



Hochschule für
Technik und Wirtschaft
Dresden
University of Applied Sciences

Fakultät Informatik/Mathematik

Masterarbeit

Auswertung und Verarbeitung von Aufnahmen einer Wärmekamera zur
Unterstützung von Feuerwehreinsätzen

eingereicht von: Paul Wolff
Geb.: 13.04.1990
Matrikelnummer: 44926
Studiengang: Angewandte Informatik
HTW Dresden

betreut durch: Prof. Dr.-Ing. Georg Freitag
Dr.-Ing. Thomas Neumann

Dresden, den 6. Januar 2020

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Abkürzungsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Technischer Hintergrund	5
2.1 Infrarot- und Wärmestrahlung	5
2.2 Thermografie	8
2.3 Digitale Bildverarbeitung	13
2.3.1 Punktoperationen	14
2.3.2 Filter	15
2.3.3 Geometrische Operationen	16
3 Problemdefinition	17
3.1 Einsatzszenario	17
3.2 Eingrenzung der Probleme	18
3.3 Stand der Technik	24
4 Entwurf	29
4.1 Wärmebildaufnahmen	29
4.2 Allgemeine Auswertung der Aufnahmen	32
4.3 Technische Anwendungsfälle	36
4.3.1 Vorverarbeitung	36
4.3.2 Sichtverbesserung	37
4.3.3 Hervorhebung von Temperaturextrema	53
4.3.4 Hervorhebung spezifischer Temperaturen	57
4.3.5 Temperaturmessung definierter Bereiche	59
4.4 Resultierender Ablauf der Verarbeitung	65

5 Umsetzung	67
5.1 Aufbereitung der Aufnahmen	68
5.2 Optimierungen	71
5.2.1 Hardwarebeschleunigung	71
5.2.2 Lookup-Tabellen	71
5.3 Ergebnisse	73
5.4 Fazit einschließlich Ausblick	82
6 Zusammenfassung	85
Literatur	89
A Quellcode	95
B Inhaltlich-semantisches Transkript zum Interview am 27.05.2019	97

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich im Rahmen meiner Masterarbeit begleitet haben. Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Freitag, welcher meine Arbeit durch seine fachliche und persönliche Unterstützung begleitete und immer ein offenes Ohr für mich hatte. Weiterhin danke ich Herrn Dr.-Ing. Thomas Neumann für seine fachbezogenen Hinweise und für seine Zweitbegutachtung.

Darüber hinaus möchte ich der Feuerwehr Dresden Süd, insbesondere dem Brandschutzerziehungszentrum Dresden, danken, ohne deren Kooperation diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ich bedanke mich für das Interview mit Herrn Michael Klahre, bei dem ich wichtige Informationen bezüglich der Verwendung von Wärmebildkameras im Feuerwehr-einsatz sammeln konnte. Weiterhin danke ich Herrn David Krautz für die Möglichkeit, Wärmebildaufnahmen im Rauchraum des BEZ Dresden anfertigen zu können.

Besonderer Dank gilt ebenfalls der InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik, insbesondere Herrn Thomas Schwarz, für die Bereitstellung der Wärmebildkamera, deren Aufnahmen wesentlich zur Entwicklung des Prototyps und damit zur vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Weiterer Dank gilt meinen Eltern, die mir durch ihre tatkräftige Unterstützung das Studium ermöglicht haben. Danken möchte ich außerdem meiner Freundin und meinen Freunden, die mich geduldig während des Schreibens begleitet und durch Anregungen und Korrekturen zur kontinuierlichen Verbesserung der Arbeit beigetragen haben.

Abkürzungsverzeichnis

AHE	Adaptive Histogram Equalization
CCD	Charged Coupled Device
CLAHE	Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization
FIR	Far Infrared
FPN	Fixed Pattern Noise
FSX	Flexible Scene Enhancement
GPU	Graphics Processing Unit
LUT	Look-Up-Table
LWIR	Long Wave Infrared
MIR	Mid Infrared
MWIR	Mid Wave Infrared
NIR	Near Infrared
NLM	Non-Local Means
NUC	Non-Uniformity Correction
PNG	Portable Network Graphics
SRV	Signal-Rausch-Verhältnis
SWIR	Short Wave Infrared

Abbildungsverzeichnis

2.1	Plancksches Strahlungsspektrum	6
3.1	Gründe für den Einsatz von Wärmebildkameras	18
3.2	Vergleich zwischen Wärmebildern mit FSX und ohne FSX	25
3.3	Module des Wärmebildkamerasytems Scott Sight	26
3.4	Vom C-Thru-System verwendete Hardware	27
4.1	Ghosting-Effekt und Bewegungsunschärfe in einem Wärmebild	33
4.2	Parallele Aufnahmen mit visueller Kamera (VIS) und Infrarotkamera (IR)	34
4.3	Wärmebildaufnahme mit geringem Kontrast	38
4.4	Schematische Darstellung einer stückweise linearen Grauwerttransformation	40
4.5	Aus einem Histogrammausgleich resultierender Informationsverlust	43
4.6	Ergebnis eines Kontrast-limitierten adaptiven Histogrammausgleiches	45
4.7	Profile ausgewählter idealer Kantenmodelle	49
4.8	Farbpalette mit Temperaturextrema	57
4.9	Farbpalette mit hervorgehobenem Bereich	58
4.10	Farbpalette mit erweitertem hervorgehobenem Bereich	59
4.11	Erkennbarkeit umrandeter Schriftzeichen vor hellem sowie dunklem Hintergrund	62
4.12	Reale Temperatur in Abhängigkeit des Emissionsgrades	63
4.13	Ablauf der Wärmebildverarbeitung	65
5.1	Aufnahme AA090500	73
5.2	Aufnahme AA090517: (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet	75
5.3	Aufnahme AA090513(456): (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet	76
5.4	Aufnahme AA090518(2794): (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet	78
5.5	Aufnahme AA090518(229): (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet	79
5.6	Aufnahme AA090518(765): (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet	80

1 Kapitel 1

Einleitung

Mit über 1,3 Millionen Mitgliedern bundesweit ist die Feuerwehr ein bedeutender Berufszweig, welcher sich „[b]esonders im Bereich der Rettung von Personen bei Bränden, Überschwemmungen und Verkehrsunfällen“ als „eine zunehmend wichtige Institution in Deutschland“ etabliert hat (Käufer 2019). Allein 2,24 Millionen Einsätze waren im Jahr 2016 im Bereich Notfallrettung zu verzeichnen (vgl. ebd.). Bei diesem Aufgabenspektrum ist nachvollziehbar, dass die Arbeit als Feuerwehrmann¹ mit enormen Risiken und Schwierigkeiten einhergehen kann. Um ebendiese zu minimieren, werden bei den Einsätzen eine Vielzahl an Hilfsmitteln angewandt. Eines dieser Hilfsmittel stellen Wärmebildkameras dar, welche sich durch ihre speziellen Eigenschaften besonders zur Brandbekämpfung als äußerst nützlich erweisen können.

Der enorme Vorteil dieser Kameras besteht darin, dass die von ihnen aufgenommene Infrarotstrahlung Rauch besser durchdringt als sichtbares Licht (vgl. Keller u. a. 2012, S. 3). Des Weiteren weisen sie eine hohe Robustheit gegenüber wechselnden Lichtverhältnissen auf. Dem Benutzer einer solchen Technik ist es somit möglich, die häufig unbekannten Einsatzumgebungen und etwaige Gefahren besser einzuschätzen. Im Brandfall mit Rauchentwicklung kann dieses Wissen über Erfolg und Misserfolg des Einsatzes entscheiden. Da die am häufigsten verwendeten Infrarotkameras sogenannte Handkameras sind, ist der Benutzer in der Durchführung anderer Tätigkeiten jedoch eingeschränkt. Als weiterer Nachteil erweist sich die Tatsache, dass die an den Kameras integrierten Displays in dichtem Rauch selbst auf kürzesten Entfernung nur sehr schwer zu erkennen sind.

Zur Beseitigung dieser Herausforderungen existieren mittlerweile Konzepte, bei denen die Kamera am Helm der Einsatzkraft angebracht und das dazugehörige Display in die Atemschutzmaske integriert ist (vgl. Scott Safety 2019). Der Benutzer eines solchen Helmes hat demzufolge zu jeder Zeit Zugriff auf ein Wärmebild in Blickrichtung, ohne dafür weitere Hardware bedienen zu müssen.

Generell gilt, um hinreichend Informationen aus einem Wärmebild zu beziehen, ist

¹Im nachfolgenden Text werden Personenbezeichnungen zur besseren Lesbarkeit vornehmlich in der männlichen Form verwendet. Diese gilt einheitlich und neutral für weibliche und männliche Personen und unterliegt keiner Wertung. In diesem Sinne schließt die in dieser Arbeit häufig themisierte Berufsbezeichnung *Feuerwehrmann* ebenfalls *Feuerwehrfrauen* ein.

1 Einleitung

eine Interpretation der bedienenden Einsatzkräfte erforderlich. Dies setzt voraus, „dass das notwendige technische und physikalische Hintergrundwissen bei den Einsatzkräften vorhanden ist“ (Linde und Dittrich 2013, S. 28). Aufgrund der Fülle an verfügbaren Modellen und dem unterschiedlichen Funktionsumfang von Wärmebildkameras, ist jedoch fraglich, ob ein umfassender Umgang mit ebendiesen in Aus- und Weiterbildung der Feuerwehr gelehrt wird. Eine vorangestellte Verarbeitung der Wärmebilder könnte an dieser Stelle relevante Informationen herausstellen und so eine Interpretation der Aufnahmen beschleunigen beziehungsweise erleichtern.

Resultierend aus der vorab erläuterten Problemstellung wird folgende Forschungsfrage formuliert: Inwieweit lassen sich bekannte Bildverarbeitungsverfahren auf Wärmebilder übertragen, um die Bewältigung diverser Probleme im Feuerwehreinsatz mithilfe von Wärmebildkameras zu unterstützen? Zunächst wird angenommen, dass der bestehende Funktionsumfang von für die Feuerwehr vorgesehenen Kamerasyystemen nicht alle Möglichkeiten nutzt und sich unter Verwendung zusätzlicher Algorithmen weitere Informationen aus einem Wärmebild extrahieren lassen.

Hierzu soll im Rahmen dieser Arbeit ein exemplarischer Prototyp entworfen und praktisch umgesetzt werden, der verschiedene Konzepte und Methoden des Forschungsgebiets der Bildverarbeitung auf im Brandfall zu bewältigende Situationen anwendet. Als Einsatzszenario dient das standardisierte Schadensereignis Wohnungsbrand, welches in den Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten beschrieben wird (vgl. AGBF bund 2015). Anhand dieses Szenarios werden von der Feuerwehr zu lösende Probleme identifiziert und untersucht, in welchem Umfang Wärmebilder zur besseren Bewältigung beitragen können. Weiterhin ist eine Auswertung der mithilfe des Prototyps erzielten Ergebnisse Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

Um sich der Thematik anzunähern, werden zu Beginn die physikalischen Grundlagen der Thermografie dargelegt und die daraus resultierenden Vor- und Nachteile bei der Anwendung von Wärmebildkameras betrachtet. Aufgrund dessen, dass sich Wärmebilder in der Regel in ihrem Aufbau nicht von herkömmlichen digitalen Bildern unterscheiden, erfolgt weiterhin eine kompakte Einführung in die digitale Bildverarbeitung.

Im nächsten Kapitel ist die Betrachtung des Einsatzszenarios für das angestrebte System verortet. Zu diesem Zweck wird das standardisierte Schadensereignis Wohnungsbrand herangezogen. Genanntes Szenario wird in Aufgaben, die von der Feuerwehr zu bewältigen sind, sowie dabei entstehende Schwierigkeiten untergliedert und abgeschätzt, inwiefern eine Auswertung von Wärmebildern zur Lösung der identifizierten Herausforderungen beitragen kann.

Das darauffolgende Kapitel dient dem Entwurf des prototypischen Systems. Für die

Entwicklung wurden vorab Wärmebildaufnahmen im Rauchraum der Feuerwehr Dresden Süd angefertigt. Fernerhin sind hierfür konstruierte Situationen, die möglichst viele Szenarien der im vorherigen Kapitel identifizierten Probleme abdecken, Bestandteil des Entwurfs. Anschließend erfolgt eine erste visuelle Auswertung der Aufnahmen hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Besonderheiten. Darauf aufbauend werden die technischen Anwendungsfälle des Prototyps aus den zuvor identifizierten Problem hergeleitet und die dafür nötigen Algorithmen und Verfahren vorgestellt.

Das fünfte Kapitel beschäftigt sich mit der Umsetzung des Prototyps und den damit erzielten Ergebnissen. Zur Veranschaulichung werden hierfür ausgewählte Aufnahmen herangezogen und die aus der Verarbeitung durch den Prototyp erzielten Resultate betrachtet. Eine kritische Diskussion schließt sich an dieser Stelle an. Des Weiteren wird auf offene Fragen und sich anschließende Forschungsdesiderata hingewiesen sowie mögliche Verbesserungsvorschläge und Alternativen für die Nutzung der Bildverarbeitung von Wärmebildern im Feuerwehreinsatz aufgezeigt.

Im letzten Kapitel erfolgt die Zusammenfassung der in der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und die Bezugnahme auf die eingangs gestellte Forschungsfrage.

Als Grundlage der Recherche wurde der Katalog der Sächsischen Landes- und Universitätsbibliothek, die Bibliothek der HTW Dresden sowie Fachdatenbanken, welche über das Netzwerk der HTW zugänglich sind, genutzt. Als vorrangig verwendete Datenbanken sind unter anderem IEEE Xplore, ResearchGate sowie SPIE Digital Library anzuführen.

2

Kapitel 2

Technischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden zunächst die erforderlichen technischen und physikalischen Hintergründe von Thermografiesystemen zusammengetragen, um deren Möglichkeiten und Grenzen nachvollziehen zu können. Für die bessere Verständlichkeit des praktischen Teils dieser Arbeit werden weiterhin Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung vorgestellt.

2.1 Infrarot- und Wärmestrahlung

Infrarotstrahlung ist wie das sichtbare Licht eine elektromagnetische Strahlung, die dem optischen Spektralbereich¹ zuzuordnen ist (vgl. Glückert 1992, S. 13). Der Infrarotbereich lässt sich entsprechend seiner unterschiedlichen Eigenschaften und Wellenlängen in mehrere Bänder unterteilen. Der dem sichtbaren Spektrum angrenzende Bereich wird nach ISO 20473 als nahes Infrarot (NIR) bezeichnet und deckt Wellenlängen von 0,78 µm bis 3 µm ab (vgl. ISO 20473:2007 2007). Es schließt sich mittleres Infrarot (MIR) mit 3 µm bis 50 µm und fernes Infrarot (FIR) mit 50 µm bis 1000 µm an (vgl. ebd.). Jedoch finden sich in Literatur und Industrie je nach Anwendungsgebiet oft weitere Unterteilungen des Infrarotbereiches. So ist speziell in der Thermografie neben NIR und FIR eine weitere Unterteilung in Short Wave Infrared (SWIR), Mid Wave Infrared (MWIR) und Long Wave Infrared (LWIR) üblich. Besonders für Temperaturmessungen ist LWIR mit Wellenlängen von 8 µm bis 15 µm relevant, da sich die Wärmestrahlung von Objekten nahe Zimmertemperatur mit einem Strahlungsmaximum bei etwa 10 µm (vgl. Dittie 2015) in diesem Bereich bewegt.

Ein jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt, das heißt 0 K beziehungsweise -273,15 °C, sendet eine elektromagnetische Strahlung aus, die als Temperatur- oder Wärmestrahlung bezeichnet wird (vgl. Glückert 1992, S. 21). Ist die Objekttemperatur dabei unterhalb von „650 °C, so liegt die von einer Oberfläche ausgehende Strahlung ausschließlich im infraroten Spektralbereich“ (Glückert 1992, S. 10).

¹Der optische Spektralbereich bezeichnet den "Bereich des elektromagnetischen Spektrums, der vom nahen Ultravioletten über den sichtbaren Bereich ins Infrarot (bis ca. 2.000 nm) reicht" (Baldenhofer 2019).

Ist die Temperatur eines Objektes noch höher, so strahlt es zusätzlich zum infraroten Anteil im sichtbaren Bereich, wodurch ein Teil der Wärmestrahlung für das menschliche Auge als Glühen sichtbar wird (vgl. Glückert 1992, S. 10).

Je höher die Temperatur eines Objektes, desto mehr „nimmt die gesamte abgestrahlte Energie zu und die ausgestrahlte Wärmestrahlung beinhaltet immer kürzere Wellenlängen“ (vgl. ebd.). Die spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers lässt sich wie in Abbildung 2.1 gezeigt als Funktion von λ (Wellenlänge) und T (Temperatur) darstellen. Hierbei bilden die unterschiedlichen Temperaturen Isothermen, das heißt Linien gleicher Temperatur. Planck gelang es, diese zunächst experimentell ermittelten Isothermen in einer geschlossenen Formel darzustellen (vgl. ebd., S. 25), was heute als Plancksches Strahlungsgesetz bekannt ist. Dieses Gesetz gibt an, „welche Leistung [von einem schwarzen Strahler] pro Flächeneinheit für eine feste Temperatur bei verschiedenen Wellenlängen in den Halbraum abgestrahlt wird“ (ebd., S. 25). Der schwarze Strahler gilt hierbei als physikalisches Ideal, von dem reale Körper beziehungsweise Temperaturstrahler in gewissem Maße abweichen. Wie in Abbildung 2.1 ersichtlich, hat jede der Isothermen ihr Strahlungsmaximum bei einer anderen Wellenlänge. Die Höhe der Strahlungsenergie, die bei einer bestimmten Wellenlänge emittiert wird, gibt demnach Rückschluss auf die Temperatur des strahlenden Körpers.

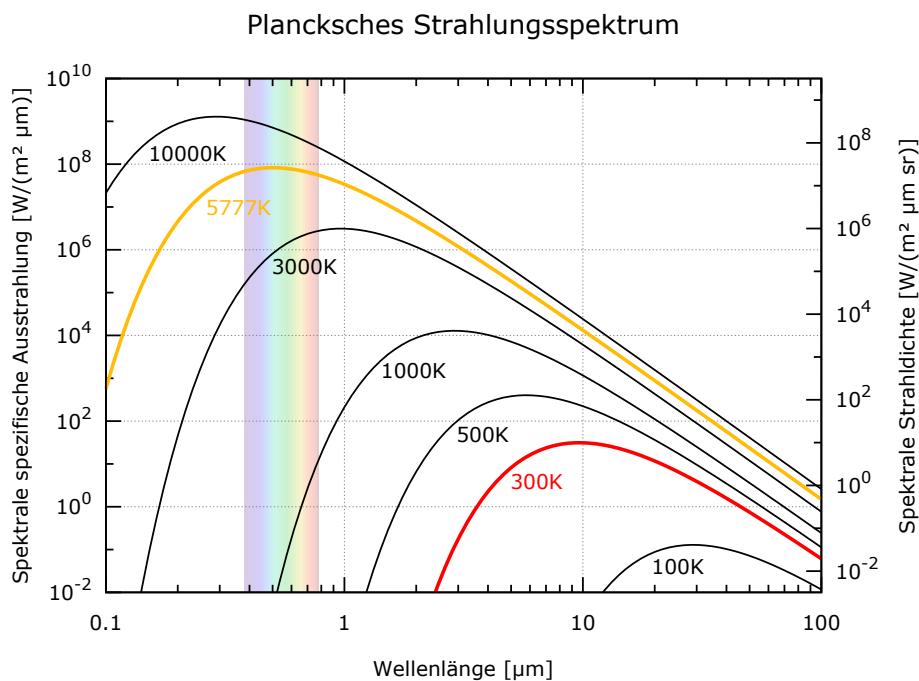


Abbildung 2.1: Plancksches Strahlungsspektrum für Temperaturen von 100 K bis 10 000 K in einem doppeltlogarithmischen Koordinatensystem (Prog 2017)

Aus dem Quotienten der abgestrahlten Leistung einer realen Oberfläche zur Leistung

eines schwarzen Strahlers der gleichen Fläche ergibt sich der Emissionsgrad ε dieser realen Oberfläche (vgl. Glückert 1992, S. 33). Für einen schwarzen Strahler gilt $\varepsilon = 1$, da die gesamte von ihm ausgehende Wärmestrahlung von ihm selbst emittiert wird. Der Grund dafür ist, dass jegliche auf den Körper treffende Strahlung absorbiert wird und der absorbierte Anteil laut Kirchhoffschem Strahlungsgesetz dem emittierten Anteil entspricht, insofern ein thermisches Gleichgewicht besteht (vgl. ebd., S. 31). Reale Oberflächen haben dementsprechend einen Emissionsgrad kleiner 1 ($\varepsilon < 1$), da eintreffende Strahlung ebenfalls reflektiert und gegebenenfalls transmittiert werden kann. Der Emissionsgrad einer Oberfläche ist dennoch nicht zwangsläufig konstant. So wird von einem selektiven Strahler gesprochen, wenn der Emissionskoeffizient abhängig von den Wellenlängen ist, bei denen er strahlt (vgl. ebd.). Ist der Emissions- und Absorptionsgrad wellenlängenunabhängig und dennoch kleiner 1, wird dies als grauer Strahler bezeichnet (vgl. ebd.). Neben dem Wellenlängenbereich kann der Emissionsgrad ebenfalls vom Betrachtungswinkel, der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Temperatur des Körpers selbst abhängig sein (vgl. ebd., S. 39).

2.2 Thermografie

Ähnlich einer herkömmlichen digitalen Kamera, welche das für unser Auge sichtbare Licht einfängt und auf einem Sensor bündelt, messen Infrarotkameras einfallende Strahlung im Infrarotbereich mittels einem dafür empfindlichen Sensor. Anhand der Wirkungsweise und der physikalischen Effekte, welche zur Detektion der Infrarotstrahlung genutzt werden, lassen sich die Sensoren von Thermografiesystemen prinzipiell in Quanten- und Nichtquantendetektoren unterscheiden (vgl. Glückert 1992, S. 47).

Vergleichbar mit den bei digitalen Kameras verbauten Sensoren nutzen Quantendetektoren den photoelektrischen Effekt, bei welchem durch einfallende Lichtquanten Ladungsträger freigesetzt werden. Zu unterscheiden sind dabei Detektoren, die den äußeren und jene, die den inneren Photoeffekt nutzen. Bei Ersterem werden die herausgelösten Elektronen von einem anliegenden elektrischen Feld auf einen Leuchtschirm gelenkt, wo die kinetische Energie den Leuchtphosphor anregt und zu erkennbaren Leuchterscheinungen führt (vgl. ebd., S. 50). Beim inneren Photoeffekt, auf dem ebenfalls CCD-Sensoren beruhen, werden Halbleiter verwendet, bei denen „das absorbierte Lichtquant zu einer Leitfähigkeitsänderung [führt, indem] ein Elektron [...] vom Valenzband in das Leitungsband gehoben [wird]“ (ebd.). Diese Leitfähigkeitsänderung kann anschließend gemessen und ausgewertet werden, denn „[j]e mehr Elektronen sich im Leitungsband befinden, desto besser leitet der Halbleiter den Strom“ (Kleger 2008, S. 51). Eine gängige Bezeichnung für diese Art von Bauelementen ist der Fotowiderstand. Die verwendeten Halbleiter lassen sich weiterhin auf unterschiedliche Weisen verschalten, wodurch der Strahlungsnachweis anderweitig erfolgen muss. So werden Halbleiterdetektoren, bei denen die zusätzlich erzeugten Ladungsträger „im 'eingefrorenen' elektrischen Feld eines p-n-Überganges zu einer meßbaren Spannung führen“ (Glückert 1992, S. 50), als Fotodioden bezeichnet.

Bei Nichtquantendetektoren führen nicht die einfallenden Photonen, sondern die aus der Strahlung resultierende Erwärmung des gesamten Sensorelements zu einer messbaren Änderung der physikalischen Eigenschaften der Bauelemente (vgl. Glückert 1992, S. 47; Kleger 2008, S. 50). Sie werden daher als Thermische Detektoren bezeichnet. Derartige Detektoren „[müssen] eine möglichst kleine Masse haben [...] um bei Bestrahlung sehr schnell ihre neue Gleichgewichtstemperatur zu erreichen“ (Glückert 1992, S. 48). Daraus resultieren eine geringere Empfindlichkeit und höhere Trägheit im Vergleich zu Quantendetektoren (vgl. Glückert 1992, S. 47f.; Kleger 2008, S. 50). Mittlerweile sind jedoch Kameras mit Nichtquantendetektoren erhältlich, die Bildfrequenzen von bis zu 240 Hz liefern (vgl. InfraTec GmbH 2017). Dadurch sind die genannten Nachteile für bestimmte Anwendungen vernachlässigbar. Bolometer sind Bauteile, die in der Thermografie häufig Verwendung finden. Diese Detektoren beruhen auf dem gleichnamigen Bolometer-Effekt,

bei welchem mit einer Temperaturerhöhung eine messbare Änderung des elektrischen Widerstandes erfolgt (vgl. Glückert 1992, S. 48). Weitere nutzbare Effekte anderer Bauteile sind der Thermopneumatische Effekt², der Thermooptische Effekt³ sowie der Seebeck-Effekt⁴ (vgl. ebd.).

Geräte mit nur einem dieser Detektorelemente lassen sich unter der Bezeichnung Pyrometer oder Strahlungsthermometer einordnen. Werden die „punktuelle[n] Information[en], die ein Pyrometer liefert, so aufgearbeitet, daß eine ganze Szene 'dargestellt' wird, so hat man ein Thermografiesystem“ (ebd., S. 94). Um demnach nicht nur einen einzelnen Wert zu erhalten, der eine bestimmte Temperatur repräsentiert, können zum Beispiel mehrere dieser Detektorelemente in einer Gitter- beziehungsweise Array-Struktur angeordnet werden. Dadurch lassen sich mehrere Bild- beziehungsweise Temperaturpunkte der aufzunehmenden Szene gleichzeitig auslesen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Strahlung aus verschiedenen Bereichen der Szene optomechanisch⁵ auf einen einzelnen Sensor zu lenken. So kann „durch geschickte Anordnung von bewegten Spiegeln (rotierende Prismenspiegel, Schwingspiegel und deren Kombination) eine vollflächige Bildinformation gewonnen werden“ (ebd.). Der verwendete Sensor muss hierfür eine hohe Ansprechgeschwindigkeit haben, da die einzelnen Bildpunkte der Szene nacheinander ausgelesen werden. Solche Systeme werden daher häufig als Scanner bezeichnet (vgl. Glückert 1992, S. 94). Durch die Kombination aus Array-Anordnung und einem optomechanischen System kann die Auflösung eines Sensors vervielfacht werden (vgl. InfraTec GmbH 2019).

Analog zum Aufbau einer herkömmlichen Kamera wird bei Wärmebildkameras eine Linse benötigt, um die Strahlung auf dem Sensor zu bündeln. Da Infrarotstrahlung von Glas jedoch stark reflektiert wird, finden für Infrarotstrahlung durchlässige Halbleitermaterialien wie Silizium oder Germanium Anwendung (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 17). Viele Kameramodelle bieten außerdem die Möglichkeit, verschiedene Objektive anzubringen, wodurch der Benutzer die Kamera an unterschiedlichste Anforderungen, wie zum Beispiel Makroaufnahmen, anpassen kann. Da sich Infrarotstrahlung sehr ähnlich der Strahlung im visuellen Spektrum verhält, müssen bei Wärmebildkameras aufzunehmende Objekte ebenfalls mithilfe des Objektivs fokussiert werden, um deutliche Bilder mit scharfen Konturen zu erhalten.

Die vom Sensor gemessenen Werte liefern noch keinen Aufschluss über konkrete Tempera-

²Der Thermopneumatische Effekt besagt, dass sich der Druck in geschlossenen Gaszellen temperaturabhängig ändert. (vgl. Glückert 1992, S. 48)

³Beim Thermooptischen Effekt erfolgt eine temperaturabhängige Änderung der optischen Eigenschaften von Materialien. (vgl. Glückert 1992, S. 48)

⁴Tritt eine Änderung der Thermospannung zu einer Vergleichsstelle auf, wird dies als Seebeck-Effekt bezeichnet. (vgl. Glückert 1992, S. 48)

⁵„Die optomechanische Technik bezeichnet ein Zusammenwirken von optischen und mechanischen Bauelementen“ (Computerwissen Online 2019).

turen. Daher müssen die Daten noch von einer Recheneinheit interpretiert werden. Hierzu müssen aus den vom Sensor gemessenen Strahlungswerten, unter Berücksichtigung des in Abschnitt 2.1 erwähnten Emissionsgrades, die Temperaturen des zu messenden Körpers ermittelt werden (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 18). Um eine genaue Temperaturmessung von Objekten eines bestimmten Materials vornehmen zu können, ist es erforderlich, den spezifischen Emissionsgrad zu bestimmen und vorab in der Kamera einzustellen. „Für die meisten nichtmetallischen Werkstoffe liegt dieser Emissionskoeffizient in einem Bereich von 0,92-0,98“ (Linde und Dittrich 2013, S.14). Deshalb ist bei den meisten Kameras ein mittlerer Emissionsgrad von 0,95 standardmäßig voreingestellt (vgl. ebd.). Neben der Berechnung der einzelnen Temperaturen kann eine Recheneinheit zusätzlich zur Bildoptimierung eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist das Hervorheben von Kanten oder kleineren Details in der resultierenden Aufnahme, wodurch dem Betrachter keine zusätzlichen Informationen über Temperaturen im Bild geliefert werden, die räumliche Orientierung beziehungsweise Interpretation der Umgebung sowie die Erkennung von Objekten jedoch deutlich erleichtert wird (vgl. FLIR Systems o.D.(a)).

Zur Darstellung der Aufnahmen einer Wärmebildkamera ist außerdem ein Anzeigegerät nötig, weshalb gerade bei kleineren tragbaren Modellen ein Bildschirm im Gehäuse integriert ist. Für eine visuelle Interpretation der aufgenommenen Daten werden den unterschiedlichen Temperaturwerten bestimmte Kontrast- oder Farbwerte zugeordnet. Die meisten Kameras bieten hierbei die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Farbpaletten zu wechseln. In der üblichen Darstellung als Graustufenbild werden die unterschiedlichen Intensitätswerte als Graustufen interpretiert, wobei die höchste Temperatur als Weiß und die niedrigste als Schwarz angezeigt wird. Unter schwierigen Bedingungen ist ein genaues Ablesen und Interpretieren der verschiedenen Helligkeitswerte in einem solchen Graustufenbild jedoch nur schwer möglich (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 23). Durch die Verwendung eines Farbbildschirms kann eine Repräsentation unterschiedlicher Temperaturen mittels verschiedener Farben oder Farbverläufe erfolgen. Dies ist insofern vorteilhaft, dass sich eine grobe Interpretation des Gesamtbildes deutlich schneller vornehmen lässt, da einzelne Temperaturbereiche leicht durch die Abstufungen einer bestimmten Farbe zu erkennen sind. Einige Kamerahersteller stellen weiterhin Bildmodi zur Verfügung, die für spezifische Situationen vorgesehen sind. So stattet die Firma FLIR Systems ihre Kameras der K-Serie beispielsweise mit einem Heat-Detection-Modus aus, bei dem das Wärmebild in Graustufen dargestellt wird, die höchsten 20 % der Temperaturen jedoch farblich hervorgehoben werden (vgl. FLIR Systems 2017, S. 32). Je nach Anwendungsfall sind noch weitere Kombinationen aus Graustufen- und Farbdarstellung möglich.

Vorteile und Grenzen der Thermografie

In Abhängigkeit vom Einsatzgebiet bieten Thermografiesysteme einerseits deutliche Vorteile gegenüber möglichen Alternativen, weisen andererseits aber ebenfalls Grenzen auf und sind somit nicht in jeder Situation zu bevorzugen. Um die Möglichkeiten und Limitierungen eines solchen Systems besser nachzuvollziehen zu können, werden im folgenden Abschnitt ausgewählte Beispiele angebracht. Dies soll lediglich einen Überblick verschaffen und einige für diese Arbeit relevante Aspekte beleuchten.

Im Gegensatz zu Verfahren, bei denen physischer Kontakt zur messenden Oberfläche erforderlich ist, bringt das kontaktlose Messen von Temperaturen mithilfe einer Wärmebildkamera wesentliche Vorteile mit sich. Befindet sich das Messobjekt beispielsweise in einem schwer zugänglichen oder gar gefährlichen Bereich, kann die Temperaturmessung mit einer Wärmebildkamera aus sicherer Entfernung vorgenommen werden. Ist das Objekt schnell bewegt, so ist eine Kontaktmessung in der Regel ebenfalls schwierig zu realisieren. Außerdem ist zu beachten, dass eine Störung der Oberflächentemperatur durch den Messfühler selbst auftreten kann, da er die Messstelle zusätzlich isolieren oder ihr die Wärme entziehen kann (vgl. Glückert 1992, S. 74). Das passive Messverfahren eines Thermografiesystem hingegen hat „praktisch keine Rückwirkung bei der Messung auf das Meßobjekt“ (ebd., S. 76). Obwohl Kontaktverfahren gemein als präziser gelten (vgl. Berg 2016, S. 16), bieten moderne Wärmebildkameras dennoch Genauigkeiten, die in vielen Anwendungsfällen keine Nachteile mit sich bringen. Insbesondere deshalb, weil oft keine absoluten Temperaturinformationen von Bedeutung sind, sondern lediglich die relativen Temperaturunterschiede in einem bestimmten Bereich (vgl. Glückert 1992, S. 104). Genauso diese Möglichkeit, Temperaturen über große Flächen hinweg zeitgleich messen und vergleichen zu können, stellt einen enormen Vorteil gegenüber Einzelmessverfahren dar. Bei diesen Methoden müssen entweder eine Reihe von Messungen vorgenommen werden oder mehrere Messfühler gleichzeitig zum Einsatz kommen, um einen direkten Vergleich von Temperaturen vorzunehmen. Insbesondere wenn durch Temperaturunterschiede identifizierbare Irregularitäten gefunden werden sollen, ist mit einer Wärmebildkamera eine schnelle erste Einschätzung möglich.

