

Thermografische Schichtdickenbestimmung von Oberflächenschutzsystemen für Beton

Simon J. ALTENBURG¹, Mario CHIEN², Florian BAVENDIEK²,
Rainer KRANKENHAGEN¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

² IBOS Institut für Betontechnologie und Oberflächenschutz GmbH, Bochum

Kontakt E-Mail: simon.altenburg@bam.de

Kurzfassung. Im Bauwesen werden Polymerbeschichtungen auf Beton häufig eingesetzt um zum einen ein bestimmtes Aussehen zu schaffen und zum anderen das Bauteil vor Alterung, Verschleiß und Schädigung zu schützen. Für praktisch alle Ziele ist die Wirkung von der eigens dafür definierten Schichtdicke der Polymerbeschichtung abhängig. Daher wird die Dicke der Beschichtung nach erfolgtem Schichtauftrag überprüft. Für den in diesem Zusammenhang anspruchsvollen mineralischen Untergrund Beton stehen bislang allerdings nur zerstörende Prüfverfahren zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes IRKUTSK ein auf aktiver Thermografie basierendes Verfahren sowie ein Gerät für den vor-Ort-Einsatz entwickelt, mit dessen Hilfe eine zerstörungsfreie Schichtdickenbestimmung möglich ist.

Hier wird ein kurzer Einblick in das zur Schichtdickenbestimmung entwickelte Thermografieverfahren gegeben. Die Besonderheiten bei der quantitativen Auswertung, die durch die Teiltransparenz der Polymerbeschichtungen auftreten, werden erläutert. Die Funktion des Verfahrens für einlagige Systeme wird anhand von Labormessungen illustriert.

1. Einführung

Polymerbasierte Oberflächenschutzsysteme (OSS) werden häufig im Bauwesen eingesetzt, um die Beständigkeit von Beton gegenüber Carbonatisierung, chemischen Angriffen und auch mechanischer Beanspruchung zu erhöhen. Um den gewünschten Schutz zu gewährleisten muss sichergestellt werden, dass die Vorgaben für die Beschichtungsdicken am Bauwerk eingehalten sind. Diese sind durch die Hersteller und auch in Normen und Richtlinien definiert [1, 2]. Hierfür müssen die Schichtdicken nach erfolgtem Auftrag in-situ überprüft werden. Bisher sind allerdings nur zerstörende Prüfverfahren verfügbar. Da diese vorhandenen zerstörenden Prüfverfahren eine anschließende Reparatur der Beschichtung erfordern, wird nur ein Minimum an Messstellen verwendet. Die Verfügbarkeit eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens könnte neben der Kosteneinsparung auch eine Erhöhung der Bauwerkssicherheit mit sich bringen, da eine Erhöhung der Messpunktdichte zur Schichtdickenüberprüfung ohne zusätzlichen Reparaturaufwand möglich ist.

Eine häufig angewendete zerstörungsfreie Messtechnik zur Schichtdickenbestimmung ist die Messung mit Hilfe von Ultraschallverfahren [3]. Im Fall der OSS für Beton ergibt sich diesbezüglich die Schwierigkeit, dass die häufig in das OSS eingebrachten Sandeinstreuungen zu einer Vielfachreflexionen an den irregulären Grenzflächen erzeugen, zum anderen zu einer sehr rauen Oberfläche führen, was übliche Methoden der Schallkopplung erschwert.



Eine andere, vielversprechende Messmethode ist die Verwendung von lauffzeitbasierten THz-Methoden [4]. Allerdings sind Messmethoden für den vorliegenden Anwendungsfall noch nicht entwickelt und das nötige Equipment ist hochpreisig, was der gewünschten Kostensparung entgegen spricht.

Hier stellen wir ein auf aktiver Thermografie basierendes Verfahren zur Bestimmung der Schichtdicken von OSS für Beton vor. Die Thermografie hat sich im Bauwesen bereits bewährt und die kürzlich erfolgten Entwicklungen im Bereich derameratechnik haben zu einer erheblichen Kostenreduktion bei Infrarotkameras geführt. In Kombination mit preisgünstigen Halogenlampen als Anregungsquelle ergibt sich somit die Möglichkeit der Realisierung eines kostengünstigen Gesamtmesssystems.

