

Photothermische Schichtdickenmessung an Betonbeschichtungen - unter Laborbedingungen und auf der Baustelle

Rainer KRANKENHAGEN¹, Simon J. ALTENBURG¹, Helena EISENKREIN²

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

² IBOS Institut für Betontechnologie und Oberflächenschutzsysteme GmbH, Bochum

Kontakt E-Mail: rainer.krankenhagen@bam.de

Kurzfassung. Bei der Realisierung von Oberflächen-Schutz-System (OSS) auf Betonflächen ist die tatsächlich erreichte Dicke der Beschichtung ein wesentlicher Parameter, der über die Funktionalität und Langzeitstabilität der aufgetragenen Schicht entscheidet. Die Firma IBOS und die BAM haben in den letzten Jahren gemeinsam einen funktionstüchtigen Prototyp eines Messgeräts zur zerstörungsfreien Schichtdickenmessung für Bodenbeschichtungen entwickelt. Hierin wird die Abkühlkurve eines vorher erwärmten Bereichs berührungslos mit einer IR-Kamera erfasst und mit einem Modell verglichen, was die Bestimmung der Schichtdicke ermöglicht. Im Rahmen dieses Beitrags wird die Umsetzung der Methode unter Laborbedingungen und in der Praxis auf der Baustelle erläutert und diskutiert.

1 Einführung

In verschiedenen Anwendungsfällen werden Betonoberflächen mit Beschichtungen versehen, um bestimmte Funktionalitäten zu erreichen. Oberflächen-Schutz-Systeme (OSS) auf Polymerbasis werden u.a. eingesetzt, um die Abriebfestigkeit oder die Widerstandsfähigkeit gegen Chemikalien oder Umwelteinflüsse zu erhöhen, z.B. bei Fußböden in Parkhäusern (siehe Abb. 1). Bei der Realisierung dieser OSS ist die tatsächlich erreichte Dicke der Beschichtung ein wesentlicher Parameter, der über die Funktionalität und Langzeitstabilität der aufgetragenen Schicht entscheidet. Leider stehen nach dem Stand der Technik nur zerstörende Verfahren zur Schichtdickenmessung auf Beton zur Verfügung. Das genaueste Verfahren, die Entnahme von Bohrkernen mit späterer mikroskopischer Vermessung der Schichtdicke an der Schnittkante, erfordert nicht nur die Ausbesserung der Schutzschicht, sondern sogar das Auffüllen der Löcher im Betonkörper. Mehrfache Vor-Ort-Termine sind daher notwendig. Die Firma IBOS und die BAM haben in den letzten Jahren gemeinsam einen funktionstüchtigen Prototyp für ein Messgerät zur zerstörungsfreien Schichtdickenmessung für Fußböden entwickelt. Im Beitrag wird zunächst das Messkonzept erläutert. Danach wird die Überprüfung der Methode unter Laborbedingungen beschrieben. Die Vorstellung des funktionstüchtigen Prototyps sowie erster Ergebnisse schließen die Darstellung ab.



2 Beschreibung des Funktionsprinzips

Das allgemeine Funktionsprinzip der photothermischen Schichtdickenmessung ist bereits seit längerem bekannt (siehe z.B.[1]). Dabei wird die Abkühlung einer kurzzeitig erwärmten Oberfläche betrachtet. Aus dem zeitlichen Verlauf der Abkühlungskurve kann unter bestimmten Voraussetzungen die Schichtdicke ermittelt werden. In Abb. 2 ist eine solche berechnete Abkühlungskurve gezeigt. Betrachtet wurde hierbei eine dünne Polymerschicht auf einem dicken Betonblock nach Erwärmung der Oberfläche mit einem Dirac-Puls mit $0,6 \text{ J/cm}^2$ Energiedichte. Einzelheiten des genutzten Modells und die Materialkennwerte sind in [2, 3] beschrieben worden.



