

Adrian Röhrle, Bernhard Kleiner, Carsten Dolar, Michael Ulrich,
Yomna Abdelrahman, Bin Yang, Albrecht Schmidt und Oliver Röhrle

Untersuchungen für feuerwehrtaugliche Wärmebildkameras

mit erweiterter Realität durch Radarsensorik

Ergebnisse des BMBF-Projekts „FeuerWeRR“

1 Das Ziel

In Deutschland sterben jährlich etwa 350 Menschen bei Bränden. Die rund 25 000 Feuerwehren (Berufsfeuerwehren und Freiwillige Feuerwehren) rücken in Deutschland zu rund 3,5–4 Millionen Einsätzen pro Jahr aus. Unter den 350 Toten sind unter anderem auch Feuerwehrleute, die zur Hilfe ausgerückt sind. Der Großteil der Feuerwehrleute tut dies in seiner Freizeit. Nicht selten gefährden Feuerwehrleute ihre Gesundheit oder gar ihr Leben. Die Internetplattform „atemschutzunfaelle.eu“ hat im Zeitraum von 2000–2019 ermittelt, dass 19 Feuerwehrleute während eines Einsatzes unter Atemschutz gestorben sind. Im gleichen Zeitraum sind 195 Feuerwehrleute beim Einsatz verletzt worden. Es wurde versucht, die Sicherheit im Atemschutzeinsatz zu erhöhen, indem ein technisches und organisatorisches Umdenken erfolgte. Die Einsätze in Köln (1996) mit einem toten Berufsfeuerwehrmann und in Tübingen (2005), bei dem zwei Freiwillige Feuerwehrleute ums Leben kamen, hatten tiefgreifende Veränderungen zur Folge. Trotzdem sind die Feuerwehrleute bei Brandeinsätzen immer noch großer Gefahr ausgesetzt, insbesondere durch die schlechte Orientierung in verrauchten Räumen. Moderne, multifunktionale Großbauten (Krankenhäuser, Altenheime, Schulgebäude, Mehrgenerationenhäuser, große Wohnblöcke, Firmen oder Bürogebäude) besitzen oft eine hochkomplexe Architektur. Auch in Tiefgaragen, Tunnelanlagen, Werkstätten und Laboren erschweren verwinkelte Flure die Orientierung im Gebäude. Hilfsmittel wie Feuerwehrpläne, die über technische und bauliche Gegebenheiten informieren, gibt es in begrenzter Anzahl bei Gebäuden mit besonderen Gefahren. Innerhalb kürzester Zeit muss die Feuerwehr die Raumstruktur im Gebäude und deren aktuelle Situation (versperrter Gang, eingestürzte Brüstungen, umgefallene Schränke, Lage von verletzten Personen) erfassen.

Beispielhaft sei hier die Situation eines Straßentunnels genannt. Der Brand im Gotthardtunnel (2001) mit elf Toten und zahlreichen Verletzten zeigt auch die große Gefahr bei übersichtlichen Gebäuden mit einer sehr hohen Eindringtiefe. Am Einsatzort fanden die Feuerwehrleute eine

ungewöhnliche und unübersichtliche Situation vor. (Straße versperrt durch gewendete Pkw und querstehende Lkw-Anhänger). Für die schnelle Erfassung der Situation unter den zeitlich begrenzten Bedingungen eines Atemschutzeinsatzes (ca. 30 min) und der Übermittlung dieser Information zum Einsatzleiter sind Hilfsmittel wie Wärmebildkameras unverzichtbar.

Zur Personensuche und zur Orientierung innerhalb des Einsatzes werden bereits heute Wärmebildkameras verwendet. Die Wärmebilder zeigen jedoch lediglich einen zweidimensionalen Temperaturverlauf. Durch die zweidimensionale Sicht lässt sich der optimale Weg zum Verletzten, der eventuell durch Hindernisse verstellt ist, jedoch schwer einschätzen. Darüber hinaus lässt sich die Temperatur bei stark reflektierenden Materialien mit einer Wärmebildkamera nur schwer oder gar nicht ermitteln. Mithilfe eines Radarsensors sollen die erfassten 2-D-Wärme-Bilder mit der bisher fehlenden Tiefeninformation ergänzt und somit räumliches Sehen ermöglicht werden. Durch räumliches Sehen können Gefahren schneller erkannt werden. Im Feuerwehreinsatz ist es wichtig, Gefahren früh zu erkennen und damit schnell einzuschätzen.

Ziel des vom BMBF geförderten Projektes „Feuerwehrtaugliche Wärmebildkamera mit erweiterter Realität durch Radarsensorik“, kurz „FeuerWeRR“, ist es, durch eine verbesserte Orientierung die Sicherheit für Einsatzkräfte zu verbessern und die Zeit für die Opfersuche zu reduzieren. Eine intelligente, intuitiv zu bedienende Schnittstelle, die den Feuerwehrmann bei der Interpretation von Umgebungsdaten aus Radar- und Infrarotsensoren bestmöglich unterstützt, soll konzipiert und entwickelt werden. Die Basis ist ein hochauflösendes Radarmodul, bei dem mehrere Funktionsbausteine auf einem einzigen kleinen Chip untergebracht sind, und das sich daher leicht in die Thermokamera integrieren lässt, ohne dass sich Größe und Gewicht der Kamera merklich ändern.

Das Projektkonsortium ist ein Zusammenschluss relevanter Forschungsstellen, Firmen und Endanwender im deutschen Raum für die jeweilige Domäne. Es vereint die Bereiche der Radartechnologie, Biomechatronik, Sensordatenfusion,

Visualisierung und im Besonderen die Sicherheitstechnologie und Feuerwehrpraxis. Es formt damit eine für diese Thematik notwendige umfassende Kompetenz, um letztendlich relevante und umsetzbare Lösungen für die Einsatzszenarien der Feuerwehr zu erarbeiten.

2 Grenzen bei der Nutzung von Wärmebildkameras

Die derzeit auf dem Markt befindlichen Wärmebildkameras haben aus physikalischen Gründen einige Grenzen. Die Wärmebildkamera kann kein räumliches Bild erzeugen, sie kann nicht durch Glas hindurchsehen, und die Reflektion der eigenen Körperwärme an metallischen Oberflächen führt immer wieder zu Fehlinterpretationen der Einsatzkräfte. Durch Schulung und Verhaltensregeln im Umgang mit Wärmebildkameras werden die Einsatzkräfte auf die Probleme vorbereitet. Alle Maßnahmen führen jedoch wieder zu einer Reduktion der tatsächlichen Arbeitszeit unter Atemschutz im verrauchten Bereich, und damit zu einer späteren Erreichung des Auftragszieles, z. B. der Menschenrettung oder der Brandbekämpfung.

