höhere Temperaturauflösung zur Darstellung möglicher im Bild verbliebener Ungleichförmigkeit bei simulierter Durchführung der DRM. Die Darstellung im rechten Bild umfasst lediglich einen Temperaturbereich von -0,1 K bis 0 K. Daher werden nur die Temperaturdifferenzen der linken Fläche dargestellt. Die Temperaturdifferenzen der Fläche rechts der unstetigen Änderung der Strahlungstemperatur besitzen eine negative Temperaturdifferenz zum Referenzbildelement und befinden sich daher außerhalb der dargestellten Skala.

Es ist zu erkennen, dass beide Flächen die erwartete vollkommen homogene Strahlungstemperaturverteilung aufweisen. Die Differenzen der Strahlungstemperaturen der linken Fläche entsprechen in Bezug auf den Wert des Referenzbildelements dem erwarteten Ergebnis von 0 K.

Die Strahlungstemperaturdifferenzen der Fläche bei Raumtemperatur in Abbildung 5.6b entsprechen nicht dem erwarteten Wert. Theoretisch sollten sich aus dem Unterschied von 100 °C des Referenzbildelements und der Raumtemperatur von 20 °C für die rechte Fläche eine Differenz von -80 K ergeben. Im Ergebnis der DRM besitzt jedes Element der Fläche eine Differenz der Strahlungstemperatur zum Referenzelement von -34 K. Die Differenz zum erwarteten Ergebnis von -80 K beträgt 46 K und ist durch die nicht ideale horizontale Verschiebung verursacht. Diese Abweichung zum erwarteten Wert lässt sich bei der Analyse der errechneten Ungleichförmigkeit der IR-Kamera besser verstehen. Die ermittelte Ungleichförmigkeit sollte ein verrauschtes Muster der einzelnen Detektorelemente aufweisen, welches gemäß Tabelle 5.1 dem doppelten Wert der Standardabweichung einer Normalverteilung von 500 mK entspricht. Somit befinden sich 95 % der Werte innerhalb von +/- 1000 mK um den Mittelwert der Strahlungstemperatur der Fläche.

Abbildung 5.7 zeigt die mit Hilfe der DRM errechnete Ungleichförmigkeit der simulierten IR-Kamera als Strahlungstemperaturdifferenzen zum Referenzbildelement. Abbildung 5.6a weist eine geringere und Abbildung 5.6b eine höhere Temperaturauflösung auf. Die Anzeigewerte der Flächen sollten analog zu den erwarteten Werten der Abbildung 5.6 auf der linken Seite der Temperaturänderung eine Strahlungstemperaturverteilung von 0 K aufweisen und auf der rechten Seite der Änderung einen Wert der Strahlungstemperaturdifferenzen von -80 K.

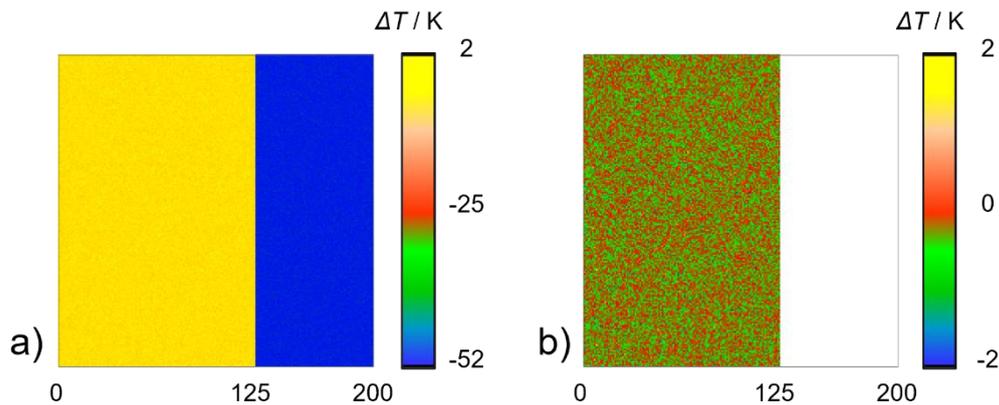


Abbildung 5.7: Mit der DRM errechnete Ungleichförmigkeit der simulierten IR-Kamera bei ungenauer horizontaler Verschiebung und einer unstetigen Änderung der Strahlungstemperatur der Strahlungsquelle bei Bildspalte 125, dargestellt als Differenzen der Strahlungstemperaturen in Bezug auf den Anzeigewert eines zentralen Referenzbildelements. a) Geringere Temperaturauflösung zur Darstellung der Strahlungstemperatur beider Flächen. b) Höhere Temperaturauflösung zur Darstellung der errechneten Ungleichförmigkeit der simulierten IR-Kamera. Die Darstellung im rechten Bild umfasst lediglich einen Temperaturbereich von -2 K bis 2 K. Daher werden nur die Temperaturdifferenzen der linken Fläche dargestellt. Die Temperaturdifferenzen der Fläche rechts der unstetigen Änderung der Strahlungstemperatur besitzen eine negative Temperaturdifferenz zum Referenzbildelement und befinden sich daher außerhalb der dargestellten Skala.

In Abbildung 5.7b ist die erwartete Ungleichförmigkeit der IR-Kamera zu erkennen, welche der ursprünglichen simulierten Aufnahme überlagert wurde. Das heißt, dass die Ungleichförmigkeit wurde durch die DRM völlig korrekt ermittelt wurde.

Die Abbildung 5.7a zeigt für die Fläche der Strahlungstemperatur des Flächenstrahlers (gelb) die richtigen Strahlungstemperaturdifferenzen in Bezug auf den Anzeigewert des Referenzbildelements. Die Differenzen sollten zu 95% im Bereich von ca. ± 1000 mK liegen, was der Standardabweichung der Normalverteilung von 500 mK entspricht. Die Strahlungstemperaturdifferenzen der dargestellten Anzeigewerte der Raumtemperaturfläche liegen ebenfalls zu 95% im Bereich von ± 1000 mK um den Wert des Referenzbildelements, weil lediglich die Kameraungleichförmigkeit im Ergebnis dargestellt wird. Für die absolute Temperatur ergibt sich jedoch eine Differenz von erwartetem und errechnetem Wert von durchschnittlich -46 K. Abbildung 5.8 veranschaulicht die ermittelte Ungleichförmigkeit der IR-Kamera, wobei die Abbildung 5.7a die Ungleichförmigkeit über der in gelb dargestellten Fläche und Abbildung 5.7b die Ungleichförmigkeit über der in blau dargestellten Fläche zeigt. Die unterschiedlichen Höhen der Histogramme lassen sich auf die unterschiedlich großen Flächen rechts und links der Temperaturänderungen zurückführen.

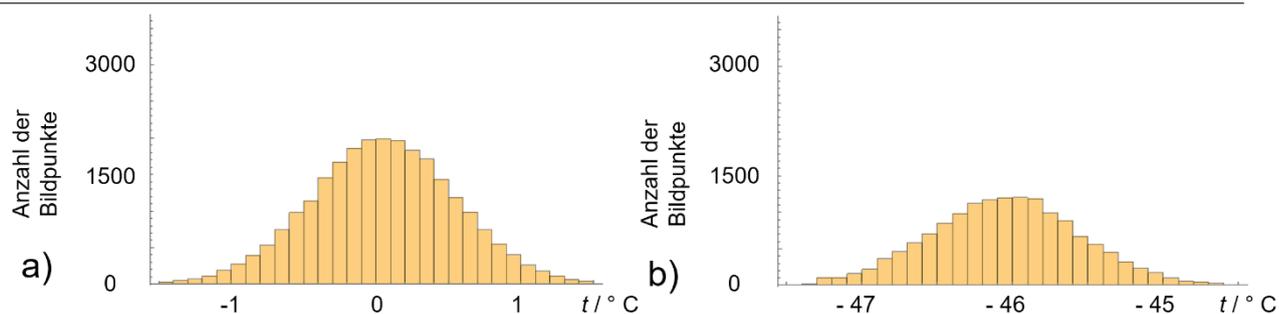


Abbildung 5.8: Histogramme der mit Hilfe der DRM ermittelten Ungleichförmigkeit der IR-Kamera. a) Histogramm, das die Fläche der Strahlungstemperatur von 100 °C abbildet. b) Histogramm, das die Fläche der Umgebungstemperatur von 20 °C abbildet.

Die entstandenen Temperaturdifferenzen für die jeweiligen Flächen rechts von der unstetigen Veränderung der Strahlungstemperatur in den Ausgangsbildern sowohl bei den errechneten Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung der Strahlungsquelle als auch bei den errechneten Differenzen der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera sind invers zueinander.

Die Temperaturdifferenz ergibt sich aus der aufeinander aufbauenden Berechnung der jeweiligen Bildelemente, ausgehend vom Referenzbildelement. Durch die Ungenauigkeit in der horizontalen Verschiebung ergibt sich bei der Berechnung der Spalte $C_{126,y}$, welches die erste Spalte nach der Änderung in der Strahlungstemperatur ist:

$$C_{126,y} = P_{126,y} - S_{125,y} = 20 - 66 = -46 \quad (5.1)$$

eine Temperaturdifferenz von -46 K in der Spalte $C_{126,y}$ der Spaltendifferenzenmatrix. Dieser Temperaturdifferenzwert wird in die Ergebnismatrix E weitergegeben und pflanzt sich in E vom Zentrum nach außen fort, sodass alle Bildelemente rechts von der Spalte $E_{125,y}$ (ab Spalte 126) diesen Temperaturdifferenzwert beinhalten. Somit ergibt sich der Temperaturdifferenzwert von -46 K in der Berechnung der Differenzen der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera. Mit Hilfe der errechneten Ungleichförmigkeit der IR-Kamera wird das Primärbild P korrigiert und es ergibt sich die Strahlungstemperaturverteilung der Strahlungsquelle. Das wiederum erklärt den inversen Differenzwert des Bereichs der Umgebungstemperatur in den errechneten Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die DRM auch bei nicht idealer Verschiebung an allen handelsüblichen Kalibrierstrahlern sehr erfolgreich anwenden lässt, um die Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera zu bestimmen. Darüber hinaus kann bei Strahlern, die nicht das gesamte Gesichtsfeld einer IR-Kamera ausleuchten, die Ungleichförmigkeit im ausgeleuchteten Bereich des Gesichtsfelds uneingeschränkt ermittelt werden, auch wenn die Verschiebung zwischen den Eingangsbildern nicht genau einem Bildelement oder genau einem Vielfachen eines Bildelements entsprechen sollte.

Die Detektorarrays von IR-Kameras werden zunehmend größer, sodass die Anzahl an Bildelementen kontinuierlich wächst und somit auch der Rechenaufwand der DRM. Für IR-Kameras mit einer großen Anzahl von Bildelementen können Cluster erstellt werden, in welchen mehrere Bildelemente zu einem Wert zusammengefasst werden. Anschließend kann um ein Vielfaches von einem Bildelement verschoben werden,

um den Rechenaufwand zu senken. Allerdings muss bei der Bildung von Clustern und beim Verschieben um mehr als ein Bildelement darauf geachtet werden, dass eine Version der DRM verwendet wird, die zuerst die Strahlungstemperatur- bzw. Strahldichteverteilung der Strahlungsquelle und daran anschließend die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera berechnet. Ansonsten würden Informationen zur Ungleichförmigkeit der IR-Kamera verloren gehen.

5.3. Einfluss einer nicht-linearen Kamerakennlinie

Mit Hilfe der DRM lässt sich die Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera bei einer Strahlungstemperatur bzw. bei einer Strahldichte ermitteln und korrigieren. Im folgenden Abschnitt soll untersucht werden, über welchen Temperaturbereich diese Korrektur dann gültig, also hinreichend gut ist.

Werden bei der DRM strahldichteproportionale Werte als Eingangsgröße verwendet, liefert die Methode eine relative Verteilung der Empfindlichkeit der Detektorelemente der IR-Kamera. Werden als Eingangsgröße Strahlungstemperaturen verwendet, kann die Ungleichförmigkeit der Kamera ebenfalls als relative Verteilung der Empfindlichkeit der Detektorelemente ausgegeben werden, wenn die Strahlungstemperaturen mit Hilfe einer Schwerpunktwellenlänge über die Planckfunktion in strahldichteproportionale Werte umgerechnet werden. Diese Umrechnung ist in Abschnitt 4.2 beschrieben.

Die relative Verteilung der Empfindlichkeit der Detektorelemente kann als Offsetkorrektur der Kamerakennlinie jedes Detektorelements bei jeder beliebigen Strahldichte angewendet werden. Im Idealfall weisen alle Detektorelemente die gleiche Kamerakennlinie auf, welche zusätzlich einen linearen Anstieg besitzt und mit Hilfe von Gleichung (4.1) beschrieben werden kann.

In der Praxis können Kamerakennlinien einen abweichenden Verlauf aufweisen und sich voneinander unterscheiden, wie es in Abbildung 5.9 exemplarisch dargestellt ist. Abbildung 5.9 zeigt eine ideale lineare Kamerakennlinie und zwei Kamerakennlinien mit S-förmigen Verlauf. Für eine der beiden S-förmigen Kennlinien sind deren Abweichungen zur idealen Kennlinie im ausgegebenen Signal ΔS_1 und ΔS_2 bei den Strahldichten L_1 und L_2 aufgetragen.

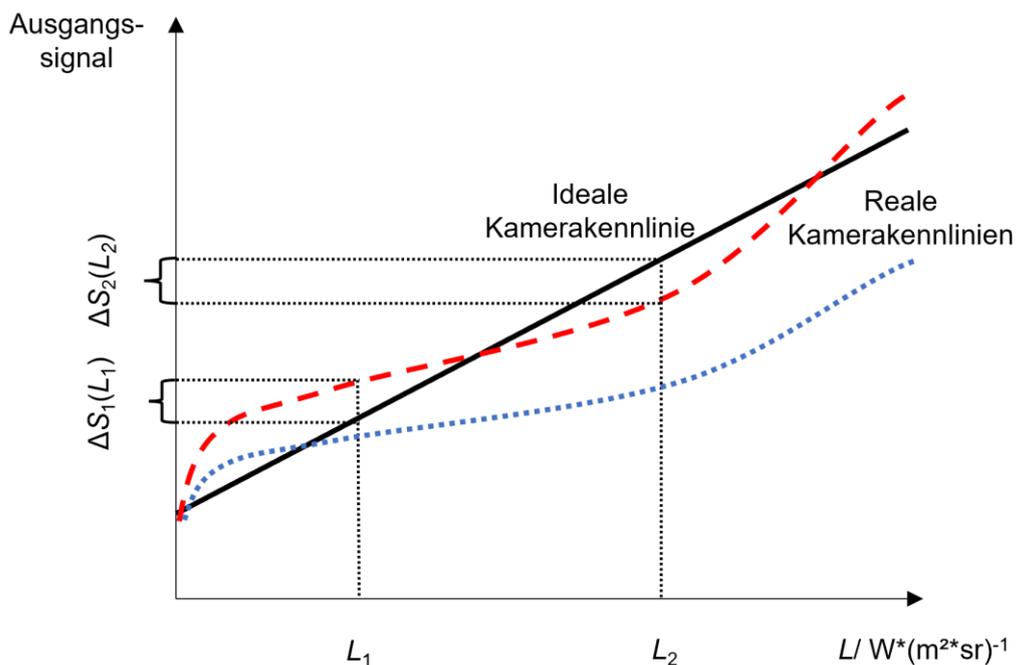


Abbildung 5.9: Ideal lineare Kamerakennlinie und zwei Kamerakennlinien mit S-förmigem Verlauf. Für eine der beiden S-förmigen Kennlinien sind deren Abweichungen im Signal bei den Strahldichten L_1 und L_2 aufgetragen.

Wird bei der gegebenen Kamerakennlinie (gestrichelt) die DRM bei einer Strahldichte L_1 angewendet und die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera bestimmt, kann diese Information zur Korrektur der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera in der Nähe des Messpunktes der Strahldichte L_1 verwendet werden.

Bei der Anwendung der an Messpunkt L_1 ermittelten Korrekturwerte bei der Strahldichte L_2 , kann sich eine Differenz zur realen Ungleichförmigkeit der IR-Kamera am Messpunkt L_2 ergeben, welche auf den nicht-linearen Verlauf der realen Kennlinie zurückzuführen ist. Dasselbe Problem tritt bei der Zwei-Punkt-Methode bei einer nicht-linearen Kennlinie einer IR-Kamera auf. Die Gültigkeit der Korrektur ist in diesem Fall nur in der Nähe der zur Kennlinienbestimmung verwendeten Strahldichte gegeben.

Der Gültigkeitsbereich der DRM wurde mit einer MCT-IR-Kamera in der Praxis überprüft. Der gesamte Temperaturmessbereich dieser IR-Kamera ist vom Hersteller in Teilbereiche unterteilt. Jeder einzelne Teilbereich wird mit einer vom Hersteller ermittelten Kalibrierdatei korrigiert. Der für die Messungen ausgewählte Teilbereich umfasste die Strahlungstemperaturen von 50 °C bis 150 °C. Die DRM wurde an den Strahlungstemperaturpunkten von 50 °C, 100 °C und 150 °C an einem hochwertigen Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahler durchgeführt.

Abbildung 5.10 zeigt die an den drei unterschiedlichen Temperaturpunkten mit Hilfe der DRM ermittelten Ungleichförmigkeiten der IR-Kamera. Die Darstellungen beinhalten relative Verteilungen der Empfindlichkeit der Bildelemente der IR-Kamera.

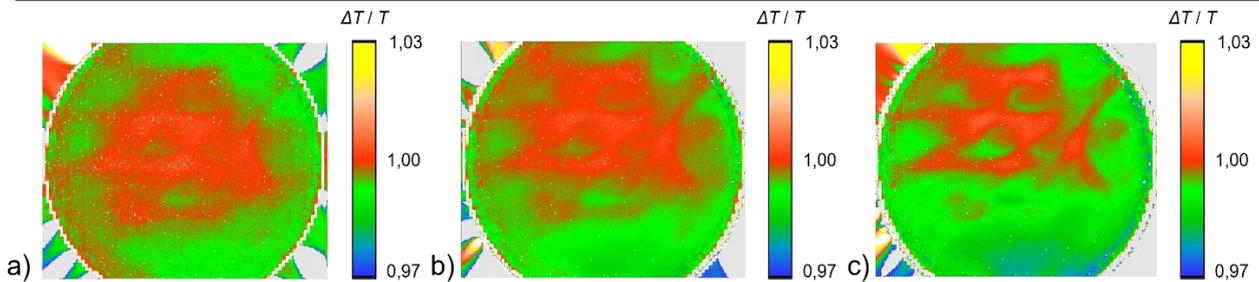


Abbildung 5.10: Mit der DRM ermittelte relative Verteilungen der Empfindlichkeit der Detektorelemente einer MCT-IR-Kamera an den Temperaturpunkten a) 50 °C, b) 100 °C und c) 150 °C.

Die ermittelten Ungleichförmigkeiten der IR-Kamera zeigen für alle drei Temperaturen eine sehr ähnliche Verteilung. Die ermittelte Ungleichförmigkeit der IR-Kamera umfasst $\pm 2\%$ der Strahldichte. Das bedeutet für eine Strahlungstemperatur von 100 °C und einer Schwerpunktwellenlänge von 10 μm , dass die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera einen Bereich von ± 200 mK umfasst. Wird die Ungleichförmigkeit bspw. bei einer Strahlungstemperatur von 150 °C (Bild rechts) mit Hilfe der DRM ermittelt und die ermittelten Korrekturdaten werden bei einer Messung einer Strahlungsquelle mit einer Strahlungstemperatur von 50 °C angewendet, so sinkt die Unsicherheit auf Grund der Referenztemperatur von 150 °C lediglich auf knapp unter 1 %. Sollte die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera bei einer Referenztemperatur des Strahlers von 150 °C ermittelt worden sein und mit den ermittelten Werten eine Korrektur bei einer Arbeitstemperatur der Quelle von 50 °C durchgeführt werden, ergäbe sich daraus eine Messunsicherheit von < 80 mK auf Grund der Ermittlung an einem anderen Temperaturpunkt.

Für die verwendete IR-Kamera lässt sich im dargestellten Fall die Ungleichförmigkeit von 400 mK (± 200 mK) auf weniger als 80 mK reduzieren, auch wenn die Korrekturwerte an einer anderen Referenztemperatur bestimmt wurden, solange der Messbereich der IR-Kamera nicht gewechselt wird. Für die verwendete IR-Kamera kann somit die Ungleichförmigkeit an einem Messpunkt des Teilmessbereichs bestimmt werden und anschließend über den gesamten Teilmessbereich angewendet werden, wobei die zusätzliche Messunsicherheit auf Grund der einmaligen Bestimmung der Ungleichförmigkeit weniger als 1 % der Strahldichte beträgt. Ursachen für die beobachtete geringfügige Abweichung zwischen den mit der DRM ermittelten Verteilungen der Empfindlichkeit der einzelnen Detektorelemente bei den drei Temperaturen in den einzelnen Bildern der Abbildung 5.10 sind das nicht-lineare Verhalten der Detektorkennlinien der einzelnen Detektorelemente oder eventuell auch das unterschiedliche lineare Verhalten und die Messunsicherheit der DRM, auf die in Abschnitt 5.6 näher eingegangen wird.

Bei einer ausreichend linearen Kamerakennlinie kann mit Hilfe der DRM an einem Messpunkt des Messbereichs die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera mit Hilfe von strahldichteproportionalen Werten bestimmt werden und anschließend die Kamera im gesamten Temperaturmessbereich mit den ermittelten Korrekturen korrigiert werden. Die zeitliche Gültigkeit der mit der DRM ermittelten Korrekturen ist dabei abhängig von der Langzeitstabilität der verwendeten IR-Kamera.

5.4. Einfluss des zeitlichen Rauschens in der Strahlungstemperaturmessung

Das zeitliche Rauschen bei der Strahlungstemperaturmessung wird in dieser Arbeit als die Fluktuation des Anzeigewertes um einen Mittelwert definiert und wird gemäß [39] als stationärer Gauß-Prozess betrachtet. Die Ursachen des zeitlichen Rauschens eines IR-Kamerabildes können, wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, in quellenbedingte und kamerabedingte Rauschprozesse unterteilt werden. Zu den quellenbedingten Rauschprozessen gehören das Strahlungsrauschen, welches die Verteilung der Emission von Photonen einer Strahlungsquelle, und das Temperaturfluktuationsrauschen, welches Temperaturfluktuationen einer Strahlungsquelle um einen konstanten Mittelwert beschreibt. Zu den kamerabedingten Rauschprozessen gehören das thermische Rauschen, welches die willkürliche Bewegung von Ladungsträgern in einem Widerstand ausdrückt, das Stromrauschen, welches die Wahrscheinlichkeit des Überwindens eines Potentials von Ladungsträgern beschreibt, und das Rauschen aufgrund der Digitalisierung von Messwerten. All diese Prozesse führen zu einer Fluktuation des Messwerts um einen Mittelwert, dem weißen zeitlichen Rauschen. Die Verteilung des weißen zeitlichen Rauschens lässt sich mit einer Normalverteilung ausdrücken. In Abschnitt 3.6.2 wurde die rauschäquivalente Temperaturdifferenz (NETD) eingeführt. Sie beschreibt die Temperaturdifferenz, welche dem zeitlichen Rauschen einer IR-Kamera für eine kurze Zeitspanne (<1 h) entspricht. Dieser Parameter soll die Grundlage für die Analyse der Auswirkungen von zeitlichem Rauschen auf das Ergebnis der DRM bilden.

5.4.1. Auswirkungen von weißem zeitlichem Rauschen auf die DRM

Die NETD der verwendeten MCT-Kamera wurde gemäß den Vorgaben der VDI/VDE Richtlinie 5585 Blatt 1 [20] bestimmt. Die Richtlinie fordert 100 aufeinanderfolgende Messungen, bei der die Standardabweichung des Anzeigewertes jedes Bildelements berechnet wird. Als spezifizierte NETD der Kamera wird der Wert der Standardabweichung angegeben, den 90 % der Standardabweichungen aller einzelnen Bildelemente unterschreiten.

Für die Bestimmung der NETD wurde die IR-Kamera in einem Abstand von 300 mm vor einem Cs-Wärmerohr-Hohlraumstrahlers bei 400 °C positioniert und planvoll verschoben, sodass alle Bildelemente mindestens einmal ausgeleuchtet wurden. Abbildung 5.11 zeigt eine der gemessenen Strahlungstemperaturen dreier zentraler Bildelemente der IR-Kamera und deren gleitenden Mittelwert (Mittelwertbildung aus 10 Messpunkten). Das weiße zeitliche Rauschen zeigt sich durch die Fluktuation der Messwerte um einen Mittelwert. Es wurde eine NETD von 151 mK gemäß der VDI/VDE Richtlinie 5585 Blatt 1 ermittelt. Im Vergleich zu Angaben verschiedener IR-Kamerahersteller [40] [41][42] [43], welche sich bei 23 °C typisch im Bereich von 30 mK befinden, liegt der ermittelte Wert der NETD hier deutlich darüber. Herstellerangaben beziehen sich jedoch in der Regel ausschließlich auf die NETD des Detektors. Der nach VDI-Richtlinien ermittelte Wert beinhaltet zusätzlich noch Rauschanteile der Ausleseelektronik, der Komponenten im Strahlengang und der Strahlungstemperatur des verwendeten Strahlers. Die zusätzlichen Rauschanteile werden in [44] genauer untersucht.

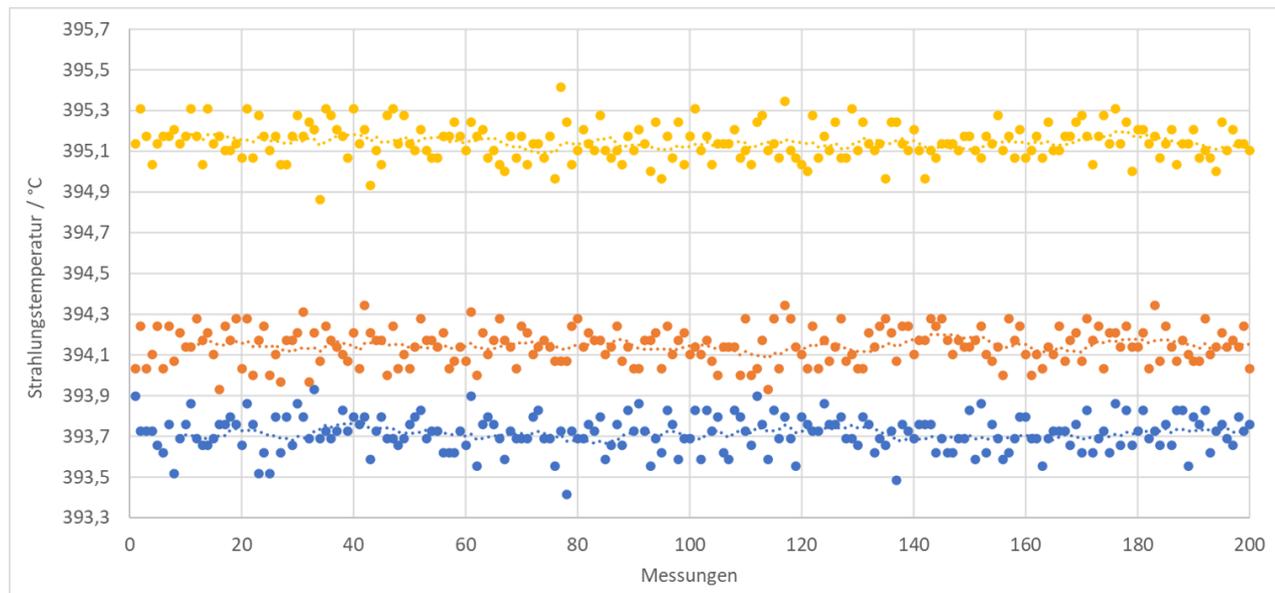


Abbildung 5.11: Gemessene Strahlungstemperaturen dreier zentraler Bildelemente einer IR-Kamera und deren gleitender Mittelwert (gestrichelte Linie) an einem Cs-Wärmerohr-Hohlraumstrahlers bei 400 °C. Die Messwerte wurden mit einer Frequenz von 50 Hz aufgezeichnet.

Abbildung 5.12 zeigt eine der gemessenen Temperaturverteilung des Wärmerohrs bei 400 °C, wie sie von der IR-Kamera aufgenommen wurde. Im Zentrum sind Strukturen zu erkennen, welche auf die Ungleichförmigkeit der Kamera zurückzuführen sind.

