

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

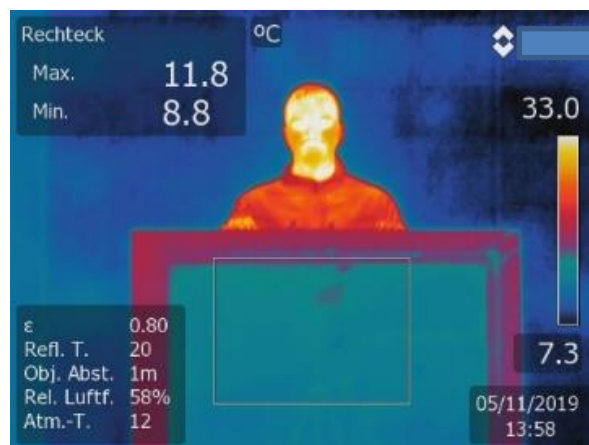
Einsatz von Wärmebildkameras zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen von Wohnungstüren bei Bränden

von

M. Vetter, F. Schoeps, D. Schelb

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik



207

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 207

**Einsatz von Wärmebildkameras zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen
von Wohnungstüren bei Bränden**

von

M. Vetter, F. Schoeps, D. Schelb

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

2020

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: 207	Titel des Berichtes: Einsatz von Wärmebildkameras zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen von Wohnungstüren bei Bränden	ISSN: 0170 - 0060
Autoren M. Sc. M. Vetter B. Sc. F. Schoeps Dr. rer.-nat. D. Schelb	durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: 1 / 2018	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: 7.12.2020		
Kurzfassung: Der bei der Feuerwehr praktizierte Handrückentest ist nicht geeignet, daraus eine Aussage über die Brandsituation im Raum dahinter ableiten zu können. Zwar kann im Raum hinter der Tür ein Vollbrand herrschen, aber an der Tür selbst kann eine Temperaturerhöhung mit dem Handrücken nicht erkennbar sein. In diesem Bericht wird untersucht, ob der Einsatz von Wärmebildkameras eine Alternative zum Handrückentest sein kann. Mittels reproduzierbarer Versuche, bei denen hinter einer gewöhnlichen Zimmertür ein typisches Brandgeschehen mit einem Kiesbettbrenner abgebildet wurde, konnte gezeigt werden, dass Wärmebildkameras durchaus geeignet sein können, schnell und zuverlässig Temperaturen und insbesondere Temperaturunterschiede aufzuzeigen.		
Schlagwörter: WBK, Bolometer, Handrückentest, unterventilierter Brand, Leslie-Würfel, Emission, Transmission, Reflexion, Absorption		

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	I
1. EINLEITUNG	5
2. FUNKTIONSPRINZIP EINER WÄRMEBILDKAMERA	6
2.1. Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung	8
2.1.1. Elektromagnetisches Strahlungsspektrum	8
2.1.2. Absorption, Reflexion, Transmission	9
2.1.3. Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann	10
2.1.4. Schwarzer Körper	11
2.1.5. Wiensches Strahlungsgesetz	12
2.1.6. Kirchhoffsches Strahlungsgesetz	13
3. BEISPIELE FÜR WBK-AUFNAHMEN	16
3.1. Leslie-Würfel	22
4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	23
4.1. Versuchsaufbau und -durchführung	23
4.2. Versuchsergebnisse	35
5. ZUSAMMENFASSUNG	44
6. LITERATURVERZEICHNIS	45

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Elektromagnetisches Spektrum

Abb. 2: Schema für Transmission, Reflexion, Absorption

Abb. 3: Strahlungsspektrum eines schwarzen Körpers ($\varepsilon=1$) für verschiedene Temperaturen

Abb. 4: Transmissionskoeffizienten verschiedener Gläser in Abhängigkeit der Wellenlänge

Abb. 5: Hand oberhalb der kalten Wasseroberfläche. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 6: Hand eingetaucht in kaltes Wasser. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 7: Hand oberhalb der warmen Wasseroberfläche. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 8: Hand eingetaucht in warmes Wasser. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 9: Transmission einer Fensterglasscheibe. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 10: Transmission einer Fensterglasscheibe. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 11: Reflexion einer Fensterglasscheibe. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 12: Reflexion einer Edelstahlplatte. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 13: Reflexion einer Edelstahlplatte. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Abb. 14: Füllstandsmessung eines mit Wasser gefüllten Fasses (200 L) mit der WBK: Füllstand links 25%, mittig 40% und 60% rechts

Abb. 15: Aufnahmen mit der WBK. Links Einströmendes warmes Wasser in kaltes Wasser, rechts einströmendes kaltes Wasser in warmes Wasser

Abb. 16: Leslie-Würfel. Ansicht Vorderseite. Links Aufnahmen mit der Digitalkamera, rechts WBK

Abb. 17: Leslie-Würfel. Ansicht Rückseite Links Aufnahmen mit der Digitalkamera, rechts WBK

Abb. 18: Schematische Darstellung einer Innentür mit Röhrenspaneinlage

Abb. 19: Schnitt der verwendeten Innentür aus Buchenholz

Abb. 20: Versuchsaufbau der Innentür mit bestückter TE-Matrix (Typ K) – Außenansicht

Abb. 21: „Wohnzimmer“ und Vorraum in der Versuchshalle

Abb. 22: Abmessungen des Versuchsraumes („Wohnzimmer“ und Vorraum)

Abb. 23: Schematischer Versuchsaufbau und Positionierung der Messtechnik

Abb. 24: Kiesbettbrenner

Abb. 25: Kiesbettbrenner-Flamme bei 200 kW, Betrieb mit LPG

Abb. 26: Rauchaustritt aus Versuchsraum durch teilweise verdeckte Fensteröffnung

Abb. 27: Versuchsaufbau Wärmebildkameras vor Türaußenseite

Abb. 28: Wärmebildkameras. Bullard T4

Abb. 29: Wärmebildkameras. FLIR T640

Abb. 30: Wärmebilder der Außenseite einer metallischen Tür bei einem Realbrandversuch etwa 30 min nach Zündung

Abb. 31: Tür ohne externe Lichtquelle. Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

Abb. 32: Tür mit externer Lichtquelle Leuchtstoffröhre (8W). Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

Abb. 33: Tür mit externer Lichtquelle Halogenstrahler (500W). Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

Abb. 34: Tür mit externer Lichtquelle LED-Strahler (12W). Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

Abb. 35: Tür mit externer Lichtquelle IR-Strahler (100W). Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

Abb. 36: Temperaturprofile aus Versuch 1 mittig oberhalb des Kiesbettbrenners, 80 cm (T19) und 30 cm (T20) über dem Boden

Abb. 37: Temperaturprofile aus Versuch 2 mittig oberhalb des Kiesbettbrenners, 80 cm (T19) und 30 cm (T20) über dem Boden

Abb. 38: Temperaturprofile in der 3x3-Matrix an der Tür-Außenseite (T1-T9) und Tür-Innenseite (T10-T18) aus Versuch 1

Abb. 39: Temperaturprofile in der 3x3-Matrix an der Tür-Außenseite (T1-T9) und Tür-Innenseite (T10-T18) aus Versuch 2

Abb. 40: Vergleich der Wärmebild-Aufnahmen des Modells „Feuerwehr“ (links) mit dem Modell „Labor“ (rechts) aus Versuch 1

Abb. 41: Vergleich der Wärmebild-Aufnahmen des Modells „Feuerwehr“ (links) mit dem Modell „Labor“ (rechts) aus Versuch 2

Hinweis

*Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brand-
schutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.*

1. EINLEITUNG

Im Rahmen einer Bachelorarbeit (/1/, /2/) wurden an der FFB Realbrandversuche in einem 25m² großen, mit Wohnmöbeln ausgestatteten Raum durchgeführt. Dieser Raum wurde mit verschiedenen gebräuchlichen Zimmertüren ausgestattet. Unter anderem sollte mit diesem Versuchsaufbau die Aktualität des Handrückentests der Feuerwehr untersucht werden. Hierzu sollte der Proband durch Fühlen der Temperatur der Tür mittels Handrücken eine Abschätzung über die Brandstärke bzw. Situation im Raum hinter der Tür abgeben. Die Theorie zum Handrückentest lautet, dass die heißen Brandgase die Türe aufheizen und somit der Zustand anhand der Temperatur der Tür dahinter fühlbar sei. Daher sollte eine rasche Situationseinschätzung vor Öffnen der Tür möglich sein. Insbesondere die Gefahr einer Durchzündung der brennbaren Rauchgase bei unterventiliertem Brand durch unsachgemäßes schnelles Öffnen der Tür soll so verringert werden.

Bei den Versuchen zeigte sich aber, dass die Temperaturen der Türen so langsam anstiegen, dass eine Aussage mittels Fühlens mit dem Handrücken selbst unter den Versuchsbedingungen, bei denen kein erhöhter Stresslevel den Feuerwehrangehörigen beeinträchtigt, nicht praktikabel ist. Zwar herrschte im Raum hinter der Tür ein Vollbrand, aber an der Tür selbst war eine Temperaturerhöhung nicht fühlbar.

Es ist naheliegend, mittels objektivierbaren, reproduzierbaren technischen Hilfsmitteln wie einer Wärmebildkamera die Temperaturen der Türen zu messen, zumal qualitativ hochwertiges Material genauere Messergebnisse als mit der Hand erwarten oder erhoffen lassen. Hierzu wurden vergleichbare Versuchsbedingungen zu den Testreihen beim Handrückentest geschaffen und mit verschiedenen Wärmebildkameras die zeitlichen Temperaturverläufe der Türen ermittelt.

2. Funktionsprinzip einer Wärmebildkamera

Mit einer für den Feuerwehreinsatz gebräuchlichen Wärmebildkamera (WBK) wird langwellige, vom menschlichen Auge nicht sichtbare Infrarotstrahlung aufgenommen und auf einem Monitor bzw. Display mittels elektronischer Hard- und Software sichtbar gemacht. Eine herkömmliche Kamera hingegen nutzt sichtbare Strahlung (=Licht).

Eine Wärmebildkamera nimmt den Wärmestrom („Strahlungswärme“) auf, der durch nicht sichtbare Infrarotstrahlung vom Objekt zur Kamera gelangt. Aus diesem Wärmestrom lässt sich die Temperatur des Objektes bzw. dessen Kontur bestimmen.

Ein Körper, der wärmer ist als die Umgebung, strahlt mehr Wärme in Form von Infrarotstrahlung ab. Diese wird gemessen und elektronisch so aufbereitet, dass der Anwender ein Bild sieht, bei dem die wärmeren Bereiche i.d.R. heller (bei Schwarz-Weiß-Display) als die kälteren sind, bzw. bei Farbdisplays gelb oder rot sind.

Eine Wärmebildkamera hat vergleichbar zu einer herkömmlichen Digitalkamera einen Sensor mit einer weit geringeren Auflösung. Während eine Kamera eines modernen Smartphones im mittleren Preissegment typischerweise schon rund 10 Mio. Pixel (=Bildpunkte) aufweist, haben Wärmebildkameras im mittleren Preissegment eine typische Auflösung um die 100.000 Pixel (320 x 240 bis 640 x 480 Pixel, /3/).

Im Gegensatz zur gewöhnlichen Digitalkamera, bei der das einfallende sichtbare Licht mittels CCD oder CMOS-Array einen Elektronenstrom erzeugt, verfügen WBKs über ein Mikrobolometer-Array. Mikrobolometer sind Strahlungssensoren, die durch den einfallenden Wärmestrom aufgeheizt werden. Die Messung der Temperaturzunahme ermöglicht dann die Bestimmung des einfallenden Wärmestroms.

Hierin liegt zwar der Mehrwert einer Wärmebildkamera gegenüber einer herkömmlichen Kamera begründet, weil das Objekt auch im völligen Dunkeln aufgenommen und erkannt wird, es stellt aber den Anwender vor ungewohnte Probleme bei der Interpretation der Bilder, weil keine Erfahrungswerte mit Infrarotstrahlung aus dem alltäglichen Leben vorhanden sind.

Ein Beispiel verdeutlicht die Problematik:

Hinter einer gewöhnlichen Glasscheibe ist die infrarote Strahlungswärme der Sonne zwar geringer als bei einer direkten Exposition, aber sie ist noch gut zu spüren. Das Glas ist also mindestens teilweise durchlässig. Die Infrarotstrahlung, welche die Wärmebildkamera aufnimmt, wird von derselben Glasscheibe allerdings zu 100 % abgeschirmt. Das ist kein Widerspruch, denn Infrarotstrahlung erstreckt sich über einen Wellenlängenbereich zwischen $0,7 \mu\text{m}$ und etwa $1000 \mu\text{m}$. Der kurzwellige Teil davon ist die fühlbare IR-Strahlung, wie sie von der Sonne, einem Heizstrahler oder einem heißen Kochfeld her bekannt und vertraut ist. Der langwellige und damit niederenergetische Anteil der IR-Strahlung ist im Alltagsleben zwar überall vorhanden, wird aber vom Menschen ohne Hilfsmittel nicht wahrgenommen.

Im folgenden Unterkapitel werden die Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung, zu der u.a. das sichtbare Licht und IR-Strahlung gehören, erläutert. Der eilige Leser kann dieses Kapitel auslassen.

Hinweis: Die korrekte Angabe der Werte für Koeffizienten liegt zwischen 0 und 1. Es ist natürlich auch möglich, die Werte in Prozenten anzugeben – dann aber ist die korrekte Bezeichnung Grad. Ein Emissivitätskoeffizient von 0,23 ist identisch mit einem Emissivitätsgrad von 23%.

2.1. Grundlagen der elektromagnetischen Strahlung

2.1.1. Elektromagnetisches Strahlungsspektrum

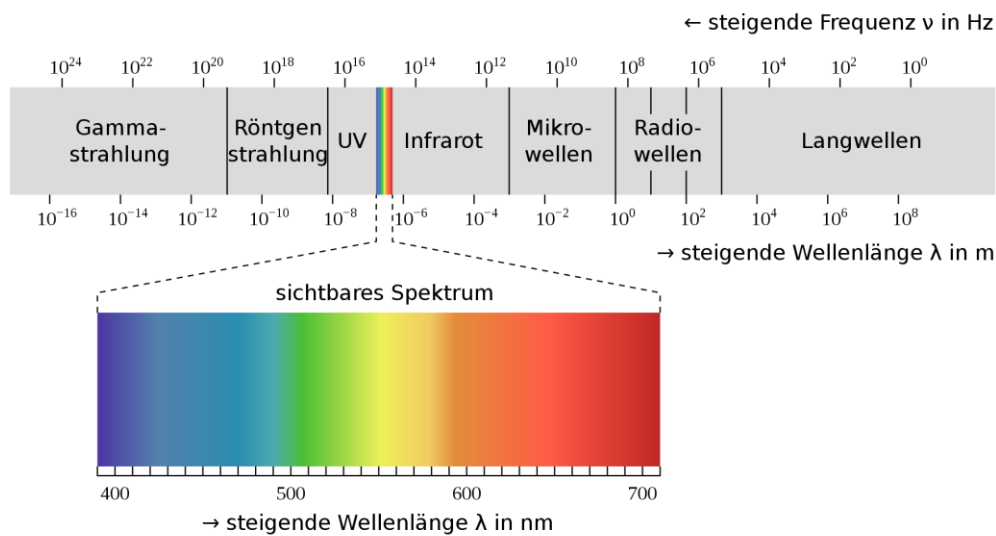


Abb. 1: Elektromagnetisches Spektrum /4/

Der Mensch nimmt elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen 400 und 700 nm mit dem Auge als sichtbares Licht wahr. Für Strahlung außerhalb dieses Bereichs hat der Mensch keine direkten Sensoren. Infrarot- und Zentimeterstrahlung („Mikrowellen“) heizen exponierte Körperteile auf, UV-Strahlung kann einen Sonnenbrand bewirken, und eine zu hohe Exposition an Röntgen- oder Gammastrahlung führt zu Zellschäden.