Des Weiteren bieten Wärmebildkameras in einigen Anwendungsgebieten deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Kameras. Aufgrund der Tatsache, dass die meisten Oberflächen den Großteil der Strahlung im LWIR-Bereich selbst emittieren, sind Wärmebildkameras unabhängig der vorhandenen Beleuchtung einsetzbar. Dies stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber im sichtbaren Spektrum arbeitenden Kameras dar, da Wärmebildkameras selbst bei schlechten Lichtverhältnissen oder gar kompletter Dunkelheit noch verwendbare Bilder liefern. Besonders wenn sich Objekte in ihrer Temperatur deutlich von

der Umgebung unterscheiden, lassen diese sich besonders effektiv mit Wärmebildkameras erkennen. Unterscheiden sich Objekte in ihrer Temperatur jedoch nur unwesentlich von ihrem Hintergrund, sind sie auf einem Wärmebild nur schwer auszumachen (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 30). Aufgrund der besonderen Eigenschaften der von Thermografiesystemen wahrgenommenen Strahlung ist es weiterhin möglich, Objekte selbst durch Rauch hindurch zu erkennen (vgl. Keller u. a. 2012, S. 3). Der Grund dafür ist, dass vor allem langwellige Infrarotstrahlung im Gegensatz zu Strahlung im sichtbarem Bereich deutlich weniger von den Rauchpartikeln reflektiert und absorbiert wird (vgl. FLIR Systems o.D.(c)). Dieser Effekt ist dabei stark von den Eigenschaften des Rauchs abhängig, so kann besonders starke Verrauchung (vgl. Keller u. a. 2012, S. 46) oder sehr heißer Rauch (vgl. Cha, Abbott und Reynolds 2015) die Durchdringung mindern.

Anzumerken ist weiterhin, dass Wärmebildkameras in der Regel Bilder mit geringem Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) produzieren, wodurch selbige oft sehr verrauscht erscheinen (vgl. Minh u. a. 2017, S. 4). Hierbei ist zwischen zufälligem Rauschen und Rauschen mit festem Störmuster (FPN⁶) zu unterscheiden. Letzteres kommt aufgrund minimaler Schwankungen der elektrischen und thermischen Eigenschaften der einzelnen Sensorelemente zustande und wird mittels Kalibrierung des Sensors in Form von Non-Uniformity Correction (NUC) ausgeglichen (vgl. Çalik u. a. 2017, S. 219). Eine Kalibrierung erfolgt in vielen Fällen bereits während der Herstellung der Kamera, indem die Unterschiede der einzelnen Elemente gemessen und die für den Ausgleich benötigten Werte in einer Tabelle in der Kamera hinterlegt werden (vgl. ebd., S. 220). Da die Unterschiede abhängig von der Eigentemperatur des Systems sind, werden in manchen Kameras mehrere dieser Tabellen angelegt und je nach Temperatur für die Korrektur ausgewählt (vgl. FLIR Systems o.D.(b)). Um Temperaturdrifts und damit verbundene Temperaturabweichungen zu vermeiden, können NUCs ebenso während des Betriebs von Wärmebildkameras durchgeführt werden (vgl. InfraTec GmbH 2008, S. 97).

⁶Abkürzung aus dem Englischen für *Fixed Pattern Noise*.

2.3 Digitale Bildverarbeitung

Wenn von digitalen Bildern gesprochen wird, ist fast immer von Pixel- oder Rastergrafiken⁷ die Rede. Diese Grafiken bestehen aus vielen regelmäßig und meist rechteckig⁸ angeordneten Elementen, die als Pixel bezeichnet werden. Der Wortursprung dieses Begriffs liegt im Englischen und lässt sich aus den Worten *picture* und *element* ableiten (vgl. Dudenredaktion 2019(b)). Jedes Pixel repräsentiert dabei jeweils einen diskreten, meist ganzzahligen Wert. Ein digitales Bild kann aus diesem Grund ebenso als zweidimensionale regelmäßige Matrix von Zahlen gesehen werden.

Die Größe eines Bildes wird durch die Anzahl seiner Zeilen und Spalten beziehungsweise der Breite und Höhe in Pixeln bestimmt. Eine Angabe erfolgt meist in der Form von *Breite x Höhe*, wobei die Angabe der Breite üblicherweise zuerst erfolgt. Oft findet ebenfalls der Begriff Auflösung oder Bildauflösung bei der Angabe der Größe eines Bildes Anwendung, wobei die Verwendung in diesem Zusammenhang technisch nicht korrekt ist, da die Auflösung eines Bildes die Anzahl der Bildelemente pro Längeneinheit angibt (vgl. Burger und Burge 2006, S.11; vgl. Adobe Systems 2019(b); vgl. Wagner 2019). In vielen Bildverarbeitungsschritten ist die Auflösung eines Bildes jedoch unwesentlich (vgl. Burger und Burge 2006, S.11), weshalb in dieser Arbeit nicht weiter darauf Bezug genommen wird.

Um verschiedene Elemente im Bild identifizieren zu können, muss ein Koordinatensystem eingeführt werden. In der Bildverarbeitung ist es dabei üblich, dass sich der Koordinatenursprung in der linken oberen Ecke des Bildes befindet und demzufolge eine Nummerierung der Zeilen von oben nach unten und der Spalten von links nach rechts erfolgt (vgl. ebd.). Die Zählung beginnt dabei, wie in der Informatik gebräuchlich, beim Wert 0.

Je nachdem wie die Werte aufgenommen und vom zur Anzeige vorgesehenen System interpretiert werden, können die Pixel verschiedene Farb- oder Grauwerte sowie andere Daten wie beispielsweise Temperaturen oder Tiefeninformationen repräsentieren. Ein jedes Pixel enthält dabei eine binäre Zahl der Länge k , womit 2^k verschiedene Werte dargestellt werden können. Die Länge dieser Zahl, das heißt die Anzahl der zur Verfügung stehenden Bits, wird häufig als Bittiefe oder Farbtiefe eines Bildes bezeichnet (vgl. Adobe Systems 2019(a)).

Ein einzelnes Pixel kann darüber hinaus mehrere Werte gleichzeitig repräsentieren, indem

⁷Wenngleich es weitere Typen und Repräsentationen von digitalen Bildern, wie beispielsweise Vektorgrafiken, gibt, richtet sich der Fokus der vorliegenden Arbeit ausschließlich auf die hier beschriebenen Rastergrafiken.

⁸Die Anordnung resultiert aus der räumlichen Abtastung durch die Geometrie des Bildsensors einer Kamera. Für bestimmte Anwendungen existieren ebenfalls Sensoren mit hexagonalen Elementen oder ringförmigen Konfigurationen. (vgl. Burger und Burge 2006, S. 9)

die binäre Zahl in mehrere Teilzahlen zerlegt wird. In diesem Fall findet der Begriff Mehrkanal-Bild Anwendung. Ein Farbbild wird beispielsweise häufig mit jeweils einer Komponente für die Farben Rot, Grün und Blau kodiert (vgl. Burger und Burge 2006, S. 13). Im Fall einer Farbtiefe von 24 Bit stehen im genannten Beispiel jeweils 8 Bit pro Farbe zur Verfügung. Daneben existieren weiterhin Mehrkanal-Bilder bei denen die einzelnen Komponenten in getrennten Arrays von identischer Größe vorliegen, wodurch das Bild als Kombination mehrerer Teilbilder gesehen werden kann (vgl. ebd., S. 236).

Neben den unterschiedlichen Repräsentationsformen digitaler Bildern stehen darüber hinaus eine Vielzahl an Verfahren zur Be- und Verarbeitung zur Verfügung. Eine grobe Unterscheidung erfolgt durch die Unterteilung in Punktoperationen, Filter und geometrische Operationen, welche in den folgenden Unterabschnitten näher erläutert werden sollen.

2.3.1 Punktoperationen

Werden Operationen auf einzelnen Bildelementen angewandt, die keine Änderung an Bildgröße, Geometrie oder Bildstruktur zur Folge haben, so werden diese als Punktoperationen bezeichnet (vgl. Burger und Burge 2006, S. 55). Das bedeutet, dass das Ergebnis der Operation ausschließlich von dem Wert und den Eigenschaften des entsprechenden Pixels abhängig ist und andere Bildelemente keinen Einfluss darauf haben. Es lässt sich weiterhin unterscheiden, ob es sich um homogene oder um inhomogene Punktoperationen handelt. Während erstere unabhängig von der Position des betreffenden Pixels sind, beziehen inhomogene Punktoperationen neben seinem Wert ebenfalls die Koordinaten eines Bildelements mit ein (vgl. Ries 2010, S.5ff.).

Typische Beispiele für homogene Punktoperationen sind Änderung des Kontrastes eines Bildes durch die Multiplikation aller Intensitätswerte mit einem konstanten Faktor oder die Anpassung der Helligkeit durch Addition oder Subtraktion eines konstanten Wertes. Die Anwendung von Punktoperationen wird häufig unter Verwendung von Look-Up-Tables (LUT) durchgeführt (vgl. Ries 2010, S.5). Für eine LUT wird das Ergebnis der Punktoperation für jeden möglichen Pixelwert berechnet und jeweils ein Eintrag in der Tabelle angelegt. Um die Operation anschließend auf einem Pixel im Bild durchzuführen, muss lediglich der betreffende Wert in der Tabelle nachgeschlagen werden. Besonders bei komplexeren Berechnungen, bei denen die Gesamtanzahl an Pixeln die Anzahl an möglichen Intensitätswerten bei Weitem übersteigt, ist ein deutlich geringerer Zeitaufwand nötig um die Operation auf dem gesamten Bild durchzuführen (vgl. Burger und Burge 2006, S. 82).

Bei allen Bildoperationen gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass die neu berechneten Werte außerhalb des vom Bild vorgegebenen Wertebereiches liegen können. Ist dies der Fall, müssen alle Werte, die den Wertebereich über- oder unterschreiten, jeweils auf den maximalen beziehungsweise minimalen Wert begrenzt werden (vgl. Burger und Burge 2006, S. 56).

2.3.2 Filter

Zwar ähneln Filter den Punktoperationen in der Hinsicht, dass sie ebenfalls keine Änderungen an der Geometrie des Bildes zum Ergebnis haben, jedoch werden sie nicht ausschließlich aus dem ursprünglichen Wert des zu bestimmenden Pixels berechnet, sondern aus einer Anzahl von Pixeln innerhalb einer definierten Region (vgl. ebd., S. 89f). Die Positionen der für die Berechnung zu berücksichtigenden Pixel sind in Bezug zur Lage des Ziel-Pixels fest und „bilden üblicherweise eine zusammenhängende Region“ (ebd., S. 90). Die Filterregion muss dabei nicht zwingend zusammenhängend sein, in bestimmten Fällen wird selbst der Wert des ursprünglichen Pixels unberücksichtigt gelassen (vgl. ebd., S. 91). Die Größe der Filterregion sowie die Gewichtung der einzelnen Pixel sind dabei die Parameter, die Stärke und Art des Filters festlegen. „Filterfunktion[en] w[erden] als Maske geschrieben“ (Steinbrecher 1993, S. 145f.) und nehmen, neben der meist verwendeten quadratischen Gestalt, ebenso kreuzförmige oder näherungsweise kreisförmige Formen an (vgl. ebd.). Tatsächlich ist eine „scheibenförmige Region für Glättungsfilter besser geeignet, um in alle Bildrichtungen gleichförmig zu wirken und eine Bevorzugung bestimmter Orientierungen zu vermeiden“ (Burger und Burge 2006, S. 91).

Bei der Berechnung eines Pixels am Rand des Bildes befindet sich im Allgemeinen mindestens einer der Filterkoeffizienten außerhalb des Bildbereiches. In diesem Fall kann kein eindeutiges Ergebnis berechnet werden. Nach Burger und Burge (2006) und Steinbrecher (1993) finden folgende Methoden für die Behandlung der Randbereiche Anwendung:

1. Konstanten Wert für Ergebnisse im Randbereich verwenden
2. Ursprüngliche Pixelwerte im Randbereich beibehalten
3. Randbereiche unter einer der folgenden Annahmen berechnen:
 - a) Pixel außerhalb des Bildes besitzen konstanten, festgelegten Wert
 - b) Randpixel setzen sich außerhalb des Bildes fort
 - c) Bild wird in allen Richtungen zyklisch fortgesetzt
 - d) Bild wird an allen Rändern und Ecken gespiegelt

- e) Bild wird an den Randpixeln gespiegelt

Burger und Burge (2006) geben an, dass Methode (3b) aufgrund der relativ geringen Verfälschungen zu bevorzugen ist.

Filter lassen sich weiterhin in lineare und nichtlineare Filter unterteilen. Die Unterteilung erfolgt dabei anhand der „Form, in der die Pixelwerte innerhalb der Filterregion verknüpft werden: entweder durch einen linearen oder durch einen nichtlinearen Ausdruck.“ (Burger und Burge 2006, S. 91).

2.3.3 Geometrische Operationen

Erfolgt eine Änderung der Position eines Bildpunktes innerhalb des Bildes anhand einer bestimmten Vorschrift, wird dies als geometrische Operation bezeichnet (vgl. Burger und Burge 2006, S. 363; vgl. Ries 2010, S.5). Neben Rotation, Translation und Skalierung als einfache Beispiele dieser Operationen, sind darüber hinaus komplexere Verfahren möglich, um beispielsweise eine Objektivverzerrung⁹ im Bild auszugleichen. In den seltensten Fällen können aber alle diskreten Koordinaten eines Ursprungsbildes wieder auf diskrete ganzzahlige Koordinaten im Zielbild abgebildet werden. So kann die neu berechnete Position eines Pixels aus reellen Koordinaten bestehen und damit zwischen das Gitter des Zielbildes fallen, oder mehrere Elemente des Ursprungsbildes auf die selbe Position im Zielbild abgebildet werden. Um wieder diskrete eindeutige Position zu ermitteln, muss eine Interpolation erfolgen (vgl. Burger und Burge 2006, S. 377ff.). Allgemein ausgedrückt werden dabei Bildwerte für beliebige reelle Koordinaten, die sich zwischen den ganzzahligen diskreten Bildpunkten befinden, geschätzt. Hierfür stehen mehrere Interpolationsverfahren zur Verfügung, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht näher thematisiert werden.

⁹Objektivverzerrungen sind Objektivfehler, bei denen gerade Linien im Bild in Richtung der Bildkanten nach innen oder nach außen gebogen werden (vgl. Adobe Systems 2019(c)).

3 Kapitel 3 **Problemdefinition**

Nach dem auszughaften Einblick in die Grundlagen der Thermografie und Bildverarbeitung in Kapitel 2 schließt im Folgenden die Darlegung des für diese Arbeit gewählten Szenarios der Brandbekämpfung an. Anhand des Einsatzszenarios werden die dabei von der Feuerwehr zu bewältigende Probleme identifiziert und betrachtet in welchem Umfang Wärmebildkameras zur Lösung ebenjener beitragen können. Zusätzlich wird der aktuelle Stand der Technik anhand ausgewählter Systeme betrachtet und bewertet.

3.1 Einsatzszenario

Laut den Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten vom AGBF Bund im Deutschen Städtetag, gilt das standardisierte dimensionierende Schadensereignis Brand als das Szenario, welches regelmäßig die größten Personenschäden fordert. Speziell wird an dieser Stelle auf den Wohnungsbrand im Obergeschoß eines mehrgeschossigen Gebäudes Bezug genommen, welcher als kritischer Wohnungsbrand bezeichnet wird. Neben dem sich ausbreitenden Feuer und entstehenden Rauch in der betroffenen Wohneinheit kommt es hierbei ebenfalls zum Rauch eintritt im Treppenhaus. Als zeitkritische Aufgabe gilt es, Personen aus der betroffenen Wohnung sowie den angrenzenden Wohnungen über Leitern und Treppenhaus zu retten. Zusätzlich müssen eine Brandausbreitung verhindert und der Brand gelöscht werden. (vgl. AGBF bund 2015, S. 1f.)

3.2 Eingrenzung der Probleme

Im Folgenden sollen nun die sich aus dem Einsatzszenario ergebenden Probleme betrachtet werden, bei deren Bewältigung Wärmebildkamerasysteme unterstützend eingesetzt werden können. Bei einer Auswertung von 940 Einsatzberichten der Feuerwehren Westfalen durch die westfälische Provinzial Schadensverhütung konnten die in Abbildung 3.1 gezeigten Gründe für den Einsatz von Wärmebildkameras festgestellt werden. Obgleich ein Einsatz in vielen Tätigkeitsbereichen der Feuerwehr hilfreich ist, liegt der Fokus dieser Arbeit ausschließlich auf dem Einsatz von Wärmebildkameras im Brandfall.

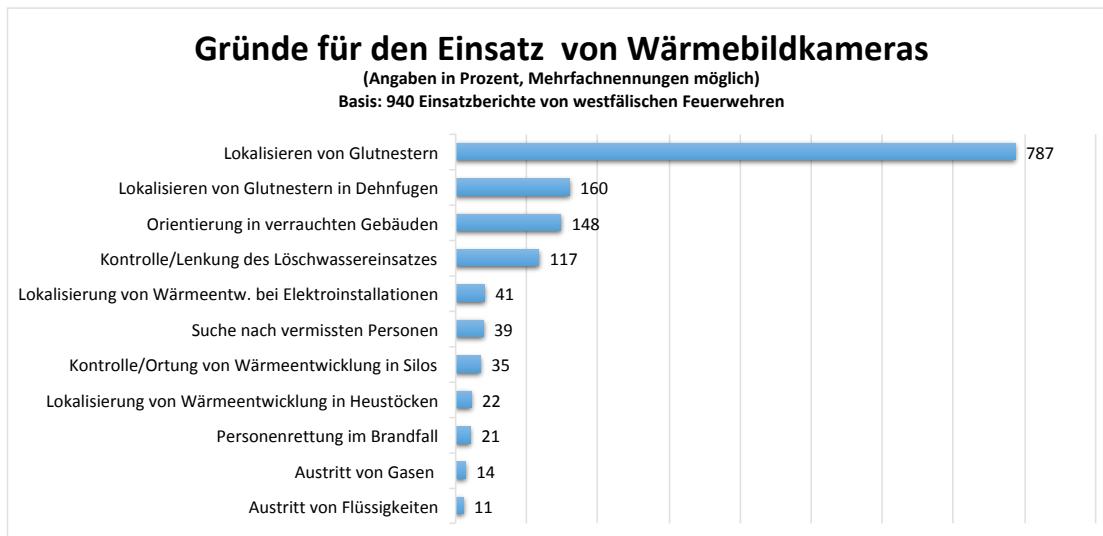


Abbildung 3.1: Gründe für den Einsatz von Wärmebildkameras (Eigene Darstellung, in Anlehnung an: Keller u. a. o.D.)

Navigation im Rauch

Da das gewählte Szenario kritischer Wohnungsbrand mit Raucheintritt im Treppenhaus einhergeht (vgl. Abschnitt 3.1), wird den Einsatzkräften die Navigation im betroffenen Gebäude erheblich erschwert. Im Gegensatz zum sichtbaren Licht wird Infrarotstrahlung deutlich weniger von den Festpartikeln im Rauch reflektiert (vgl. Abschnitt 2.2). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass unter Zuhilfenahme einer Infrarotkamera deutlich mehr Informationen über die Beschaffenheit des Raumes gewonnen werden können. Ein zu beachtender Nachteil ist jedoch, dass die Kamera lediglich eine zweidimensionale Darstellung der Wärmestrahlung von Objekten in der Umgebung ermöglicht (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 29), sodass immer eine korrekte Interpretation durch die Einsatzkräfte erfolgen muss.

Lageeinschätzung und Lokalisierung der betroffenen Wohneinheit

Auch wenn das vom Brand betroffene Gebäude in der Regel ohne Umstände von außen zu identifizieren ist, so kann eine genaue Lokalisierung und Einschätzung der Ausbreitung des Brandes durch Brandrauch und Lichtquellen erschwert werden. Der Einsatzleiter kann in diesem Fall eine Wärmebildkamera für die Lagebeurteilung einsetzen, da heiße Quellen deutlich hervorgehoben werden und etwaige Erwärmungen am Gebäude schon von außen sichtbar sein können. (vgl. Keller u. a. 2012, S. 34)

Insofern der Zugang zum Gebäude über das Treppenhaus erfolgt, gilt es die betroffene Wohneinheit im Inneren zu lokalisieren und zu identifizieren. Da in den vom Brand betroffenen Bereichen in der Regel deutlich höhere Temperaturen herrschen, lassen sich die in Frage kommenden Räumlichkeiten oft bereits an erwärmten Türen erkennen. Unter anderem wird hierbei der sogenannte Türcheck eingesetzt, indem eine der Einsatzkräfte ihren Schutzhandschuh ablegt und die Tür auf Erwärmung prüft. Die Zuhilfenahme einer Wärmebildkamera kann in dieser Situation bereits zu einem deutlichen Zeitgewinn führen, da die gesamte Tür aus sicherer Entfernung auf erwärmte Bereiche untersucht werden kann und keine Schutzausrüstung abgelegt werden muss. Außerdem kommt es so zu weniger Fehlinterpretationen, wie zum Beispiel stark erwärmte Umgebungsluft. (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 30f.)

Auffinden von zu rettenden Personen

Aufgrund der Tatsache, dass Personen- und Sachschäden mit zunehmender Einsatzdauer exponentiell zunehmen, ist die Menschenrettung als zeitkritische Aufgabe eines Feuerwehreinsatzes einzustufen (vgl. AGBF bund 2015, S. 2). Neben der „Möglichkeit, deutlich mehr Räume in gleicher Zeit abzusuchen, als dies ohne die technischen Möglichkeiten einer Wärmebildkamera gegeben wäre“ (Linde und Dittrich 2013, S. 37), kann weiterhin die „Wärmesignatur eines Menschen [...] sichtbar gemacht werden“ (ebd., S. 37f). Ermöglicht wird dies durch die Tatsache, dass der Mensch als Warmblüter im gesunden Zustand eine konstante Körpertemperatur von etwa 37° C besitzt und sich in seiner Temperatur von der Umgebung abhebt (vgl. ebd.). Zu beachten ist jedoch, dass diese Wärmestrahlung leicht von einem Hindernis, welches sich zwischen Kamera und Person befindet, verdeckt werden kann. Deshalb kann nicht zwangsläufig darauf geschlossen werden, dass sich keine Person im betroffenen Raum befindet, sobald keine von einem Menschen ausgehende Wärmestrahlung in der Kamera auszumachen ist (vgl. ebd., S. 38).

Geht ein Trupp während des Einsatzes verloren oder sendet einen Notruf aus, ist es notwendig, dass ein weiterer Trupp zur Rettung in das Gebäude geschickt wird. In

diesem Fall kann der Schlauchleitung des zu rettenden Trupps gefolgt werden um diesen aufzufinden (vgl. Keller u. a. 2012, S. 47). Ist das Gebäude jedoch weiterhin stark verraucht, wird die Verfolgung des Schlauchs deutlich erschwert. In diesem Fall kann die Verwendung einer Wärmebildkamera Vorteile mit sich bringen, da die Leitung mit kaltem Wasser im Schlauch deutlich auf dem Bild zu erkennen ist (vgl. ebd.). Befindet sich der vermisste Trupp jedoch nicht in der Nähe der Schlauchleitung oder ist aufgrund eines versperrten Wegs eine alternative Route zu wählen, muss die Suche auf herkömmlichen Wege fortgesetzt werden. Die Wärmebildkamera kann in einem solchen Fall weiterhin unterstützend eingesetzt werden. Anders als bei Personen in Alltagskleidung, erschwert die isolierende Bekleidung von Atemschutztrupps eine Identifizierung der Körpertemperatur im Wärmebild (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 40). Insofern eine freie Sicht auf die Pressluftflasche des Atemschutzgeräts besteht, lässt sich dessen Träger jedoch gut im Wärmebild erkennen (vgl. ebd., S. 40; vgl. Keller u. a. 2012, S. 48), da sich die Flasche „[a]ufgrund der Expansionskälte [...] im Einsatz verhältnismäßig stark abgekühlt“ (Linde und Dittrich 2013, S. 40).

Lokalisieren von Brandherden

Genau wie dichter Rauch die Navigation durch das Gebäude und das Auffinden von Personen erschwert, kann dieser ebenfalls das Finden und Löschen von Brandherden beeinträchtigen. Besonders wenn sich ein Brand in Zwischendecken oder Isolierungen von Hohlwänden ausgebreitet hat, kann sich diese Aufgabe als äußerst diffizil herausstellen (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 31). Mithilfe einer Wärmebildkamera kann ein Brandherd oft schon beim Betreten eines Raumes identifiziert werden, wodurch es nur noch in Einzelfällen erforderlich ist, Wände und Decken zu Kontrollzwecken zu öffnen (vgl. ebd., S. 32).

Selbst wenn ein Bereich im Bild der Kamera wärmer erscheint und deutlich hervorgehoben wird, muss es sich nicht zwangsläufig um einen Brand handeln. Speziell bei dynamischen Farbmodi, bei denen die heißesten Bereiche im Bild farblich hervorgehoben werden oder sich der Kontrast automatisch anpasst, kann es zu Fehlinterpretationen kommen (vgl. Keller u. a. 2012, S. 41f.). Um Glimm- und Schwelbrände oder Brände in der Entstehungsphase zu erkennen, hilft oft ein Temperaturvergleich mit einem anderen Bereich im Raum (vgl. ebd., S. 41). Mit der Wärmebildkamera kann ein beliebiger Referenzpunkt im Raum gemessen und dann mit der Temperatur des potenziellen Brandherdes verglichen werden. Ist eine deutliche Temperaturdifferenz zu erkennen, handelt es sich wahrscheinlich um einen Brandherd (vgl. ebd.).

Überprüfung der Wirksamkeit der Löschmaßnahmen

Neben der zunächst durchgeführten Identifikation der Brandherde ist die Beurteilung der Wirksamkeit von Löschmaßnahmen in einer verrauchten Umgebung ebenfalls deutlich erschwert. Mithilfe einer Wärmebildkamera kann überprüft werden, ob Löschmaßnahmen Erfolg tragen und ob eine Brandausdehnung stattfindet (vgl. Keller u. a. 2012, S. 35). Wenn der „Truppführer die Wärmebildkamera und der Truppmann das Strahlrohr führt“, hat „[d]er Truppführer [...] die Möglichkeit, dem Truppmann genaue Anweisungen zu geben, wie die Brandbekämpfung durchgeführt werden soll“ (ebd., S. 43). Da die Temperatur des Löschwassers in der Regel deutlich niedriger als die Umgebungstemperatur ist, hebt sich der Löschwasserstrahl klar im Bild der Wärmebildkamera ab, wodurch die Effektivität eines Löschangriffs überprüft und gegebenenfalls Änderungen vorgenommen werden können (vgl. Keller u. a. 2012, S. 43).

Wärmebildkameras finden darüber hinaus „zur Kontrolle bei der Restablösung“ (Anh. B, S. 100) Verwendung. Gerade beim Aufsuchen von noch vorhandenen Glutnestern unterstützt eine Wärmebildkamera die Einsatzkräfte erheblich, da die Temperaturunterschiede selbiger durch die Kamera sichtbar gemacht werden können. Tatsächlich ist das Aufspüren von Glutnestern einer der häufigsten Gründe für den Einsatz von Wärmebildkameras (vgl. Abb. 3.1). Die Gefahr von Glutnestern liegt darin, dass sie den Brand selbst Stunden später erneut entfachen können (vgl. Kinast 2010).

Punktuelle Messung von Temperaturen

Wenngleich bei der Interpretation eines Wärmebildes oft die Information genügt, dass sich ein bestimmter Bereich in seiner Temperatur deutlich von seiner Umgebung unterscheidet (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 30), kann unter Umständen die genaue Temperaturmessung eines bestimmten Punktes im Bild hilfreich sein (vgl. Anh. B, S. 105; vgl. Keller u. a. 2012, S. 41). Hierfür verfügen viele Wärmebildkameras über eine Funktion zur Spotmessung, bei der die konkrete Temperatur eines bestimmten Punktes im Bild zusätzlich als Zahlenwert angezeigt wird. Bei einer oft verwendete Variante dieser Funktion befindet sich eine Markierung in Form eines Fadenkreuzes¹ in der Mitte des Displays beziehungsweise Bildes, mit dem der Bedienende einen bestimmten Bereich anvisieren kann und die gemessene Temperatur angezeigt bekommt. Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist hierbei jedoch immer zu beachten, dass der gemessene Temperaturwert nur dann korrekt ist, wenn der Emissionsgrad des zu messenden Materials bekannt ist

¹Fadenkreuz bezeichnet eine „an der Linse von optischen Geräten angebrachte Markierung in Form zweier senkrecht aufeinanderstehender Fäden oder eingeätzter dünner Striche zum genauen Visieren“ (vgl. Dudenredaktion 2019(a)).

und richtig eingestellt wurde. Da eine Einstellung des Emissionsgrads „mit Geräten für die Feuerwehr üblicherweise nicht möglich [ist]“ (Keller u. a. 2012, S. 15), ist eine genaue Messung nur bei Objekten mit einem Emissionsgrad nahe dem voreingestelltem Wert der Kamera sinnvoll.

Rückweg

Eine etablierte Möglichkeit zur Sicherung des Rückwegs im Feuerwehreinsatz stellt die Markierung durch Leinen- und Schlauchsicherung dar (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 29). Durch den zusätzlichen Einsatz einer Wärmebildkamera kann, ähnlich der Suche nach einem verunglücktem Trupp, die gefüllte Schlauchleitung schneller verfolgt werden, da der Schlauch durch das kalte Wasser deutlich im Bild zu erkennen ist und die Einsatzkräfte sich nicht ausschließlich auf ihren Tastsinn verlassen müssen (vgl. Keller u. a. 2012, S. 25). Wird der markierte Weg jedoch durch Hindernisse wie brennende Objekte und einstürzende Gebäudeteile versperrt oder ist der Hinweg aus anderen Gründen nicht mehr als Rückweg zulässig, muss ein anderer Wege aus dem Gebäude gewählt werden. Kam die Wärmebildkamera bereits bei der Erkundung der Räume zum Einsatz, können die dabei bereits entdeckten Öffnungen und Durchgänge als mögliche Fluchtwege genutzt werden (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 36). Selbst ohne vorher bekannte Fluchtwege ist der Ausgang mit einer Wärmebildkamera deutlich schneller zu finden (vgl. Keller u. a. 2012, S. 25), wenngleich bei diesem Vorgehen nicht außer Acht gelassen werden darf, dass technische Geräte als Rückwegsicherung gewisse Grenzen aufweisen. Die Geräte sind im Einsatz erheblichen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt, sodass „bei Ausfall der Technik ein sicherer Rückweg aus dem verrauchten Einsatzgebiet mehr als infrage gestellt“ wird, falls „eine Wärmebildkamera als Ersatz für die [übliche] Rückwegsicherung“ eingesetzt wird (Linde und Dittrich 2013, S. 29).

Interaktion mit einem Wärmebildkamerasystem

Die Brandbekämpfung stellt für die Einsatzkräfte eine hohe physische und psychische Belastung dar (vgl. Finteis u. a. 2002, S. 1), bei der nur wenige Sekunden über den Erfolg oder Misserfolg des Einsatzes entscheiden können. Besonders durch den stetig wachsenden Funktionsumfang von Wärmebildkameras muss stets gewährleistet sein, dass die Bedienung eines solchen Gerätes intuitiv und nicht zu komplex ist. Dies ist vor allem deshalb von Bedeutung, da der „richtige technische und taktische Einsatz einer Wärmebildkamera so gut wie nicht gelehrt [wird]“ (Linde und Dittrich 2013, S. 6). Im durchgeföhrten Interview vom 27.05.2019 wurde ebenfalls bestätigt, dass der Umgang

mit Wärmebildkameras kein Ausbildungsbestandteil ist und nur eine geringe Priorität in der Grundausbildung aufweist. (vgl. Anh. B, S. 97).

Da „ein Trupp unter Einsatzbedingungen auch nur eine bestimmte Informationsmenge sinnvoll verarbeiten [kann]“ (Linde und Dittrich 2013, S. 23), gilt es die Informationsausgabe eines solchen Systems auf das Wesentliche zu reduzieren, um den Benutzer nicht durch für ihn unwichtige oder überflüssige Informationen abzulenken.

3.3 Stand der Technik

Durch den Zugriff auf fortwährend steigende Rechenleistung in permanent kompakter werdenden Geräten wurden gerade in den letzten Jahren maßgebliche Fortschritte in der Wärmebildkameratechnik erzielt. Dies gilt gleichermaßen für hardwarebedingte Innovationen sowie softwaregestützte Konzepte.

In den meisten Kameras sind bereits eine Vielzahl von Funktionen integriert, welche den Benutzer situationsabhängig unterstützen können. Speziell in den für den Feuerwehreinsatz vorgesehenen Kameras haben sich eine Reihe an Optionen etabliert, die herstellerunabhängig Verwendung finden. Für eine erleichterte Bedienung werden diese Funktionen häufig in diversen Kamera-Modi zusammengefasst, welche an bestimmte Gegebenheiten angepasst sind (vgl. FLIR Systems 2017, S. 21f.).

Als Beispiel ist die Verwendung von situationsabhängigen Farbpaletten zu nennen, mit denen eine Hervorhebung von verschiedenen Temperaturbereichen erfolgen kann. Während sich bei der Farbwahl der Übergang von Graustufen über Gelb- und Orange- zu Rottönen etabliert hat, variieren die Temperaturen ab denen ein Farbwechsel erfolgt je nach Hersteller (vgl. Keller u. a. 2012, S. 40). Die Verwendung verschiedener Farbverläufe zur Unterteilung des gesamten aufgenommenen Temperaturumfangs ermöglicht einen deutlich höheren Kontrast innerhalb der einzelnen Bereiche. Grund hierfür ist die Darstellung der Temperaturen durch ein größeres Farbspektrum als dies beispielsweise bei einer vollständigen Graustufendarstellung der Fall wäre.

Neben den bei vielen Herstellern Anwendung findenden etablierten Funktionen, existieren speziell für den Feuerwehreinsatz entwickelte Systeme, die sowohl software- sowie hardwarebedingte Besonderheiten aufweisen. Im Rahmen der Recherche dieser Arbeit zeigten speziell drei Systeme relevante Entwicklungen und neue Konzepte bei der Verwendung von Wärmebildkameras in der Brandbekämpfung. Im Folgenden werden diese in Hinblick auf ihre technischen Besonderheiten skizziert und einer Wertung unterzogen.