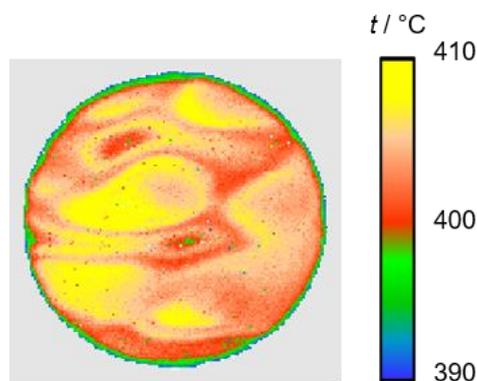


Abbildung 5.12: Temperaturverteilung des Wärmerohrs bei 400 °C, gemessen von einer gekühlten, temperaturstabilisierten MCT-IR-Kamera. Das Bild ergibt sich aus der realen Temperaturverteilung des Strahlers und der Inhomogenität des Ansprechverhaltens der einzelnen Detektorelemente der Kamera.

Im Anschluss wurde die DRM angewendet, um die möglichen Auswirkungen des weißen zeitlichen Rauschens der IR-Kamera auf die DRM zu bestimmen. Es wurde an jeder der benötigten Positionen eine Aufnahme durchgeführt und anschließend wurden die mit weißem zeitlichem Rauschen überlagerten Werte in die DRM eingespeist. Die Strahlungstemperaturverteilung des Strahlers, korrigiert von der Ungleichförmigkeit der Kamera unter Anwendung der DRM, ist in Abbildung 5.13 gezeigt.

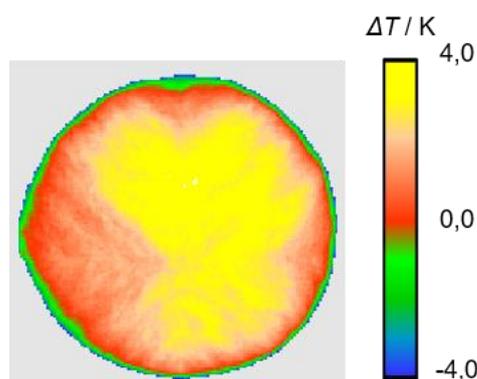


Abbildung 5.13: Berechnete Strahlungstemperaturverteilung des Wärmerohres unter Anwendung der DRM. Die Eingangsbilder waren mit einem weißen zeitlichen Rauschen behaftet.

Es sind, ausgehend vom im Zentrum liegenden Referenzbildelement, strahlenförmige Strukturen in die Ecken der Aufnahme erkennbar. Die aus den verrauschten Einzelaufnahmen mit der DRM ermittelten Strahlungstemperatur-differenzen liegen deutlich über den erwarteten Ergebnissen, welche bei einem hochwertigen Wärmerohrstrahler im dreistelligen mK-Bereich liegen sollten. Es handelt sich hierbei um Effekte, die infolge der verrauschten Aufnahmen durch eine Fehlerfortpflanzung im Algorithmus der DRM auftreten. Diese Fehlerfortpflanzung wird im Folgenden mit Hilfe von Simulationen nachvollzogen.

5.4.2. Simulationen zum weißen zeitlichen Rauschen im DRM-Algorithmus

Es wird die Auswirkung des weißen zeitlichen Rauschens mit Eingangsparametern aus der Praxis einer MCT-Kamera bei 400 °C simuliert. In Abschnitt 5.3.1 wurde gezeigt, dass sich in diesem Fall die NETD typischerweise in der Größenordnung von 100 mK bis 200 mK befindet. Die folgenden Simulationen wurden für eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Einflüsse gemäß den Festlegungen in Tabelle 5.1 durchgeführt. Es wurde eine Strahlungsquelle mit vollkommen homogener Strahlungstemperaturverteilung mit einer Strahlungstemperatur von 100 °C simuliert. Diese Strahlungstemperaturverteilung wird von einer simulierten Kamera ohne Ungleichförmigkeit in einer 200 x 200 Bildelemente großen Matrix dargestellt.

Den drei für die DRM benötigten Aufnahmen wird jeweils ein unterschiedliches, zufälliges, weißes zeitliches Rauschen mit einer doppelten Standardabweichung von 200 mK überlagert, so dass über der gesamten Aufnahme eine Fluktuation der Anzeigewerte vorherrscht. Die Höhe der Fluktuationswerte entspricht den Werten der Tabelle 5.1. Abbildung 5.14a zeigt das von der Kamera aufgenommene und mit weißem Rauschen überlagerte Bild der Strahlungstemperaturverteilung der Strahlungsquelle. Im Histogramm von Abbildung 5.14b ist die Strahlungstemperaturverteilung grafisch dargestellt.

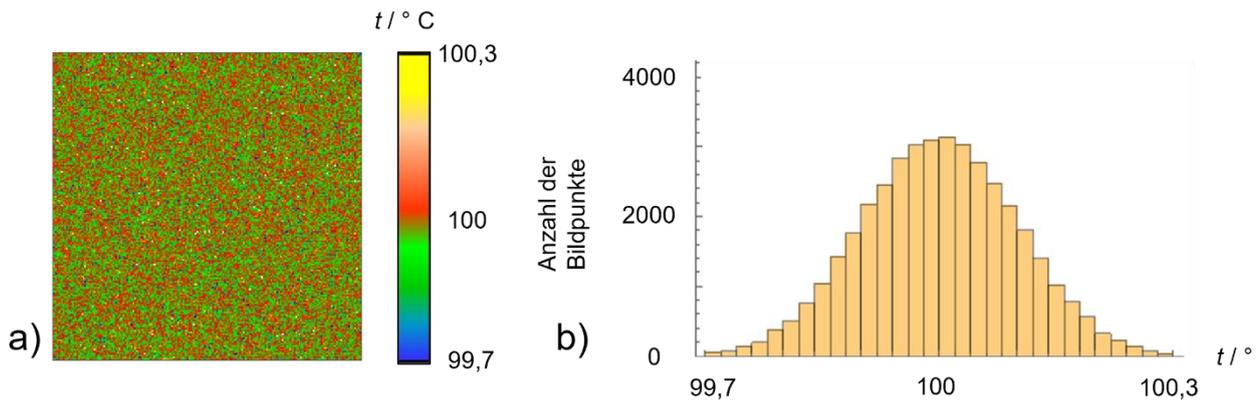


Abbildung 5.14: a) Simulierte und mit weißem Rauschen überlagerte Strahlungstemperaturverteilung, welche von einer Kamera gemessen worden wäre. b) Verteilung der Bildelemente über der Temperatur. Die dargestellte Fluktuation der Anzeigewerte ist in dieser Simulation durch das weiße zeitliche Rauschen verursacht und nicht durch eine Kamerainhomogenität.

Das weiße zeitliche Rauschen ist im Gegensatz zur Kamerainhomogenität ein zeitliches Phänomen, das die Anzeigewerte der Kamera bei jeder Aufnahme variieren lässt. Die Kamerainhomogenität ist eine stationäre Eigenschaft, die bei jeder Aufnahme die gleiche Variation in den Messwerten erzeugt und dem zeitlichen Rauschen überlagert ist.

Wird die DRM auf die drei zueinander verschobenen Aufnahmen der Strahlungsquelle, welchen ein unterschiedliches Rauschen in gleicher Höhe überlagert wurde, angewendet, ergibt sich die in Abbildung 5.15 dargestellte Strahlungstemperaturverteilung der Strahlungsquelle. Aufgrund der Eingangsparameter (Strahlungsquelle mit völlig homogener Strahldichte) sollte das Ergebnis eine vollkommen homogene Strahlungstemperaturverteilung darstellen, in der jedes Bildelement den Wert 0 K liefert.

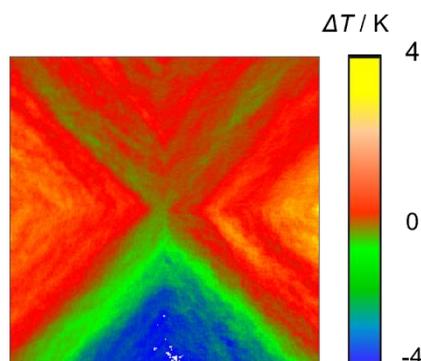


Abbildung 5.15: Errechnete Strahlungstemperaturverteilung der Strahlungsquelle, simuliert mit verrauschten Eingangsbildern.

Die errechnete Strahlungstemperaturverteilung zeigt deutliche Abweichungen zur erwarteten homogenen Verteilung. Es sind, ausgehend vom im Zentrum liegenden Referenzbildelement, strahlenförmige Strukturen in die Ecken der Aufnahme erkennbar. Fehler scheinen sich diagonal durch die Matrix fortzupflanzen. Diese strahlenförmigen Strukturen, die sich aus der Simulation mit verrauschten Einzelbildern ergeben, sind in

abgeschwächerter, aber gleicher Form in dem realen Messergebnis in Abbildung 5.13 erkennbar.

Diese Fehlerfortpflanzung soll im Folgenden untersucht werden. Dazu wurden für die Aufnahmen P, S und Z drei vollkommen homogene Strahlungstemperaturverteilungen mit einer Strahlungstemperatur von 100 °C simuliert. Lediglich in der Primäraufnahme P wird bewusst im unteren rechten Quadranten eine verrauschte Temperatur-fehlerstelle mit einer Strahlungstemperatur von $100,1\text{ °C}$ integriert. Der Fehler betrifft nur den Messwert eines einzelnen Detektorelements. Die Strahlungstemperatur stellt bspw. einen Fluktuationswert auf Grund von weißem zeitlichem Rauschen dar, nur dass sich in diesem Fall das Rauschen auf ein Detektorelement beschränkt.

Das Detektorelement besitzt bei der ersten Aufnahme einen Temperaturdifferenzwert von 100 mK , bezogen auf die beiden folgenden Aufnahmen. Abbildung 5.16a zeigt die Strahlungstemperaturverteilung des Primärbildes mit der eingebauten Fehlstelle. In Abbildung 5.16b ist die mit der DRM errechneten Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung der homogenen Strahlungsquelle gezeigt.

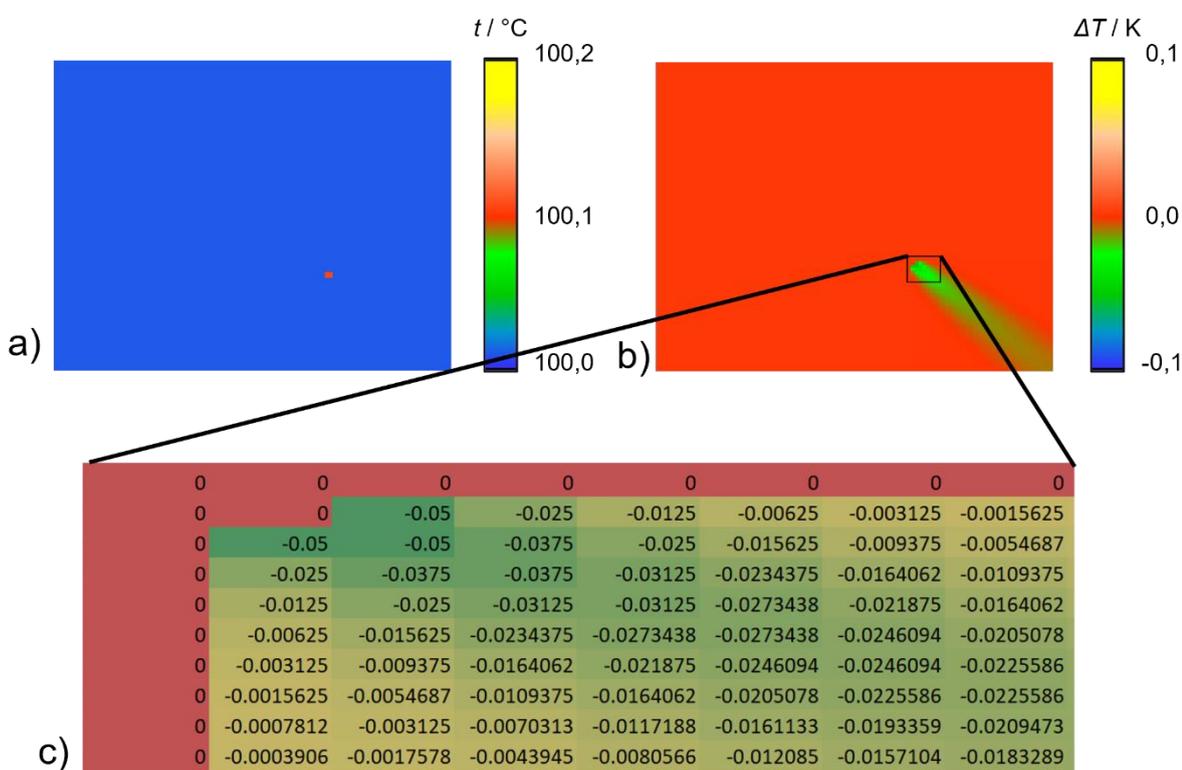


Abbildung 5.16: a) Strahlungstemperaturverteilung des Primärbildes (100 °C) mit der bewusst eingebauten Temperaturfehlerstelle ($100,1\text{ °C}$). b) Mit der DRM errechnete Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung der homogenen Strahlungsquelle. c) Detail des Schweifs aus b).

In Abbildung 5.16b wird ausgehend von der Temperaturfehlerstelle die Fehlerfortpflanzung deutlich. Es handelt sich dabei um ein schweifartiges Verhalten ähnlich einem Kometen. Dieses Verhalten ist in Abbildung 5.16c näher beleuchtet.

Die Differenz zum richtigen Anzeigewert halbiert sich mit jedem Bildelement in der Horizontalen und Vertikalen, ausgehend von der Temperaturfehlerstelle bei der Berechnung des jeweiligen nächsten

Bildelements. In der Diagonalen, hin zur nächsten Ecke der Aufnahme, nimmt die Abweichung zum richtigen Anzeigewert deutlich langsamer ab.

Abbildung 5.16 zeigt die Entwicklung des Fehlers bei Anwendung der DRM mit einer Temperaturfehlerstelle in einer der drei Aufnahmen. Im Folgenden soll bei gleichen Randbedingungen die Entwicklung betrachtet werden, wenn aufgrund von weißem zeitlichem Rauschen an derselben Position im Bild der Aufnahme S das Detektorelement eine positive Temperaturdifferenz von 100 mK und bei der Aufnahme Z dasselbe Detektorelement eine negative Temperaturdifferenz von -100 mK besitzt. Das Ergebnis der DRM unter diesen Voraussetzungen ist in Abbildung 5.17 gezeigt.

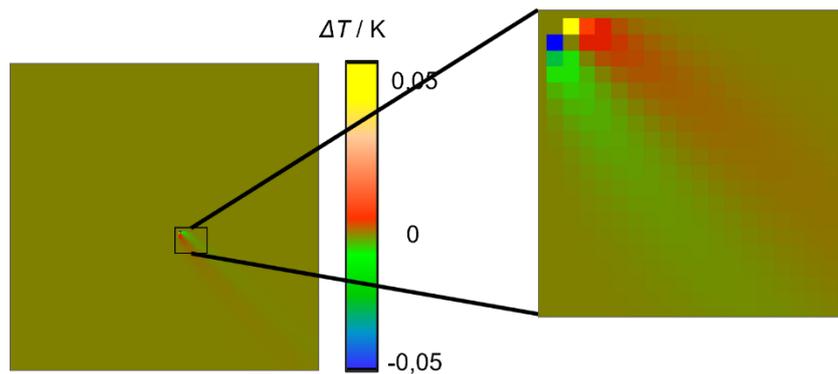


Abbildung 5.17: Errechnete Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung der homogenen Strahlungsquelle als Ergebnis der DRM. In den Eingangsbildern S und Z wurden an derselben Position Temperaturfehlerstellen mit gleichem Wert, aber unterschiedlichem Vorzeichen simuliert.

Hier zeigt sich, dass sich die entgegengesetzten Temperaturfehlerstellen an derselben Position im Bild im Rechenschema der DRM nicht egalalisieren, sondern zwei gleiche Muster mit unterschiedlichen Vorzeichen ausbilden. Lediglich in der Diagonalen, ausgehend von der Fehlstelle, heben sich beide Effekte auf.

Im Folgenden sollen bei gleichen Randbedingungen die Entwicklung betrachtet werden, wenn im Eingangsbild S am Detektorelement (110/110) eine Temperaturfehlerstelle mit einer positiven Temperaturdifferenz von 100 mK und im Eingangsbild Z am Detektorelement (112/112) eine Temperaturfehlerstelle mit einer negativen Temperaturdifferenz von - 100 mK simuliert wird. Das Ergebnis der DRM unter diesen Voraussetzungen ist in Abbildung 5.18 dargestellt.

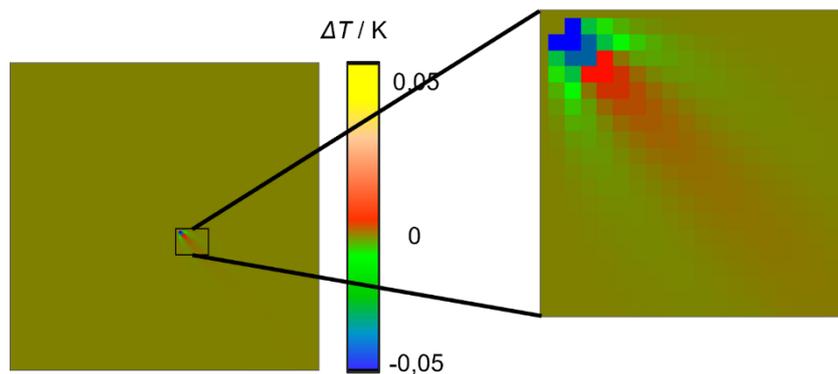


Abbildung 5.18: Berechnete Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung der homogenen Strahlungsquelle als Ergebnis der DRM. Im Eingangsbild S wurde am Detektorelement (110/110) eine Temperaturfehlerstelle mit einer positiven Temperaturdifferenz von 100 mK und im Eingangsbild Z am Detektorelement (112/112) eine Temperaturfehlerstelle mit einer negativen Temperaturdifferenz von -100 mK simuliert.

Es ist zu erkennen, dass sich die zweite Temperaturdifferenz auf die Fehlerfortpflanzung der ersten Fehlerstelle auswirkt und die Ausbreitung unterbricht.

Zur Abschätzung der zu erwartenden Unsicherheit der DRM aufgrund des weißen zeitlichen Rauschens muss die Entwicklung der Varianz Var während der Berechnungsschritte der DRM betrachtet werden. Die Varianz jedes Anzeigewerts im Ergebnis der DRM ist mit den zuvor im Quadranten berechneten Anzeigewerten korreliert, wobei der Korrelationsfaktor vom Abstand der betrachteten Anzeigewerte abhängt. Dieser nimmt mit steigendem Abstand ab. Die Abschätzung der Varianzen der einzelnen Elemente der Ergebnismatrix wird für große Matrizen sehr aufwändig und komplex, deshalb werden für das Aufstellen eines Unsicherheitsbudgets in Abschnitt 5.6 Monte-Carlo-Simulationen eingesetzt.

5.4.3. Methoden zur Reduktion der Auswirkung von weißem zeitlichem Rauschen

Die Auswirkungen von weißem zeitlichem Rauschen während des Messprozesses auf das Ergebnis der DRM wurden in den Abschnitten 5.4.1 und 5.4.2 an einem gemessenen Beispiel gezeigt und in Simulationen bestätigt. Es ist zu erkennen, dass ohne eine Reduzierung des zeitlichen Rauschens die Ergebnisse der DRM so stark verfälscht sein können, dass keine ausreichend guten Daten zur Korrektur der Ungleichförmigkeit der getesteten IR-Kamera ermittelt werden. Bei den vorgestellten Untersuchungen ergab ein weißes Rauschen von 150 mK in den Eingangsbildern der DRM eine maximale Abweichung von 4,16 K bei 400 °C Strahlungstemperatur der Strahlungsquelle. Diese Unsicherheiten würden eine Anwendung der DRM nicht praktikabel machen, deshalb werden Methoden zur Verringerung des Einflusses der Rauschprozesse benötigt.

a) Mittelung der Eingangsmatrizen

Weißes Rauschen tritt als eine Fluktuation der Anzeigewerte um einen Mittelwert auf und kann als Gaußförmige Verteilung um den Anzeigewert dargestellt werden. Durch den statistischen Charakter des Rauschens können die Rauschanteile der Eingangsgrößen durch längeres Messen mit anschließender Mittelwertbildung minimiert werden. Für die Anwendung der DRM würde das bedeuten, dass an allen drei Positionen über einen gewissen Zeitraum, abhängig von der Höhe des Rauschens, Messwerte aufgenommen und gemittelt

werden. Die gemittelten Aufnahmen dienen anschließend als Matrizen P, S und Z.

Exemplarisch wurde eine Mittelwertbildung der Eingangsbilder bei dem in Kapitel 5.3.2 simulierten weißen Rauschen durchgeführt. Im verwendeten Beispiel wurde die Strahlungsquelle bei 400 °C als vollkommen homogen angesehen. Das Ergebnis der DRM sollte somit eine vollkommen homogene Strahlungstemperaturverteilung liefern. Als Maß zur Bewertung der Homogenität wird die Standardabweichung der einzelnen Bildelemente verwendet. In Abbildung 5.19 ist die ermittelte Standardabweichung über die gesamte Ergebnismatrix über der Anzahl der gemittelten Eingangsaufnahmen aufgetragen.

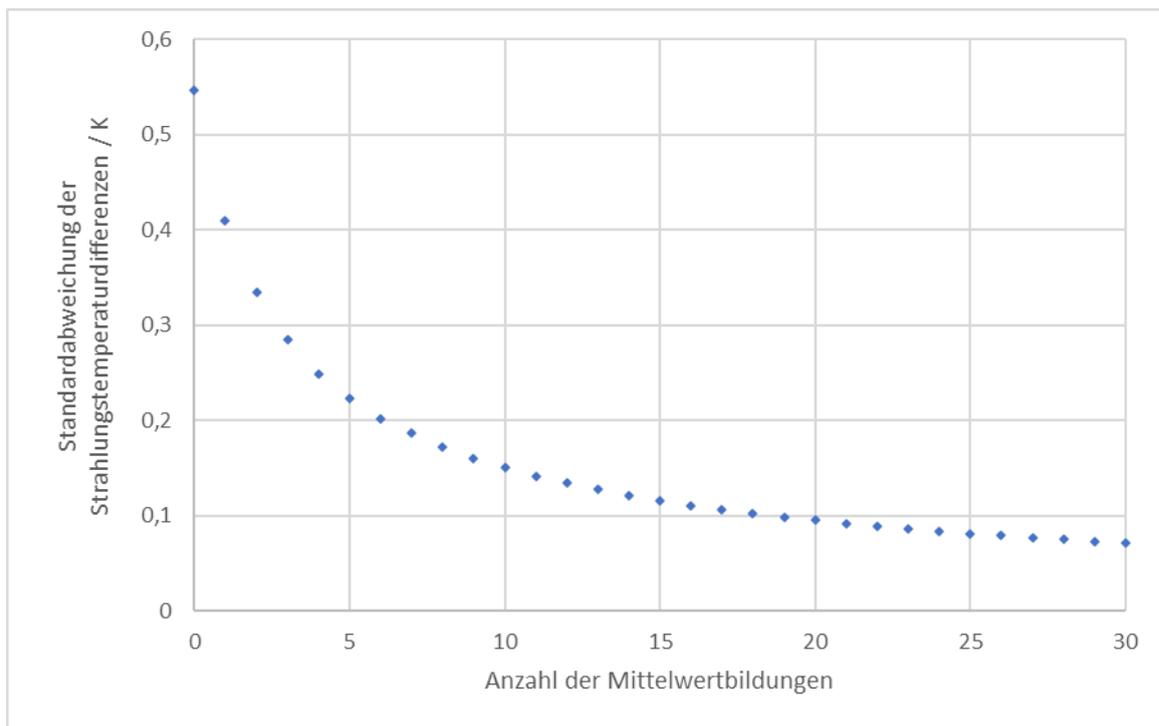


Abbildung 5.19: Standardabweichung der Strahlungstemperatur der Ergebnismatrix in Abhängigkeit von der Anzahl an Mittelungen, in den mit weißem Rauschen überlagerten, der Eingangsbildern. Simulierte Aufnahmen bei 400 °C, einer Matrix von 100 x 100 Bildelementen und einem weißen Rauschen von 150 mK.

Es ist zu erkennen, dass bereits wenige Mittelungen der Eingangsbildern die Unsicherheit im Ergebnis der DRM deutlich verbessern. Im simulierten Beispiel konnte die Standardabweichung über die gesamte Ergebnismatrix innerhalb von 20 Mittelungen um einen Faktor 5,5 verbessert werden.

Jedoch würde eine längere Messzeit pro Position eine mögliche zeitliche Temperaturdrift verstärken. Die Auswirkungen einer zeitlichen Temperaturdrift auf das Ergebnis der DRM wird im folgenden Abschnitt untersucht. An dieser Stelle kann vorweggenommen werden, dass eine zeitliche Temperaturdrift einen größeren Einfluss auf das Ergebnis der DRM hat als weißes Rauschen, deshalb ist eine Verlängerung der Messzeit an den einzelnen Messpositionen keine Option, solange eine Temperaturdrift nicht ausgeschlossen werden kann.

b) Mittelung der Ergebnismatrizen

Eine zweite Möglichkeit, die Auswirkung des weißen Rauschens zu minimieren, besteht darin, mehrere DRM-Durchgänge hintereinander auszuführen und die einzelnen Ergebnismatrizen zu mitteln. Das bedeutet, dass in jedem Durchgang drei Aufnahmen gemacht und anschließend wieder an der ersten Position der nächste Durchgang begonnen wird. Der Verfahrensweg multipliziert sich somit mit der Anzahl der einzelnen Durchgänge. Durch die zusätzlichen Verfahrensweg verlängert sich die Gesamtmesszeit, jedoch vergrößert sich die Messzeit zwischen den Aufnahmen eines DRM-Durchgangs nicht. Deshalb ergibt sich kein negativer Einfluss durch eine mögliche Temperaturdrift.

In Abbildung 5.20 ist die Auswirkung einer Mittelwertbildung der Ergebnismatrizen der DRM anhand der Standardabweichung der Ergebnismatrix gezeigt. Verwendet wurden die gleichen Parameter wie in Abbildung 5.19.

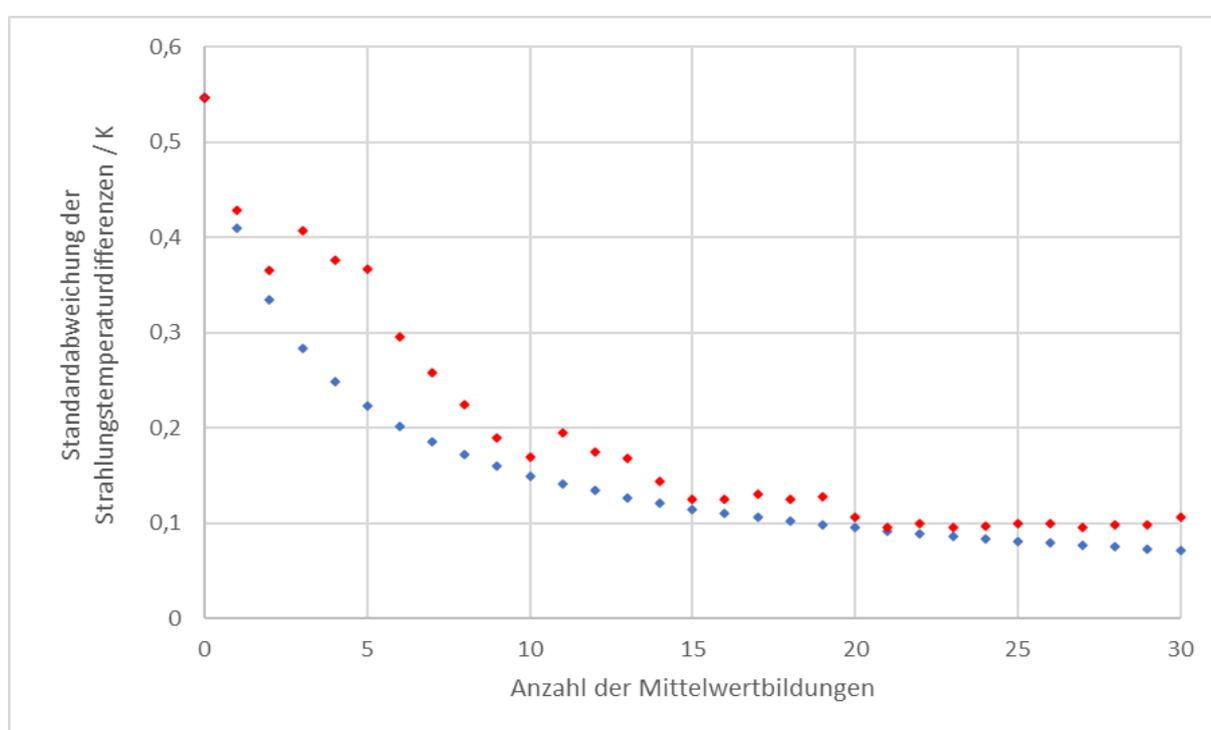


Abbildung 5.20: Standardabweichung der Strahlungstemperatur der Ergebnismatrix in Abhängigkeit der Anzahl an Mittelungen der Eingangsbildern (blau) und der Ergebnismatrizen (rot). Simulierte Aufnahmen bei 400 °C, einer Matrix von 100 x 100 Bildelementen und einem weißen Rauschen von 150 mK.