Abb. 1. Parkhaus mit Fußbodenbeschichtung, in der Bildmitte steht der mobile Prototyp zur berührungslosen Schichtdickenmessung

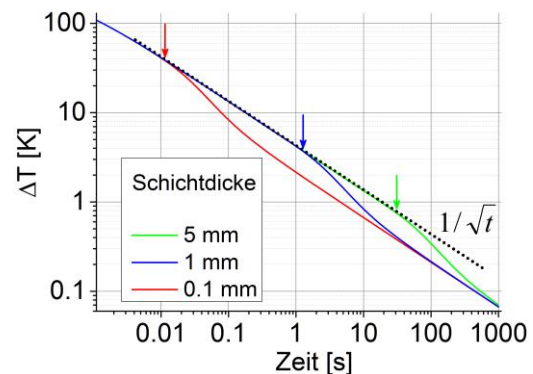


Abb. 2. Simulierte Abkühlung eines polymerbeschichteten Betonblocks für verschiedene Beschichtungsdicken, die schwarz gepunktete Linie steht für den unbeschichteten Block, die Pfeile markieren den Zeitpunkt der Abweichung von der idealen Kurve

Es ist klar erkennbar, dass die Zeitpunkte, an denen der Temperaturverlauf sich vom idealen Verlauf einer unbeschichteten Probe unterscheidet, stark von der Schichtdicke abhängen. Im Fall der dünnsten Beschichtung mit 0,1 mm Schichtdicke tritt die Abweichung bereits nach 10 ms auf, für die dickeren Beschichtungen entsprechend später. Dieser Effekt bildet die Grundlage der photothermischen Schichtdickenmessung.

Die Methode lässt sich komplett berührungslos realisieren, wenn sowohl die Erwärmung als auch die Temperaturmessung berührungslos erfolgen, Dazu bietet sich die Erwärmung einer bestimmten Fläche mit einer leistungsstarken Lampe an, während die Temperatur mit einem Pyrometer über einen bestimmten Zeitraum erfasst wird. Die Bezugsgröße ist hierbei die Temperaturerhöhung durch den Puls. Eine Absolutmessung der Temperatur ist nicht notwendig, was die Anforderungen an das Messsystem vereinfacht. Die Umsetzung dieses Konzeptes wird in den nächsten Abschnitten näher beschrieben.

3. Umsetzung unter Laborbedingungen und Ergebnisse

3.1 Laboraufbau

Aus der in Abb. 2 gezeigten Simulation lassen sich wichtige Rückschlüsse auf die technischen Anforderungen an die berührungslose Temperaturmessung ziehen. Der Sensor muss folgende Anforderungen erfüllen:

- möglichst hohe Abtastraten von mindestens 100 Hz, um auch dünne Schichten bis zu 0,1 mm Dicke vermessen zu können

- Temporaufauflösung von mindestens 0,1 K, um auch den Temperaturverlauf nach längerer Abkühlzeit noch auflösen und damit dicke Schichten vermessen zu können
- Sensor muss empfindlich sein für niedrige Temperaturen unter 100 °C (ambient temperature sensor)
- Sensor muss möglichst unempfindlich für die Reststrahlung der erlöschenden Lampe sein (der Einsatz eines gekühlten Shutters wurde verworfen)

Diese Randbedingungen stellen eine starke Einschränkung dar, so dass nur wenige Sensoren überhaupt in Frage kamen. Letztendlich kamen 2 Pyrometer und 2 einfache IR-Kameras, alle nur im LWIR-Bereich sensitiv, in die nähere Auswahl. Nach ausführlichen Tests fiel die Entscheidung, eine der IR-Kameras als Temperatursensor zu nutzen. Weitere Einzelheiten zur Sensorüberprüfung sind in [4] beschrieben. Die ausgewählte Kamera hat folgende technische Spezifikationen:

- Ungekühlter Bolometer-Detektor mit 160x120 Pixeln
- bis 100 Hz Bildfrequenz
- Temperaturbereich -20°C ... 850°C
- Spektralbereich 7,5 ... 13 µm

Die folgende Abbildung 3 vermittelt einen Eindruck von der Qualität der Temperaturmessung mit der ausgewählten Kamera. Gemessen wurde die Oberflächentemperatur eines mit einem OSS beschichteten Beton-Probekörpers während und nach einer 10 s langen Erwärmung. Das gezeigte Signal ist ein Mittelwert über einer 0,5 cm x 1 cm großen Fläche (entspricht 220 Pixeln). Das Referenzsignal wurde an der gleichen Fläche mit einer hochpreisigen kalibrierten IR-Kamera mit gekühltem Detektor ermittelt.