Obwohl moderne Wärmebildkameras eine große Hilfestellung bei verrauchter Umgebung sind, bergen sie auch Gefahren für die Einsatzkräfte. Beispielsweise sind Entfernungen im Wärmebild oft nur schwer einschätzbar, wenn die Szene keine Referenzobjekte bekannter Größe, z. B. Tische, Stühle, Personen, Pkw etc., enthält. Außerdem unterscheidet sich Wärmestrahlung in vieler Hinsicht von sichtbarem Licht. Beispielsweise reflektieren viele Oberflächen, z. B. Glasscheiben, Metall oder lackierte Flächen, die thermische Strahlung wie ein Spiegel, obwohl diese Objekte für sichtbares Licht entweder durchsichtig sind oder diffus reflektieren. Beispielsweise könnten Einsatzkräfte ihr Spiegelbild auf einer Glasscheibe für eine zu rettende Person halten. Bis sie diese Täuschung bemerken, geht wertvolle Zeit verloren.

Im Brandfall arbeiten die Feuerwehrleute oft bei extrem hohen Temperaturen und mit umluft-unabhängigem Atemschutz. Das Gewicht der mitgeführten Ausrüstung (Atemschutzmaske, Schutzkleidung, Werkzeuge, Messgeräte, Wärmebildkamera, Schlauch) beträgt 30 bis 50 kg. Wichtig ist deshalb, den Feuerwehrmann nicht noch zusätzlich zu belasten. Wärmebildkameras helfen heute schon bei der Orientierung, da die thermische Strahlung vom Rauch nur wenig beeinflusst wird. Ziel des Projekts FeuerWeRR ist es, die räumliche Wahrnehmung und Szeneninterpretation durch die Hinzunahme eines Radarsensors weiter zu verbessern. Ähnlich wie die thermische Strahlung durchdringt auch die Radarstrahlung den Rauch und kann deshalb im Innenangriff verwendet werden. Die Hinzunahme eines Radarsensors kann Wärmebildkameras in zweierlei Hinsicht verbessern: (1) Eine genaue Abstandsmessung kann die Orientierung in verrauchten Ge-

bäuden erleichtern und (2) eine genaue Messung der radialen Geschwindigkeit ermöglicht die Unterscheidung von echten Personen/Objekten und deren Spiegelbildern (Reflexionen).

Der im Projekt FeuerWeRR entwickelte Radarsensor ermöglicht die Messung von Abständen und radialen Geschwindigkeiten. Allerdings können mit Radar nur die Parameter „Abstände“ und „radiale Geschwindigkeiten“ derjenigen Objekte gemessen werden, die die Radarwellen reflektieren – typischerweise Ecken und Kanten. Deshalb kann nicht vorab bestimmt werden, für welche Abstrahlrichtung (Pixel im Wärmebild) eine Messung erfolgen soll. Stattdessen werden die Parameter aller Reflektoren im Sichtbereich des Radars gemessen und später in das Wärmebild eingeblendet.

3 Das FeuerWeRR-System

3.1 Überblick

Das FeuerWeRR-System basiert auf einem Millimeterwellenradarsystem, dass die Leistung von Infrarotkameras zur Orientierung in der Umgebung wesentlich verbessert. Das Radarmodul ist kompakt und leicht, sodass das System, kombiniert mit Trägheitssensoren und integriert in eine tragbare Infrarotkamera, handgetragen die Umgebung kartieren und wesentliche Ortsmerkmale detektieren kann. Dies ermöglicht eine präzise Abstandsmessung unter Einsatzbedingungen, wie z. B. in Tunneln oder in der Industrie, wo heutzutage optische Sensoren eingesetzt werden. In der direkten Konfiguration ohne weitere Datenverarbeitung werden die gemessenen Distanzinformationen durch das Radarsystem als Messwert in das Infrarotbild projiziert. Radarmessungen sind ähnlich wie Laser sehr anfällig gegenüber Absorption und Abstrahlung bei ungünstigen Geometrien. Deshalb ist es notwendig, mit dem Radarsystem einen größeren Bereich abzutasten, um möglichst viele hinreichend genaue Messwerte zu erhalten. Für die räumliche Zuordnung der verschiedenen Tiefen-Messwerte im Infrarotbild ist eine Kartierung unerlässlich und bedarf somit einer Bewegungsmessung des Radar-Infrarot-Systems. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil ist die bedarfsgerechte Visualisierung der Informationen für den Feuerwehrmann im Einsatzfall.

3.2 Umgebungserfassung mittels Radar und Infrarotkamera

Ein single-input-single-output-Radar (SISO-Radar) kann nur Abstände und Geschwindigkeiten messen, die Winkel (Pixel) der Radar-Detektionen sind zunächst unbekannt. Mithilfe einer speziellen dielektrischen Linse werden die Radarstrahlen fokussiert und so der Sichtbereich des Sensors eingeschränkt. Das Sichtfeld beträgt ca. 15° (etwas mehr als die Hälfte des Sichtfeldes einer Feuerwehr-Wärmebildkamera). Mithilfe

eines Structure-from-Motion-Algorithmus (SfM-Algorithmus) wird aus der zeitlichen Bildfolge und der geschätzten Kamerabewegung ein Tiefenbild der Szene errechnet, ähnlich wie bei einer Stereokamera. Aufgrund der geringen Auflösung der Wärmebildkamera und des Bildrauschens enthält dieses Tiefenbild viele Ausreißer. Außerdem ist durch die Ungenauigkeit der Bewegungsschätzung auch die Skalierung des Tiefenbilds ungenau. Allerdings können durch Clustering Objekte aus dem Tiefenbild extrahiert werden, die wiederum über ihre Entfernung den Radardetektionen zugeordnet werden können. Die fusionierten Detektionen enthalten die präzise Abstandsschätzung aus dem Radarsensor und die Richtungsinformation der Objekte aus dem Wärmebild. Ein Beispiel für das Ergebnis einer solchen Sensorfusion ist in Abbildung 1 gezeigt.

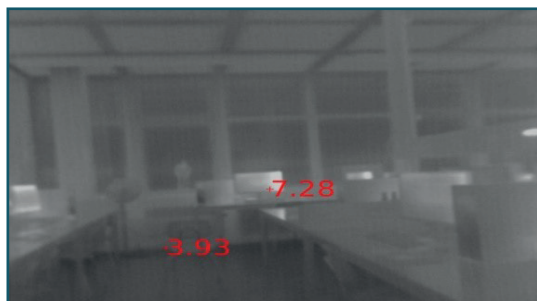


Abbildung 1: Die Radarreflexionen werden im Wärmebild angezeigt (Innenangriff).

