

Untersuchungen des IR-Strahlungsverhaltens neuartiger textiler Flächen

H. Frank, Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik
holger.frank@uni-rostock.de

H. Ewald, Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik
hartmut.ewald@uni-rostock.de

Zusammenfassung

In vielen Bereichen werden Wärmebildkameras zur bildgebenden Sensorik für die Bewertung des Betriebszustandes von Geräten und Anlagen verwendet. Es wird dabei die vom Untersuchungsobjekt ausgehende Infrarotstrahlung (IR) bzw. Wärmestrahlung zur Bildgebung genutzt. Bei einem ausreichenden Temperaturunterschied zum Umfeld sind dann auch ganze Strukturen abbildbar. Mit Hilfe speziell konzipierter Gewebe soll diese thermische Bildgebung (Thermovisions-Sensorik) von Objekten unterdrückt werden. Dazu sind Untersuchungen zum Reflexions- und Transmissionsverhalten im Bereich der infraroten Strahlung an den Geweben durchgeführt worden. Unter dem Begriff **metallpigmentierte Membran** wird eine neuartige Folie bzw. gewebte Fläche verstanden, die mittels einer eingebrachten Metallmischung zum einen im IR-Bereich transmissionsdämpfende Eigenschaften erhalten soll und zum anderen den textilen Charakter des Gewebes beibehält.

Einleitung

Industrielle Planen und Gewebe dienen zum einen als temporärer Wetterschutz und zum anderen werden sie zum Abdecken von Anlagen und Geräten benutzt. Sie verfügen z.B. über Eigenschaften wie wasserabweisend, dampfdurchlässig und wärmeisolierend. Sie sollen leicht und möglichst falt- oder einrollbar sein. Darüber hinaus sollen durch neu entwickelte *Membranen*, textile Flächen hergestellt werden, mit denen Geräte und Anlagen durch die Thermovision-Sensorik nicht mehr detektiert werden können.

Der innovative Ansatz besteht darin, dass kleinste Beschichtungspartikel aus Aluminium, Silizium und Zinn auf eine perforierte Folie aufgetragen werden, wodurch die ‚optischen Eigenschaften‘ im Infrarotbereich (IR-Bereich), wie die Reflexion, die Absorption und die Streuung verändert werden. Für die Optimierung der Gewebe musste ein geeignetes Messsystem entwickelt werden, mit dem das Strahlungsverhalten dieser pigmentierten Folie im IR-Bereich charakterisiert werden konnte.

In Abbildung 1 sind die beispielhaft berechneten Emissionsspektren von Körpern unterschiedlicher Temperatur (z.B. Lebewesen bei 37°C , Maschine bei 100°C und 45W Halogen Glühlampe nach [1] bei $T=2600^{\circ}\text{C}$, Schwarzer Körper) dargestellt. Die Strahlungsleistung wird nach [2] mit dem Planckschen Strahlungsgesetz (1) berechnet. Die Strahlungsmaxima verschieben sich nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz mit steigender Temperatur in den kurzwelligeren Bereich. Gleichzeitig nimmt gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die Strahlungsleistung mit der vierten Potenz der absoluten Strahlungstemperatur zu. Es ist die Strahlungsleistung die vom Flächenelement dA der Strahleroberfläche im Wellenlängenbereich zwischen λ und $\lambda+d\lambda$ hemisphärisch abgestrahlt wird.

Wärmebildkameras detektieren über große Entfernungen die Strahlungsleistung von Körpern mit unterschiedlicher Temperatur. Die Atmosphäre zwischen Objekt und Sensor wirkt dabei wie ein Filter. Dunst und Nebel haben einen wesentlichen Anteil auf die Dämpfung der Strahlungsleistung (siehe IR-Absorptionsspektrum H_2O Abbildung 1, gestrichelte Linie).