Für die Schichtdickenbestimmung mit Hilfe der Lock-in Thermografie gibt es bereits eine Norm [5]. Allerdings würden sich für die hier betrachteten OSS aufgrund der niedrigen thermischen Diffusivitäten und der Dicke von bis zu 6 mm der Materialien für die Lock-in Thermografie sehr lange Messzeiten ergeben. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der thermischen Eindringtiefe müssten in der Lock-in Thermografie für die Untersuchung von Mehrschichtsystemen mehrere verschiedene Anregungsfrequenzen verwendet werden, was die Messzeit weiter erhöhen würde. Daher verwenden wir hier die Impulsthermografie. Hierbei wird das gesamte Frequenzspektrum, und damit der gesamte Tiefenbereich der Probe, in einem einzelnen Messzyklus erfasst, wodurch die Messzeit deutlich reduziert wird.

Für die Impulsthermografie existieren bereits verschiedene Analysemethoden, welche für die Schichtdickenbestimmung auf einem semiunendlichen Substrat angepasst werden könnten [6, 7, 8]. Allerdings könnte sich eine Adaption für Mehrschichtsysteme als schwierig erweisen. Zudem stellen die endliche Pulsdauer der Anregung, die bei der hohen Messdauer nicht zu vernachlässigenden thermischen Verluste und die (wie sich zeigte, vorhandene) Teiltransparenz der OSS weitere Komplikationen dar [8]. Daher wählten wir den Ansatz, die Temperaturentwicklung im Probekörper mit Hilfe eines eindimensionalen analytischen Modells zu berechnen, um die Schichtdicken nach vorheriger Kalibrierung durch einen Fit an die Messdaten zu bestimmen. Da die experimentelle Verifikation an OSS eines entwickelten Mehrlagenmodells noch aussteht [9], beschränken wir die Diskussion hier auf Einlagensysteme auf Beton. Wir erläutern kurz das verwendete analytische Modell sowie das Auswerteverfahren und präsentieren Ergebnisse für einlagige Beschichtungen auf Beton.

2. Das analytische Modell

Hier fassen wir kurz das analytische Modell zusammen, das zur Berechnung des Temperaturverlaufes für den Fit verwendet wird. Es basiert auf der Arbeit von Salazar und Kollegen [10], welches den Oberflächentemperaturverlauf von einlagigen, isolierten, optisch angeregten, teiltransparenten Körpern unter Berücksichtigung von thermischen Verlusten beschreibt. Das verwendete Modell wird genauer in einer unserer früheren Veröffentlichungen beschrieben [9]. Es basiert auf der Lösung der Wärmediffusionsgleichung im Laplace-Raum, wobei der zeitliche Oberflächentemperaturverlauf durch numerische Rücktransformation erhalten wird. Die in das Modell einfließenden Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Der zeitliche Verlauf des einfallenden Lichtpulses wird von dem Modell berücksichtigt und wird durch seine Laplace-Transformierte definiert. Für die hier vorgestellte Arbeit wurde der zeitliche Verlauf der Ausgangsintensität der verwendeten Halogenlampe in Abhängigkeit von der Pulslänge mit Hilfe einer Fotodiode vermessen und eine geeignete, Laplace-transformierbare analytische Funktion wurde angefügt und für das Modell verwendet (nicht gezeigt). Die Gesamtenergiedichte des Lichtpulses wird durch den Parameter Q im Modell berücksichtigt. Die oberste Lage des Systems ist als teiltransparent modelliert, wobei

Tabelle 1. Zusammenfassung der in das Modell eingehenden Parameter.