FLIR Flexible Scene Enhancement

Die Firma FLIR Systems stattet ihre Wärmebildkameras der K-Serie mit einem nichtlinearen Bildverarbeitungsalgorithmus aus, der ein detaillierteres Bild liefert und somit dafür sorgt, dass Objekte mit geringerem Kontrast im Bild deutlicher zu erkennen sind (vgl. FLIR Systems o.D.(a)). Beim Flexible Scene Enhancement (FSX) werden nach eigenen Angaben Bildmerkmale wie Kanten und Ecken extrahiert, verstärkt und anschließend wieder im ursprünglichen Wärmebild integriert (vgl. ebd.). Beim Betrachten des verarbeiteten

Wärmebildes in Abbildung 3.2b lässt sich die Struktur der Decke des Raumes deutlich erkennen, während dies beim Wärmebild ohne FSX in Abbildung 3.2a nicht der Fall ist. Besonders in Situationen bei denen ein sehr großer Temperaturumfang in der Kamera dargestellt werden soll, ist eine derartige Hervorhebung von Bildmerkmalen als förderlich einzuschätzen, da Details mit geringen Temperaturunterschieden, die anderenfalls nahezu identische Farb- oder Grauwerte aufweisen, weiterhin wahrgenommen werden können.

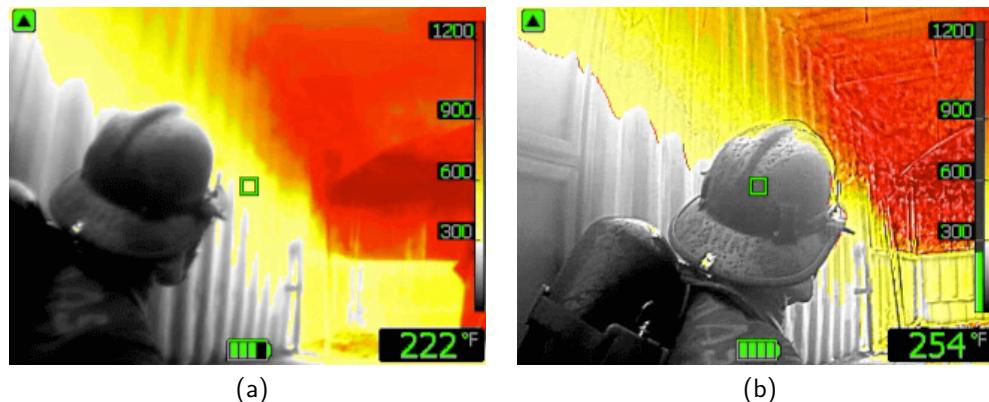


Abbildung 3.2: Vergleich zwischen Wärmebildern (a) mit FSX und (b) ohne FSX (FLIR Systems o.D.(a))

Bei einer Sichtung der technischen Ausstattung der Feuer- und Rettungswache Dresden Altstadt am 27.05.2019 konnte eine mit dieser Technologie ausgestattete Kamera begutachtet werden. Wenngleich die Kamera bei geringeren Temperaturen als im Brandfall erprobt wurde, war dennoch feststellbar, dass aus einem Bild mit eingeschaltetem FSX detailliertere Informationen über die aufgenommene Szene gewonnen werden können. Sehr feine Strukturen, wie beispielsweise die Oberfläche von rauem Asphalt, die andernfalls nicht in der Wärmekamera sichtbar sind, waren damit deutlich im Bild zu erkennen. Obgleich keinerlei Informationen zu verwendeten Algorithmen bekannt sind, lässt sich anhand dieses Systems das Potenzial von mit Bildverarbeitung unterstützten Wärmebildkameras erkennen.

Scott Safety Scott Sight

Im Jahr 2016 stellte die Firma Scott Safety ihr Produkt Scott Sight vor (vgl. Graves 2017). Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus einer an der Atemschutzmaske befestigten Wärmebildkamera und einem im Inneren der Maske angebrachtem Display. Der offensichtliche Vorteil gegenüber herkömmlichen Handkameras ist die freihändige Bedienung. Der Benutzer kann somit alle Tätigkeiten durchführen, ohne auf das Bild

3 Problemdefinition

einer Wärmebildkamera zu verzichten. Bei sehr starker Verrauchung kann es weiterhin vorkommen, dass auf dem Display einer herkömmlichen Wärmebildkamera selbst auf kurzer Entfernung wenig zu erkennen ist, dieser Fall kann bei Scott Sight aufgrund des in der Maske befindlichen Displays nicht eintreten. Gleichermaßen ist der schnelle Zugriff auf ein benötigtes Wärmebild als vorteilhaft zu erachten, da anstelle des Griffes zur Handkamera ein einfacher Blick in den unteren Bereich der Maske genügt.

Neben der speziell dafür vorgesehenen Atemschutzmaske besteht das System grundlegend aus den zwei in Abbildung 3.3 gezeigten Modulen. Im Einzelnen sind dies eine Kamera, die außen an der Atemschutzmaske befestigt wird, sowie ein Display-Modul im Inneren der Maske. Da zwischen den beiden Modulen keine physische Verbindung besteht, erfolgt die Kommunikation kabellos über Bluetooth. Abgesehen von den hardwarebedingten Unterschieden, orientiert sich die Funktionsweise von Scott Sight an herkömmlichen Handkameras. Neben der Darstellung des Wärmebilds in Graustufen erfolgt eine Hervorhebung der höchsten Temperaturen in der Farbe Rot. Zusätzlich befindet sich ein Fadenkreuz in der Mitte des Bildes zur Markierung des Bereiches für Temperaturmessungen, wobei der gemessene Wert auf der rechten Seite des Displays angezeigt wird. (vgl. Scott Safety 2017, S. 18ff.)



Abbildung 3.3: Module des Wärmebildkamerasytems Scott Sight (Kelsey 2016)

Bei neueren Modellen des Systems können zusätzlich der heißeste und der kälteste Bereich im Bild markiert und deren Temperatur ausgelesen werden (vgl. Scott Safety 2019). Über eine mobile Anwendung lässt sich weiterhin die Anzeige des Systems individuell anpassen und so beispielsweise Helligkeit des Displays oder verwendete Farbpaletten verändern (vgl. ebd.).

Zusammenfassend bringt Scott Sight vorrangig hardwarebedingte Vorteile, ist in seiner Funktionsweise aber mit herkömmlichen Wärmebildkameras vergleichbar. In einer durch-

geführten Übung gelang es einem mit Scott Sight ausgestatteten Team mehrere Brände fast acht Minuten schneller zu löschen als dies ein Team ohne ein vergleichbares System bewältigen konnte (vgl. Graves 2017). Hierbei ist jedoch anzumerken, dass das zweite Team keinerlei Wärmebildkamera zur Verfügung hatte. Wenngleich anzunehmen ist, dass das vorgestellte System deutliche Vorteile gegenüber herkömmlicher Wärmebildkameras bietet, liegen momentan keinerlei Daten vor, welche einen direkten Vergleich in einem ähnlichen Szenario gewährleisten.

Qwake Technologies C-Thru

Während das von Qwake Technologies entwickelte System ebenfalls eine am Helm befestigte Wärmebildkamera verwendet, so ist die Darstellung der aus der Kamera gewonnenen Informationen grundverschieden. Anstelle eines Displays, welches das Wärmebild im unteren Bereich der Maske anzeigt, kommen bei C-Thru halbtransparente Displays zum Einsatz, welche sich direkt im Blickfeld des Benutzers befinden. Damit ist es möglich, Informationen anzuzeigen, ohne dass der Benutzer seinen Blick und seine Aufmerksamkeit vom äußeren Geschehen abwenden muss (vgl. Fenwick 2018). Wie in Abbildung 3.4 ersichtlich, kommt eine separate Recheneinheit zum Einsatz, die der Benutzer zusätzlich am Körper trägt. Damit wird im Wärmebild eine Kantenerkennung durchgeführt und das resultierende Kantenbild anschließend auf den Displays angezeigt (vgl. Qwake Technologies 2018(a)). Die Überlagerung der Bilder mit visuellen Eindrücken des Brandraumes ermöglicht hierbei eine bessere Einschätzung über die räumliche Anordnung der in den Displays angezeigten Objekte (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 30).

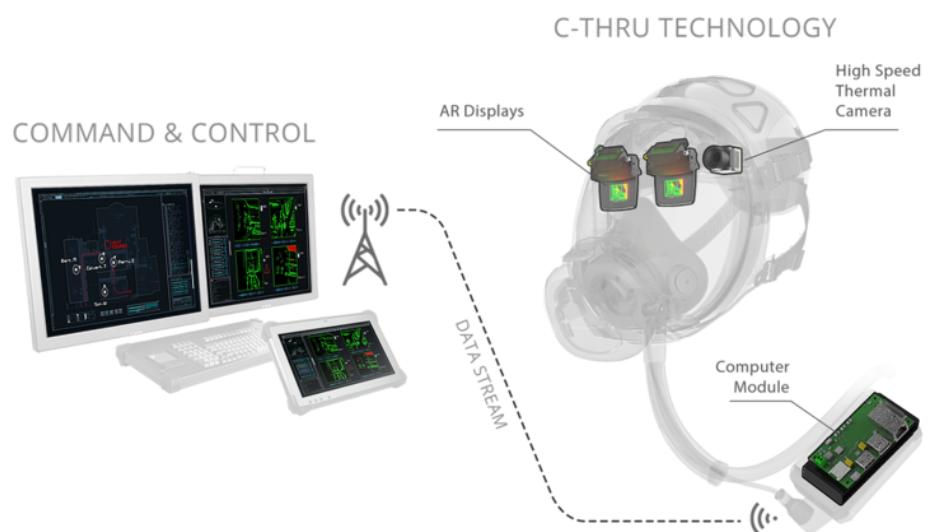


Abbildung 3.4: Vom C-Thru-System verwendete Hardware (Qwake Technologies 2018(a))

3 Problemdefinition

In einem von Qwake Technologies durchgeführten Test im Juni 2018 wurde das von ihnen entwickelte System mit zwei anderen Wärmebildkamerasystemen verglichen (vgl. Qwake Technologies 2018(b)). Ziel der mit den unterschiedlichen Systemen ausgestatteten Testpersonen war es, ein Opfer durch Rauch hindurch und in vollständiger Dunkelheit zu finden und das Gebäude im Anschluss so schnell wie möglich wieder zu verlassen (vgl. ebd.). Die mit C-Thru ausgestatteten Einsatzkräfte konnten die Aufgabe nach eigenen Angaben in allen bis auf einen Fall schneller als mithilfe der anderen Technologien bewältigen (vgl. ebd.). Laut Fenwick (2018) kamen zusätzlich eine handbediente Wärmebildkamera sowie ein weiterer in der Maske angebrachter Thermal-Display eines anderen Herstellers zum Einsatz. Da bei letzterem zusätzlich die Handfreiheit erwähnt wird (vgl. Fenwick 2018), wird angenommen, dass es sich hierbei um ein ähnliches am Helm angebrachtes System wie das zuvor beschriebene von Scott Safety handelt. Eine sichere Aussage kann diesbezüglich jedoch nicht getroffen werden, da keine weiteren Informationen über die anderen für den Test verwendeten Systeme vorlagen.

Als zusätzliche Funktion kann das beschriebene System eine Live-Übertragung des Kamerabildes kabellos an die Einsatzleitung senden (vgl. Abb. 3.4). Ähnlich wie bei Handkameras lassen sich die heißen Bereiche im Bild hervorheben (vgl. Qwake Technologies 2018(a)), sodass das System nicht ausschließlich zur Navigation verwendet werden kann. Von den Entwicklern ist weiterhin geplant, das System um zusätzliche Funktionen zu erweitern. So soll die Möglichkeit bestehen, biometrische Daten auszulesen, anzuzeigen sowie zu übertragen (vgl. Fenwick 2018) oder eine Objekterkennung im Wärmebild durchzuführen (vgl. Qwake Technologies 2018(a)).

Wenngleich die von Qwake Technologies veröffentlichten Testergebnisse zeigen, dass das C-Thru System anderen Wärmebildkamerasystemen hinsichtlich der Navigationsunterstützung in verrauchten Räumen überlegen ist, ist der Datensatz für eine endgültige Einschätzung zu klein. Abgesehen davon handelt es sich bei dem Testszenario lediglich um eines der möglichen Anwendungsgebiete von Wärmebildkameras im Feuerwehreinsatz, wodurch kein vollständiger Vergleich zu bestehenden Systemen vorgenommen werden kann. Weiterhin ist anzumerken, dass es sich bei C-Thru um noch kein auf dem Markt erhältliches Produkt handelt, wodurch keinerlei Aussagen bezüglich Hitzebeständigkeit, Akkulaufzeit oder Ausfallsicherheit getroffen werden können.

Kapitel 4

4 Entwurf

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein System zu entwickeln, welches die Aufnahmen einer Wärmebildkamera so verwertet, dass die für den Feuerwehreinsatz nützlichen Daten aufgearbeitet und wichtige Details hervorgehoben werden. In diesem Kapitel werden die dafür relevanten Anwendungsfälle hergeleitet und der Entwurf des Systems vorgestellt. Weiterhin wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Auswahl an Wärmebildern angefertigt, für deren Umsetzung es analog der Anwendungsfälle verschiedene Situationen zu entwerfen galt, die in diesem Kapitel ebenso vorgestellt werden.

4.1 Wärmebildaufnahmen

Wenngleich der Prototyp in Hinblick auf eine Verarbeitung von Bildern entwickelt wird, welche direkt von der Kamera geliefert werden, sind konstante Situationen notwendig, um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Algorithmen sicherzustellen.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte hierfür die Erstellung mehrerer Datensätze an Wärmebildaufnahmen. Hierzu galt es mehrere Situationen zu konstruieren, welche die verschiedenen Probleme im Anwendungsszenario abdecken sollen. Um den Einfluss von Rauch auf das System mit in Betracht ziehen zu können, wurden die Aufnahmen im Rauchraum des Brandschutzzentrum Dresden angefertigt. Dort war es möglich, einen ölbasierten Nebel in den Raum zu bringen, der sich ähnlich einem Brandrauch zunächst an der Decke sammelt. Für eine bessere Beurteilung des Einflusses von Rauch liegen einige Wärmebilder sowohl mit als auch ohne Rauch vor und zeigen ansonsten einen identischen Bildinhalt. Um die Situationen ebenso für Außenstehende nachvollziehbar zu gestalten, wurde für einige Vergleichsbilder parallel jeweils ein visuelles Bild angefertigt. Hierfür konnte die zusätzlich zur Infrarotkamera integrierte visuelle Kamera verwendet werden, die bei Bedarf zeitgleich Aufnahmen erzeugt.¹ Im Folgenden werden die unterschiedlichen für die Aufnahmen geplanten Situationen vorgestellt.

¹Diese Funktion ist nur für Einzelbildaufnahmen verfügbar und konnte nicht für Bilderfolgen genutzt werden.

Erkundung des Raumes

Als erste Situation soll der Raum mithilfe der Kamera erkundet werden. Vorab erfolgt die Platzierung diverser Hindernisse, die in etwa die gleiche Temperatur wie ihre Umgebung aufweisen. Um alle Gegebenheiten des Raumes aufzeichnen zu können, wird der sogenannte Würfelblick durchgeführt, welcher sich bei der Benutzung einer Wärmebildkamera im Feuerwehreinsatz durchgesetzt hat (vgl. Linde und Dittrich 2013, S. 35 ff.). Hierbei werden nacheinander Decke, Boden sowie alle Wände des Raumes betrachtet, um einen schnellen Überblick über die Situation zu erhalten. Nach der Empfehlung von Keller u. a. (2012), wird die Kamera für ein bis zwei Sekunden auf jede Seite gerichtet sowie nach folgender Reihenfolge vorgegangen: Decke, Boden, Wand rechts, Wand gegenüber, Wand links, Wand durch die der Raum betreten wird. Anschließend wird die Kamera weiter durch den Raum bewegt um alle Details und verdeckte Objekte wahrnehmen zu können.

Temperaturextrema

Neben den zuvor genannten Hindernissen werden zusätzlich Objekte mit deutlich höherer sowie niedrigerer Temperatur in den Raum gebracht. Als heißes Objekt soll eine brennende Kerze² verwendet werden und als kaltes Pendant eine im Gefrierschrank ausreichend gekühlte Flasche Wasser. Es werden mehrere Aufnahmen angefertigt, bei denen sich die betreffenden Objekte an unterschiedlichen Orten befinden, wobei sie teilweise von Hindernissen verdeckt sind, um nicht sofort nach Betreten des Raumes in der Kamera erkennbar zu sein.

Personensuche

Um eine Personensuche zu simulieren, soll sich in einigen der Aufnahmen eine Person im Raum befinden. Um möglichst viele verschiedene Situationen in diesem Szenario abzudecken, werden mehrere Aufnahmen angefertigt, bei denen die Person unterschiedlich stark von Textilien verdeckt ist. Sie ist entweder komplett mit einer Decke verhüllt, teilweise verdeckt, sodass noch ein Teil der Haut offen liegt, oder unverdeckt, wodurch nur die Bekleidung der Person die Wärmestrahlung abschirmt.

Temperaturmessung

Für Temperaturmessungen sollen nacheinander unterschiedliche Objekte in das Sichtfeld der Kamera gebracht werden. Als Messobjekte werden die für Temperaturextrema zum

²Die Kerze wurde in einer Dose platziert um die im Bild eingenommene Fläche zu vergrößern.

Einsatz kommenden Gegenstände verwendet. Die beiden Objekte werden auf einem Tisch platziert und nacheinander die Mitte des Kamerabildes darauf ausgerichtet. Zusätzlich wird in einer weiteren Aufnahme die Tür des Raumes mit der Kamera auf Erwärmungen abgesucht, um den in Abschnitt 3.2 erwähnten Türcheck zu simulieren.

Navigation

Da sich der Brandherd beim standardisierten Wohnungsbrand im Obergeschoss befindet, sind ebenfalls Aufnahmen der Navigation durch ein Gebäude nötig, um möglichst viele Szenarien abzudecken. Hierbei muss jedoch auf den simulierten Brandrauch verzichtet werden, da dieser nur im Rauchraum zur Verfügung steht. Aufgezeichnet werden soll der Weg vom Eingang, durch das Untergeschoss, über das Treppenhaus bis in einen Raum im Obergeschoss.

4.2 Allgemeine Auswertung der Aufnahmen

Bei einer ersten Sichtung der angefertigten Aufnahmen in der von InfraTec zur Verfügung gestellten Software lassen sich bereits viele der in Kapitel 2 beschriebenen Eigenschaften von Infrarot- beziehungsweise Wärmestrahlung bestätigen. Dies schließt die Vorteile von Thermografiesystemen gegenüber herkömmlichen Kameras mit ein, wobei die angefertigten Aufnahmen ebenso Eigenschaften aufweisen, die eine weitere Verarbeitung erschweren.

Bei der Betrachtung von Wärmebildern im gesamten von der Kamera verwendeten Temperaturbereich (-40 °C bis 120 °C), sind zunächst nur Objekte auf dem Bild auszumachen, die sich in ihrer Temperatur sehr deutlich von der Umgebungstemperatur unterscheiden. Der Grund dafür ist, dass von der eingestellten Farbskala einheitliche Farben für weite Temperaturbereiche verwendet werden müssen, wenn eine möglichst große Spanne an Temperaturen durch eine begrenzte Anzahl von Farben dargestellt werden soll. Da die meisten Oberflächen aber nur eine sehr geringe Temperaturdifferenz zu ihrer Umgebung aufweisen, werden sie in diesem Fall farblich homogen abgebildet. Um einen guten Überblick über die gesamte Szene zu erhalten, müssen die Temperaturgrenzen also deutlich näher beieinander liegen, um kleine Temperaturunterschiede möglichst kontraststark darstellen zu können. Dabei werden jedoch alle Temperaturen, die über oder unter den eingestellten Grenzen liegen, einheitlich in der Farbe der Grenzen angezeigt. Der Betrachter weiß in diesem Fall nur, dass die abgebildeten Werte größer gleich beziehungsweise kleiner gleich der Temperaturgrenzen sein müssen, er kann aber keine Aussage darüber treffen, um welche konkreten Temperaturen es sich dabei handelt. Speziell für die Aufnahmen im Rauchraum lieferten Grenzen, welche sich im Bereich von ± 3 K um die Umgebungstemperatur von etwa 24 °C bewegten, gute visuelle Ergebnisse. Aufgrund der aus den engeren Temperaturgrenzen resultierenden Kontrasterhöhung wird jedoch das durch den Sensor der Kamera bedingte Rauschen im Bild deutlich verstärkt.

Allgemein ist anzunehmen, dass das Rauschen bei einer automatisierten Verarbeitung der Bilder einen erheblichen Störfaktor darstellt, wodurch schlechtere Ergebnisse zu erwarten sind. Besonders bei der Betrachtung von Einzelbildern aus den aufgenommenen Bilderfolgen ist je nach gewählten Einstellungen ein sehr deutliches Rauschen zu erkennen. Bei statischen Einzelaufnahmen fällt der Einfluss bei identischen Einstellungen hingegen deutlich geringer aus. Da jedoch anzunehmen ist, dass Bilder, die in einem Echtzeitszenario von der Kamera geliefert werden, ähnliche Eigenschaften wie die aufgenommenen Bilderfolgen aufweisen, wird auf eine Untersuchung der Ursachen dieser Unterschiede verzichtet. Zwar bietet die Software von InfraTec bereits diverse Filter zur Rauschreduzierung, jedoch wurde bewusst von einer Verwendung abgesehen, um später mit unveränderten Aufnahmen arbeiten zu können und so möglichst ähnliche Bedingungen

wie in einem Szenario zu schaffen, in dem die Bilder direkt von der Kamera geliefert werden.

Aufgrund der Bewegung der Kamera während der Aufnahmen kommt es unweigerlich zu Bewegungsunschärfe in den resultierenden Bildern, welche auf die Abklingzeit des elektrischen Signals der einzelnen Mikrobolometer zurückzuführen ist (vgl. Oswald-Tranta 2017, S. 783). Details wie Kanten oder kleinere Strukturen erscheinen bei schnellen Bewegungen damit sehr unscharf, was eine genaue Abgrenzung und Identifizierung von unterschiedlichen Objekten im Bild erschwert. In Abbildung 4.1 wird dies durch die diffuse Kante im Bereich zwischen weißem Vordergrund und grauem Hintergrund deutlich. Außerdem kann in einigen Bildern eine Art Ghosting-Effekt³ beobachtet werden, wie es aus analogen Fernsehübertragungen oder Bildschirmen mit geringen Ansprechzeiten bekannt ist. In den Aufnahmen ist dieser Effekt vorrangig dann bemerkbar, wenn sich das Objekt in seiner Temperatur deutlich von seinem Hintergrund unterscheidet. In diesem Fall kommt es wie in Abbildung 4.1 zu erkennbaren Kanten, die den in Bewegungsrichtung versetzten Umrissen des Objektes entsprechen und mit größerer Entfernung schwächer werden. Die Kamera bewegte sich während der Aufnahme des gezeigten Bildes nach links oben. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt ebenso auf die Abklingzeit des elektrischen Signals der Sensorelemente zurückzuführen ist. Die negativen Auswirkungen des genannten Effekts steigern sich potentiell durch eine Weiterverarbeitung des Bildes, insbesondere bei Kontrasterhöhungen oder Einschränkungen der Temperaturgrenzen.

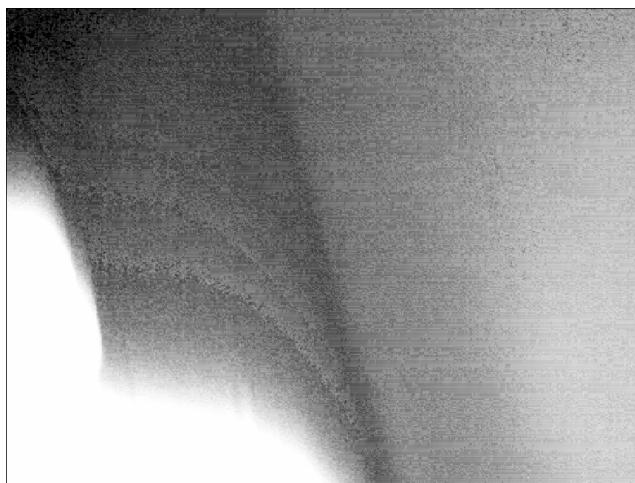


Abbildung 4.1: Ghosting-Effekt und Bewegungsunschärfe in einem Wärmebild

Weiterhin bestätigt sich die Annahme, dass Wärmebildkameras unabhängig von der Beleuchtungssituation verwendet werden können. Werden die Abbildungen 4.2e und

³Beim Ghosting sind Bildinhalte an mehreren Positionen gleichzeitig zu erkennen, also zum Beispiel an der gleichen Position wie im vorhergehenden Bild einer Bilderfolge, sowie zusätzlich an der aus einer Bewegung resultierenden neuen Position.

4.2f verglichen, ist sehr gut erkennbar, dass beide Wärmebilder bezüglich Qualität und Informationsgehalt fast identisch sind, obwohl Ersteres bei eingeschalteter Lichtquelle und Letzteres in fast vollständiger Dunkelheit aufgenommen wurde. Als Vergleich ist der deutliche Einfluss der Beleuchtung bei visuellen Bildern in den dazugehörigen Aufnahmen in Abbildung 4.2b und 4.2c zu erkennen.

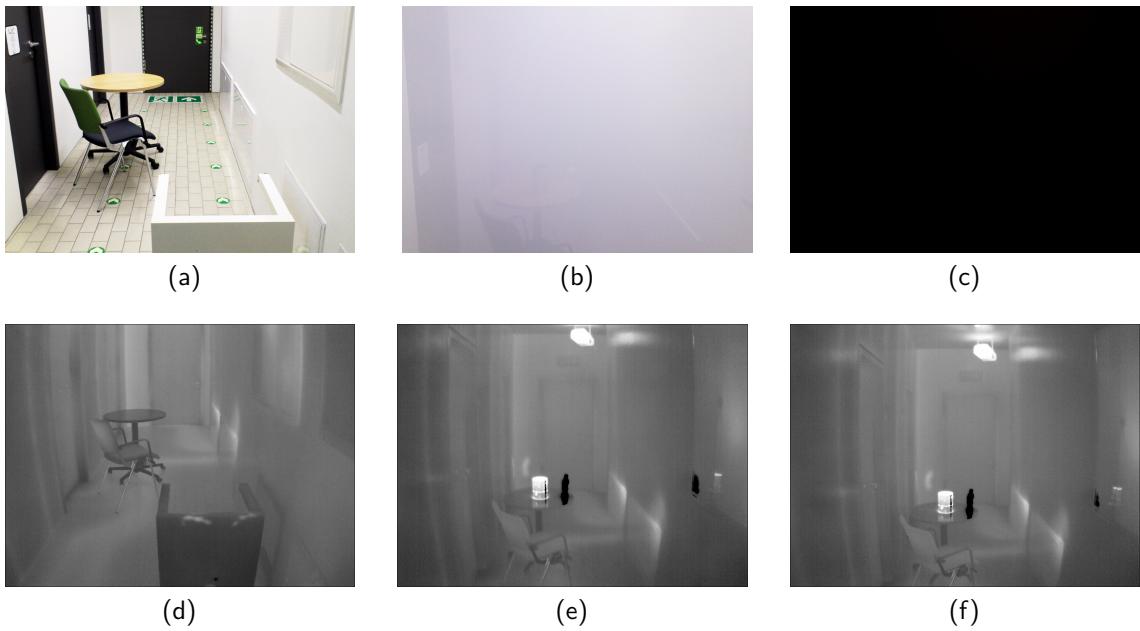


Abbildung 4.2: Parallele Aufnahmen mit visueller Kamera (VIS) und Infrarotkamera (IR):
 (a) VIS mit Licht und ohne Rauch, (b) VIS mit Licht und Rauch, (c) VIS ohne Licht und mit Rauch, (d) IR mit Licht und ohne Rauch, (e) IR mit Licht und Rauch, (f) IR ohne Licht und mit Rauch

Die Annahme, dass Objekte mit einer Wärmebildkamera selbst durch Rauch hindurch wahrgenommen werden können, kann ebenfalls bestätigt werden. Bei einem direkten Vergleich der Abbildungen 4.2d und 4.2e ist jedoch ein geringer Einfluss des Rauchs auf die Qualität der Aufnahmen erkennbar. Besonders Objekte und Details wie beispielsweise Kanten, welche weiter von der Kamera entfernt sind, erscheinen diffuser, insofern sich bei der Aufnahme Rauch im Raum befand. Es ist davon auszugehen, dass Infrarotstrahlung, ähnlich wie Strahlung im sichtbaren Spektrum, an den Rauchpartikeln reflektiert und gestreut wird, wenngleich dies in einem deutlich geringeren Umfang geschieht. Laut Keller u. a. (2012) sowie Cha, Abbott und Reynolds (2015) kann es vereinzelt vorkommen, dass die Wärmestrahlung besonders dichten oder sehr heißen Brandrauch nicht mehr durchdringen kann. Dies ließ sich im geführten Interview jedoch nicht bestätigen (vgl. Anh. B, S. 100f.). Da es sich in dem konstruierten Szenario nicht um realen Brandrauch handelt und der Einfluss bei den Aufnahmen sehr gering ausfällt, wird im Laufe der Arbeit

auf eine weitere Untersuchung dieses Sachverhalts verzichtet.

Eine weitere Auffälligkeit stellt der Temperaturunterschied der einzelnen Oberflächen zu Beginn der Aufnahmen im Vergleich zum Ende der Aufnahmen dar. Zwischen der ersten und der letzten Aufnahme lagen etwa 30 Minuten, in denen sich die in den Raum gebrachten Gegenstände leicht erwärmtten und die Wände des Raumes leicht abkühlten. An den Wänden konnte eine Temperaturabnahme von etwa 0,5 K festgestellt werden, während einige der Gegenstände bis zu 1 K wärmer wurden. Als besonders auffällig gestaltet sich die Temperaturdifferenz des weißen auf der Seite liegenden Tisches (vgl. Abb. 4.2a), der sich in den Wärmebildern zu Beginn noch sehr deutlich von seiner Umgebung abhebt (vgl. Abb. 4.2d). Es wird angenommen, dass die Temperatur im Vorraum, in welchem sich die Gegenstände vor Beginn der Aufnahmen befanden, geringer als die im zunächst geschlossenen Rauchraum war. Das zwischenzeitliche Öffnen der Türen im Verlauf der Aufnahmen führte mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Temperaturausgleich.

4.3 Technische Anwendungsfälle

Aus den in Abschnitt 3.2 identifizierten Problemen lassen sich die möglichen Anwendungsfälle ableiten, die von dem angestrebten System abgedeckt werden sollen. Da die Vorgehensweisen bei einigen der Herausforderungen Parallelen aufweisen beziehungsweise der Einsatz der Wärmebildkamera in vergleichbarer Weise vorgenommen werden kann, erscheint eine Zusammenfassung dieser Anwendungsfälle zweckdienlich.

4.3.1 Vorverarbeitung

Je nach Art und Beschaffenheit der von der Kamera zur Verfügung gestellten Daten ist unter Umständen zunächst eine Aufbereitung notwendig, um relevante Bildinformationen zu erhalten. Während ein übliches Format für die Aufnahmen von Wärmebildkameras Bilder mit lediglich einem Kanal und 16 Bit Farbtiefe sind, können die meisten Displays in der Regel nur 8 Bit pro Farbkanal darstellen. Die Bilder müssen demzufolge zunächst in ein darstellbares Format gebracht werden. Während dies bei Kameras mit integrierten Bildschirmen oder Programmen zur Bildverarbeitung automatisiert geschieht, ist es bei einer direkten Verarbeitung der Rohinformationen erforderlich, alle Werte selbst in den darstellbaren Wertebereich zu überführen, um sie auf einem Ausgabegerät anzeigen zu können. Da die Bilder der Wärmebildkamera lediglich einen Kanal enthalten, können die Daten direkt als Graustufenbild dargestellt werden, indem die mit 16 Bit möglichen Werte von 0 bis 65535 direkt auf den 8-Bit-Bereich zwischen 0 und 255 abgebildet und das Ergebnis in alle drei Kanäle geschrieben wird. Eine Überführung zwischen zwei ganzzahligen und bei 0 beginnenden Wertebereichen lässt sich analog folgender Gleichung durchführen:

$$g'(x, y) = \left\lfloor g(x, y) \frac{k'}{k} \right\rfloor \quad (4.1)$$

mit $g'(x, y)$: resultierender Intensitätswert an der Stelle (x, y) , $g(x, y)$: ursprünglicher Intensitätswert an der Stelle (x, y) , k : Anzahl darstellbarer Werte im ursprünglichen Bereich, k' : Anzahl darstellbarer Werte im resultierenden Bereich.

Im Fall der Wärmebilder ist dementsprechend eine Multiplikation der jeweiligen 16-Bit-Werte mit dem Quotienten aus der Anzahl der darstellbaren Werte im kleineren Bereich und der Anzahl der darstellbaren Werte im größeren Bereich durchzuführen. Um stets ganzzahlige Werte zu erhalten, ist ein Abrunden der Ergebnisse beziehungsweise Verwerfen der Dezimalstellen notwendig. Unter Umständen nutzt die Kamera jedoch nicht

den kompletten Wertebereich eines 16-Bit-Bildes.⁴ Werden beispielsweise nur die Hälfte aller durch 16 Bit darstellbaren Werte abgedeckt, so wird bei dem zuvor beschrieben Vorgehen ausschließlich die Hälfte des Wertebereiches im resultierenden 8-Bit-Bild genutzt. Insofern der tatsächlich von der Kamera verwendete Wertebereich bekannt ist, kann dieser anstatt des vollständigen Bereiches für die Berechnung eingesetzt werden⁵, womit das beschriebene Problem umgangen wird. Da eine Abbildung auf einen kleineren Wertebereich in der Regel mit Informationsverlust einhergeht, sollte dies ausschließlich zur Anzeige der Bilder angewandt werden, alle anderen Verarbeitungsschritte haben auf den unveränderten Daten zu erfolgen.