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \right] \quad (1)$$

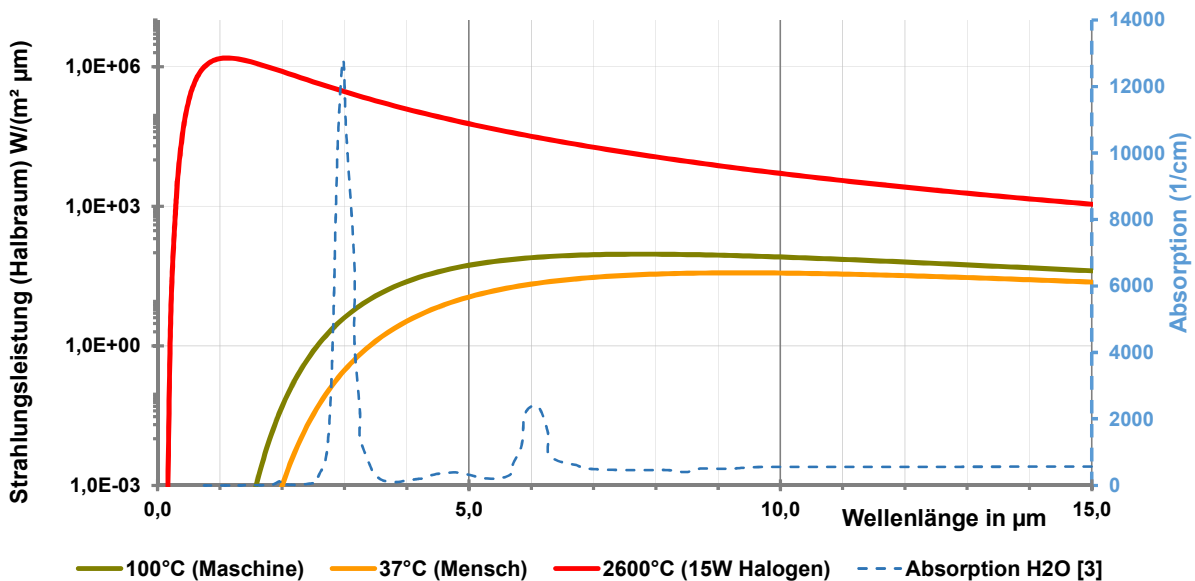


Abbildung 1: Spektrale spezifische Ausstrahlung eines thermischen bzw. Planckschen Strahlers mit unterschiedlichen Temperaturen

Transmissions- und Reflexionsuntersuchungen im IR-Bereich

Die Thermovisionssysteme geben die örtlichen Verteilungen (zweidimensional) der Strahlungsleistung im mittleren IR-Bereich wieder. Das heißt, es kann die empfangene Strahlungsleistung im IR-Sensor bei gegebenen Emissionsgrad der Objekte in eine äquivalente (Oberflächen-) Temperatur umgerechnet werden. Als thermische Detektoren kommen z.B. sogenannte Bolometer zum Einsatz. Bolometer absorbieren die gesamte Wärmestrahlung und verändern nach [4] ihre Leitfähigkeit des Sensorelementes. Der elektrische Widerstand des bestrahlten Elements ist proportional zur Temperaturänderung durch die thermische Strahlung. Für die Bildgebung werden die elektrischen Signale mehrere Elemente zu einem Array mit $n \times m$ Pixeln (Mikrobolometer) erfasst. Es wirkt dabei die gesamte spektrale Strahlungsintensität eines Objektes auf das Bolometer-Array. Andere Funktionsprinzipien für Thermovisionssysteme nutzen die IR-Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich (1-5µm, 3-5 µm oder 7-13 µm) zur Signalgebung. Hier kommen für die Wandlung der wellenlängenabhängigen Strahlungsleistung gekühlte oder ungekühlte Halbleiterelemente zum Einsatz (z.B. InSb [5]). Die Grenzen des optischen Spektrums werden vorrangig durch die verwendete Kameraoptik (Objektiv, Linsenmaterial) und den Detektoren (Halbleitermaterialien) bestimmt. Das Sensorsignal entspricht der Strahlungsleistung in einem gegebenen Wellenlängenbereich (Integral über einen Spektralbereich $\Delta\lambda$). Es war für unsere Untersuchungen nicht notwendig, die Remission der Membranen spektral aufgelöst zu erfassen.