2.1.2. Absorption, Reflexion, Transmission

Einfallende Strahlung wird von einem Material entweder absorbiert, reflektiert oder transmittiert.

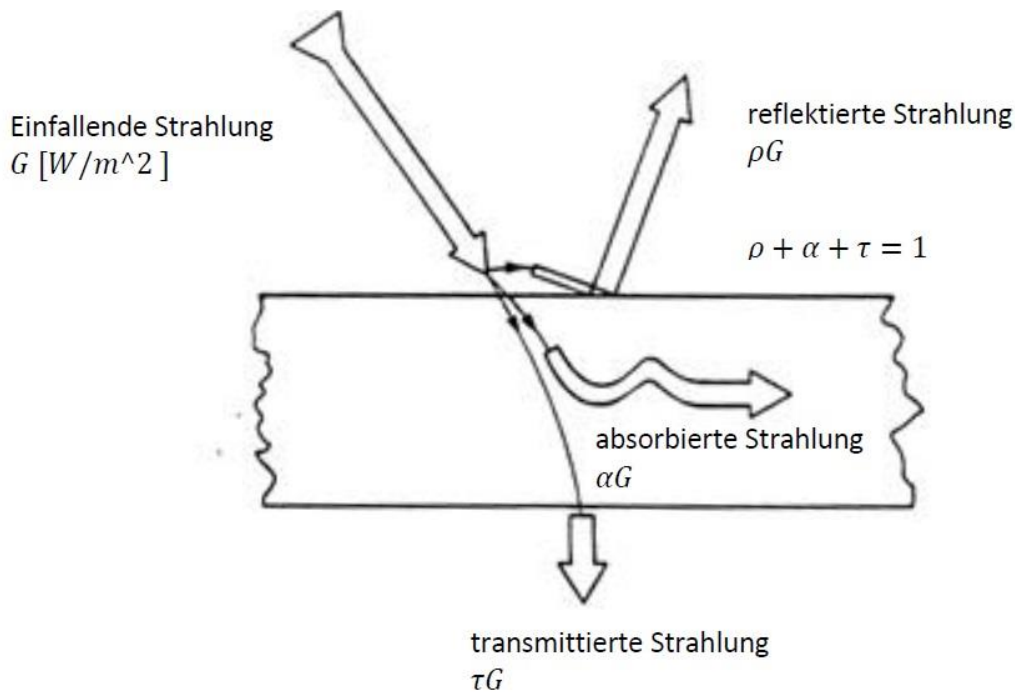


Abb. 2: Schema für Transmission, Reflexion, Absorption. /5/

Es gilt $\alpha + \rho + \tau = 1$, mit

α = Absorptionskoeffizient, ρ = Reflexionskoeffizient, τ = Transmissionskoeffizient

Das bedeutet z.B., dass ein Körper keine Strahlung durchlässt (Transmission=0), wenn er entweder die einfallende Strahlung zu 100 % reflektiert, zu 100 % absorbiert, oder wenn die Summe aus Reflexion und Absorption 100% beträgt. Eine Glasscheibe reflektiert einen (kleinen) Anteil des Lichts und lässt den Rest fast ungehindert durch. Absorption kann praktisch vernachlässigt werden.

Schwarzer Filzstoff lässt kein Licht durch ($\tau = 0$) und reflektiert sehr wenig ($\rho < 5 \%$). In erster Näherung beträgt die Absorption daher praktisch 100 %.

Ein stehendes Gewässer reflektiert einen Teil der einfallenden Strahlung, und mit zunehmender Tiefe wird das Licht schwächer. Sowohl Reflexion, Transmission und Absorption spielen eine Rolle.

Ein Körper emittiert auch Strahlung- und zwar in Abhängigkeit der Temperatur, beschrieben durch das folgende Stefan-Boltzmann-Gesetz:

2.1.3. Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann

Es gibt einen zumindest mathematisch einfachen Zusammenhang zwischen Objekttemperatur und emittierter Strahlungsleistung („Wärmestrahlung“):

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4, \text{ mit}$$

P = Strahlungsleistung in Watt

ε = Emissivitätskoeffizient (dimensionslos zwischen 0 und 1)

σ = Stefan-Boltzmann Konstante = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$

A = Fläche in m^2

T = Objekttemperatur in Grad Kelvin

Das Stefan-Boltzmann Gesetz ist auch bekannt als „T⁴-Gesetz“. Eine heiße, dunkelrot schwach leuchtende Stahlplatte mit 700 °C (=973 K) strahlt pro Quadratmeter

$$0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4) \cdot 1 \text{m}^2 \cdot 973^4 \text{ K}^4 = 40600 \text{ W ab.}$$

Dieselbe Platte strahlt bei 213,5 °C = 486,5 K lediglich 2500 W ab. Bei doppelter Temperatur (in Grad Kelvin gemessen) ist die Strahlungsleistung also 16 (=2⁴) mal höher.

Ein menschlicher Körper mit einer Hauttemperatur von 20 °C, einem Quadratmeter Fläche und einem geschätzten $\varepsilon=0,8$ strahlt etwa 330 W ab.

Hier sind zwei Punkte zu beachten:

1. ε ist temperaturabhängig.

Es ist aus alltäglicher Erfahrung bekannt, dass z. B. ein Fensterglas bei 20 °C lichtdurchlässig ist. Es kann aber für langwellige IR-Strahlung undurchlässig sein, da sie zu 100 % absorbiert oder reflektiert wird. Der Emissivitätskoeffizient bei 20 °C bezieht sich auf die langwellige IR-Strahlung des Körpers. Das sichtbare Licht hingegen stammt von einem 5500 °C heißen Körper.

2. Ein Körper absorbiert auch Strahlung. Der Mensch z.B., der sich in einem Raum mit 20 °C warmen Wänden befindet, absorbiert 330 W – egal welches ε die Wände haben, s. folgendes Unterkapitel. Weisen die Wände ein extrem niedriges ε auf, reflektieren sie die vom Menschen abgestrahlte Wärme. Sind sie schwarz mit ε fast 1 absorbieren sie zwar die gesamte Strahlung vom Menschen, dafür strahlen sie aber wieder Wärme ab. Die Strahlungsbilanz ist ausgeglichen, d. h. er strahlt genau so viel ab, wie er aufnimmt. Wärme gibt er an die Umgebung per Wärmeleitung an die Luft und per Verdunstungskälte (Schwitzen, Atmen, wobei die Atemluft angefeuchtet wird) ab.

2.1.4. Schwarzer Körper

Ein Körper, dessen Emissivitätskoeffizient = 1 ist. In der Realität gibt es keinen schwarzen Körper, aber $\varepsilon > 0,95$ ist einfach zu realisieren, indem z. B. eine dicke Rußschicht auf eine Oberfläche aufgebracht wird.

2.1.5. Wiensches Strahlungsgesetz

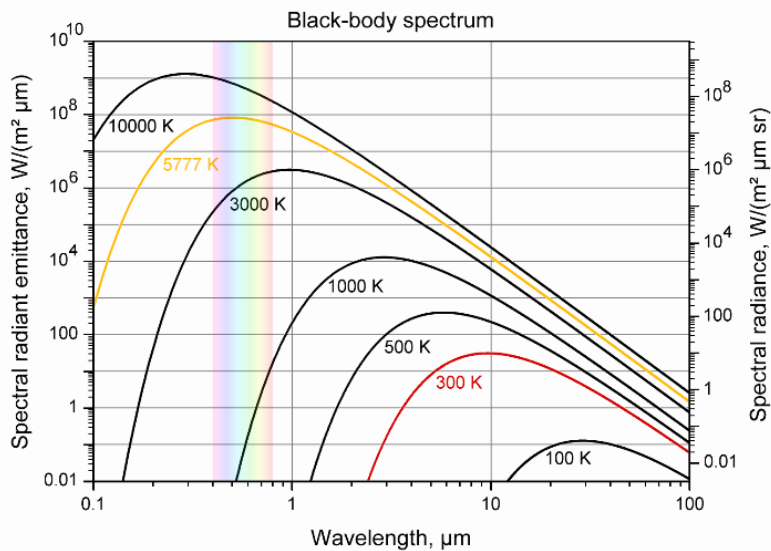


Abb. 3: Strahlungsspektrum eines schwarzen Körpers für verschiedene Temperaturen [7].

In Abb. 3 ist die Intensität der Strahlung über der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen des strahlenden (schwarzen) Körpers aufgetragen.

Die Wellenlänge λ_{max} , bei der das Maximum der Strahlungsintensität auftritt, nimmt mit zunehmender Temperatur ab:

$$\lambda_{\text{max}} = 2.897,8 \mu\text{m K} / T \text{ (in K)}.$$

Die Oberflächentemperatur der Sonne beträgt rund 5500°C ($=5777\text{K}$), das Strahlungsmaximum liegt bei 500nm . Die vertikalen Farbstreifen decken das für den Menschen sichtbare Lichtspektrum ab (ca. $400\text{-}700\text{nm}$). Ein Körper mit 1000K (z.B. glühender Stahl) emittiert ebenfalls ein wenig im sichtbaren Spektrum – der größte Teil der Strahlungsenergie ist allerdings im langwelligeren Infrarot mit einem Maximum bei etwa $2900\text{nm} = 3\mu\text{m}$ angesiedelt.

Die Wärmebildkamera soll Körper mit typischen Temperaturen von 20°C (=293K) erkennen. Hier liegt das Maximum bei rund 10 μ m (s. Abb. 3 rote Kurve bei 300K).

2.1.6. Kirchhoffsches Strahlungsgesetz

Ein Körper, der gut absorbiert, emittiert genauso gut:

$\alpha = \varepsilon$, mit

α = Absorptionskoeffizient (dimensionslos zwischen 0 und 1)

ε = Emissivitätskoeffizient

Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik (Wärme strömt nur vom wärmeren zum kälteren Objekt) fordert dies. Angenommen, bei einem Körper wäre α größer als ε und diesem sei in einem (thermisch isolierten) Vakuum ein schwarzer Strahler mit (zu Beginn) gleicher Temperatur gegenüber. Dann würde dieser Körper einen Nettowärmestrom proportional zu $\alpha - \varepsilon > 0$ aufnehmen und sich damit erwärmen. Dann wäre aber der Zweite Hauptsatz verletzt.

Aus 2.1.2. ($\alpha + \rho + \tau = 1$) und $\alpha = \varepsilon$ folgt:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Das bedeutet z.B., dass ein Körper, der sehr stark absorbiert auch stark emittiert. Ebenso ist der Reflexionskoeffizient eines Spiegels $> 95\%$, so dass für den Emissivitätskoeffizienten max. 5 % „übrigbleiben“, dieser also sehr klein ist.

Oberfläche	ϵ	Oberfläche	ϵ
Kupfer, poliert	0,03	Silber, poliert	0,022
Kupfer, oxidiert	0,78	Silber, poliert, 370°C	0,031
Stahl, oxidiert	0,79	Holz, gehobelt	ca. 0,9
Gusseisen, rau, stark oxidiert	0,95	Dachpappe	0,91
Glas, Quarzglas	0,94	Beton, rau	0,94
Quarzglas, 840°C	0,47	Ziegelstein, rot	0,93

Tab. 1. Ausgewählte Beispiele für (temperaturabhängige) Emissivitätskoeffizienten bei Raumtemperatur /5/

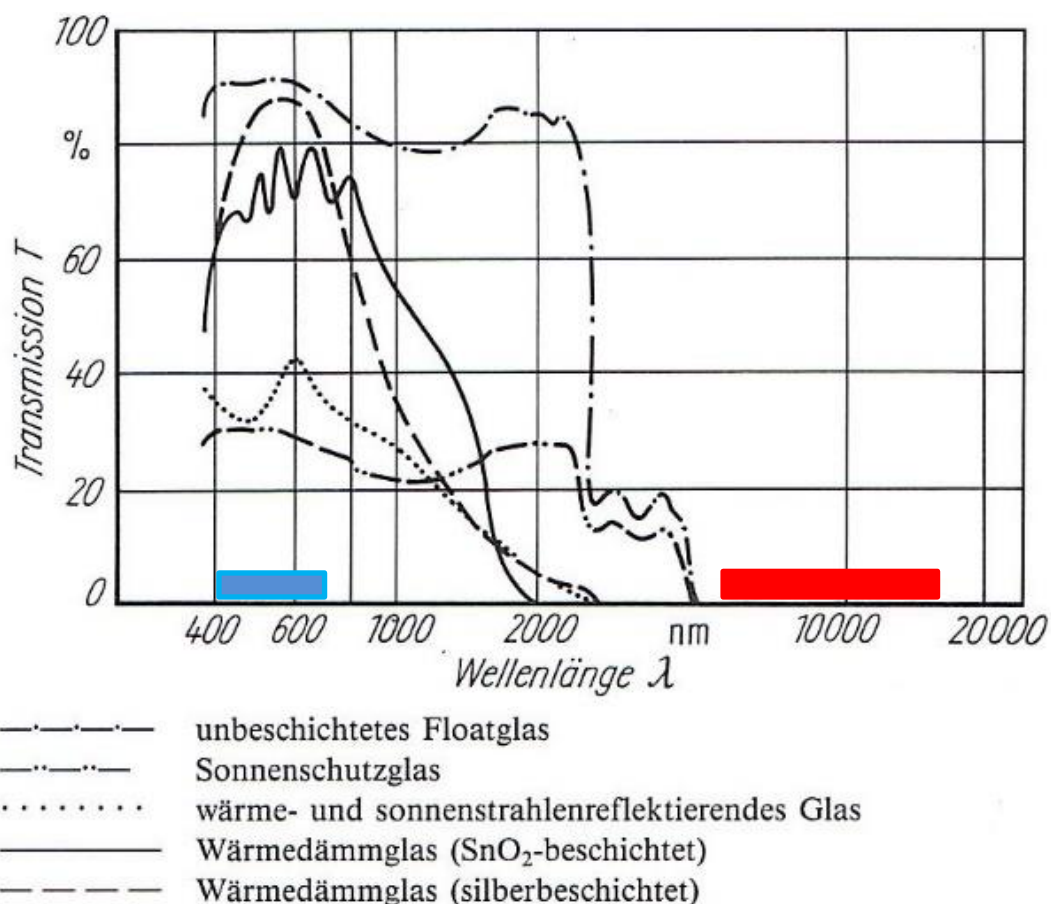


Abb. 4: Transmissionskoeffizienten verschiedener Gläser in Abhängigkeit der Wellenlänge /8/. Oberhalb einer Wellenlänge von ca. 5 μm ist die Transmission = 0. Das blaue Rechteck deckt das sichtbare Spektrum ab, das rote die IR-Strahlung eines 20 °C warmen Körpers.