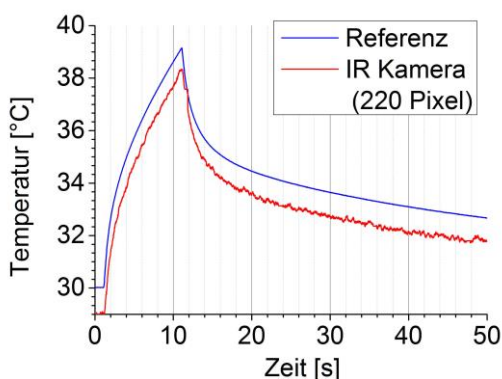


Abb. 3. Zeitliche Entwicklung der Oberflächentemperatur während und nach 10 s Erwärmung eines OSS-beschichteten Beton-Probekörper, Vergleich des Rohsignals der IR-Kamera mit einer kalibrierten Referenz

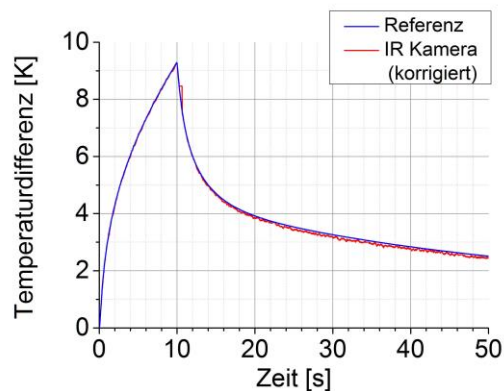


Abb. 4. Darstellung des gleichen Signalverlaufs wie in Abb. 3 als Temperaturdifferenz zum Ausgangszustand, das Signal der IR-Kamera wurde bezüglich Drift und Absolutwert korrigiert

Als wesentliche Maßnahme zur Signalverbesserung wurde eine Driftkorrektur mit einem internen Referenzkörper installiert, um zeitliche Schwankungen des Temperaturmesswertes zu korrigieren. Bei Betrachtung der relevanten Temperaturdifferenz konnte nach Signalkorrektur eine gute Übereinstimmung mit der Referenz erzielt werden (siehe Abb. 4). Als Wärmequelle wurde ein Bühnenstrahler mit 1 kW Anschlussleistung und integrierter Fokussieroptik ausgewählt. Eine Erzeugung kurzer Pulse von wenigen Millisekunden ist damit nicht möglich, was die Vermessung dünner Schichten unter 1 mm Schichtdicke erschwert. Eine Einbindung von Blitzlampen in ein entsprechendes Messgerät ist prinzipiell möglich, sprengt aber den anvisierten Kostenrahmen. Daher ist die ausgewählte Lampe, wie auch die IR-Kamera als Temperatursensor, ein Kompromiss zwischen Kosten und Performance.

Die mit dieser Kombination von Lampe und Kamera gemessenen Temperaturverlaufskurven werden in der Auswertephase mit einem analytischen Modell verglichen und in Übereinstimmung gebracht. Die gesuchte Schichtdicke ist dabei ein Fitparameter. Wegen der Vielzahl der Parameter, welche den zeitlichen Verlauf der Erwärmungs- und Abkühlungskurve beeinflussen, wurde für die praktische Umsetzung ein zweistufiges Verfahren konzipiert. Dabei werden die thermischen Eigenschaften und eine eventuelle Teiltransparenz des reinen Beschichtungsmaterials als materialspezifischer Parametersatz separat unter Laborbedingungen bestimmt. Bei der vor-Ort Messung muss dann das Beschichtungsmaterial mit dem zugehörigen Parametersatz bekannt sein. Dann kann die Schichtdicke sehr effektiv als Fitparameter bestimmt werden. Einzelheiten der Modellierung und der Anpassung sind in [2] beschrieben.