In Abbildung 2 ist das aus zwei Ulbrichtkugeln bestehende Messsystem zur Bestimmung des IR-Strahlungsverhaltens von Geweben schematisch dargestellt. Als Wärmebildkamera kommt das Gerät SC620, Firma FLIR®, zum Einsatz, die den spektralen Wellenlängenbereich $\lambda=7,5\mu\text{m} - 13\mu\text{m}$ zur Bildgebung nutzt [5]. Mit den Ulbrichtkugeln A und B (LBS-4P-GPS-040-IG der Firma Labsphere, Innendurchmesser: $10,14\text{cm}$, Anzahl Ports: 4, Infragoldbeschichtung: $0,7\mu\text{m}$ bis $20\mu\text{m}$) werden die in einer Hemisphäre eingestrahlte Streu-, Reflexions- und Transmissionsstrahlungen (Abbildung 2) räumlich intergiert. Die Strahlungsanteile stehen als Teilbetrag an den Ports zur Messung zur Verfügung. Mit diesem System aus zwei Ulbrichtkugeln sind die zu untersuchenden Gewebe bezüglich des Reflexions- und Transmissionsverhalten charakterisierbar.

Für die gesamte eingestrahlte Leistung P_0 wird folgender einfacher Ansatz gewählt (vgl. Abb. 2):

$$P_0 = P_{AB} + P_R + P_T \quad (2)$$

mit

P_0 = Strahlungsleistung Quelle am Porteingang Kugel A,

P_{AB} = absorbierte Strahlungsleistung,

P_R = reflektierte Strahlungsleistung,

P_T = transmittierte Strahlungsleistung.

Als Transmissionsstrahlung P_T wird diejenige Strahlung bezeichnet, die durch die Messprobe (hier pigmentierte Folie oder Gewebe zwischen den beiden Ulbrichtkugeln) transmittiert wird und an dem Port der Ulbrichtkugel B messbar ist. Der reflektierte Strahlungsanteil P_R wird an dem Port der Ulbrichtkugel A bestimmt, die absorbierte Strahlungsleistung P_{AB} im Gewebe hat eine Probenerwärmung zur Folge. Sie wird als ‚Eigenstrahlung‘ in beide Ulbrichtkugeln abgestrahlt. Als IR-Strahlungsquelle wird eine modifizierte 50W-Halogenlampe verwendet. Die abgegebene Strahlungsleistung in den Porteingang wird als P_0 bezeichnet, (2).

Unter vereinfachter Annahme (keine Wärmekonvektion an der eingespannten Probe gilt):

$$\text{Port A: } P_{AB}/2 + P_R \quad , \quad \text{Port B: } P_{AB}/2 + P_T \quad .$$