Beide Methoden liefern nach ungefähr 20 Mittelwertbildungen vergleichbare Ergebnisse, wobei die Mittelwertbildung der Messdaten vor der Durchführung der DRM zu einer kontinuierlichen Verringerung der Standardabweichungen führt. Im Ergebnis der Mittelwertbildung nach Durchführung der DRM sind größere Sprünge zu erkennen. Diese größere Unsicherheit lässt sich darauf zurückführen, dass Fehler in den Eingangsdaten je nach Lage im Bild unterschiedlich starke Auswirkungen auf die Methode und somit auf das errechnete Ergebnis haben.

Die Abbildungen 5.20 und 5.21 zeigen, dass beide Varianten der Rauschreduzierung ähnlich gute Ergebnisse liefern. Somit können für die DRM sowohl die Eingangsbilder mehrfach aufgenommen und gemittelt als auch die Datenaufnahme der erforderlichen Bilder mehrfach durchgeführt und dann die Ergebnismatrizen gemittelt werden. Eine Mittelwertbildung in den Eingangsbildern bietet den Vorteil, dass sich im Allgemeinen die Gesamtmesszeit dadurch nur in geringem Maße erhöht. Der Umfang der notwendigen zusätzlichen Messzeit ist abhängig von der Stärke des weißen Rauschens in den Aufnahmen. Jedoch führt bei dieser Methode die Messzeitverlängerung zur Verstärkung einer eventuell vorhandenen Temperaturdrift. Die Mittelwertbildung der Ergebnismatrix benötigt dagegen eine mehrfache Aufnahme der Eingangsbilder und verursacht somit auch eine höhere Gesamtmesszeit durch den längeren Verfahrensweg. Durch diese Vorgehensweise wird die Auswirkung einer Temperaturdrift jedoch nicht verstärkt.

5.5. Einfluss einer Drift in der Temperaturmessung

Niederfrequente Rauschprozesse führen zu einer Temperaturdrift in den Anzeigewerten der IR-Kamera. Bei niedrigen Frequenzen treten zum Beispiel in Halbleitern größere Rauschanteile auf, es wird vom $1/f$ -Rauschen gesprochen. Die Ursache dieses Rauschens ist bis heute nicht eindeutig geklärt. Des Weiteren können Kapazitätsveränderungen in elektrischen Bauteilen oder eine Veränderung des Dunkelstroms Driften in der Temperaturmessung auslösen. Eine weitere wichtige mögliche Ursache für eine Drift in der Temperaturanzeige ist die Erwärmung der Kamera bzw. einzelner Bauteile der Kamera. Bei nicht temperaturstabilisierten Kameras ist die Eigentemperatur der Kamera von der Umgebungstemperatur und auch der Temperatur des beobachteten Messobjekts abhängig und muss korrigiert werden. Dies geschieht bei vielen ungekühlten Kameras durch einen schwarzen Shutter in der Kamera, der in den Strahlengang gebracht wird. Zwischen zwei Abgleichvorgängen mit Hilfe dieses Shutters kann die Temperaturanzeige driften, wenn die Eigentemperatur der Kamera drifftet.

Die Aufnahme der drei aufeinander folgenden Bilder zur Anwendung der DRM erfolgt, abhängig von der verwendeten Verschiebevorrichtung, üblicherweise in einem Zeitrahmen von weniger als 1 min. Für eine Temperaturdrift über einen so kurzen Zeitraum gibt es im Allgemeinen keinen technischen Parameter, der dieses Verhalten im Datenblatt des Herstellers beschreibt. Der Kameraparameter, der sich mit der Stabilität der Messwerte innerhalb eines kurzen Zeitraums befasst, ist gemäß dem VDI/VDE Datenblatt [20] die Kurzzeitstabilität. Dabei handelt es sich um einen technischen Parameter, der die Stabilität der Anzeigewerte über mindestens 3 h beschreibt. Deshalb wurde in dieser Arbeit die Stabilität bzw. Drift der Temperaturmesswerte für die benötigten kurzen Zeiträume Anhand von exemplarischen Messdaten an typischen Kameras selbst ermittelt.

5.5.1. Auswirkungen von Driftvorgängen auf die DRM

Die Drift der Anzeigewerte einer Mikrobolometer-Kamera wurde unter Verwendung eines Hohlraumstrahlers untersucht. Dafür wurde die IR-Kamera vor einem Cs-Wärmerohr-Hohlraumstrahlers mit einer Strahlungstemperatur von 400 °C positioniert. Abbildung 5.21 zeigt die gemessenen Strahlungstemperaturen zweier zentraler Bildelemente der IR-Kamera. Die digitale Anzeige der IR-Kamera ist auf eine

Nachkommastelle begrenzt. Durch diese Begrenzung ergeben sich Sprünge in der Darstellung der Temperaturanzeige. Zusätzlich wurde zur Veranschaulichung der Driftvorgänge ein linearer Fit durch die Messpunkte gelegt. Anhand dieser Fitgeraden ist die Temperaturdrift deutlich zu erkennen.

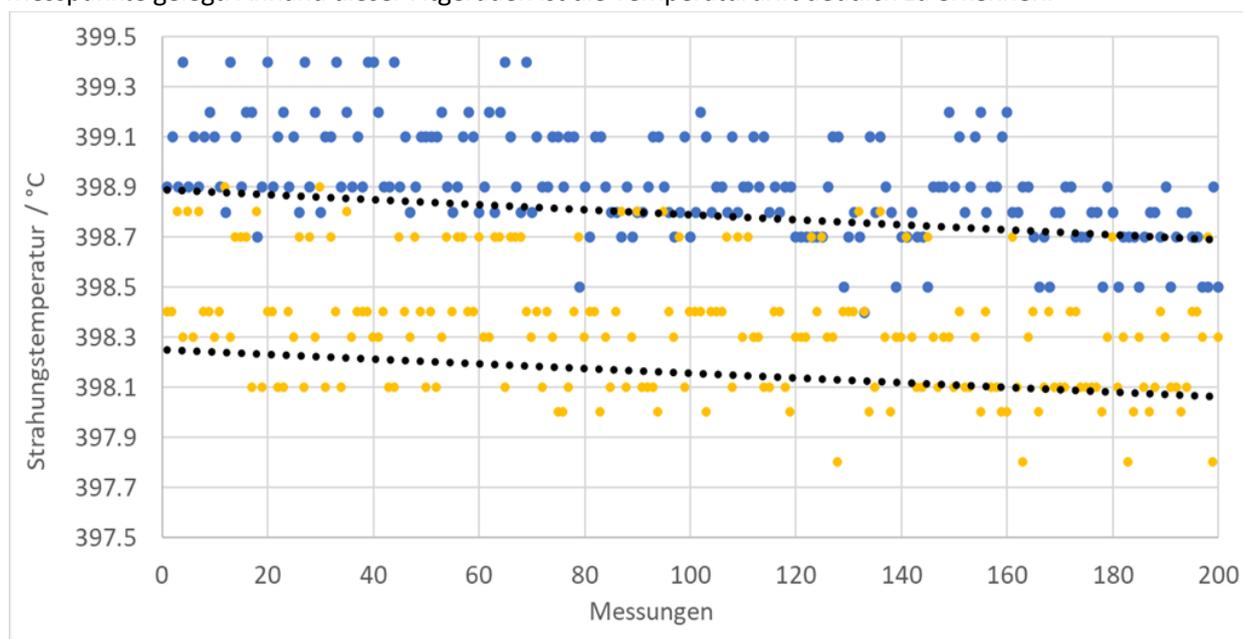


Abbildung 5.21: Gemessene Strahlungstemperaturen (gelbe und blaue Punkte) zweier zentraler Bildelemente einer Mikrobolometer-Kamera über 200 Einzelmessungen und die sich daraus ergebenden Fitgeraden (schwarze Punkte) bei der Beobachtung eines Cs-Wärmerohr-Hohlraumstrahlers bei 400 °C. Die Messwerte wurden mit einer Kamerafrequenz von 32 Hz und in einem Abstand zwischen Kamera und Hohlraumstrahlerapertur von 300 mm aufgezeichnet.

Abbildung 5.22 zeigt die Aufnahme der gemessenen Strahlungstemperaturverteilung des Cs-Wärmerohr-Hohlraumstrahlers bei einer eingestellten Temperatur von 400 °C mit der Mikrobolometer-Kamera. Die Strahlungstemperatur weist im Zentrum der Strahlerapertur eine homogene Verteilung mit Abweichungen von weniger als 2 K auf. Zu den Rändern der Apertur hin kommt es zu einem Temperaturabfall von bis zu 8 K.

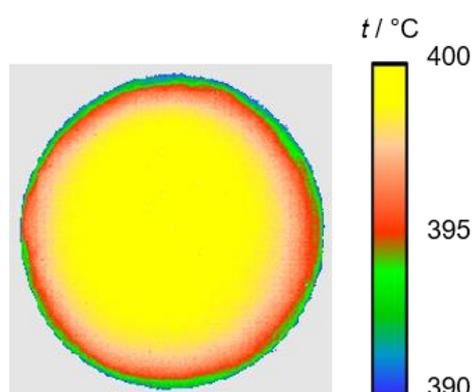


Abbildung 5.22: Temperaturverteilung des Wärmerohrs bei 400 °C, gemessen von einer Mikrobolometer-Kamera.

Wird mit dem in Abbildung 5.22 gezeigten Strahler und der in Abbildung 5.21 dargestellten Drift in den angezeigten Temperaturwerten der Kamera die DRM durchgeführt, ergibt sich die in Abbildung 5.23 dargestellte berechnete Strahlungstemperaturverteilung. Es handelt sich bei der Darstellung um Strahlungstemperaturdifferenzen zu einem im Zentrum liegenden Referenzbildelement.

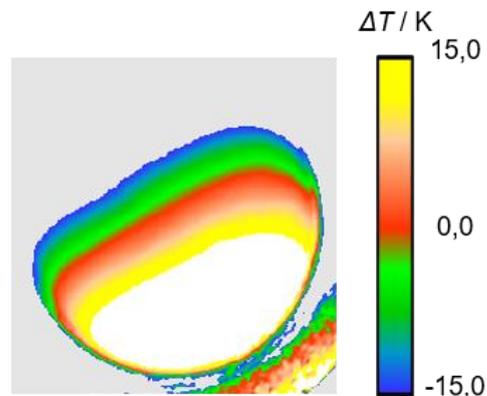


Abbildung 5.23: Berechnete Strahlungstemperaturverteilung des Wärmerohres unter Anwendung der DRM. Die für die DRM verwendeten Eingangsbilder waren mit der in Abbildung 5.21 gezeigten Temperaturdrift behaftet.

Abbildung 5.23 zeigt einen deutlichen Einfluss der Temperaturdrift auf das Ergebnis der DRM. Es entsteht ein starker Temperaturgradient in der Verteilung, welcher durch den Algorithmus verursacht wird und zu einer völligen Verfälschung der ermittelten Temperaturverteilung gegenüber der tatsächlichen Verteilung führt. Die DRM führt bei einer Drift der angezeigten Temperaturwerte während der drei aufeinander folgenden Aufnahmen somit anstelle der angestrebten Verbesserung zu einer deutlichen Verschlechterung der gewonnenen Temperaturverteilung. Die Entstehung des Gradienten wird im Detail in Kapitel 5.4.2 simuliert und erläutert.

5.5.2. Simulationen zu zeitlichen Driftvorgängen der Strahlungstemperatur

Die im Abschnitt 5.5.1 betrachtete Temperaturdrift soll anhand eines praktischen Beispiels an einer Mikrobolometer-Kamera bei 400 °C untersucht werden. Dabei zeigt Abbildung 5.21 die Drift der Anzeigewerte zweier zentraler Bildelemente über 200 Messungen. Die DRM benötigt in der Regel lediglich einen Durchlauf mit drei aufeinanderfolgenden Bildern. Daher kann als Referenz die Temperaturdrift von drei aufeinanderfolgenden Bildern genutzt werden. Die Bildelemente der zweiten Aufnahme zeigen eine Differenz von 100 mK bis 200 mK zum ersten Bild und die der dritten Aufnahme wiederum eine Differenz von 100 mK bis 200 mK zur zweiten Aufnahme. Eine Ursache für die Höhe der Strahlungstemperaturdifferenzen liegt in der Digitalisierung der Werte. Die IR-Kamera hat lediglich eine Auflösung von einer Nachkommastelle, sodass Differenzen unterhalb von 100 mK-Schritten nicht dargestellt werden können.

Der Einfachheit halber wurde zunächst eine Strahlungsquelle mit vollkommen homogener Strahlungstemperaturverteilung simuliert. Die Strahlungstemperatur des Primärbilds P beträgt 400 °C und wird von einer simulierten Kamera ohne Ungleichförmigkeit in einer 100 x 100 Bildelemente großen Matrize

dargestellt. Jedes Bildelement des Spaltenversatzbilds S erhält eine Temperaturdifferenz von 100 mK in Bezug auf P , somit zeigt jedes Bildelement von S einen Wert von 400,1 °C an. Die Bildelemente der dritten Aufnahme (Zeilenversatzbild Z) weisen eine Temperaturdifferenz von 200 mK in Bezug auf P auf. Mit den Informationen dieser drei Aufnahmen wurde die DRM durchgeführt.

Abbildung 5.24 zeigt die errechneten Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung der Strahlungsquelle (Abbildung 5.24a) und die errechneten Differenzen der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera (Abbildung 5.24b). Beide Abbildungen müssten theoretisch eine vollkommen homogene Verteilung zeigen, weil die simulierte Strahlungsquelle eine homogene Strahlungstemperaturverteilung aufweist und die simulierte Kamera keine Ungleichförmigkeit besitzt.

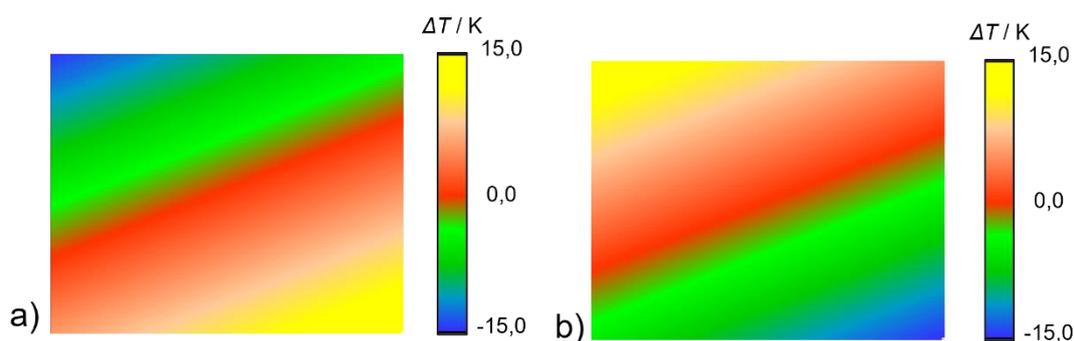


Abbildung 5.24: a) Errechnete Differenzen der Strahlungstemperaturverteilung der Strahlungsquelle und b) errechnete Differenzen der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera. Beide Verteilungen wurden mit homogenen Aufnahmen berechnet, die eine simulierte Temperaturdrift von 100 mK je Bild aufweisen.

Beide Bilder zeigen jedoch einen starken Temperaturgradienten in ihrer Diagonalen (von links oben nach rechts unten bzw. umgekehrt). Die maximale Differenz im Bild beträgt 29,7 K. Des Weiteren sind lineare Isotherme zu erkennen, welche sich jeweils unter demselben Winkel befinden. Die errechneten Differenzen beider Bilder sind jeweils die Negation der anderen Verteilung.

Für das Verständnis dieser Strukturen muss die Auswirkung der Differenzwerte der zweiten und dritten Aufnahme und die damit verbundene Fehlerfortpflanzung im Algorithmus untersucht werden. Die Anzeigewerte des Spalten- und des Zeilenversatzbildes unterscheiden sich jeweils um einen Differenzwert vom Primärbild. Also gilt für den betrachteten Fall:

$$s_{i,j} = p_{i,j+1} + o; \quad (5.16)$$

$$z_{i,j} = p_{i+1,j} + 2o, \quad (5.17)$$

wobei o den Differenzwert zwischen P und S symbolisiert. Somit ergibt sich für c und r :

$$c_{i,j} = p_{i,j+1} + o - p_{i,j+1} = o \quad \text{für alle } c_{i,j} \text{ mit } j < B, \quad (5.18)$$

$$c_{i,j} = p_{i,j} - p_{i,j} - o = -o \quad \text{für alle } c_{i,j} \text{ mit } j > B, \quad (5.19)$$

$$r_{i,j} = p_{i+1,j} + 2o - p_{i+1,j} = 2o \quad \text{für alle } r_{i,j} \text{ mit } i < b, \quad (5.20)$$

$$r_{i,j} = p_{i,j} - p_{i,j} - 2o = -2o \quad \text{für alle } r_{i,j} \text{ mit } i > b. \quad (5.21)$$

Beim Erstellen der Ergebnismatrix ergeben sich für die vier Quadranten unterschiedliche Wichtungen der Differenzwerte. Tabelle 5.2 zeigt auf der linken Seite die Entstehung der Hauptachsen der Ergebnismatrix unter Berücksichtigung der Drift und auf der rechten die vollständige Ergebnismatrix. Das Referenzbildelement ist grün markiert.

Tabelle 5.2: a) Entstehung der Hauptachsen der Ergebnismatrix unter Berücksichtigung der Drift, b) vollständige Ergebnismatrix. Das Referenzbildelement ist grün markiert.

E				
$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	4o	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$
$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	2o	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$
2o	o	0	-o	-2o
$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	-2o	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$
$e_{i,j}$	$e_{i,j}$	-4o	$e_{i,j}$	$e_{i,j}$

a)

E				
6o	5o	4o	3o	2o
4o	3o	2o	o	0
2o	o	0	-o	-2o
0	-o	-2o	-3o	-4o
-2o	-3o	-4o	-5o	-6o

b)

Bei der Ergebnismatrix ist ein sehr klares Schema erkennbar: In der Horizontalen wird von links nach rechts der Anzeigewert eines Bildelements jeweils beim Übergang zum nächsten Bildelement um den Differenzwert verringert. In der Vertikalen wird von oben nach unten der Anzeigewert des Bildelements jeweils beim Übergang zum nächsten Bildelement um das Doppelte des Differenzwerts verringert. Die Höhe der Veränderung korreliert mit den Differenzen zwischen P und S in der Horizontalen und zwischen P und Z in der Vertikalen. Tabelle 5.3 fasst die simulierten Auswirkungen des weißen Rauschens und der Temperaturdrift zusammen. Die Drift- bzw. Rauschvorgänge wurden mit Werten zwischen 100 mK und 200 mK simuliert und haben unterschiedlich starken Einfluss auf das Ergebnis der DRM.

Tabelle 5.3: Vergleich der Auswirkungen von weißem zeitlichem Rauschen und einer Temperaturdrift auf das Ergebnis der DRM.

Einfluss	Weißes Rauschen von 100 mK	Drift von 100 mK pro Aufnahme
Max. Abweichung / K	4,16	29,7

5.5.3. Methoden zur Reduktion der Auswirkung von Driftprozessen

Eine typische Drift in den Anzeigewerten von ungekühlten IR-Kameras hat einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis der DRM und verfälscht dieses, deshalb werden Methoden zur Reduzierung der Drift benötigt.

a) Mittelwertbildung im Zentrum

Unter der Annahme, dass eine mögliche Drift sich auf alle Bildelemente annähernd gleich auswirkt, lässt sich eine Driftbestimmung in den aufeinander folgenden Aufnahmen durchführen. Im Zentrum der Aufnahmen P, S und Z wird eine Region of Interest (ROI) gewählt und in dieser Region wird die Durchschnittstemperatur ermittelt. Abbildung 5.25 veranschaulicht die Wahl einer solchen ROI und die Bestimmung der jeweiligen mittleren Temperatur.

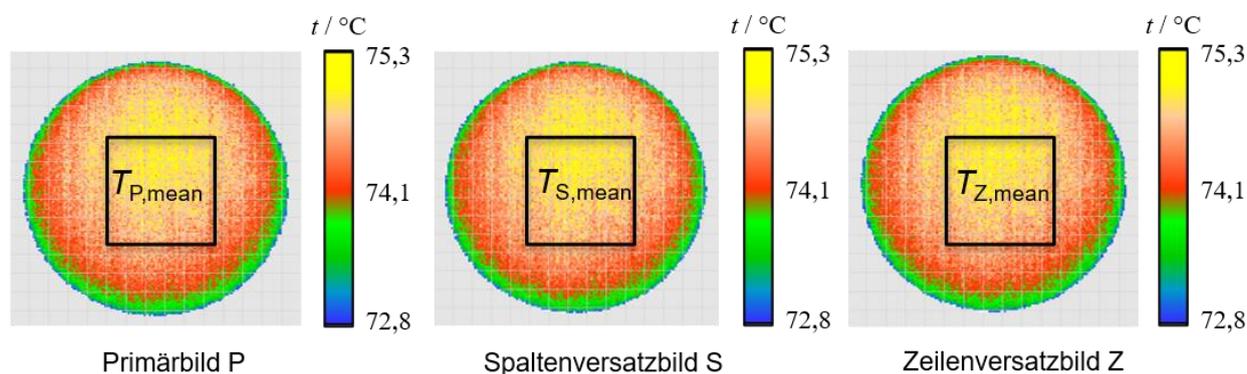


Abbildung 5.25: Vorgehen bei der Mittelwertbildung im Zentrum der drei Aufnahmen zur Reduzierung der Drifteinflüsse auf das Ergebnis der DRM.

Aus den ermittelten Temperaturen $T_{P,mean}$, $T_{S,mean}$ und $T_{Z,mean}$ lassen sich mit

$$T_{S,mean} - T_{P,mean} = O_S, \quad (5.22)$$

$$T_{Z,mean} - T_{P,mean} = O_Z \quad (5.23)$$

die Driftwerte O_S und O_Z ermitteln, mit den anschließend die Werte der Bildelemente der Aufnahmen S und Z mit

$$T_{S_{x,y}} - O_S = T_{S_{x,y}korr}, \quad (5.24)$$

$$T_{Z_{x,y}} - O_Z = T_{Z_{x,y}korr} \quad (5.25)$$

korrigiert werden. Anschließend kann die DRM mit der originalen Aufnahme P und den korrigierten Aufnahmen S_{korr} und Z_{korr} durchgeführt werden.

b) Nutzung der Isothermen zur Driftbestimmung

In der Theorie lassen sich die Driftwerte zur Korrektur der Temperaturdrift mit geringen Unsicherheiten unter Verwendung der drei Aufnahmen der IR-Kamera bestimmen. Jedoch hat sich in der praktischen Anwendung gezeigt, dass die Überlagerung der Temperaturdrift durch das weiße Rauschen als weitere Störgröße die Bestimmung der Driftwerte erschwert, insbesondere wenn der Einfluss des Rauschens von vergleichbarer Größe wie die Drift ist. Deshalb wurde eine robustere Methode zur Korrektur der Temperaturdrift gesucht. Dazu wurde die in Tabelle 5.3 veranschaulichte Tatsache, dass die Temperaturdrift einen deutlich größeren Einfluss als das Rauschen auf das Ergebnis der DRM hat, ausgenutzt.

Die Auswirkung verschieden starker Temperaturdriften auf das Ergebnis der DRM wurde mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen untersucht. Dabei wurde angenommen, dass sich eine Temperaturdrift auf alle Anzeigewerte der Bildelemente gleich auswirkt. Die Temperatur der Aufnahme P wurde als Referenz verwendet und für die Aufnahmen S und Z wurden unterschiedliche Driftkonstellationen angenommen. Anschließend wurde das Ergebnis der DRM bestimmt. Abbildung 5.26 zeigt gewonnene Ergebnisse der DRM.

Die Ergebnisse wurden für unterschiedliche Driftpaarungen erzielt. Unter der jeweiligen Abbildung sind die Driftwerte der Aufnahmen O_S und O_Z , bezogen auf die Referenztemperatur der Aufnahme P, gezeigt. Die Bildelemente der Aufnahme P hatten einen Wert von $400\text{ }^\circ\text{C}$.

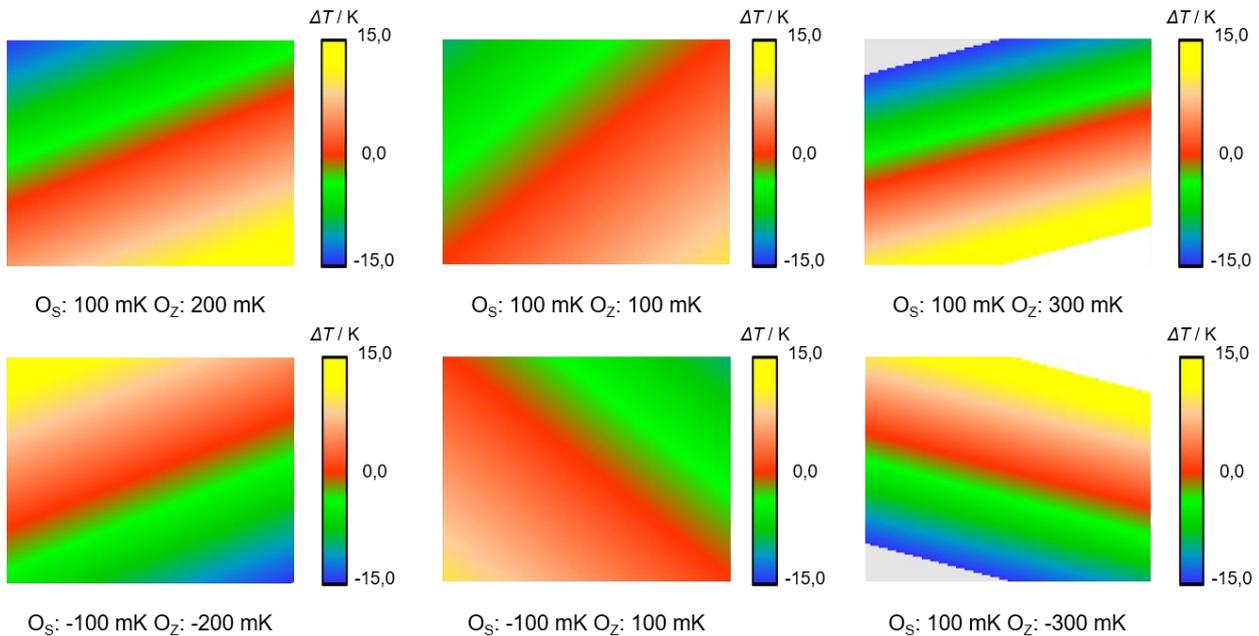


Abbildung 5.26: Übersicht der Ergebnismatrizen der DRM zu verschiedenen Kombinationen unterschiedlicher Driftwerte in den Eingangsbildern zur Simulation einer Temperaturdrift. In der oberen Reihe wurde das Verhältnis der beiden Differenzwerte variiert. In der unteren Reihe wurde zusätzlich das Vorzeichen der Differenzwerte verändert.

Die Ergebnismatrizen von Abbildung 5.26 zeigen alle die gleiche Struktur. Es gibt diagonale Isothermen, welche sich unter einem gewissen Winkel durch das Bild ziehen. Senkrecht zu den Isothermen entsteht der größte Temperaturgradient im Bild. Aus dieser Struktur und der Veränderung der Struktur durch die Variation der Temperaturdifferenzkombinationen lassen sich vier Erkenntnisse ableiten.