Modellparameter	Symbol	Einheit	Fit
Diffusivität der Beschichtung	D	m^2/s	Fest
Effusivität der Beschichtung	e	$\text{Ws}^{0.5}/\text{m}^2\text{K}$	Fest
Dicke der Beschichtung	l	m	Frei
Effektiver Absorptionskoeffizient der Beschichtung	α	$1/\text{m}$	Fest
Effusivität des Substrates	e_s	$\text{Ws}^{0.5}/\text{m}^2\text{K}$	Fest
Thermischer Verlustparameter	h	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	Frei
Heizenergiedichte	Q	J/m^2	Frei

das Licht gemäß dem Lambert-Beer'schen Gesetz mit dem effektiven Absorptionskoeffizienten α absorbiert wird. Effektiv bedeutet hier, dass die spektralabhängige Intensitätsverteilung der Lichtquelle berücksichtigt und ein mittlerer Absorptionskoeffizient gebildet wird. Licht, das die oberste Lage durchdringt, wird an der Grenzschicht zur zweiten Lage komplett absorbiert. Thermische Verluste, die sich aus Strahlungsverlusten und Verlusten durch Wärmeleitung an die umgebende Luft und Konvektion zusammensetzen, werden durch den linearen thermischen Verlustparameter h zusammengefasst und an der Oberfläche der obersten Lage berücksichtigt. Möglicher Wärmeaustausch mit der Umgebung aufgrund von lateraler Wärmeleitung bei räumlich stark variierender Anregung oder Schichtdicke kann teilweise auch vom Parameter h beschrieben werden, auch wenn dies rein phänomenologisch ist. Daher hat es sich bezüglich der Genauigkeit der Schichtdickenbestimmung als hilfreich erwiesen, h als freien Fitparameter zu verwenden.

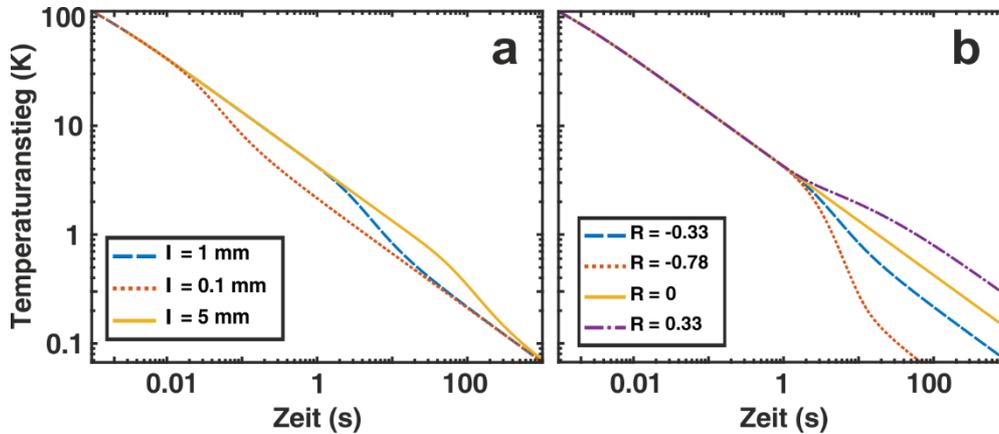


Abb. 1. Modellierter Oberflächentemperaturverläufe für eine einlagige Polymerbeschichtung auf Beton unter Vernachlässigung des zeitlichen Verlaufs der Anregung (Anregung: Dirac-Puls), thermischer Verluste und Teiltransparenz. **a:** Verschiedene Beschichtungsdicken. **b:** Beschichtungsdicke von 1 mm, verschiedene thermische Reflexionskoeffizienten.

Abb. 1 **a** zeigt den berechneten Oberflächentemperaturverlauf des Modells für eine Polymerlage auf Beton für verschiedene Dicken, wobei thermische Verluste, eine endliche Anregungspulsbreite und Teiltransparenz vernachlässigt sind (Dirac-förmige Anregung). Die Temperaturkurve ist eine gerade Linie in der doppeltlogarithmischen Darstellung, die einen Knick zeigt, dessen zeitliche Position von der Dicke der Beschichtung abhängt. Der Zeitpunkt des Knicks ist durch die thermische Diffusionszeit $t_c = l^2/D$ definiert. Die Form des Knicks hängt vom thermischen Reflexionskoeffizienten des Übergangs zwischen Polymerbeschichtung und Betongrund $R = (e - e_s)/(e + e_s)$ ab. Dies ist in Abb. 1 **b** illustriert. Für $e = e_s$ ist $R = 0$, der thermische Kontrast zwischen den Schichten verschwindet und die Schichten sind mit Hilfe der Thermografie nicht voneinander zu unterscheiden. Der Einfluss der