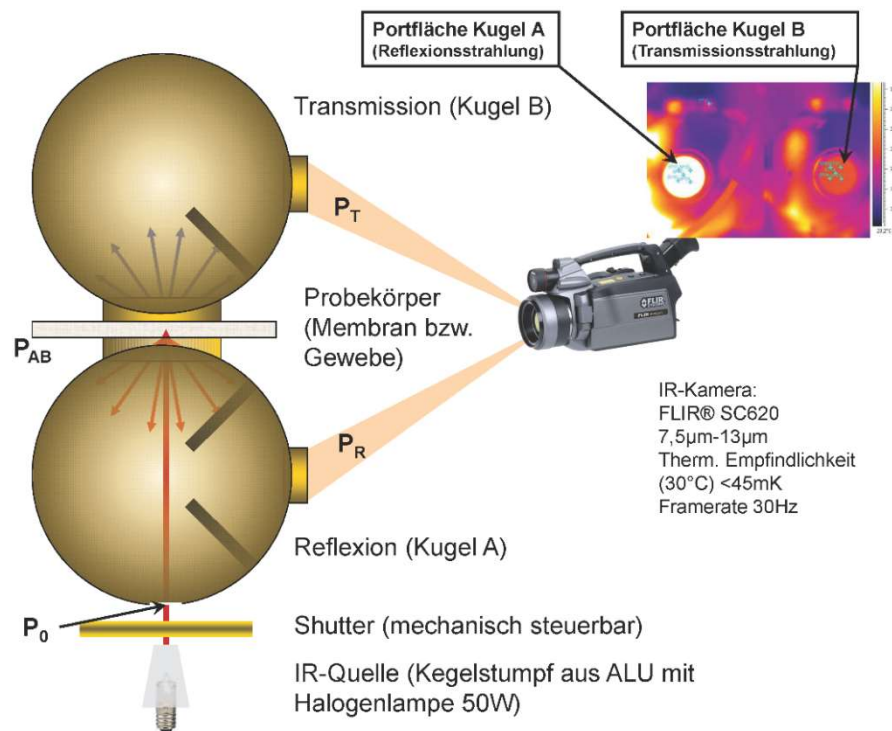


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Strahlungsverhaltens pigmentierter Gewebe

Da ein absorbierender VIS-Anteil die Messprobe zusätzlich erwärmen würde, wurde die 50W-Halogenleuchte in einen Aluminiumkörper eingepasst. Der Aluminiumkörper ist ein Kegelstumpf mit der Stumpffläche A_s . Die Kegelstumpffläche wurde zusätzlich mit Kerzenruß eingeschwärzt, um so den Emissionsgrad zu erhöhen. Zur Bestimmung der einzelnen Strahlungsleistungen wird mit Hilfe der Wärmebildkamera die Strahlungstemperatur an den Portausgängen der Ulbrichtkugeln bestimmt. Die Strahlungsleistung wird mit (3) nach [2] berechnet. Dabei ist P die optische Leistung, ε der Emissionsgrad, σ die Boltzmann-Konstante und die Temperatur T ergibt sich aus den gemessenen Temperaturen $\vartheta + 273K$. Der Emissionsgrad der Gewebe wird mit $\varepsilon=0,88$ angenommen. Dieser Wert wurde wiederum zur Strahlungstemperaturbestimmung T mit der IR-Kamera festgelegt. Die Strahlungsfläche A ist gleich der Fläche der Porteingänge der Ulbrichtkugeln und auch gleich der Fläche der Strahlungsquelle A_s .

$$P = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (3)$$

Das zu untersuchende Gewebe befindet sich zwischen den beiden Ulbrichtkugeln. Um für die Charakterisierung der Gewebe gleiche Bedingungen zu erreichen und die Dunkelintensität (Offsetstrahlung wie Eigenwärme durch die Umgebungstemperatur) zeitnah messen zu können, wird der Wärmestrahlungsweg der Quelle durch ein IR-Target (Shutter) mechanisch unterbrochen. So kann der Eingangsport der Ulbrichtkugel schlagartig verdeckt und geöffnet werden (zyklisches Schalten). Die Thermovisionskamera misst an den beiden Ports der Ulbrichtkugeln den reflektierten (Kugel A) und den transmittierten Anteil (Kugel B) der Gewebe, (siehe Wärmebild in Abbildung 2). Mit dem Aufbau können sowohl stationäre als auch dynamische Untersuchungen vorgenommen werden.

Zunächst wird das ‚Dunkelrauschen‘ bestimmt, das heißt, bei geschlossenem Shutter (vgl. Abbildung 2) wird die Strahlungsleistung P_{DARK} der beiden Kugeln ermittelt (Umgebungstemperatur). Anschließend wird die Referenz- Strahlungsleistungen der Quelle P_0 gemessen. Die Referenzstrahlung P_{0B} in der Ulbrichtkugel B (Transmission) ist die gemessene Leistung ohne Probekörper. Zur Bestimmung von P_{0A} in der Kugel A (Reflexion) wurde als Probekörper ein Goldtarget eingesetzt. Nach (4.1) und (4.2) kann aus allen Messergebnissen die Transmissions- und Reflexionsgrade berechnet werden.

$$Transmission = \frac{P_{Kugel\ B} - P_{DARK\ B}}{P_{0B} - P_{DARK\ B}} 100\% \quad (4.1)$$

$$Reflexion = \frac{P_{Kugel\ A} - P_{DARK\ A}}{P_{0A} - P_{DARK\ A}} 100\% \quad (4.2)$$

Untersucht wurde ein Gewebe mit einer pigmentierten Folie (sogenanntes Reflektor-Shield) und zum Vergleich ein Standardgewebe mit einer GORE-TEX®-Membran. Die Diagramme in Abbildung 3 und 4 zeigen beispielhaft das Strahlungsverhalten der untersuchten Textilien. Die gekennzeichnete Fläche entspricht dem Intervall der Shutteröffnungszeit. Es ergibt sich für beide Gewebe ein nahezu identisches Reflexionsvermögen von ca. 85 %.