Beispiele:

1. Poliertes Silber (Spiegel). Transmission $\tau = 0$, $\varepsilon = 0.02$. Reflexionskoeffizient 0,98 d.h. 98% der einfallenden Strahlung werden reflektiert.
2. Glas bei Raumtemperatur: $\varepsilon = 0,92$. Bleiben 8% für Transmission und Reflexion übrig? Glas ist im sichtbaren Spektrum natürlich durchsichtig, d.h. die Transmission ist sicherlich $>90\%$. Ebenso ist die Strahlungswärme der Sonne durch das Glas sehr gut wahrnehmbar, so dass auch hier ein Wert von 8% für die Transmission nicht mit der Erfahrung übereinstimmt, denn hinter einer Fensterscheibe wird die Strahlungswärme der Sonne nur unwesentlich abgeschwächt. ε nimmt mit zunehmender Temperatur ab und dürfte bei 5.500°C Glastemperatur kleiner 0,1 sein (nur theoretischer Wert). Die Definition von ε ergibt sich aus der Strahlungsleistung bei Raumtemperatur. Das spielt sich aber im infraroten Spektrum bei einer Wellenlänge um die $10\mu\text{m}$ ab. In diesem Wellenlängenbereich ist Glas undurchlässig.

3. Beispiele für WBK-Aufnahmen



Abb. 5: Hand oberhalb der kalten Wasseroberfläche. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Die Hand ist gut mit der WBK zu erkennen - trotz offensichtlich kalter Finger des Probanden.

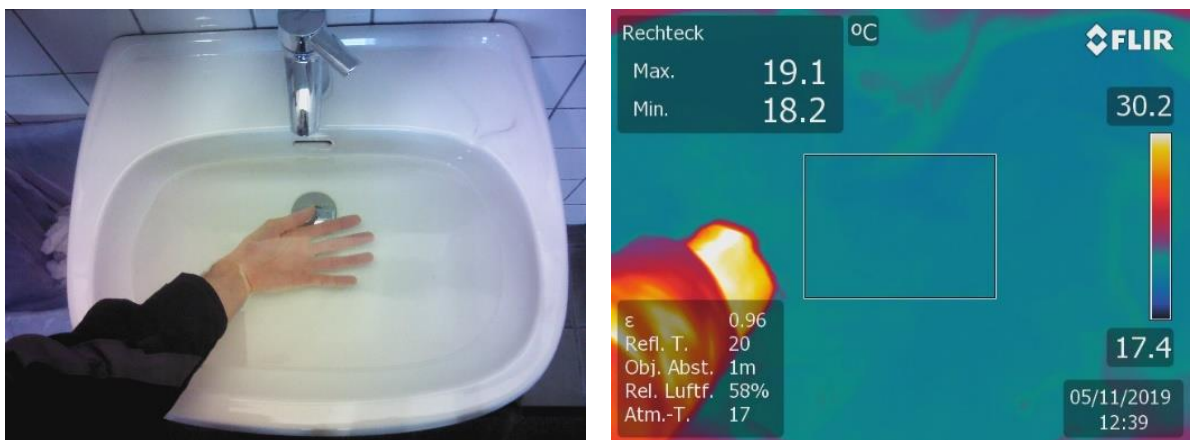


Abb. 6: Hand eingetaucht in kaltes Wasser. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Unter Wasser ist von der Hand nichts mehr zu erkennen. Wasser ist für langwellige IR-Strahlung undurchlässig.

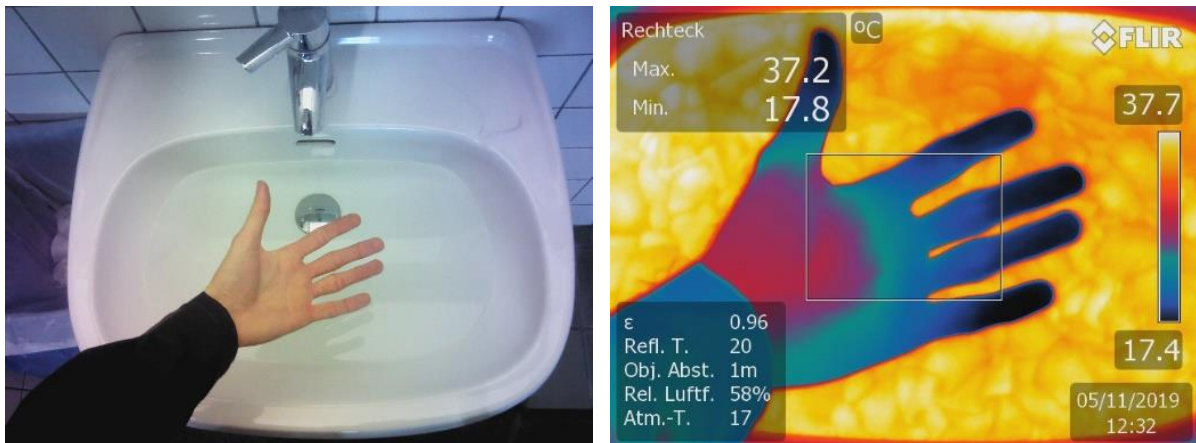


Abb. 7: Hand oberhalb der warmen Wasseroberfläche. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Die Hand ist besonders gut mit der WBK zu erkennen - aufgrund der offensichtlich immer noch kalten Finger des Probanden ist der Farbkontrast zum warmen Wasser besonders hoch.

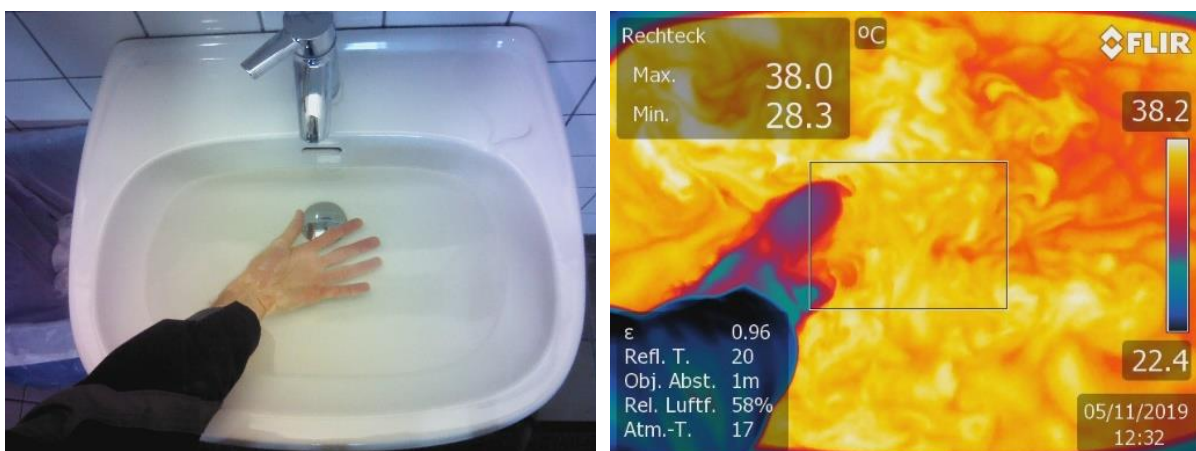


Abb. 8: Hand eingetaucht in warmes Wasser. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Wie zuvor ist unter Wasser von der Hand nichts zu erkennen.



Abb. 9: Transmission einer Fensterglasscheibe. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Für sichtbares Licht ist die Glasscheibe durchlässig, für langwelliges IR hingegen nicht.

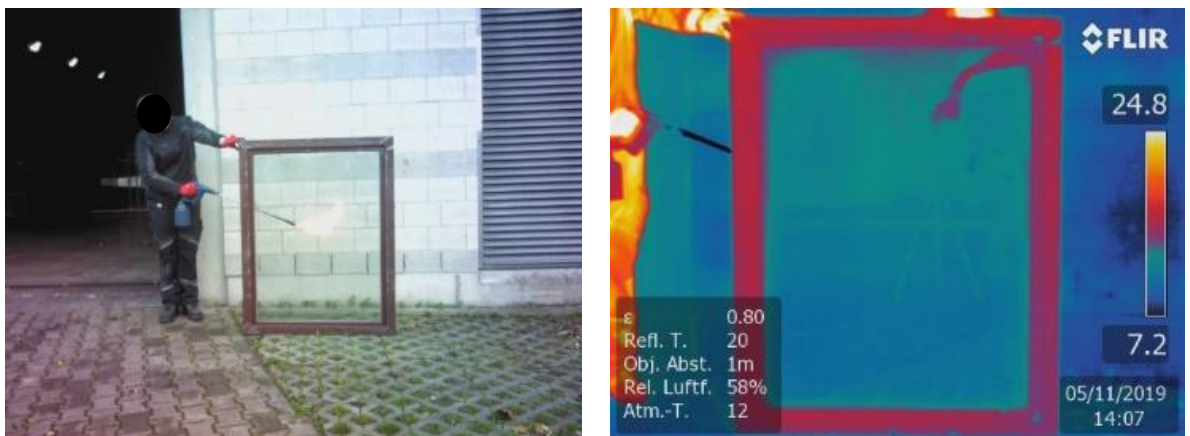


Abb. 10: Transmission einer Fensterglasscheibe. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Hinter der Glasscheibe brennt eine Flamme mit einer Temperatur von rund 1000°C. Durch die Scheibe ist sie mit der WBK nicht zu erkennen - das Dreibein-Stativ (bzw. dessen langwellige IR-Strahlung) der IR-Kamera spiegelt sich in der Scheibe.



Abb. 11: Reflexion einer Fensterglasscheibe. Links eine Person, rechts die Flamme des Gasbrenners. Aufnahmen mit der WBK



Abb. 12: Reflexion einer Edelstahlplatte. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Mit der herkömmlichen Digitalkamera ist die Reflexion der Person nicht zu sehen, weil das diffuse Sonnenlicht die schwache Reflexion überdeckt. Die Reflexion des warmen Körpers hingegen ist mit der WBK gut sichtbar. Hilfreich ist, dass die Außentemperatur niedrig ist. An einem warmen Sommertag würde wegen der diffusen langwelligigen IR-Strahlung der ebenso körperwarmen Umgebung die Reflexion nicht so deutlich zu erkennen sein.



Abb. 13: Reflexion einer Edelstahlplatte. Links herkömmliche Aufnahme mit Digitalkamera, rechts Aufnahme mit der WBK

Eine vorgemischte Gasflamme rußt nicht und leuchtet daher sehr schwach. Im langwelligeren IR ist sie ebenso wie ihre Reflexion hingegen sehr gut zu erkennen.

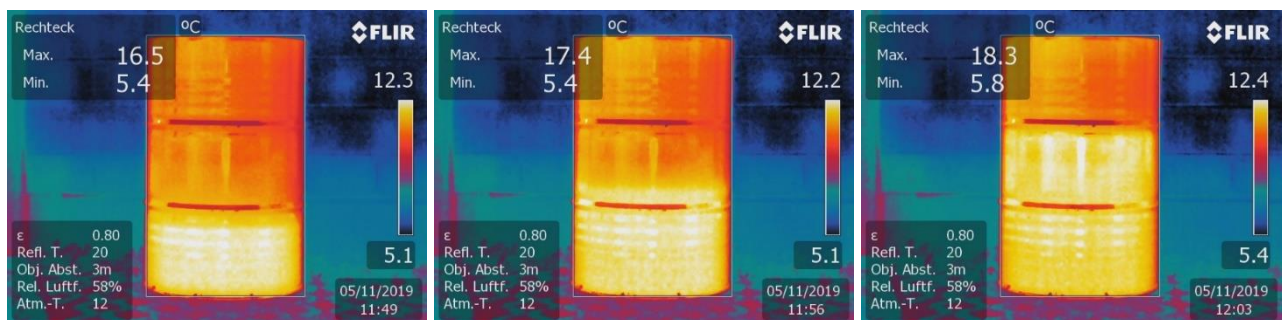


Abb. 14: Füllstandsmessung eines mit Wasser gefüllten Fasses (200 L) mit der WBK: Füllstand links 25%, mittig 40% und 60% rechts

Die Füllstandsmessung mit der WBK funktioniert nur, wenn sich die Umgebungstemperatur vor der Aufnahme geändert hat oder die Flüssigkeit zuvor mit einer zum Fass unterschiedlichen Temperatur eingefüllt wurde. Stünde das Fass – egal, wie hoch der Füllstand sei – so lange in einem Raum mit konstanter Temperatur, bis sich die Temperaturen der Flüssigkeit und des Fasses angeglichen haben, ist mit der WBK nichts zu erkennen. Die WBK misst lediglich die Oberflächentemperatur des Fasses und der Nutzer kann aus den unterschiedlichen Temperaturen den Füllstand ableiten.

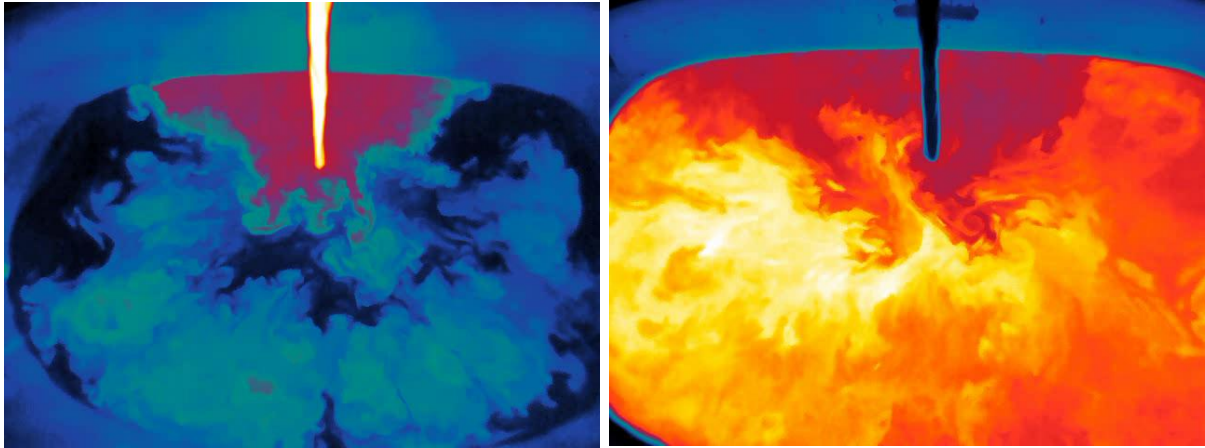


Abb. 15: Aufnahmen mit der WBK. Links einströmendes warmes Wasser in kaltes Wasser, rechts einströmendes kaltes Wasser in warmes Wasser

Die zeitliche Abtastrate der WBK ist hoch genug, dass kurzzeitige, turbulente Muster der Temperaturunterschiede im Wasserbecken gut zu erkennen sind.