4.3.2 Sichtverbesserung

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil einer Wärmebildkamera im Feuerwehreinsatz ist die Möglichkeit, mit ihrer Hilfe die Beschaffenheit der Einsatzumgebung selbst durch dichten Rauch hindurch wahrzunehmen. Sobald sich Objekte in ihrer Wärmestrahlung jedoch nur unwesentlich vom Hintergrund unterscheiden, sind diese auf dem Bild praktisch nicht mehr auszumachen (vgl. Linde und Dittrich 2013, S.30). Neben der Herausforderung, Unterschiede auf dem Display zu erkennen, spielt die Beschaffenheit des Displays eine entscheidende Rolle, da minimale Temperaturdifferenzen durch eine zu geringe Farbauflösung womöglich nicht dargestellt werden können. Wenngleich bestimmte Details im Bild visuell nicht wahrnehmbar sind, so lassen sich bereits kleinste Unterschiede in den einzelnen Temperaturwerten durch eine digitale Auswertung der Bilder detektieren. Durch die Anwendung geeigneter Algorithmen und Filter lassen sich verschiedene Bildmerkmale wie Kanten oder Ecken extrahieren und verstärken. Je nach der zum Einsatz kommenden Anzeige können die Merkmale anschließend separat dargestellt oder wieder im Wärmebild selbst integriert werden und so dessen Detailgrad für den Betrachter erhöhen. Abgesehen davon kann bereits eine Kontrasterhöhung zu einer besseren Erkennbarkeit einzelner Objekte führen.

4.3.2.1 Kontrastmanipulation

Wird eine Aufnahme im gesamten von der Kamera aufgenommenen Temperaturbereich angezeigt, ist das Bild in der Regel sehr kontrastarm, insofern sich die Temperaturen im

⁴Die während der Arbeit angefertigten Aufnahmen durchlaufen vor ihrer Verwendung eine Vorverarbeitung, welche in Abschnitt 5.1 beschrieben wird. Daraus resultieren Bilder, welche lediglich 16 001 von den mit 16 Bit möglichen 65 536 Werten nutzen.

⁵Dies gilt unter der Annahme, dass der Teilwertebereich ebenfalls bei 0 beginnt, anderenfalls muss das Verfahren angepasst werden.

Sichtbereich nicht deutlich voneinander unterscheiden. Besonders auf Bildern, die bei Zimmertemperatur und in geschlossenen Räumen aufgenommenen werden, lassen sich in diesem Fall keine oder nur erschwert Gegenstände oder Strukturen erkennen. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Dabei handelt es sich um die selbe Aufnahme wie in Abbildung 4.2e, jedoch wird hier die Aufnahme im gesamten aufgenommenen Bereich von -40 °C bis 120 °C dargestellt. Grund für den geringen Kontrast ist die bereits im vorherigen Unterabschnitt erwähnte Limitierung der möglichen Grauwerte bei der Konvertierung in 8 Bit. Umfasst der aufgenommene Temperaturbereich beispielsweise 0 bis 500 °C, so sind bei der Anzeige mit 256 Intensitätswerten nur Unterschiede von etwa 2 K darstellbar. Objekte und Flächen mit geringeren Temperaturunterschieden werden in diesem Fall durch identische Farbwerte repräsentiert, wodurch eine visuelle Unterscheidung nicht mehr möglich ist. Um selbst kleinere Unterschiede in der Temperatur darstellen zu können, muss der Kontrast im für den Betrachter relevanten Temperaturbereich oder im gesamten Bild erhöht werden. Hierfür stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, welche sich in ihrer Komplexität sowie den Ergebnissen unterscheiden und im Nachfolgenden erläutert werden.



Abbildung 4.3: Wärmebildaufnahme mit geringem Kontrast

Lineare Grauwertransformation

Da das visuelle System des Menschen, aufgrund seiner logarithmischen Kennlinie bezüglich der Helligkeitsempfindlichkeit, in dunklen Bereichen einen deutlich geringere Grauwertunterscheidung aufweist (vgl. Steinbrecher 1993, S. 113), kann eine Addition aller Werte mit einem konstanten positiven Faktor das Bild für den Betrachter subjektiv kontrastreicher erscheinen lassen. Die Addition stellt jedoch keine Änderung des Kontrastes dar, sondern hellt lediglich das Bild durch eine Verschiebung aller Grauwerte auf. Analog besteht die

Möglichkeit, ein zu helles Bild durch eine negative Verschiebung aller Werte abzudunkeln. Zu beachten gilt, dass die Werte dabei nicht aus dem darstellbaren Bereich geschoben werden, da in diesem Fall Informationen verloren gingen. Die Multiplikation aller Werte mit einem konstanten Faktor stellt hingegen eine tatsächliche Änderung des Kontrastes dar. Während bei einer Multiplikation mit einem Faktor größer 1 der Wertebereich des Bildes gespreizt und so der Kontrast erhöht wird, wird der Wertebereich bei einem Faktor kleiner 1 gestaucht und der Kontrast verringert. Durch eine Kombination aus Addition und Multiplikation können die tatsächlich im Bild enthaltenen Werte auf den gesamten zur Verfügung stehenden Wertebereich verteilt werden. Hierfür steht folgende Transformationsfunktion zur Verfügung:

$$g'(x, y) = (g(x, y) - g_{min}) \frac{G_{max} + 1}{g_{max} - g_{min} + 1} \quad (4.2)$$

mit G_{max} : obere Grenze des Wertebereiches, g_{max} , g_{min} : maximaler und minimaler im Bild vorkommender Intensitätswert.

Wird diese Transformation auf Bilder angewandt, in denen Werte außerhalb des gewählten Bereiches zwischen g_{max} und g_{min} vorkommen, so werden ebenjene auf Werte außerhalb des Wertebereiches abgebildet. Um Fehler bei der Darstellung zu vermeiden, müssen Werte unterhalb des Wertebereiches auf 0 und oberhalb des Wertebereiches auf G_{max} gesetzt werden.

Gegeben durch die Linearität und die Ortsunabhängigkeit der vorgestellten Transformation erfolgt eine Gleichbehandlung aller Teilwertebereiche. Dies bedeutet, wenn ein für den Betrachter interessanter Teil des Bildes einen kleinen Teilwertebereich abdeckt, das Bild ansonsten jedoch einen deutlich größeren Wertebereich beinhaltet, ist die aus Gleichung 4.2 resultierende Kontrasterhöhung für den interessanten Bereich unter Umständen unerheblich. Ist der Wertebereich, welcher die relevanten visuellen Informationen enthält, jedoch bekannt, lassen sich anstelle von g_{min} und g_{max} die Grenzen des relevanten Bereiches verwenden und so der Kontrast weiter erhöhen. Hierbei werden jedoch alle Werte außerhalb der gewählten Grenzen durch eben diese ersetzt. Daraus resultiert, dass keinerlei Intensitätsunterschiede außerhalb des relevanten Bereiches wahrnehmbar sind. Ist dies unerwünscht, kann stattdessen eine stückweise lineare Transformation durchgeführt werden. Hierbei werden uninteressante Werte weniger stark gespreizt oder bei Bedarf gestaucht und der relevante Teil des Wertebereiches stärker gespreizt. Voraussetzung ist, dass die verschiedenen Bereiche unabhängig voneinander behandelt und auf unterschiedliche Teile des resultierenden Wertebereiches abgebildet werden.

Hierfür gilt es Gleichung 4.2 um eine untere Grenze des resultierenden Wertebereiches zu erweitern:

$$g'(x, y) = (g(x, y) - g_{min}) \frac{G_{max} - G_{min} + 1}{g_{max} - g_{min} + 1} + G_{min} \quad (4.3)$$

mit G_{min} : untere Grenze des Wertebereiches. Durch Einführung von Grenzen für den relevanten Bereich im ursprünglichen sowie resultierenden Wertebereich ergibt sich die in Abbildung 4.4 gezeigte schematische Darstellung der Grauwerttransformationen der einzelnen Teilbereiche.

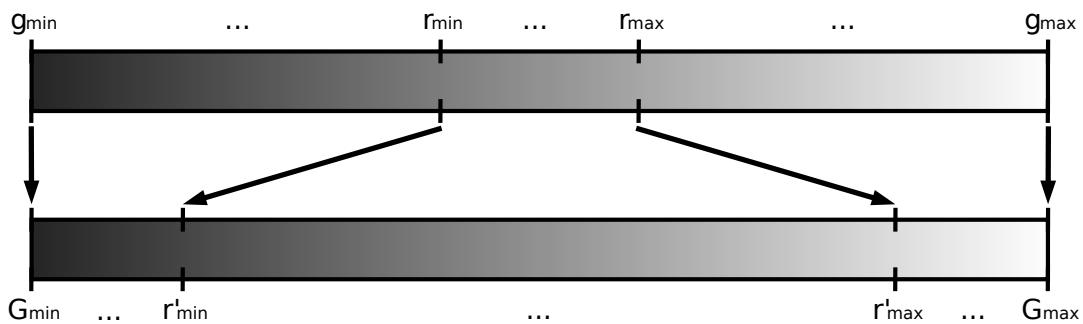


Abbildung 4.4: Schematische Darstellung einer stückweise linearen Grauwerttransformation (Eigene Darstellung)

Anschließend lässt sich folgende Fallunterscheidung für die Grauwerttransformation in Abhängigkeit der festgelegten Grenzen durchführen:

$$g'(x, y) = \begin{cases} (g(x, y) - g_{min} + 1) \frac{r'_min}{r_{min} - g_{min} + 1} & \text{falls } g(x, y) < r_{min} \\ (g(x, y) - r_{min}) \frac{r'_{max} - r'_{min} + 1}{r_{max} - r_{min} + 1} + r'_{min} & \text{falls } r_{min} \leq g(x, y) \leq r_{max} \\ (g(x, y) - r_{max} - 1) \frac{G_{max} - r'_{max}}{g_{max} - r_{max}} + r'_{max} + 1 & \text{falls } g(x, y) > r_{max} \end{cases} \quad (4.4)$$

mit r_{min} : untere Grenze des relevanten Bereiches im ursprünglichen Bild, r_{max} : obere Grenze des relevanten Bereiches im ursprünglichen Bild, r'_{min} : untere Grenze des relevanten Bereiches im resultierenden Bild, r'_{max} : obere Grenze des relevanten Bereiches im resultierenden Bild.

Hiermit wird der ursprüngliche Kontrast zwischen r_{min} und r_{max} erhöht, insofern der Bereich zwischen r'_{min} und r'_{max} einen größeren Anteil des Wertebereiches abdeckt. Gleichzeitig wird der Kontrast in den Randbereichen verringert. Es gilt erneut zu beachten,

dass das Stauchen von Wertebereichen zu Informationsverlust führt. Betrifft dies jedoch nur Bereiche, die für den Betrachter oder die weitere Verarbeitung irrelevant sind, ist dies nicht von Nachteil.

Die Bestimmung der Grenzen des in Gleichung (4.4) verwendeten relevanten Bereiches muss in Abhängigkeit von der Umgebung erfolgen, da konstante Werte bei einer Veränderung der Gegebenheiten zu schlechteren Ergebnissen führen können. Es ist anzunehmen, dass mithilfe von Grenzen, welche sich nahe der jeweiligen Umgebungstemperatur befinden, gute Ergebnisse zu erwarten sind. Die Herausforderung hierbei besteht darin, die Umgebungstemperatur lediglich anhand der Wärmebilder zu schätzen. In Räumen, die sich nahe einem thermischen Gleichgewicht⁶ befinden, lässt sich die Umgebungstemperatur über eine Mittelwertbildung aller im Wärmebild enthaltenen Bildpunkte bestimmen, da in diesem Fall lediglich minimale Temperaturdifferenzen zwischen den aufgenommenen Oberflächen bestehen. Enthält bereits ein kleiner Teil des Bildes deutlich höhere Intensitätswerte, resultieren aus der Mittelung Werte oberhalb der eigentlichen Umgebungstemperatur. die Mittelwertbildung unter Limitierung von extremen Werten, stellt einen Ansatz zur Lösung dieses Problems dar. Mithilfe von Temperaturgrenzen lassen sich zunächst alle Werte, die sich jeweils ober- oder unterhalb der Grenzen befinden, abschneiden und auf den Wert der Grenze setzen. Hierfür kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$g_L(x, y) = \begin{cases} T_{min} & \text{falls } g(x, y) \leq T_{min} \\ g(x, y) & \text{falls } T_{min} < g(x, y) < T_{max} \\ T_{max} & \text{falls } g(x, y) \geq T_{max} \end{cases} \quad (4.5)$$

mit g_L : resultierendes Bild mit limitierten extremen Werten, T_{min} : untere Temperaturgrenze für die Mittelwertbildung, T_{max} : obere Temperaturgrenze für die Mittelwertbildung. Anschließend lässt sich der Mittelwert des resultierenden Bildes folgendermaßen bestimmen:

$$T_{mean} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} g_L(x, y) \quad (4.6)$$

mit T_{mean} : Temperaturmittelwert, M : Höhe des Bildes, N : Breite des Bildes. Mithilfe des berechneten Wertes lassen sich anschließend die in Gleichung 4.4 verwendeten r_{min} und r_{max} bestimmen. Im Fall der angefertigten Aufnahmen liefern $r_{min} = T_{mean} - 3 \text{ K}$ sowie $r_{max} = T_{mean} + 3 \text{ K}$ gute Ergebnisse. Für T_{min} wird ein Wert von $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und für

⁶Ein System befindet sich im thermischen Gleichgewicht, wenn alle Bestandteile die gleiche Temperatur aufweisen und demnach keine Energieübergabe in Form von thermischen Wechselwirkungen besteht (vgl. Baehr und Kabelac 2012, S. 30ff.).

T_{max} ein Wert von $40^{\circ}C$ vorgeschlagen.

Da in der Regel keine abrupte Änderung der Umgebungstemperatur in aufeinanderfolgenden Bildern stattfindet, kann ein berechneter Mittelwert für mehrere Bilder verwendet werden um Rechenzeit zu sparen. Beispielsweise lässt sich die Berechnung lediglich alle n Bilder durchführen und jeweils für die darauffolgenden $n - 1$ Bilder verwenden. Um jedoch beim Betreten eines sehr heißen Raumes nicht zu lang auf eine nötige Kontrastanpassung warten zu müssen, sollte kein zu großer Abstand für die Berechnungen gewählt werden. Für den Prototyp wird zunächst $n = 10$ vorgeschlagen. Da in den angefertigten Wärmebildaufnahmen keine erheblichen Temperaturänderungen stattfinden, kann über einen optimalen Abstand keine Aussage getroffen werden.

Histogrammmanipulation Als Histogramm wird eine Darstellung der Häufigkeitsverteilung der Grau- oder Farbwerte in einem Bild bezeichnet, die einem Balkendiagramm ähnelt.⁷ Auf der horizontalen Achse lassen sich die unterschiedlichen Grauwerte als Zahl oder Grauverlauf ablesen, wobei die Häufigkeit jedes Grauwerts durch einen dazu in Relation stehenden Balken abgebildet wird. Für ein Histogramm und spätere Berechnungen sind in der Regel keine absoluten, sondern relative Häufigkeiten der Grauwerte von Interesse (vgl. Steinbrecher 1993, S. 119). Wenngleich die im vorherigen Abschnitt vorgestellte lineare Transformation durch Multiplikation sowie Addition bereits eine Histogrammspreizung beziehungsweise -verschiebung darstellt, wird bewusst von dieser Wortwahl abgesehen, da dabei keinerlei Informationen über die Häufigkeitsverteilung der Werte notwendig sind.

Sofern alle Werte möglichst gleichmäßig über den gesamten zur Verfügung stehenden Wertebereich verteilt werden sollen, ist ein Histogrammausgleich⁸ zweckdienlich. Dabei erfolgt eine Spreizung der Bereiche mit häufig vorkommenden Werten und eine Stauchung der Bereiche mit weniger häufigen Werten. Das führt dazu, dass die direkten Nachbarwerte sehr häufig vorkommender Werte nicht mehr im Bild enthalten sind, wodurch sich diese mehr von ihrer Umgebung abheben und deutlicher zu erkennen sind. In der Regel wird angestrebt, „daß in einem jeweils konstanten Grauwertintervall etwa gleich viele Bildpunkte enthalten sind“ (Steinbrecher 1993, S. 120). Als Ansatz für eine annähernde Lösung dieses Problems, kann das kumulative Histogramm verwendet werden (vgl. Burger und Burge 2006, S. 62), bei dem ein jeder Wert durch die Summe aller darunter liegenden Werte im ursprünglichen Histogramm definiert ist (vgl. ebd., S. 52). Im Fall einer Gleichverteilung

⁷Histogramme werden ebenfalls für die Darstellung anderer Daten verwendet, im folgenden Abschnitt wird jedoch ausschließlich auf die beschriebene Art Bezug genommen.

⁸Der Histogrammausgleich wird weiterhin als Histogrammäqualisation oder Histogrammeinebnung bezeichnet.

hätte die Funktion des kumulativen Histogramms dementsprechend einen linearen Anstieg, da von jedem Intensitätswert die gleiche Anzahl an Pixeln im Bild vorhanden ist. Um eine annähernde Gleichverteilung zu erreichen, müssen die Histogrammlinien so verschoben werden, dass sie im kumulativen Histogramm eine zumindest näherungsweise linear ansteigende Funktion bilden (vgl. ebd., S. 63). Diese Transformation kann nach Gonzalez und Woods (2006) analog der folgenden Gleichung erfolgen:

$$g'_{eq}(x, y) = \frac{G_{max}}{MN} \sum_{j=0}^{g(x,y)} n_j \quad (4.7)$$

mit g'_{eq} : aus Histogrammausgleich resultierendes Bild, n_j : Anzahl der Pixel mit Intensitätswert j , M : Höhe des Ausgangsbildes, N : Breite des Ausgangsbildes.

Wenngleich der Histogrammausgleich in vielen Situationen ein kontrastreicheres Bild zur Folge hat, kann er in bestimmten Fällen zu einem schlechteren visuellen Ergebnis führen. Kommt ein Grauwert oder ein kleiner Grauwertbereich in einem Bild sehr häufig vor, führt dies dazu, dass der Kontrast in den verbleibenden Bereichen durch Stauchung der Teilwertebereiche verschlechtert wird. Im ungünstigsten Fall resultiert daraus ein Informationsverlust, wenn im Histogramm benachbarte und wenig vorkommende Grauwerte auf den selben Wert abgebildet werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 4.5b zu sehen. Die Struktur der Dose im Bild ist nicht mehr zu erkennen, da alle in diesem Bereich vorliegenden Grauwerte auf den Maximalwert abgebildet wurden. Weiterhin ist erkennbar, dass das im Bild enthaltene Rauschen deutlich verstärkt wird. Da das Ergebnis ausschließlich vom Inhalt des Bildes abhängig ist, variieren die damit erzielbaren Ergebnisse stark. Bei Bilderfolgen ist demnach von einer Verwendung des Histogrammausgleiches abzuraten.



Abbildung 4.5: Aus einem Histogrammausgleich resultierender Informationsverlust: (a) Eingangsbild (b) Ergebnis des Histogrammausgleiches

Wie Steinbrecher (1993) erklärt, kann das Problem des Informationsverlustes durch einen

adaptiven Histogrammausgleich (AHE⁹) gelöst werden. Hier wird das Bild zunächst in gleich große Felder unterteilt, in denen jeweils ein normaler Histogrammausgleich vorgenommen wird. Der eigentliche Wert eines Pixels wird daraufhin anhand der Transformationsfunktion der vier nächstgelegenen Felder berechnet, wobei deren Einfluss in Abhängigkeit des Abstandes ihres Mittelpunktes zur Position des Pixels gewichtet wird. Der Einfluss eines Feldes ist dabei indirekt proportional zum Abstand des betreffenden Pixels, das bedeutet, seine Gewichtung nimmt mit wachsender Entfernung ab und die der anderen angrenzenden Felder zu. Durch die relative Gewichtung der verschiedenen Felder werden die Übergänge zwischen Nachbarbereichen geglättet. Zusammenfassend „wird [mit diesem Verfahren] lokal ein optimaler Kontrast erreicht“, während „sich häufig vor kommende Grauwerte nicht mehr negativ auf das Gesamtbild aus[wirken]“ (Steinbrecher 1993, S. 122). Das Ergebnis variiert dabei in Abhängigkeit der gewählten Feldgröße zur Unterteilung des Bildes. Das Resultat nähert sich dem normalen Histogrammausgleich an, wenn die Felder sehr groß gewählt werden, während bei einer sehr kleinen Feldgröße ebenfalls kleinste Grauwertänderungen und damit etwaiges Rauschen deutlich verstärkt werden (vgl. Steinbrecher 1993, S. 123; Pizer u. a. 1987, S. 358). Als optimale Größe für die Felder geben Pizer u. a. (1987) einen Bereich zwischen $\frac{1}{16}$ und $\frac{1}{64}$ der gesamten Bildgröße an, wobei der kleinste Wert nur gewählt werden soll, wenn relevante Strukturen in dieser Größenordnung im Bild enthalten sind. Während Pizer u. a. (1987) nur auf medizinische Bilder Bezug nehmen, ist anzunehmen, dass sich diese Richtlinien auf andere Graustufenbilder anwenden lassen. Steinbrecher (1993) fügt dem noch hinzu, dass in einem Feld mindestens so viele Bildpunkte enthaltend sein sollten, wie darstellbare Grauwerte zur Verfügung stehen, „[damit] die Häufigkeiten der einzelnen Grauwerte als repräsentativ anzusehen [sind] und die Schätzung der Grauwertverteilung aufgrund dieser Stichprobe [...] einigermaßen korrekt [ist]“ (Steinbrecher 1993, S. 123).

Während AHE in vielen Fällen bessere Ergebnisse als ein normaler Histogrammausgleich liefert, wird mit der stärkeren lokalen Kontrasterhöhung in jedem Fall im Bild vorkommendes Rauschen weiter verstärkt (vgl. Pizer u. a. 1987, S. 363). Dies kann besonders in sehr einheitlichen Gebieten auftreten, in denen der Intensitätsunterschied zwischen den Pixeln unwesentlich höher als der Rauschpegel ist. Um das Rauschen in einem solchen Fall nicht übermäßig zu verstärken, kann die Kontrastverstärkung limitiert werden. Dies wird als Kontrast-limitierter adaptiver Histogrammausgleich (CLAHE¹⁰) bezeichnet. Wie in Abbildung 4.6b zu erkennen, resultiert aus CLAHE eine im gesamten Bild einheitliche Kontrastverbesserung. Jedoch ist die damit einhergehende Verstärkung des Rauschens nicht gänzlich zu vermeiden. Durch eine stärkere Limitierung der Kontrastverstärkung wird

⁹Abkürzung aus dem Englischen für *Adaptive Histogram Equalization*.

¹⁰Abkürzung aus dem Englischen für *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*.

dieser Effekt weiter abgeschwächt, jedoch fällt damit ebenfalls die Kontrastverbesserung geringer aus.



Abbildung 4.6: Ergebnis eines Kontrast-limitierten adaptiven Histogrammausgleiches: (a) Eingangsbild (b) Ergebnis des Histogrammausgleiches

4.3.2.2 Rauschunterdrückung

Bilder mit starkem Rauschen, also zufälligen Schwankungen der Pixelwerte, können eine weitere Verarbeitung erschweren und die Leistungsfähigkeit von Algorithmen deutlich verringern. Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, haben Wärmebildkameras ein geringes SRV, was häufig zu starkem Rauschen in den Bildern führt. Durch die hohe Rauschanfälligkeit einiger Operatoren, besonders bei der Kantenerkennung (vgl. Burger und Burge 2006, S. 121; vgl. Steinbrecher 1993, S. 151 f.), ist eine vorherige Rauschunterdrückung oder Glättung¹¹ demzufolge unerlässlich.

Eine der ersten Ideen, um Rauschen in einem Bild zu reduzieren, ist die Mittelwertbildung in Pixelnachbarschaften (vgl. Buades, Coll und Morel 2011, S. 209). Diese Mittelwertbildung lässt sich als Filter beschreiben, da sie als gewichtete Summe der Pixelwerte in der Umgebung gesehen werden kann (vgl. Russ 2011, S. 208). Werden alle Pixel in einer quadratischen Umgebung gleich gewichtet, wird dieser Filter als Box-Filter und die daraus folgende Operation als Box-Blur¹² bezeichnet. Aufgrund seiner Eigenschaften ist der Box-Filter jedoch als schlechter Glättungsfilter zu sehen (vgl. Burger und Burge 2006, S. 99f.), da weiterhin hochfrequente Anteile des Bildes und damit ebenfalls Rauschen durchgelassen werden (vgl. Steinbrecher 1993, S. 51). Eine größere Filterregion kann die Rauschunterdrückung weiter verstärken, was jedoch zu einer größeren Unschärfe anderer Bildmerkmale führt (vgl. Russ 2011, S. 210). Durch unterschiedliche Gewichtung der

¹¹In vielen Operatoren wird bereits eine Glättung in der Filtermaske berücksichtigt, wodurch eine geringere Rauschanfälligkeit erzielt wird (vgl. Burger und Burge 2006, S. 148ff.).

¹²Im Deutschen ebenfalls als Box-Weichzeichner oder Feld-Weichzeichner bekannt.

Filterkoeffizienten kann die resultierende Unschärfe im Bild verringert und die Mittelwertbildung kontrollierter durchgeführt werden. Ein höherer Faktor im Zentrum des Filters verringert beispielsweise das Weichzeichnen, da der Einfluss des ursprünglichen Pixelwerts größer ist (vgl. ebd., S. 111). Isotropie, dass heißt die Richtungsunabhängigkeit, ist eine weitere wünschenswerte Eigenschaft für Glättungsfilter (vgl. Burger und Burge 2006, S. 100). Isotope Filter wirken in allen Richtungen und damit für alle Punkte mit identischem Abstand zum Zentrum stets gleichmäßig.

Gauß-Filter Als einer der Glättungsfilter, welcher die genannten Eigenschaften erfüllt und in der Bildverarbeitung häufig Verwendung findet, ist der Gauß-Filter anzuführen. Die Gewichte seiner Filtermatrix entsprechen entlang jeder Zeile, Reihe und Diagonalen durch den Mittelpunkt annähernd der Form einer Gauß-Funktion (vgl. Russ 2011, S. 212). Ein Vorteil des Gauß-Filters gegenüber komplexeren Verfahren zur Rauschunterdrückung ist, dass die Anwendung des Filters in zwei einfachere Berechnungen zerlegt und so erheblich beschleunigt werden kann (vgl. Russ 2011, S. 212). Hierbei wird nacheinander ein horizontaler und ein vertikaler eindimensionaler Gauß-Weichzeichner angewandt, wobei die Reihenfolge der Operationen irrelevant ist.

Obgleich mit dem Gauß-Filter eine effiziente Rauschunterdrückung erfolgen kann, werden gerade bei größeren Filterstärken hier ebenfalls die Nachteile der lokalen Mittelwertbildung ersichtlich. Lineare Glättungsfilter liegen der Annahme zu Grunde, dass alle Pixel einer Nachbarschaft zur selben Struktur gehören, was jedoch bei Übergängen wie Kanten oder Ähnlichem nicht der Fall ist (vgl. Russ 2011, S. 214). Dadurch werden mit steigender Filterstärke Details im Bild unschärfer und können von nachfolgenden Algorithmen unter Umständen nicht oder nur schwer erkannt werden.

Bei den angefertigten Aufnahmen zeigte der Gauß-Filter lediglich bei hohen Filterstärken eine ausreichend Rauschunterdrückung. Die hierbei auftretenden Nachteile sind bei einer weiteren Verarbeitung jedoch nicht vertretbar, wodurch ein komplexeres Verfahren zu bevorzugen ist, bei dem wichtige Bildmerkmale erhalten bleiben.

Non-Local Means Als vielversprechendes Verfahren ist das von Buades, Coll und Morel (2011) vorgestellte Non-Local Means (NLM) Denoising anzuführen. Die grundlegende Ansatz beruht auf der Idee der Selbstähnlichkeit innerhalb eines Bildes, das bedeutet, dass zu einem bestimmten Bildausschnitt viele weitere ähnliche Ausschnitte im selben Bild existieren, die zur Rauschreduzierung betrachtet werden können (vgl. Schacht 2014, S. 11f.). Ähnlich der zuvor vorgestellten Filter soll der Mittelwert möglichst ähnlicher Pixel gebildet werden, wobei diese jedoch nicht zwangsläufig in der näheren Nachbarschaft

liegen müssen. Die Ähnlichkeit der betreffenden Pixel wird nicht ausschließlich durch einen Vergleich der Intensitätswerte festgestellt, sondern durch Betrachtung eines Fensters um die Pixel herum (vgl. Buades, Coll und Morel 2011, S. 209). Gesucht werden demnach Pixel, deren Nachbarschaften möglichst ähnlich zu der des zu rekonstruierenden Pixels sind. Der Algorithmus für ein diskretes Bild ist nach Buades, Coll und Morel (2011) wie folgt definiert:

$$g'(p) = \frac{1}{C(p)} \sum_{q \in B(p,r)} g(q) w(p,q), \quad C(p) = \sum_{q \in B(p,r)} w(p,q) \quad (4.8)$$

mit p : zu verarbeitendes Pixel, $B(p,r)$: Nachbarschaft um Pixel p mit der Größe $(2r+1) \cdot (2r+1)$, q : beliebiges Pixel aus $B(p,r)$, $w(p,q)$: Gewichtungsfunktion in Abhängigkeit von p und q , $C(p)$: Normalisierungsfaktor.

Das in Gleichung 4.8 verwendete Gewicht $w(p,q)$ ist vom quadratischen euklidischen Abstand¹³ d^2 zwischen den Bildausschnitten $B(p,f)$ und $B(q,f)$ abhängig, welcher wie folgt berechnet wird:

$$d^2(B(p,f), B(q,f)) = \frac{1}{(2f+1)^2} \sum_{j \in B(0,f)} (g(p+j) - u(q+j))^2 \quad (4.9)$$

mit $d^2((B(p,f), B(q,f))$: quadratischer euklidischer Abstand zwischen $B(p,f)$ und $B(q,f)$, $B(p,f)/B(q,f)$: um p und q befindliche Bildausschnitte der Größe $(2f+1) \cdot (2f+1)$.

Die Berechnung der Gewichte $w(p,q)$ erfolgt anschließend analog folgender Gleichung:

$$w(p,q) = e^{-\frac{\max(d^2 - 2\sigma^2, 0.0)}{h^2}} \quad (4.10)$$

mit d^2 : quadratischer euklidischer Abstand zwischen $B(p,f)$ und $B(q,f)$, σ : Standardabweichung des Rauschens im Bild, h : in Abhängigkeit von σ gesetzter Filterparameter.

Auch wenn für die Berechnung eines Pixels theoretisch das gesamte Bild nach ähnlichen Bildpunkten durchsucht werden kann, so wird der zu betrachtende Bereich in der Praxis auf eine quadratische Nachbarschaft fester Größe limitiert (vgl. Buades, Coll und Morel 2011, S. 209). Für geringes und moderates Rauschen im Bild wird eine Fenstergröße von 21×21 Pixeln empfohlen, während bei größerem Rauschen eine Größe von 35×35 Bildpunkten zu wählen ist, um eine stärkere Rauschunterdrückung zu erzielen (vgl. ebd.).

¹³In der Bildverarbeitung gilt der quadratische euklidische Abstand als ein Maß der Ähnlichkeit zwischen Bildausschnitten. Je geringer der berechnete Abstand ausfällt, desto größer die Übereinstimmung. (vgl. Burger und Burge 2006, S. 413f.)

Mittlerweile existieren Varianten des NLM Algorithmus mit verschiedenen Optimierungen (vgl. OpenCV 2019(b)), die eine Berechnung beschleunigen. Da sich das prinzipielle Vorgehen nicht verändert und die Optimierungen zu keinem besseren Verständnis des Algorithmus führen, wird auf eine weitere Ausführung verzichtet.

4.3.2.3 Kantenerkennung

Laut Steinbrecher (1993) konzentrieren sich Menschen “beim Betrachten von Objekten sehr stark auf die Grenzen zwischen mehr oder minder homogenen Regionen” (Steinbrecher 1993, S. 137), wodurch Gegenstände häufig bereits an ihren groben Umrissen erkannt werden. Insofern die Temperaturunterschiede der Objekte ausreichend groß sind, entsprechen die erkannten Kanten häufig den physischen Umrissen der Gegenstände im Bild, wodurch „Kantendetektionsverfahren in der Bildverarbeitung eine bedeutende Rolle [haben]“ (ebd.). Durch eine Lokalisierung und Hervorhebung beziehungsweise Verstärkung von Kanten im Bild kann ein Betrachter womöglich bereits mehr Informationen über den aufgenommenen Raum gewinnen, als dies mit einem unverarbeiteten Wärmebild der Fall wäre. Zu beachten gilt jedoch, dass je nach Emissionsgrad der betrachteten Fläche ebenfalls durch Reflexionen hervorgerufene Kanten erkannt werden können.

Um Verfahren zur Kantenerkennung nachvollziehen zu können, muss zunächst eine Definition des Begriffs Kante im Zusammenhang mit digitalen Bildern erfolgen. In der Bildverarbeitung werden diejenigen Bereiche als Kante bezeichnet, an denen in einer bestimmten Richtung eine starke Änderung der Intensitätswerte auf kleinem Raum erfolgt (vgl. Burger und Burge 2006, S. 117). Die Änderung der Werte kann dabei sprunghaft oder stetig über mehrere Pixel hinweg erfolgen, weshalb sich verschiedene Modelle für das Profil einer Kante definieren lassen. In Abbildung 4.7 werden vier häufig verwendete ideale Kantenmodelle eines eindimensionalen Signals dargestellt.