Ein multiple-input-multiple-output-Radar (MIMO-Radar) kann außer Abständen und radialen Geschwindigkeiten auch die Richtung der Reflexionen bestimmen (Winkelschätzung). Eine Winkelschätzung wird hier durch mehrere Send- und Empfangselemente ermöglicht. Die Radarreflexionen aus dem MIMO-Radar können direkt im Wärmebild angezeigt werden. Die beiden vorgestellten Verfahren zur Lokalisierung der Radarmessungen im Wärmebild haben verschiedene Vor- und Nachteile. Das MIMO-Radar ist teurer als ein SISO-Radar, da mehrere Send- und Empfangselemente benötigt werden. Außerdem kann die Winkelauflösung des MIMO-Radars problematisch sein, wenn mehrere Radar-Reflexpunkte denselben Abstand haben. Eine höhere Winkelauflösung wird in der Regel durch Hinzunahme weiterer Send- und Empfangsantennen realisiert (höhere Kosten). Die Lokalisierung mit dem SISO-Radar setzt eine erfolgreiche Szenenrekonstruktion durch Structure-from-Motion (SfM) voraus. In Szenen mit ausreichend Textur im Wärmebild ist SfM einsetzbar, allerdings schlägt eine optische Rekonstruktion fehl, wenn das Wärmebild unzureichend Texturen aufweist (z.B. Rettungseinsatz in einem Keller). Auch die Genauigkeit der Eigenbewegungsschätzung wirkt sich stark auf das Ergebnis der Sensorfusion aus. Im Gegensatz dazu ist das MIMO-Radar unabhängig von Bildinhalt.

Die Lokalisierung der Radarreflexionen ist einerseits für Einsatzkräfte im Innenangriff hilfreich

(siehe oben), aber auch für die Einsatzleitung. Wird eine Sequenz von Wärmebildern mit fusionierten Radarmessungen aufgezeichnet, kann für die Einsatzleitung ein Panoramabild der Szene generiert werden. Diese Funktion ist in herkömmlichen Kameras bereits häufig verfügbar. Die Erweiterung in diesem Projekt ist lediglich eine Überlagerung der fusionierten Radarmessungen aller Wärmebilder. Hierfür wird die zur Erstellung des Panoramabildes bestimmte Bildtransformation verwendet. Ein Beispiel ist in Abbildung 2 zu sehen.

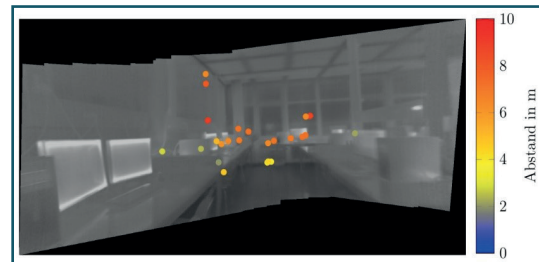


Abbildung 2: Panoramabild mit Tiefeninformation für die Einsatzzentrale. (Abbildung aus Ulrich, Michael; Yang, Bin: „Abschlussbericht Feuerwehraugliche Wärmebildkamera mit erweiterter Realität durch Radarsensorik“ übernommen).

3.3 Erfassung der Umgebungsgeometrie mittels Infrarotkamera

Das zuvor erwähnte Structure-from-Motion-Verfahren sucht in einem ersten Schritt markante Bildpunkte, die sich in zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Wärmebildern eindeutig einander zuordnen lassen. In einem zweiten Schritt wird aus den gefundenen Bildpunktkorrespondenzen die Kamera-Eigenbewegung geschätzt und anschließend für jede Bildpunktkorrespondenz mithilfe der Kamera-Eigenbewegung die relative Entfernung dieses Punktes bestimmt. Über diese Entfernungsmessung kann dann ein 3D-Modell der Szenengeometrie erstellt werden (Abbildung 3).

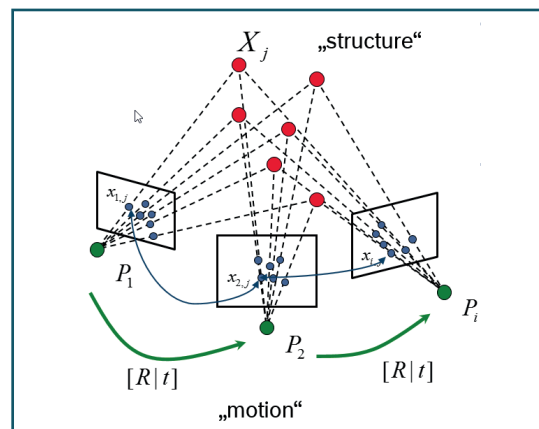


Abbildung 3: Das Structure-from-Motion-Verfahren errechnet aus korrespondierenden Bildpunkten (blau) die Kamerabewegung (grün) sowie die 3-D-Punkte eines Objektes (rot).

Voraussetzungen zur Anwendung dieses Verfahrens sind:

1. Der relevante Bildinhalt muss sich deutlich vom Bildrauschen in den Wärmebildern abheben.
2. Die Wärmebilder müssen einen genügend großen Bildkontrast aufweisen.
3. Die gefundenen Bildkorrespondenzen sollten möglichst gleichmäßig im ganzen Bild verteilt sein.
4. Die Wärmebildkamera muss bewegt werden, z. B. wie beim Absuchen eines Raumes mit der Wärmebildkamera am ausgestreckten Arm.

Dies bedeutet, dass das Verfahren nur für Wärmebilder eingesetzt werden kann, wenn in der beobachteten Szene eine genügend hohe Temperatur- oder Material-Varianz vorkommt. Mehr noch, die beobachteten Objekte selbst müssen eine lokale Temperatur- oder Material-Varianz haben, damit auf ihnen markante Bildpunkte identifiziert werden können. Abbildung 4 verdeutlicht dies anhand von zwei Beispielen, eine Büroszene und eine Außenaufnahme. In der Büroszene gibt es viele Flächen mit gleichem Grauwert, lediglich wenige Gegenstände besitzen eine ausgeprägte Struktur im Wärmebild, in der markante Bildpunkte im nächsten Bild wiedergefunden werden können. Anders ist dies in der Außenaufnahme. Hier ist fast überall im Bild eine genügend große lokale Varianz vorhanden. Es können sehr viele markante Bildpunkte identifiziert und im nächsten Bild wiedergefunden werden.