Teiltransparenz und der thermischen Verluste auf den Oberflächentemperaturverlauf ist in Abb. 2 a gezeigt. Eine endliche Teiltransparenz sorgt dafür, dass die Heizenergie sich auf ein endliches Volumen an der Oberfläche verteilt statt direkt an der Grenzschicht absorbiert zu werden, wodurch der Temperaturhub zu kurzen Zeiten, verglichen mit einer komplett opaken Probe, reduziert wird. Die thermischen Verluste bewirken einen zusätzlichen Energieverlust, wodurch die Oberflächentemperatur zu späten Zeiten schneller fällt, als wenn thermische Verluste vernachlässigt werden. Wenn die thermische Signatur des Schichtübergangs, d.h. der Knick in der Kurve, zu frühen oder späten Zeiten auftritt, ist daher eine Berücksichtigung der Teiltransparenz bzw. der thermischen Verluste besonders wichtig. Abb. 2 b zeigt den Einfluss einer realistischen Pulsform auf den Oberflächentemperaturverlauf, in diesem Falle eines Halogenlampenpulses mit 500 ms Dauer. Die maximale Oberflächentemperaturerhöhung ist verglichen mit dem Dirac-Puls deutlich reduziert, was für eine zerstörungsfreie Prüfung mit endlicher Maximaltemperatur des Prüfobjektes essentiell ist. Da der Temperaturverlauf auch während der Heizphase beschrieben werden kann, können auch geringe Schichtdicken untersucht werden, deren thermische Diffusionszeit t_c geringer als die Pulsdauer ist. Voraussetzung ist hierfür nur, dass das Signal-Rauschverhältnis zu dieser Zeit schon groß genug ist und dass der Ursprung der Zeitachse hinreichend genau bestimmt werden kann. Ohne weitere Synchronisation ist der Zeitsprung nur mit der Unsicherheit der Zeit zwischen 2 Frames der Infrarotkamera bestimmt (50 ms bei einer Aufnahmezeit von 20 Hz), was in der doppeltlogarithmischen Darstellung einen durchaus sichtbaren Einfluss haben kann.

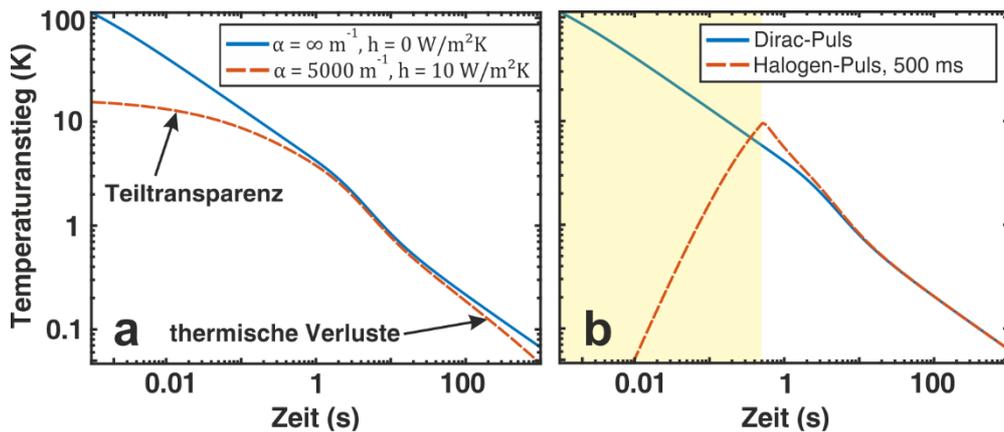


Abb. 2. Modellierte Oberflächentemperaturverläufe für eine einlagige Polymerbeschichtung auf Beton. **a:** Einfluss der Teiltransparenz und der thermischen Verluste. **b:** Einfluss der endlichen Pulsbreite für Anregung mit einer Halogenlampe mit 500 ms Pulsdauer (gelb hinterlegt).

3. Vorgehen, experimentelle Methoden und Auswertung

In diesem Abschnitt beschreiben wir die für die Schichtdickenbestimmung verwendeten Probekörper, den experimentellen Aufbau und die Referenzdickenbestimmung sowie die Datenaufbereitung und die verwendeten numerischen Methoden.