3.1. Leslie-Würfel

Die unterschiedlichen Emissionsgrade bzw. –koeffizienten von verschiedenen Farben und Oberflächenbeschaffenheiten sind anschaulich und kompakt anhand eines „Leslie-Würfels“ aufzuzeigen /9/. Der Leslie-Würfel ist ein Messingwürfel mit je einer schwarzen und weißen Seite, sowie einer polierten und einer unbehandelten, rauen Seite. Der Würfel ist mit Wasser gefüllt, welches auf eine definierte Temperatur erhitzt werden kann.

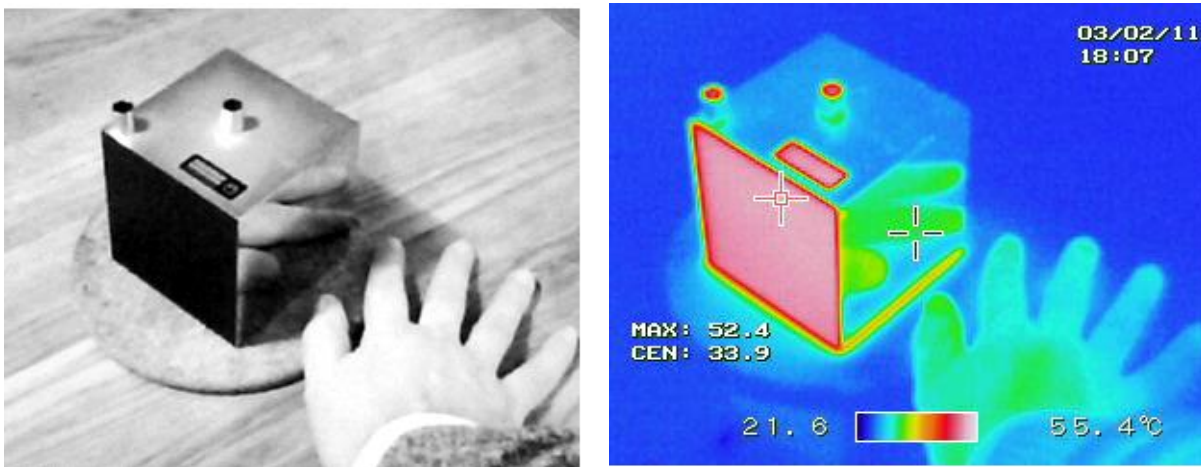


Abb. 16: Leslie-Würfel. Ansicht Vorderseite. Links Aufnahmen mit der Digitalkamera, rechts WBK

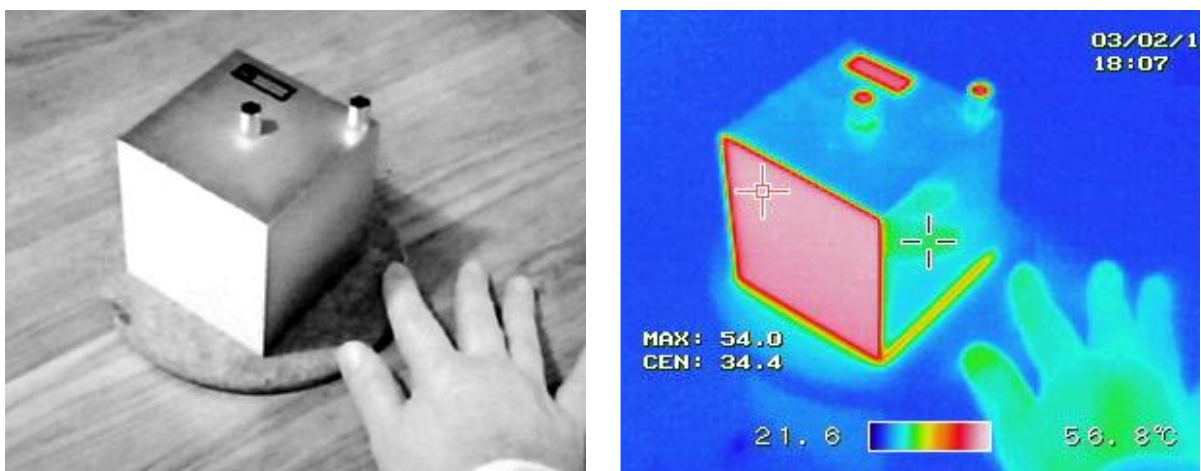


Abb. 17: Leslie-Würfel. Ansicht Rückseite. Links Aufnahmen mit der Digitalkamera, rechts WBK

4. Versuchsdurchführung

4.1. Versuchsaufbau und -durchführung

Zu einer der risikoreichsten Tätigkeiten der Feuerwehr gehört nach wie vor die Brandbekämpfung im Innern von Gebäuden oder Einhausungen, der sogenannte Innenangriff. Die Fortbewegung des vorgehenden Atemschutztrupps im Gefahrenbereich teils unter Nullsicht stellt ein hohes physisches und psychisches Stressaufkommen dar. In nur wenigen Sekunden müssen sich die Einsatzkräfte ein Bild von ihrer Umgebung machen, die Lage fortwährend beurteilen und Entscheidungen für das weitere Vorgehen treffen. Eine dieser Entscheidungen kann zum Beispiel die Risikoabschätzung zur Öffnung einer Wohnungstür vor einem potentiellen Brandherd sein. Ein unbedachtes Öffnen der Tür kann einem unterventilierten Brand den nötigen Luftsauerstoff für eine darauffolgende Rauchgasdurchzündung (engl.: Backdraft) liefern /2/. Bereits beim Suchen nach Personen oder nach besagtem Brandherd ist die Wärmebildkamera ein prominentes Mittel, um sich ein „schnelles Bild“ seiner Umgebung zu machen /10/. So stellt sich die Frage, ob man mithilfe dieses Einsatzmittels auch zuverlässig beurteilen kann, ob sich hinter einer Wohnungstür ein brandlastgesteuerter Brand noch in der Entstehungsphase oder ein bereits unterventilierter, abklingender Brand mit hohem Pyrolysegasanteil im Rauchgas befindet. Herkömmliche Methoden beinhalten den verbreiteten „Handrücktentest“ /1/, /2/ sowie die Durchführung der Türöffnungsprozedur.

Als vorrangiges Ziel soll untersucht werden, ob bzw. ab wann mit einer Wärmebildkamera eine signifikante Temperaturerhöhung an einer Türoberfläche bei einem Zimmerbrand dahinter beobachtet werden kann.

Das im folgenden beschriebene Experiment dient dazu, mit angemessenem Versuchsaufwand einen reproduzierbaren Wärmeeintrag in die Tür herzustellen, wie dieser bei einem Wohnungsbrand vorherrscht.

Weiterhin wird untersucht, welche Einflüsse das Messergebnis - und damit die Einsatzgrenzen der Wärmebildkamera beeinträchtigen können.

Der Versuchsaufbau lehnt sich im Wesentlichen an Voruntersuchungen zum Handrücktentest an.

Es wurde eine typische Innentür aus Buchenholz mit Röhrenspaneinlage, Innenfutter aus Styropor und ohne besondere Außenbeschichtung / Furnier verwendet (siehe Abbildungen 18 und 19). Die obere Hälfte der Tür wurde von beiden Seiten gleichmäßig mit einer 3x3-Matrix aus Thermoelementen (Typ K) bestückt (siehe Abbildungen 20 und 23). Die Türspalte wurden um die Tür herum mit Hochtemperaturwolle gegen Brandrauch abgedichtet. Ein mit Flüssiggas (LPG) befeuerter Kiesbettbrenner mit einer Leistung von 200 kW wurde als definierter Wärmeeintrag vor der dem Versuchsraum zugewandten Türseite positioniert (siehe Abbildung 24). Zwei weitere Thermoelemente (Typ K) wurden oberhalb des Brenners positioniert (siehe Abbildung 23). Der Versuchsraum, dessen Abmessungen einem typischen 25 m² großen (Wohn-)Zimmer mit Vorraum resp. Flur entspricht, befindet sich in einer großen Versuchshalle mit Abzug inklusive Rauchgasreinigung. Die Fensteröffnung des Versuchsraumes wurde teilweise abgedeckt, sodass eine entstehende Rauchsicht bis zur oberen Türkante inklusive der obersten Reihe von Thermoelementen reicht (siehe Abbildung 26). Die Maße und der Versuchsaufbau sind im Folgenden abgebildet (siehe Abbildung 21-23).

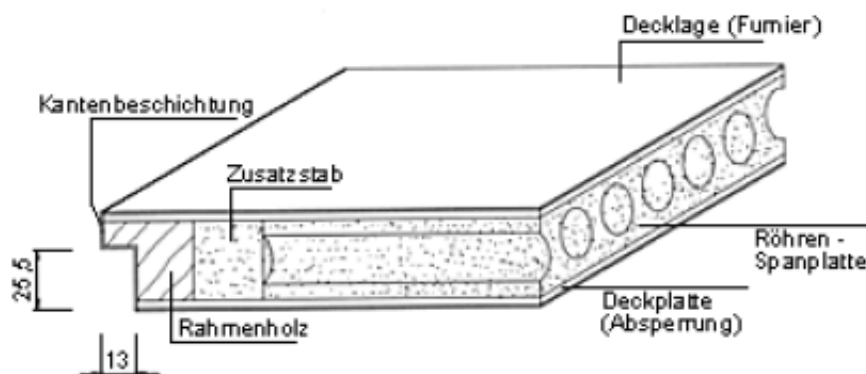


Abb. 18: Schematische Darstellung einer Innentür mit Röhrenspaneinlage



Abb. 19: Schnitt der verwendeten Innentür aus Buchenholz (1985x985x40 mm, 35 kg)

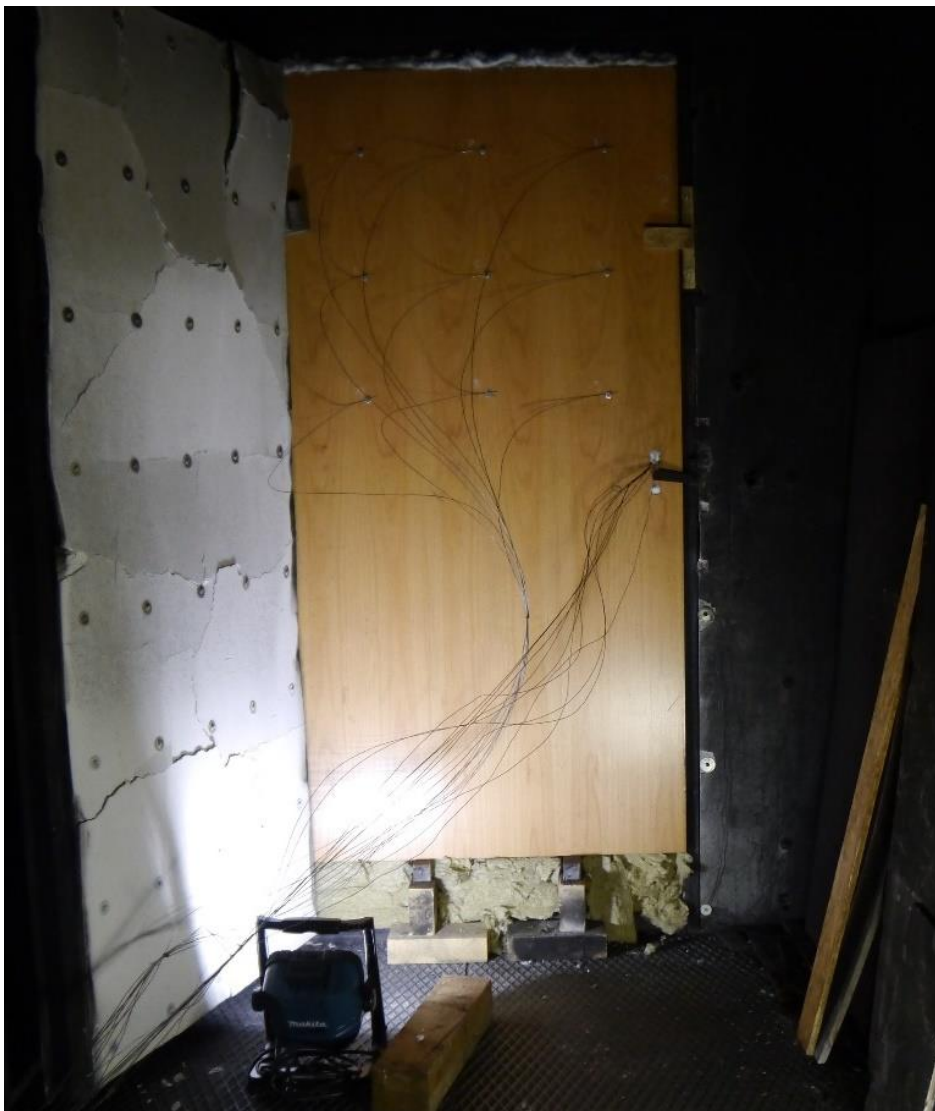


Abb. 20: Versuchsaufbau der Innentür mit bestückter TE-Matrix (Typ K) – Außenansicht