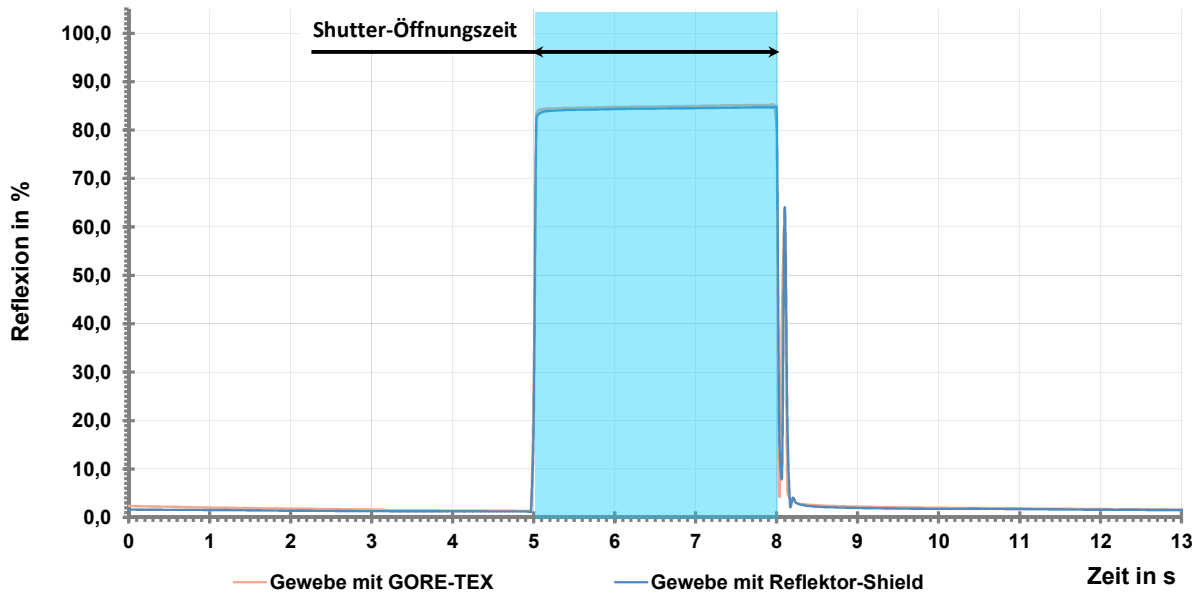


Abbildung 3: Vergleich des Reflexionsvermögen ($\lambda=7,5$ bis $13\mu\text{m}$) von Geweben