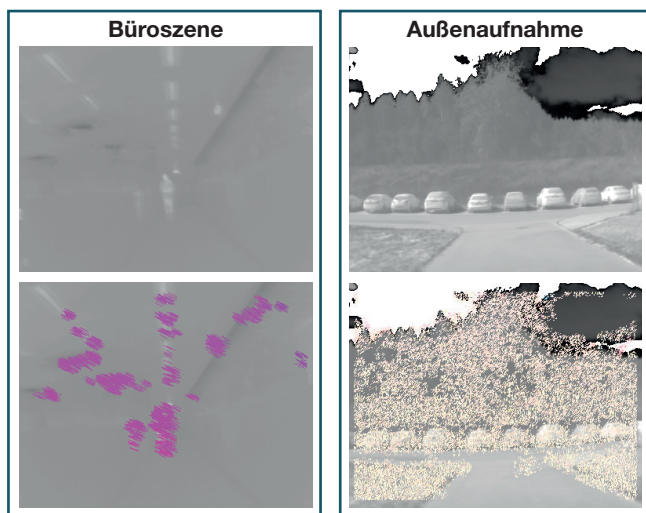


Abbildung 4: In einer Büroszene (linke Spalte) gibt es nur sehr wenige Bildregionen mit großem lokalem Kontrast, in welchen der optische Fluss bestimmt werden kann (zweite Reihe). In einer Außenaufnahme ist der lokale Kontrast fast überall ausreichend hoch, um den optischen Fluss anzuwenden.

Somit kann das Verfahren in Brandszenarien wie Wohnungs-, Keller- oder Tunnelbrand fast gar nicht eingesetzt werden, da in den Wärmebildern ähnlich wie in der Büroszene wenig lokaler Kontrast vorhanden ist. Abbildung 5 zeigt Aufnahmen einer Brandübung in einem Tunnel. Die Tunnel-

wände weisen im Wärmebild meist keinen lokalen Kontrast auf, da sie keine große lokale Temperatur- oder Material-Varianz besitzen. Selbst mit bloßem Auge kann man recht schwer erkennen, dass man sich in einem Tunnelgang befindet und in welche Richtung dieser führt. Lediglich die Kabelführung im oberen rechten Teil des Bildes deutet die Richtung an. Dies ist auch derjenige Bereich, in dem Bildpunktkorrespondenzen gefunden werden. Die Anzahl der gefundenen Korrespondenzen ist jedoch zu gering, um damit eine 3-D-Szenenrekonstruktion zu errechnen. Überall dort, wo das Bild nicht eingefärbt ist, kann auch keine Rekonstruktion erfolgen. Der Algorithmus ist in diesen Bildregionen sozusagen „blind“.

Anders verhält es sich bei Wärmebildern mit höherem Kontrast. In der rechten Spalte von Abbildung 5 ist ein Wärmebild der Tunnelbrandübung abgebildet, in dem sich der optische Fluss gut bestimmen lässt. Somit lässt sich für eine Vielzahl an Objekten in der abgebildeten Szene über Structure-from-Motion auch eine Entfernung bestimmen.

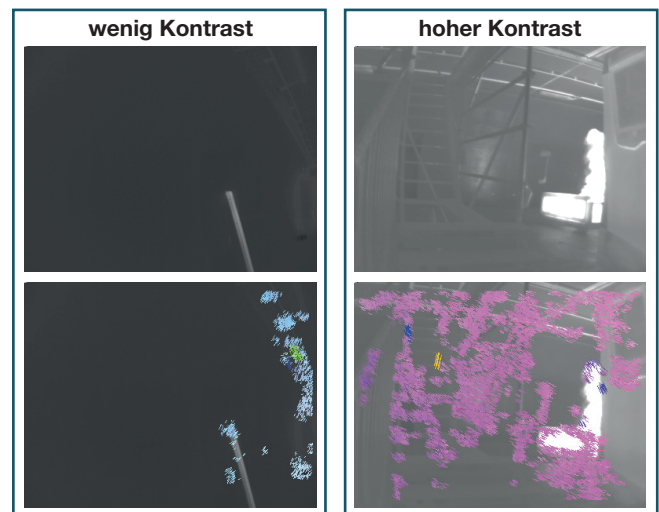


Abbildung 5: Bestimmung des optischen Flusses auf Aufnahmen bei einer Tunnelbrandübung. In Wärmebildern mit wenig Kontrast (linke Spalte) können an nur sehr wenigen Stellen im Bild Punkte für die 3-D-Szenenrekonstruktion genutzt werden (untere Zeile). Zum Vergleich ein Bild mit hohem Kontrast.

Abbildung 6 stellt ein Ergebnis des in den Funktionsdemonstrator integrierten Structure-from-Motion-Verfahrens dar. Die Signalverarbeitung des Beschleunigungssensors sucht geeignete Wärmebilder mit genügend örtlichem Versatz aus dem Bilddatenstrom der Wärmebildkamera heraus („first“ und „second image“). Das Structure-from-Motion-Verfahren bestimmt daraus eine Abstandsinformation für diejenigen Stellen, an denen korrespondierende Bildpunkte gefunden werden konnten. Diese Punkte werden in ein 3-D-Modell eingetragen, die Farbe markiert den Abstand. Man erkennt, dass Teile der Kaffeemaschine und des Schachbrettmusters als 3-D-Modell rekonstruiert werden können. Man erkennt ebenfalls, dass auch

die Spiegelungen der Objekte in der Tischoberfläche rekonstruiert werden. Für eine 3-D-Objekterkennung müssten solche „Geisterobjekte“ erkannt und herausgefiltert werden.

Die rekonstruierten 3-D-Punkte werden in einem späteren Schritt in der Signalverarbeitung mit der Radar-Messung abgeglichen, sodass die Radar-Entfernungsmessung einem Punkt im Wärmebild zugeordnet werden kann.

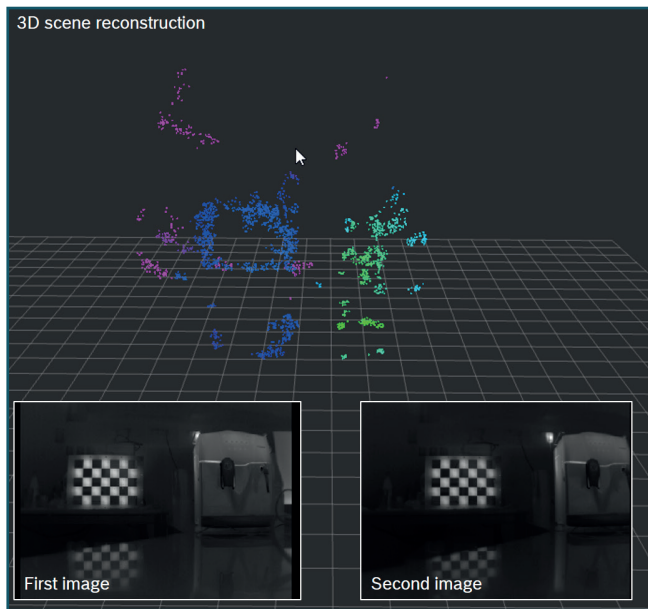


Abbildung 6: 3-D-Szenerekonstruktion anhand von Infrarotbildern.