Abb. 21: „Wohnzimmer“ (rot) und Vorraum (gelb mit Treppe) in der Versuchshalle

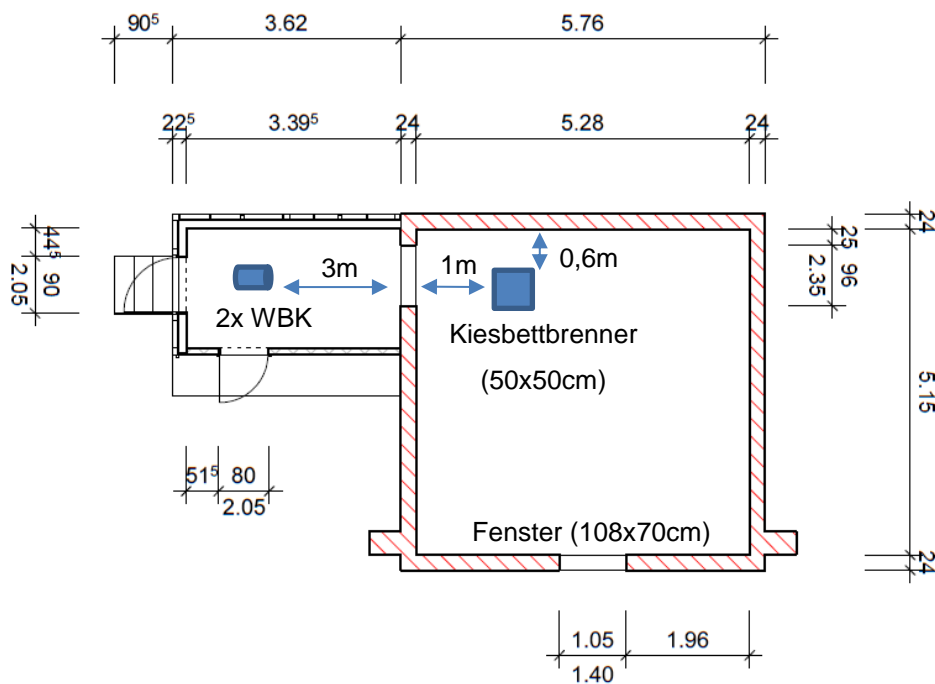


Abb. 22: Abmessungen des Versuchsraumes („Wohnzimmer“ und Vorraum)

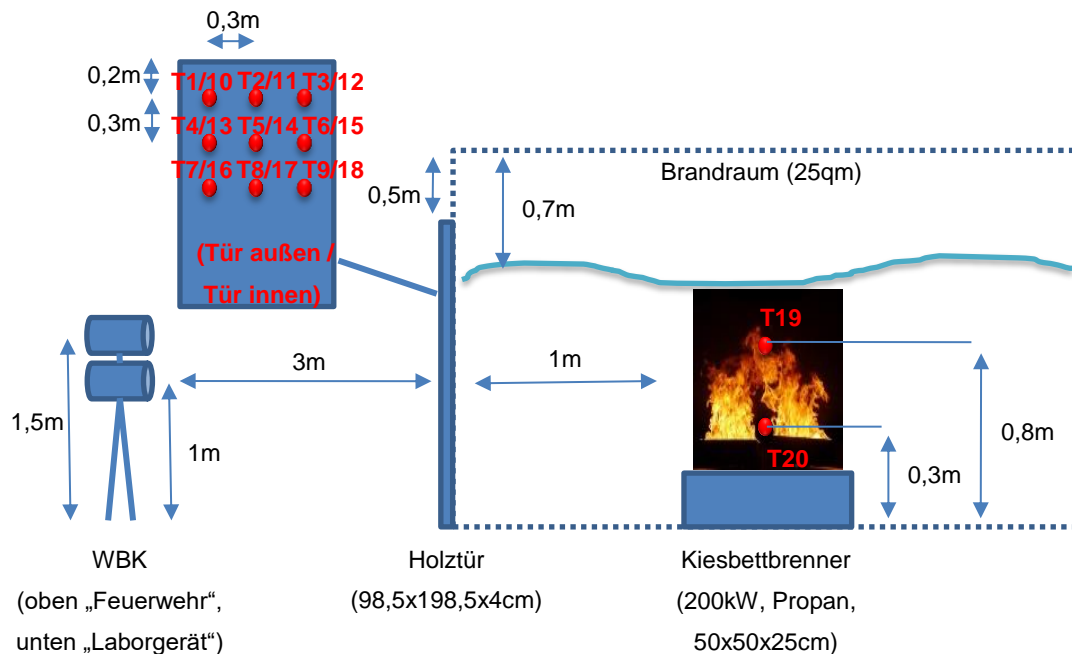
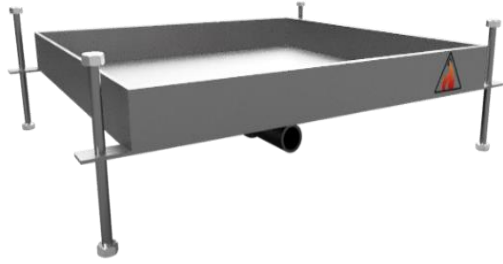


Abb. 23: Schematischer Versuchsaufbau und Positionierung der Messtechnik

Um die Leistung des Kiesbettbrenners (200 kW) und dessen Entfernung zur Tür so abzustimmen, dass die Tür einen Versuchsdurchlauf von mindestens 20 Minuten unversehrt übersteht, aber dennoch genügend Wärmeeintrag vergleichbar dem eines Wohnungsbrandes in der Früh- / Entwicklungsphase vorhanden ist, wurden Vorversuche durchgeführt. Bei einer Meter Entfernung und 200 kW Brennerleistung wurde nach zehn Minuten eine Oberflächentemperatur von 117 °C und nach zwanzig Minuten 136 °C sowie leichte Verformungen der Tür (jedoch ohne sichtbare thermische Umsetzungen) beobachtet und die wesentlichen oben genannten Versuchsanforderungen damit erfüllt.



Kiesbett-Schüttung: 5/8 mm
Größe: 50 x 50 cm; $A=0,25 \text{ m}^2$
Brenngas: Flüssiggas Propan/ Butan



Abb. 24: Kiesbettbrenner



Abb. 25: Kiesbettbrenner-Flamme bei 200 kW, Betrieb mit LPG



Abb. 26: Rauchaustritt aus Versuchsraum durch teilweise verdeckte Fensteröffnung

Zur Beobachtung der Türaußenseite kamen für einen direkten Vergleich eine Wärmebildkamera „Bullard T4“, die typischerweise bei einem Feuerwehreinsatz verwendet und demnach im Folgenden als Modell „Feuerwehr“ bezeichnet wird, und eine Wärmebildkamera „FLIR T640“, die in der Versuchshalle vorgehalten und demnach im Folgenden als Modell „Labor“ bezeichnet wird, zum Einsatz.

Die Positionierung erfolgte entsprechend einer vergleichbaren und annähernd rechtwinkligen Ausrichtung auf die obere Türhälfte in einer Höhe über dem Boden von 1-1,5 m und einem Abstand von 3 m vor der Tür (siehe Abbildungen 23 und 27). Beide Kameras arbeiten mit ungekühlten Mikrobolometern im Spektralbereich von 7,5-14 μm und einer Bildwiederholungsrate von 30 Hz.

Die beiden WBKs unterscheiden sich jedoch in folgenden technischen Details (Quelle: Datenblätter Bullard und FLIR):

Bullard T4 (Modell „Feuerwehr“):

- Auflösung: 320x240, Sichtfeld: 50°x32°
- Thermische Empfindlichkeit (NETD): 50 mK
- Fixe T-Skala, schwarz-weiß, Farbumschlag zu orange-rot ab 250 °C
- Keine Videospeicherung, daher Bildschirm mittels DigiCam abgefilmt

FLIR T640 (Modell „Labor“):

- Auflösung 640x480, Sichtfeld: 25°x19°
- Thermische Empfindlichkeit (NETD): 30 mK
- Bildabhängige T-Skala, blau-rot, automatische Grenzerweiterung
- Videospeicherung, jedoch ohne (veränderbare) T-Skala



Abb. 27: Versuchsaufbau Wärmebildkamas vor Türaußenseite

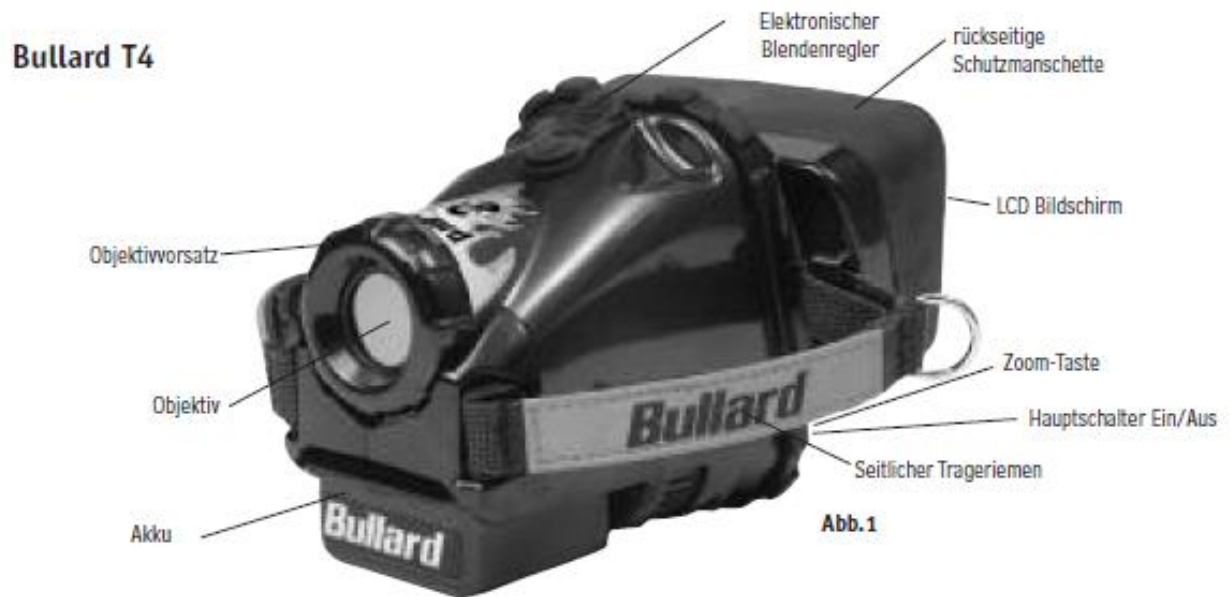
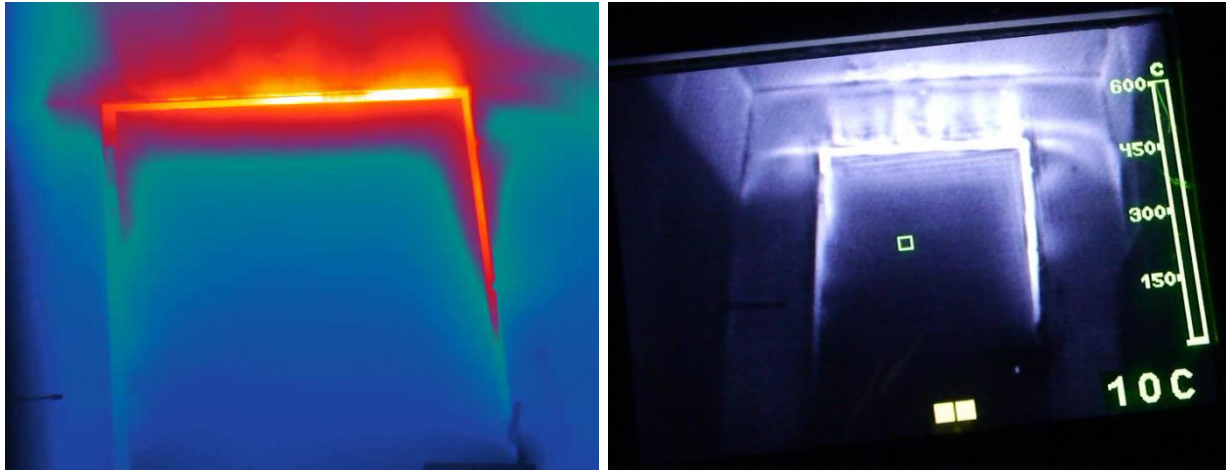


Abb. 28: Wärmebildkamas. Bullard T4



Abb. 29: Wärmebildkamas. FLIR T640

Aus einem vorangegangenen Realbrandversuch (inklusive Mobiliar, allerdings mit einer metallischen Tür), konnten bereits Erfahrungen aus einem Vergleich der Wärmebildkamera „Labor“ mit einer anderen Feuerwehr-Wärmebildkamera des Typs „Bullard Eclipse LDX“ gesammelt werden (s. Abb. 30).



FLIR T640

Bullard Eclipse LDX

Abb. 30: Wärmebilder der Außenseite einer metallischen Tür bei einem Realbrandversuch etwa 30 min nach Zündung. Die (mit Thermoelementen gemessene) Temperatur am Türspalt / Türrahmen oben beträgt etwa 250 °C; Links: Videoausschnitt Modell „Labor“, Skala nicht gespeichert, etwa von 20 bis 250 °C; Rechts: Foto von Typ „Bullard Eclipse LDX“ (Feuerwehr), fixe Skala von 10 bis 600 °C

Die Aufnahmen entstanden etwa 30 Minuten nach Zündung. Aufgrund der metallischen Oberfläche der Tür sollte die Temperaturangabe aus der WBK-Messung nur als ungefähre Angabe angesehen werden, denn der stark abweichende Emissionskoeffizient vom standardmäßig voreingestelltem Wert $\epsilon=0,8-0,9$ (vgl. blanke Metalloberflächen $\epsilon=0,1-0,25$) verfälschen eine quantitativ genaue thermografische Messung erheblich. Zusätzliche Reflektionen von aus dem Umfeld stammender Wärmestrahlung tragen auch nicht zur erhöhten Genauigkeit bei.

Trotz der Unwägbarkeiten bei der Temperaturmessung ist in Abbildung 30 eindrücklich zu sehen, dass eine Detektion am eindeutigsten über den oberen Türspalt / Türrahmen, der in diesem Versuch nicht komplett abgedichtet wurde, erfolgen.

Eine weitere Voruntersuchung erfolgte unter Variation der Beleuchtung im Vorraum als möglicher Störeinfluss. Es wurden mit dem Wärmebildkamera-Modell „Labor“ dazu Vergleichsbilder (d. h. 1x Wärme- und 1x Digitalbild) der Tür unter jeweils identischen

thermischen Randbedingungen (Kiesbettbrenner) aufgenommen. Als potentielle Störquellen wurden eine handelsüblichen Leuchtstoffröhre (8 W), ein Halogen-Strahler (500 W), ein LED-Strahler (12 W) und eine handelsüblichen IR-Wärmelampe (100 W) untersucht. Aus den Abbildungen 31 bis 35 ist ersichtlich, dass die Hintergrundbeleuchtung durch die Störquellen einen kaum merklichen Einfluss auf das Wärmebild hat, welcher sich auf die geringfügige Erwärmung (wenige Kelvin) des Messobjektes bei direkter Bestrahlung mit dem IR- und dem Halogen-Strahler beschränkt und aufgrund der geringen Temperaturgradienten eher einem Rauschen gleicht. Vermutlich wurde auch nicht der gesamte reflektierte Strahlungsanteil von der Kamera erfasst, sondern nur ein kleiner (diffuser) Anteil, da sich die Störquellen jeweils leicht links der Kameraposition befanden und damit der Einstrahl- / Abstrahlwinkel von der restlichen durch die Türoberfläche in Normaler-Richtung emittierten Strahlung abwichen.