3.1. Probekörper

Zur Verfahrensvalidierung für Einsichts-systeme wurden drei Probekörper mit einer Lage des Materials StoPox TEP MultiTop auf Beton verwendet. Die Kurzbezeichnungen der Probekörper sind R1, R2 und R3. Die Betonkörper haben die Maße von $30 \times 30 \times 6 \text{ cm}^3$ und wurden vor dem Beschichtungsauftrag etwa mittig zerbrochen und anschließend mit einem Epoxidharzklebstoff wieder zusammengeklebt, um für ein hier nicht betrachtetes Experiment

den Einfluss eines Risses auf das Verfahren zu untersuchen. Für die hier betrachteten Untersuchungen wurden die Regionen in der Nähe des Risses ausgespart. Die erzielten Schichtdicken lagen zwischen 0,7 mm und 2,6 mm. Zum späteren Abgleich der Orte der Referenzdickenmessungen wurden zwei Markierungen aus Aluminiumklebefolie in definiertem Abstand auf den Probenoberflächen angebracht.

3.2. Experimenteller Aufbau

Als Wärmequelle für die thermografischen Experimente wurde eine Halogenlampe mit 1000 W elektrischer Eingangsleistung verwendet. Die Lampe ist mit zwei Sammellinsen ausgestattet und hat einen verstellbaren Fokus. Die Linsen aus Borosilikatglas dienen gleichzeitig als Infrarotfilter, um unerwünschtes Heizen durch das Nachglühen der Halogenlampe und die Aufheizung des Innenraums des Lampengehäuses zu verhindern. Die Dauer des Heizpulses wurde auf 10 s gesetzt. Die verwendete Infrarotkamera ist im Spektralbereich von 8 μm bis 9,4 μm empfindlich (gekühlter HgCdTe-Detektor, Modell: Infratec ImageIR 8800, NETD: < 60 mK, Auflösung bis 640 \times 512 Pixel, Integrationszeit: 140 μs). Sie wurde mit einer Aufnahme­frequenz von 20 Hz im Half-Frame-Modus (320 \times 256 Pixel) verwendet. Der Abstand zwischen Halogenlampe (Vorderseite der vorderen Linse) und Probenoberfläche war 40 cm und der Abstand zwischen Kamera und Probenoberfläche war 146 cm. Daraus ergibt sich eine räumliche Auflösung von 1,3 mm/Pixel. Eine Referenzprobe aus graphitbeschichtetem Kupfer (s.u.) wurde im seitlichen Bereich des Bildes der Kamera im Abstand von 48 cm von der Kamera platziert. Diese Referenzprobe wurde gewählt, da sie aufgrund einer hohen Wärmekapazität und thermischer Leitfähigkeit eine sehr konstante Oberflächentemperatur auf der Zeitskala des Experimentes (max. 600 s) aufweist. Es wurde darauf geachtet, dass die Referenzprobe während des Heizvorganges nicht erwärmt wurde. Ein Foto des gesamten experimentellen Aufbaus ist in Abb. 3 a gezeigt.