- Das Verhältnis der beiden Driftwerte in den Aufnahmen S und Z bestimmt den Winkel, unter dem die Isothermen auftreten.
- Aus der Richtung, in welcher der größte Temperaturgradient auftritt, lässt sich das Vorzeichen von O_Z bestimmen. Tritt der größte Temperaturgradient von unten nach oben auf, dann ist das Vorzeichen von O_Z negativ, weist er von oben nach unten, dann ist sein Vorzeichen positiv.
- Aus dem Anstieg der Isothermen lässt sich ableiten, ob O_S und O_Z gleiche Vorzeichen (positiver Anstieg) oder unterschiedliche Vorzeichen (negativer Anstieg) besitzen.
- Die Größe der Driftwerte bestimmt die Größe des Temperaturgradienten.

Die drei Informationen (Verhältnis, Vorzeichen und Größe der Driftwerte) können für eine Driftkorrektur verwendet werden.

Abbildung 5.27 veranschaulicht die aus den gewonnenen Erkenntnissen entwickelte Korrekturmethode. Zunächst werden zwei ROIs gewählt (Region 2 und 4), welche sich auf einer Isothermen der Ergebnismatrix

befinden. Werden beide ROIs miteinander verbunden, ergibt sich eine Gerade (d_1), welche parallel zu den Isothermen verläuft. Anschließend müssen zwei weitere ROIs (Region 1 und 3) so gewählt werden, dass deren verbindende Gerade (d_2) senkrecht auf (d_1) steht und alle ROIs den gleichen Abstand zum Schnittpunkt der Geraden besitzen.

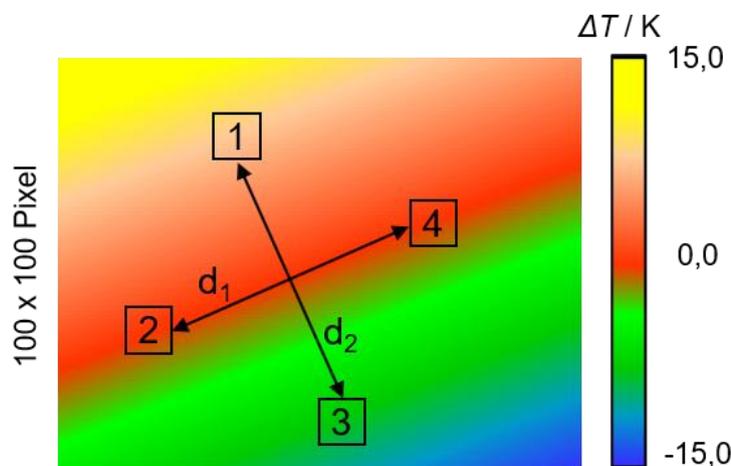


Abbildung 5.27: Vorgehen zur Bestimmung von Regionen, welche zur Mittelwertbildung genutzt werden. Zwei ROIs müssen sich auf einer Isothermen der Ergebnismatrix und zwei weitere müssen sich auf dem größten Temperaturgradienten befinden.

Für die genaue Bestimmung von O_S und O_Z müssen zunächst die Mittelwerte der vier ROI errechnet werden, diese werden im Folgenden als T_{ROI1} bis T_{ROI4} bezeichnet. Anschließend wird eine Kennzahl I nach der Vorschrift

$$I = |T_{ROI1} - T_{ROI4}| - |T_{ROI2} - T_{ROI3}| \quad (5.26)$$

bestimmt.

Zur Anwendung der Methode wird zunächst die DRM mit den unkorrigierten, also driftüberlagerten, Aufnahmen durchgeführt. Aus der Ergebnismatrix wird das Verhältnis von O_S und O_Z deren Vorzeichen und die Kennzahl I bestimmt. Die Driftwerte O_S und O_Z werden unter den ermittelten Einschränkungen (Vorzeichen und Verhältnis) variiert und mit jeder Variation werden die Aufnahmen S und Z korrigiert. Anschließend wird die DRM mit den korrigierten Aufnahmen durchgeführt und für jede Variation wird die Kennzahl I der Ergebnismatrix bestimmt. O_S und O_Z werden so lange variiert, bis sich ein Minimum für I einstellt.

5.6. Unsicherheitsbudget

Das Unsicherheitsbudgets der DRM wurde kameraunabhängig aufgestellt. Der Fokus liegt dabei ausschließlich auf der Unsicherheit, die die Methode selbst unter Berücksichtigung von weißem Rauschen und einer Temperaturdrift aufweist. In der Praxis hat sich gezeigt, dass das weiße Rauschen und eine Temperaturdrift in den drei Ausgangsbildern die dominierenden Unsicherheitsbeträge zur Gesamtunsicherheit der DRM sind.

Dabei gehen die Simulationen von einer völlig homogenen Strahlungsquelle und einer Kamera ohne Ungleichförmigkeit aus. Die Ergebnismatrix sollte daher eine völlig homogene Strahlungstemperatur aufzeigen. Zusätzlich zu diesen beiden Randbedingungen werden die simulierten Aufnahmen sowohl mit weißem Rauschen als auch mit einer Temperaturdrift überlagert. Anschließend werden die statistischen Auswirkungen auf das Ergebnis der DRM analog zu den gezeigten Simulationen in den Abschnitten 5.4 und 5.5 ermittelt. Des Weiteren werden die Methoden zur Reduzierung von Einflüssen in die Betrachtung einbezogen. Es wurden Matrizen mit den Größen von 100 x 100 und 200 x 200 Bildelementen betrachtet.

Bei der Bewertung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass es sich beim weißen Rauschen und einer Temperaturdrift um zeitabhängige Rauschgrößen handelt. Die dargestellten Ergebnisse zeigen dagegen örtliche Unsicherheiten, welche sich über das Kamerabild erstrecken. Wenn weißes Rauschen in Höhe von 100 mK eine Unsicherheit im Kamerabild von 100 mK verursacht, bedeutet es daher nicht, dass die DRM keine Verbesserung des Messprozesses darstellt. Die zeitliche Rauschkomponente beeinflusst die Messunsicherheit, beide Größen sind jedoch nicht direkt vergleichbar. Die ermittelte Unsicherheit der DRM muss mit der typischen Ungleichförmigkeit einer Kamera verglichen werden. Exemplarische Beispielwerte für diesen Parameter werden im Unterabschnitt 6.1.1 ermittelt und liegen bei 100 °C für drei untersuchte Kameratypen im Bereich von 1 K bis 2,5 K.

Im ersten Fall wird davon ausgegangen, dass die Eingangsbilder lediglich von einem weißen Rauschen unterschiedlicher Intensität überlagert werden. Bei der verwendeten Korrektur werden 20 Mittelungen im Ergebnis der DRM betrachtet. Tabelle 5.4 zeigt die ermittelten Ergebnisse.

Tabelle 5.4: Unsicherheitsbetrachtung der DRM unter Berücksichtigung von weißem Rauschen. Die Eingangsbilder wurden mit weißem Rauschen überlagert und anschließend wurde die DRM durchgeführt. Dargestellt ist der Mittelwert der Standardabweichung nach 1000 Simulationen und die verbleibende Standardabweichung nach 20 Mittelungen nach Durchführung der DRM.

Matrizengröße [Bildelemente]	Weißes Rauschen [mK]	Unsicherheit des DRM-Ergebnis (ohne Korrekturmethode) [K]	Unsicherheit DRM-Ergebnis (mit Korrekturmethode) [K]
100 x 100	100	0,51	0,11
	200	1,03	0,18
	300	1,59	0,34
	400	1,94	0,46
	500	2,35	0,48
	1000	5,00	1,12
200 x 200	100	0,73	0,17
	200	1,56	0,26
	300	2,23	0,39
	400	2,85	0,43
	500	3,31	0,54
	1000	7,75	1,18

Die ermittelten Unsicherheiten zeigen eine direkte Abhängigkeit von der Größe der verwendeten Matrix. Je größer die verwendete Matrix ist, desto größer ist die Unsicherheit im ermittelten Ergebnis. Die Fehlerfortpflanzung breitet sich vom Zentrum zu den Rändern des Bildes aus. Mit steigendem Wert des Rauschens vergrößert sich die ermittelte Unsicherheit im Ergebnis der DRM. Die Ursachen für den Anstieg der Unsicherheit mit zunehmendem Rauschen wurde mit Hilfe von Simulationen in Abschnitt 5.4 erläutert. Eine Mittelwertbildung über 20 Ergebnismatrizen zeigt in allen betrachteten Fällen eine deutliche Reduzierung der Messunsicherheit.

Wie in Abschnitt 5.5 dargestellt, kann zusätzlich zum weißen Rauschen eine Temperaturdrift die Messwerte mehrerer aufeinanderfolgender Aufnahmen beeinflussen. Die Auswirkungen einer solchen zusätzlichen Drift auf die Unsicherheit der DRM wurde untersucht, indem jedem Messwert der Aufnahmen S und Z ein auf die Aufnahme P bezogener Driftwert überlagert wird. Da sich eine Temperaturdrift in der Praxis nicht gleichmäßig auf alle Bildelemente auswirkt, wurden die Driftwerte mit Hilfe einer Gauß-förmigen Verteilung um den in der Tabelle 5.5 angegebenen Mittelwert realisiert. Die Gauß-Verteilung besitzt jeweils die Grenzen von $\pm 25\%$ des Mittelwerts. Das bedeutet, dass bei einem Differenzwert von 100 mK die Verteilung Werte in den Grenzen von 75 mK bis 125 mK umfasst.

Tabelle 5.5: Unsicherheitsbetrachtung der DRM unter Berücksichtigung von weißem Rauschen und einer Temperaturdrift. Die Eingangsbilder wurden mit weißem Rauschen und einer Temperaturdrift überlagert und anschließend wurde die DRM durchgeführt. Dargestellt ist der Mittelwert der Standardabweichung nach 1000 Simulationen und die verbleibende Standardabweichung nach 20 Mittelungen nach Durchführung der DRM.

Matrizengröße [Bildelemente]	Drift S / Z [mK]	Weißes Rauschen [mK]	Unsicherheit des DRM-Ergebnis (ohne Korrektur) [K]	Unsicherheit DRM-Ergebnis (mit Korrektur) [K]
100 x 100	100 / 200	100	6,83	0,17
	200 / 400	100	12,83	0,16
	-100 / 100	100	4,07	0,15
	100 / 200	500	7,04	0,40
	200 / 400	500	12,91	0,37
	-100 / 100	500	4,85	0,37
200 x 200	100 / 200	100	12,96	0,15
	200 / 400	100	25,79	0,17

Die Ergebnisse in Tabelle 5.5 zeigen deutlich, dass ohne die Anwendung einer Korrekturmethode die Auswirkung einer Temperaturdrift die Unsicherheit der DRM-Ergebnisse dominieren und die große Unsicherheit der Methode einen sinnvollen Einsatz bei ungekühlten Kameras unmöglich macht. Jedoch lassen sich, wie auch schon in Abschnitt 5.5 gezeigt, die Auswirkungen der simulierten Drift mit den dargestellten

Methoden gut kompensieren, sodass die verbliebende Messunsicherheit überwiegend vom weißen Rauschen bzw. von der Güte der Korrektur des weißen Rauschens abhängt. Die Gesamtunsicherheit der DRM unter Anwendung der Korrekturmethode aus den Abschnitten 5.4 und 5.5 ist gut vergleichbar mit den in Spalte 5 der Tabelle 5.5 berechneten Resultaten.

6. Praktische Anwendungen der Datenreferenzmethode

In diesem Kapitel sollen unter Anwendung der in Kapitel 5 entwickelten Methoden zur Reduzierung des Einflusses von Störgrößen die Möglichkeiten und Grenzen der Datenreferenzmethode in der Praxis untersucht werden.

Zunächst werden der für diese Untersuchungen verwendete und weiterentwickelte Messplatz und die zur Anwendung gebrachten IR-Kameras kurz beschrieben. Dann wird die DRM zur metrologischen Charakterisierung und Kalibrierung von verschiedenen Bauarten von IR-Kameras eingesetzt. Es werden NETD und IETD von drei verschiedenen IR-Kameras bestimmt. Anschließend wird mit Hilfe der DRM ihre Ungleichförmigkeit bestimmt und korrigiert. Im letzten Teil des Kapitels wird die Möglichkeit der Charakterisierung verschiedener Strahlungsquelle mit Hilfe der DRM untersucht.

6.1. Messplatz und IR-Kameras

Im folgenden Abschnitt werden die Strahlungsquellen und IR-Kameras vorgestellt, mit denen die Untersuchungen zur praktischen Anwendung der Datenreferenzmethode durchgeführt wurden. Zunächst werden die Strahlungsquellen vorgestellt, die sich in die zwei in Abschnitt 3.2 vorgestellten Kategorien - Hohlraumstrahler und Flächenstrahler - einteilen lassen. Anschließend werden drei unterschiedliche Bauarten von IR-Kameras vorgestellt, die zur praktischen Durchführung der DRM verwendet wurden.

6.1.1. Kamera-Kalibriermessplatz

Der Kamera-Kalibriermessplatz der PTB berücksichtigt die spezifischen technischen Anforderungen an die messtechnische Charakterisierung von IR-Kameras. Der Laborraum wird mit kontrollierter Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit betrieben. Die Raumtemperaturregelung arbeitet in einem Bereich von 18 °C bis 30 °C mit einer Stabilität von ± 1 °C. Die relative Luftfeuchtigkeit kann in einem Bereich von 25 % bis 60 % relativer Luftfeuchte mit einer Stabilität von ± 2 % eingestellt werden. Eine schematische Darstellung des Messplatzes ist in Abbildung 6.1 als gezeichnete Draufsicht gegeben.

Die messtechnische Charakterisierung der IR-Kameras erfolgt mit Hilfe von Wärmerohr-Hohlraumstrahlern und Flächenstrahlern bekannter Strahlungstemperatur, welche nebeneinander installiert sind. Der Messplatz umfasst vier Wärmerohr-Hohlraumstrahler, die den Temperaturbereich von -60 °C bis 962 °C vollständig abdecken. Die Temperatur der Wärmerohr-Hohlraumstrahler wird gemäß der ITS-90 über ein Standard-Platin-Widerstandsthermometer (SPRT) gemessen, welches sich sehr nahe am Boden des Hohlraums befindet und in gutem thermischem Kontakt mit dem Wärmeträgermittel ist. Die Wärmerohr-Hohlraumstrahler liefern die Strahlungstemperatur mit Unsicherheiten, die dem besten Stand der Technik entsprechen. Typische Unsicherheiten sind in Tabelle 3.1 und in [16] dargestellt.

Die Aperturen der Hohlraumstrahler sind kreisförmig und umfassen einen Durchmesser von 30 mm bis hin zu einem Maximum von 75 mm. Aufgrund der im Vergleich zum typischen Gesichtsfeld einer IR-Kamera begrenzten strahlenden Flächen der Hohlraumstrahler verfügt der Messplatz zusätzlich über zwei Flächenstrahler. Die Temperaturen der Flächenstrahler umfassen einen Temperaturbereich von -15 °C bis

600 °C. Die Flächenstrahler zeichnen sich durch ihre größeren Strahlungsflächen von bis zu 300 mm x 300 mm aus. Die Strahlungstemperatur der Flächenstrahler wird rückführbar mit Vergleichsmessungen zu den Wärmerohr-Hohlraumstrahlern auf die ITS-90 über hochwertige Strahlungsthermometer bestimmt.

Zur Durchführung der DRM müssen die IR-Kameras mit hoher Präzision vor den Strahlungsquellen verschoben werden. Dazu wurde ein automatisches x-y-z-Positionierungssystem verwendet, das eine mechanische Reproduzierbarkeit von 100 µm besitzt. Darauf befindet sich ein zusätzliches hochpräzises Positioniersystem mit einer Genauigkeit um sub-µ-Bereich. In Vorbereitung und im Verlauf dieser Arbeit wurde die vollständig automatisierte messtechnische Durchführung und softwaregestützte Auswertung der drei räumlich gegeneinander verschobenen Kamerabilder entwickelt und unter der Einbeziehung der Methoden zur Störgrößenreduzierung kontinuierlich weiterentwickelt. Das hohe Maß an mechanischer Präzision des Messplatzes und die automatisierte Durchführung und Auswertung der DRM ermöglichten eine sehr gute quantitative Vergleichbarkeit der mit verschiedenen Kamerasystemen erzielten Resultate der DRM.

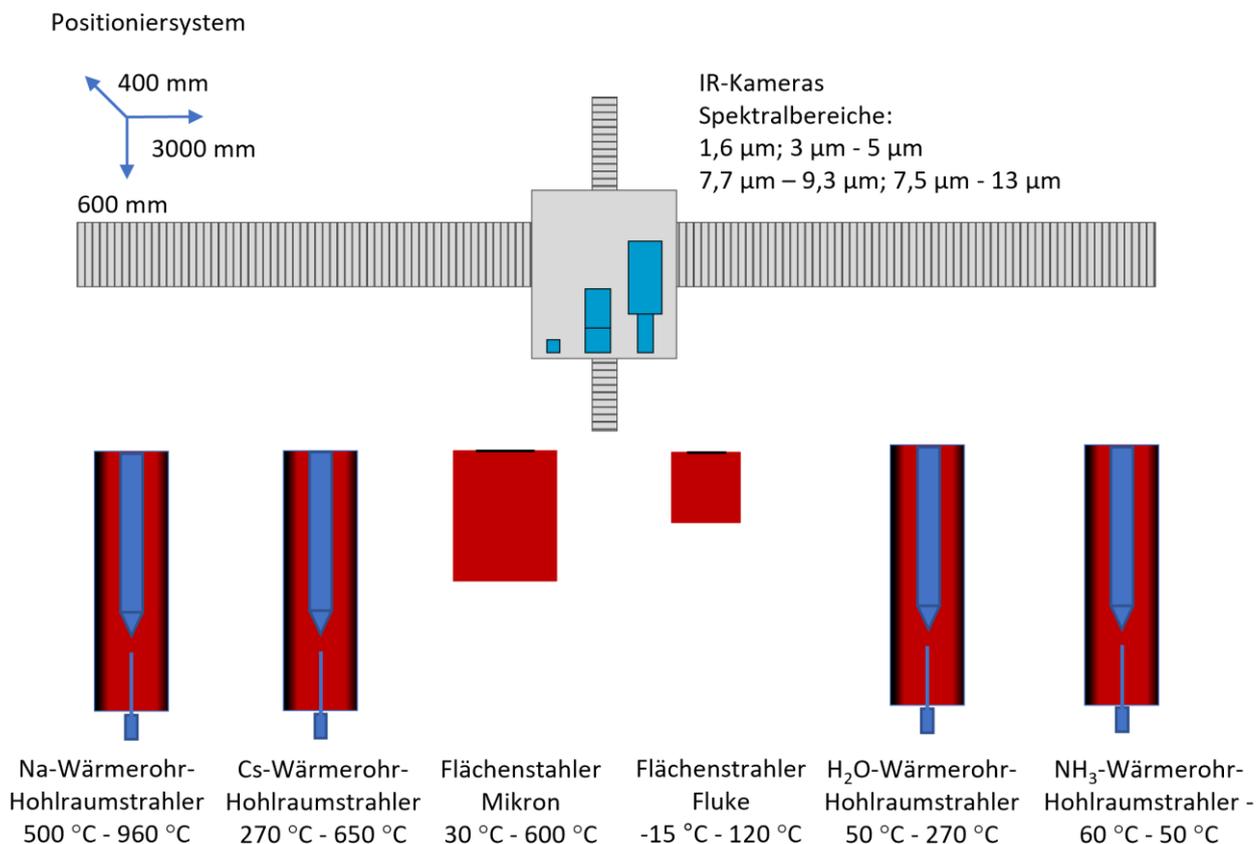


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Kamera-Kalibriermessplatzes.

Abbildung 6.2 zeigt einen Bildausschnitt des Messplatzes mit einem Strahlungsthermometer und einer IR-Kamera, die auf dem Positionierungssystem vor verschiedenen Kalibrierstrahlern befestigt sind.

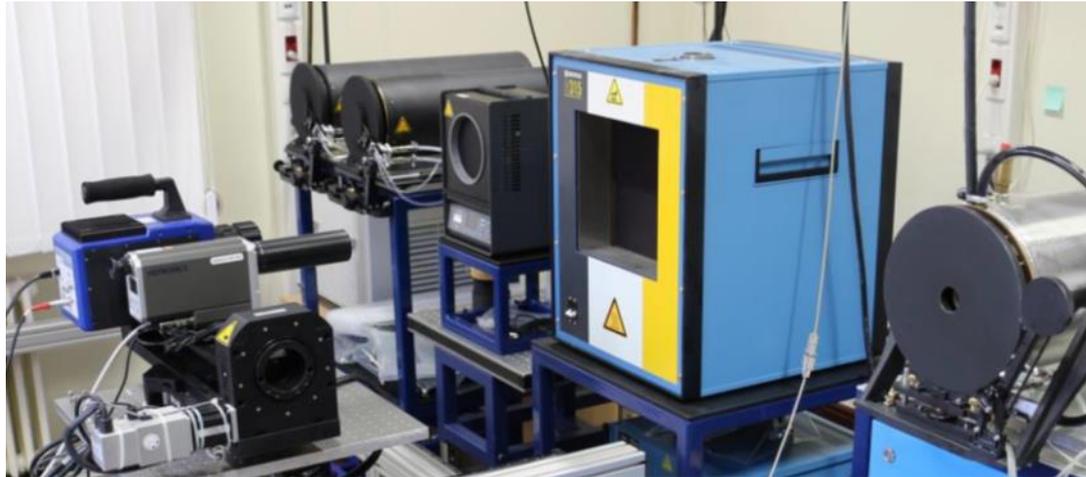


Abbildung 6.2: Bild eines Teils des verwendeten Kamera-Kalibriermessplatzes. Ein Strahlungsthermometer (Vordergrund) und eine IR-Kamera (Hintergrund) sind auf dem automatisierten Positionierungssystem befestigt. Rechts sind zwei Flächenstrahler und drei Hohlraumstrahler zu sehen.

6.1.2. IR-Kameras

Die DRM wurde an drei unterschiedlichen IR-Kameras angewendet, die in dieser Arbeit als Titanium, PYROVIEW 640L und Pi 640 bezeichnet werden. Ihre technischen Daten sind in Tabelle 6.1a aufgeführt. Bei der Titanium handelt es sich um eine Kamera mit einem gekühlten und temperaturstabilisierten MCT-Detektor. Bei PYROVIEW 640L und Pi 640 um Kameras mit ungekühlten und nicht temperaturstabilisierten Mikrobolometer-Detektoren. Die Ungleichförmigkeit aller Kameras wurden zunächst von den Herstellern korrigiert und die Kameras wurden dann werksseitig kalibriert. Die in Tabelle 6.1 angegebenen Messunsicherheiten der Kameras sind den Datenblättern der Hersteller entnommen. Zu diesen Unsicherheiten wird kein Konfidenzintervall angegeben. Die durch die Hersteller angegebenen technischen Spezifikationen der verwendeten Kameras sind in [40], [41] und [42] aufgeführt. Zusätzlich wurden bei praktischen Anwendungen noch eine NIR- und eine MIR-Kamera angewendet, deren technische Daten ebenfalls in Tabelle 6.1b dargestellt sind.

Tabelle 6.1a: Technische Spezifikationen der verwendeten IR-Kameras

Kameratyp	Titanium	PYROVIEW 640L	Pi 640
Sensortyp	MCT	Mikrobolometer	Mikrobolometer
Temperaturmessbereiche	-20 °C – 50 °C 50 °C – 150 °C 100 °C – 250 °C 150 °C – 300 °C 250 °C – 500 °C 500 °C – 1.000 °C 600 °C – 1.500 °C 1.500 °C – 3.000 °C	-20 °C – 120 °C 0 °C – 500 °C	-20 °C – 100 °C 0 °C – 250 °C 150 °C – 900 °C
Spektralbereich	7,7 µm – 9,3 µm	8 µm – 14 µm	7,5 µm – 13 µm
Optik	25 mm FOV: 22° x 16°	18 mm FOV: 34° x 26°	10.5 mm FOV: 60° x 45°
Detektorformat	320 x 256	640 x 480	640 x 480
NETD	< 25 mK @ 25 °C BB	< 80 mK @ 30 °C BB	75 mK
Messunsicherheit	2 K < 100 °C 2 % > 100 °C	2 K < 100 °C 2 % > 100 °C	2 K < 100 °C 2 % > 100 °C
Integrationszeit	10 µs - 20 ms	-	-
Frequenz	-	50 Hz	32 Hz
Detektortemperatur	80 K	ungekühlt	ungekühlt
Pitch	k. A.	k. A.	k. A.

Tabelle 6.1b: Technische Spezifikationen der verwendeten IR-Kameras

Kameratyp	SC 2500	Silver 420M
Sensortyp	InGaAs	InSb
Temperaturmessbereiche	-	-20 °C – 350 °C
Spektralbereich	0,9 µm – 1,7 µm 0,4 µm – 1,7 µm	3,6 µm – 5 µm
Optik	18 mm FOV: 34° x 26°	12 mm FOV: 38° x 26°
Detektorformat	320 x 256	320 x 256
NEI/NETD	< 5 10 ⁹ ph/s/cm ² < 3 10 ¹⁰ ph/s/cm ²	< 20 mK
Messunsicherheit	< 150e- RMS	2 K < 100 °C, 2 % > 100 °C
Integrationszeit	400 ns – 1 s	-
Frequenz	-	100 Hz
Detektortemperatur	k. A.	k. A.
Pitch	30 µm	k. A.

6.2. Messtechnische Charakterisierung der IR-Kameras

In diesem Abschnitt werden die Ungleichförmigkeit, die NETD und die IETD der drei IR-Kameras gemäß den in der Technische Richtlinie VDI / VDE 5585 Teil 1 „Metrologische Charakterisierung von Wärmebildkameras“ [20] festgelegten Vorgaben des VDI/VDE Fachausschuss 8.16 "Temperaturmessung mit Wärmebildkameras" bestimmt.

6.2.1. Bestimmung der Ungleichförmigkeit

Besteht der Detektor einer Kamera aus mehreren Elementen (Mehrelementdetektoren) treten Unterschiede in der Charakteristik der Detektorelemente der Matrix auf. Diese Unterschiede werden durch den Kamerahersteller über Korrekturverfahren ausgeglichen. Der verbleibende Restfehler tritt als Unterschied der Strahlungstemperaturmesswerte bei der Beobachtung von Strahlungsquellen mit bildfüllender, homogener Strahldichte auf. Der Kameraparameter, der diesen Restfehler beschreibt, wird Ungleichförmigkeit (NU) genannt. Die Ungleichförmigkeit ist eine Eigenschaft, die die Abweichung zwischen den angezeigten Einzeltemperaturwerten in einem Bild bei bildfüllender, homogener Strahldichte des Messobjekts unter Vernachlässigung des zeitabhängigen Eigenrauschens des Geräts beschreibt [20].

In Kapitel 3.5 wurden typische Ursachen, die zu einer Inhomogenität im Kamerabild führen, beschrieben. Zwei Beispiele sind die Inhomogenität der Detektorempfindlichkeit über die Detektorfläche und die optischen Eigenschaften des Kameraobjektivs. Bei IR-Kameras mit Mehrelementdetektoren ist das Auftreten von Ungleichmäßigkeiten technisch unvermeidbar. Normalerweise kompensieren die Hersteller die individuelle Ungleichmäßigkeit einer IR-Kamera mit Hilfe der Signalverarbeitungssoftware bei der Ersteinstellung der Kamera so weit wie möglich. Da jedoch keine perfekt homogenen, großflächigen Temperaturstrahlungsquellen für diesen Abgleich zur Verfügung stehen und, weil nach dem Erstabgleich der Kamera im Laufe der Zeit Veränderungen im Ansprechverhalten der einzelnen Detektorelemente auftreten können, ist dieser Prozess der anfänglichen Ungleichmäßigkeitskorrektur nicht perfekt. Der Restfehler manifestiert sich in einer verbleibenden Ungleichförmigkeit der Kamera.