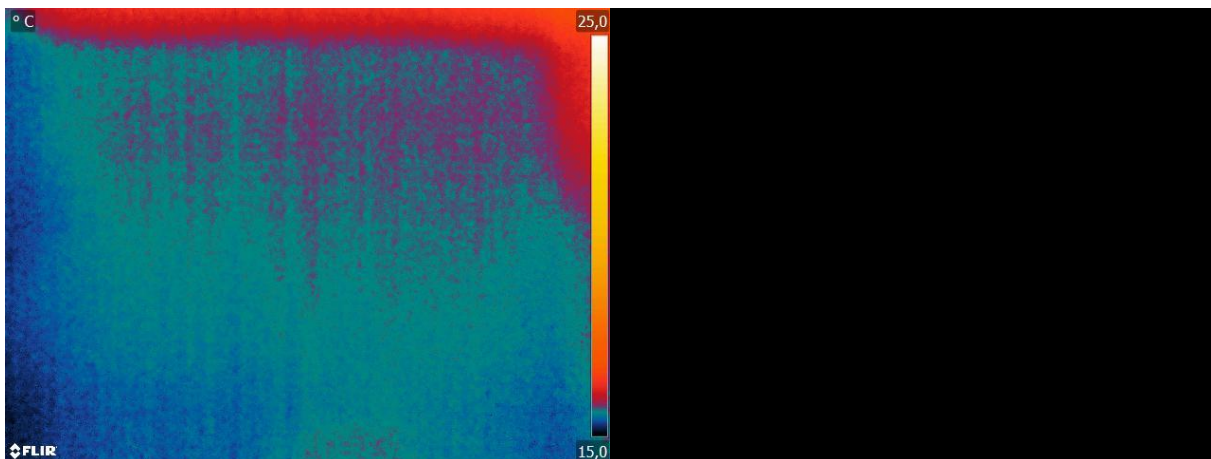


Abb. 31: Tür ohne externe Lichtquelle. Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

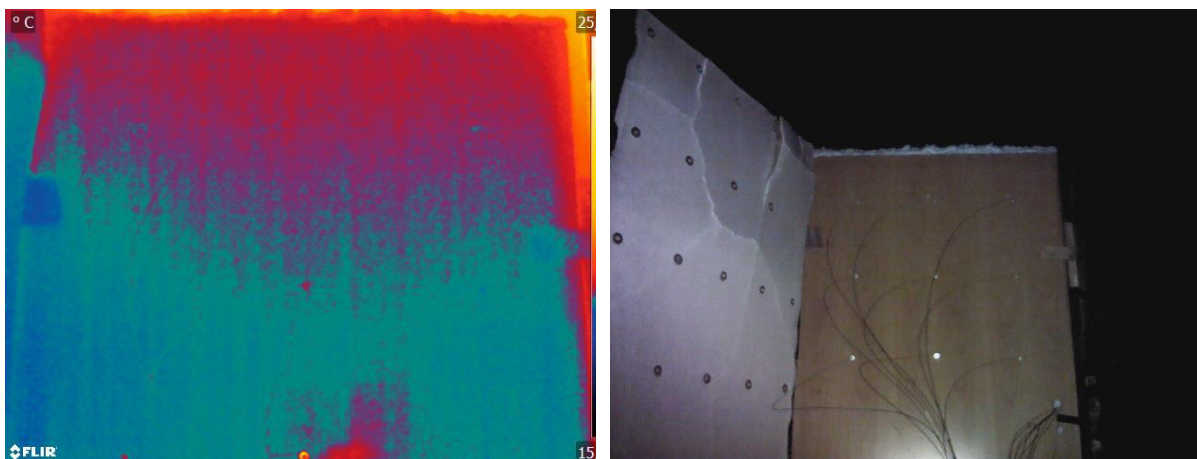


Abb. 32: Tür mit externer Lichtquelle Leuchtstoffröhre (8 W). Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

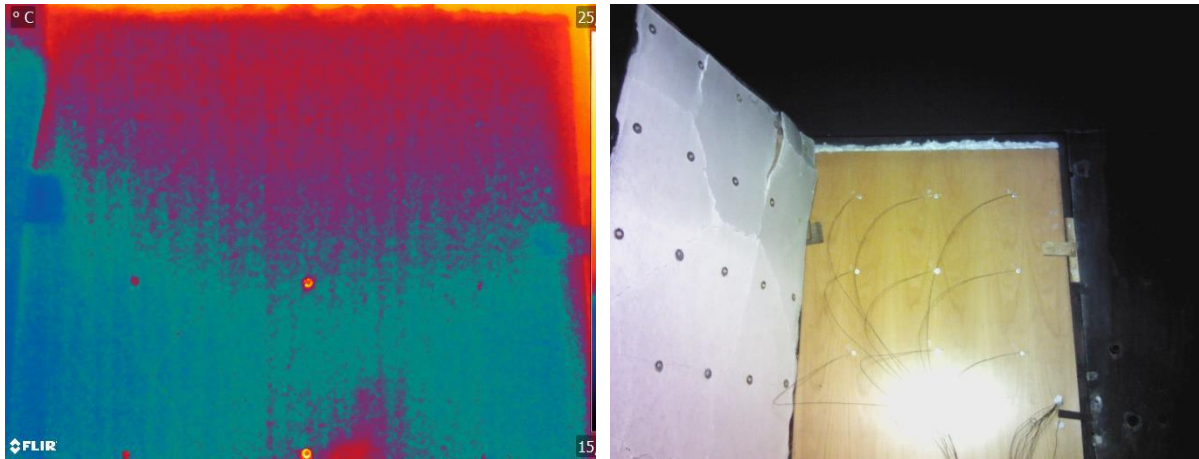


Abb. 33: Tür mit externer Lichtquelle Halogenstrahler (500 W). Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

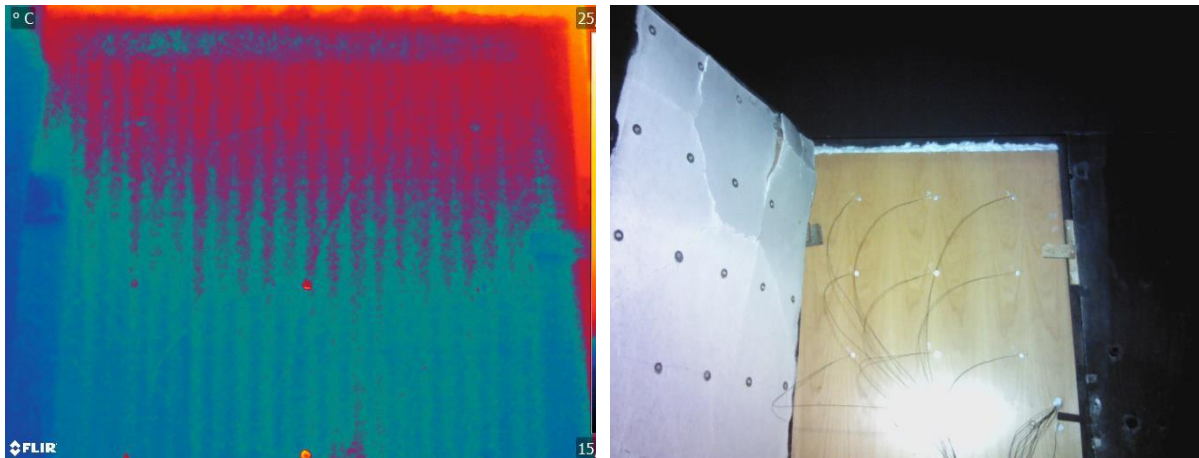


Abb. 34: Tür mit externer Lichtquelle LED-Strahler (12 W). Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

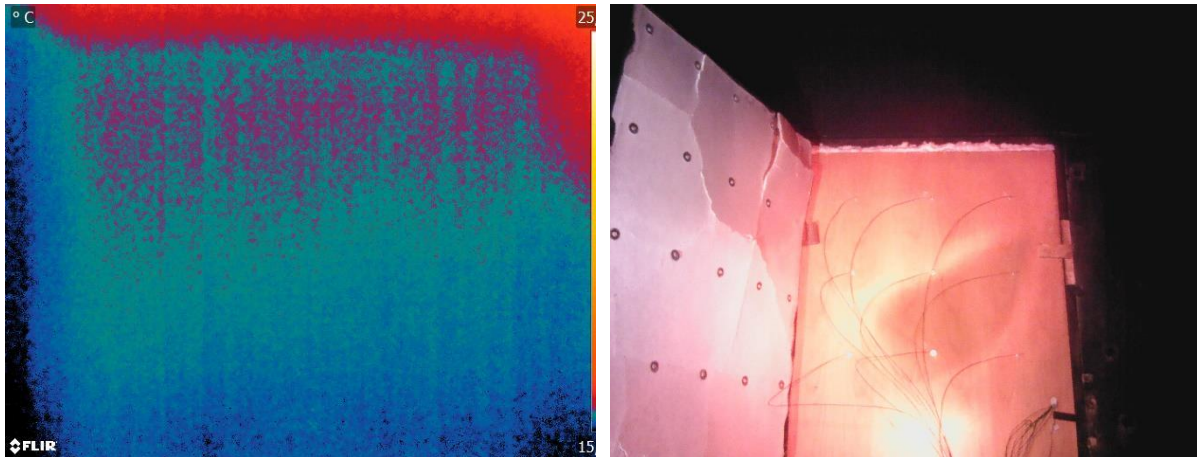


Abb. 35: Tür mit externer Lichtquelle IR-Strahler (100W). Aufnahme mit WBK links, mit Digitalkamera rechts

4.2. Versuchsergebnisse

Nach jeweils einer Minute Vorlaufzeit für das Messsystem der Thermoelemente und die Wärmebildkameras wurde bei $t = 0$ min der Kiesbettbrenner mit einer Zündlanze gezündet und auf 100% Leistung (200 kW) für 10 Minuten betrieben. In einem Wiederholungsversuch wurde die Brennerlaufzeit auf 16 Minuten erhöht, um die maximale Temperatur auf der Tür-Innenseite möglichst nah an das gesetzte Limit von 200 °C herangehen zu lassen. Anhand der Temperaturen in und oberhalb der Flamme lässt sich der sehr gleichmäßige Abbrand und damit auch Wärmefreisetzung mit dem Kiesbettbrenner erkennen (Abbildungen 36 und 37), ein großer Vorteil für den durchgeführten Versuch. Im ersten Versuch liefen die Wärmebildkameras bis $t=12$ min, im zweiten Versuch bis $t=17$ min.

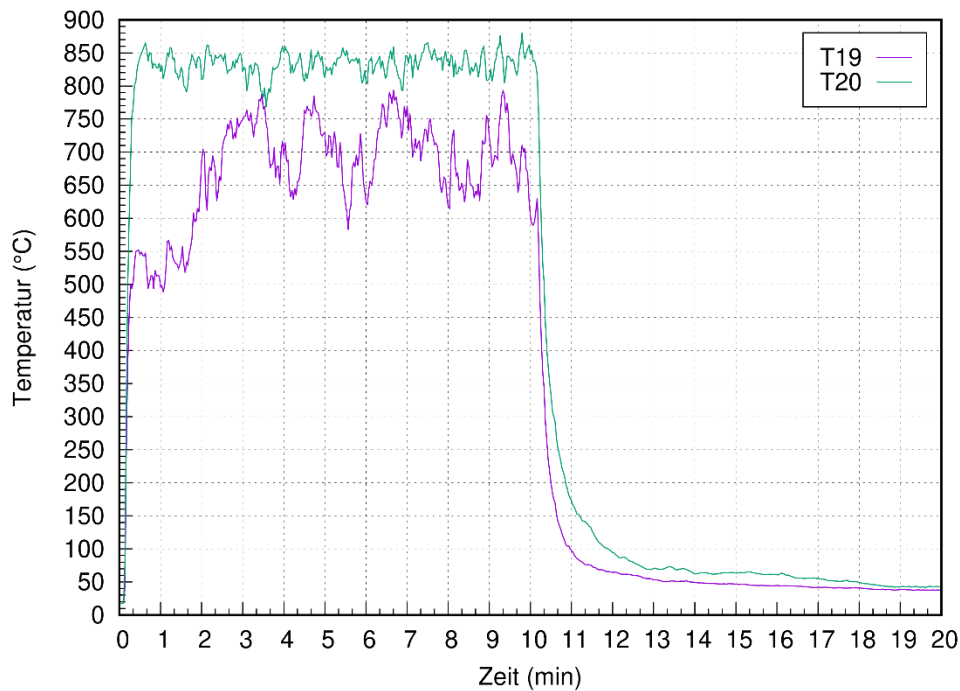


Abb. 36: Temperaturprofile aus Versuch 1 mittig oberhalb des Kiesbettbrenners, 80 cm (T19) und 30 cm (T20) über dem Boden

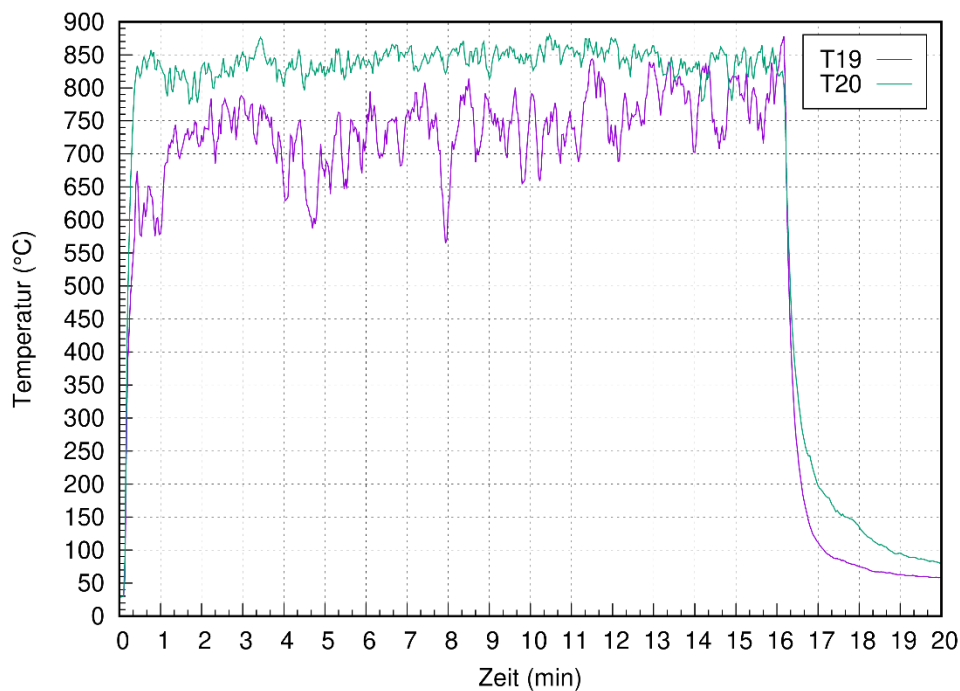


Abb. 37: Temperaturprofile aus Versuch 2 mittig oberhalb des Kiesbettbrenners, 80 cm (T19) und 30 cm (T20) über dem Boden

Die Temperaturprofile der oberen Türhälfte auf der Außen- und Innenseite zeigen jeweils eine größtenteils gleichmäßige Verteilung in einem engen Temperaturbereich, für beide Versuche etwa 20-25 Kelvin auf der Tür-Innenseite und etwa 10 Kelvin auf der Tür-Außenseite (siehe Abbildungen 38 und 39). Die Verteilung lässt sich durch die

etwas dezentrale Ausrichtung des Kiesbettbrenners vor der Innentür weg von der Versuchsraumwand erklären (siehe Abbildung 23). Man erkennt gut die Aufheizphase während des Brennerbetriebes und schließlich die Abkühlphase nach Abschalten des Brenners. In Versuch 1 werden maximal 150 °C auf der dem Brand zugewandten Türseite erreicht und in Versuch 2 sind es fast 200 °C, wobei im zweiten Versuch die Tür leicht vorgewärmt vom Vorversuch war (um 10 Kelvin außen und 20 Kelvin innen). Der Wärmeeintrag durch den Kiesbettbrenner ist über die Temperaturprofile ausreichend charakterisiert und kann im Folgenden mit den Aufnahmen der Wärmebildkamera verglichen werden.