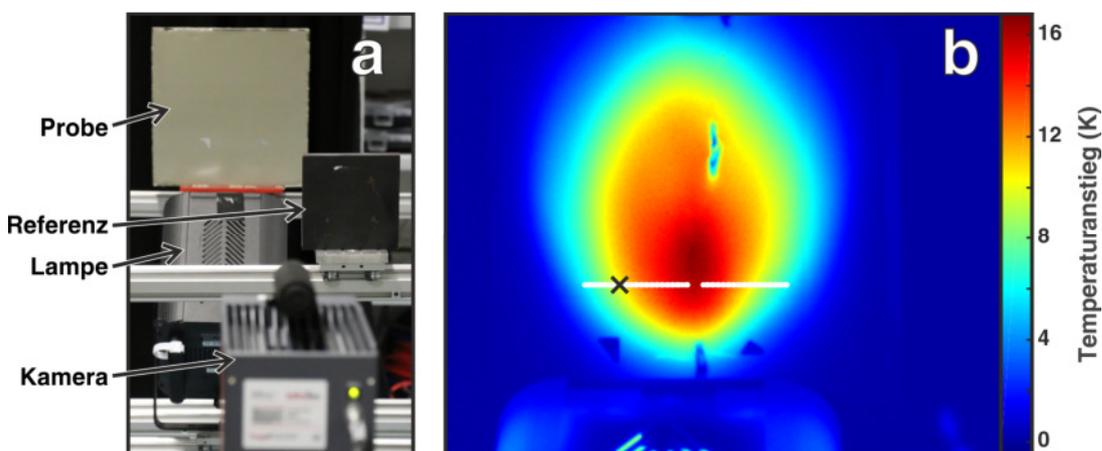


Abb. 3. a: Foto des experimentellen Aufbaus. Eine hier nicht verwendete Probe gleicher Abmessungen ist zu sehen. **b:** Thermogramm einer Messung der Probe R1 zum Zeitpunkt der maximalen Erwärmung am Ende des Heizpulses (10 s). Die weiße Linie (Länge 15,4 cm) zeigt die Positionen, an denen im Anschluss eine zerstörende Referenzmessung der Schichtdicke durchgeführt wurde. Das schwarze Kreuz markiert den Ort, an dem die Messdaten für Abb. 4 a ausgewertet wurden. Eine Signatur des hier nicht näher betrachteten Risses ist im oberen Bereich erkennbar.

3.3. Referenzdickenmessung

Als Referenz für die Schichtdickenmessung der Beschichtung auf Beton wurden die Probekörper nach erfolgter thermografischer Vermessung mit einer Diamantsäge zerteilt und die Schichtdicken alle 2 mm entlang der Schnittkante mit Hilfe von optischer Mikroskopie ermittelt. Durch die im Thermogramm sichtbaren Marker ist eine Zuordnung der Positionen

der Referenzdickenmessung möglich. Für die Dickenbestimmung wurden Messpunkte, die außerhalb des erwärmten Bereiches oder auf dem Riss liegen, nicht berücksichtigt.

3.4. Datenaufbereitung und numerische Methoden

Der Ursprung der Zeitachse der Messungen wurde als der Zeitpunkt des letzten Frames gewählt, der keine Erwärmung durch das Einschalten der Lampe aufweist. Als erster Schritt der Datenaufbereitung wurde das zeitliche Mittel der Thermogramme vor Beginn des Heizens (typischerweise 50 Bilder) vom gesamten Datensatz abgezogen um Temperaturdifferenzen zu erhalten. Dann wurde das räumliche Mittel einer Region des Datensatzes, in dem die Referenzprobe aus graphitbeschichtetem Kupfer abgebildet wurde, vom Datensatz abgezogen, um kleine Temperaturdriften der Kamera während der Messung zu kompensieren.

Mit Hilfe des oben beschriebenen analytischen Modells wurde der Oberflächentemperaturverlauf im Laplace-Raum berechnet. Für den Vergleich mit den experimentellen Daten musste dieser in den Realraum transformiert werden. Dies wurde mit einem Algorithmus, basierend auf der Euler-Methode von Abate und Whitt, durchgeführt [11].

Für den Fit wurde die mittlere quadratische Abweichung zwischen den Logarithmen der gemessenen und der errechneten Temperatur minimiert, wobei eine Gewichtung der Datenpunkte mit $1/\sqrt{t}$ (t : Zeit) angewendet wurde. Die wurzelförmige Gewichtung wurde gewählt, da die gesuchten Schichtdicken von der Wurzel der thermischen Diffusionszeit abhängen. Für die Minimierung wurde der Simplex-Algorithmus von Lagarias und Kollegen [12] verwendet.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Kalibrierung

Um Schichtdicken durch einen Fit der Ergebnisse der Modellrechnungen an experimentelle Daten bestimmen zu können, müssen der effektive Absorptionskoeffizient α und die thermischen Materialparameter e und D der Polymerschicht, sowie die Effusivität e_s des Betonsubstrates bekannt sein. α wurde in Voruntersuchungen [9, 13] an einer freistehenden Schicht bestimmt. Der ermittelte Wert für α weicht von dem in Ref. [13] ab, da die hier verwendete Lampe eine andere spektrale Intensitätsverteilung aufweist. D und e wurden durch Referenzmessungen einer Beschichtung bekannter Dicke auf einem Referenzmaterial bestimmt. e_s hingegen wurde durch Kalibrierung mit den hier verwendeten Messdaten der Probe R3 (rot in Abb. 4 b, 93 Messpunkte) bestimmt. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2. Liste der Materialparameter.