Zur Bestimmung der Ungleichförmigkeit nach [20] wird die Kamera mittig vor einem Referenzstrahler mit möglichst homogener Strahldichte und bekannter Strahlungstemperatur positioniert. Die kurzzeitigen Temperaturschwankungen und verbleibenden räumlichen Inhomogenitäten des Strahlers müssen im Vergleich zu der zu messenden Ungleichförmigkeit klein sein. Die Gesamtmesszeit sollte mindestens das 100fache der Bildperiode und das 10fache der Ansprechzeit betragen. Für alle Bildelemente werden mindestens 50 aufeinanderfolgende Messungen aufgezeichnet und daraus der arithmetische Mittelwert des Signals für jedes Bildelements gebildet. Die Temperaturspanne, in der 99% aller gemittelten Temperaturwerte der einzelnen Detektorelemente liegen, beschreibt die Ungleichförmigkeit der Kamera. Bei Angabe der Ungleichmäßigkeit einer Kamera müssen die gemessene Temperatur, die Integrationszeit und die Eigentemperatur der Kamera angegeben werden.

Für die folgenden Messungen wurde als Flächenstrahler der Plattenstrahler Mikron M315 mit einer Temperatur von 100,0 °C verwendet. Seine Strahlungstemperatur wurde in der Mitte der Strahlungsfläche mit einer Standardunsicherheit ($k=1$) von 35 mK mit einem im Wellenlängenbereich von 8 μm bis 14 μm empfindlichen Strahlungsthermometer bestimmt. Die Abbildung 6.3 zeigt Bilder des Flächenstrahlers durch

die drei untersuchten Kameras und die daraus resultierenden Histogramme der gemessenen Temperaturverteilungen. Die Integrationszeit von der Titanium-IR-Kamera betrug 0,127 ms. Die PYROVIEW 640L verwendete eine Bildfrequenz von 50 Hz und die Pi 640 eine Bildfrequenz von 32 Hz. Die Innentemperaturen der Kameras betragen 28,6 °C (Titanium), 31,1 °C (PYROVIEW 640L) und 23,4 °C (Pi 640). Die Kameras waren mit ihrer optischen Achse senkrecht auf die strahlende Oberfläche des Flächenstrahlers ausgerichtet. In Tabelle 6.2 sind die resultierenden Ungleichmäßigkeiten der drei Kameras angegeben [45].

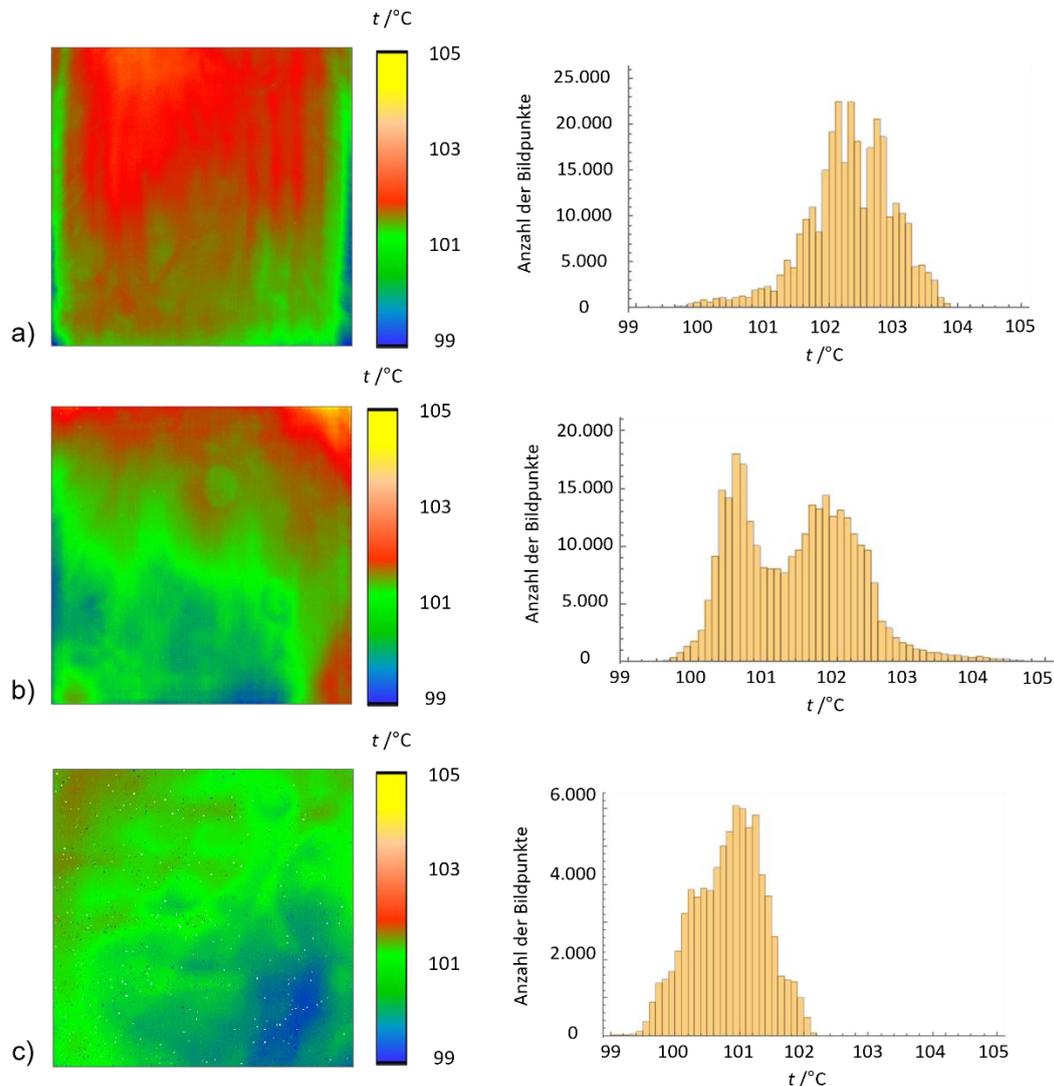


Abbildung 6.3: Thermografische Aufnahme eines Flächenstrahlers bei 100,0 °C mit a) der Kamera Titanium, b) der Kamera PYROVIEW 640L und c) der Kamera Pi 640. Aus diesen Aufnahmen wurden die Ungleichmäßigkeiten der Kameras bestimmt. Rechts: Histogramme der dargestellten Temperaturverteilungen.

Tabelle 6.2: Ermittelte Ungleichmäßigkeiten der untersuchten IR-Kameras bei 100,0 °C.

Parameter	Titanium	PYROVIEW 640L	Pi 640
NU / K	1,26	2,23	1,84

Alle drei untersuchten Kameras zeigen Ungleichförmigkeiten in der gleichen Größenordnung, wobei die gekühlte, temperaturstabilisierte Titanium-Kamera ein besseres Ergebnis erzielt als die beiden ungekühlten, nicht-temperaturstabilisierten Mikrobolometerkameras. Dieses Ergebnis war so zu erwarten.

Das Histogramm in Abbildung 6.3 zeigt im Gegensatz zu den anderen beiden Kameras zwei Spitzen. Dieses Verhalten ist auffällig. Es folgt aus einer imperfekten Ungleichförmigkeitskorrektur, bei dem der Randbereich des Gesichtsfelds systematisch eine höhere Temperatur detektiert (rechte Spitze) und der zentrale Bereich eine niedrigere Temperatur (linke Spitze). Die Kamera spiegelt damit vermutlich die Inhomogenität des zu ihrer Ungleichförmigkeitskorrektur verwendeten Flächenstrahlers wider, der zu seinen Rändern hin kälter als in der Strahlermitte war. Die ist ein für Flächenstrahler nicht untypisches Verhalten aufgrund von Wärmeverlusten am Strahlerrand.

6.2.2. Bestimmung der IETD

Die inhomogenitätsäquivalente Temperaturdifferenz (IETD) gibt die kleinste auflösbare Temperaturdifferenz an, die dem örtlichen Rauschen entspricht, das sich aus der Ungleichförmigkeit der Kamera ergibt und über die gesamte Bildoberfläche verteilt ist (VDI/VDE 5585 Blatt 1, 2018). Im Gegensatz zur Ungleichförmigkeit beträgt das Vertrauensintervall der IETD immer 68,3 % (Standardmessunsicherheit, Erweiterungsfaktor $k = 1$). Tabelle 6.3 fasst die IETD der drei untersuchten IR-Kameras unter den beschriebenen Bedingungen zusammen.

Tabelle 6.3: Ermittelten IETD-Werte der untersuchten IR-Kameras bei 100 °C.

Parameter	Titanium	PYROVIEW 640L	Pi 640
IETD / K	0,61	1,01	0,69

6.2.3. Bestimmung der NETD

Die rauschäquivalente Temperaturdifferenz (NETD) wird in der Technischen Richtlinie VDI / VDE 5585 Blatt 1 „Metrologische Charakterisierung“ als der Beitrag zur Messunsicherheit, der aufgrund von hochfrequentem zeitlichen Signalrauschen entsteht, beschrieben. Sie entspricht der Temperaturdifferenz eines Schwarzen Strahlers, bei der das Signal-Rausch-Verhältnis der IR-Kamera gleich eins ist. Bei der rauschäquivalenten Temperaturdifferenz des einzelnen Detektorelements beträgt das Vertrauensintervall wie bei der IETD stets 68,3 % (Standardunsicherheit, Erweiterungsfaktor $k = 1$) [20].

In der Richtlinie werden aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Kameratypen zwei verschiedene praktische Methoden zur Bestimmung der NETD definiert. Bei Methode A werden mindestens 100 aufeinanderfolgende Bilder zur Bestimmung der NETD durchgeführt. Somit ist eine zeitliche Aussage über das Verhalten jedes Bildelementes möglich. Währenddessen liefert Methode B einen Mittelwert der NETD aller Detektorelemente aus zwei aufeinanderfolgenden Bildern.

Die NETD aller drei Kameras wurden mit beiden Methoden bestimmt. Für Methode A wurden 100 aufeinanderfolgende Aufnahmen eines Flächenstrahlers durchgeführt und das zeitliche Verhalten jedes Bildelementes analysiert. Abbildung 6.4 zeigt jeweils zwei typische zeitliche Verläufe von zentralen Bildelementen jeder Kamera.

Bei Methode B wurden zwei Bilder aufgenommen und anschließend die NETD nach Gleichung (6.1) bestimmt:

$$NETD = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_h} \sum_{j=1}^{n_v} \frac{(\Delta T_{i,j} - \overline{\Delta T})^2}{n_h n_v}}. \quad (6.1)$$

Dabei ist $\Delta T_{i,j}$ die Differenz zwischen der Anzeigetemperaturen des Bildelements i,j , $\overline{\Delta T}$ die mittlere Temperaturdifferenz zwischen den Mittelwerten der beiden Aufnahmen, n_h die horizontale und n_v die vertikale Anzahl der Bildelemente. Tabelle 6.4 fasst die ermittelten NETD zusammen.

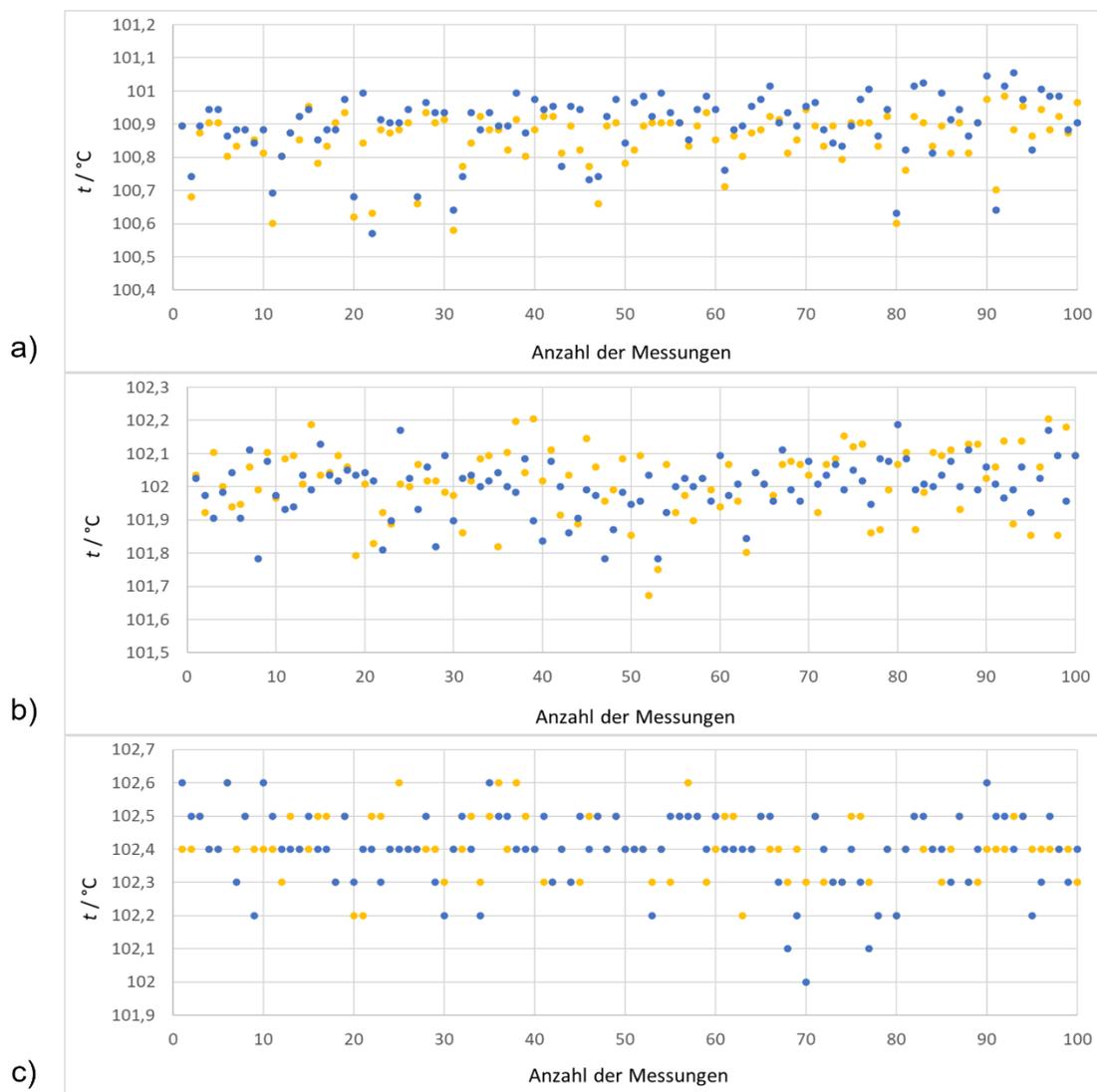


Abbildung 6.4: Temperaturanzeige zweier zentraler Detektorelemente a) der IR-Kamera Titanium, b) der IR-Kamera PYROVIEW 640L und c) der IR-Kamera Pi 640 im Zeitverlauf.

Tabelle 6.4: Ermittelte NETD-Werte der untersuchten IR-Kameras bei 100 °C, bestimmt nach den Methoden A und B gemäß [20].

NETD / mK	Titanium	PYROVIEW 640L	Pi 640
Methode A	12,5	14,0	13,9
Methode B	9,6	9,1	13,0

Ein Vergleich der Ergebnisse in Tabelle 6.3 mit den Ergebnissen von Tabelle 6.4 macht deutlich, dass bei allen drei Kameras die Messunsicherheit der Kamera deutlich stärker durch die IETD als durch die NETD bestimmt wird. Dies unterstreicht die Bedeutung einer guten Ungleichförmigkeitskorrektur von IR-Kameras und das Potential der DRM zur Verbesserung der quantitativen Temperaturmessung mit IR-Kameras.

6.3. Anwendung der DRM bei verschiedenen Kameratypen

6.3.1. Gekühlte temperaturstabilisierte Kameras

Im Folgenden werden Anwendungsbeispiele der DRM mit IR-Kameras gezeigt, deren Detektor gekühlt und temperaturstabilisiert ist.

Abbildung 6.5a zeigt eine Aufnahme des Flächenstrahlers Mikron mit einer strahlenden Fläche von 300 mm x 300 mm, einer Temperatur von 400 °C und einem Emissionsgrad ε_{bb} von 0,85 mit der IR-Kamera Titanium. Die in dieser Aufnahme zu sehenden Temperaturinhomogenitäten ergeben sich aus der Überlagerung der tatsächlichen, inhomogenen Strahlungstemperaturverteilung des Flächenstrahlers und der Ungleichförmigkeit der Kamera.

Es wurden mit der Titanium drei zueinander verschobene Aufnahmen (P, S und Z) vom Flächenstrahler gemacht und der Algorithmus der DRM angewendet. Als Ergebnis lieferte die DRM zum einen die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera (Abbildung 6.5b) und zum anderen die tatsächliche Strahlungstemperaturverteilung des Flächenstrahlers (Abbildung 6.5c). In den Abbildung 6.5b und 6.5c sind die Strahlungstemperaturdifferenzen zu einem Referenzbildelement aufgetragen, das sich im Zentrum der Abbildungen befindet und den Wert null besitzt.

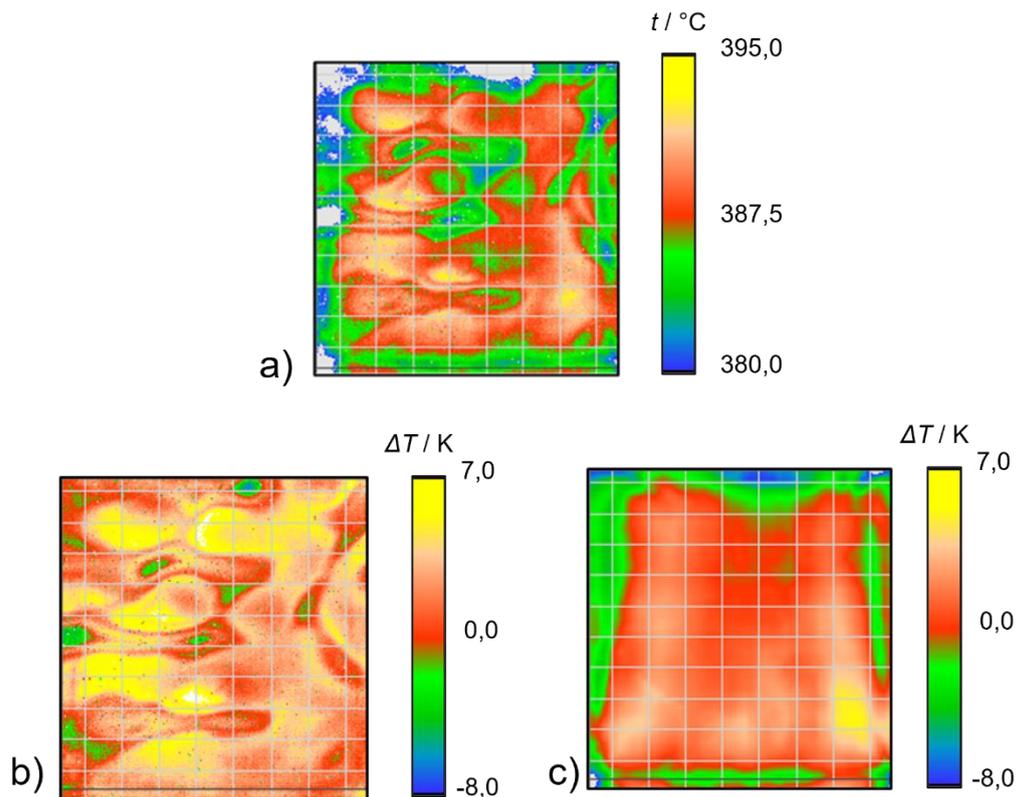


Abbildung 6.5: a) Strahlungstemperaturbild eines bei etwa 400 °C betriebenen Flächenstrahlers (Mikron), aufgenommen von der IR-Kamera Titanium. Die beobachteten Temperaturinhomogenitäten resultieren teilweise aus der tatsächlichen Temperaturinhomogenität über die strahlende Fläche des Flächenstrahlers und teilweise aus der Ungleichförmigkeit der Empfindlichkeit der Kamera. b) Errechnete Inhomogenität der aufgenommenen Strahlungstemperaturverteilung aufgrund der Ungleichförmigkeit der Empfindlichkeit der IR-Kamera bei 400 °C. Dieses Bild wird mit der DRM aus den in a) gezeigten Daten und den Daten von zwei zum Primärbild vertikal verschobenen Bildern erzeugt. Die Ungleichförmigkeit wird in Temperaturunterschieden angegeben, die sich auf ein Referenzbildelement in der Bildmitte beziehen. c) Berechnete tatsächliche Strahlungstemperaturverteilung des Flächenstrahlers bei 400 °C. Das Bild wird mit der DRM aus den in a) und b) gezeigten Daten erzeugt. Die Temperaturverteilung wird analog zu b) in Temperaturdifferenzen angegeben, die sich auf ein Referenzbildelement in der Bildmitte beziehen.

Nach Anwendung der DRM ist sehr gut zu erkennen, dass die Strukturen, die in Abbildung 6.5a dominieren, nicht durch den Flächenstrahler verursacht werden, sondern der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera (Abbildung 6.5b) geschuldet sind. Der Flächenstrahler besitzt eine deutlich homogenere Strahlungstemperaturverteilung (Abbildung 6.5c) als zunächst angenommen werden konnte.

Das nächste Beispiel veranschaulicht noch deutlicher, dass eine verbesserte Korrektur der Ungleichförmigkeit von IR-Kameras eine wesentlich genauere Nutzung der Kameras für die quantitative Messung von Temperaturen und Temperaturverteilungen ermöglicht. Zwei gekühlte, temperaturstabilisierte IR-Kameras bilden beide die Strahlungstemperaturverteilung desselben Flächenstrahlers bei ca. 300 °C ab. Die Aufnahme von Kamera 1 (Titanium) ist in Abbildung 6.6a und die Aufnahme von Kamera 2 (Silver) in Abbildung 6.6b gezeigt. Bei der IR-Kamera Silver handelt es sich auch um eine gekühlte, temperaturstabilisierte IR-Kamera, die in einem Spektralbereich von 3 µm bis 5 µm arbeitet. Obwohl es sich um denselben Flächenstrahler handelt, sind zwei sehr unterschiedliche Strahlungstemperaturverteilungen zu erkennen. In Abbildung

6.6 **Abbildung 6.5a** sind deutliche Muster und in **Abbildung 6.6b** ein systematischer Temperaturanstieg von links nach rechts zu erkennen. Im zentralen Bildbereich befindet sich eine Fläche mit einer geringeren Strahlungstemperatur.

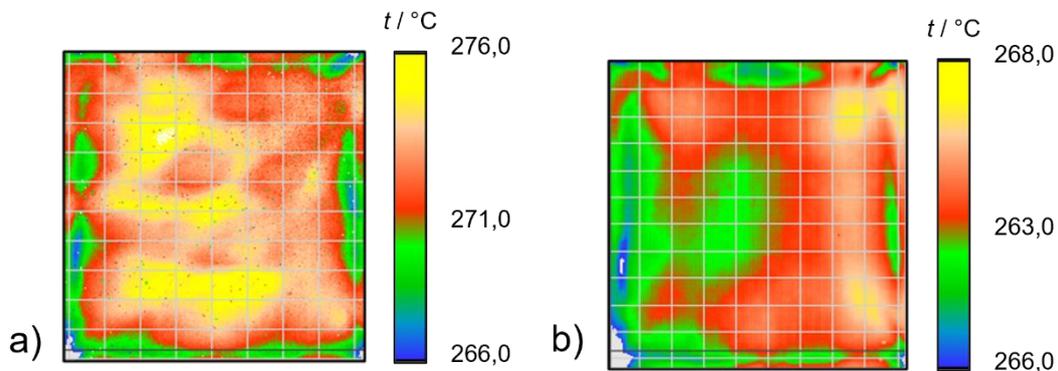


Abbildung 6.6: Strahlungstemperaturverteilungen eines Flächenstrahlers (Mikron) bei ca. 300 °C, aufgenommen von zwei IR-Kameras a) Titanium und b) Silver. Beide Aufnahmen zeigen die Strahlungstemperaturverteilung desselben Flächenstrahlers.

Mit beiden Kameras wurde die DRM durchgeführt. **Abbildung 6.7** zeigt die ermittelten Ungleichförmigkeiten der beiden IR-Kameras. In **Abbildung 6.7a** ist die Ungleichförmigkeit von Kamera 1 (Titanium) zu sehen. Es sind deutlich die Muster aus **Abbildung 6.6a** erkennbar. In **6.7b** ist die Ungleichförmigkeit von Kamera 2 (Silver) dargestellt. Das Zentrum der Aufnahme hat eine geringere Temperatur als die Randbereiche. Daraus kann geschlossen werden, dass diese Kamera an einem Strahler abgeglichen wurde, der im Zentrum wärmer war als an seinen Rändern. Die Ungleichförmigkeit von Kamera 2 (Silver) ist das Negativ der Temperaturverteilung des zum Abgleich verwendeten Strahlers.

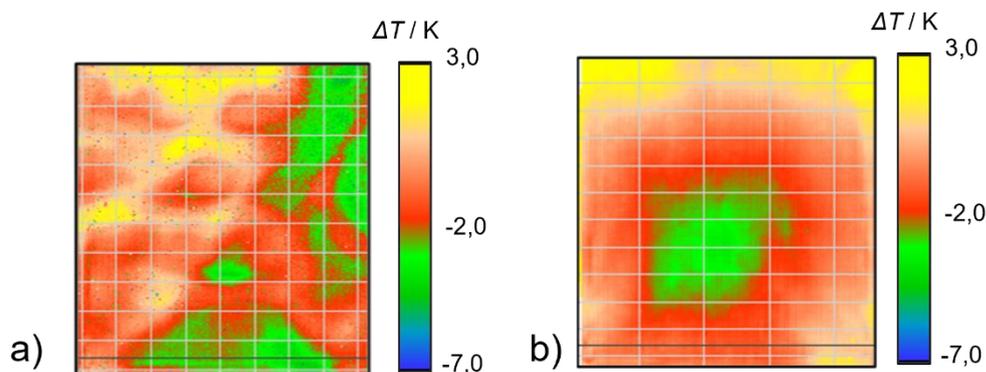


Abbildung 6.7: Mit der DRM ermittelten Ungleichförmigkeiten der IR-Kameras a) Titanium und b) Silver. Es sind die auf ein Referenzbildelement bezogenen Strahlungstemperaturdifferenzen dargestellt. Das Referenzbildelement befindet sich im Zentrum der jeweiligen Aufnahme.

Abbildung 6.8 zeigt die ermittelten Strahlungstemperaturen des Flächenstrahlers.

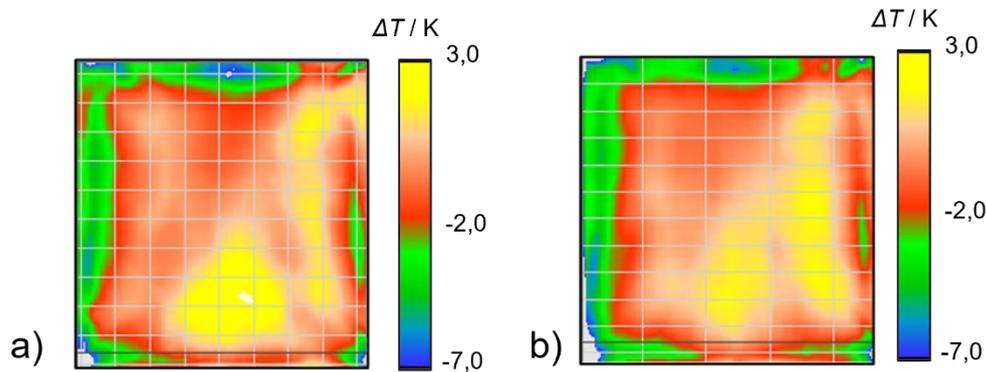


Abbildung 6.8: Mit der DRM ermittelten Strahlungstemperaturverteilungen des Flächenstrahlers (Mikron) für die IR-Kameras von a) Titanium und b) Silver. Es sind die auf ein Referenzbildelement bezogenen Strahlungstemperaturdifferenzen dargestellt. Das Referenzpixel befindet sich im Zentrum.

Nach Anwendung der DRM zeigen beide Kameras eine sehr ähnliche Strahlungstemperaturverteilung. Dieses Ergebnis verdeutlicht erneut die wichtige Rolle der Korrektur der Ungleichförmigkeit von IR-Kameras. Ohne eine Korrektur der Ungleichförmigkeit wirkte die Strahlungstemperaturverteilung des Flächenstrahlers bei den beiden Aufnahmen völlig verschieden (Abbildung 6.6). Erst nach der Korrektur der Ungleichförmigkeit ist erkennbar, dass beide Kameras die Strahlungstemperaturverteilung desselben Strahlers zeigen (Abbildung 6.8).