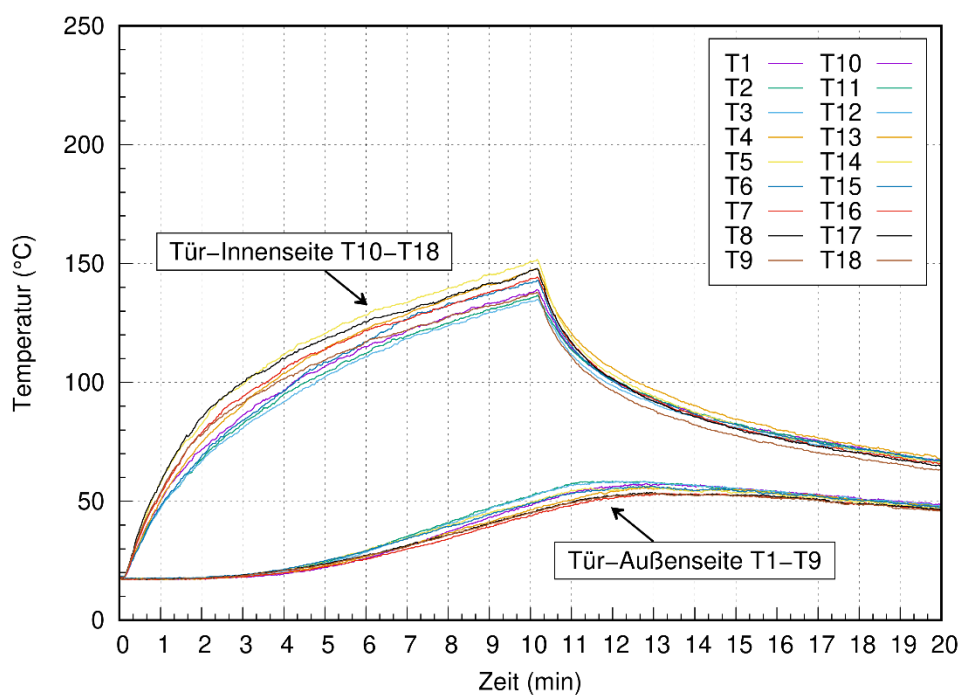


Abb. 38: Temperaturprofile in der 3x3-Matrix an der Tür-Außenseite (T1-T9) und Tür-Innenseite (T10-T18) aus Versuch 1

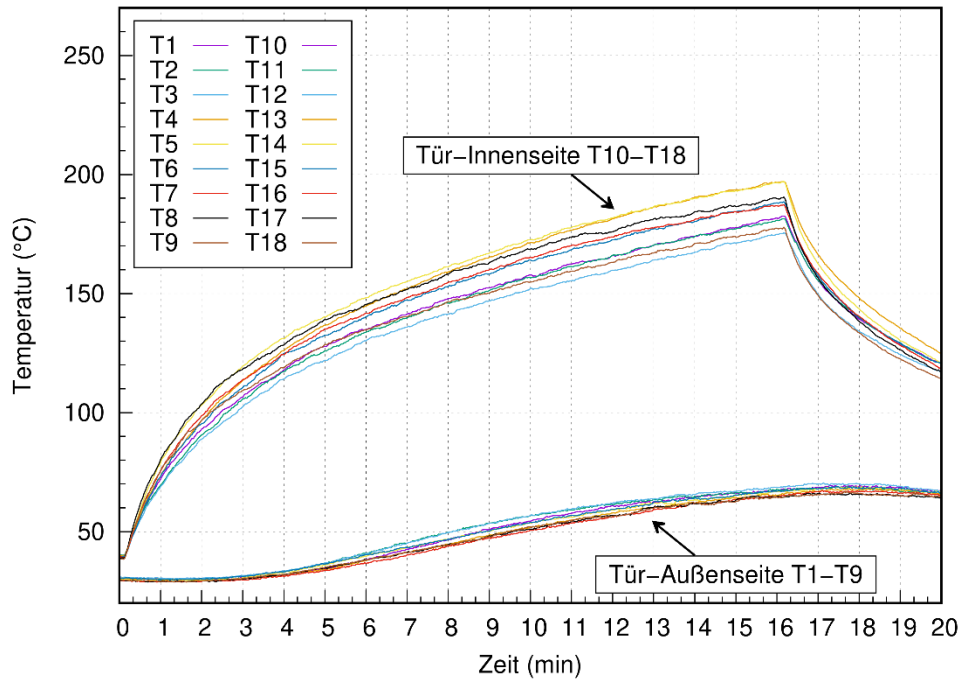


Abb. 39: Temperaturprofile in der 3x3-Matrix an der Tür-Außenseite (T1-T9) und Tür-Innenseite (T10-T18) aus Versuch 2

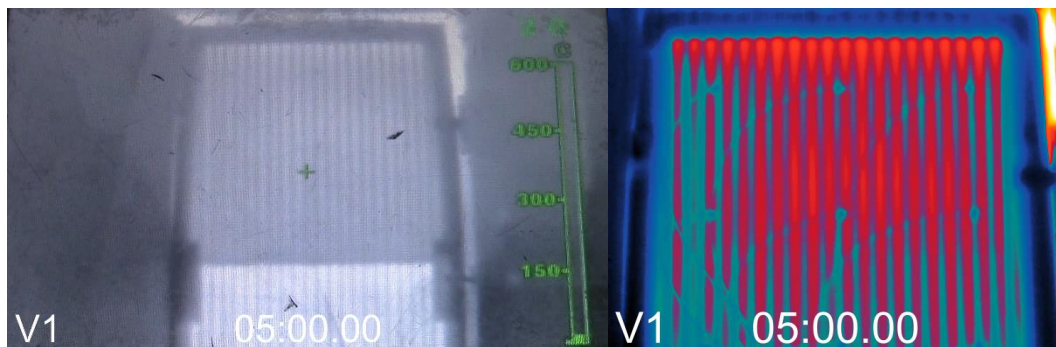
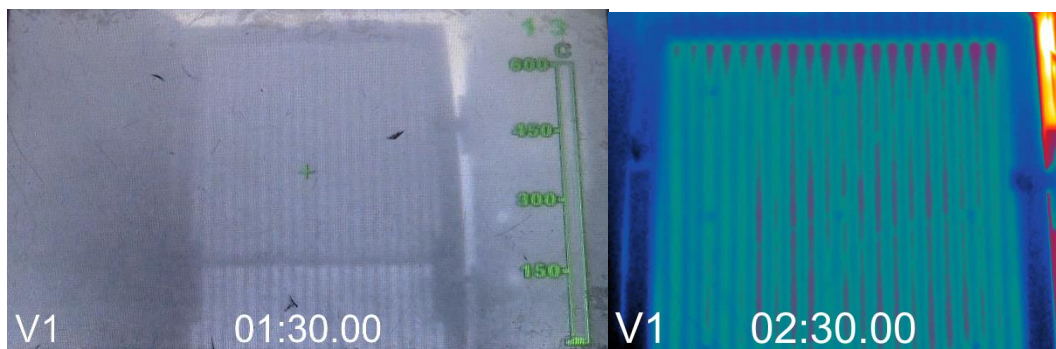
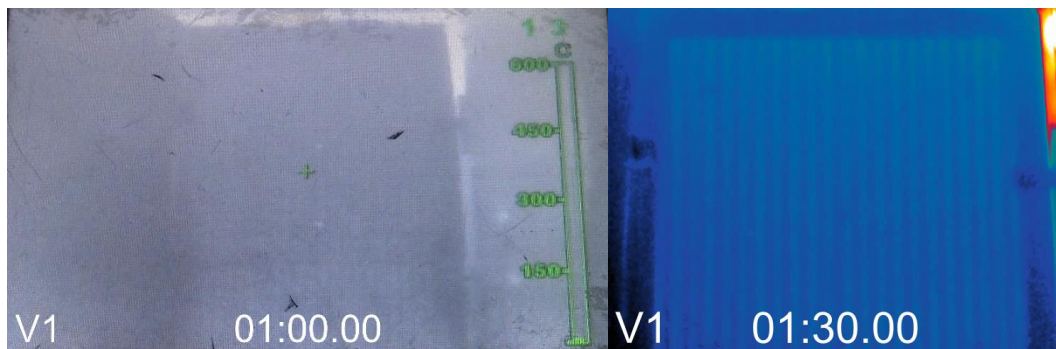
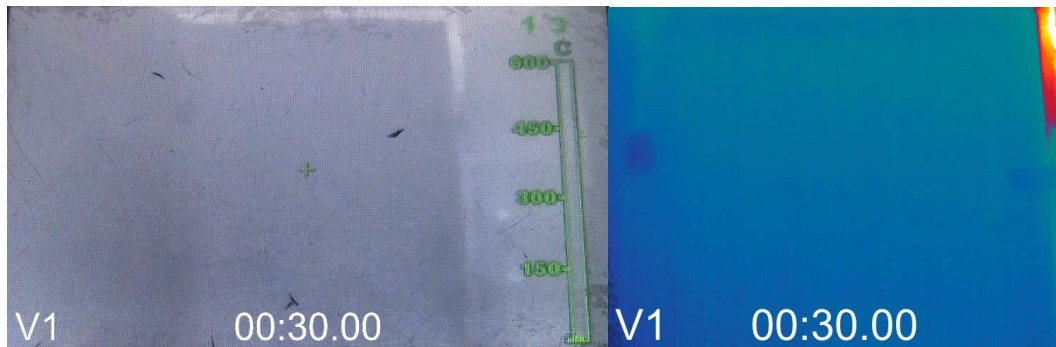
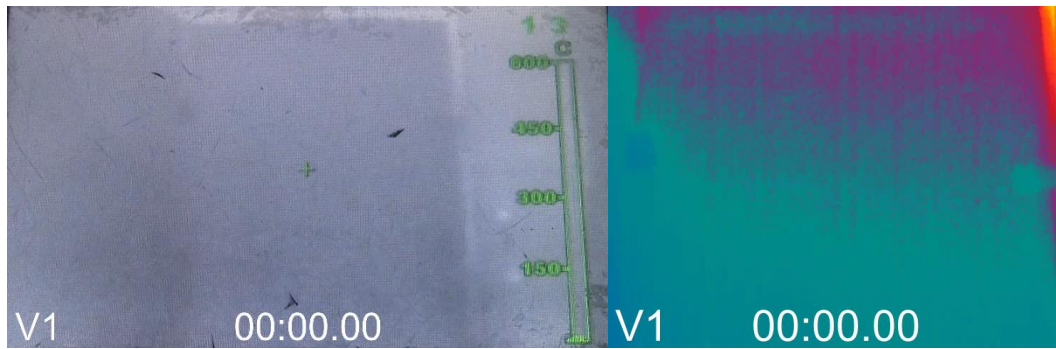
In den Abbildungen 40 und 41 werden die Aufnahmen der beiden Wärmebildkamera-Vergleichsmodelle „Feuerwehr“ und „Labor“ für die Versuche 1 und 2 jeweils für charakteristische Zeitpunkte gegenübergestellt. Es ist an dieser Stelle nochmals zu betonen, dass der Bildschirm des Modells „Feuerwehr“ abfotografiert wurde, also genau der Ansicht gleicht, der eine Feuerwehreinsatzkraft potentiell im Innenangriff begegnet, und dass der Videoschnappschuss aus dem Modell „Labor“ keine Temperaturskala mitliefert, welche in der Beurteilung einer Temperaturdifferenz und der Darstellung von Konturen aufgrund von farblichen Hervorhebungen auf dem Bildschirm eher eine untergeordnete (und bei absoluten Ablesewerten eine unbedingt kritisch zu bewertende) Rolle spielt.

In allen Versuchen sowie mit allen Wärmebildkameras konnte beobachtet werden, dass das angezeigte Bild jeweils schärfere und klarere Konturen zeigt, sobald die Temperaturunterschiede größer werden. Zwar weisen beide Modelle, „Feuerwehr“ und „Labor“, jeweils sehr geringe thermische Empfindlichkeiten auf, jedoch spielt das Gesamtbild aller Sensoren bei der optischen Lagebeurteilung (z. B. bei der Orientierung in dunklen / verrauchten Räumen) eine wichtige Rolle.

Wie schon im Realbrandversuch mit der metallischen Tür und nicht abgedichteten Türspalten kann die Erwärmung am oberen Türspalt trotz Abdichtung gegen Brandrauch

mit beiden Modellen schnell beobachtet werden. Der helle Streifen bei $t = 0$ min stellt dabei den metallischen Türrahmen dar, der vermutlich durch Wärmeleitung sehr schnell auf der Außenseite vergleichbare Temperaturen wie auf der Innenseite annahm.

In Versuch 1 brauchte das Modell „Labor“ aufgrund der automatischen Temperaturskalenanpassung etwa 30 Sekunden nach Zündung um anstatt Rauschen ein relativ klares Bild zu zeigen. Nach 1:30 Minuten wird die innere Türstruktur der Röhrenspaneinlage allmählich erkennbar, beim Modell „Feuerwehr“ geschieht das in Versuch 1 bereits nach 1:00 Minute (siehe Abbildung 40). Während die Temperaturen auf der Tür-Außenseite zu dieser Zeit noch keine Veränderung aufzeigen, werden auf der Innenseite bereits Temperaturen zwischen 50 und 80 °C gemessen (siehe Abbildung 38). Von einem möglichen Brandereignis würde man vermutlich ab 2:30 Minuten nach Zündung bei dem Modell „Labor“ und ab 1:30 Minuten bei dem Modell „Feuerwehr“ ausgehen. Etwa 10 Minuten nach Zündung konnte man in beiden Versuchen mit allen Wärmebildkameras ein stetig / gleichbleibend klares Bild erkennen, sodass das Eintreten eines Gleichgewichtszustandes zu diesem Zeitpunkt angenommen werden kann (vgl. Abbildungen 40 und 41).