StoPox TEP MultiTop			Betonsubstrat
$\alpha(\text{m}^{-1})$	$D(10^{-7}\text{m}^2/\text{s})$	$e(\text{W}\sqrt{\text{s}}/\text{m}^2\text{K})$	$e_s(\text{W}\sqrt{\text{s}}/\text{m}^2\text{K})$
2760	1,1	800	2730

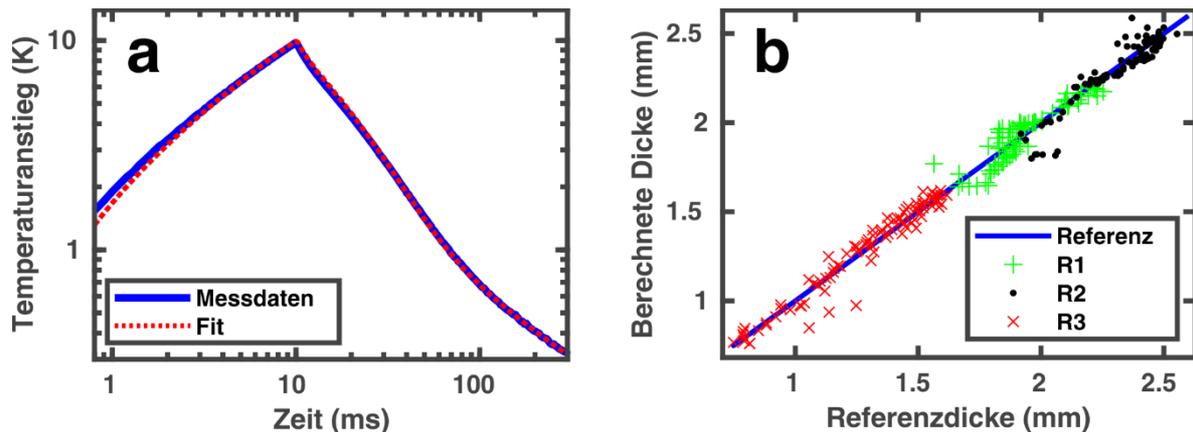


Abb. 4. a: Gemessener Zeitverlauf des Temperaturhubes (blau) und Fitergebnis (rot) für die in Abb. 3 **b** indizierte Position, gemittelt über 9 Pixel ($4 \times 4 \text{ mm}^2$). **b:** Berechnete Dicken in Abhängigkeit von der zerstörend gemessenen Referenzdicke. Jeder Datenpunkt (255 insgesamt) entspricht dem Ergebnis eines Fits wie in **a** dargestellt. Für ideale Dickenbestimmung liegen alle Werte auf der blauen Referenzlinie mit Steigung 1.

4.2. Schichtdickenbestimmung

Abb. 4 **a** zeigt den gemessenen Temperaturhub an der in Abb. 3 **b** gekennzeichneten Position auf Probe R1 (gemittelt über 9 Pixel) zusammen mit dem Fitergebnis. Das Ergebnis für die Dicke ist mit 1,91 mm dicht an der Referenzdicke von 1,92 mm. Die Abweichungen zwischen Experiment und Fit zu kurzen Zeiten sind durch die Unsicherheit der Bestimmung des Ursprunges der Zeitachse verursacht, da diese nur mit der Zeitauflösung des Experiments bestimmt wurde (50 ms bei einer Aufnahmezeit der Kamera von 20 Hz). Eine Übersicht aller bestimmten Dicken der Proben R1, R2 und R3 ist in Abb. 4 **b** gezeigt. Jeder der insgesamt 255 Datenpunkte entspricht dem Ergebnis eines Fits wie in Abb. 4 **a** dargestellt. Insgesamt ist die Übereinstimmung zwischen den bestimmten Dicken und den Referenzdicken sehr gut. Die bestimmten Werte weichen im Mittel um 2,8 % vom Referenzwert ab (mittlere absolute Abweichung) und die mittlere Abweichung ist mit unter -0,2 % sehr gering (keine systematische Über- oder Unterschätzung der Dicke).