3.2 Ergebnisse unter Laborbedingungen

Für das Beschichtungsmaterial StoPox TEP MultiTop wurde im Labor ein gültiger Parametersatz bestimmt. Darauf basierend erfolgte die photothermische Schichtdickenbestimmung an einem Probekörper mit der entsprechenden Beschichtung. Durch uneinheitlich dicke Beschichtung waren verschiedene Schichtdicken am gleichen Probekörper präsent. Die folgenden Ergebnisse wurden mit einer hochwertigen IR-Kamera (gekühlter Detektor mit 640*512 Pixel, 100 Hz Aufnahmezeit, Spektralbereich 8...9,4 μm) erzielt, sollten aber ohne Probleme übertragbar sein (siehe Abb. 4). Abb. 5 zeigt ein Thermogramm des kompletten Probekörpers mit 30 cm Kantenlänge nach 10 s Erwärmung. Deutlich erkennbar ist eine inhomogene Erwärmung durch den kreisförmigen Halogenstrahler. Im Zentralbereich wurden Werte von 30-34°C erreicht, Ausgangstemperatur war 22,5°C. Die Schichtdicken wurden entlang der gestrichelten Linie bestimmt. Danach wurde der Probekörper entlang der eingezeichneten Linie zerschnitten und die jeweiligen Schichtdicken entlang der Linie im Schnittbild mikroskopisch bestimmt. In Abb. 6 sind die photothermisch bestimmten Schichtdicken über den geometrisch bestimmten Werten aufgetragen worden. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Größen, die so auch an anderen Probekörpern mit anderen Schichtdicken gefunden wurde. Damit ist das Funktionieren der Messmethode unter Laborbedingungen bewiesen worden.

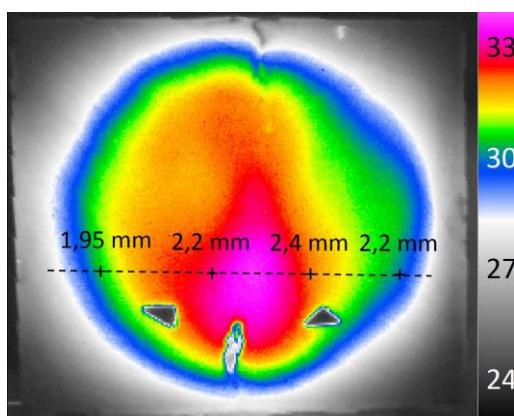


Abb. 5. Thermogramm der Oberfläche eines OSS-beschichteten Betonblocks nach 10 s Erwärmung, Anfangstemperatur war 22,5°C, die Zahlen zeigen tatsächliche Schichtdicken entlang der gestrichelten Linie an

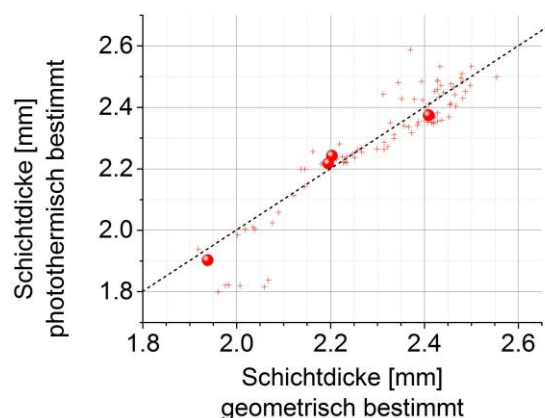


Abb. 6. Vergleich geometrisch bestimmter und photothermisch bestimmter Schichtdicken für den in Abb. 5 gezeigten Probekörper, die gestrichelte Linie verkörpert ideale Übereinstimmung, die vier vergrößerten Messpunkte entsprechen den in Abb. 5 gezeigten Positionen

4. Umsetzung im Prototyp und erste Ergebnisse

4.1 Aufbau des Prototyps

Die ausgewählten Komponenten wurden zusammen mit einem Steuerrechner in ein Gehäuse integriert, der komplette Aufbau ist in Abb. 7 gezeigt. Abb. 8 stellt den inneren Aufbau dar. Das gesamte Gehäuse ist ungekühlt, transportabel und wird über einen normalen 220 V Netzanschluss versorgt. Die insgesamt untersuchte Fläche pro Messung beträgt 5 cm x 5 cm. Über diese Fläche kann ein variables Raster von Messpunkten für die Messung der jeweiligen Schichtdicke gelegt werden. Die Auswertung soll in einer späteren Ausbaustufe direkt vor Ort vorgenommen werden können.