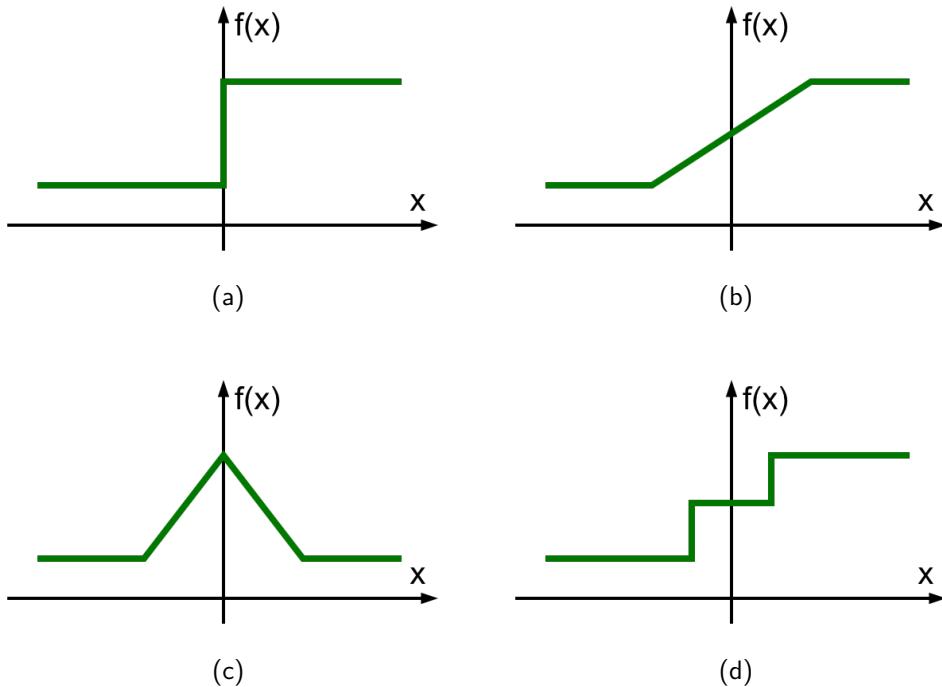


Abbildung 4.7: Profile ausgewählter idealer Kantenmodelle: (a) ideale Stufenkante, (b) ideale Rampenkante, (c) ideale Dachkante, (d) ideale Treppenkante (Eigene Darstellung, in Anlehnung an: Steinbrecher 1993)

In der Regel lassen sich reale im Bild vorkommende Kanten durch von Rauschen gestörte Varianten dieser Kantenmodelle beschreiben (vgl. Steinbrecher 1993, S. 137). Zusätzlich kann eine Kante aus Überlagerungen mehrerer dieser Formen bestehen, wodurch eine genaue Lokalisierung erschwert wird (vgl. ebd.).

Ein wichtiger Ansatz für die Bestimmung der Kantenstärke ist die erste Ableitung der Bildfunktion, da diese die auf die Distanz bezogene Stärke der Intensitätsänderung angibt. Da ein Bild jedoch aus diskreten Werten besteht und die Ableitung für diskrete Funktionen nicht definiert ist, kann lediglich eine Schätzung erfolgen. Die Ableitung einer kontinuierlichen Funktion an einer bestimmten Stelle kann ebenso als Anstieg der Tangente an dieser Stelle interpretiert werden. Wird das Bildsignal zunächst eindimensional betrachtet, also zum Beispiel entlang einer Bildzeile, kann der Anstieg in einem bestimmten Punkt unter Einbeziehung der direkten Nachbarwerte geschätzt werden. Der Anstieg einer Geraden durch die beiden Nachbarpunkte entspricht annähernd dem Anstieg der Tangente des dazwischen liegenden Punktes, wodurch dieser häufig als Schätzung für die erste Ableitung genügt. (vgl. Burger und Burge 2006, S. 117ff.)

Nach Burger und Burge (2006) lässt sich der Anstieg entlang einer Bildzeile an der Stelle x dementsprechend wie folgt berechnen:

$$\frac{df}{dx}(x) \approx \frac{1}{2}(f(x+1) - f(x-1)) \quad (4.11)$$

mit f : eindimensionale Bildfunktion entlang einer Bildzeile, $\frac{df}{dx}(x)$: erste Ableitung der Funktion f an der Stelle x , $f(x)$: Funktionswert der Funktion f an der Stelle x .

Die in Gleichung 4.11 angegebene Formel kann analog für die Berechnung des Anstiegs entlang der Bildspalten verwendet werden. Die Ableitung einer mehrdimensionalen Funktion entlang einer der Koordinatenrichtungen wird als partielle Ableitung bezeichnet (vgl. Burger und Burge 2006, S. 119). Der Vektor aus beiden partiellen Ableitungen an einer Stelle der Bildfunktion wird Gradientenvektor oder Gradient genannt (vgl. ebd.). Der Betrag des Gradienten ist richtungsunabhängig und findet daher in vielen Kanten-detectionsverfahren Verwendung (vgl. ebd.). Er gibt im Fall der Kanten detektion die Kantenstärke an und wird wie folgt berechnet:

$$E(x, y) = \sqrt{(D_x(x, y))^2 + (D_y(x, y))^2} \quad (4.12)$$

mit $E(x, y)$: Kantenstärke an der Stelle (x, y) , D_x/D_y : x - und y -Komponente des Gradienten.

Da in der Regel lediglich die relative Größe des Gradienten von Interesse ist, wird dessen Betrag häufig approximiert, um den benötigten Rechenaufwand zu minimieren (vgl. Steinbrecher 1993, S. 145). Zusätzlich lässt sich mithilfe der partiellen Ableitungen ebenfalls der Winkel des Gradienten, der in diesem Fall die Kantenrichtung angibt, nach folgender Gleichung bestimmen:

$$\Theta(x, y) = \arctan\left(\frac{D_y(x, y)}{D_x(x, y)}\right) \quad (4.13)$$

mit $\Theta(x, y)$: Kantenrichtung an der Stelle (x, y) , \arctan : inverse Tangensfunktion¹⁴.

Die Schätzung der Ableitung in Gleichung 4.11 lässt sich nach Burger und Burge (2006) als linearer Filter realisieren, indem die Koeffizientenmatrix $\frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ für die horizontale Komponente sowie die transponierte Matrix für die vertikale Komponente des Gradienten verwendet wird. Dieser Filter, der als einfacher symmetrischer Differenzoperator

¹⁴Die inverse Tangensfunktion ist lediglich auf zwei Quadranten beschränkt und der berechnete Winkel daher mehrdeutig. Für eine eindeutige Bestimmung muss die in vielen Programmiersprachen verfügbare inverse Tangensfunktion mit zwei Argumenten verwendet werden. (vgl. Burger und Burge 2006, S. 439)

bezeichnet wird, wirkt jedoch richtungsabhängig und besitzt eine hohe Anfälligkeit gegenüber Rauschen (vgl. Burger und Burge 2006, S. 120f.; vgl. Steinbrecher 1993, S. 148). Wie in Abschnitt 4.3.2.2 erwähnt, kann jedoch eine zusätzliche Glättung in der Filtermaske berücksichtigt werden.

Sobel-Operator Ein häufig verwendeter Filter zur Kantendetektion, der ebenfalls eine Glättung beinhaltet, ist der Sobel-Operator (vgl. Burger und Burge 2006, S. 149; vgl. Steinbrecher 1993, S. 123). Ähnlich dem Gaußfilter werden beim Sobelfilter die Pixel stärker berücksichtigt, die sich näher am zentralen Pixel befinden. Die Filtermasken des Sobel-Operators setzen sich aus einem einfachen Differenzoperator sowie einem senkrecht hierzu wirkenden eindimensionalen Gauß-Glättungsfilter zusammen (vgl. OpenCV 2019(c)). In horizontaler Richtung ergibt sich folgende Filtermatrix:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

Für die entsprechende Filtermaske in vertikaler Richtung muss die gezeigte Matrix transponiert werden. Aufgrund der Separierbarkeit lassen sich Glättung und Differenzoperator ebenfalls sequentiell durchführen, wodurch insgesamt weniger Rechenschritte notwendig sind (vgl. Burger und Burge 2006, S. 103f.). Infolge der Kommutativität linearer Faltungsoperationen ist die Reihenfolge der Berechnung hierbei irrelevant (vgl. ebd., S. 102f.).

Die Bestimmung des Gradienten ist mittels der in Gleichung 4.14 vorgestellten Filtermatrix jedoch insbesondere in Hinsicht des Winkelfehlers als ungenau zu sehen (vgl. ebd., S. 122; vgl. OpenCV 2019(c)). Aus diesem Grund schlägt Scharr (2000) die folgenden auf maximale Richtungsgenauigkeit des Gradienten optimierten Ableitungsfilter vor:

$$F_x = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 3 \\ 10 \\ 3 \end{bmatrix} = \frac{1}{32} \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 \\ -10 & 0 & 10 \\ -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

mit F_x : Ableitungsfilter in horizontaler Richtung, sowie

$$F_y = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} * \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \end{bmatrix} = \frac{1}{32} \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

mit F_y : Ableitungsfilter in vertikaler Richtung.

Der daraus resultierende Operator wird als optimierter Sobel-Operator oder Scharr-Operator bezeichnet (vgl. OpenCV 2019(c)).

Wie bereits erwähnt gibt der Betrag des Gradienten eines Bildpunktes Aufschluss über die Kantenstärke an dieser Stelle des Bildes. Wird die Kantenstärke mittels Gleichung 4.12 für alle Bildpunkte berechnet, so resultiert daraus ein Graustufenbild, in welchem stärkere Kanten heller dargestellt werden als weniger starke. Je heller ein Punkt in diesem Bild ist, desto größer ist demzufolge der Hinweis auf eine Kante an dieser Stelle. Weiterhin ist es möglich, Punkte mit geringen Hinweisen auf Kanten mithilfe eines Schwellwertverfahrens zu entfernen. Hierbei werden alle Pixel, deren Intensitätswerte unter einem definierten Schwellwert liegen, auf 0 gesetzt. In der Regel erfolgt beim Schwellwertverfahren eine Binarisierung, das bedeutet, dass die restlichen Werte auf den maximalen Wert gesetzt werden und so ein Binärbild entsteht (vgl. Burger und Burge 2006, S. 129). Um weiterhin zwischen starken und weniger starken Kanten unterscheiden zu können, werden die ursprünglichen Werte oberhalb des Schwellwertes jedoch beibehalten. Das Festlegen eines universellen Schwellwertes stellt jedoch eine Herausforderung dar. Unter Umständen bestehen nur sehr geringe Temperaturunterschiede zwischen den Objekten im Wärmebild, wodurch relevante Kanten aus dem Bild entfernt werden, wenn eine zu hohe Schwelle gewählt wird. Andererseits werden im Bild verbliebenes Rauschen sowie andere Störungen als Kante dargestellt, insofern ein zu geringer Schwellwert Verwendung findet. Aufgrund dieser Schwierigkeiten wird der Schwellwert für die Kantenerkennung anhand der verfügbaren Aufnahmen für die Umsetzung des praktischen Teils dieser Arbeit empirisch bestimmt.

Anschließend kann das Kantenbild alleinstehend angezeigt werden, insofern die enthaltenen Intensitätswerte im darstellbaren Wertebereich liegen. Ist dies nicht der Fall, muss zunächst eine Überführung der Werte analog Gleichung 4.1 erfolgen (vgl. Abschnitt 4.3.1).

Alternativ besteht die Möglichkeit, die Kanten im ursprünglichen Wärmebild mithilfe des erzeugten Kantenbildes zu verstärken. Dadurch bleiben relative Temperaturunterschiede weiterhin visuell unterscheidbar, während unterschiedliche Objekte durch die Kantenverstärkung deutlicher voneinander abgegrenzt werden. Die Verstärkung erfolgt durch Subtraktion des Kantenbildes vom ursprünglichen Wärmebild und kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$I'(x, y) = I(x, y) - \omega \cdot K(x, y) \quad (4.17)$$

mit I : ursprüngliches Bild, I' : kantenverstärktes Bild, $K(x, y)$: Kantenbild von I , ω : positiver Gewichtungsfaktor.

Der Gewichtungsfaktor ω steuert hierbei die Verstärkungswirkung, wobei mit $\omega = 0$ keine Verstärkung stattfindet. Mit dieser Methode erfolgt in sehr dunklen beziehungsweise kalten Bereichen jedoch eine weniger offensichtliche Verstärkung der Kanten, da die Subtraktion lediglich zu einer Reduzierung der Intensitäten im Kantenbereich führt. Befinden sich die betreffenden Werte bereits sehr nah an der unteren Grenze des Wertebereiches, können die Werte weniger stark gesenkt werden, als dies bei einer ähnlich starken Kante in einem helleren Bereich des Bildes der Fall wäre. Zur Lösung dieses Problems kann eine Fallunterscheidung vorgenommen werden, bei welcher unterhalb eines festgelegten Schwellwertes eine Addition an Stelle der Subtraktion durchgeführt wird. Hieraus resultiert folgende Gleichung für die Kantenverstärkung:

$$I'(x, y) = \begin{cases} I(x, y) + \omega \cdot K(x, y) & \text{falls } I(x, y) < R_S \\ I(x, y) - \omega \cdot K(x, y) & \text{falls } I(x, y) \geq R_S \end{cases} \quad (4.18)$$

mit R_S : Schwellwert für Operatorenwechsel.

Im Fall, dass sich eine Kante sowohl ober- als auch unterhalb des Schwellwertes bewegt, entstehen an den Übergängen zwischen mittels Subtraktion verringerten und durch Addition erhöhten Intensitätswerten sichtbare Brüche. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Verbesserung der Wahrnehmung von Kanten hierdurch nicht beeinflusst wird. Abgesehen davon stellt die Fallunterscheidung aufgrund des Vergleiches mit dem Schwellwert einen höheren Rechenaufwand dar, wodurch zu überprüfen ist, ob dies eine bessere Kantenverstärkung in dunkleren Bereichen rechtfertigt.

4.3.3 Hervorhebung von Temperaturextrema

In vielen Situationen ist es hilfreich, Objekte oder Bereiche zu erkennen, die entweder sehr hohe oder vergleichsweise niedrige Temperaturen gegenüber ihrer Umgebung aufweisen. Um eine schnelle Identifikation dieser Bereiche zu begünstigen, erscheint eine Hervorhebung von Temperaturextrema hilfreich. Es kann jedoch vorkommen, dass die Extrema in einem Bild sehr nah an der Umgebungstemperatur liegen und so unter Umständen von geringem Interesse sind. Um den Benutzer demnach nicht mit unnötigen Informationen zu belasten, ist die Festlegung von Temperaturschwellen, ab welchen die Hervorhebung stattfindet, förderlich.

Um eine spätere visuelle Anpassung der identifizierten Bereiche zu erleichtern, ist es zweckdienlich, diese vorab jeweils vom Bild zu separieren. Zusätzlich können die Bilder für Temperaturmaxima und -minima nach einer Trennung unabhängig voneinander eingeschaltet werden. Hierfür wird eine Kopie des zu betrachtenden Bildes angelegt

und anschließend der irrelevante Bereich entfernt. Das bedeutet, dass alle Werte, die über beziehungsweise unter einer festgelegten Grenze liegen, erhalten bleiben und die verbleibenden Werte auf 0 gesetzt werden. Für die spätere Verarbeitung ist es weiterhin relevant Masken, der identifizierten Bereiche vorliegen zu haben, welche sich wie folgt ermitteln lassen:

$$M_{high}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{falls } g(x, y) < T_{high} \\ 1 & \text{falls } g(x, y) \geq T_{high} \end{cases} \quad (4.19)$$

mit $M_{high}(x, y)$: resultierender Wert der Maxima-Binärmaske an der Stelle (x, y) , T_{high} : Grenze für Temperaturmaxima, sowie

$$M_{low}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{falls } g(x, y) \leq T_{low} \\ 0 & \text{falls } g(x, y) > T_{low} \end{cases} \quad (4.20)$$

mit $M_{low}(x, y)$: resultierender Wert der Minima-Binärmaske an der Stelle (x, y) , T_{low} : Grenze für Temperaturminima. Die Bilder der Temperaturextrema lassen sich anschließend mittels folgender Gleichungen berechnen:

$$g_{high}(x, y) = M_{high}(x, y) \cdot g(x, y) \quad (4.21)$$

mit $g_{high}(x, y)$: resultierender Werte des Maxima-Bildes an der Stelle (x, y) , sowie

$$g_{low}(x, y) = M_{low}(x, y) \cdot g(x, y) \quad (4.22)$$

mit $g_{low}(x, y)$: resultierender Werte des Minima-Bildes an der Stelle (x, y) .

Bei den Ergebnisbildern der Temperaturextrema handelt es sich weiterhin um Graustufenbilder mit nur einem Kanal, das heißt, dass die Bilder zunächst in mehrkanalige Farbbilder umgewandelt werden müssen, um Bereiche farblich hervorheben zu können. Werden die Werte des Graustufenbildes in alle Kanäle eines leeren RGB-Bildes kopiert, so ist das resultierende Bild zunächst weiterhin als Graustufenbild wahrzunehmen. Mittels Veränderung der einzelnen Kanäle lässt sich das Ergebnis anschließend farblich anpassen. Wird nur ein einzelner Kanal betrachtet, so repräsentieren die einzelnen Werte die Intensität der jeweiligen Farbe von Schwarz bis zur vollständigen Sättigung. Da es sich bei RGB um ein additives Farbsystem handelt (vgl. Burger und Burge 2006, S. 233), wird das Bild in den Farbabstufungen eines Kanals dargestellt, insofern man alle Pixel der anderen beiden Farbkanäle auf 0 setzt. Die mittels Gleichung 4.21 und 4.22 ermittelten Bilder

der Extrema müssen demzufolge jeweils in nur einem Kanal hinterlegt und wieder ins ursprüngliche Bild¹⁵ kopiert werden, um eine farbliche Hervorhebung zu erzielen. Vorteil gegenüber einer binären Hervorhebung ist, dass die Intensitätsabstufungen in den farbigen Bereichen erhalten bleiben. Allerdings handelt es sich hierbei nur um einen Teilbereich des ursprünglichen Wertebereiches, wodurch die möglichen Abstufungen der gewählten Farben eingeschränkt sind. Mittels Gleichung 4.2 lassen sich die in den Teilbildern vorkommenden Werte auf den vollständigen darstellbaren Wertebereich abbilden. Anschließend können den einzelnen Bildern unterschiedliche Farbbereiche zugeordnet werden.

Als Farben für Temperaturminima eignen sich Abstufungen von Blau, da mit dieser Farbe die Adjektive kalt oder kühl assoziiert werden (vgl. de Groot u. a. 2018, S. 9). Werden die Werte von g_{low} in den Blau-Kanal geschrieben, werden die kältesten Temperaturen zunächst dunkler und T_{low} als gesättigtes Blau dargestellt. Intuitiver erscheint eine umgekehrte Darstellung, bei welcher die tiefsten Temperaturen als intensives Blau erscheinen. Um dies zu erreichen, kann eine bitweise Invertierung des blauen Kanals durchgeführt werden. Dabei werden allerdings die zuvor mittels Gleichung 4.22 auf 0 gesetzten Pixel auf den maximalen im Bild möglichen Wert gesetzt. Die überflüssigen Werte lassen sich durch erneute elementweise Multiplikation mit der Binärmasken M_{low} analog Gleichung 4.22 entfernen.

Mit Rottönen werden häufig Hitze oder Wärme assoziiert (vgl. de Groot u. a. 2018, S. 11), wodurch sich diese Farben besonders für die Darstellung der Temperaturmaxima eignen. Viele Kameramodelle sehen eine weitere Unterteilung des Bereiches hoher Temperaturen vor, wobei ein Übergang von Gelb zu Rot üblich ist (vgl. Keller u. a. 2012, S. 40). Somit lassen sich extreme Temperaturen von weniger kritischen Temperaturen visuell unterscheiden. Für eine Umsetzung dieser farblichen Unterteilung muss eine weitere Grenze für kritische Temperaturen eingeführt werden, ab welcher der Übergang von Gelb zu Rot beginnen soll. Anschließend kann der Bereich für extreme Temperaturen analog Gleichung 4.19 und Gleichung 4.21 identifiziert und separiert werden. Die resultierende Binärmasken wird nachfolgend als M_{crit} und das resultierende Teilbild als g_{crit} bezeichnet.

Um einen gleichmäßigen Übergang vom maximal durch Graustufen darstellbaren Intensitätswert zum farblich hervorgehobenen Bereich der Temperaturmaxima zu erzielen, muss ein Farbverlauf von Weiß zu Gelb erfolgen. Im RGB-Farbraum wird vollständig gesättigtes Gelb mittels eines maximalen Anteil vom Rot- sowie Grün-Kanal erzielt, wobei der Blau-Kanal leer bleibt. Weiß entsteht durch ein Wertemaximum in allen drei Kanälen. Um demzufolge einen Farbverlauf von Weiß zu Gelb zu erzeugen, muss der Anteil vom Blau-Kanal mit steigenden Intensitätswerten im ursprünglichen Bild verringert werden.

¹⁵Bei dem Zielbild muss es sich bereits um ein dreikanaliges Graustufenbild handeln.

Hierfür werden alle Werte in g_{crit} mittels Gleichung 4.2 in den vollständigen darstellbaren Bereich gebracht, wobei T_{high} und T_{crit} als Grenzen für den ursprünglichen Bereich eingesetzt werden. Anschließend werden alle Werte bitweise invertiert und im Blau-Kanal hinterlegt, während der Rot- und Grün-Kanal für alle Pixel auf den Maximalwert des Wertebereiches gesetzt werden.

Für den angrenzenden Farbverlauf von Gelb zu Rot zwischen T_{crit} und dem maximalen im Bild vorkommenden Wert T_{max} muss der Grün-Kanal mit steigenden Intensitätswerten verringert werden. Zunächst werden die in g_{high} enthaltenden Werte auf den vollständigen Wertebereich abgebildet, indem Gleichung 4.2 mit T_{crit} und T_{max} als Grenzen für den ursprünglichen Bereich angewandt wird. Nachfolgend müssen die Werte invertiert und in den Grün-Kanal hinterlegt werden, während für alle Pixel der Blau-Kanal auf 0 und der Rot-Kanal auf den Maximalwert gesetzt werden.

Im Anschluss lassen sich die Bilder der Temperaturextrema wieder im ursprünglichen Wärmebild integrieren. Die Kombination der Bilder lässt sich mittels folgender Gleichung vornehmen:

$$g'(x, y) = g(x, y) \cdot (\bar{M}_{low} + \bar{M}_{high}) + g_{low}(x, y) \cdot M_{low} + g'_{high}(x, y) \cdot M_{high} \quad (4.23)$$

mit $\bar{M}_{low}/\bar{M}_{high}$: invertierte Binärmasken der Extrema, wobei

$$g'_{high}(x, y) = g_{high}(x, y) \cdot \bar{M}_{crit} + g_{crit}(x, y) \cdot M_{crit} \quad (4.24)$$

mit g'_{high} : kombiniertes Bild aus g_{high} und g_{crit} , \bar{M}_{crit} : invertierte Binärmaske des kritischen Temperaturbereiches. Hierbei ist es erforderlich, dass alle Bilder drei Kanäle aufweisen und die Berechnung demnach für jeden Kanal erfolgt.

Unter der Voraussetzung, dass zusätzlich alle Werte im Quellbild, die zwischen den Temperaturextrema liegen, auf den gesamten darstellbaren Graubereich abgebildet werden, sowie 8 Bit pro Kanal Verwendung finden, resultiert aus der Zusammenführung der Bilder die in Abbildung 4.8 dargestellte Farbpalette.

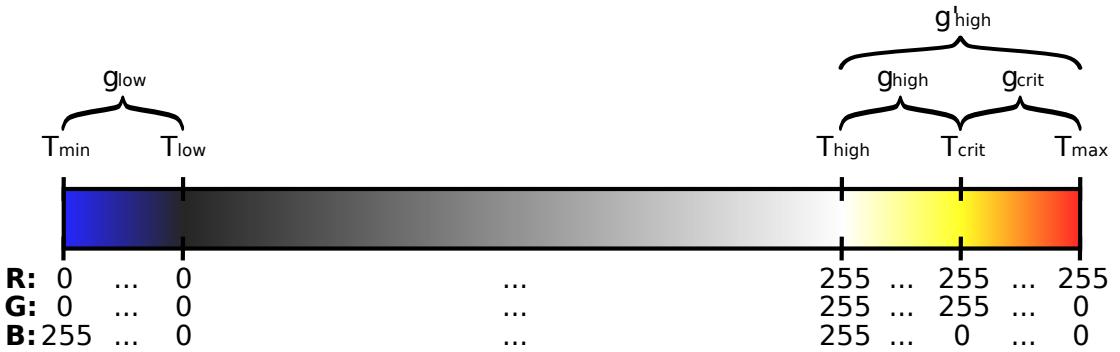


Abbildung 4.8: Farbpalette mit Temperaturextrema (Eigene Darstellung)

4.3.4 Hervorhebung spezifischer Temperaturen

Besonders in Hinblick auf das Auffinden von zu rettenden Personen kann es von Vorteil sein, dass dem Anwender des Systems eine bestimmte Temperatur, im speziellen Anwendungsfall die Körpertemperatur eines Menschen, besonders hervorgehoben wird. Zu beachten ist hierbei, dass nur der unverdeckte Teil eines Körpers erkannt werden kann. Demnach gilt zu untersuchen, ob die Ausweitung des aufzufindenden Temperaturbereiches einen Vorteil bei der Auffindung von Personen bringt, die von Kleidung und anderen Textilien verdeckt sind. Durch die Ausweitung des Bereiches kann es jedoch zu häufigeren Fehlinterpretationen kommen, wodurch zu überlegen ist, ob eine Unterscheidung in mehrere Bereiche günstig ist. Denkbar ist eine deutlichere Hervorhebung von Werten, die sich sehr nahe der Körpertemperatur bewegen, sowie einen weiteren gesondert hervorgehobenen Temperaturbereich mit erweiterten Grenzen. Der Anwender kann sich so bei der Suche beispielsweise zunächst auf den ersten Bereich konzentrieren und den zweiten Bereich lediglich beim weiteren manuellen Absuchen des Raumes priorisieren.

Die Hervorhebung eines Bereiches erfolgt allgemein ähnlich der in Abschnitt 4.3.3 vorgestellten Methode. Das bedeutet, es ist zunächst notwendig, den gewünschten Bereich vom ursprünglichen Bild zu separieren. Für die Binärmaske werden jedoch, anders als bei der Bestimmung der Extrema, zwei Grenzen verwendet, da sich die betreffenden Werte nicht ausschließlich am Rand des Wertebereiches bewegen. Die Maske lässt sich wie folgt berechnen:

$$M_r(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{falls } g(x, y) < T_{rLo} \\ 1 & \text{falls } T_{rLo} \leq g(x, y) \leq T_{rHi} \\ 0 & \text{falls } g(x, y) > T_{rHi} \end{cases} \quad (4.25)$$

mit $M_r(x, y)$: resultierender Wert der Binärmaske an der Stelle (x, y) , T_{rLo} : untere Grenze

des hervorzuhebenden Bereiches, T_{rHi} : obere Grenze des hervorzuhebenden Bereiches. Für eine einheitliche Einfärbung ist keine weitere Berechnung erforderlich, da den erkannten Pixeln im ursprünglichen Bild mithilfe von M_r direkt eine gewünschte Farbe zugewiesen werden kann. Daraus resultieren jedoch harte Übergänge an den Grenzen sowie der Verlust von visuellen Temperaturdifferenzen im erkannten Bereich. Ist ein sanfterer Übergang erforderlich, kann ein Bild g_r , welches nur den ausgewählten Bereich enthalten soll, durch elementweise Multiplikation des ursprünglichen Bildes mit der berechneten Maske M_r ermittelt werden. Aufgrund der Tatsache, dass das menschliche Auge auf grünes Licht am empfindlichsten reagiert (vgl. Russ 2011, S. 93f.), eignet sich die Farbe Grün besonders für die Hervorhebung relevanter Bereiche im Bild. Insofern kein erweiterter Bereich zum Einsatz kommt, bietet sich ein Farbverlauf vom ursprünglichen Grauwert T_{rLo} über vollständig gesättigtes Grün bis hin zum ursprünglichen Grauwert T_{rHi} . Vollständiges Grün befindet sich dabei in der Mitte des separierten Wertebereiches, sprich bei $T_{rMe} = T_{rLo} + \frac{(T_{rHi} - T_{rLo})}{2}$. Demzufolge steigt die Intensität im Grün-Kanal zunächst an und fällt im Anschluss wieder, wodurch eine erneute Unterteilung des ausschließlich steigenden Wertebereiches bei T_{rMe} vorzunehmen ist. Die hieraus resultierenden Bilder g_{r1} und g_{r2} können somit unabhängig voneinander in den gewünschten Bereiche transformiert werden. Da eine ausführliche Beschreibung der nötigen Transformationen bereits in Abschnitt 4.3.3 erfolgte, sollen in Abbildung 4.9 lediglich die resultierenden Werte¹⁶ für ein RGB-Bild mit 24 Bit (8 Bit pro Kanal) sowie die daraus hervorgehende Farbpalette aufgezeigt werden.

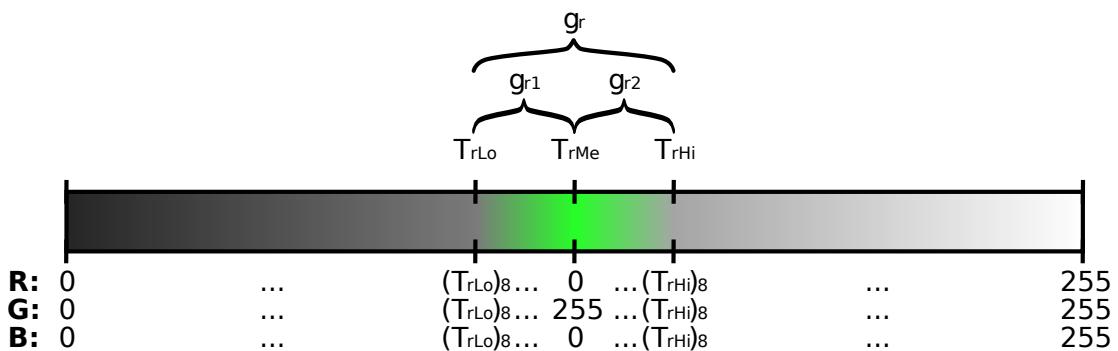


Abbildung 4.9: Farbpalette mit hervorgehobenem Bereich (Eigene Darstellung)

Um einen erweiterten Temperurbereich separat hervorheben zu können, müssen Werte ober- sowie unterhalb des eigentlichen Bereiches vom ursprünglichen Bild separiert werden. Für eine Umsetzung ist die Einführung zusätzlicher Grenzen notwendig, die nachfolgend als T_{extLo} und T_{extHi} bezeichnet werden. Anschließend wird Gleichung 4.25 mit den

¹⁶Mit $(p)_8$: resultierender Intensitätswert von p bei Abbildung des vollständigen ursprünglichen Wertebereiches auf den durch 8 Bit darstellbaren Bereich von 0 bis 255.

Grenzen T_{extLo} und T_{rLo} für den unteren erweiterten Bereich sowie T_{extHi} und T_{rHi} für den oberen erweiterten Bereich angewandt und die Werte jeweils in den neuen Bildern g_{extLo} und g_{extHi} abgelegt.

Der erweiterte Bereich soll in der Farbe Cyan, also einer Kombination aus gleichen Anteilen von Grün und Blau, dargestellt werden. Für einen sanften Übergang zwischen Grauwerten im ursprünglichen Bild und dem markierten Bereich, müssen Farbverläufe von T_{extLo} bis T_{rLo} sowie von T_{rHi} bis T_{extHi} erzeugt werden, wobei T_{rLo} sowie T_{rHi} gesättigtes Cyan und T_{extLo} sowie T_{extHi} ihre ursprünglichen Grauwerte zugewiesen bekommen. Hierfür müssen ebenfalls die Farbwerte in g_r angepasst werden, da die Grenzen T_{rLo} und T_{rHi} in Cyan dargestellt werden und so zusätzlich ein Übergang von Cyan zu Grün erforderlich ist. Die notwendigen Transformationen unterscheiden sich ebenfalls nur geringfügig von den Berechnungen in Abschnitt 4.3.3, wodurch auf eine genaue Ausführung verzichtet wird. Die vollständige resultierende Farbpalette ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

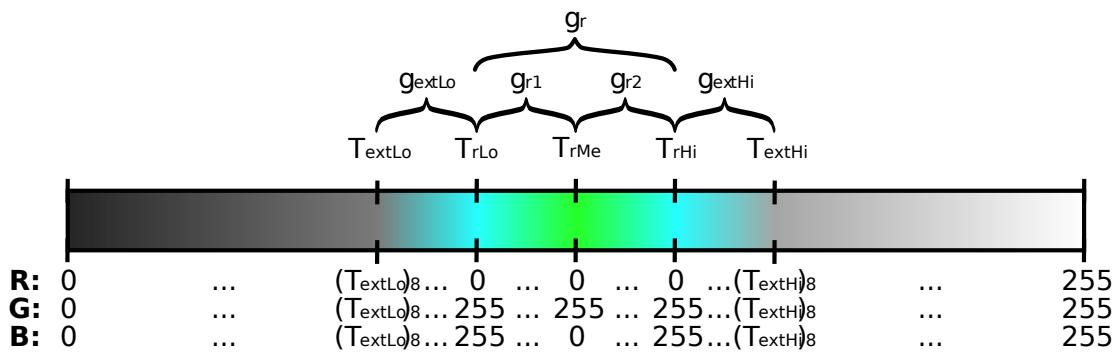


Abbildung 4.10: Farbpalette mit erweitertem hervorgehobenem Bereich (Eigene Darstellung)

4.3.5 Temperaturmessung definierter Bereiche

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, kann es unter Umständen hilfreich sein, Temperaturmessungen an einem bestimmten Punkt vorzunehmen. Hierzu muss ein dem Anwender bekannter Punkt des Bildes ausgewertet und die gemessene Temperatur kenntlich gemacht werden. Da eine manuelle Setzung eines zu messenden Punktes im Einsatzfall als eher unpraktisch einzuschätzen ist, erscheint die Benutzung des Bildmittelpunktes zur Messung sinnvoll. Wird der Messpunkt zusätzlich markiert, kann der Benutzer durch einfache Ausrichtung der Kamera den zu messenden Bereich anvisieren. Die Temperatur kann dann als Zahlenwert im Bild ausgegeben werden.