5. Zusammenfassung

Wir haben hier ein Verfahren vorgestellt, um mit Hilfe der Impulsthermografie die Schichtdicke von einlagigen Oberflächenschutzsystemen ohne Absandung auf Beton zu bestimmen. Das Verfahren beruht darauf, dass analytisch modellierte Temperaturverläufe an thermografische Messergebnisse gefittet werden, wobei die Schichtdicke als freier Fitparameter das Ergebnis darstellt. Das Modell beschreibt eindimensionalen Wärmetransport in Tiefenrichtung und berücksichtigt sowohl die Teiltransparenz des Beschichtungsmaterials im Spektralbereich der Lampe als auch thermische Verluste in linearer Näherung. Nach vorangegangener Kalibrierung zur Bestimmung von Materialparametern des Beschichtungsmaterials und des Substrates konnten wir anhand von Messungen an drei verschiedenen Probekörpern zeigen, dass das Verfahren zur Schichtdickenbestimmung funktioniert. Als nächstes sollen die Grenzen des Verfahrens bezüglich unterschiedlicher Substrate (verschiedene Betonsorten) und dessen Tauglichkeit unter realen Bedingungen geprüft werden. Des Weiteren ist eine Erweiterung des Verfahrens für die Anwendung auf OSS mit Sandeinstreuungen geplant.

Die hier vorgestellte Arbeit ist Teil des ZIM-Projektes IRKUTSK mit dem Förderkennzeichen KF2201089AT4 und ist gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Referenzen

- [1] DIN, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität - Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton, DIN EN 1504-2, 2006.
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN e.V., DAfStb-Richtlinie-Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, 2001.
- [3] Matthies K., Thickness Measurement with Ultrasound. 1998, DVS Media GmbH: Berlin.
- [4] Feige Volker K. S., Berta M., Nix S., Ellrich F., Jonuscheit J., Beigang R., Berührungslose Mehrlagen-Schichtdickenmessung Industrieller Beschichtungen Mittels THz-Messtechnik, in tm - Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik. 2012. p. 87.
- [5] DIN, Schichtdickenmessung Und Charakterisierung Von Oberflächen Mittels Oberflächenwellen – Teil 2: Leitfaden Zur Photothermischen Schichtdickenmessung, DIN EN 15042-2, 2006.
- [6] Favro L. D., Han X., Kuo P.-K., Thomas R. L., Imaging the Early Time Behavior of Reflected Thermal Wave Pulses, Thermosense XVII, 1995: Orlando, FL, United States. p. 162-166.
- [7] Shepard S. M., Lhota J. R., Rubadeux B. A., Wang D., Ahmed T., Reconstruction and Enhancement of Active Thermographic Image Sequences, Opt. Eng. - Vol. 42, no 5, pp. 1337 - 1342, 2003.
- [8] Zeng Z., Zhou J., Tao N., Feng L., Zhang C., Absolute Peak Slope Time Based Thickness Measurement Using Pulsed Thermography, Infrared Physics & Technology. - Vol. 55, no 2–3, pp. 200-204, 2012.
- [9] Altenburg S., Krankenhagen R., Bavendiek F., Thickness Determination of Polymeric Multilayer Surface Protection Systems for Concrete by Means of Pulse Thermography, QNDE conference 2016 - Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 2016: Atlanta, GA.
- [10] Salazar A., Mendioroz A., Apiñaniz E., Pradere C., Noël F., Batsale J.-C., Extending the Flash Method to Measure the Thermal Diffusivity of Semitransparent Solids, Measurement Science and Technology. - Vol. 25, no 3, p. 035604, 2014.
- [11] Abate J., Whitt W., A Unified Framework for Numerically Inverting Laplace Transforms, Informs Journal on Computing. - Vol. 18, no 4, pp. 408-421, 2006.
- [12] Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E., Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, SIAM Journal on Optimization. - Vol. 9, no 1, pp. 112-147, 1998.
- [13] Altenburg S. J., Weber H., Krankenhagen R., Thickness Determination of Semitransparent Solids Using Flash Thermography and an Analytical Model, Quantitative InfraRed Thermography Journal. - Vol. pp. 1-11, 2017.