Ein weiterer Nutzen des 3-D-Modells ist, dass die Geometrie einer Szene, sofern sie im Wärmebild gut zu erkennen ist, über einen gewissen Zeitraum erfasst und kartografiert werden kann. Hierbei wird zwischen einer lokalen und einer globalen Szenenrekonstruktion unterschieden. In einer lokalen Rekonstruktion wird lediglich ein lokales 3-D-Modell der unmittelbaren Umgebung erstellt, um zum Beispiel einen Raum zu erfassen. In einer globalen Karte könnten dann ganze Tunnelabschnitte erfasst werden. Aufgrund der oben genannten wenig ausgeprägten Strukturen im Wärmebild im Innenbereich ist die Kartografierung jedoch in diesen Szenarien nicht möglich oder sehr instabil. Vielmehr würde sich dies für Einsätze von Wärmebildkameras im Außenbereich eignen.

3.4 Sensorfusion zur Bestimmung der Kamera- und Radartrajektorie für die Kartierung

Nur anhand der einzelnen Bewegungsinformation aus der integrierten Trägheitssensorik lassen sich keine robusten Trajektorien bestimmen, um später Radarinformationen in das Infrarotbild zu projizieren. Der Ansatz im FeuerWeRR-System ist es, die berechneten Positions- und Winkeldaten aus der Trägheitssensorik mit der gemessenen Ra-

dialgeschwindigkeit aus dem Radarsensor und der Eigenbewegungsschätzung der Wärmebildkamera zu fusionieren, um eine robuste und präzisere Positionsbestimmung zu erhalten. Das Sensorsystem besteht aus: (1) einer Inertialsensorik in Kombination mit einem Hochleistungs-Beschleunigungssensor und Magnetometer, (2) einer Infrarotkamera und (3) dem SISO/MIMO-Radarsensor. Die Sensoren sind wie folgt definiert:

- Inertiale Messeinheit: EPSON M-G364
- Beschleunigungssensor: EPSON M-A351
- Magnetometer: Freescale MAG 3110
- Infrarotkamera: Optris PI 450
- Radarsensor: Fraunhofer SISO-/MIMO-Radarsensor

Die in Abbildung 7 aufgezeigte Architektur stellt die Komponenten des Sensorfusionssystems dar. Das Ziel der Datenverarbeitung ist die Erstellung einer dreidimensionalen Tiefen-Karte in einem lokal begrenzten Raum, welche auf ein Infrarotbild projiziert wird.

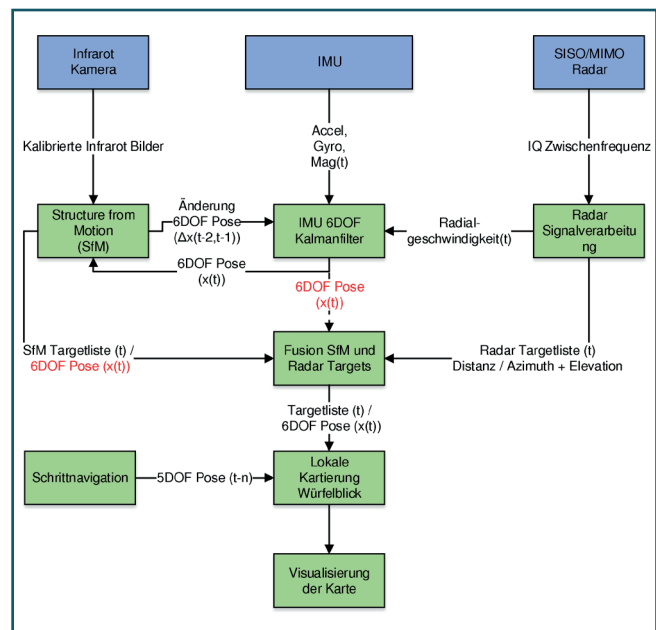


Abbildung 7: Datenflussdiagramm für das Sensorfusionssystem.

Die Komponenten der Sensorfusion sind wie folgt definiert:

- Structure from Motion (SfM): Aus den zeitlich aufeinander folgenden Bildsequenzen wird eine unskalierte 6-D-Trajektorie berechnet. Die Skalierung erhält das System während einer Initialisierungsphase durch den IMU 6DOF Kalmanfilter.
- IMU 6DOF Kalmanfilter: Berechnung der Trajektorie aus Inertialsensordaten mittels Kalmanfilterung.
- Radar-Signalverarbeitung Generierung: einer Liste, die die Radarziele enthält. Die Radarsignalverarbeitung beinhaltet die IQ-Kalibrierung, Detektion und Schätzung (Interpolation) in Entfernung und Geschwindigkeit.

- **Fusion SfM und Radar Targets:** Die Fusion von SfM und der Radarzielliste vereinigt die Radarzielliste mit dem Tiefenbild der SfM. Konkret werden jeweils in einem SfM-Datensatz mehrere Radardetektionen überlagert
- **Ausgabe im Online-Demonstrator:** einzelne „Fusionspunkte“ sind stabil getrackt worden. Diese Punkte sollen den Einsatzkräften helfen, die Entfernung einzelner visuell sichtbarer Objekte im Bild zu bestimmen. Die Radarzielliste wird nur für eine Scale-Korrektur der SfM verwendet. Nach dem „Match“ sollen alle Punkte der SfM ohne Tracking an die Visualisierung weitergegeben werden, mit korrigierter (stabiler) Scale.
- **Lokale Kartierung Würfelblick:** Der Würfelblick soll der Einsatzleitung eine bessere Vorstellung der Szene geben. Im Feld werden IR- und Radardaten aufgezeichnet, im Einsatzleitwagen werden diese für die Einsatzleitung prozessiert. Hierzu werden mehrere IR-Aufnahmen und mehrere Radar-Messungen fusioniert.