Aufgrund der Tatsache, dass ein digitales Bild normalerweise aus einer geraden Anzahl an

Zeilen und Spalten besteht¹⁷, wird der Mittelpunkt eines Bildes nicht von einem einzelnen Bildpunkt repräsentiert. Um den Wert in der Mitte eines Bildes zu bestimmen, muss also der Mittelwert der vier zentralen Pixel gebildet werden. Im Fall einer Wärmebildkamera im Feuerwehreinsatz ist in der Regeln kein einzelner Bildpunkt von Interesse, sondern die Temperatur einer bestimmten Fläche, wodurch der Bildbereich, von dem der Mittelwert gebildet werden muss, noch erweitert werden kann. Hinzu kommt, dass die Messung eines einzelnen Bildpunktes aufgrund von etwaigen defekten Pixeln, starkem Rauschen, Reflexionen oder ungenauen Optiken ohnehin als ungenau einzuschätzen ist (vgl. FLIR Systems 2018). FLIR Systems (2018) schlägt einen Bereich von mindestens drei mal drei Pixeln vor, um eine annähernd genaue Messung durchführen zu können. Der Mittelwert eines beliebig großen Bereiches in der Mitte des Bildes lässt sich wie folgt berechnen:

$$p_{mean} = \sum_{y=j}^{j+(m-1)} \sum_{x=i}^{i+(n-1)} p(x, y) \quad (4.26)$$

mit m : Höhe des zu betrachtenden Bereiches, n : Breite des zu betrachtenden Bereiches, $j = \frac{M}{2} - \frac{m}{2}$, $i = \frac{N}{2} - \frac{n}{2}$.

Letztendlich wurde sich für einen Bildausschnitt von 10 mal 10 Pixeln entschieden. Grund hierfür ist die vergleichsweise hohe Anzahl an Bildpunkten der im Laufe der Arbeit angefertigten Aufnahmen. Dementsprechend nimmt der Ausschnitt nur einen kleinen Teil des Gesamtbildes ein. Weiterhin senkt die Mittelwertbildung über einen größeren Bereich den Einfluss von Bildstörungen auf die Temperaturmessung. Durch die zusätzliche Anwendung einer Binärmaske kann der Messbereich weiter verfeinert oder bei Bedarf verkleinert werden. Besonders für den Fall, dass Wärmebilder mit wenigen Bildpunkten verarbeitet werden sollen, füllt ein Bereich von 10 mal 10 Pixeln unter Umständen einen zu großen Teil des Bildes aus, wodurch kleinere Strukturen weniger genau gemessen werden können.

¹⁷Dem Verfasser der vorliegenden Arbeit ist keine Kamera bekannt, die Bilder mit einer ungeraden Anzahl an vertikalen oder horizontalen Pixeln liefert. Ein Bild mit diesen Eigenschaften kann jedoch in der Bildbearbeitung durch Verkleinern oder Zuschneiden entstehen.

Aufgrund der hohen Anzahl an Bildpunkten, soll folgende Maske für die Messung verwendet werden:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.27)$$

Die runde Form der Maske wurde gewählt, damit eine Messung an Übergängen von kleineren runden Strukturen präziser vorgenommen werden kann. Da jedoch anzunehmen ist, dass während eines Feuerwehreinsatzes in der Regel keine Messungen von sehr kleinen Strukturen vorgenommen werden, ist gerade bei kleineren als der hier gezeigten Maske eine quadratische Form als ausreichend einzuschätzen.

Der mithilfe von Gleichung 4.26 ermittelte Wert ist im Anschluss zur Anzeige zu bringen. Da ein Kamerasystem in der Regel mit einem einzelnen Display ausgestattet ist, eignet sich eine direkte Überlagerung des Wertes in Textform auf dem anzuzeigenden Bild. Um die Werte sowohl vor dunklem sowie hellem Hintergrund erkennbar zu gestalten, werden die zur Anzeige verwendeten Zeichen mit einem von der Schriftfarbe verschiedenen Rand versehen.

Wie in Abbildung 4.11 zu sehen, ist mit einer weißen Schrift mit schwarzem Rand stets eine gute Erkennbarkeit gewährleistet. Um die Sicht des Benutzers nicht einzuschränken, wird für die Platzierung der Werte die linke obere Ecke des Bildes verwendet.

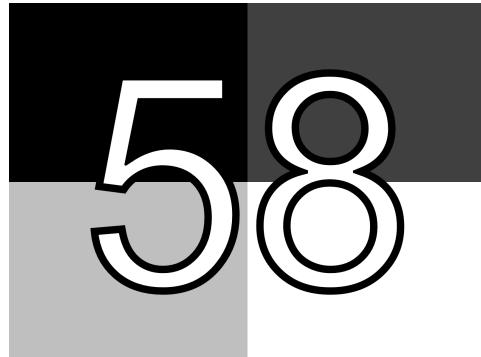


Abbildung 4.11: Erkennbarkeit umrandeter Schriftzeichen vor hellem sowie dunklem Hintergrund (Eigene Darstellung)

Wie bereits erwähnt kann die zusätzliche Platzierung einer Markierung im Bereich des Messpunktes die Ausrichtung der Kamera für eine Messung erleichtern. Hierfür kann eine bereits als Grafik vorliegende Markierung direkt über das anzuseigende Bild gelegt werden. Zu dem Zweck, ebenfalls komplexere Formen als Markierung darstellen zu können, soll ebenfalls die Option bestehen, die Markierung durch eine Maske zu verfeinern. Die Maske lässt sich beispielsweise im Alpha-Kanal einer als Datei vorliegenden Grafik der Markierung oder als separates Binärbild hinterlegen. Ähnlich der zur Temperaturanzeige verwendeten Schrift, wird eine weiße Markierung mit schwarzem Rand verwendet.

Emissionsgradkorrektur Wie bereits in Kapitel 2 angeführt ergibt die Temperaturmessung mithilfe einer Wärmebildkamera nur dann korrekte Werte, wenn der Emissionsgrad der zu messenden Oberfläche bekannt ist und in der Kamera eingestellt wird. Eine genaue Einstellungen des Emissionsgrades während des Feuerwehreinsatzes ist jedoch als impraktikabel anzusehen, da dies wertvolle Zeit in Anspruch nimmt und die Bedienung der Geräte mit Schutzhandschuhen eine zusätzliche Hürde darstellt. Die Messung ergibt demzufolge unter Umständen eine deutlich geringere Temperatur als tatsächlich vorliegt. Wie weit die tatsächliche Temperatur bei einem falsch eingestellten Emissionsgrad abweichen kann, ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Während eine Messung mit einem Emissionsgrad von 1,0 unbedenkliche 40 °C ergibt, ist die tatsächliche Temperatur eines Objektes mit einem Emissionsgrad von 0,1 etwa 132 °C und damit fast 100 K höher.

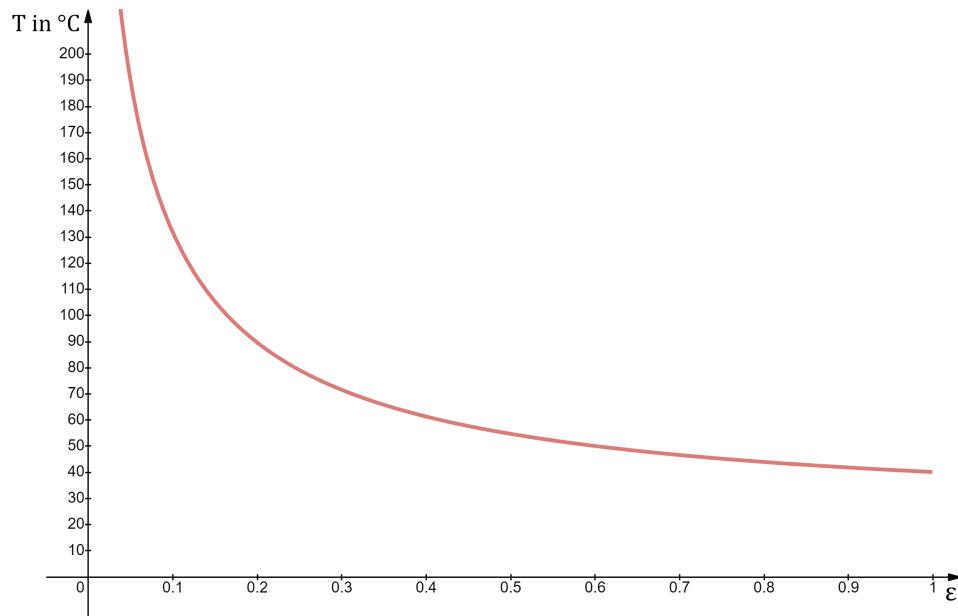


Abbildung 4.12: Reale Temperatur in Abhängigkeit des Emissionsgrades bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C (Eigene Darstellung)

Im Fall einer Fehleinschätzung der Temperatur von tragenden Komponenten kann es zu unvorhergesehenen Konstruktionseinstürzen kommen, da zum Beispiel Stahl ab etwa 500 °C im Vergleich zu üblichen Temperaturen lediglich die Hälfte seiner Tragfähigkeit besitzt (vgl. Kemper 2015, S. 26). Obgleich eine situationsabhängige Lageeinschätzung durch den Benutzer der Kamera in jedem Fall notwendig ist, ist eine Unterstützung durch Anzeige von Temperaturen im Fall eines geringeren Emissionsgrades als hilfreich zu beurteilen, um etwaiges Zögern zu vermeiden und gegebenenfalls wertvolle Zeit einzusparen. Hierfür soll unterhalb der in der oberen rechten Ecke des Bildes platzierten ausgelesenen Temperatur ein zusätzlicher kleiner dargestellter Wert eingeblendet werden, der die Temperatur bei Verwendung eines geringeren Emissionsgrades angibt. Der verwendete Emissionsgrad ist hierbei vorab einstellbar, wobei ein möglichst gering gewählter Wert zu bevorzugen ist, um einen möglichst ungünstigen Fall bei der Einschätzung der Situation berücksichtigen zu können. Zum derzeitigen Zeitpunkt kann keine Aussage darüber getroffen werden, welcher Emissionsgrad hierfür als günstig anzusehen ist. Da einige Metalloberflächen einen Emissionsgrad unterhalb von 0,1 aufweisen können, wird zunächst ein fester Wert von 0,05 vorgeschlagen.

Im Fall eines Emissionsgrades kleiner 1 wird nicht die gesamte durch die Kamera detektierte Wärmestrahlung vom Körper selbst emittiert, sondern ebenfalls die Wärmestrahlung der Umgebung, welche am Objekt reflektiert wird (vgl. Apogee Instruments o.D., S. 1).

Daraus resultiert nach Apogee Instruments (o.D.) folgende Gleichung für die gesamte vom Detektor gemessene Strahlungsenergie:

$$E_S = \varepsilon \cdot E_O + (1 - \varepsilon) \cdot E_U \quad (4.28)$$

mit E_S : vom Sensorelement detektierte Strahlungsenergie, E_O : von der Objektoberfläche emittierte Strahlungsenergie, E_U : von der Umgebung emittierte Strahlungsenergie, ε : spezifischer Emissionsgrad der Objektoberfläche. Mithilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes lässt sich emittierte Energie der Wärmestrahlung in Abhängigkeit der Temperatur des Körpers in folgender Weise ausdrücken:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (4.29)$$

mit E : abgestrahlte Energie, σ : Stefan-Boltzmann-Konstante ($5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$), T : Temperatur in Kelvin. Mittels Substitution ergibt sich aus Gleichung 4.28 demnach:

$$\sigma T_S^4 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_O^4 + (1 - \varepsilon) \cdot \sigma \cdot T_U^4 \quad (4.30)$$

mit T_S : vom Sensor gemessene Temperatur in Kelvin, T_O : Objekttemperatur in Kelvin, T_U : Umgebungstemperatur in Kelvin. Eine Umstellung nach T_O ergibt schließlich:

$$T_O = \sqrt[4]{\frac{T_S^4 - (1 - \varepsilon) \cdot T_U^4}{\varepsilon}}. \quad (4.31)$$

Mithilfe der hergeleiteten Gleichung 4.31 lässt sich aus der von der Kamera gemessenen Temperatur die reale Temperatur eines Objektes in Abhängigkeit seines Emissionsgrades und der Umgebungstemperatur berechnen. Abbildung 4.12 zeigt den Funktionsverlauf von Gleichung 4.31 in Abhängigkeit von ε , bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C ($T_U = 296,15$ K) und einer gemessenen Temperatur von 40 °C ($T_S = 313,15$ K).

Angesichts der je nach Einsatz variierenden Umgebungstemperaturen, kann für T_U kein fester Wert gewählt werden. Bereits zwischen Decke und Boden ein und des selben Raumes können starke Temperaturdifferenzen auftreten, da die aufsteigende heiße Luft eines Wohnungsbrandes obere Bereiche stärker erwärmt. Es ist demnach in der Regel nicht möglich, einen klar definierten Wert für die Umgebungstemperatur zu finden. Als Näherung soll der in Unterabschnitt 4.3.2.1 für die Kontrastanpassung vorgeschlagene Temperaturmittelwert T_{mean} aus Gleichung 4.6 verwendet werden.

4.4 Resultierender Ablauf der Verarbeitung

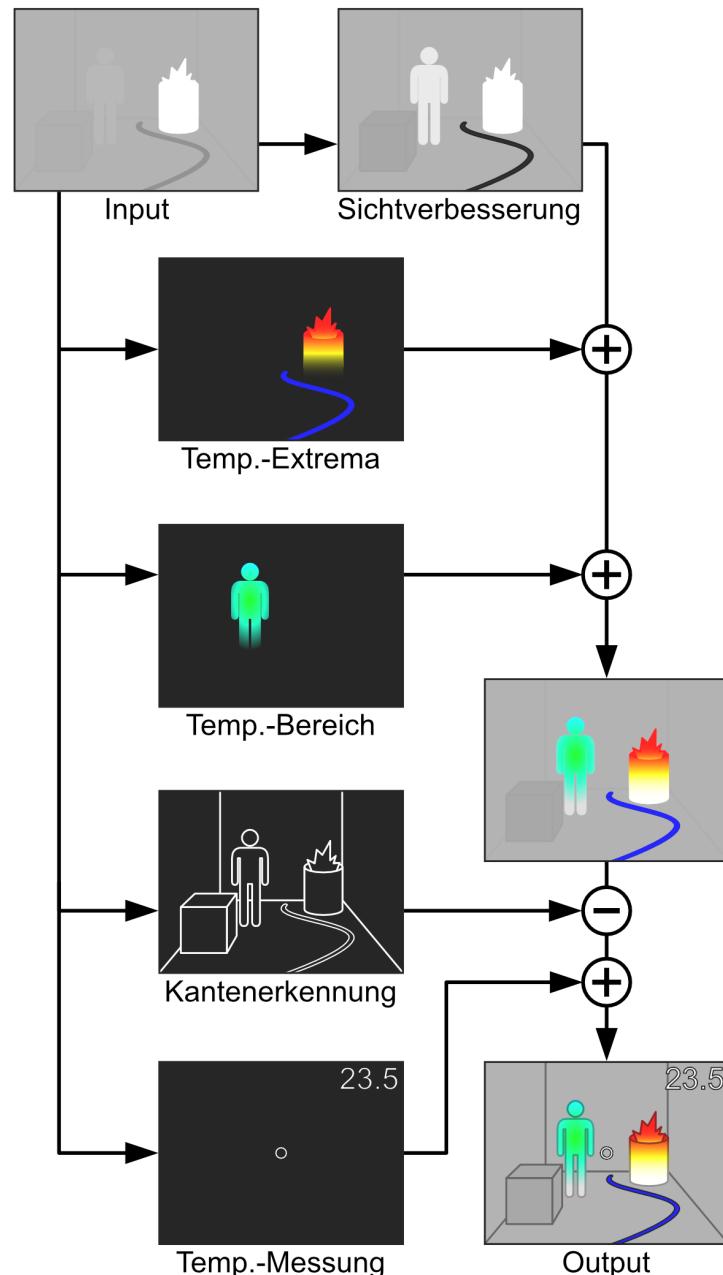


Abbildung 4.13: Ablauf der Wärmebildverarbeitung (Eigene Darstellung)¹⁸

¹⁸Die durch Addition dargestellte Verknüpfung der Bilder erfolgt mittels der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Verfahren.

5 Kapitel 5 Umsetzung

Die in 4.3 ausgearbeiteten Anwendungsfälle wurden als praktischer Teil dieser Arbeit in Form einer Konsolenanwendung mit der Sprache C++ umgesetzt. Die Implementierung erfolgte dabei analog des in 4.4 vorgestellten Entwurfs. Jeder der Anwendungsfälle wird von einer eigenen Klasse repräsentiert, wobei einige der Zwischenschritte ebenfalls separat implementiert wurden, um deren Ergebnisse in mehreren verschiedenen Funktionen nutzen zu können. Da zum momentanen Zeitpunkt nicht sicher ist, in welchem Umfang und vor allem mit welcher Hardware eine mögliche auf dieser Arbeit basierende Anwendung genutzt und weiterentwickelt wird, stellt der modulare Aufbau des Projekts sicher, dass sich die einzelnen Programmteile separat und einfach in andere Anwendung integrieren lassen.

Alle Klassen bauen auf der Programmbibliothek OpenCV auf. OpenCV steht für *Open Source Computer Vision Library* und enthält optimierte Implementierungen von mehr als 2500 klassischen sowie modernen Algorithmen auf dem Gebiet des Maschinellen Sehens und Lernens (vgl. OpenCV 2019(a)). Die Bibliothek befindet sich seit 1999 in Entwicklung (vgl. Kaehler und Bradski 2016, S. 1) und wurde mittlerweile auf fast jedes kommerzielle System portiert (vgl. Kaehler und Bradski 2016, S. 18). Besonders während der Entwicklung von Systemen, bei welchen noch kein konkreter Hardwareentwurf existiert, bietet sich die Verwendung der Bibliothek an, da sich entwickelter Code aufgrund der Portabilität von OpenCV in der Regel ohne Umstände auf andere Systeme übertragen lässt. Hauptgegenstand des Großteils aller Funktionen in OpenCV ist die Klasse `cv::Mat`, welche n-dimensionale Matrizen repräsentiert (vgl. Kaehler und Bradski 2016, S. 71). Alle zu verarbeiteten Bilddaten müssen vorab in einer solchen Matrix hinterlegt werden. OpenCV liefert hierfür eine Funktion zum Einlesen gängiger Datei-Formate, wie beispielsweise JPEG-Dateien, Windows Bitmaps oder Portable Network Graphics (PNG). Die angefertigten Aufnahmen liegen jedoch in keinem von OpenCV unterstützten Format vor, wodurch zunächst eine Aufbereitung der Daten vorgenommen werden muss.

5.1 Aufbereitung der Aufnahmen

Aufgrund des proprietären Dateiformats der Kameras von InfraTec müssen die angefertigten Aufnahmen zunächst aufbereitet beziehungsweise in ein leicht auslesbares Format umgewandelt werden, um sie unabhängig der von InfraTec zur Verfügung gestellten Software IRBIS® 3 verwenden zu können. Hierzu müssen die Dateien zunächst im erwähnten Programm geöffnet werden, um die Aufnahmen anschließend in einer geeigneten Form exportieren zu können. Hierfür stehen grundsätzlich zwei verschiedene Alternativen zur Verfügung.

Die erste Möglichkeit besteht darin, die Daten direkt als Bilddateien, zum Beispiel im PNG-Format, zu speichern. Hierbei wird das Bild exakt so, wie es in der Vorschau des Programms dargestellt wird, exportiert. Alle Anpassungen an Temperaturskala und Farbpalette bleiben dabei erhalten. Dies bedeutet jedoch, dass alle Daten außerhalb der eingestellten Temperaturgrenzen verloren gehen. Außerdem lässt sich aus den einzelnen Farbwerten ohne Bezugspunkt nicht mehr auf konkrete Temperaturen schließen, zumal sich je nach eingestellter Farbpalette und Grenzen unter Umständen nicht alle gemessenen Temperaturabstufungen darstellen lassen.

Als Alternative bietet die Software die Möglichkeit, alle Temperaturpunkte im Tabellenformat zu exportieren. Bei dieser Methode werden die einzelnen Werte entweder direkt in ein für Tabellenkalkulationsprogramme verständliches Dateiformat gebracht oder zeilenweise und jeweils durch selbstgewählte Trennzeichen separiert in eine Textdatei geschrieben. Hierbei kann für gewählte Punkte direkt ein konkreter Temperaturwert ausgelesen werden, was für viele der identifizierten Anwendungsgebiete von erheblichem Vorteil ist. Die Genauigkeit der Werte wird von den in der Software eingestellten Anzahl an Dezimalstellen bestimmt, wobei die Messgenauigkeit der verwendeten Kamera zu beachten ist. Ein wesentlicher Nachteil dieses Datenformats ist jedoch, dass keine direkte visuelle Darstellung der Daten vorliegt und eine weitere Verarbeitung erfolgen muss, um ein konkretes Bild anzeigen zu können.

Letztendlich wurde sich für die zweite Variante entschieden. Grund dafür ist vorrangig, dass der direkte Export als Bilddatei in jedem Fall mit Informationsverlust verbunden ist. Werden die Temperaturgrenzen der Farbskala auf den Messbereich der Aufnahmen ausgeweitet, in diesem Fall -40 °C bis 120 °C, so lassen sich nicht mehr alle gemessenen Temperaturabstufungen im Bild darstellen. Wird von einer Temperaturauflösung von bis zu 0,02 K ausgegangen¹, müssen in dem verwendeten Messbereich mindestens $(40 + 120 + 1) \div 0,02$ also 8050 Temperaturabstufungen darstellbar sein, um keine

¹Angabe des Herstellers der verwendeten Kamera bei 30 °C (vgl. InfraTec GmbH 2019).

wesentlichen Informationen zu verlieren. Da die Aufnahmen aber nur als 24 Bit RGB-Bild, also 8 Bit pro Farbkanal, exportiert werden können, ist beispielsweise die häufig verwendete Darstellung als Graustufenbild auf lediglich 256 Grautöne beschränkt. Zwar lassen sich mit einer Farbtiefe von 24 Bit bis zu 2^{24} , also etwa 16,8 Millionen Farben darstellen, jedoch nutzt keine der verwendbaren Farbpaletten ansatzweise das gesamte zur Verfügung stehende Farbspektrum aus. In den Einstellungen der Temperaturskalen lassen sich neben der Skala selbst ebenfalls die Anzahl der dabei dargestellten Farben anpassen. So können zwischen minimal 10 und maximal 2000 Farben verwendet werden. Inwieweit die eingestellte Anzahl der Farben mit den in den exportierten Bildern repräsentierten Farben übereinstimmt wurde nicht überprüft, da in jedem Fall nicht alle möglichen Temperaturwerte dargestellt werden können.

Das zeilenweise Auslesen der tabellarischen Daten und anschließende Schreiben in ein OpenCV *Mat*-Objekt birgt jedoch einen deutlich höheren Rechenaufwand als das direkte Lesen einer Bilddatei mit der OpenCV Funktion *cv::imread*. Im direkten Vergleich benötigt das Laden der Aufnahmen in Tabellenform 10 mal länger als das Laden identischer Daten im PNG-Format². Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die exportierten Daten vor der Verwendung erneut zu konvertieren. Hierfür müssen die einzelnen tabellarisch gespeicherten Temperaturwerte in ein eindimensionales 16 Bit *Mat*-Objekt eingelesen und anschließend mit der Funktion *cv::imwrite* als PNG gespeichert werden. Als Datentyp stehen entweder *short* oder *unsigned short* zur Verfügung, also ganzzahlige Werte von -32 768 bis 32 767 beziehungsweise von 0 bis 65 535. Da die tabellarischen Daten jedoch bis auf zwei Dezimalstellen genau sind, können die Werte nicht direkt als *short* ausgelesen werden, da so die Nachkommastellen verloren gingen. Um einen Datenverlust zu vermeiden, müssen die Daten also zunächst als Gleitkommazahl ausgelesen, mit dem Faktor 100 multipliziert und anschließend in den Ganzahltyp umgewandelt werden. Da einige Algorithmen ausschließlich *unsigned* Datentypen als Argumente akzeptieren, ist es für die spätere Verarbeitung vorteilhaft, die Daten außerdem auf positive Werte zu limitieren und als *unsigned short* im Bild abzuspeichern. Um jedoch weiterhin mögliche negative Daten abbilden zu können, muss zu allen Werten der Betrag der kleinstmöglichen negativen Temperatur, also die untere Grenze des Messbereiches, addiert werden. Zusammenfassend bedeutet das für die angefertigten Aufnahmen, dass die niedrigste Temperatur von -40 °C durch den Wert 0 und die höchstmögliche Temperatur von 120 °C durch den Wert 16 000 repräsentiert werden. Insofern aus dem resultierenden Bild eine konkrete Temperatur ausgelesen werden soll, müssen die entsprechenden Umkehroperationen angewandt werden.

²Für den Vergleich wurde eine in Tabellenform gespeicherte Aufnahme mit dem im Anschluss vorgestellten Verfahren in ein PNG konvertiert. Weiterhin ist anzumerken, dass keinerlei Optimierungen beim Auslesen der Tabellendaten vorgenommen wurden, wodurch sich der erzielte Faktor voraussichtlich noch reduzieren ließe.

5 Umsetzung

Zusammenfassend kann die Umwandlung analog folgender Gleichungen erfolgen:

$$p(x, y) = (T(x, y) + 40) * 100 \quad (5.1)$$

und

$$T(x, y) = \frac{p(x, y)}{100} - 40 \quad (5.2)$$

mit $p(x, y)$: Intensitätswert an der Stelle (x, y) , $T(x, y)$: Temperatur an der Stelle (x, y) .

5.2 Optimierungen

5.2.1 Hardwarebeschleunigung

Bildverarbeitungsalgorithmen sind in der Regel sehr rechenintensiv, besonders wenn es sich um ein großes Bild mit einer hohen Anzahl an Bildpunkten handelt. Die Berechnungen lassen sich jedoch erheblich beschleunigen, insofern hierfür der Grafikprozessor (GPU³) verwendet wird. (vgl. Reddy, Shanthala und VijayaKumar 2017, S. 437ff.)

Um dies zu realisieren, steht in OpenCV die Transparent API zur Verfügung, welche Hardwarebeschleunigung für eine Vielzahl an Funktionen bietet. Um vorhandenen Quellcode hierfür anzupassen, muss lediglich die abstrakte Klasse `cv::UMat` anstelle der üblichen `cv::Mat` in den Funktionsaufrufen verwendet werden. Das führt dazu, dass OpenCL⁴ spezifischer Code aufgerufen wird, insofern ein unterstützter GPU zur Verfügung steht. Ist dies nicht der Fall, wird für die Berechnung automatisch zum Prozessor gewechselt. (vgl. de Paulo 2018)

5.2.2 Lookup-Tabellen

Wie in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, lassen sich Operationen, deren Ergebnisse ausschließlich vom Wert des zu verändernden Pixels abhängen, mithilfe einer vorab berechneten LUT durchführen. Beruhend darauf, dass die Ergebnisse der Hervorhebung von Temperaturextrema sowie spezifischer Temperaturbereiche ausschließlich durch die einzelnen Temperaturwerte im Bild bedingt sind, ist es möglich, die Berechnungen hierfür in einer einzelnen LUT zusammenzufassen.

Um die optimierten Funktionen sowie die Hardwarebeschleunigung von OpenCV bei der Berechnung der Tabelle verwenden zu können, kann die LUT als einzeiliges Bild beziehungsweise einzeilige Matrix angelegt werden. Diese enthält einen Eintrag für jeden möglichen Intensitätswert und besitzt im Fall der aufbereiteten Aufnahmen demzufolge 16 001 Werte (vgl. Abschnitt 5.1). Die LUT wird anschließend für jedes Pixel wie folgt initialisiert:

$$LUT(x) = x \quad (5.3)$$

mit $LUT(x)$: Intensitätswert an der Stelle (x) .

³Abkürzung aus dem Englischen für *Graphics Processing Unit*.

⁴OpenCL ist ein Standard für die Programmierung verschiedenartiger Prozessortypen mit dem Schwerpunkt auf Parallelisierung. (vgl. Khronos Group 2020)

Anschließend können die Verfahren zur Hervorhebung von Temperaturextrema und Temperaturbereichen direkt auf der Matrix der LUT angewandt werden. Zu beachten gilt, dass aus den Berechnungen eine Tabelle mit drei Kanälen resultiert. Demzufolge muss eine zu verarbeitende Wärmebildaufnahme ebenfalls in ein dreikanaliges Bild umgewandelt werden, um die berechnete LUT für Temperaturextrema und -bereiche verwenden zu können. Anschließend kann der Wert eines jeden Pixels wie folgt aus der Tabelle ausgelesen werden:

$$p'_{LUT}(x, y) = LUT(p(x, y)) \quad (5.4)$$

mit $p'_{LUT}(x, y)$: resultierende Intensitätswerte des Rot-, Grün und Blau-Kanals an der Stelle (x, y) , $LUT(p(x, y))$: in der LUT-Matrix an der Stelle $(p(x, y))$ hinterlegte Intensitätswerte der Kanäle Rot, Grün und Blau. Eine Neuberechnung der Tabelle muss ausschließlich dann erfolgen, wenn sich die zu verwendenden Grenzen für Extrema oder hervorzuhebende Bereiche ändern.

Die Kontrastanpassung der Aufnahmen kann ebenfalls in der LUT hinterlegt werden. Problematisch ist hierbei, dass jene in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur vollzogen wird. Das bedeutet, dass die Tabelle neu berechnet werden muss, sobald sich die Umgebungstemperatur ändert. Um die Anzahl der Neuberechnungen zu verringern, wird die Bestimmung der Umgebungstemperatur, wie in Unterabschnitt 4.3.2.1 beschrieben, lediglich alle 10 Bilder durchgeführt. Für eine weitere Reduzierung der Berechnungen soll die LUT nur dann erneut berechnet werden, wenn sich die Umgebungstemperatur maßgeblich verändert. Hierfür wird neben der Tabelle selbst zusätzlich die zur Berechnung verwendete Umgebungstemperatur hinterlegt. Die LUT wird anschließend nur in dem Fall neu berechnet, wenn die Differenz aus momentaner und hinterlegter Umgebungstemperatur einen gewissen Schwellwert übersteigt.

Die weitere Kontrastverbesserung mittels CLAHE kann jedoch nicht durch die Verwendung einer LUT beschleunigt werden. Der Grund hierfür ist, dass die neuen Grauwerte nicht ausschließlich vom ursprünglichen Intensitätswert abhängig sind, sondern zusätzlich von einer definierten Umgebung. Damit werden identischen Intensitätswerten in Abhängigkeit des Pixelumfelds unterschiedliche Grauwerte zugewiesen.

5.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt eine Auswertung der Ergebnisse, die mit der entwickelten Konsolenanwendung erzielt werden konnten. Um die Anwendung in verschiedenen Szenarien zu testen, kam hierfür eine Auswahl der im Laufe der Arbeit angefertigten Aufnahmen zum Einsatz. Insofern es sich dabei um eine Aufnahmerekord handelt, wurden Einzelbilder entnommen, die typische sowie problematische Situation und Eigenschaften der jeweiligen Aufnahmen aufzeigen.

Um die zunächst unverarbeiteten Aufnahmen hier darstellen zu können, wurde eine Kontrastanpassung analog des in Abschnitt 4.3.2.1 vorgestellten Verfahrens durchgeführt. Von einer Verwendung des CLAHE-Algorithmus wurde abgesehen, da sich die Kontrastanpassung nicht durch eine LUT beschleunigen lässt und das verstärkte Rauschen zu schlechteren Ergebnissen bei der Kantenerkennung führt.

Eine Zusammenfassung der für die Ergebnisse verwendeten Aufnahmen findet sich am Ende des Abschnitts in Tabelle 5.1.

Aufnahme 1

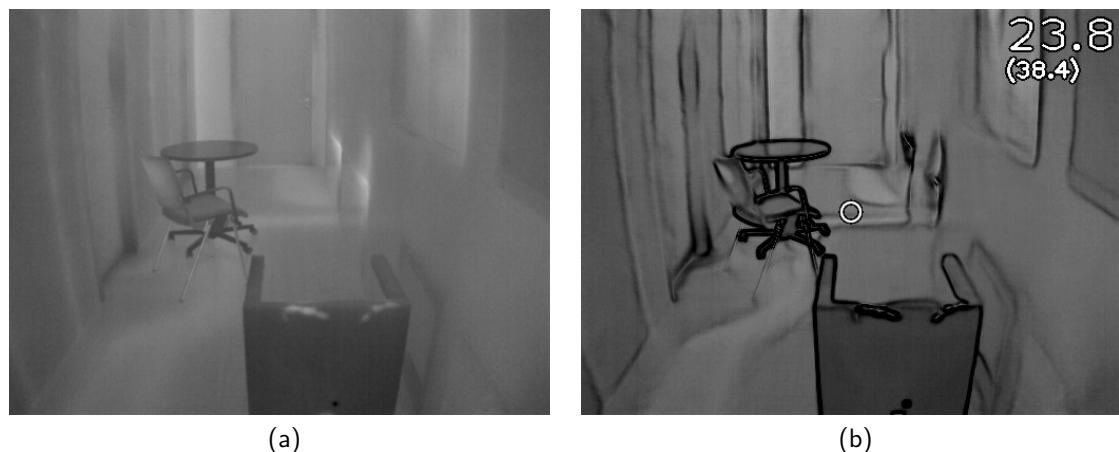


Abbildung 5.1: Aufnahme AA090500: (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet

Bei Abbildung 5.1 handelt es sich um eine Einzelbildaufnahme, die zu Beginn der Aufnahmen angefertigt wurde. Die verwendeten Hindernisse befanden sich daher erst vergleichsweise kurz im Raum. Wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, war im Verlauf der Aufnahmen eine leichte Erwärmung der Gegenstände sowie eine Abkühlung der Umgebung feststellbar. Daraus folgt, dass sich die in den Raum gebrachten Hindernisse in der Aufnahme deutlicher von der Umgebung abheben als in chronologisch späteren

5 Umsetzung

Aufnahmen. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass sich zum Zeitpunkt des Wärmebilds noch kein Rauch im Raum befand, womit die Aufnahme im Rahmen der Möglichkeiten unter optimalen Bedingungen angefertigt wurde. Es befanden sich jedoch weder Personen noch für die Bestimmung von Temperaturextrema vorgesehene Gegenstände im Sichtfeld der Kamera, womit das Bild lediglich für die Einschätzung der Sichtverbesserung verwendet werden kann.