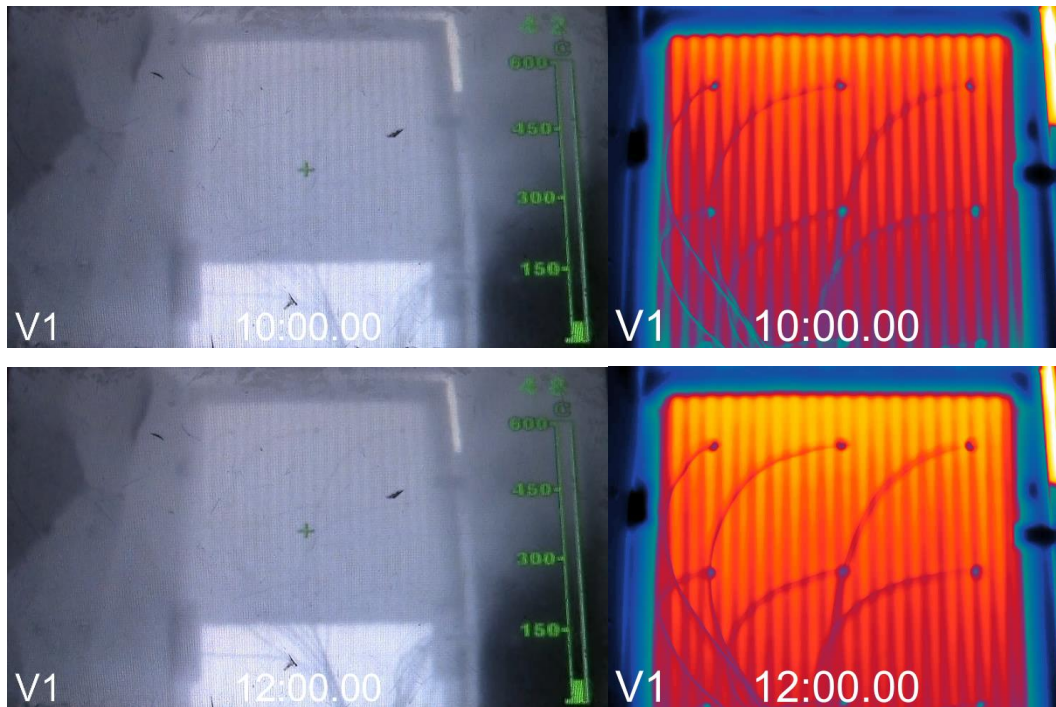
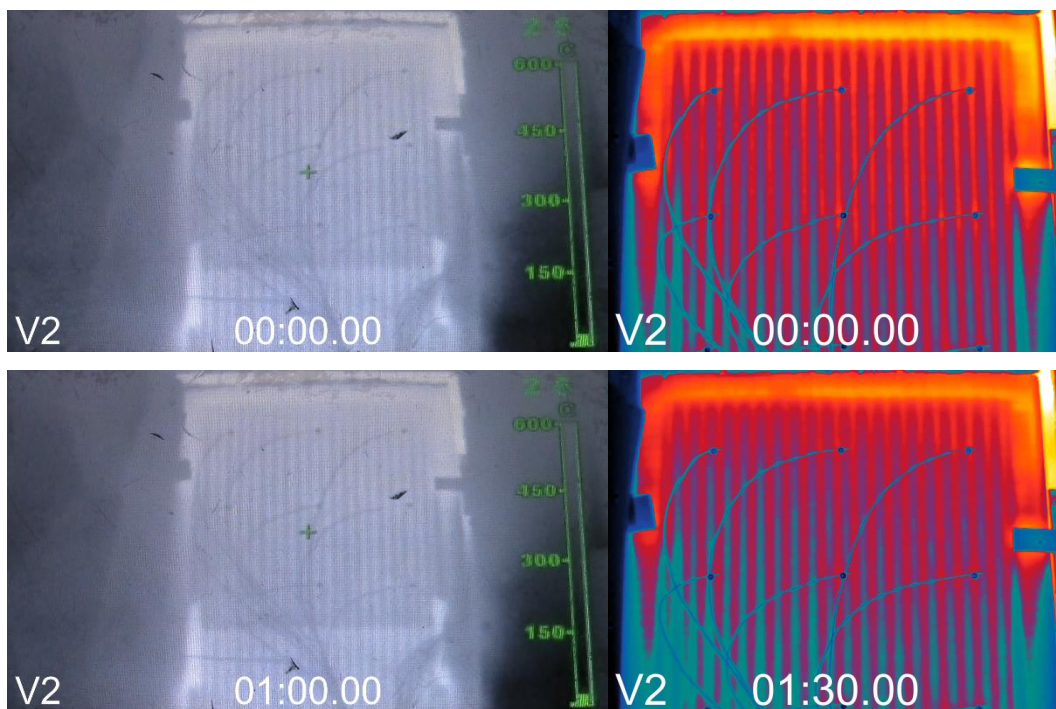


Abb. 40: Vergleich der Wärmebild-Aufnahmen des Modells „Feuerwehr“ (links) mit dem Modell „Labor“ (rechts) aus Versuch 1



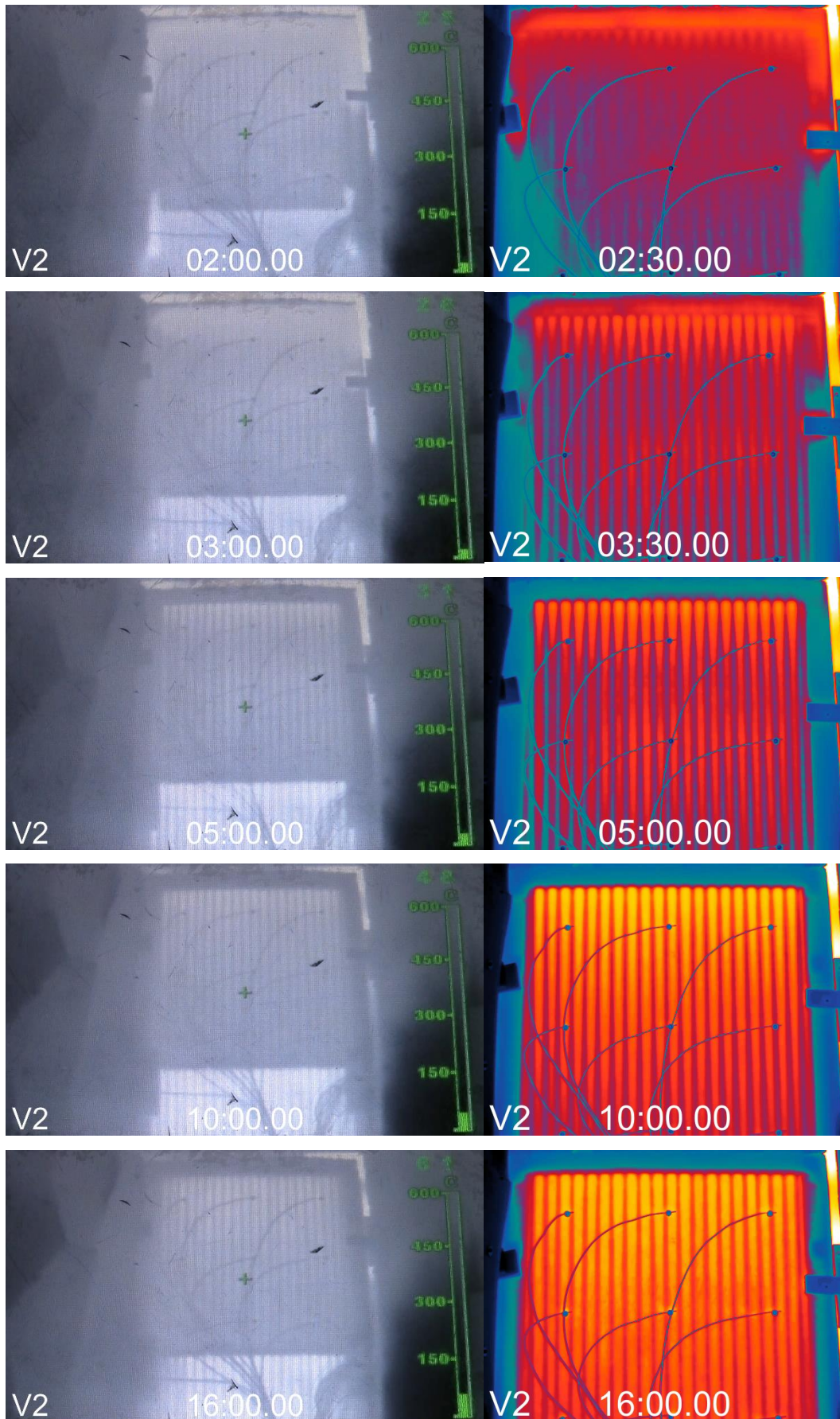


Abb. 41: Vergleich der Wärmebild-Aufnahmen des Modells „Feuerwehr“ (links) mit dem Modell „Labor“ (rechts) aus Versuch 2

Bereits die Vorwärmung um 10 Kelvin in Versuch 2 reichte aus, um von Anfang an bei beiden Modellen ein relativ klares Bild zu zeigen (siehe Abbildung 41). Inwieweit die Temperatur im Zwischenbereich der Röhrenspaneinlage noch erhöht war konnte im Versuch nicht festgestellt werden. Nachfolgend ändert sich nicht sehr viel bis zum besagten Gleichgewichtszustand etwa 10 Minuten nach Zündung (hier ggf. etwas früher) und wie zuvor beschrieben blieben die Bilder danach ebenfalls nahezu unverändert. Lediglich das Modell „Labor“ wies bei 2:30 Minuten ein Verschwimmen der Konturen auf, was vermutlich einer erneuten Anpassung der automatischen Temperaturskala zuzurechnen ist. Zu diesem Zeitpunkt waren die Temperaturen auf der Tür-Außenseite erneut nahezu unverändert, auf der Innenseite allerdings bereits zwischen 90 und 110 °C (siehe Abbildung 39). Im zweiten Versuch wäre man bei beiden Modellen vermutlich direkt bei $t = 0$ min von einem möglichen Brandereignis hinter der Tür ausgegangen. Unklar ist jedoch, welchen Einfluss eine zudem vorgewärmte umgebende Baustruktur (heißer als Vorwärmung der Tür) auf diese Einschätzung hätte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass trotz etwas geringerer Bild- und thermischer Auflösung die Wärmebildkamera des Modells „Feuerwehr“ (50 anstatt 30 mK) mit ihrer fixen Temperaturskala eine Temperaturänderung an der Türoberfläche etwas früher sichtbar macht als das Modell „Labor“, welches das Gesamtbild zu sehr mit ihrer automatischen Temperaturskala beeinflusst. Sind die zu erwartenden Temperaturen sowie die zu messende Oberfläche (Stichwort: Emissionsgrad- bzw. -koeffizient) allerdings im Vorhinein bekannt, so ließe sich durch entsprechende Vorkalibrierungen die Anzeige hinsichtlich des Anwendungsfalles deutlich verbessern. Die klarsten Bilder wurden jeweils etwa 10 Minuten nach Zündung aufgezeichnet, bei einer Oberflächentemperatur der Tür-Außenseite von etwa 50 °C, was einer Erwärmung von 20-30 Kelvin entspricht. Das Modell „Labor“ zeigt ab diesem Zeitpunkt besonders feinere Strukturen (z. B. die Thermolemente an der Tür) deutlicher als das Modell „Feuerwehr“, das im Niedertemperaturbereich unter 250 °C nur eine sehr zurückhaltende Farbgebung und Konturierung aufweist. Hier ist allerdings auch zu erwähnen, dass ein Hauptaugenmerk des Modells „Feuerwehr“ eben auf der Detektion von Heißzonen über 250 °C wie beispielsweise Glutnestern / Brandherden liegt.

5. Zusammenfassung

Wärmebildkameras sind zur Detektion erhöhter Oberflächentemperaturen von Wohnungstüren geeignet.

Prinzipiell ist es mit bei den Feuerwehren gebräuchlichen Wärmebildkameras möglich, auch nur leicht erwärmte Türen zu erkennen, jedoch bieten mitunter metallische Oberflächen (in direktem Wärmeaustausch zum Brandraum) oder undichte Spalte an der Türumrandung schnellere Indizien für ein Brandereignis hinter der Tür.

Mögliche störende Quereinflüsse von unterschiedlichen Hintergrundbeleuchtungen wurden untersucht und es konnte gezeigt werden, dass keine Einschränkung daraus für den Einsatz der WBKs hervorgehen, wenn die direkte Reflexion des störenden Lichts zur Wärmebildkamera vermieden wird.

Jedoch stellt nach wie vor die Handhabung der Wärmebildkamera, d. h. die korrekte Ausrichtung und die angemessene Beurteilung der vermeintlichen „Messergebnisse“, die größte Herausforderung dar, die eine entsprechende Schulung über die Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen dieses vielseitigen Einsatzmittels erforderlich macht.

6. Literaturverzeichnis

- /1/ Menzel, C. et al.: Untersuchungen zum Handrückentest. Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung, **2017**, Ausgabe Heft 1 Januar, Seite 5-9
- /2/ Menzel, C.: Experimentelle Untersuchung des zeitlichen Temperaturverlaufes und Wärmedurchgangs von Türen bei einseitiger Temperaturbeaufschlagung, konkret bei Bränden in geschlossenen Räumen. *Bachelorarbeit Studiengang Sicherheit und Gefahrenabwehr Magdeburg*, Sept. 2016.
- /3/ Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Springer Vieweg Verlag, **2014**, S. 1414
- /4/ <https://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotspektroskopie>
- /5/ P. Sincaglia und J. Barnett: „Development of a Glass Window Fracture Model for Zone-Type Computer Fire Codes“, *Journal of Fire Protection*, pp. 101-118, **1997**
- /6/ VDI Wärmeatlas, 7. erweiterte Auflage, VDI Verlag **1994**
- /7/ https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_en.png
- /8/ A. Petzold, H. Marusch und B. Schramm: Der Baustoff Glas, Schorndorf: Karl Hoffmann, 1990
- /9/ <https://de.wikipedia.org/wiki/Leslie-W%C3%BCrfel#/media/Datei:LesliesCube.png>
- /10/ M. Pulm: Wärmebildkameras im Feuerwehreinsatz. Rotes Heft / Ausbildung Kompakt 202. Kohlhammer Verlag.2. Auflage **2008**

Hinweis

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

<http://www.ffb.kit.edu>

und des

Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge

<http://www.idf.sachsen-anhalt.de/start-idf/>

eingesehen werden.