In manchen Situationen ist es relevant, die Position des Nutzers in einem Gebäude zu erfassen. Systeme, welche auf GPS basieren, sind in diesen Situationen, aufgrund der im Gebäude nicht vorhandenen Signale, nicht nutzbar. Deshalb wurde ein Sensorinterface-Modul aufgebaut, das unabhängig vom Einsatzort die Position des Nutzers erfassen kann. In diesem handgetragenen Sensorsystem werden zwei Beschleunigungssensoren sowie ein Gyroskop und ein Magnetometer verwendet. Die Position des Nutzers wird über eine Schrittnavigation berechnet. Hierfür wurden Neuronale Netze für die Klassifikation und Regression eingesetzt.

3.5 Visualisierung der Sensordaten

Die Visualisierung von Informationen und Bildern ist ein wichtiger Bestandteil, um Situationen zu erfassen. Insbesondere die Art und Weise, wie die Visualisierung erfolgt, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit und Leichtigkeit der Bilderfassung. Im Projekt wurden die Allgegenwärtigkeit von Sensoren und Displays sowie der Einsatz von Augmented-Reality-Brillen und Virtual-Reality-Brillen, 3-D-Displays und Wärmebildkameras betrachtet.



Abbildung 8: Prototyp eines Video-See-Through-Systems das eine Oculus Rift mit einem RGB-, Tiefen- und Wärmebild kombiniert.

Die Verfügbarkeit und Kombination dieser neuen Technologien eröffnen ganz neue Möglichkeiten zur Entwicklung von Brandbekämpfungswerkzeugen. Beispielsweise untersuchten Forscher die Möglichkeiten, Drohnen mit Wärmebildkameras auszustatten, um Feuerwehreinsätze zu beobachten. Feuerwehrleuten kann so ein besserer Überblick über den Einsatzort zur Verfügung gestellt werden. Die Umsetzung solcher Systeme war bis vor kurzem nur unter erheblichem finanziellen Aufwand möglich. Die kontinuierliche Weiterentwicklung aller Technologien ermöglicht aber heute den kosteneffizienten Einsatz.

Gemeinsam haben die Partner Demonstratoren entwickelt, gebaut und evaluiert (siehe Abbildung 8 und 9). Mit diesen Demonstratoren wurde erforscht, wie die Radar- und Wärmebildtechnik kombiniert werden kann, um die Wahrnehmung der Feuerwehrleute während des Einsatzes bestmöglich zu unterstützen. Hauptziel des Projektes ist es, Feuerwehrleute optimal bei der Brandbekämpfung zu unterstützen sowie die Orientierung im Einsatz zu erleichtern. Hierzu wurden die Schwächen der heutigen Wärmebildkamertechnologie analysiert und neue Lösungen entwickelt.

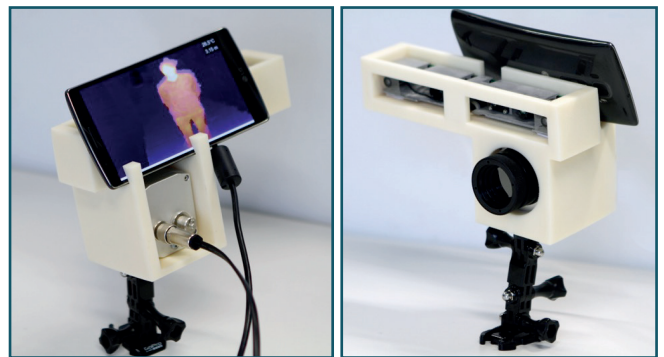


Abbildung 9: Prototyp eines mobilen Systems, das ein Smartphone mit einer Tiefen- und Wärmebildkamera kombiniert.

Eine der Hauptherausforderungen in der Brandbekämpfung ist der Mangel an Informationen über den Einsatzort bei Einsatzbeginn. Dies erschwert die Orientierung und erzeugt hohe kognitive Last bei der Suche nach Überlebenden und Opfern. Das Institut für Visualisierung und Interaktive System (VIS) der Universität Stuttgart kombinierte die neuesten Technologien aus dem Bereich Augmented Reality und Wärme-Sensorik, um einen tragbaren (siehe Abbildung 9) Demonstrator zu entwickeln. Mit diesem wird Feuerwehrleuten ermöglicht, die Umgebung mit erweiterten Tiefen- und Wärmeinformationen zu sehen. Ihre Wahrnehmung ist hierdurch verbessert und ermöglicht so, Such- und Orientierungsaufgaben besser zu bewältigen.

Die Forscherinnen und Forscher vom VIS, bauten und evaluierten mehrere Demonstratoren in verschiedenen Formen mit den Feuerwehrleuten der Feuerwehr Reutlingen. Hier stand insbesondere die Akzeptanz des entwickelten Konzepts im

Mittelpunkt der Untersuchung. In Interviews sprachen die Feuerwehrleute über die Anforderungen und Wünsche, die an solch ein System gestellt werden, um dieses erfolgreich im täglichen Gebrauch nutzen zu können. Sie stimmten mit den Forscherinnen und Forschern des VIS überein, dass es nur eine Frage der Zeit ist, bis die Demonstratoren der Machbarkeitsstudie soweit verkleinert sind, dass sie in die bestehenden Systeme und Werkzeuge der Feuerwehr integriert werden können.



Abbildung 10: Demonstrator-Evaluation mit Feuerwehrleuten aus Reutlingen.

Wie in Abbildung 10 gezeigt, waren Demonstratoren entweder Handgeräte oder am Helm getragene Varianten. Während der Evaluation mit Feuerwehrleuten wurden unter anderem die Vor- und Nachteile der verschiedenen Versionen erörtert. Das Handgerät ermöglichte insbesondere die einfache Zusammenarbeit und die gemeinsame Nutzung des Gerätes. Zudem wird die Sicht der Nutzer zu keinem Zeitpunkt eingeschränkt. Im Gegensatz dazu überzeugte die am Helm getragene Variante des Demonstrators insbesondere durch die Möglichkeit der Freihand-Interaktion.

Am VIS wurde außerdem erforscht, wie zusätzliche Informationen direkt im Wärmebild dargestellt werden können, sodass Feuerwehrleute diese schnell verarbeiten können. Eine der größten Herausforderungen für die Feuerwehr ist es, im Wärmebild verschiedene reflektierende Materialien (z. B. Glas, Metall) zu haben. Das erschwert die Unterscheidung zwischen realer Person und deren Reflexion. In Zusammenarbeit mit dem VIS wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Wärmedaten analysiert und ermittelt, ob es sich um eine reale Person oder deren Reflexion der Wärmesignatur handelt (siehe Abbildung 11). Verschiedene Arten der Informationsdarstellung (Text, farbige Hervorhebung; siehe Abbildung 12) wurden entwickelt und evaluiert. Interessanterweise bevorzugten Feuer-

wehrleute die abstrakte Form der Visualisierung, da sie weniger kognitiv belastend sei.