6.3.2. Ungekühlte nicht-temperaturstabilisierte Mikrobolometer-Kamera

Im folgenden Unterabschnitt wird ein Anwendungsbeispiel der DRM mit einer ungekühlten, nicht-temperaturstabilisierten Mikrobolometer-Kameras gezeigt. Die folgende Beschreibung baut auf der Publikation [46] auf.

Es wurde die Strahlungstemperaturverteilung eines Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers bei 75 °C mit der Mikrobolometer-Kamera PYROVIEW 640L unter Anwendung der DRM bestimmt. Die Apertur des Wärmerohres beträgt 60 mm und sein Emissionsgrad $\varepsilon_{\text{Hohlraum}} 0,99973 \pm 0,00006$. Es wurden drei zueinander verschobene Aufnahmen gemacht, von denen die aufgenommene Strahlungstemperatur der Primäraufnahme P in Abbildung 6.9a dargestellt ist.

Die aufgenommene Strahlungstemperaturverteilung zeigt einen Abfall der Strahlungstemperatur zu den Rändern der Strahlerapertur. Das Maximum der Strahlungstemperatur liegt leicht oberhalb des Zentrums der Apertur. Die DRM wurde auf die drei Aufnahmen angewendet. Abbildung 6.9b zeigt die berechnete Strahlungstemperaturverteilung des Wärmerohrs bei 75 °C und Abbildung 6.9c die errechneten Differenzen in der Strahlungstemperaturverteilung des Wärmerohrstrahlers.

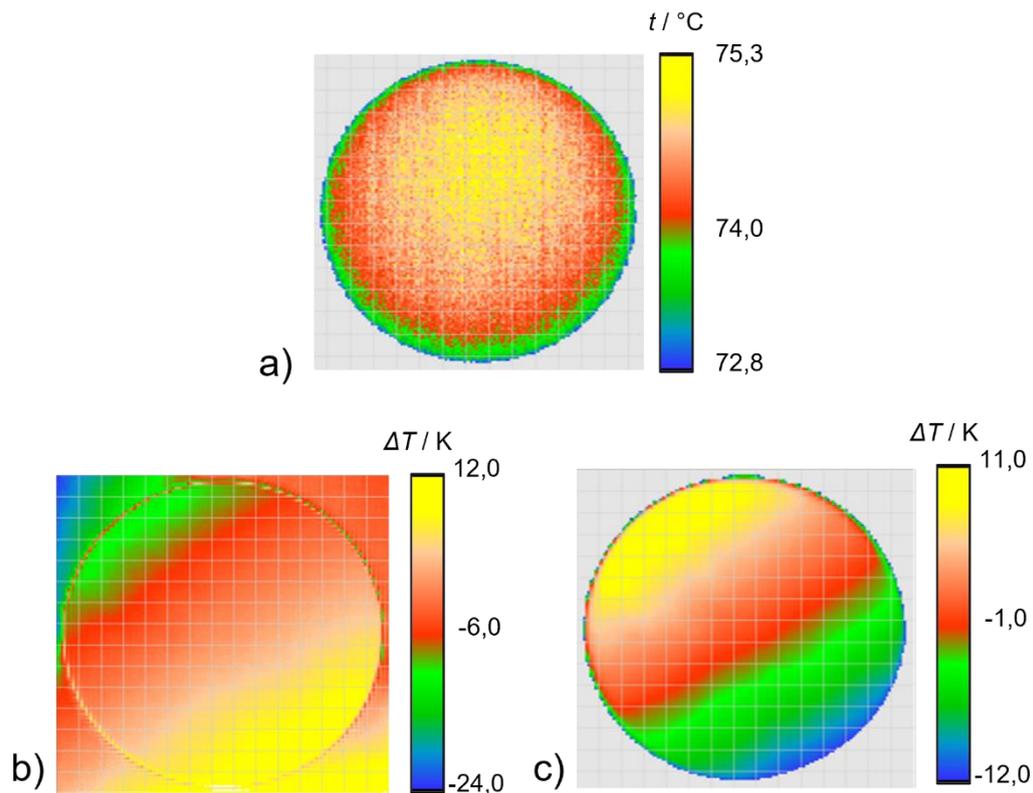


Abbildung 6.9: a) Strahlungstemperaturbild der kreisförmigen Öffnung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers, aufgenommen von einer ungekühlten, nicht-temperaturstabilisierten IR-Kamera (PYROVIEW 640L). Das Bild ist eine Mittelung aus acht aufeinanderfolgenden Bildern, die mit einer Bildrate von 50 Hz gemessen wurden. Die beobachteten Temperaturinhomogenitäten resultieren teilweise aus der tatsächlichen Temperaturinhomogenität des Strahlers über die Apertur und teilweise aus der Ungleichförmigkeit der Empfindlichkeit der Kamera. b) Errechnete Inhomogenität der aufgenommenen Strahlungstemperaturverteilung aufgrund der Ungleichförmigkeit der Empfindlichkeit der IR-Kamera bei 75 °C. Dieses Bild wird mit der DRM aus den in a) gezeigten Daten und den Daten von zwei zum Primärbild vertikal verschobenen Bildern erzeugt. Die Ungleichförmigkeit wird in Temperaturunterschieden angegeben, die sich auf ein Referenzbildelement in der Bildmitte beziehen. Das Ergebnis gibt die tatsächliche Ungleichförmigkeit nicht wieder. Es ist ein starker Einfluss einer Temperaturdrift der Kamera auf die DRM zu erkennen. c) Berechnete Strahlungstemperaturverteilung des Wärmerohrs bei 75 °C. Das Bild wird mit der DRM aus den in a) und b) gezeigten Daten erzeugt. Die Temperaturverteilung wird analog zu b) in Temperaturdifferenzen angegeben, die sich auf ein Referenzbildelement in der Bildmitte beziehen. Das Ergebnis gibt die tatsächliche Temperaturverteilung nicht wieder. Es ist ein starker Einfluss einer Temperaturdrift der Kamera auf die DRM zu erkennen.

Die Abbildung 6.9 b, c zeigen den typischen Verlauf, der sich einstellt, wenn während der Aufnahme der drei Bilder eine Temperaturdrift in den Anzeigewerten der IR-Kamera auftritt. Dieses Verhalten des Algorithmus wurde ausführlich in Abschnitt 5.4.1 beschrieben. Anhand des Verlaufes der Isothermen kann darauf geschlossen werden, dass es sich bei der Temperaturdrift um eine annähernd lineare Abnahme der ermittelten Strahlungstemperaturwerte handelt.

Abbildung 6.10 zeigt die erfasste zeitliche Drift des erfassten Temperatursignals eines zentralen Detektorelements der PYROVIEW 640L während des Messvorgangs. Die Strahlungsquelle selbst liefert eine sehr stabile Strahlungstemperatur von etwa 75 °C.

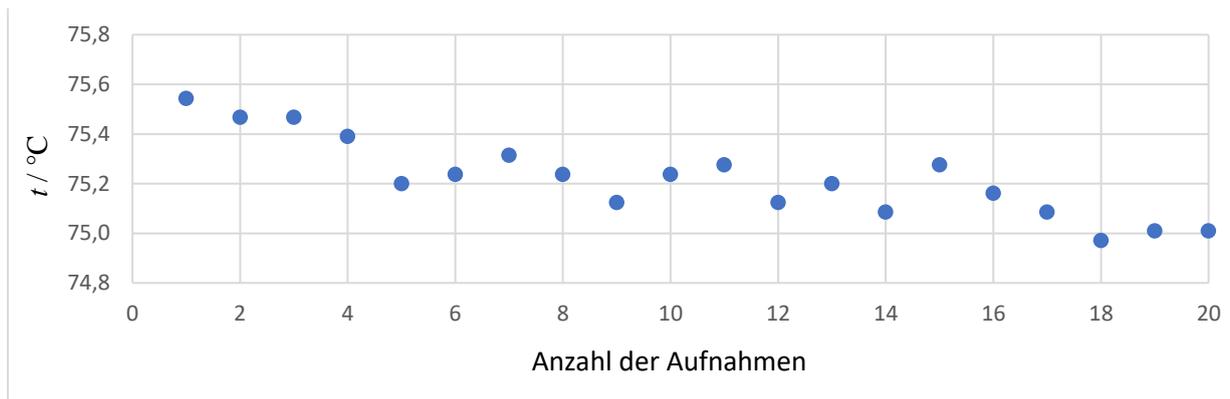


Abbildung 6.10: Drift des erfassten Temperatursignals eines zentralen Detektorelements der nicht-temperaturstabilisierten Mikrobolometer-Kamera (PYROVIEW 640L) bei der Beobachtung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers mit stabiler Strahlungstemperatur bei etwa 75 °C.

Es wurde nun der in Abschnitt 5.5.3 beschriebene Ansatz zur Korrektur der aufgetretenen Temperaturdrift verwendet. Abbildung 6.15 zeigt die errechnete Ungleichförmigkeit der IR-Kamera und die errechnete Strahlungstemperaturverteilung unter Anwendung der Driftkorrektur.

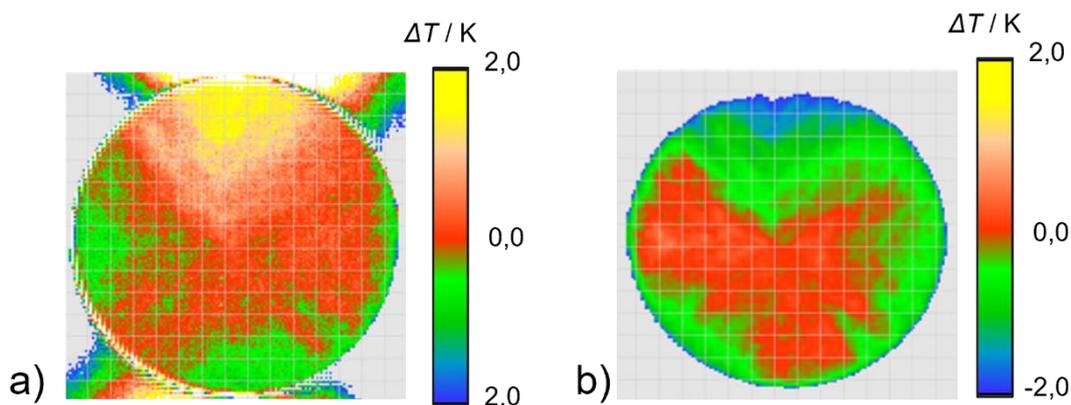


Abbildung 6.11: a) Errechnete Inhomogenität der aufgenommenen Strahlungstemperaturverteilung aufgrund der Ungleichförmigkeit der Empfindlichkeit der IR-Kamera (PYROVIEW 640L) bei 75 °C. Dieses Bild wird mit der DRM aus den in a) gezeigten Daten und den Daten von zwei zum Primärbild vertikal verschobenen Bildern erzeugt unter Berücksichtigung der Driftreduktionsmethode. Die Ungleichförmigkeit wird in Temperaturunterschieden angegeben, die sich auf ein Referenzbildelement in der Bildmitte beziehen. Das Ergebnis gibt die tatsächliche Inhomogenität wesentlich besser wieder als Abbildung 6.13b. Der starke Einfluss einer Temperaturdrift der Kamera ist verschwunden. Es sind aber noch Einflüsse von weißem Rauschen zu erkennen. B) Errechnete Strahlungstemperaturverteilung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahler bei 75 °C bei Anwendung der beschriebenen Driftreduktionsmethode in Kombination mit der DRM. Die Inhomogenität wird in Temperaturunterschieden angegeben, die sich auf ein Referenzbildelement in der Bildmitte beziehen. Der starke Einfluss einer Temperaturdrift der Kamera, der in Abbildung 6.13c zu erkennen ist, ist verschwunden. Es sind aber noch Einflüsse von weißem Rauschen zu erkennen.

Die Strahlungstemperaturverteilung weist nach Korrektur der Temperaturdrift eine deutlich geringere Spreizung auf, jedoch sind Strukturen zu erkennen, die sich ausgehend von dem im Zentrum liegenden Referenzelement zu den Ecken hin ausbreiten. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass die Eingangsaufnahmen noch ein weißes Rauschen aufweisen und dies die DRM in ihrem Ergebnis beeinflusst.

Zur Reduzierung des Rauschens gibt es die Möglichkeit an jeder Position mehrere Aufnahmen aufzunehmen und anschließend den Mittelwert zu bilden. Jedoch würde diese Herangehensweise die vorhandene Temperaturdrift wieder verstärken. Deshalb wurden, wie in Abschnitt 5.4.3 beschrieben, mehrere DRM-Durchläufe durchgeführt und die gewonnenen Ergebnismatrizen gemittelt.

Die ermittelte Ungleichförmigkeit ist in Abbildung 6.12a in Differenzen der Strahlungstemperatur, bezogen auf ein Referenzbildelement, und in Abbildung 6.12b die errechnete Strahlungstemperaturverteilung unter Berücksichtigung der Driftkorrektur von Abschnitt 5.5.3 und Mittelung der Ergebnismatrizen dargestellt.

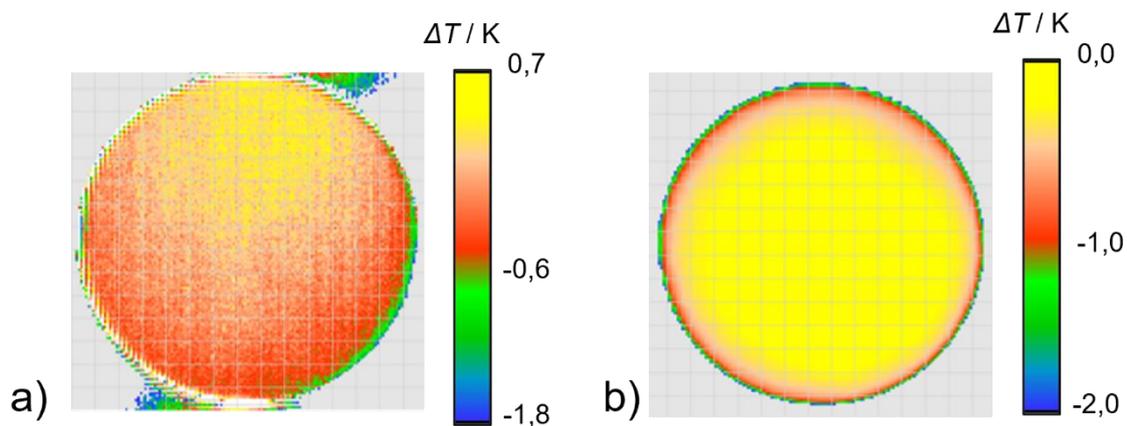


Abbildung 6.12: a) Ungleichförmigkeit der Empfindlichkeit der PYROVIEW 640L bei 75 °C bei Anwendung der beschriebenen Driftreduktionsmethode in Kombination mit der Mehrfachanwendung der DRM. Die Ungleichförmigkeit wird in Temperaturunterschieden angegeben, die sich auf ein Referenzpixel in der Bildmitte beziehen. b) Ermittelte Strahlungstemperaturverteilung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers bei 75 °C unter Berücksichtigung der Driftkorrektur und Mittelung der Ergebnismatrizen. Die Temperaturverteilung wird in Temperaturdifferenzen angegeben, die sich auf ein Referenzbildelement in der Bildmitte beziehen. Der Einfluss der Temperaturdrift in den Kamerabildern und der Einfluss des weißen Rauschens auf die DRM ist minimiert und das Bild gibt die tatsächliche sehr homogene Temperaturverteilung des Hohlraumstrahlers sehr gut wieder.

Anhand der ermittelten Ungleichförmigkeit in Abbildung 6.12a lässt sich die Verschiebung der maximalen Strahlungstemperatur in Abbildung 6.9a erklären. Der sehr homogenen Strahlungstemperaturverteilung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers wird die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera (PYROVIEW 640L), welche ein Maximum oberhalb vom Bildzentrum aufweist, überlagert. So entsteht diese scheinbare Erhöhung der Strahlungstemperatur.

Die ermittelte Strahlungstemperaturverteilung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers in Abbildung 6.12b zeigt in großen Bereichen der Apertur eine Homogenität mit Temperaturdifferenzen von weniger als 100 mK. Lediglich zu den Rändern der Apertur hin ist ein Temperaturabfall zu erkennen, welcher jedoch auf den SSE der IR-Kamera zurückgeführt werden kann.

Zur Visualisierung der Verbesserung der Messqualität der IR-Kamera durch die DRM bei Anwendung der Drift-Reduktionsmethode in Kombination mit der Reduktion des weißen Rauschens zeigen die Abbildung 6.13 a und b einen horizontalen Schnitt durch das Zentrum der Aufnahmen der Temperaturverteilungen des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers aus der Originalmessung (Abbildung 6.9a) und der korrigierten

Messung (Abbildung 6.16b). Die horizontale Temperaturverteilung des Schwarzkörpers wird in Temperaturdifferenzen zur Temperatur in der Mitte der Blende angegeben.

In Abbildung 6.13 b ist eine deutliche Verbesserung der Temperaturmessung zu erkennen. Während die gemessene Temperaturverteilung in Abbildung 6.13 a noch durch die Ungleichförmigkeit der IR-Kamera dominiert wird, gibt das Temperaturprofil in Abbildung 6.13 b die sehr gute Isothermie des Wärmerohr-Hohlraumstrahlers wieder. Zum Vergleich wurde das Temperaturprofil des Wärmerohr-Hohlraumstrahlers zusätzlich mit einem hochwertigen Strahlungsthermometer schrittweise ausgemessen und in Abbildung 6.13 c dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass das mit der Kamera ermittelte Temperaturprofil (Abbildung 6.13 b) und das mit dem Strahlungsthermometer ermittelte Temperaturprofil (Abbildung 6.13 c) einen sehr ähnlichen Verlauf aufweisen. Lediglich zum Rand der Apertur des Strahlers sind größere Abweichungen erkennbar, die auf den stärkeren Size-of-Source-Effekt der Kameraoptik gegenüber der Optik des Strahlungsthermometers zurückzuführen sind.

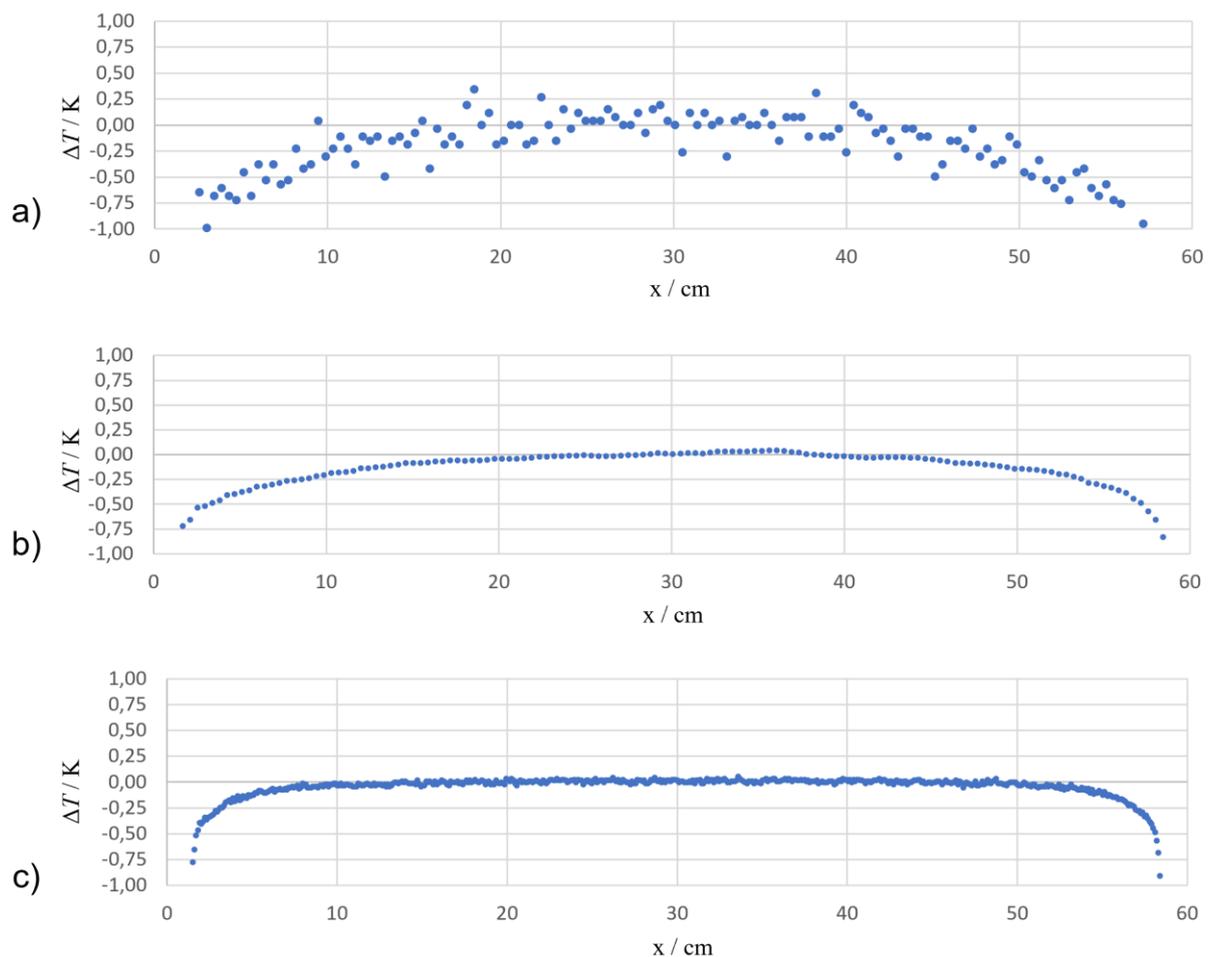


Abbildung 6.13: Horizontale Temperaturverteilung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers durch die Mitte der Blende, gemessen mit der PYROVIEW 640L a) ohne und b) mit Anwendung des DRM. a) Die Daten für sind Abbildung 6.13a) entnommen. Das zeitliche Rauschen wird durch Mittelwertbildung über 8 Bilder mit einer Bildfrequenz von

50 Hz minimiert. Das beobachtete Rauschen in den Daten wird von der Ungleichförmigkeit der Kamera dominiert. b) Die Daten sind aus Abbildung 6.16a) entnommen. Im Vergleich zu Abbildung 6.17 ist die Ungleichmäßigkeit der IR-Kamera deutlich verbessert. Die sehr gute Temperaturhomogenität des Hohlraumstrahlers kann mit der IR-Kamera nachgewiesen werden. c) Horizontale Temperaturverteilung des Wasserwärmerohr-Hohlraumstrahlers durch die Mitte der Öffnung, schrittweise gemessen mit einem Strahlungsthermometer auf dem Positioniersystem des Kamera-Kalibriermessplatzes. Die Messung bestätigt die sehr gute zeitliche Stabilität und sehr homogene Temperaturverteilung des Hohlraumstrahlers. Die Temperaturverteilungen alle Abbildungen werden in Temperaturdifferenzen zur Temperatur in der Mitte der Blende angegeben.

Dieses praktische Anwendungsbeispiel zeigt, dass die DRM in Kombination mit den Methoden zur Reduzierung der Einflüsse einer Temperaturdrift und des weißen Rauschens, die in Kapitel 5 lediglich an Rechenbeispielen angewendet wurden, in der Praxis eine sehr deutliche Verbesserung des DRM-Ergebnisses erzielen können. Unter Anwendung dieser Methoden erweist sich die DRM als ein sehr genaues und robustes Verfahren, um in der Praxis auch bei nicht temperaturstabilisierten Kameras gute Ergebnisse bei der Korrektur der Ungleichförmigkeit der Kamera zu erzielen. Selbst mit preisgünstigen, ungekühlten IR-Kameras ermöglicht die Anwendung der DRM, in Kombination mit den beschriebenen Korrekturmethode, die hohe thermometrische Qualität von Wärmerohr-Hohlraumstrahlern nachzuweisen.

6.4. Anwendung der DRM bei ausgewählten Strahlungsquellen

6.4.1. Homogenitätsbestimmung der Strahldichte einer großflächigen Ulbricht-Kugel

Im Folgenden soll die Anwendung der DRM zur genauen Strahldichtemessung an einer Ulbricht-Kugel untersucht werden. Die folgenden Ausführungen bauen auf der Publikation [47] auf.

Für die metrologische Charakterisierung und Kalibrierung von IR-Kameras werden großflächige Temperaturstrahlungsquellen mit einer homogenen Strahldichteverteilung benötigt, um das gesamte Gesichtsfeld der IR-Kameras gleichförmig auszuleuchten. Für Temperaturen oberhalb von 500 °C wird die technische Realisierung von großflächigen Temperaturstrahlern, die in der Lage wären, das gesamte Gesichtsfeld einer IR-Kamera zu bestrahlen und dabei eine gute Homogenität ihrer Strahldichte über die gesamte Fläche aufweisen, immer schwieriger. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass großflächige Temperaturstrahler bei hohen Temperaturen eine deutliche Erwärmung des Kameragehäuses hervorrufen. Die Auswirkung der thermischen Belastung auf Kameras und Methoden zur Kompensation dieser wurden bereits für Kamerasysteme untersucht, die auf ungekühlten, verschlusslosen Mikrobolometer-Detektorarrays basieren [26].

Eine Alternative zu thermischen Strahlungsquellen bilden Ulbricht-Kugeln. Ulbricht-Kugeln können mit Halogenglühfadenlampen oder LEDs ausgestattet werden. Eine Ausstattung mit LEDs ermöglicht es, die ausgesendete Strahlung an den empfindlichen Spektralbereich des Prüflings anzupassen. Dadurch eignen sich Ulbricht-Kugeln als Strahlungsquellen hoher Strahldichte insbesondere im sichtbaren und NIR-Spektralbereich, ohne eine nennenswerte Wärmebelastung für den Prüfling zu erzeugen.

Die radiometrische Charakterisierung von Ulbricht-Kugeln, z.B. die Homogenitätsbestimmung ihrer Strahldichte, ist jedoch bei Anwendung von punktmessenden, rasternden Abtastverfahren zeitaufwendig und erfordert ein präzises x-y-Positioniersystem für den messenden Detektor bzw. das Strahlungsthermometer [48]. Im Zuge dieser Arbeit wurde deshalb die Anwendbarkeit der DRM im NIR-Bereich zur schnelleren Ermittlung der relativen Homogenität der Strahldichte der Ulbricht-Kugel mit einer NIR-Kamera untersucht.

Ulbricht-Kugel und NIR-Kamera

Für die Untersuchung der Anwendbarkeit der DRM zur Bestimmung der Strahlungshomogenität einer Ulbricht-Kugel im NIR wurde die Large Aperture Variable Radiance Source (LAVRAS) der PTB verwendet. Die Homogenität der Strahldichte der Ulbricht-Kugel wurde in vorangegangenen Arbeiten mit Strahlungsthermometern mit sehr kleiner Unsicherheit untersucht [48]. Die Ulbricht-Kugel besitzt einen Durchmesser von 1,2 m und ihre Apertur hat einen Durchmesser von 400 mm. Abbildung 6.14 zeigt die Ulbricht-Kugel. Die Innenflächen der Kugel ist mit BaSO₄ beschichtet, um ein hohes diffuses Reflexionsvermögen zu erreichen. Als optische Strahlungsquellen werden 64 Wolfram-Halogenlampen mit aluminiumbeschichteten Reflektoren (Leistung 50 W, Typ OSRAM 64607 EFM) verwendet. Je zwei Lampen sind als Paar parallelgeschaltet. Alle 32 Paare sind einzeln ansteuerbar und besitzen individuell steuerbare Blenden zur Variation der Strahldichte.

Zur Bestimmung der Homogenität der Strahldichte der Ulbricht-Kugel mittels der DRM wurde eine InGaAs-Infrarotkamera verwendet (Abbildung 6.15). Der Kameradetektor ist im Wellenlängenbereich von 0,9 µm bis

1,7 μm empfindlich ist. Mit Hilfe geeigneter optischer Filter kann der Spektralbereich der Kamera weiter eingegrenzt werden. Es standen zwei Filter zur Verfügung, deren Transmissionskurven gemäß Herstellerangaben in Abbildung 6.16 gezeigt sind. Das erste Filter transmittiert im Spektralbereich zwischen 930 nm und 950 nm. Das zweite verwendete Filter besitzt einen breiteren Transmissionsbereich und ist von etwa 1,5 μm bis 1,9 μm durchlässig, wobei das Detektormaterial der IR-Kamera nur bis 1,7 μm empfindlich ist.



Abbildung 6.14: Large-Area Variable Radiance Source (LAVRAS) der PTB.