In der verarbeiteten Aufnahme wird ersichtlich, dass die Kantenverstärkung eine deutliche Abgrenzung der im Raum befindlichen Objekte vom jeweiligen Hintergrund bewirkt. Aufgrund des Zeitpunktes der Aufnahme sind die Konturen der Objekte bereits in der unverarbeiteten Aufnahme gut erkennbar, treten nach der Verarbeitung allerdings deutlicher hervor. Einige Bereich, wie zum Beispiel die Stuhllehne in der linken Mitte des Bildes, besitzen jedoch unscharfe Konturen, wodurch die Kantenverstärkung lediglich geringfügig bessere Ergebnisse liefern kann. Weiterhin ist anzumerken, dass größere Temperaturunterschiede auf ansonsten glatten Oberflächen ebenfalls stark hervorgehoben werden, was zu Fehlinterpretationen der Objektkonturen führen kann. Gut sichtbar ist dieser Effekt im oberen Bereich des auf der Seite liegenden Tisches.

Aufnahme 2



Abbildung 5.2: Aufnahme AA090517: (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet

Das letzte im Rauchraum angefertigte Wärmebild ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Es handelt sich um eine Einzelaufnahme, bei welcher sich zusätzlich die für die Bestimmung der Extrema vorgesehen Gegenstände im Bild befinden. Weiterhin ist anzumerken, dass der Raum zu diesem Zeitpunkt mit dichtem Rauch gefüllt war, welcher jedoch nur einen geringfügigen Einfluss auf die Qualität des Wärmebildes hat (vgl. Abschnitt 4.2).

Im direkten Vergleich zu Aufnahme 1 ist anzumerken, dass sich die Tischplatte in Abbildung 5.2a deutlich weniger vom Hintergrund abhebt. Wie in Abbildung 5.2b ersichtlich, trägt die Kantenverstärkung nur unerheblich zu einer besseren Erkennbarkeit bei. Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass eine Bewegung der Kamera während einer Aufnahmereihe dazu führt, dass sich die tatsächlichen Positionen sowie Konturen der Objekte besser bestimmen lassen, als dies in einem Standbild möglich ist. Auffällig ist weiterhin, dass die Kantenverstärkung bei bereits deutlichen Kanten erheblich stärker wirkt, was zu einer Ausdehnung der Konturen betroffener Objekte führt. Ersichtlich wird dies beispielsweise bei der auf dem Tisch befindlichen Flasche in der Mitte des Bildes.

Die Einfärbung der Temperaturextrema führt im verarbeiteten Bild in ursprünglich homogenen Bereichen zu erkennbaren Temperaturunterschieden. Als Beispiel ist hier die heißere Düse der Rauchmaschine im oberen Bereich des Bildes zu erwähnen, welche nur in der verarbeiteten Aufnahme sichtbar ist. Der Detailgrad des Bildes wird demnach sichtbar erhöht.

Aufnahme 3

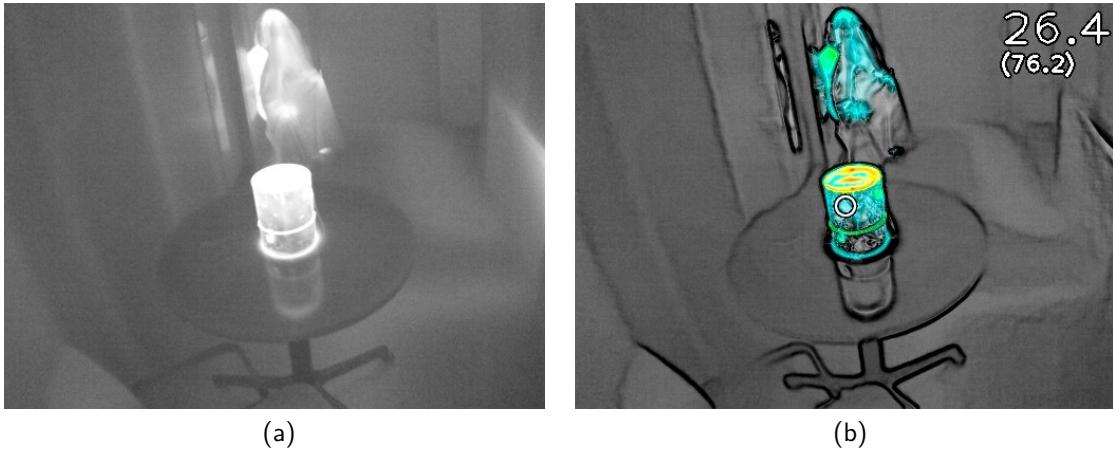


Abbildung 5.3: Aufnahme AA090513(456): (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet

Anhand der in Abbildung 5.3 dargestellten Aufnahme ist eine Einschätzung der Hervorhebung von Temperaturbereichen möglich. Es handelt sich hierbei um ein ausgewähltes Einzelbild einer Aufnahmerekord. Im Bild befindet sich eine beinahe vollständig verhüllte Person, bei welcher lediglich die Schulter offen liegt.

In der gezeigten Aufnahme ist problematisch, dass sich die Temperaturgrenzen der Extrema und des Temperaturbereiches in der momentanen Implementierung überschneiden. Dadurch lassen sich die hervorgehobenen Bereiche nicht klar voneinander trennen. Grund hierfür war die vergleichsweise niedrigen Temperaturen der Gegenstände, welche zur Bestimmung der Temperaturmaxima Verwendung fanden. In einem realen Brand-Szenario ist mit deutlich größeren Temperaturen zu rechnen, wodurch die Grenzen für die Maxima höher angesetzt werden können. Die allgemein höheren Umgebungstemperaturen führen voraussichtlich jedoch ebenfalls dazu, dass deutlich mehr Bereiche für die Personensuche hervorgehoben werden, welche nicht auf Personen zurückzuführen sind.

Weiterhin ist erkennbar, dass die Abdeckung der Person lediglich zu einer geringfügig schlechteren Erkennbarkeit eben jener führt. Die Kontaktstellen mit der Decke werden in kürzester Zeit so weit erwärmt, dass an diesen Bereichen weiterhin eine Hervorhebung erfolgt. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich hierbei um sehr dünnes Textil handelt und demnach bei einem dickeren sowie stärker isolierenden Stoff schlechtere Ergebnisse zu erwarten sind.

Der Unterschied zwischen dem gemessenen Temperaturwert und dem unter Verwendung eines niedrigeren Emissionsgrades berechneten Wert ist in der Aufnahme ebenfalls ersichtlich. Wird die vorherige Aufnahme in Abbildung 5.2a betrachtet, ist erkennbar,

dass die im Bild befindliche Flasche in der Dose reflektiert wird. Demnach wird nicht die gesamte von der Dose ausgehende Wärmestrahlung von eben jener emittiert. Ihr Emissionsgrad ist demnach deutlich geringer als 1. Insofern es sich hierbei um eine glatte Aluminiumdose handelt, liegt ihr Emissionsgrad etwa zwischen 0,03 und 0,08 (vgl. viZaar AG 2019). Die tatsächliche Temperatur der Dose liegt demnach zwischen 55 °C und 94 °C, wenn von einer Umgebungstemperatur von 23 °C ausgegangen wird. Dies zeigt, dass die tatsächliche Temperatur mithilfe des zusätzlich eingeblendeten Wertes besser abgeschätzt werden kann.

Aufnahme 4

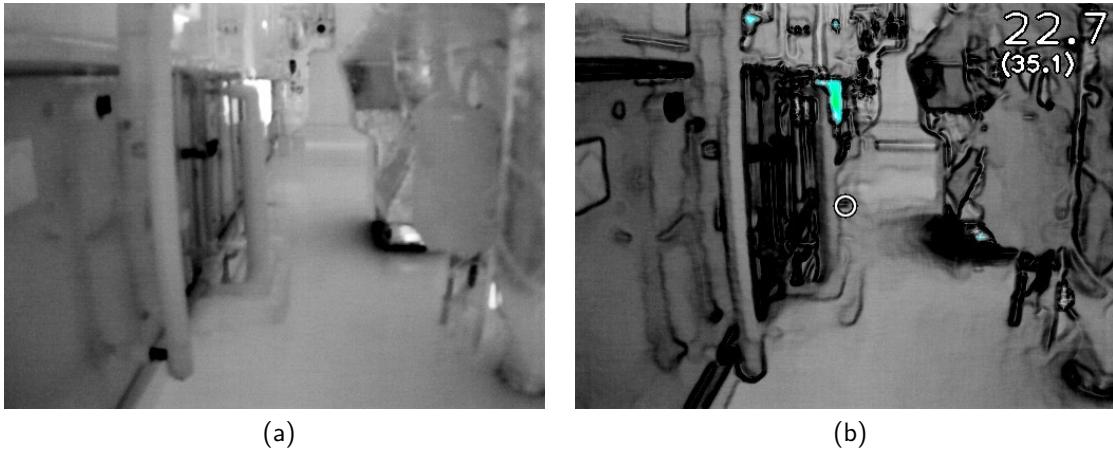


Abbildung 5.4: Aufnahme AA090518(2794): (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet

Bei der in Abbildung 5.4 gezeigten Aufnahme handelt es sich um ein Einzelbild einer Aufnahmerekord, welche außerhalb des Rauchraumes angefertigt wurde.

Deutlich erkennbar sind hierbei die größeren Temperaturunterschiede zwischen den im Raum befindlichen Objekten. Daraus resultiert, dass aus dem unverarbeiteten Wärmebild deutlich einfacher Informationen über die Beschaffenheit des Raumes gewonnen werden können. Die auf deutlichen Kanten stark ausfallende Kantenhervorhebung führt jedoch dazu, dass einige der Konturen im verarbeiteten Bild verschmelzen und sich die einzelnen Objekte visuell nicht klar von einander abgrenzen lassen. Hierbei ist zu erwähnen, dass diese Problematik bei einer sich in Bewegung befindlichen Kamera weniger gravierend ausfällt.

Weiterhin auffällig ist der hervorgehobene Bereich im hinteren Teil des Raumes. Hierbei handelt es sich um ein Objekt, welches eine Temperatur nahe der Körpertemperatur aufweist. Die Hervorhebung zur Personensuche kann demnach zu einer Fehlinterpretation führen. Es ist jedoch anzunehmen, dass eine Einschätzung, ob es sich hierbei um eine Person handelt, mithilfe der unverarbeiteten Aufnahme gleichermaßen schwierig ist. Der betroffene Bereich muss in jedem Fall aus einer näheren Entfernung überprüft werden. Die Hervorhebung ist somit weiterhin als vorteilhaft einzuschätzen, da der betroffene Bereich gegebenenfalls schneller entdeckt wird.

Aufnahme 5

Abbildung 5.5: Aufnahme AA090518(229): (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet

Die in Abbildung 5.5 dargestellte Aufnahme wurde ebenfalls außerhalb des Rauchraumes angefertigt und einer Aufnahmerekord entnommen. Das Wärmebild zeigt die Reflexion zweier Personen in einer Glastür.

Die abgebildete Situation kann während eines Einsatzes zu Fehlinterpretationen führen, wenn die Reflexionen der Einsatzkräfte als potentielle Opfer identifiziert werden. Aufgrund dessen, dass sich die von der Tür reflektierte Infrarotstrahlung mit ihrer eigenen überlagert, ist die Wärmestrahlung der Personen geringer, als dies bei direkter Sicht der Fall wäre. Dies führt dazu, dass die Personen nicht im Bild hervorgehoben werden. Demnach kann die Hervorhebung zur Personensuche schneller Aufschluss darüber liefern, ob es sich bei den im Wärmebild gezeigten Personen um Reflexionen handelt. Momentan kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob dieser Vorteil weiterhin besteht, wenn die Temperatur der Tür deutlich höher ist.

Aufnahme 6

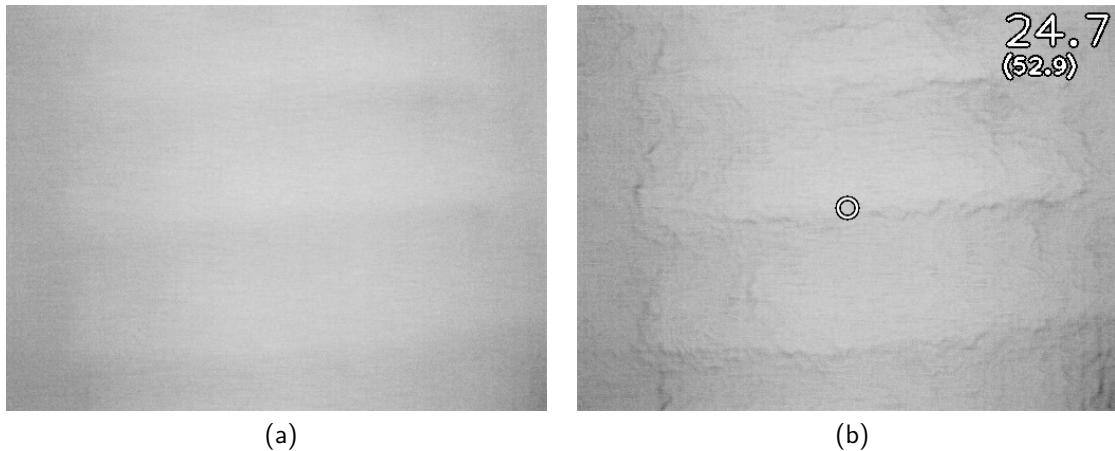


Abbildung 5.6: Aufnahme AA090518(765): (a) unverarbeitet und (b) verarbeitet

Eine weitere außerhalb des Rauchraums angefertigte Aufnahme ist in Abbildung 5.6 dargestellt, wobei das Wärmebild erneut einer Aufnahmereihe entnommen wurde. Gezeigt wird eine nach oben führende Treppe, bei welcher kaum Temperaturunterschiede feststellbar sind. Die Differenz zwischen minimaler und maximaler enthaltenen Temperatur beträgt lediglich 1,26 K. Es wird angenommen, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass sich die Treppe in einem abgeschlossenen Bereich befand und damit ein annähernder Temperaturausgleich erreicht wurde.

Aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen und dem damit einhergehenden geringen Kontrast sind die Stufen im unverarbeiteten Bild kaum zu erkennen. Obgleich keine klaren Kanten aus der Verarbeitung resultieren, so wird die Lokalisierung einzelner Stufen deutlich erleichtert.

Nr.	Aufnahme ⁵	Temp.-Bereich	Besonderheiten
1	AA090500	21,11 - 25,40	<ul style="list-style-type: none"> ▪ deutliche Temperaturdifferenz der Gegenstände zur Umgebung
2	AA090517	3,71 - 62,26	<ul style="list-style-type: none"> ▪ dichter Rauch ▪ Gegenstände für Temperaturextrema
3	AA090513 (456)	22,65 - 59,02	<ul style="list-style-type: none"> ▪ dichter Rauch ▪ fast vollständig verhüllte Person
4	AA090518 (2794)	19,61 - 31,53	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Außerhalb des Rauchraumes aufgenommen ▪ Oberflächen nahe Körpertemperatur
5	AA090518 (229)	23,03 - 25,49	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Außerhalb des Rauchraumes aufgenommen ▪ Spiegelungen von Personen in einer Glastür
6	AA090518 (765)	23,72 - 24,98	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Außerhalb des Rauchraumes aufgenommen ▪ Sehr geringe Temperaturunterschiede im Bild

Tabelle 5.1: Eigenschaften der verwendeten Aufnahmen.

⁵Im Fall einer Aufnahmereihe wird die Nummer des entnommenen Bildes in Klammern angegeben.

5.4 Fazit einschließlich Ausblick

Mittels umgebungsabhängiger Kontrastanpassung werden kleine Intensitätsunterschiede deutlicher hervorgehoben, woraus ein besserer Überblick über Szenen mit annähernd gleichen Temperaturen resultiert. Obwohl CLAHE in vielen Fällen zu einem noch besseren lokalen Kontrast im Bild führt, wird im Bild enthaltenes Rauschen weiter verstärkt. Zusätzlich werden hierbei identischen Intensitätswerten in Abhängigkeit ihrer Umgebung innerhalb eines Bildes und über mehrere Bilder hinweg unterschiedliche Grau- oder Farbwerte zugewiesen, wodurch sich keine vorab berechneten LUTs verwenden lassen. Aufgrund des verstärkten Rauschens und der geringeren Optimierungsmöglichkeiten ist von der Verwendung von CLAHE im Kontext einer Wärmebilderfolge abzuraten. Da in den angefertigten Wärmebildaufnahmen jedoch keine erheblichen Wechsel der Umgebungstemperatur auftreten, kann zu diesem Zeitpunkt keine Aussage darüber getroffen werden, ob das vorgestellte Verfahren zur Kontrastanpassung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur im Fall eines abrupten Wechsels weiterhin zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Bei einer weiteren Untersuchung der Thematik gilt demzufolge die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Verfahren in einem realitätsnahem Szenario zu überprüfen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.

Mittels farblicher Hervorhebung der Temperaturextrema im Bild werden einerseits selbige für den Betrachter erkennbar und andererseits ist damit ein grober Überblick über vorliegende Temperaturen ohne direkte Messungen möglich. Aufgrund der Verwendung von Farbverläufen anstelle von einfarbigen Flächen lassen sich Temperaturunterschiede innerhalb der hervorgehobenen Bereiche weiterhin wahrnehmen. Infolgedessen, dass sich die Grenzen, ab denen eine Hervorhebung stattfindet, in der Regel außerhalb des durch die Kontrastanpassung darstellbaren Temperaturbereiches befinden, führen die zusätzlichen Farben in den ansonsten homogenen Grauwertbereichen zu einem höheren Dynamikumfang im Bild und demzufolge zu einer höheren Anzahl an unterscheidbaren Temperaturabstufungen. Die in den angefertigten Aufnahmen vorliegenden Temperaturen der Temperaturmaxima entsprechen jedoch sowohl in Höhe als auch Umfang nicht annähernd den Temperaturen während eines Wohnungsbrandes. Die zunächst verwendeten Temperaturgrenzen für die Hervorhebung gilt es dementsprechend anhand von Wärmebildern aus einsatznäheren Szenarien zu bestimmen und anzupassen.

Im Wärmebild befindliche Personen werden durch die speziell für die Personensuche vorgesehene Hervorhebung von fest definierten Temperaturbereichen vom Rest der Aufnahme unterscheidbar. Darüber hinaus ist die Erkennbarkeit lediglich geringfügig eingeschränkt, insofern die jeweiligen Personen teilweise mit Textilien verdeckt sind. Hierbei ist anzumerken, dass das in den Aufnahmen zur Verdeckung verwendete textile Material

vergleichsweise dünn war, wonach bei dickeren sowie stärker isolierenden Textilien mit schlechteren Ergebnissen zu rechnen ist. Insofern ein Teil des Körpers frei liegt, ist die farbliche Hervorhebung hingegen weiterhin als Vorteil zu bewerten. Die Grenzen der Hervorhebung überschneiden sich im derzeitigen Prototyp mit den Grenzen der Temperaturmaxima, da letztere aufgrund der vergleichsweise niedrigen Temperaturen in den Aufnahmen anderenfalls nicht zur Geltung kommen. Im Fall einer realen Brandsituation sind die Grenzen der Maxima deutlich höher anzusetzen, wodurch keine Überschneidungen auftreten. Aufgrund der im Brandfall vorliegenden höheren Umgebungstemperaturen ist zu überprüfen, ob in einem realen Szenario zu viele Bereiche im Bild hervorgehoben werden, sodass die Lokalisierung von Personen erschwert wird. Im ungünstigsten Fall ist die Hervorhebungen in Situationen außerhalb der Personensuche gar hinderlich. Eine abschließende Aussage hierüber kann anhand der angefertigten Aufnahmen nicht getroffen werden.

Bei der Merkmalsextraktion und Verstärkung mithilfe von Kantenerkennung erwies sich vorrangig das starke Rauschen der angefertigten Aufnahmen als Herausforderung, da ohne vorherige Rauschunterdrückung nicht vorhandene Kanten erkannt werden. Die Anwendung des NLM-Algorithmus liefert hierbei weitestgehend rauschfreie Bilder, während wichtige Kanten im Bild erhalten bleiben. Je nach zum Einsatz kommender Kamera kann das Rauschverhalten variieren, wodurch die Parameter des Algorithmus unter Umständen anzupassen sind. Für die Kantenerkennung selbst liefert der Sobel- beziehungsweise Scharr-Operator in den meisten Fällen zufriedenstellende Ergebnisse, da lediglich infolge starker Kamerabewegungen und damit verbundener Bewegungsunschärfe schwächere Kanten nicht mehr erkannt werden. Es wird jedoch angenommen, dass in diesen Fällen selbst modernere Kantenerkennungsverfahren keine besseren Ergebnisse liefern. Die Verstärkung der detektierten Kanten im ursprünglichen Wärmebild führen zu deutlich besser erkennbaren Objektkonturen und -strukturen, insbesondere wenn nur unerhebliche Temperaturunterschiede zwischen den Objekten und ihrer Umgebung bestehen. Bei einer weiteren Untersuchung der Thematik wäre zu evaluieren, ob das ursprüngliche Wärmebild nach einer Kantenextraktion weiterhin von Relevanz ist oder ob die alleinstehende Anzeige des berechneten Kantenbildes genügend Informationen über die Beschaffenheit eines Raumes liefert.

Da eine genaue Temperaturmessung mithilfe von Wärmebildkameras ohne Kenntnis über den Emissionsgrad der zu messenden Oberfläche nicht möglich ist, wurde die Funktion der Temperaturmessung um eine Anzeige der Temperatur im Fall eines geringen Emissionsgrades erweitert. Es wird angenommen, dass hiermit eine schnellere Beurteilung der tatsächlichen Temperatur einer Oberfläche möglich ist. Dennoch ist das Wissen über den Emissionsgrad der zu messenden Oberfläche nötig, um die Temperatur anhand der

beiden angezeigten Werte abschätzen zu können. Gegebenenfalls genügt im Brandfall bereits die Kenntnis darüber, dass sich die tatsächliche Temperatur zwischen den beiden angezeigten Werten bewegt. Da die Funktion des Temperaturausgleiches in Abhängigkeit vom Emissionsgrad nicht linear verläuft, ist die Einschätzung der Temperatur selbst bei bekanntem Emissionsgrad nicht trivial. Als zusätzliche Unterstützung ist die Anzeige eines weiteren Wertes denkbar, welcher mithilfe eines zwischen den anderen Werten liegenden Emissionsgrades berechnet wird. Bei einer weiteren Vertiefung der Thematik ist der tatsächliche Nutzen der zusätzlichen Temperaturwerte in einer erneuten Befragung der Feuerwehr zu ermitteln.

Während die in dieser Arbeit verwendeten Verfahren vielversprechende Ergebnisse liefern, ist das komplette Spektrum an Möglichkeiten auf diesem Gebiet längst nicht erschöpft. Aufgrund dessen, dass sich Wärmebilder in ihrem Aufbau nicht von herkömmlichen Graustufenbildern unterscheiden, lassen sich weitere bekannte Bildverarbeitungstechniken auf eben diese übertragen. Interessante Ansatzpunkte sind zum Beispiel eine visuelle Odometrie, mithilfe welcher der zurückgelegte Weg der Einsatzkräfte aufgezeichnet werden kann, oder eine Objekterkennung. Besonders die Fortschritte auf dem Gebiet der durch maschinelles Lernen gestützten Bildverarbeitung, welche in den vergangenen Jahren erzielt wurden, sind als Ansatzpunkt für weitere Forschung auf dem Gebiet der Auswertung von Wärmebildern im Feuerwehreinsatz zu nennen.

Weiterhin ist festzuhalten, dass die im Prototyp implementierten Verfahren lediglich auf einzelnen Bildern angewandt werden. Unter Berücksichtigung vorangegangener Bilder einer Bilderfolge ist eine potentielle Verbesserung oder Erweiterung der Algorithmen möglich. Insbesondere die Kantenerkennung kann von einem solchen Vorgehen profitieren, da Kanten über mehrere Bilder verfolgt werden können. Dadurch ließen sich temporäre Kanten, welche durch Störungen wie zum Beispiel Rauschen hervorgerufen werden, besser von tatsächlichen Kanten unterscheiden.

Im Fall der Umsetzung eines auf dieser Arbeit basierenden Wärmebildkamerasystems gilt es als nächsten Schritt einen konkreten Hardwareentwurf zu entwickeln. Je nach zum Einsatz kommender Technik, welche für die Anzeige sowie die Recheneinheit Verwendung finden sollen, sind einige der vorgeschlagenen Verfahren unter Umständen weniger praktikabel oder zu rechenintensiv. In diesem Fall wäre abzuschätzen, welche technischen Anwendungsfälle relevanter sind und an welchen Stellen sich weitere Optimierungen anbieten.

6 Kapitel 6 **Zusammenfassung**

Wärmebildkameras lassen sich nicht nur zum Messen von Temperaturen einsetzen, sondern unterstützen auf vielfältige Weise die Einsatzkräfte der Feuerwehr bei der Brandbekämpfung. Besonders die Möglichkeit, die Umgebung durch dichten Rauch wahrzunehmen, stellt einen wertvollen Aspekt dieser Technologie dar. Auf diesem Gebiet existieren um zusätzliche Funktionen erweiterte Modelle, welche sich im Einsatz als nützlich erweisen können. Der Hauptschwerpunkt der vorliegenden Arbeit war es, zu ermitteln, ob sich bekannte Bildverarbeitungsverfahren auf Wärmebilder übertragen lassen, um die Bewältigung diverser Probleme im Feuerwehreinsatz mithilfe von Wärmebildkameras zu erleichtern. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde das Einsatzszenario auf den standardisierten Wohnungsbrand beschränkt, anhand dessen sich die zu betrachtenden Anwendungsmöglichkeiten von Wärmebildkameras auf diesem Gebiet eingrenzen ließen. Ein Interview zum Feuerwehreinsatz von Wärmebildkameras lieferte darüber Aufschluss und zeigte zusätzliche Ansatzpunkte auf.

In vorangegangenen Recherchen zeichnete sich weiterhin ab, dass nur vereinzelt Entwicklungen auf diesem Gebiet zu beobachten sind. In den Blick genommen wurden die Systeme C-Thru von Qwake Technologies, Scott Sight von Scott Safety sowie die mit einem speziellen Bildverarbeitungsalgorithmus ausgestatteten Kameras der K-Serie von FLIR Systems. Während sich über die ersten beiden Systeme nur bedingt Informationen zur Leistungsfähigkeit zusammengetragen ließen, konnte bei einer Sichtung der Wärmebildkameratechnik der Feuerwehr Dresden eine Kamera der Firma FLIR getestet werden. Hierbei wurde der Vorteil, kleinere Details durch die Verstärkung von Bildmerkmalen besser erkennen zu können, deutlich. Die anderen betrachteten Systeme zeugten vorrangig von hardwarespezifischen Innovationen, welche in der vorliegenden Arbeit jedoch keinen Schwerpunkt darstellten. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die erste Annahme bestätigt wurde, da keines der Systeme die komplette Bandbreite an Bildverarbeitungsmöglichkeiten ausschöpft. Dennoch ließ sich an den exemplarisch untersuchten Beispielen das Potenzial einer mittels Bildverarbeitung unterstützten Wärmebildtechnik erkennen.

Um Verfahren zu ergründen, welche zusätzliche Informationen aus einem Wärmebild extrahieren können, wurde zunächst ein Satz an Wärmebildaufnahmen angefertigt, um

konstante Szenarien für die jeweiligen Algorithmen zu gewährleisten. Hierfür erfolgte eine Konzeption diverser Situationen, welche möglichst viele Gegebenheiten des standardisierten Wohnungsbrands nachbilden sollten. Die Durchführung im Rauchraum der Feuerwehr Dresden Altstadt eröffnete zusätzlich die Möglichkeit, den Einfluss von Rauch auf die Aufnahmen und Algorithmen zu untersuchen.

Unter Berücksichtigung der bisherig gewonnenen Erkenntnisse wurde anschließend ein Prototyp konzipiert, dessen Entwurf den maßgeblichen Teil der Arbeit einnahm. Der Prototyp deckt vier technische Anwendungsfälle ab, die jeweils zur Lösung spezifischer Probleme bei der Brandbekämpfung beitragen sollen. Besonders hervorzuheben ist, dass die einzelnen Teile ebenfalls unabhängig voneinander zum Einsatz kommen können. Der erste Part des Programms dient der allgemeinen Sichtverbesserung, indem Kanten im Bild identifiziert und anschließend verstärkt werden. Damit kleinere Temperaturunterschiede und so ebenfalls einzelne Objekte im Bild deutlicher erkennbar sind, wird zusätzlich eine Kontrastanpassung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur vorgenommen. Die Hervorhebung extremer Temperaturen im Bild erfolgt im zweiten Teil des Programms. Hierfür werden Bereiche farbig dargestellt, deren Temperaturen unter- beziehungsweise oberhalb festgelegter Grenzen liegen. Eine zusätzliche Unterteilung der Maxima in hohe und extreme Temperaturen führt durch das erweiterte Farbspektrum zu einem größeren visuell unterscheidbaren Temperaturbereich. Den dritten Schwerpunkt des Prototyps stellt die Hervorhebung fest definierter Temperaturbereiche speziell für die Personensuche dar. Ähnlich der Extrema werden hierbei Temperaturgrenzen festgelegt, innerhalb derer eine Einfärbung der betroffenen Bildbereiche erfolgt. Im letzten Part steht die Temperaturmessung im Fokus. Hierfür wird ein kleiner Teil in der Mitte des Wärmebildes markiert, ausgelesen und die gemittelte Temperatur zur Anzeige gebracht. Aufgrund der Abhängigkeit der tatsächlichen Temperatur vom Emissionsgrad der gemessenen Oberfläche wird zusätzlich ein zweiter Temperaturwert bei sehr geringem Emissionsgrad angezeigt.

Im Anschluss an den Entwurf wurden die konkrete Umsetzung des Prototyps sowie die aus den angefertigten Aufnahmen erzielten Ergebnisse betrachtet. Hierfür wurden ausgewählte Einzelbilder sowie Teilbilder der Aufnahmefolgen verwendet, um das Verhalten der Algorithmen in bestimmten Situationen zu vergleichen. Ausgenommen einiger situationsbedingter Einschränkungen lieferten alle Teile des entwickelten Programms zufriedenstellende Resultate. Lediglich der Algorithmus zur Kontrastverbesserung brachte uneinheitliche Ergebnisse hervor, wodurch im finalen Prototyp letztendlich ein einfacheres Verfahren Verwendung fand.

Zusammenfassend kann die Annahme bestätigt werden, dass sich mithilfe diverser Bildverarbeitungsverfahren subjektiv mehr Informationen aus einem Wärmebild entnehmen lassen, als dies mit einem unverarbeitetem Bild der Fall wäre. Aufgrund des beschränkten

Testszenarios kann diese Aussage lediglich auf die während der Arbeit angefertigten Aufnahmen beschränkt werden. Für eine umfassende Einschätzung sind sowohl einsatznähere Situationen sowie eine Bewertung der Ergebnisse durch Fachkräfte der Feuerwehr nötig. Unabhängig davon zeigen die Ergebnisse jedoch, dass weitere Forschungen auf diesem Gebiet großes Potential aufweisen und demnach als relevant einzuschätzen sind.

Schlussendlich ist entscheidend, in welchem Gebiet und Umfang Wärmebildkameratechnik eingesetzt wird. Hier spielen unter anderem Faktoren wie technische Verfügbarkeit und Wartungsintensität eine Rolle, ebenso wie finanzielle Aspekte sowie die Kompetenzen der jeweiligen Einsatzkräfte. An dieser Stelle sei nochmals ausdrücklich auf eine stärkere Implementierung in Aus- und Weiterbildung hingewiesen, in welcher die Basis im Umgang mit ebenjener Technik gelehrt werden sollte. Im Zusammenspiel dieser und weiterer Punkte erhebt sich die Wärmebildkamera zu einem wichtigem, nicht mehr wegzudenkendem Medium im Feuerwehreinsatz, welches es Wert ist, Auswertung und Verarbeitung der Aufnahmen dem aktuellen sowie bestmöglichen technischen Stand anzupassen.

Literatur

- Adobe Systems (2019[a]). *Basisinformationen zu Bildern*. URL: https://helpx.adobe.com/ch_de/photoshop/using/image-essentials.html (besucht am 28.10.2019).
- Adobe Systems (2019[b]). *Bildgröße und Auflösung*. URL: <https://helpx.adobe.com/de/photoshop/using/image-size-resolution.html> (besucht am 28.10.2019).
- Adobe Systems (2019[c]). *Korrigieren von Bildverzerrung und Rauschen*. URL: <https://helpx.adobe.com/de/photoshop/using/correcting-image-distortion-noise.html> (besucht am 29.10.2019).
- AGBF bund (Nov. 2015). *Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten*.
- Apogee Instruments (o.D.). *A Review of the Physics for Emissivity Correction of Infrared Temperature Measurements*.
- Baehr, H. D. und Kabelac, S. (2012). *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg.
- Baldenhofer, K. (2019). *Lexikon der Fernerkundung*. URL: <http://fe-lexikon.info/lexikon-o.htm> (besucht am 06.08.2019).
- Berg, A. (2016). "Detection and Tracking in Thermal Infrared Imagery". Diss. Linköping University.
- Buades, A., Coll, B. und Morel, J.-M. (2011). "Non-Local Means Denoising". In: *Image Processing On Line* 1, S. 208–212.
- Burger, W. und Burge, M. (2006). *Digitale Bildverarbeitung: Eine Einführung mit Java und ImageJ*. Bd. 2. X.media.press. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Çalik, R. C., Tunali, E., Ercan, B. und Öz, S. (2017). "A Study on Calibration Methods for Infrared Focal Plane Array Cameras". In: *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2018)* 4, S. 219–226.
- Cha, J. H., Abbott, A. L. und Reynolds, J. P. (2015). "Thermal image enhancement construct for seeing through obscurants". In: *Independent Component Analyses, Compressive Sampling, Large Data Analyses (LDA), Neural Networks, Biosystems, and Nanoengineering XIII*. Bd. 9496. SPIE, S. 121–130.