Abb. 7. Geöffneter Prototyp mit Laptop zur Steuerung der Messung und Vorauswertung vor Ort

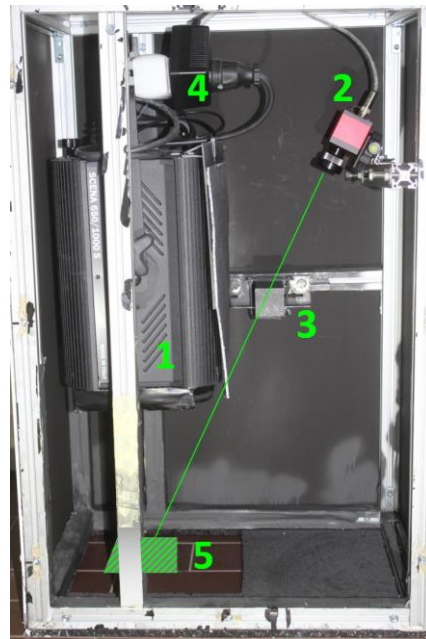


Abb. 8. Blick ins Innere des Prototyps mit folgenden Komponenten: 1 Lampe mit Optik, 2 IR-Kamera, 3 Referenzkörper, 4 Relais für Lampe, 5 Messfeld, die Linie zeigt die optische Achse der IR-Kamera

Als erstes Testobjekt für den Prototyp unter Laborbedingungen wurde der in Abb. 9 gezeigte Probekörper genutzt, der in 3 Quadranten 3 verschiedene Schichtdicken des gleichen OSS (VSNR3) aufweist. Durch eine zerstörende Messung (PIG-Schichtdickenmessgerät mit Ritzerzeugung) wurden folgende Schichtdicken ermittelt: $166 \pm 15 \mu\text{m}$, $330 \pm 20 \mu\text{m}$ und $430 \pm 20 \mu\text{m}$. In Abb. 9 sind die senkrecht verlaufenden Ritzspalten in den oberen Quadranten schwach erkennbar.

Der gemessene Temperaturverlauf an der Oberfläche ist exemplarisch in Abb. 10 (rote Kurve) gezeigt. Hier trat während der Messung nach etwa 27 s ein deutlicher Temperatursprung auf Grund der kamerainternen Driftkorrektur auf. Nach Signalkorrektur unter Nutzung des Referenzkörpers erhält man eine geglättete Kurve, die dann für die Ermittlung der Schichtdicke genutzt werden kann.

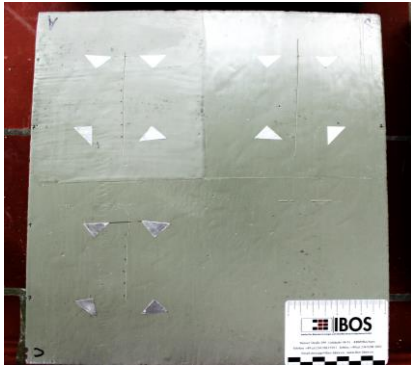


Abb. 9. Betonplatte mit 3 verschiedenen Schichtdicken VSNR3 beschichtet, die Schichtdicken wurden zerstörend entlang eines Ritzes bestimmt