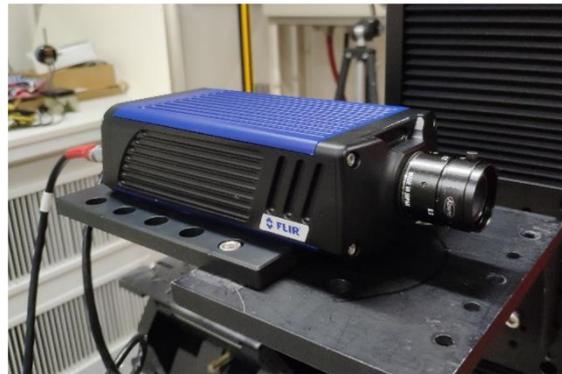


Abbildung 6.15: SWIR-InGaAs-Infrarotkamera (SC 2600, FLIR).

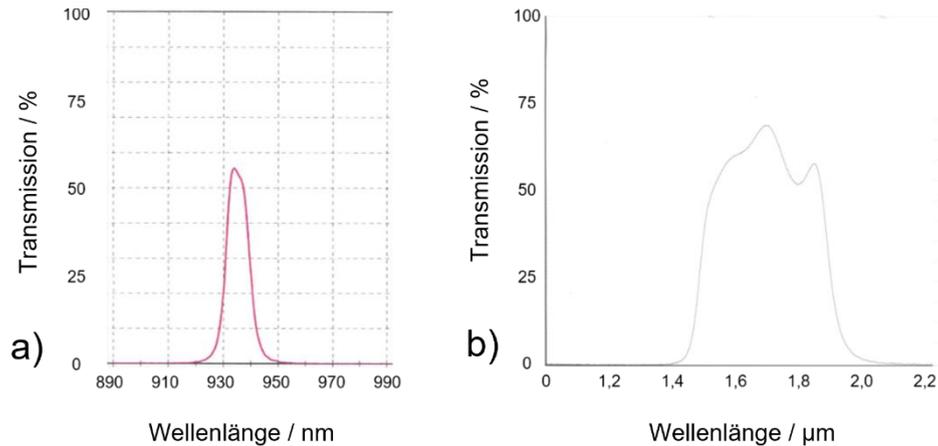


Abbildung 6.16: Transmissionsbereich a) des ersten Spektralfilters (Filter 1) mit einer maximalen Transmission bei 940 nm und b) des zweiten Spektralfilters (Filter 2) mit einer Transmission zwischen 1,5 µm und 1,9 µm.

Messergebnisse

Abbildung 6.17 zeigt die unkorrigierte NIR-Kameraaufnahmen der Strahldichteverteilung der Ulbricht-Kugel bei Verwendung der beiden Filter von Abbildung 6.22. Die Abbildungsgeometrie wurde so gewählt, dass die Ecken des rechteckigen Gesichtsfelds der Kamera genau innerhalb der kreisförmigen Öffnung der Ulbricht-Kugel liegen. Alle 32 Lampenpaare sind eingeschaltet und die Blenden aller Lampenpaare sind vollständig geöffnet.

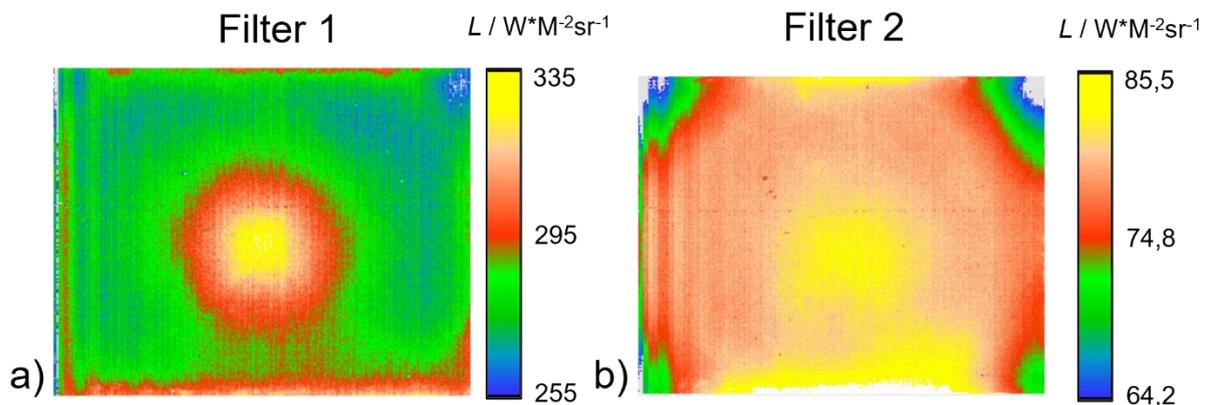


Abbildung 6.17: Unkorrigierte Kameraaufnahmen (SWIR-InGaAs-Infrarotkamera) der Strahldichteverteilung der Ulbricht-Kugel bei Verwendung a) des Filters 1 im Bereich von 940 nm und b) des Filters 2 im Bereich von 1,5 µm bis 1,9 µm.

In beiden Fällen ist eine Strahldichteverteilung zu erkennen, die im Zentrum ein Maximum aufweist und zu den Ecken der Abbildung abnimmt. Im schmalbandigeren Spektralbereich des Filters 1 zeigt die Strahldichte eine deutliche Überhöhung im Zentrum, während im breiteren Spektralbereich des Filters 2 ein deutlicher Abfall der Strahldichte zu den Ecken des Gesichtsfelds hin auftritt. In beiden Fällen wird das Messergebnis von der Ungleichförmigkeit der InGaAs-Kamera bestimmt, da die sehr gute Homogenität der Strahldichte der Ulbricht-Kugel über die gesamte Apertur bereits durch punktförmige, abtastende Messungen mit einem Strahlungsthermometer nachgewiesen wurde [48]. Im VIS und NIR besitzt die Strahldichteverteilung der

Ulbricht-Kugel eine Inhomogenität von weniger als 3 % [48].

Die DRM wurde für die InGaAs-Kamera mit beiden Filtern durchgeführt. Die errechneten Strahldichteverhältnisse sind mit gleicher Spreizung der dargestellten Strahldichte wie in Abbildung 6.17a für Filter 1 in Abbildung 6.18 dargestellt.

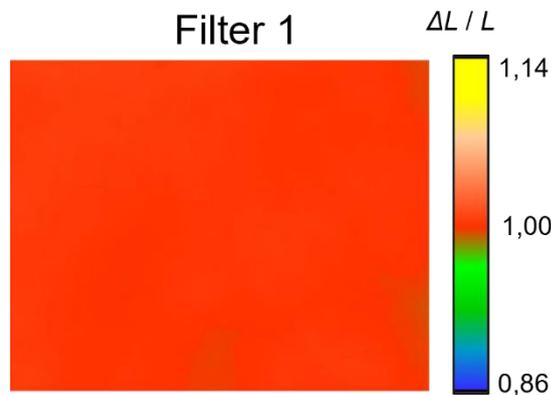


Abbildung 6.18: Mittels der DRM korrigierte Kameraaufnahme (SWIR-InGaAs-Infrarotkamera) der Strahldichteverteilung der Ulbricht-Kugel bei Verwendung von Filter 1 im Bereich von 940 nm mit gleicher Spreizung der dargestellten Strahldichteverhältnisse wie in Abbildung 6.17a.

Die in Abbildung 6.18 dargestellte korrigierte Strahldichteverteilung der Ulbricht-Kugel weist eine deutlich höhere Homogenität auf, als die Darstellung in Abbildung 6.17a vermuten lässt. Der Großteil der gemessenen Inhomogenität der Strahldichte ist auf die Ungleichförmigkeit des Kamerasystems zurückzuführen. In Abbildung 6.23 lassen sich nahezu keine Unterschiede in der Strahldichteverteilung erkennen, daher wurde die Spreizung der dargestellten Strahldichtewerte erhöht, um für Messungen mit Filter 1 und Filter 2 eine höhere Auflösung zu erzielen (Abbildung 6.19).

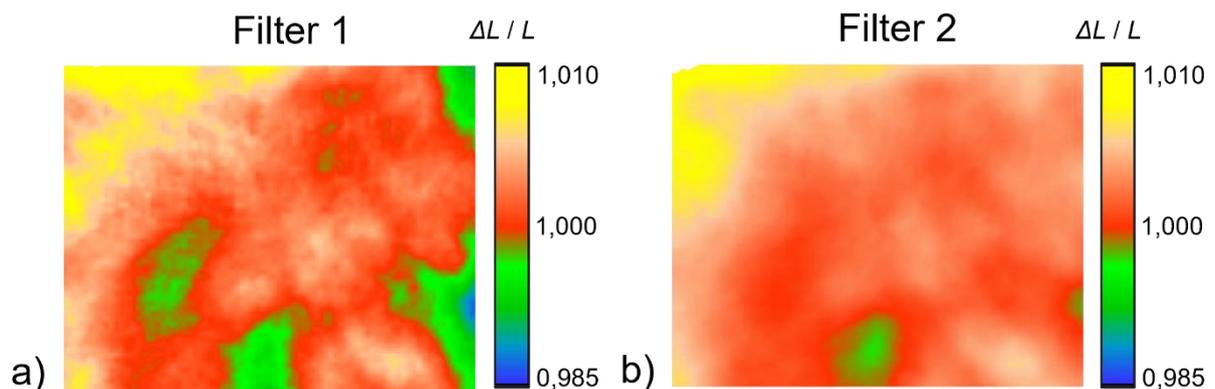


Abbildung 6.19: Mittels der DRM korrigierte Kameraaufnahme der Strahldichteverteilung der Ulbricht-Kugel a) im Bereich um 940 nm bei Verwendung von Filter 1 und b) im Bereich von 1,5 µm bis 1,9 µm bei Verwendung von Filter 2.

Durch eine stärkere Spreizung der dargestellten Strahldichtewerte lassen sich in Abbildung 6.24 mehr Details erkennen. Beide Aufnahmen zeigen eine ähnliche Strahldichteverteilung. Aus den aufgenommenen

Messwerten lässt sich die Homogenität der Strahldichte der Ulbricht-Kugel wie folgt ableiten:

Die Ulbricht-Kugel besitzt eine gemessene Homogenität ihrer Strahldichte im Spektralbereich von 930 nm bis 950 nm von $\pm 1,25\%$ und im Spektralbereich von $1,5\ \mu\text{m}$ bis $1,7\ \mu\text{m}$ von $\pm 1,00\%$ über ihre gesamte Apertur. Dieses Resultat stimmt mit den Ergebnissen überein, die in [48] für den UV- bis NIR-Bereich durch ein zweidimensionales Abtasten der Apertur mit einem punktförmig messenden Strahlungsthermometer erzielt wurden.

Nachdem die Eignung der DRM zur Ermittlung der Strahldichteverteilung der Ulbricht-Kugel gezeigt wurde, sollte anschließend die Homogenität der Strahldichte bei unterschiedlichen Blendeneinstellungen der Lampenpaare untersucht werden. Durch die Variation der Blenden und das Ausschalten von Lampenpaaren lässt sich die Strahldichte der Ulbricht-Kugel über einen großen Bereich variieren, so dass sich die Auswirkung der Strahldichteveränderung auf die Homogenität der abgebegebenen Strahldichte untersuchen lässt.

Dazu wurden vier verschiedene Lampenkonfigurationen der Kugel getestet und die entsprechende Strahldichte analysiert. In Abbildung 6.20 sind die verschiedenen Konfigurationen dargestellt. In 6.25a sind alle Lampenpaare angeschaltet und ihre Blenden voll geöffnet, in Abbildung 6.20 b sind nur die Lampenpaare im oberen rechten Viertel der Kugel angeschaltet und ihre Blenden sind voll geöffnet, in Abbildung 6.20 c ist jede zweite Lampenpaar angeschaltet und ihre Blenden sind voll geöffnet und in d) sind alle Lampenpaare angeschaltet und ihre Blenden sind halb geöffnet. Dargestellt sind die ermittelten relativen Verteilungen der Strahldichte der Apertur der Kugel.

Die Lampenkonfiguration der Abbildungen 6.25a und 6.24 ist identisch, jedoch ist die Strahldichte in 6.25a höher als in Abbildung 6.24.

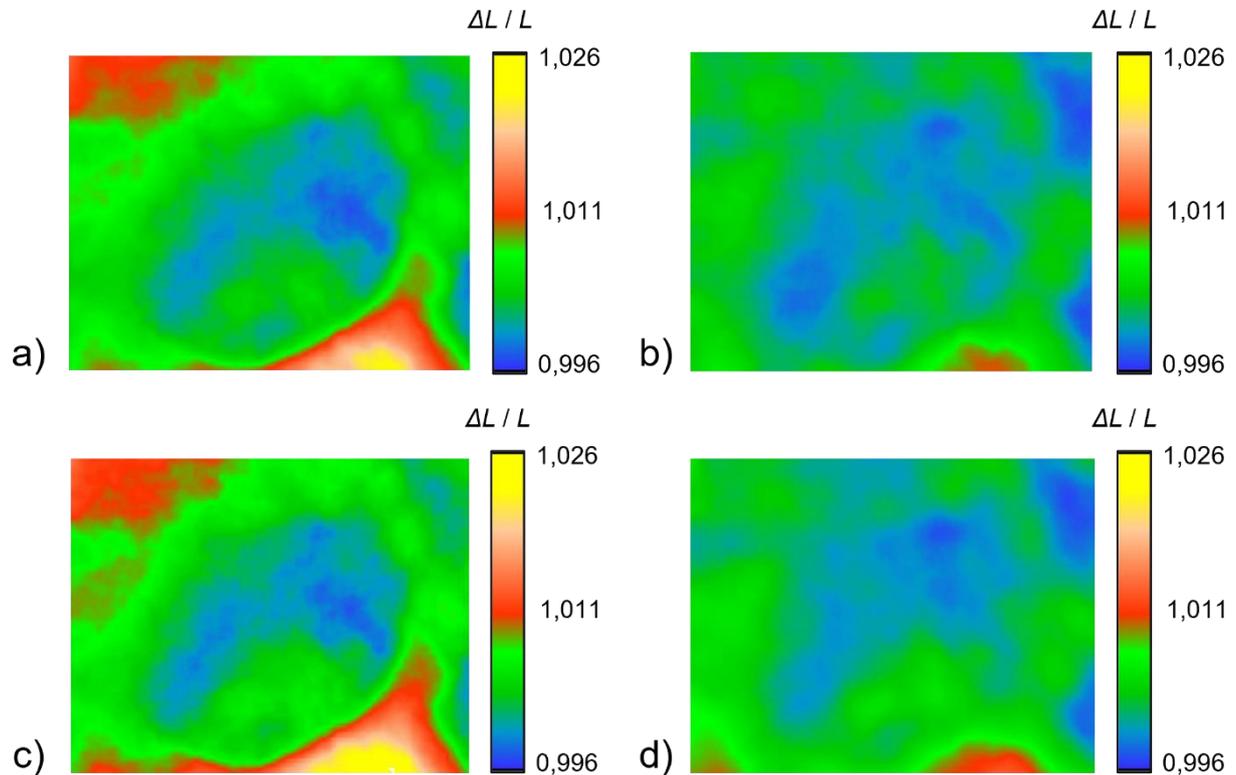


Abbildung 6.20: Variation der Betriebsparameter der Ulbricht-Kugel zur Veränderung der Strahldichte. Gezeigt sind die mittels der DRM korrigierten Kameraaufnahmen der Strahldichteverteilung der Ulbricht-Kugel in Strahldichteverhältnissen bezogen auf ein zentrales Referenzbildelement. a) alle Lampenpaare angeschaltet und ihre Blenden voll geöffnet, b) lediglich die Lampenpaare im oberen rechten Viertel der Kugel sind angeschaltet und die entsprechenden Blenden voll geöffnet, c) jedes zweite Lampenpaar angeschaltet und die entsprechenden Blenden voll geöffnet und d) alle Lampenpaare angeschaltet und die entsprechenden Blenden halb geöffnet.

Es ist zu erkennen, dass die Strahldichteverteilung der Ulbricht-Kugel in allen Konfigurationen nur geringfügig Abweichungen zeigt und sich bei allen Messungen in einem Bereich von $\pm 1\%$ bewegt.

Durch die Variation der konstruktiven Kugelgegebenheiten lässt sich die absolute Strahldichte über einen großen Bereich verändern, so dass sich so unterschiedliche Strahlungstemperaturen bis hin zu 800 °C bei einer Wellenlänge von $1,6\text{ }\mu\text{m}$ für die Charakterisierung von Infrarotkameras bei annähernd gleichbleibender, sehr guter Homogenität der Strahldichte realisieren lassen.

Die verwendete IR-Kamera besitzt eine integrierte Blende, mit der sich der Strahlungsfluss auf den Detektor begrenzen lässt. In Abbildung 6.21 ist die ermittelte Kameraungleichförmigkeit bei gleichbleibenden Quellenbedingungen und schrittweisem Schließen der Blende der IR-Kamera von Abbildung 6.21 a hin zu Abbildung 6.21 e dargestellt. Durch den reduzierten Strahlungsfluss, der auf den Detektor der IR-Kamera trifft, ergibt sich beim Schließen der Blende eine geringere gemessene Temperatur. Die Messpunkte sind so gewählt, dass bei der größten Blendenöffnung eine Strahlungstemperatur von 600 °C im Zentrum des Gesichtsfelds der Kamera gemessen wurde, dann nimmt die gemessene Temperatur im Zentrum in Schritten von 25 K ab. Bei der letzten Blendeneinstellung wird im Zentrum ein Wert von 500 °C gemessen. Der Messbereich wurde während der Messungen nicht geändert.

Mit jeder Blendeneinstellung wurde die DRM durchgeführt und im Folgenden sind die ermittelten relativen

Verteilungen der Empfindlichkeit der Bildpunkte der Kamera dargestellt.

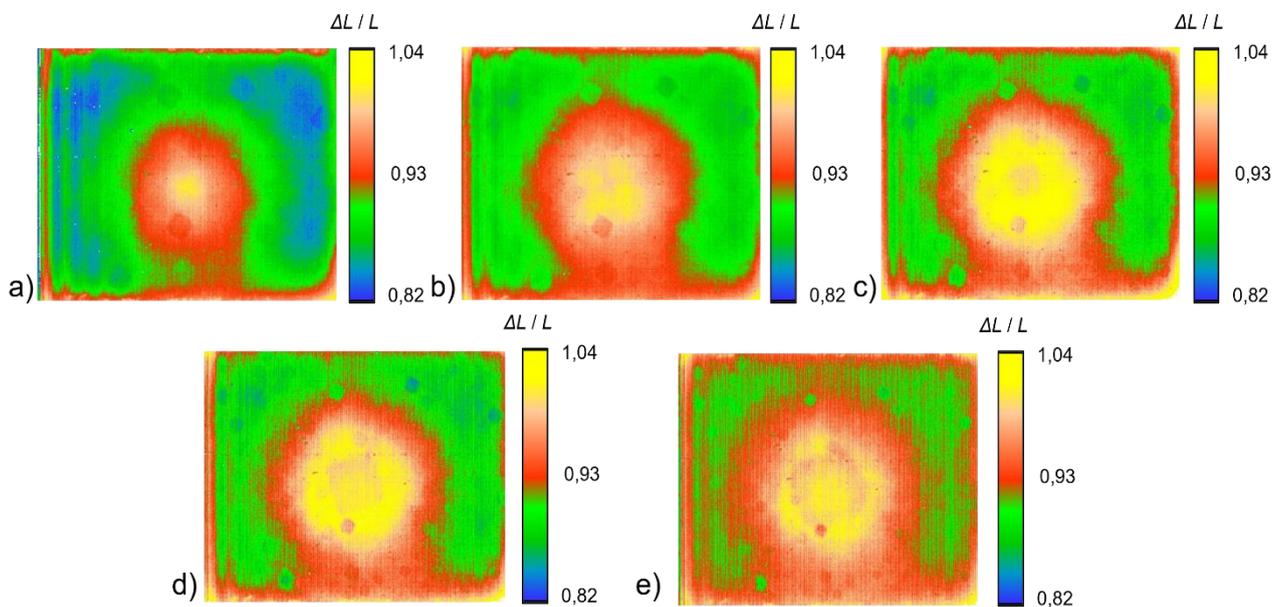


Abbildung 6.21: Ermittelte Kameraungleichförmigkeit beim schrittweisen Schließen der Kamerablende und gleichbleibender Strahldichte der Ulbricht-Kugel. Strahlungstemperatur a) 600 °C, b) 575 °C, c) 550 °C d), 525 °C und d) 500 °C.

Es ist zu erkennen, dass die Ungleichförmigkeit der Kamera von der Blendeneinstellung beeinflusst wird. Der Size-of-Source Effekt wirkt sich auf das Messergebnis aus. In allen Messungen war das Gesichtsfeld der Kamera von der Quelle vollständig ausgeleuchtet. Jedoch ist zu erkennen, dass die Randbereiche des Messfeldes eine stärkere Änderung aufzeigen als die zentralen Bildelemente.

Zusammenfassung

Ulbricht-Kugeln erzielen eine deutlich bessere Homogenität in der Strahldichte als Flächenstrahler. Sie sind damit sehr geeignete, homogene, großflächige Strahlungsquellen um das Potential der DRM zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, dass die DRM im NIR-Bereich an einem Ulbricht-Kugelstrahler angewendet werden kann und damit die Messgenauigkeit der InGaAs-Kamera durch Minimierung der Ungleichförmigkeit der Kamera deutlich erhöht werden. Somit konnte eine einfache Methode zur Bestimmung der Strahldichteverteilung von Ulbricht-Kugeln realisiert werden, die deutlich weniger Zeit benötigt als herkömmliche Methoden, bei denen die Apertur der Kugel mit einem Strahlungsthermometer abgerastert wird. Mit Hilfe der DRM konnte sowohl die geringfügigen quellenbedingten Änderungen die Homogenität der Strahldichte der Ulbricht-Kugel bestimmt werden als auch die Veränderung der Ungleichförmigkeit der Kamera bei Veränderung der Kamerablendeneinstellung.

6.4.2. Homogenitätsbestimmung der Strahlungstemperaturverteilung von Körpertemperaturreferenzstrahlern

Im Jahr 2020 gipfelte das globale Problem der Infektionskrankheiten mit Pandemiepotential als Bedrohung für die öffentliche Gesundheit im SARS-CoV-2 Virus. Das Virus brachte das öffentliche Leben innerhalb kürzester Zeit nahezu zum Erliegen. Zur Eindämmung pandemischer Infektionskrankheiten ist eine frühzeitige flächendeckende Erkennung notwendig. Ein gemeinsamer Indikator vieler Pandemieerkrankungen, wie unter Anderem Influenza, SARS und Ebola, ist Fieber. Zur flächendeckenden Erkennung erhöhter Körpertemperaturen an wichtigen Verkehrsknotenpunkten, wie z. B. Flughäfen, wird ein Fieber-Screeningverfahren benötigt, welches schnell, kostengünstig und mit geringem Testaufwand arbeitet.

Die gängigste Testmethode zur Ermittlung der Körpertemperatur ist das Messen mit einem Kontaktthermometer. Diese Methode ist sehr zuverlässig, jedoch an Infrastrukturknotenpunkten und bei einer großen Anzahl von Menschen schwer anwendbar. Die durchschnittliche Messzeit eines herkömmlichen Kontaktthermometers inklusive Positionierung und anschließender Reinigung des Thermometers beträgt ca. 1-2 min. Eine Boeing 787 kann 246 Menschen befördern. Daraus würde im typischen Fall eine Messzeit von 492 min (über 8 h) resultieren. Selbst bei vier Messstationen, welche einen höheren Personalaufwand erfordert, würde die Messzeit über 2 h pro Station betragen. Diese Zeitspanne ist um ein Vielfaches höher als die normale Boardingzeit. Es zeigt sich, dass diese Messmethode zu langsam ist, um bei einer großen Anzahl von Personen zur Anwendung zu kommen.

Beim Einsatz eines bildgebenden Thermografieverfahrens wird mit Hilfe einer IR-Kamera die Temperatur des inneren Canthus im Gesicht der getesteten Person bestimmt. Die Messzeit liegt im Bereich weniger Sekunden und wäre theoretisch für eine große Anzahl von Testpersonen innerhalb kürzester Zeit einsetzbar. Typische IR-Kamerasysteme werden vom Hersteller mit einer absoluten Temperaturmessgenauigkeit von mind. $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ angeben. Diese Genauigkeit bei der Bestimmung der Körpertemperatur wäre für den Einsatz zur Fiebererkennung nicht ausreichend. Deshalb wird bei der Detektion der Körpertemperatur ein Referenzstrahler verwendet, welcher sich zusätzlich im Bild befindet. Bei genauer Kenntnis der Referenztemperatur des Strahlers kann die Differenz zwischen Referenztemperatur und Körpertemperatur gebildet werden. Im Zuge dieser Arbeit wird auf eine genauere Beschreibung und Bewertung des Einsatzes von IR-Kamerasystemen zur Bestimmung der Körpertemperatur verzichtet und auf die Literatur verwiesen [49] [50].

Die DRM kann bei der genaueren Bestimmung von Körpertemperaturen eingesetzt werden, ohne das Messverfahren deutlich zu verlangsamen. Zum einen kann mit Hilfe der DRM die Ungleichförmigkeit einer IR-Kamera erheblich verbessert werden, was den Messfehler bei der Temperaturdifferenzbestimmung zwischen Körpertemperatur und Referenztemperatur verringert. Die Eignung der DRM zur Verringerung der Ungleichförmigkeit von IR-Kameras wurde in dieser Arbeit ausführlich beschrieben und mit Anwendungsbeispielen belegt.

Der zweite wichtige Teil der Messkette ist ein Referenzstrahler mit einer bekannten und möglichst homogenen Strahlungstemperaturverteilung. Diese Referenzstrahler sollten möglichst robust, zahlreich verfügbar und leicht zu bedienen sein. Im Zuge eines Projekts sollten neuartige Strahler, die mit Hilfe von

Peltier-Elementen beheizt wurden, charakterisiert werden. Die gängigste Methode zur Bestimmung der Homogenität der Strahlungstemperatur wäre das schrittweise Abrastern der Strahlungsfläche mit einem Strahlungsthermometer. Dieses Verfahren ist sehr zeitaufwendig und somit kostenintensiv. Deshalb sollte die Homogenität der Strahlungstemperatur verschiedener Strahlerprototypen mit Hilfe einer IR-Kamera bestimmt werden. Es wurden sowohl unterschiedliche Positionierungen der Peltier-Elemente als auch unterschiedliche Verbindungselemente zwischen Peltier-Element und strahlender Fläche untersucht.

Tabelle 6.5 fasst die Ergebnisse dreier Variationen zusammen. In den Spalten (1), (2) und (3) sind drei unterschiedliche Strahleraufbauten dargestellt. (1) zeigt Messungen eines Referenzstrahlers mit einer Spalte zentral positionierter Heizelemente, (2) zeigt Messungen eines Referenzstrahlers mit über die gesamte strahlende Fläche verteilten Peltier-Elementen und bei Messaufbau (3) wurde die Kontaktierung zwischen Peltier-Elementen und Strahlerfläche im Vergleich zu (2) verbessert. Alle Aufbauten sind jeweils in einer unkorrigierten Aufnahme des Flächenstrahlers und in einer mit Hilfe der DRM korrigierte Aufnahme der Kamera mit zwei unterschiedlichen Skalierungen dargestellt. Die Abbildungen zeigen in (a) jeweils die Originalaufnahme der IR-Kamera Titanium, die die direkt gemessene Strahlungstemperaturverteilung darstellt. In den Teilbildern (b) ist jeweils die mit Hilfe der DRM korrigierte Strahlungstemperaturverteilung als Strahlungstemperaturdifferenz zu einem zentralen Detektorelement dargestellt. Dabei ist die Skalierung so gewählt, dass die Darstellung die gleiche Temperaturspanne wie im jeweiligen Teilbild (a) besitzt. In den Teilbildern (c) sind jeweils die gleichen Temperaturwerte wie im jeweiligen Teilbild (b) mit einer größeren Temperaturauflösung aufgetragen.

Tabelle 6.5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Strahlungstemperaturverteilung dreier Strahlervariationen.