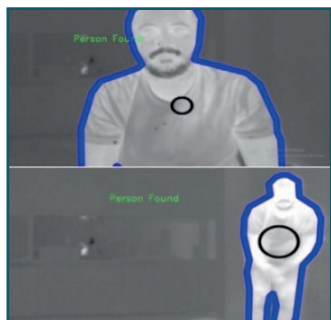


Abbildung 11: Visualisierung mit Text.



Abbildung 12: (links) Person mit grünem Indikator, (rechts) echte Person mit grünem Indikator und Reflexion mit rotem Indikator.

3.6 Test-System

Die Sensorsysteme wurden als tragbare Einheit in ein gemeinsames Gehäuse integriert und an eine externe, körpergetragene Rechen- und Energieeinheit angeschlossen (siehe Abbildung 13). Alle Messdaten werden in Echtzeit verarbeitet und über ein angeschlossenes Display dargestellt. Den Feuerwehr-Mitarbeitern konnte somit ein Gefühl für die ange-dachte Funktionalität vermittelt werden, was letztendlich in die Bewertung und Weiterentwicklung der Komponenten mit einfließt.



Abbildung 13: Funktionsdemonstrator mit allen Komponenten und praktischen Haltegriffen.

4 Praxistest

Die Berufsfeuerwehr Reutlingen konnte in verschiedenen Übungen mit den Sensoren Praxistests durchführen.

4.1 Schrittnavigation eines Feuerwehrangehörigen im Einsatz

Feuerwehrleute bewegen sich unter Einsatzbedingungen nicht vergleichbar zu bekannten Bewegungsmustern aus anderen Tätigkeitsfeldern. Die Bewegungen umfassen unter anderem Rennen,



Abbildung 14: Identifizierung von Bewegungsmustern eines Feuerwehrmannes.

Anheben von Lasten, Tragen von Lasten (Ausrüstung), kriechende Fortbewegung im Brandraum, krabbelnde Fortbewegung im Brandraum, Arbeiten in Zwangspositionen. Dies erschwert eine Schrittnavigation durch das Erkennen eines typischen Bewegungsmusters. Hierfür wurden verschiedene Übungen mit typischen Bewegungsmustern durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass eine Schrittnavigation nur unter kontrollierten Bedingungen in aufrechter Pose möglich ist.

4.2 3-D-Szenenerkennung

Die Erkennung der 3-D-Szenen stellt im Einsatz ein wesentliches Merkmal dar. Da die Wärmebildkamera zu Beginn des Einsatzes und immer wieder zwischendurch pendelt, wurde zunächst versucht, trotz Bewegung die dort gewonnenen Daten zu nutzen. Leider sind die pendelnden Bewegungen nicht geeignet, um eine Szenenerkennung während der Pendelbewegung zu nutzen. Erst mit der gezielten handgeführten Bewegung ist auch eine Szenenerkennung möglich. Hierzu wurden in der Atemschutzübungsanlage verschiedene Übungen absolviert (siehe Abbildung 15).

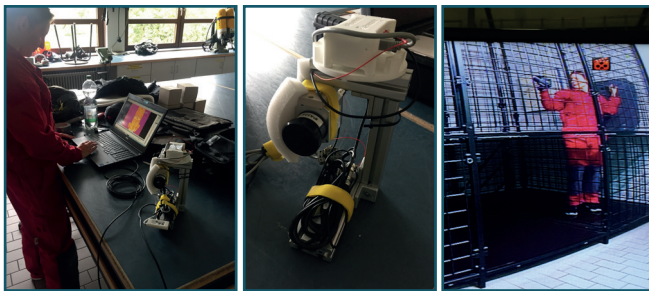


Abbildung 15: Test eines Demonstrators in der Atemschutzübungsanlage der Feuerwehr Reutlingen.

4.3 Feldversuch des Radars im Rauch

Zunächst war nicht klar, wie sich die im echten Rauch befindlichen Partikel auf die Ergebnisse im Rauch auswirken. Hierzu wurden in der Wärmegewöhnungsanlage (siehe Abbildung 16) verschiedene Tests und Messungen mit dem Radarsensor durchgeführt. Als Fazit konnte festgestellt werden, dass der übliche Rauch keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Radarmes-

sungen hat und somit das Radar für die Nutzung in verrauchten Gebäuden geeignet ist.

5 Weitere Anwendungsmöglichkeiten des FeuerWeRR-Systems

Ein weiterer Anwendungsfall des FeuerWeRR-Systems ist die Erkennung und Unterscheidung von echten Personen und Spiegelbildern im Wärmebild. Diese Information ist für Einsatzkräfte hilfreich, um Gefahren und Zeitverlust durch unnötige Rettungsversuche zu vermeiden. Die Unterscheidung von echten Personen und ihren Spiegelbildern erfolgt anhand der radialen Geschwindigkeitsmessung (Doppler) des Radars. Wird eine Person direkt betrachtet (echte Person), dann wird der Doppler der Person gemessen. Verschiedene Körperteile der Person bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (sog. Mikro-Doppler). Bei laufenden Personen ist dieser Mikro-Doppler besonders ausgeprägt, da sich die Relativgeschwindigkeiten der Arme und Beine stark von denen des Torsos unterscheiden (siehe Abbildung 17). Bei dichtem Rauch sind jedoch eher langsame Bewegungen typisch, weshalb in diesem Projekt auch stehende Personen betrachtet werden. In diesem Projekt wird ein zweistufiges Verfahren verwendet. In der ersten Stufe werden Kandidaten (mögliche echte Personen oder Spiegelbilder) im Wärmebild detektiert (ohne Radar-Information). Für ein echtzeitfähiges System wird der recheneffiziente Detektor¹ verwendet, um die charakteristische Kontur von Oberkörpern der Personen und Spiegelbilder zu erkennen. In der zweiten Stufe werden diese Kandidaten näher untersucht, wobei sowohl die Mikro-Doppler-Spektren des Radars als auch die Inhalte des Wärmebildes (grüne Boxen in Abbildung 17) zur Klassifikation verwendet werden. Da in der zweiten Stufe nur wenige Kandidaten untersucht werden, werden neuronale Netze zur Klassifikation eingesetzt, um eine hohe Genauigkeit zu erreichen².

¹ Viola, Paul; Jones, Michael: „Rapid object detection using a boosted cascade of simple features“. In Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001.