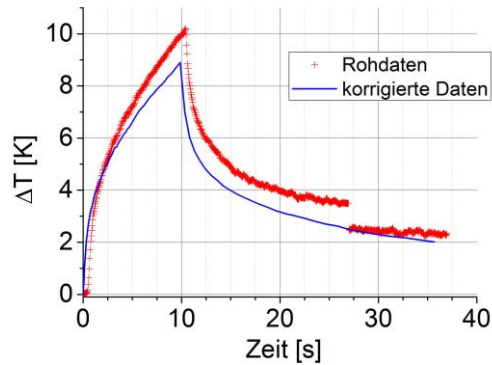


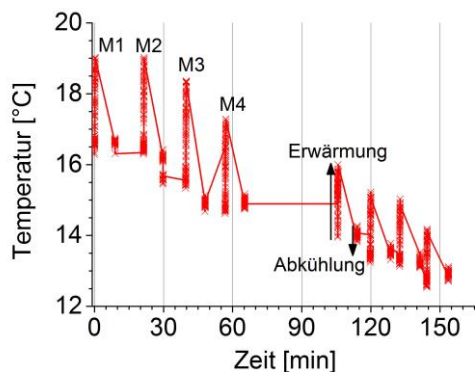
Abb. 10. Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturdifferenz nach 10 s Erwärmung mit dem Scheinwerfer, Vergleich zwischen Rohdaten und korrigierten Daten

Die photothermisch bestimmten Schichtdicken betragen $115 \mu\text{m}$, $255 \mu\text{m}$ und $475 \mu\text{m}$. Die geringste und mittlere Schichtdicke wurde unterbestimmt, die große Schichtdicke liegt etwa 10% neben dem wahren Wert. Hierzu ist anzumerken, dass die Messmethode mit dieser Hardware bei dünnen Schichten unter $0,5 \text{ mm}$ Dicke ihre Einsatzgrenze erreicht. Abb.2 zeigt, dass bei Polymerschichten unterhalb 1 mm Schichtdicke der typische Knick bereits nach 1 s oder noch kürzerer Zeit auftritt. Wenn dieser Zeitpunkt noch innerhalb der Erwärmungsphase liegt, wird die Auswertung stark erschwert, da das Ergebnis empfindlich von der Genauigkeit der Modellierung der Erwärmungsphase abhängt. Für so dünne Schichten ist eine Blitzlampe mit wenigen Millisekunden Blitzdauer wesentlich besser geeignet.

Das Messergebnis der dicksten Schicht belegt jedoch, dass der Prototyp prinzipiell funktioniert und die Applikation der photothermischen Messmethode auf der Baustelle ermöglicht.

4.1 Ergebnisse beim Vor-Ort-Einsatz im Parkhaus

Im ersten Vor-Ort-Einsatz sollte vor allem die Praxiseignung in einem Parkhaus überprüft werden. Die weiter oben gezeigte Abb. 1 zeigt das Gerät während des Einsatzes. Wegen der nichtinvasiven Messtechnik treten dabei kaum Nutzungseinschränkungen für den Betrieb des Parkhauses auf. Insgesamt wurden 8 Messstellen auf Ebenen untersucht, die Dauer für jede Einzelmessung wurde mit 9 Minuten extrem lang gewählt. Pro Ebene dauerten die Messungen dann etwa 1 h. In Abb. 11 kann der Zeitverlauf der gesamten Messkampagne nachvollzogen werden. Hier sind die Temperaturen des Referenzkörpers jeweils zu Beginn (Erwärmung) und zum Ende der Messung (langsame Abkühlung) gezeigt. An die Abkühlung schloss sich jeweils eine Umbaupause an. Das wichtigste Ergebnis dieser Dauermessung war, dass sich der Prototyp während der Messung nicht allmählich erwärmte, stattdessen trat eine leichte Abkühlung auf. Zumindest für den Winter und die Übergangszeit ist die thermische Auslegung des Prototyps ausreichend.



bb. 11. Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Oberflächentemperatur des Referenzkörpers im Prototyp während der gesamten Messkampagne, M1 ... M4 stehen für Einzelmessungen in einer Ebene, die Pfeile kennzeichnen einen Messzyklus