Anordnung der Heizelemente	Spaltenförmig (1)	Gleichmäßig (2)	Gleichmäßig und verbesserte Kontaktierung (3)
Unkorrigiertes IR-Kamerabild (a)			
DRM korrigierte Strahlungstemperaturverteilung (b)			
DRM korrigierte Strahlungstemperaturverteilung mit größerer Temperaturauflösung (c)			

Der Vergleich zwischen den Teilbildern (1a) und (1b) zeigt deutlich die positive Auswirkung der Korrektur der Kameraungleichförmigkeit. Durch die gleiche Wahl der dargestellten Temperaturspannweite lassen sich beide Abbildungen direkt miteinander vergleichen und es ist deutlich zu sehen, dass ein Großteil der ursprünglich aufgenommenen Temperaturunterschiede durch die IR-Kamera verursacht wurden. Die Erhöhung der Temporauflösung in Teilbild (1c) zeigt, dass die Wärme der Peltier-Elemente nur unzureichend an die äußeren Bereiche der strahlenden Fläche abgegeben wird. Es entsteht ein Temperaturgefälle von ca. 250 mK.

Die Darstellung in Teilbild (2a) zeigt im Gegensatz zu Teilbild (1a) eine dargestellte Temperaturspanne von 2 K. Die mit Hilfe der DRM durchgeführte Korrektur der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera zeigt wiederum eine deutliche Verbesserung der Aufnahmequalität. Alle Peltier-Elemente sind auf die gleiche Temperatur eingestellt, jedoch ist zu erkennen, dass die zentralen Peltier-Elemente eine höhere Strahlungstemperatur hervorrufen als die äußeren Elemente. Außerdem ist die Differenz der Strahlungstemperaturen zwischen Bereichen, unter denen sich ein Heizelement befindet und den Bereichen ohne Heizelement größer als bei dem in den Teilbildern (1) gezeigten Strahler.

Daraufhin wurde derselbe Aufbau von Peltier-Elementen mit einem anderen Wärmekontaktmittel zwischen den Heizelementen und der strahlenden Fläche untersucht. Die Ergebnisse sind in den Teilbildern (3) dargestellt.

Die Teilbilder (2c) und (3b) weisen die gleiche Temporauflösung auf und lassen sich so direkt miteinander vergleichen. Beide Darstellungen umfassen einen Temperaturbereich von 1 K. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Wechsel des Kontaktmittels eine verbesserte und gleichmäßigere Wärmeübertragung ermöglicht. Mit diesem Strahleraufbau lässt sich eine strahlende Fläche mit einer Temperaturhomogenität von ungefähr ± 75 mK realisieren.

Diese Anwendungsbeispiele haben gezeigt, dass durch die Anwendung der DRM Strahlungstemperaturverteilungen von Referenzstrahlern schnell mit guter Qualität bestimmt werden können. Ohne die Anwendung der DRM hätte die verwendete IR-Kamera nicht die Messgenauigkeit erzielt, die für eine Untersuchung und Optimierung der Referenzstrahler notwendig ist.

6.4.3. In-situ-Regelung eines Flächenstrahlers

Am PTB-Messplatz zur messtechnischen Charakterisierung und Kalibrierung von Thermografiekameras wird der Flächenstrahler Mikron M315 als großflächige Strahlungsquelle, der typischerweise das gesamte Gesichtsfeld einer IR-Kamera ausfüllen kann, verwendet. Er besitzt im Spektralbereich von 3 μm bis 5 μm einen Emissionsgrad von 0,93 und im Spektralbereich von 8 μm bis 14 μm einen Emissionsgrad von 0,91. Er arbeitet in einem Temperaturbereich von 30 °C bis 600 °C und seine strahlende Fläche umfasst 300 mm x 300 mm [51]. Die Fläche ist in neun gleichgroße Heizonen unterteilt und jede Zone wird einzeln geheizt. Die Temperatur der zentralen Zone wird mit einem Platin-Widerstandsthermometer gemessen. Die acht äußeren Zonen werden über Leistungsfaktoren in Bezug auf die zentrale Zone geregelt. Der Strahler wurde in einer vorangegangenen Arbeit charakterisiert [21] und seine Homogenität der Strahlungstemperatur durch eine In-situ-Regelung verbessert. Hier soll nur exemplarisch eine sehr kurze Zusammenfassung der dabei erzielten Ergebnisse gegeben werden.

Dazu wurde die Temperaturverteilung mit der IR-Kamera Titanium aufgenommen und mit der DRM korrigiert. Die korrigierte Aufnahme der Temperaturverteilung des Flächenstrahlers bildete die Basis zur Regelung der Leistungsfaktoren der äußeren acht Heizzonen. In [22] sind sowohl eine genaue Beschreibung des Optimierungsverfahrens als auch die erzielten Ergebnisse veröffentlicht.

Im Folgenden soll als ein exemplarisches Ergebnis des Strahlers bei einer Arbeitstemperatur von 100 °C dargestellt werden. Die Abbildung 6.22a zeigt die durch die DRM ermittelte Temperaturverteilung des Flächenstrahlers mit der Werkseinstellung bei 100 °C während in Abbildung 6.22b die durch die DRM ermittelte Temperaturverteilung nach der Anpassung der Leistungsfaktoren bei 100 °C dargestellt ist.

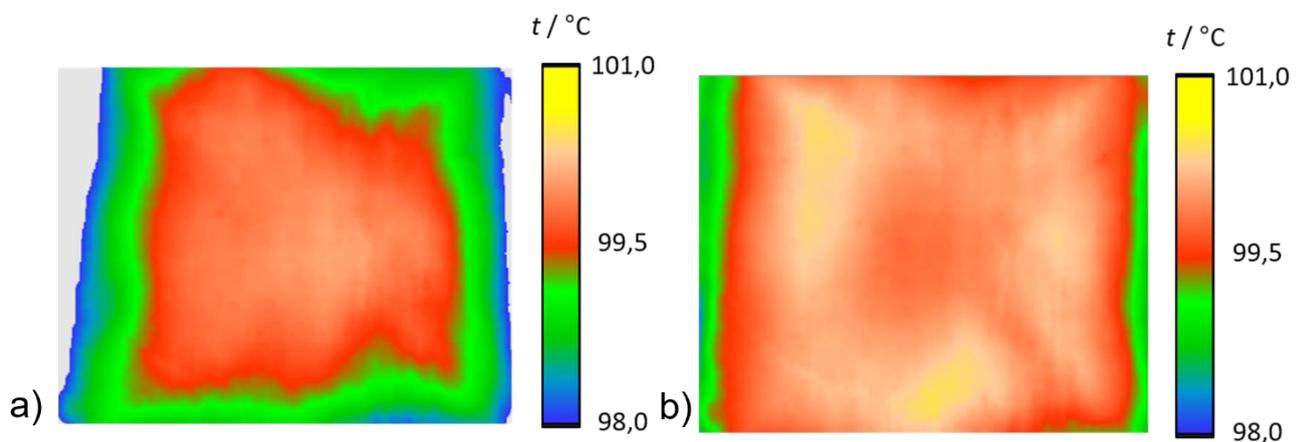


Abbildung 6.22: Temperaturverteilung des Flächenstrahlers Mikron M 315, gemessen mit einer IR-Kamera bei 100 °C. Gemessen a) mit Werkseinstellung und b) mit Anpassung der Leistungsfaktoren der äußeren Heizzonen bei Anwendung der DRM.

Es ist zu erkennen, dass der zentrale homogene Temperaturbereich nach der Anpassung deutlich größer geworden ist (Abbildung 6.22b). In der Abbildung 6.30a ist ein Temperaturabfall zu allen Rändern zu erkennen. Dieser Temperaturabfall ließ sich in der Vertikalen durch die Anpassung ausgleichen. Es ist lediglich weiterhin ein Temperaturabfall in der Horizontalen zu den Rändern erkennen. Für detaillierte Informationen zur Verbesserung der Temperaturhomogenität wird für jede Temperatureinstellung ein Histogramm der Temperaturverteilung des Strahlers angegeben. Zum Vergleich werden in Abbildung 6.23 Histogramme der Temperaturverteilungen des unregulierten Betriebs (Abbildung 6.23a) und für den regulierten Betrieb (Abbildung 6.23b) des Flächenstrahlers unter identischen Bedingungen gezeigt.

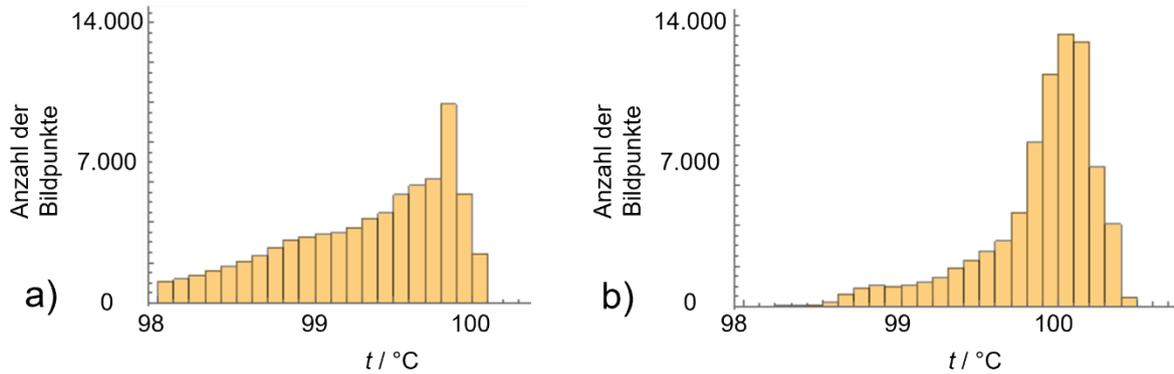


Abbildung 6.23: Histogramme zur dargestellten Temperaturverteilung des Flächenstrahlers M 315 in Abbildung 6.22. a) bei Werkseinstellung und b) mit Anpassung der Leistungsfaktoren der äußeren Heizzonen.

Die Verbesserung der Homogenität der Strahlungstemperaturverteilung ist in Abbildung 6.31 deutlich zu erkennen. Die Randbereiche zeigen weiterhin einen Temperaturabfall, welcher sich auch in den Histogrammen erkennen lässt, jedoch ist der Temperaturverlauf in Abbildung 6.23b deutlich schmalbandiger.

In Tabelle 6.6 sind ausgewählte Ergebnisse bei den Referenztemperaturen von 100 °C, 400 °C und 500 °C zusammengefasst. Dargestellt ist jeweils der Vergleich zwischen unregelmäßigem und regelmäßigem Strahlerbetrieb. Verglichen wird zum einen die Standardabweichung der Strahlungstemperatur des Bereichs der Fläche, der 95 % der Temperaturmesswerte umfasst, und zum anderen die Standardabweichung der Strahlungstemperatur einer Fläche von 240 mm x 240 mm um das Zentrum der strahlenden Fläche. In allen Fällen ist eine deutliche Verbesserung der Homogenität der Strahlungstemperaturverteilung zu erkennen.

Tabelle 6.6: Vergleich der Temperaturbereiche und der Standardabweichung der Temperaturen bei der Optimierung der Regelparameter des M 315 an verschiedenen Referenztemperaturen.

Referenztemperatur	100 °C		400 °C		500 °C	
Zustand	unregelmäßig	regelmäßig	unregelmäßig	regelmäßig	unregelmäßig	regelmäßig
Bereich, in dem 95 % der gemessenen Temperaturen lagen, in °C	97,4 - 100,1	98,4 - 100,3	391,7 - 403,6	394,2 - 401,2	489,1 - 503,5	493,0 - 502,0
Standardabweichung der Temperatur über eine Fläche von 240 mm x 240 mm in K	0,6	0,3	3,4	0,8	2,9	1,1

7. Zusammenfassung

Die für die radiometrische Kalibrierung von Thermografiekameras verwendete Messtechnik basiert ganz wesentlich auf großflächigen Temperaturstrahlern mit bekannter Strahlungstemperatur. Die zeitliche Stabilität und räumliche Homogenität dieser Strahler, die als Hohlraum- oder Flächenstrahler realisiert werden, bestimmen wesentlich die erreichbare Genauigkeit und den zeitlichen Aufwand des Kalibrierprozesses.

Mit der Datenreferenzmethode wurde in dieser Arbeit ein Verfahren vorgestellt, das es ermöglicht, Thermografiekameras auch an inhomogenen Strahlungsquellen zu kalibrieren, so dass die Anforderungen an den verwendeten Kalibrierstrahler deutlich geringer sind, ohne dass sich dadurch die erreichbare Unsicherheit der Kalibrierung damit verschlechtert. Der wesentliche Beitrag der Datenreferenzmethode im Kalibrierprozess ist die verbesserte Bestimmung der Ungleichförmigkeit des Ansprechverhaltens der Thermografiekamera über das beobachtete Bildfeld und das nahezu unabhängig von der Qualität der räumlichen Temperaturhomogenität des verwendeten Kalibrierstrahlers.

Ziel dieser Arbeit war eine umfassende quantitative Untersuchung und Weiterentwicklung der Datenreferenzmethode bezüglich der damit erreichbaren Kalibrierunsicherheit von Thermografiekameras. Zunächst wurden der Einfluss der Positioniergenauigkeit und der Nichtlinearität der Kamerakennlinie auf das Ergebnis der DRM untersucht. Im nächsten Schritt wurden die wichtigsten Störgrößen, nämlich das statistische zeitliche Rauschen und die systematische zeitliche Drift der Temperaturmesswerte während der DRM identifiziert. Dabei wurde quantitativ untersucht, wie sich diese Störgrößen auf das Ergebnis der DRM auswirken. Diese Auswirkungen wurden mit Hilfe von Simulationen nachvollzogen, sodass eine Abschätzung des Unsicherheitsbeitrages möglich war. Dazu wurden Modelle zur Fehlerfortpflanzung, für die auf die verschiedenen Kameratypen angepassten Ungleichförmigkeitskorrekturen entwickelt.

Rauscheinflüsse können insbesondere bei mikrobolometerbasierten Kameras eine Verbesserung der Ungleichförmigkeit der IR-Kamera mittels der DRM verhindern. Deshalb wurden Methoden zur Reduzierung der Rauscheinflüsse bei der Durchführung der DRM entwickelt.

Eine Untersuchung der entwickelten Methoden zeigte in Simulationen auch für mikrobolometerbasierte Kameras eine deutliche Verbesserung des DRM-Ergebnisses. Die theoretischen Untersuchungen der Methodik und Konzeptentwicklungen zur Minimierung der Auswirkungen von Störgrößen wurden mit dem Aufstellen eines Unsicherheitsbudgets abgeschlossen.

Der an der PTB betriebene Messplatz zur messtechnischen Charakterisierung und Kalibrierung von Thermografiekameras wurde für die automatisierte Durchführung der DRM weiterentwickelt und die wichtigsten Kameraeigenschaften, die einen Einfluss auf das Ergebnis der DRM haben, wurden gemäß der Technischen Richtlinien des VDI/VDE an einer Auswahl von unterschiedlichen kommerziellen IR-Kameras bestimmt. Die vorangegangenen theoretischen Betrachtungen zum quantitativen Einfluss von Störgrößen und zur Reduzierung des Einflusses dieser Störgrößen auf die DRM wurden sowohl an gekühlten als auch an nicht-gekühlten IR-Kamerasystemen unter Realbedingungen untersucht. Die entwickelten Methoden haben

zu einer deutlichen Verbesserung der Korrektur der Ungleichförmigkeit von IR-Kameras geführt. Die DRM wurden zur Bestimmung der Homogenität sowohl der Strahlungstemperatur als auch der Strahldichte in unterschiedlichen Spektralbereichen und an verschiedenen Referenzstrahlungsquellen angewendet und ihre Eignung als schnelle und effektive Methode zur Bestimmung der Homogenität von Strahlungsquellen wurde belegt.

Die durchgeführten Arbeiten erfolgten im engen Austausch mit den VDI/VDE-Fachausschüssen für „Strahlungsthermometrie“ und „Temperaturmessung mit Wärmebildkameras.“ Die dabei erzielten Ergebnisse flossen in die Technischen Richtlinien VDI/VDE 5585 ein.

Literaturverzeichnis

- [1] F. Bernhard, *Handbuch der Technischen Temperaturmessung*, ser. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, (2014).
- [2] D. W. J.V. Nicholas, "Traceable temperatures - an introduction to temperature measurement and calibrationures," *Wiley*, (2001).
- [3] J. Hollandt, J. Hartmann, O. Struss, and R. Gaertner, "Industrial applications of radiation thermometry," in *Experimental methods in the physical sciences. Radiometric Temperature Measurements. II Applications*, Elsevier, 43 (2010), 1-56.
- [4] P. J. Minnett and I. J. Barton, "Remote sensing of the Earth's surface temperature," in *Experimental methods in the physical sciences. Radiometric Temperature Measurements. II Applications*, Elsevier, 43 (2012), 333-391.
- [5] M. Vollmer and K. Möllmann, "Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications," *Wiley*, (2010).
- [6] H. Budzier and G. Gerlach, *Thermal infrared sensors: theory, optimisation and practice*. Wiley, (2011).
- [7] J. L. Miller, *Principles of infrared technology*. Springer, (1994).
- [8] C. M. Hanson, H. R. Beratan, R. A. Owen, M. Corbin, and S. McKenney, "Uncooled thermal imaging at texas instruments," in *Infrared Detectors: State of the Art, 1735 (1992)*, 17-26.
- [9] R. A. Wood, C. J. Han, and P. W. Kruse, "Integrated uncooled infrared detector imaging arrays," in *Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, (1992), 132-135.
- [10] M. Kimata, "Uncooled infrared focal plane arrays," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 12 (2018) 1, 4-12.
- [11] S. Takasawa, "Uncooled LWIR imaging: applications and market analysis," in *Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications II, SPIE, 9481 (2015)*, 87-99.
- [12] H. Budzier, „*Radiometrische Kalibrierung ungekühlter Infrarot-Kameras.*“ TUDpress, Habilitationsschrift (2014).
- [13] J. Hollandt, J. Seidel, R. Klein, G. Ulm, A. Migdall, and M. Ware, "Primary sources for use in radiometry," in *Experimental methods in the physical sciences.*, Elsevier, 41 (2005), 213-290.
- [14] J. Hollandt and B. Gutschwager, "Nonuniformity correction of imaging systems with a spatially nonhomogeneous radiation source," *Applied Optics*, 54 (2015), 10599-10605.
- [15] B. Gutschwager and J. Hollandt, "Nonuniformity correction of infrared cameras by reading radiance temperatures with a spatially nonhomogeneous radiation source," *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, 28 (2017), 015401.

-
- [16] I. Müller, A. Adibekyan, K. Anhalt, C. Baltruschat, B. Gutschwager, S. König, E. Kononogova, C. Monte, M. Reiniger, S. Schiller *et al.*, "Non-contact temperature measurement at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Taylor & Francis, 18 (2021) 3, 187-212.
- [17] J. Hollandt, B. Gutschwager, S. König, and C. Monte, "Strahlungsthermometrische Charakterisierung und Kalibrierung von Thermografiekameras an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt," *DGZfP-Jahrestagung, Tagungsband*, (2017), 1-9.
- [18] VDI/VDE 5585 Blatt 2, "Technische Temperaturmessung, Temperaturmessung mit Thermografiekameras: Kalibrierung," *Verein Deutscher Ingenieure*, (2021).
- [19] VDI/VDE 3511 Blatt 4.6, "Technische Temperaturmessung, Strahlungsthermometrie, Aufbau und Einsatz von Kalibrierstrahlern," *Verein Deutscher Ingenieure*, (2019).
- [20] VDI/VDE 5585 Blatt 1, "Technische Temperaturmessung, Temperaturmessung mit Thermografiekameras: Messtechnische Charakterisierung," *Verein Deutscher Ingenieure*. (2018).
- [21] S. König, "Realisierung eines in seiner Strahlungstemperatur homogenen großflächigen Strahlers über einen Temperaturbereich von 30 °C bis 500 °C," *TH Wildau, Masterarbeit*, (2017).
- [22] S. König, B. Gutschwager, and J. Hollandt, "A large-area plate radiator with in situ temperature homogenization for thermographic imager calibration," *Review of Scientific Instruments*, AIP Publishing LLC, 89 (2018) 7.
- [23] A. Tempelhahn, "Verschlusslose mikrobolometerbasierte radiometrische Infrarotkameras," *Dresden: TUDpress, Doktorarbeit* (2017).
- [24] S. N. Torres, E. M. Vera, R. A. Reeves, and S. K. Sobarzo, "Adaptive scene-based nonuniformity correction method for infrared-focal plane arrays," in *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XIV*, SPIE, 5076 (2003),130-139. International Society for Optics and Photonics.
- [25] J. M. Mooney and F. D. Shepherd, "Characterizing IR FPA nonuniformity and IR camera spatial noise," *Infrared physics & technology*, Elsevier, 37(1996) 5, 595-606.
- [26] A. Tempelhahn, H. Budzier, V. Krause, and G. Gerlach, "Shutter-less calibration of uncooled infrared cameras," *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Copernicus GmbH, 5 (2016) 1, 9-16.
- [27] J. Zhao, Q. Zhou, Y. Chen, T. Liu, H. Feng, Z. Xu, and Q. Li, "Single image stripe nonuniformity correction with gradient-constrained optimization model for infrared focal plane arrays," *Optics Communications*, Elsevier, 296 (2013), 47-52.
- [28] H. Budzier and G. Gerlach, "Calibration of uncooled thermal infrared cameras," *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 4 (2015) 1, 187-197.
-

-
- [29] D. Lin, H.-G. Maas, P. Westfeld, H. Budzier, and G. Gerlach, "An advanced radiometric calibration approach for uncooled thermal cameras," *The Photogrammetric Record, Wiley Online Library*, 33 (2018) 161, 30-48.
- [30] A. Wolf, J. E. Pezoa, and M. Figueroa, "Modeling and compensating temperature-dependent non-uniformity noise in ir microbolometer cameras," *Sensors, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 16 (2016) 7, 1121-1134.
- [31] F. Marcotte, P. Tremblay, and V. Farley, "Infrared camera nuc and calibration: comparison of advanced methods," in *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIV, International Society for Optics and Photonics*, (2013), 17-26.
- [32] D. A. Scribner, K. A. Sarkady, M. R. Kruer, J. T. Caulfield, J. Hunt, and C. Herman, "Adaptive nonuniformity correction for ir focal-plane arrays using neural networks," in *Infrared Sensors: Detectors, Electronics, and Signal Processing, SPIE*, 1541 (1991), 100-109.
- [33] R. C. Hardie, M. M. Hayat, E. Armstrong, and B. Yasuda, "Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration," *Applied Optics, Optical Society of America*, 39 (2000) 8, 1241-1250.
- [34] T. Orzanowski, "Nonuniformity correction algorithm with efficient pixel offset estimation for infrared focal plane arrays," *SpringerPlus, SpringerOpen*, 5 (2016) 1, 1-8.
- [35] D. A. Scribner, K. A. Sarkady, J. T. Caulfield, M. R. Kruer, G. Katz, C. Gridley, and C. Herman, "Nonuniformity correction for staring ir focal plane arrays using scene-based techniques," in *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays, International Society for Optics and Photonics*, 1308 (1990), 224-233.
- [36] E. Vera and S. Torres, "Fast adaptive nonuniformity correction for infrared focal-plane array detectors," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, Springer*, 13 (2005), 1-11.
- [37] P. A. Coelho, J. E. Tapia, F. Pérez, S. N. Torres, and C. Saavedra, "Infrared light field imaging system free of fixed-pattern noise," *Scientific reports, Nature Publishing Group UK London*, 7 (2017) 1, 13040.
- [38] C. Zuo, Q. Chen, G. Gu, and X. Sui, "Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration," *JOSA A, Optical Society of America*, 28 (2011) 6, 1164 - 1176.
- [39] H.-H. Kuo, "White noise distribution theory," *CRC Press*, (1996).
- [40] *Datenblatt Optris Xi 400.*
- [41] *Datenblatt DIAS PYROVIEW 640L.*
- [42] *Datenblatt FLIR T 800.*
- [43] *Datenblatt High-End-Kameraserie ImageIR.*

-
- [44] D. Grbovic, N. V. Lavrik, P. G. Datskos, D. Forrai, E. Nelson, J. Devitt, and B. McIntyre, "Uncooled infrared imaging using bimaterial microcantilever arrays," *Applied Physics Letters, American Institute of Physics*, 89 (2006) 7, 73 - 118.
- [45] S. König, B. Gutschwager, R. D. Taubert, and J. Hollandt, "Metrological characterization and calibration of thermographic cameras for quantitative temperature measurement," *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 9 (2020) 2, 425 - 442.
- [46] S. König, B. Gutschwager, and J. Hollandt, "Nonuniformity determination of infrared imagers by detecting radiance temperatures with the data reference method," in *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV, SPIE*, (2018), 35 - 45.
- [47] S. König, I. Mueller, and R. D. Taubert, "Messung der Homogenität der Strahldichte einer Ulbricht-Kugel mit großer Apertur im SWIR mit einer InGaAs-Infrarotkamera," *tm-Technisches Messen, Oldenbourg Wissenschaftsverlag*, 89 (2022) 1, 43 - 49.
- [48] S. S. R. D. Taubert, C. Baltruschat and J. Hollandt, "Radiometric characterization of a large-aperture variable-radiance calibration source for remote sensing applications," in *New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2014): Proc. 12th Intern. Conf.*, (2014), 25 - 26.
- [49] K. Ammer, "The glamorgan protocol for recording and evaluation of thermal images of the human body," *Thermol Int*, 18 (2008) 4, 125 - 144.
- [50] M. Diakides, J. Bronzino, and D. Peterson, *Medical Infrared Imaging: Principles and Practices*. CRC Press, (2012), no. Chapter 22 and 23.
- [51] *Datenblatt Mikron M 315*.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Kamera-Kalibriermessplatz der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Berlin.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Jörg Hollandt für die Möglichkeit der Durchführung meiner Arbeit auf dem interessanten Arbeitsgebiet der Strahlungsthermometrie und für die wertvollen geführten Diskussionen bedanken. Ohne Ihre stetige Unterstützung und Motivation bei der Anfertigung der Dissertation wäre diese nicht möglich gewesen.

Besonders möchte ich meinen Dank Herrn Berndt Gutschwager aussprechen, welcher mir von Beginn an mit Rat und Tat zur Seite stand und den Grundstein für diese Arbeit gelegt hat.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerald Gerlach für die ausgezeichnete Betreuung und den Wissensaustausch bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Dr. Ingmar Müller und Herrn Dr. Richard Dieter Taubert für die stets konstruktiven und hilfreichen Diskussionen bedanken.

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen meinen großen Dank aussprechen, die mich bei der Bearbeitung meiner Dissertation unterstützt haben.

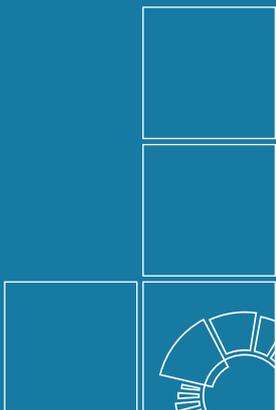
Wissenschaftliches Veröffentlichungsverzeichnis

Erstautorenschaften:

- S. König, B. Gutschwager, R. D. Taubert, and J. Hollandt, "Metrological characterization and calibration of thermographic cameras for quantitative temperature measurement," *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 9 (2020) 2, 425 - 442.
- S. König, B. Gutschwager, and J. Hollandt, "Nonuniformity determination of infrared imagers by detecting radiance temperatures with the data reference method," in *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIV*, SPIE, (2018), 35 - 45.
- S. König, I. Mueller, and R. D. Taubert, "Messung der Homogenität der Strahldichte einer Ulbricht-Kugel mit großer Apertur im SWIR mit einer InGaAs-Infrarotkamera," *tm-Technisches Messen*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 89 (2022) 1, 43 - 49.
- S. König, "Realisierung eines in seiner Strahlungstemperatur homogenen großflächigen Strahlers über einen Temperaturbereich von 30 °C bis 500 °C," TH Wildau, Masterarbeit, (2017).
- S. König, B. Gutschwager, and J. Hollandt, "A large-area plate radiator with in situ temperature homogenization for thermographic imager calibration," *Review of Scientific Instruments*, AIP Publishing LLC, 89 (2018) 7.

Co-Autorenschaften:

- I. Müller, A. Adibekyan, K. Anhalt, C. Baltruschat, B. Gutschwager, S. König, E. Kononogova, C. Monte, M. Reiniger, S. Schiller et al., "Non-contact temperature measurement at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Taylor & Francis, 18 (2021) 3, 187-212.
- J. Hollandt, B. Gutschwager, S. König, and C. Monte, "Strahlungsthermometrische Charakterisierung und Kalibrierung von Thermografiekameras an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt," *DGZfP-Jahrestagung, Tagungsband*, (2017), 1-9.



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21

Telefax: (05 31) 592-92 92

www.ptb.de