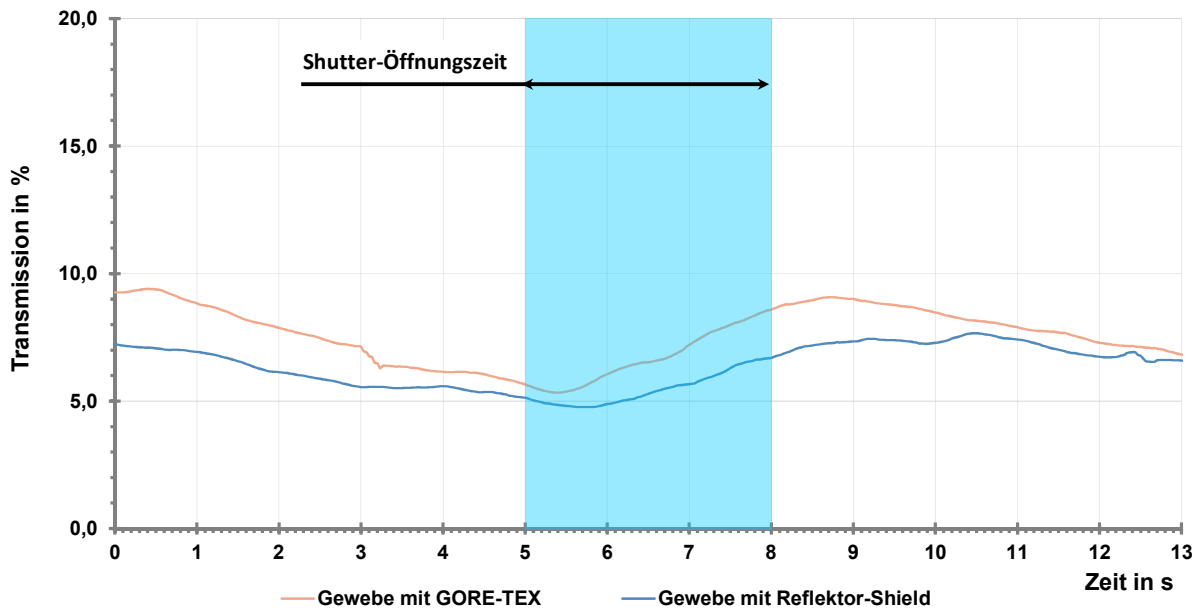


Abbildung 4: Vergleich des Transmissionsvermögen ($\lambda=7,5$ bis $13\mu\text{m}$) von Geweben

In Transmissionsrichtung (Abbildung 4) hingegen, zeigt das Gewebe mit einem *Reflektor-Shield* einen geringeren transmittierten Strahlungsanteil P_T als ein Standardgewebe mit GORE-TEX®-Membran. Durch die nachgewiesenen gleichen Reflexionseigenschaften der beiden Materialien, ist im Gewebe mit einer pigmentierten Folie mehr IR-Strahlung absorbiert worden (P_{AB}). Der Anstieg der Transmissionen (vgl. Abbildung 4) nach Shutteröffnung resultiert aus der Eigenerwärmung der Gewebe durch die Absorption der IR-Strahlung (P_{AB}). Bei der Bewertung der Messergebnisse bzw. der Bestimmung der einzelnen Strahlungsanteile muss aber auch die größere Schichtdicke des Gewebes mit *Reflektor-Shield* berücksichtigt werden. Die zusätzliche Schichtdicke hat eine zeitliche Verzögerung der Wärmeaufnahme- und -abgabe der absorbierten Strahlung durch die größere thermische Zeitkonstante zur Folge. Wird die Öffnungszeit des Shutters weiter heraufgesetzt, erhöht sich die absorbierte Strahlungsleistung P_{AB} sosehr, dass das Gewebe immer stärker erwärmt wird. Die Gewebeflächen werden dann durch die Standard-Thermovision wieder detektierbar und Strahlungsquellen wären weiterhin sichtbar.

Analyse der Strahlungswärme an hinterlüfteten Membranen

Die Gewebe mit einem *Reflektor-Shield* dämpfen die IR-Strahlung stärker als andere, was vorrangig durch die Absorption der Strahlung erreicht wird. Das Gewebe muss die absorbierte Strahlungsenergie P_{AB} durch einen Wärmetransport (Wärmeleitung und Konvektion in die Umgebung) oder durch Selbststrahlung wieder abgeben. Das Gewebe ist dann selbst Strahler und kann mit jeder bildgebenden IR-Sensorik, detektiert werden.

Um die im Gewebe absorbierte Energie/Wärme (P_{AB}) abzuleiten wird eine belüftete Membran eingesetzt. Die pigmentierte Folie wird dazu zusätzlich auf der Rückseite mit einem Stützgewirk versehen. Durch das Stützgewebe kann eine Hinterlüftung realisiert werden, um somit die Wärme durch die Absorptionsenergie des Gewebes über die Luft auf der Rückseite abzuführen.