² Ulrich, Michael; Hess, Thomas; Abdulatif, Sherif; Yang, Bin: „Person recognition based on micro-Doppler and thermal infrared camera fusion for firefighting“. In International Conference on Information Fusion, 2018.



Abbildung 16: Test des Radarsensors unter realen Rauchbedingungen in der Wärmegewöhnungsanlage der Feuerwehr Reutlingen.

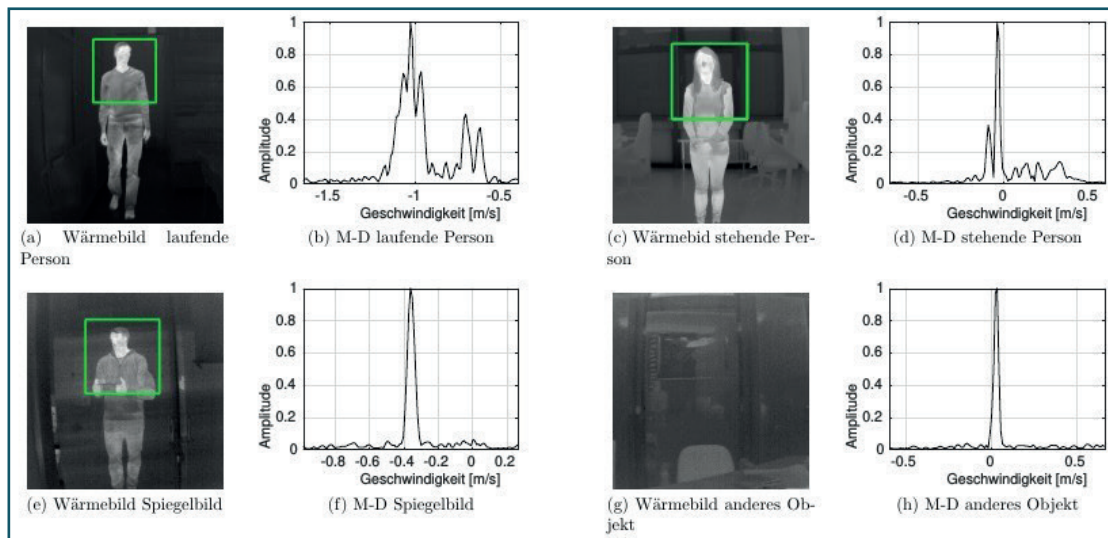


Abbildung 17: Echte Personen und Spiegelbilder können anhand einer hochgenauen Geschwindigkeitsmessung und Radar unterschieden werden.

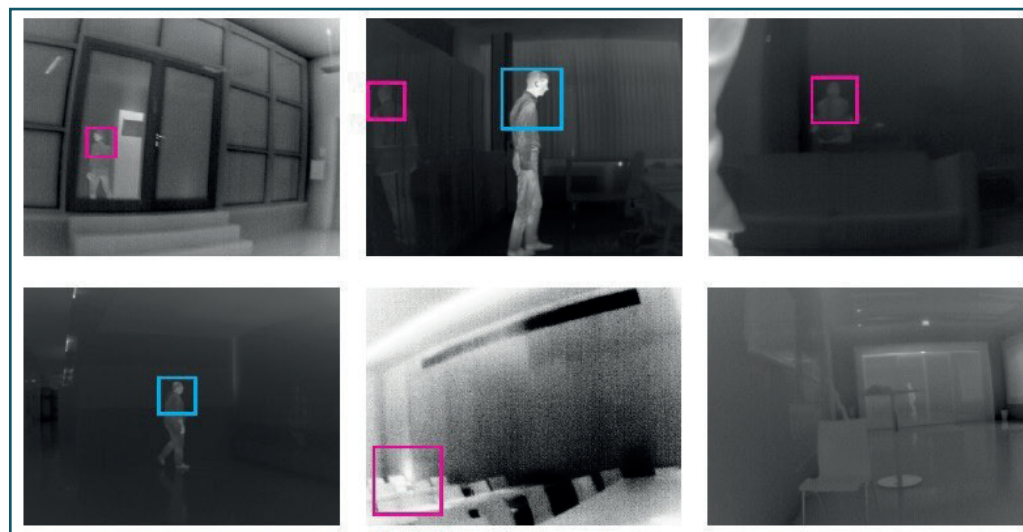


Abbildung 18: Beispiele von Szenen zur Spiegelbilderkennung. (Abbildung modifiziert aus Ulrich, Michael: Radar Signal Processing and Sensor Fusion with Thermal Infrared for Firefigthing. PhD thesis, University of Stuttgart, 2019.)

Beispiele für das Ergebnis des vorgestellten Ansatzes sind in Abbildung 18 zu sehen.

6 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist aus technischer Sicht eine Erweiterung der Wärmebildsensorik durch Radar für den Feuerwehreinsatz realistisch. Die hochgenaue Geschwindigkeitsmessung des Radarsensors ermöglicht eine Unterscheidung von echten Personen und ihren Spiegelbildern. Allerdings weist die Klassifikation in realistischen Bedingungen nur eine Genauigkeit von ca. 80% auf. Folglich ist diese Klassifikation nicht als zuverlässige Information, sondern nur als Entscheidungshilfe oder Warnhinweis zu sehen. Außerdem kann die Entfernungsmessung des Radars im Innenanriff direkt im Wärmebild angezeigt werden. Hierbei ist die Verwendung eines MIMO-Radars der robustere, aber auch teurere Weg. Diese Sensorfusion kann auch für ein Panoramabild mit Tiefeninformation für die Einsatzleitung erweitert werden.

Autoren

Dipl.-Ing. Adrian Röhrle,
stellv. Leiter der Feuerwehr Reutlingen – Oberbrandrat
Dipl.-Ing. Bernhard Kleiner,
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
Dr. Carsten Dolar,
Bosch Engineering GmbH – Engineering Driver Assistance
and Automated Driving, Computer Vision
Dr. Michael Ulrich,
Universität Stuttgart – Institut für Signalverarbeitung
und Systemtheorie
Dr. Yomna Abdelrahman,
Universität Stuttgart – Institut für Visualisierung
und Interaktive Systeme
Prof. Dr.-Ing. Bin Yang,
Universität Stuttgart – Institut für Signalverarbeitung
und Systemtheorie
Prof. Dr. Albrecht Schmidt,
Universität Stuttgart – Institut für Visualisierung
und Interaktive Systeme
Prof. Dr. Oliver Röhrle,
Projektleiter, Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung, Universität Stuttgart – Institut für Modellierung
und Simulation biomechanischer Systeme