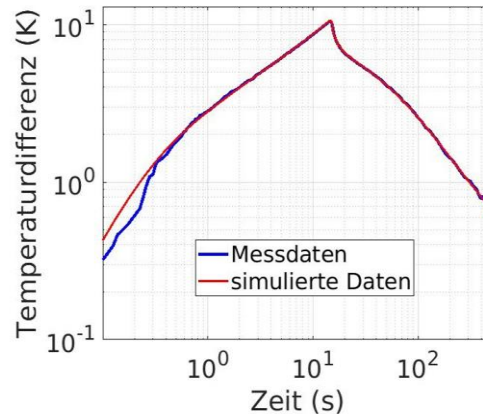


Abb. 12. Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Oberflächentemperatur eines mit OS11a beschichteten Fußbodens in einem Parkhaus, die Anpassung der mit dem analytischen Modell simulierten Kurve (rot) an die Messdaten (blau) ergab eine Gesamtdicke von 5,5 mm für die Beschichtung

Die bei diesem Messeinsatz gewonnenen Daten konnten mit dem in [2] beschriebenen analytischen Modell simuliert werden, die Qualität der Modellanpassung ist in Abb. 12 demonstriert.

Für das verwendete OS11 a ergab sich eine plausible und systemimmanente Gesamtschichtdicke von 5,5 mm. Ein Abgleich mit der tatsächlichen Schichtdicke konnte jedoch an diesem Objekt leider nicht vorgenommen werden. Der Vor-Ort-Einsatz belegte zunächst die Praxistauglichkeit des entwickelten Prototyps, es traten keinerlei Einsatzbeschränkungen auf.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass eine photothermische Schichtdickenmessung an OSS auf Beton unter Laborbedingungen realisierbar ist. Zur quantitativen Auswertung wird ein analytisches Modell verwendet, das neben der Teiltransparenz und korrekten Pulsform auch die Wärmeverluste berücksichtigt. Es muss eine Multiparameter-Anpassung vorgenommen werden, wobei die Schichtdicke einer der Parameter ist. Für das OSS StoPox TEP MultiTop konnte auf diese Weise die Schichtdicke exakt, aber völlig zerstörungsfrei, bestimmt werden. Bei der Überführung des Messprinzips in einen baustellentauglichen Aufbau wurde eine preisgünstige IR-Kamera als Temperatursensor ausgewählt, um die Gerätekosten im Rahmen zu halten. Durch geeignete Signalkorrekturen konnte die Qualität der gemessenen Temperaturverläufe soweit verbessert werden, dass eine Bestimmung der Schichtdicke möglich ist. Der fertige Geräte-Prototyp konnte in einem Vor-Ort-Einsatz in einem Parkhaus seine Praxistauglichkeit nachweisen.

Zur Bestimmung der vor Ort tatsächlich erreichbaren Messgenauigkeit ist eine Reihe weiterer Untersuchungen in Kombination mit zerstörenden Messverfahren zur Schichtdickenbestimmung notwendig. Die Evaluierung des gesamten Verfahrens ist Gegenstand eines Nachfolgeprojektes, bei dem auch ein Normentwurf für das neue Verfahren verfasst werden soll. Die dafür notwendigen Messreihen werden sowohl im Labor als auch mit dem entwickelten Prototyp durchgeführt werden. Bei erfolgreichem Abschluss stünde ein völlig zerstörungsfreies Messverfahren für OSS auf Betonböden zur Verfügung, welches die bisher verfügbaren mehr oder weniger zerstörenden Verfahren ablösen könnte.

Danksagung

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

Literatur

- [1] D. P. Almond and P. M. Patel, *Photothermal Science and Techniques* (PHYSICS AND ITS APPLICATION). London: Chapman & Hall, 1996, p. 241.
- [2] S. Altenburg, R. Krankenhagen, and F. Bavendiek, "Thickness determination of polymeric multilayer surface protection systems for concrete by means of pulse thermography," in *QNDE conference 2016 - Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, Atlanta, GA, 2016, vol. 1806: AIP Publishing.
- [3] S. J. Altenburg, M. Chien, F. Bavendiek, and R. Krankenhagen, "Thermografische Schichtdickenbestimmung von Oberflächenschutzsystemen für Beton," in *DGZfP-Berichtsband BB 163*, 2017, vol. DGZfP-BB 163, pp. 1-8.
- [4] R. Krankenhagen and S. J. Altenburg, "Direct comparison of two pyrometers and a low-cost thermographic camera for time resolved LWIR temperature measurements," (in English), *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX*, vol. 10214, 2017.