Für diese Untersuchung des Strahlungsverhaltens mit hinterlüfteten Membranen kam der gleiche Versuchsaufbau aus Abbildung 2 zum Einsatz. Die Ulbrichtkugel A integriert räumlich die Wärmestrahlung der Quelle P_0 und die Kugel B integriert räumlich die Strahlung, die das Gewebe in die Beobachtungsrichtung abstrahlen würde. Auf beide Portausgänge der Kugeln ist die IR-Kamera gerichtet, die die Wärmestrahlung misst und in Abbildung 5 in einem Zeitdiagramm ausgewertet wurde. Zwischen den Kugeln ist das zu messende Gewebe mit Hinterlüftung (*Reflektor-Shield* und einem zusätzlichem Stützgewebe) eingefügt. Das Stützgewebe wurde über eine Art Schlauchsystem an eine Zwangsbelüftung mit Umgebungsluft zwecks Wärmeabfuhr angeschaltet.

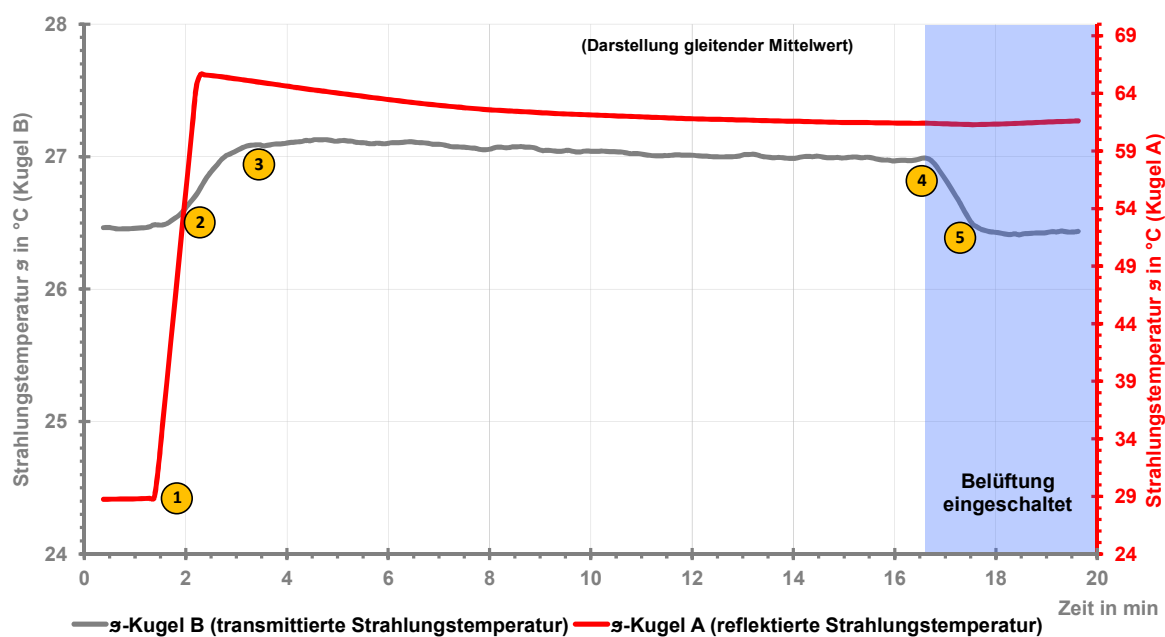


Abbildung 5: Dynamisches Strahlungsverhalten eines *Reflektor-Shield-Gewebes* mit Stützgewirk zur zusätzlichen Zwangsbelüftung