- Computerwissen Online (2019). *Fachwörterlexikon*. URL: <https://www.computerwissen-online.de/index.php?page=lexika> (besucht am 19.11.2019).
- de Groot, R. M., Wild, M., Kess, R. und Stupperich, K. (2018). *Die unbewusste Macht Wirkung von Farben in Design und Marketing. Verblüffende Neuigkeiten der Farbpsychologie, Hirn- Marktforschung sowie Behavioral Economics.*
- de Paulo, J. V. (2018). *A little about OpenCV's UMat class*. URL: <https://jeanvitor.com/opencv-opencl-umat-performance/> (besucht am 02.01.2020).
- Dittié, G. (2015). *Physik der Thermografie*. URL: <http://www.thermografie.de/physik.htm> (besucht am 09.11.2019).
- Dresing, T. und Pehl, T. (2015). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende*. Bd. 6. Eigenverlag. Marburg.
- Dudenredaktion (2019[a]). *Fadenkreuz*. URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Fadenkreuz> (besucht am 10.11.2019).
- Dudenredaktion (2019[b]). *Pixel*. URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Pixel> (besucht am 19.07.2019).
- Fenwick, S. (2018). "Wearable sensors for monitoring heat stress". In: *Critical Communications Today*. URL: <http://www.criticalcomms.com/features/wearables-biometrics-firefighters-heat-stress> (besucht am 17.11.2019).
- Finteis, T., Oehler, J.-C., Genzwürker, H., Dempfle, J. H. C.-E., Becker, H. und Ellinger, K. (2002). *Stressbelastung von Atemschutzgeräteträgern bei der Einsatzsimulation im Feuerwehr-Übungshaus Bruchsal Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg (STATT-Studie)*.
- FLIR Systems (o.D.[a]). *Flexible Bildoptimierung FSX*. URL: <https://www.flir.de/discover/instruments/firefighting/flexible-scene-enhancement/> (besucht am 19.07.2019).
- FLIR Systems (o.D.[b]). *How does FLIR calibrate thermal cameras? What is NUC?* URL: <https://www.flir.com/support-center/oem/how-does-flir-calibrate-thermal-cameras-what-is-nuc/> (besucht am 11.11.2019).
- FLIR Systems (o.D.[c]). *Seeing through fog and rain with a thermal imaging camera. Metrological effects of Fog & Rain upon IR Camera Performance*. URL: https://www.flirmmedia.com/MMC/CVS/Tech_Notes/TN_0001_EN.pdf (besucht am 10.11.2019).
- FLIR Systems (2017). *User's manual Flir Kx series*.
- FLIR Systems (2018). *Spot Size Ratio*. URL: https://www.flir.com/globalassets/discover/industrial/spot-size-ratio-tech-note_us.pdf (besucht am 26.10.2019).

-
- Glückert, U. (1992). *Erfassung und Messung von Wärmestrahlung: eine praktische Einführung in die Pyrometrie und Thermographie*. Franzis-Einführung. Franzis.
- Gonzalez, R. C. und Woods, R. E. (2006). *Digital Image Processing*. Bd. 3. Prentice-Hall, Inc.
- Graves, J. (2017). *Industry Insights: The Hands-Free Revolution. How a culture of innovation led to the industry's first hands-free thermal vision system, Scott Sight*. URL: <https://www.firehouse.com/safety-health/ppe/blog/12329326/industry-insights-the-handsfree-revolution-of-thermal-imaging-scott-sight-thermal-imager> (besucht am 17.11.2019).
- InfraTec GmbH (2008). *IRBIS® 3. Infrarot-Thermografiesoftware. Benutzerhandbuch*.
- InfraTec GmbH (2017). *VarioCAM® HD head. Infrarot-Thermografiesystem für den Industrie- und Laboreinsatz*.
- InfraTec GmbH (2019). *VarioCAM® HD research 900*. URL: <https://de.infratec.eu/thermografie/waermebildkameras/variocam-hd-research-900/> (besucht am 18.07.2019).
- ISO 20473:2007 (2007). *Optics and photonics — Spectral bands*. Standard. International Organization for Standardization.
- Kaehler, A. und Bradski, G. (2016). *Learning OpenCV 3. Computer Vision in C++ with the OpenCV Library*. O'Reilly Media.
- Käufer, T. (2019). *Statistiken zur Feuerwehr in Deutschland*. URL: <https://de.statista.com/themen/4308/feuerwehr-in-deutschland> (besucht am 25.12.2019).
- Keller, P., Maass, T., Reichard, M. und Witte, D. (o.D.). *Statistik zu Einsätzen von Wärmebildkameras*. URL: http://www.wbk-einsatz.de/webpage/?page_id=185 (besucht am 09.11.2019).
- Keller, P., Maass, T., Reichard, M. und Witte, D. (2012). *WBK-Ausbilderhandbuch Feuerwehr*.
- Kelsey, C. (2016). *The new mask that could help firefighters find people in burning buildings*. URL: <https://www.walesonline.co.uk/business/business-news/new-mask-could-help-firefighters-11385204> (besucht am 17.11.2019).
- Kemper, H. (2015). *Gefahren der Einsatzstelle. Einsturz*. Fachwissen Feuerwehr. ecomed.
- Khronos Group (2020). *OpenCL Overview*. URL: <https://www.khronos.org/opencl/> (besucht am 02.01.2020).
- Kinast, J. (Apr. 2010). "Feuerwehr: Brandgefährliche Glutnester". In: *Westdeutsche Zeitung*. URL: https://www.wz.de/nrw/duesseldorf/feuerwehr-brandgefaehrliche-glutnester_aid-31026565 (besucht am 09.11.2019).
- Kleger, E. (2008). "Schwarzkörperstrahlung". Magisterarb. Pädagogische Hochschule des Kantons St. Gallen.

- Linde, C. und Dittrich, B. (2013). *Wärmebildkamera: Physikalische Grundlagen - Aufbau und Funktion - Gerätekunde - Brandeinsatz - Gefahrguteinsatz - Einsatzgrenzen - Geräteübersicht*. Fachwissen Feuerwehr. ecomed.
- Minh, V. H., Aleef, T. A., Pervaiz, U., Hagos, Y. B. und Khawaldeh, S. (2017). *Smoothness-based Edge Detection using Low-SNR Camera for Robot Navigation*.
- OpenCV (2019[a]). *About*. URL: <https://opencv.org/about/> (besucht am 22.12.2019).
- OpenCV (2019[b]). *Denoising*. URL: https://docs.opencv.org/4.1.2/d1/d79/group__photo__denoise.html (besucht am 18.11.2019).
- OpenCV (2019[c]). *Image Filtering*. URL: https://docs.opencv.org/4.1.2/d4/d86/group__imgproc__filter.html (besucht am 26.11.2019).
- Oswald-Tranta, B. (2017). "Motion Deblurring of Infrared Images". In: *AMA Conferences 2017 - SENSOR 2017 and IRS2 2017*, S. 783–787.
- Pizer, S. M., Amburn, E. P., Austin, J. D., Cromartie, R., Geselowitz, A., Greer, T., Romeny, B. t. H., Zimmerman, J. B. und Zuiderveld, K. (1987). "Adaptive Histogram Equalization and Its Variations". In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 39, S. 355–368.
- Prog (Juli 2017). *Plancksches Strahlungsspektrum für Temperaturen von 100 K bis 10000 K in einem doppeltlogarithmischen Koordinatensystem*. CC BY-SA 4.0. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BlackbodySpectrum_loglog_de.svg (besucht am 09.11.2019).
- Qwake Technologies (2018[a]). [Webseite von Qwake Technologies]. URL: <https://www.qwake.tech> (besucht am 17.11.2019).
- Qwake Technologies (2018[b]). *C-Thru. Search & Rescue Performance Test*. URL: <https://www.qwake.tech/s/results.jpg> (besucht am 15.11.2019).
- Reddy, B. N. M., Shanthala, S. und VijayaKumar, B. R. (2017). "Performance Analysis of GPU V/S CPU for Image Processing Applications". In: *International Journal for Research in Applied Science Engineering Technology* 5.II, S. 437–443.
- Ries, C. B. (2010). *Optische Systeme: Bildvorverarbeitung*. Techn. Ber. Fachhochschule Bielefeld.
- Russ, J. C. (2011). *The Image Processing Handbook*. Bd. 6. CRC Press.
- Schacht, F. (2014). "Non-Local-Means-Algorithm vs. Expert Regularizers". Magisterarb. Westfälische Wilhelms-Universität Münster.
- Scharr, H. (2000). "Optimale Operatoren in der Digitalen Bildverarbeitung". Diss. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.
- Scott Safety (2017). *SCOTT AV-3000 HT FULL FACEPIECE. INSTALLATION AND OPERATION INSTRUCTIONS*.

-
- Scott Safety (2019). *3M™ Scott™ Sight In-Mask Thermal Imager*. URL: <https://www.3mscott.com/products/scott-sight/> (besucht am 17.11.2019).
- Steinbrecher, R. (1993). *Bildverarbeitung in der Praxis*.
- viZaar AG (2019). *Emissionsgrad-Tabelle*. URL: www.thermografie-xtra.de/tipps-tricks/emissionsgrad-tabelle (besucht am 29.12.2019).
- Wagner, P. (2019). *Bildgröße und Auflösung*. URL: <http://www.scandig.eu/BildgroesseAufloesung.html> (besucht am 28.10.2019).

A Anhang A

Quellcode

Da eine Weiterentwicklung des Prototyps erfolgt und das exemplarisch umgesetzte Programm somit ständigen Aktualisierungen unterliegt, wird der Quellcode zusätzlich zum beigefügten Datenträger ebenfalls über das folgende Repository zur Verfügung gestellt. Um die Entwicklung des Prototyps nachvollziehbar zu gestalten, wird neben dem aktuellen Code ebenfalls eine Version mit dem Stand zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit zugänglich sein. Das Repository ist über folgenden Link zugänglich:

<https://github.com/Adolar13/Masterarbeit.git>

Der Autor versichert, dass der Prototyp wenigstens im Zeitraum vom 06.01.2020 bis 05.01.2021 unter obig genannter Quelle vorzufinden ist.

B Anhang B

Inhaltlich-semantisches Transkript zum Interview am 27.05.2019

Transkriptionsregeln/Legende¹:

- Interviewer = I.
- Befragter = B. Halbsätze, Satzabbrüche = /
- Pausen ab 3 Sek = (...)
- Betonung = VERSALIEN
- Emotionen = (lacht, seufzt, usw.)
- Unverständlichkeiten = (unv.)
- Vermutete Wörter mit Fragezeichen in Klammer = (ok?)

[Beginn Aufnahme]

I: So, ich habe mir ein paar Fragen schon notiert. Zuerst würde ich sagen, inwieweit wird der taktische Einsatz mit Wärmebildkameras gelehrt? Ich habe da so ein Buch gehabt, das ist aber etwas älter schon, das ist glaube ich von 2013 oder so, und da wird gesagt, dass es gar nicht so viel in der Lehre vorkommt und man sich das eher selber aneignen muss.

B: Genau, das ist richtig. Im Rahmen der Grundausbildung der Kollegen ist das Thema Wärmebildkamera ganz sporadisch nur dabei. Wir machen bei uns selber mit Einführung der Wärmebildkameras/ haben wir eine Einweisung darauf bekommen. Wir haben jetzt ein zweites Modell hier in Dienst genommen, oder nehmen gerade in Dienst. Ein zweites Modell, wir haben also im Löschzug zwei Wärmebildkameras, weil wir zwei Löschfahrzeuge haben und jedes hat eine und dahingehend gab es auch eine Schulung. Wir haben da Multiplikatoren ausgebildet, die dann unsere Kollegen dann Stück für Stück, je nachdem

¹(vgl. Dresing und Pehl 2015, S. 21 ff.)

wie sie ja auch im Dienst sind, an dem Gerät ausgebildet. Was kann das, was kann es nicht, wofür können wir es tatsächlich verwenden.

I: Ok, gut. Sie haben schon gesagt, ein neues Gerät. Welche Kameras kommen denn zum Einsatz? Also haben sie da ein Modell?

B: Die Modellbezeichnung können wir uns jetzt gleich ankucken, die hab ich jetzt nicht im Kopf. Ich weiß dass eine von Träger ist und eine von Flicker.

I: Ok, kommt bei verschiedenen Einsätzen auch verschiedene Kameras zum Einsatz? Also es gibt ja welche, sag ich mal, die gekühlt sind, ungekühlt sind. Die gekühlten sind ja meistens genauer.

B: Ja, also wir haben ja bei uns im Löschzug letztendlich nur die beiden Kameras. Der/ Wir haben bei uns noch den Zugführer Umweltschutz. Also das ist der sogenannte U-Dienst. Das ist also ein Kollege im gehobenen Dienst, der speziell für alle Einsätze zuständig ist von der Führung her, die mit Umweltschutz zu tun haben, beziehungsweise mit Gefahren, die aus Gefahrstoffen herrühren. Und der hat auf seinem Fahrzeug noch weitere Wärmebildkameras, die mit zum Einsatz kommen können. Aber dazu muss das Fahrzeug immer separat in die Einsatzstelle geführt werden, denn wir als Löschzug im Angriff letztendlich damit wo wir arbeiten/ mit den Kameras mit denen wir arbeiten im Alltag, das sind die auf dem Löschzug und nicht die vom Gehilfen. Ich weiß aber nicht im Detail, welche er noch draufhat, es kann durchaus sein, dass da eine gekühlte mit dabei ist, aber ich glaube unsere selber, die sind nicht aktiv gekühlt. Die sind recht einfach gehalten, erstens vom Preis her und zweitens von der Anwendung her. Das ist natürlich ganz wichtig, weil unsere Kollegen sollen das Ding einschalten und dann sollen sie damit arbeiten.

I: Genau das wäre meine nächste Frage sozusagen gewesen. Wird die vorm Einsatz kalibriert oder wird einfach die Automatik genommen, vorkalibriert, einsatzabhängig?

B: Also eine Kalibrierung findet nicht statt, es gibt bei der Fahrzeugübernahme einen Kollegen, der nimmt die Wärmebildkamera in die Hand, guckt, dass sie optisch in Ordnung ist, der Akku geladen, schaltet sie ein, macht kurzen Check, schaltet sie wieder aus und dann fertig.

I: Ok, ok. Also (...) genau, da gibt es ja bestimmt einen Arbeitsbereich, also es wird einfach automatisch genommen und dann ja/

B: Genau, sobald wir zur Brandbekämpfung vorgehen, im Einsatzfall, ist die Wärmebildkamera mit dabei. Die hat ja auf dem HLF 10, was gerade beim Brandeinsatz momentan noch als erstes vorgeht/ geht nur ein/aus, da gibt's nicht verschiedene Modi. Das ist ja

das Gute, das es einfach zu bedienen ist. Ich weiß, dass der/das man die programmieren kann am PC und dann könnte man verschiedene Sachen da noch aktivieren, aber das ist bei uns nicht der Fall. Also ich finde das auch gut so. Mehr Möglichkeiten zum Umstellen, desto mehr Fehlerquellen.

I: Richtig, richtig. Gut wenn wir die Modelle jetzt im Kopf haben, wissen wir die Arbeitsbereiche jetzt wahrscheinlich auch nicht, in denen die funktionieren müssen. Also, in welchen Arbeitsbereichen würden die funktionieren, in welchen Temperaturbereichen, ist das bekannt?

B: Also mir jetzt persönlich nicht, da müssten wir jetzt...

I: Also wenn wir die Modelle haben, dann könnte ich das ja selber nachforschen.

B: Wir können aber gerne mit dem Gerätewart mal sprechen, der wird die Anweisungen vorliegen haben.

I: Genau (...) das wären auch die nächsten Fragen gewesen, was die typischen Werte sind, aber ich kann das im Allgemeinen fragen, was so die Temperaturen, die, sag ich mal, aufgenommen werden müssen von der Kamera bei einem Wohnungsbrand, und welche Temperaturen sind in dem Raum üblicherweise am häufigsten.

B: Also wenn wir vom Standard Wohnungsbrand ausgehen, den wir ja auch noch als Bewertungskriterium genommen haben, nach den AGBF-Schutzz Zielen, müssen wir letztendlich rechnen Temperaturen, zwischen hundert Grad, die das Minimum wahrscheinlich sind bei dem Vorgang bis hin zu sechs-, siebenhundert Grad auf jeden Fall. Aber, je nachdem was für Brände, und das kann man natürlich vorher schlecht beurteilen, können die Temperaturen auch höher sein. Aber dieser Bereich, korrigier mich, wenn ich da jetzt falsch liege, das ist der Bereich, der so üblich ist.

I: Also sind dann normalerweise die Wände auch schon auf diesen Temperaturen von hundert Grad?

B: Ja, auf jeden Fall. Also ein Raum in dem es brennt kriegen wir natürlich deutlich über hundert Grad. Ja, das ist klar. Also da sind wir regelmäßig so bei drei-, vier-, fünfhundert Grad in diesem/ in der Hitzezone, damit müssen wir auf jeden Fall rechnen. Und diese massiven Temperaturunterschiede machen es uns natürlich wiederum leichter, die Temperaturunterschiede, die ja durch die Kamera dargestellt werden, dann eine Personensuche zu machen. Weil die Person liegt meistens eher unten, sprich in der relativ kühleren Zone, wenn wir sie als solche bezeichnen wollen, und aufgrund der hohen Temperaturdifferenz ist sie natürlich im Kontrast der Kamera viel besser feststellbar.

I: Jetzt kommt es zu den Einsatzmöglichkeiten. Also für was wird sie verwendet.

Wird sie auch für den Türcheck verwendet oder auch für (...) Absuchen von Brandherden in der Decke, in den Wänden?

B: Ja, dafür ist sie auch gedacht. Letztendlich zur/ zum/ zur Personensuche ist die primäre Anwendung. Also zur Personensuche, dann zur Orientierung im Raum der verqualmt ist natürlich, zur Kontrolle bei der Restablösung, ja also Glutnester finden und so weiter und so fort. Man kann sie durchaus verwenden bei der Suche von Personen in Gewässern, ja, die irgendwo ins Gewässer gefallen sind. Man kann sie ein Stückweit auch zur Feststellung von Füllständen von Gefäßen verwenden. Und was war das eine? Das hatten Sie jetzt noch gesagt?

I: Den Türcheck.

B: Türcheck, genau! Zum Türcheck wird sie genauso verwendet. Aber dort muss man wiederum aufpassen, was ist es für eine Tür, also was für ein Material ist sie. Weil gerade bei Glastüren und so weiter und so fort, da kann man das vergessen. Also dort wo es auch taktisch möglich ist und Sinn macht, nutzen wir sie. Aber wir müssen natürlich auch die Kriterien kennen und dort, und das ist auch in der Ausbildung ganz wichtig, wo es uns nichts bringt. Im Gegenteil, wo vielleicht sie uns auch ein falsches Bild liefert und wir dann falsche Schlussfolgerungen ziehen.

I: Genau, was gibt es denn für Probleme beim Einsatz? Das ist ja, sag ich mal, die jetzt bekannt sind bei den Wärmebildkameras? Also, fallen die Geräte vielleicht mal aus oder ist das schon mal passiert, dass eine ausgefallen ist?

B: Nein, eigentlich nicht. Aber eines der Hauptprobleme bei den Kameras ist der Akku, ja aufgrund das (...) der halt relativ rasch verschleißt und zumindest kenn ich das noch von dem Vorgängermodell, dass der Akku dann halt eben immer in der Ladung ist, die nicht abgeschaltet hat, sprich, da powert die ganze Zeit Ladestrom drauf. Das ist natürlich nicht gut für den Akku. Und dann haben wir sie entnommen und nach zehn Minuten war's schon vorbei. Das war so eines der Hauptprobleme, die wir da eigentlich bislang hatten. Ansonsten bin ich jetzt ehrlich gesagt nicht mehr ganz so im Thema, weil ich jetzt natürlich nicht mehr so oft mit der arbeite, oder ist dir noch was bekannt? Wir können/ Wir gehen auf jeden Fall jetzt nochmal zusammen raus und sprechen mal mit dem Gerätewart. Der kann uns da sicherlich noch ein paar detaillierte Auskünfte darüber geben.

I: Ok. Was ich jetzt auch recherchiert habe, ist das, wenn der Rauch sehr heiß ist, das die Kamera oft versagt. Ist das der Fall oder ist das schon mal vorgekommen?

B: Also das habe ich noch nicht gehört oder kann das nicht bestätigen.

I: Also normalerweise kann man meistens durchsehen?

B: Ja.

I: Ok. Gut (...). Genau, jetzt würden wir zu diesem System an dem ich arbeite, und die Datenbrille, an der der andere Student arbeitet/ Ich habe jetzt schon einiges aufgeschrieben, was man damit machen könnte vielleicht, und wenn jetzt noch Wünsche von euch reinkommen würden, oder vielleicht was gut wäre/ Ich hatte ja schon mal gesagt, dass die Kantenerkennung sein wird, sozusagen dass man nicht das ganze Bild sieht, sondern eben nur die Kanten um sich zu orientieren. Wäre eine Ansichtsmöglichkeit.

B: Wie muss ich mir das aber vorstellen?

I: Also kommt darauf an, wie die Brille ist. Entweder man hat den Display unten, dann hat man das ganze Kantenbild oder wenn es eine „See Through“ ist, also man Durchsehen kann, dann hat man quasi das ganze Gesichtsfeld eingeschränkt, sondern man hat nur die Kanten. Dann kann der Kameramann also trotzdem noch durchsehen, hat aber quasi bei Objekten oder bei Kanten quasi Kanten. Damit er trotzdem noch sehen kann, aber eben die Kanten/

B: Das wird jetzt also/ wenn ich jetzt einen Schrank hab, nicht der Schrank dargestellt, sondern nur die Kanten.

I: Das ist das worauf es hinarbeiten sollte. Also wenn es funktioniert. Genau.

B: Also im Angriffsfall hat der nur noch eine Brille auf und keine Kamera mehr oder wie?

I: Die Kamera wäre dann quasi angebracht am Helm.

B: Die Kamera ist am Helm dran, und du hast dann die Maske oder den Helm, mal gucken, ein Hologramm oder so etwas in der Richtung, ja? Also entweder ein kleines Display oder Hologramm, oder etwas wo du durchgucken kannst und dort wird das dann dargestellt? Und dort ist dann eben auch zu prüfen, ob man sagt, willst du das permanent haben oder drückst du auf eine Taste und sagst, jetzt brauch ich das und ansonsten stört es mich nur.

I: Genau das wäre eine Frage: Sollte es ausschaltbar sein, das denke ich nämlich schon.

B: Ja.

I: Da wäre gleich die nächste Frage, Was wäre eine gute Interaktion? Taster ist vielleicht schwer zu finden, weil/ vielleicht wäre sogar mit Gesten der am Handschuh irgendetwas, mit den Fingern tippen gut? Ich weiß jetzt nicht, was da, sag ich mal, gut wäre.

B: Also letztendlich wäre wahrscheinlich irgendeine berührungsempfindliche Sensorik am Helm gut. Das man sagt, An – Aus. Aber zweimal dann halt. Weil im Handschuh selber wird schwierig, weil man fast den natürlich ständig an und da ist natürlich die Gefahr, dass man das auslöst, mehr gegeben. Und beim Helm ist es eher unwahrscheinlich, dass man ständig etwas auf den Kopf kriegt. Im verrauchten Raum Gesten wird ja nicht funktionieren, oder?

I: Doch. Weil wenn die Kamera durch den Rauch durchsehen kann, sollte es ja funktionieren, ja.

B: Und dafür nutzt du ja auch die Wärmebildkamera, dass du durch den Raum kucken kannst.

I: Genau. Ja also, muss getestet werden, logischerweise aber wäre jetzt mein erster Gedanke, was man mal testen könnte, quasi. Genau, also wäre die Möglichkeit aufzunehmen, also die Kamera auch zur Aufnahme nutzt, dass zum Beispiel später noch etwas ausgewertet wird oder/

B: Das ist ein „Nice-to-have“ aber nicht notwendig. Fotos können wir jetzt schon aufnehmen, also von dem Bild, aber jetzt kein Film/ Naja das Problem ist ganz einfach auch, dass von unseren Strukturen und Denkweise das überhaupt nicht vorhanden ist, dass man in der Nachbereitung solche Mittel dazu nimmt. Also ich fände es eine gute Idee, einfach mal/ man muss ja mal auch anfangen, ja. Dann ist es sicherlich gut zu haben um dann in der Einsatznachbesprechung auch mal zu sagen: Ok, so seid ihr da vorgegangen, das war vielleicht so gut, die Probleme habt ihr gehabt, hier müssten wir in der Ausbildung vielleicht nochmal gegensteuern, weil das einfach nicht gut war wie ihr das gemacht habt. Also ist sicherlich eine interessante Geschichte. Kann man durchaus mit vorsehen. Aber was ich jetzt nicht machen würde, wäre jetzt noch eine Telemetrie dranhängen. Das man so etwas wie ein Livebild rausschickt, ich glaube das wäre zu viel des Guten. Zumal das wieder von so vielen Faktoren abhängig ist, die Inhaus-Versorgung ist ohne hin selbst über Funk schon kritisch und dann noch solche Bilder rausschicken, die ja auch eine relativ höhere Datenrate benötigen, und das frisst wieder Akkuleistung. Das nächste ist halt der Akku. Wir haben nicht viel Platz und vor allen Dingen: Das Gewicht des Helms ist ja an sich schon hoch und jetzt fangen wir an, an den Helm noch Dinge anzubauen und (...) das müssen wir mal gucken. Da sind zweihundert Gramm schon eine ganze Menge. Das muss der Hersteller erst einmal zulassen, dass du an den Helm etwas anbaust. Das ist auch erst einmal Fakt. Das steht alles außer Frage. Wir müssen vom Konzept erst einmal was vorbringen, was der Hersteller auch überhaupt einbauen kann. Wenn es so etwas geben würde, wäre ein sicherheitsrelevanter Aspekt, ich weiß nicht, ich meine aufwendig ist es wahrscheinlich ziemlich, so eine Art wie eine

Rückwegsaufzeichnung.

I: Genau das habe ich auch als nächstes/

B: Das wäre das man so eine Art Tracking macht, wie viele Schritte du zum Beispiel vorgegangen bist, wie viele Etagen du zurückgelegt hast um einerseits für deinen Rückweg das noch einmal Revue passieren zu lassen, oder auch für den Sicherheitstrupp, der im schlimmsten Fall nachkommen muss um die zu retten, genau weiß, so und so sind die gelaufen. Das haben wir schon mit in der Überlegung.

I: Ja. Ich schaue mal, ob es noch aufnimmt, Ja sehr gut. Da habe ich schon einmal so ein bisschen eine Vorforschung gemacht, das geht theoretisch auch direkt in der Kamera, eine Art Karte zu bauen, den Weg zu finden. Also wäre auf jeden Fall von Interesse, sozusagen?

B: So etwas wäre wiederum natürlich dann im Rahmen der Telemetrie interessant für den Einsatzleiter, wenn der so etwas dann rauskriegt, das muss ich schon sagen. Und dann brauch ich immer noch kein Livebild, sondern dann könnte man zum Beispiel sagen: Ok, jetzt schickt das mal die Karte raus zu uns Einsatzleiter.

I: Also das wird tatsächlich schwierig, weil die Kameras noch nicht so hochauflösend sind und Objekte mit gleicher Temperatur auch schwierig zu erkennen aber es gibt einige Forschungen dazu, vielleicht wird man sehen. Genau, Hotspots wären wahrscheinlich dann gut zu markieren, wie Hinweis, da ist es sehr heiß, oder so vermutlich?

B: Das ja.

I: Wäre da auch ein Tracking gut, zu sagen, in der Richtung ist ein Hotspot, in der Richtung ist ein Hotspot. Das man sich zurückfindet dahin?

B: Ja. Gerade innen im Raum, wo man null Sicht hat, ist das/ so etwas auf jeden Fall immer ein gutes Hilfsmittel.

I: Also ergo man dreht sich weg und sagt da ist der Hotspot. Ok, müsste man dann sehen, wann das Display dann überladen ist mit Informationen, aber/

B: Und das nächste, darüber hatten wir ja auch schon gesprochen, wir gehen mindestens immer zu weit vor, also truppweise, und da ist auf jeden Fall eine gute Geschichte, diese Erkennung, wo ist mein Teampartner, beziehungsweise wenn ich ihn verloren habe, wo er zuletzt war. Das man eben auch sagt, ok, keine Ahnung nach fünf Metern reißt hier eine Bluetooth-Verbindung ab, weil fünf Meter ist schon relativ viel, da würde ich sagen, ok, das ist ein tolerierbarer Bereich in dem Raum und das man dann eben eine Pfeilanzeige hat, ok, er war zuletzt da, oder er ist jetzt in diese Richtung oder so.

I: Ja. Gut, das wäre jetzt nicht direkt Wärmebildkamera, jemand zu visualisieren, aber allgemein ja. Genau (...), ich glaube das waren soweit erst einmal meine Fragen. Ich hab jetzt gesehen, dass Lichter im Helm schon verbaut sind. Da wäre ja auch eine Idee, da quasi da eine Wärmebildkamera mit reinzubauen.

B. Genau. Also, vom Platzangebot her sehe ich das jetzt unkritisch. Dort statt der Lampe da jetzt die Kamera rein zumachen, beim Angriffstrupp, denn ohnehin die Lampe im Brandeinsatz gar nix nützt, die Lampe bringt überhaupt keinen Mehrwert in dem Fall. Die Lampe ist letztendlich dafür gedacht, wenn man sich draußen irgendwo bewegt, oder irgendwo in einem Raum ist, der aber nicht verqualmt ist und es dunkel ist, dass man Licht hat und sieht, wo man hintritt. Beziehungsweise das man die Hände freihat, wenn man jetzt etwas schreibt oder irgendetwas lesen muss der so. Als wenn ich da jetzt noch irgendwie eine Lampe halten muss, nur dafür ist das gedacht, aber für nichts anderes.

I: Ok. Noch eine Frage habe ich, und zwar hängt die Durchdringung von den Wärmebildkameras ja von der/ den Stoffen ab, die brennen. Und je nachdem wie die Teilchengröße ist in dem Rauch, was sind denn, sag ich mal, bei einem Wohnungsbrand die üblichen (...) Stoffe, die brennen? Vermutlich Holz?

B: Alle möglichen Kunststoffe. Dann Holz selbstverständlich, aber Holz/ meistens sind es ja keine/ ist es kein reines Holz, sondern dann sind es meistens irgendwelche verklebten Geschichten. Irgendwelche Folien, beziehungsweise wie sagt man dazu, (...) was du noch drüber machst (...), Furnier, was furniertes, wo letztendlich ein Kunststoff ist, der eine Holzfurnierplatte drüber hat, und mit Klebstoff und dann war's das. Also es sind größtenteils Kunststoffe, die verbrennen.

I: Das ist wahrscheinlich eine etwas konkrete Frage, bei diesen Kunststoffen, wie groß dann die Teilchen im Rauch sind, das wissen Sie jetzt wahrscheinlich nicht aus dem Kopf (...) pro Kunststoff wahrscheinlich ist das unterschiedlich/

B: Das werden wir auch niemals bewerten. Wir haben einen Rauch, einen Brandrauch an dem sich diese Schwebstoffe befinden, aber in welcher Größe, Stärke, Intensität, das bewerten wir nicht und ist auch grundsätzlich egal.

I: Ja, ok. Also es geht darum, dass es ja (...) auch Infrarotkameras gibt, die näher am sichtbaren Bereich arbeiten, die aber nicht so gut für die Rauchdurchdringung sind, das hängt ja von der Teilchengröße ab. Die sind aber, was die Auflösung/ was die Auflösung angeht, besser. Also eventuell für Sachen wie Wegerkennung um einiges besser wäre

B: Da ist vielleicht von Interesse wenn Sie sich mal mit der Schule Magdeburg in Verbindung setzen, beziehungsweise mit dem Institut der Feuerwehr, Magdeburg beziehungsweise

(unv. Hermutsberge?), die forschen in diesem Bereich. Ja, und die können Ihnen wahrscheinlich in dieser Richtung, gerade was die Bestandteile von solchen Brandgasen sind, mehr Informationen geben. Das können die auf jeden Fall. Weil die forschen aktiv dort, die haben ihr eigenes Labor, wo die irgendwelche Brandversuche machen und solche Dinge wahrscheinlich auch in der Bewertung viel mehr aufnehmen.

I: Ok, das ist ein guter Tipp. Genau (...), ach so ja, wäre es noch hilfreich, quasi, umzuschalten für eine Verwendung (...) im konventionellen Bereich, also dass das normale Wärmebild angezeigt wird? (...) Ich meine, an sich ist die Verwendung ja gleich/

B: Nein, nicht wirklich.

I: Also im Endeffekt werden die ja auch nur interpretiert, die Wärmebilder und dann kommt das gleiche dann/ (Ok), Gut, das war es dann erst einmal so weit, glaube ich. Ich schau noch einmal kurz.

B: Wie muss ich mir das dann vorstellen? Ist das dann wie ein Fadenkreuz, mit dem ansteuern kann, wenn ich zum Beispiel was messen will, von der Temperatur her, weil im Prinzip kann ich das bisher so machen, dass er mir dann die Gradzahl anzeigt, in dem Punkt wo ich das Objektiv drauf halte.

I: Das wäre noch eine weitere Anwendungsmöglichkeit. Also eine Messung hatte ich jetzt noch nicht mit drinnen. Klar Türcheck, aber eine Messung wäre natürlich auch möglich.

B: Ja, das macht auf jeden Fall Sinn. Das man, wenn man einen Punkt hat, gucken kann, ja wie heiß ist denn der.

I: Ja, ja. Wäre vermutlich auch gut, wenn der dann umschaltbar ist, also dann nicht die ganze Zeit da ist. Genau ok.

B: Ja, dann lasst uns gern mal an die Modelle gehen, da kucken wir mal. Da sprechen wir auch mit dem Gerätewart noch einmal.

I: Gern.

[Ende Aufnahme]

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hinweise verwendet.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und noch nicht veröffentlicht.

Dresden, der 6. Januar 2020

Paul Wolff