In der Abbildung 5 ist der resultierende Effekt durch die Belüftung der pigmentierten Folie gezeigt. Es sind die mit der Thermovisionskamera aufgenommenen Strahlungstemperaturen dargestellt ($\varepsilon = 0,88$). Die graue Kurve (Skala links) zeigt die Strahlungstemperatur der Kugel B, die die Transmissionsstrahlung P_T der pigmentierten Folie wiederspiegelt (Framerate $12/min$). Die rote Kurve im Diagramm (Skala rechts) zeigt die gemessene Strahlungstemperatur der Kugel A, die die reflektierte Quellentemperatur P_R ausdrückt. Zunächst wird die Quelle durch den Shutter abgedeckt und der Punkt 1 kennzeichnet den Shutteröffnungszeitpunkt. Nach dem Freigeben der Quellenstrahlung P_0 , erhöhen sich erwartungsgemäß die Temperaturen (rote Kurve $\hat{=} P_R$ und graue Kurve $\hat{=} P_T$). Ein Teil der Strahlung der nicht reflektiert oder transmittiert wird, erwärmt die Membran durch die absorbierte Strahlung P_{AB} . Die Membran wird selbst zum Strahler und die abgegebene Strahlungstemperatur in Transmissionsrichtung erhöht sich ebenfalls (Punkt2). Die Temperatur ist deutlich höher als zu Beginn

mit geschlossenem Shutter. Sie wird aber ab (Punkt 3) durch die Umgebungstemperatur (Konvektion) begrenzt. Nach dem Einschalten des Lüfters (Punkt 4) sinkt die Strahlungstemperatur auf der Transmissionsseite so weit, als wäre die Strahlungsquelle nicht vorhanden (Punkt 5). Die pigmentierten Membranen mit Hinterlüftung ‚dämpfen‘ die Wärmestrahlung eines Objektes soweit bzw. passen an der Frontseite des Gewebes die Oberflächentemperatur der Umgebungstemperatur an, so dass eine Detektion von Anlagen und Objekten durch Standard-Thermovision-Sensorik schwer behindert wird.

Status und Ausblick

Bei allen Untersuchungen bezüglich der Zusammensetzung der metallischen und anderer anorganischen Pigmenten, Flächenkonstruktionen als Folie, Gestrick, Gewebe und die Ausstattung der Membran mit einem zusätzlichen Stützgewirke, hat sich gezeigt, dass die effektivste Wirkung, IR-Strahlung zu ‚dämpfen‘, durch ein Gewebe mit *Reflektor-Shield* und einer *zusätzlichen* Hinterlüftung mittels Stützgewebe erreicht wird. Durch die Hinterlüftung wird die Wärme durch die absorbierte IR-Strahlungsleistung sicher abgeführt.

Bei weiteren Untersuchungen zu den Transmissions- und Reflexionsmessungen, müsste durch entsprechenden Anordnungen die Konstanz der Intensität der Quelle P_0 mitüberwacht werden. Wird eine stabilere Standard IR-Quelle verwendet, muss zumeist ein VIS-Anteil (rot glühend) toleriert werden oder einzelne Strahlungsanteile messtechnisch bestimmt werden, (vgl. Formel (1)). Ein spektraler Anteil des sichtbaren Lichtes hat zufolge, dass die Bestimmung der Strahlungsanteile stark verfälscht wird. Diese Wellenlängen werden im Referenzwärmebild der IR-Thermovisionskamera nicht erfasst. Der sichtbare spektrale Anteil wird aber von den Geweben ebenfalls teilweise absorbiert und so dass sich deren Temperatur dadurch erhöht. Der Einsatz von speziellen optischen IR-Filtern könnte diese Fehlerquelle weiterhin minimieren. Eine zeitaufwendigere Messmethode wäre der Einsatz von IR-Spektrometern, um so die Strahlungsanteile auch spektral aufgelöst zu messen.

Literatur

- [1] Lichtquellen, <http://www.cwaller.de/deutsch.htm?lichtquellen.htm~information>
- [2] Hecht, Eugen: *Optik*, 3. Vollständig überarbeitete Auflage, Oldenbourg Verlag München Wien, 2001
- [3] G.M. Haleand, M.R. Query, Optical constants of water in the 200-nm to 200- μm wavelength region, *Appl. Opt.* 12, 555-563 (1973)
- [4] Israel, Helmut: Messen und Orten mit Infrarot, Optische und elektronische Grundlagen-Applikationen, Franzis Verlags GmbH München, 1988
- [5] FLIR® Systems, Inc. 27700 SW Parkway Avenue Wilsonville, OR 97070 USA, Website: <http://www.flir.com>