

Standardisierung eines thermografischen Verfahrens zur Schichtdickenbestimmung von Beton-Oberflächenschutzsystemen

Florian JONIETZ¹, Rainer KRANKENHAGEN¹, Simon J. ALTENBURG¹,
Helena EISENKREIN-KREKSCH²

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

² kiwa GmbH, Beckum

Kontakt E-Mail: florian.jonietz@bam.de

Kurzfassung. Polymerbeschichtungen auf Beton bieten einerseits mechanischen Schutz vor Beschädigungen und verhindern das Eindringen von Wasser, gelösten Salzen und CO₂ und können andererseits der Oberfläche ein gewünschtes Aussehen geben. Daher werden sie in der Bauindustrie insbesondere bei Brücken und Parkhäusern häufig verwendet. Für die beabsichtigte Wirkung der Beschichtung ist deren Schichtdicke ein entscheidender Faktor und muss daher nach Aufbringung der Schicht und im Betrieb regelmäßig überprüft werden. Üblich sind hier zerstörende Verfahren mit nachträglich erforderlicher Ausbesserung. Im Rahmen eines Vorgängerprojektes wurde an der BAM in Kooperation mit der IBOS GmbH ein zerstörungsfreies Verfahren entwickelt, welches auf aktiver Thermografie basiert. Ein Prototyp mit Halogenlampe und Infrarot-Kamera wurde erprobt.

Das hier beschriebene Folgeprojekt hat das Ziel, dieses Verfahren zu standardisieren, damit es sich in der Industrie als zerstörungsfreies Alternativverfahren zur Schichtdickenbestimmung durchsetzt. Im ersten Schritt wird gezeigt, bei welchen Oberflächenschutzsystemen das Verfahren bereits zuverlässige Schichtdickenmessungen ermöglicht und praxistauglich ist. Anschließend werden weitere Forschungsthemen definiert und bearbeitet, die eine Anwendung für alle Oberflächenschutzsysteme ermöglichen sollen. Besondere Herausforderungen stellen etwa Sandeinstreuungen in der Polymerschicht dar. Auch muss der Frage nach der Anwendbarkeit auf Mehrschichtsysteme nachgegangen werden. Des Weiteren stellt sich die Frage nach dem Einfluss der Beschaffenheit des Betonuntergrunds auf die Anwendbarkeit des Verfahrens. Im zu erarbeitenden Normentwurf sollen diese Untersuchungen die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der aktiven Thermografie zur Schichtdickenmessung von Oberflächenschutzsystemen aufzeigen. Im Beitrag werden die systematischen Untersuchungen bezüglich dieser Fragestellungen dargelegt.

1. Einführung

Der auf Brückenbauwerken und in Parkhäusern verwendete Beton wird in der Regel mit Beschichtungen aus Polymermaterial versehen, um Schutz vor mechanischen Einwirkungen zu bieten, um das Eindringen von betonschädigenden Medien zu verhindern, aber auch aus ästhetischen Gründen. Die Dicke dieser Beschichtung ist ein wichtiger Parameter, der die Wirkung der Schicht maßgeblich bestimmt. Sie muss während der Applikation einer neuen Schicht und während des Betriebs des Bauwerkes zur Istzustandsermittlung kontrolliert



werden. Eine Nichteinhaltung der vorgegebenen Schichtdicke kann zu vorzeitigem Verschleiß und zur Beschädigung des Oberflächenschutzsystems führen und damit letztendlich zur Beschädigung des Baumaterials [1]. Bislang erfolgt dies durch zerstörende Prüfung. Dies hat eine ganze Reihe von Nachteilen. Prinzipiell kann eine solche zerstörende Prüfung nur stichpunktartig erfolgen. Es entstehen durch die Prüfung Fehlstellen, welche anschließend repariert werden müssen. Selbst nach erfolgter Reparatur stellen sie optische und funktionale Mängel dar.

Ein mögliches Verfahren zur Schichtdickenfeststellung bei max. 500 µm Dicke ist das Keilschnittverfahren, für das eine DIN-Norm existiert. Dabei wird ein keilförmiger Schnitt in der Beschichtung erzeugt, dessen Schnittfläche senkrecht von oben mittels einer integrierten Lichtoptik ermittelt wird, wodurch bei bekannter Geometrie des Schnittkeils die Schichtdicke ermittelt wird.

Eine andere Prüfmethode ist, eine Spanprobe der Beschichtung zu entnehmen, diese also stellenweise vom Substrat zu lösen und deren Dicke mittels eines Messschiebers oder mikroskopisch zu ermitteln.

Eine weitere Methode stellt die Differenzdickenmessung durch Einstechen einer Messnadel in die Beschichtung dar. Diese Methode ist zwar nur minimal invasiv, allerdings ist sie mit Messunsicherheiten behaftet und nur bei bestimmten Beschichtungstypen (plastoelastischen) durchführbar.

Eine weit verbreitete Prüfmethode ist die Entnahme von Bohrkernen bestehend aus Substratmaterial und Beschichtung, und deren anschließende Untersuchung mittels Lichtmikroskop. Diese Methode stellt den maximal zerstörenden Eingriff dar.

Hier wird ein zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Schichtdickenbestimmung vorgestellt, welches auf dem Verfahren der aktiven Thermografie basiert und im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt worden ist. Das Ziel des neuen und im Folgenden vorzustellenden Projektes ist es, dieses Verfahren zu normieren, um es einem größeren Benutzerkreis und letztendlich der kommerziellen Nutzung zugänglich zu machen. Es ist geplant, das Verfahren dem Normenausschuss DIN NA 005-07-06 AA („Schutz, Instandsetzung und Verstärkung“) zu präsentieren und in diesem Rahmen eine neue Norm für dieses Verfahren zu etablieren.

2. Methode der thermografischen Schichtdickenbestimmung

Die Methode, einlagige Polymerbeschichtungen auf Beton mittels aktiver Thermografie zu bestimmen, wurde in einem Vorgängerprojekt, welches eine Kooperation zwischen der BAM und der IBOS GmbH war, entwickelt. Die beschichtete Oberfläche wird dabei mittels optischer Anregung erwärmt. Der Temperaturverlauf an der Oberfläche wird während der Erwärmung und der anschließenden Abkühlung mit einer Infrarotkamera erfasst und dann mit Hilfe eines analytischen Modells ausgewertet. Dieses gründet sich auf der Arbeit von Salazar et al. [2], basiert auf der Lösung der Wärmediffusionsgleichung im Laplace-Raum und beschreibt den Oberflächentemperaturverlauf an einlagigen, isolierten, optisch erwärmten, teiltransparenten Körpern oder Schichten auf einem Substrat, wobei es thermische Verluste berücksichtigt [3]. Der zeitliche Oberflächentemperaturverlauf wird durch numerische Rücktransformation erhalten. Im Modell wird auch der zeitliche Verlauf des einfallenden Lichtpulses zur Erwärmung berücksichtigt. Für die Bestimmung der Schichtdicke durch einen Datenfit an besagtem zeitlichem Temperaturverlauf muss das Beschichtungsmaterial hinsichtlich folgender Größen charakterisiert sein:

- thermische Diffusivität („Temperaturleitfähigkeit“)
- thermische Effusivität
- effektiver Absorptionskoeffizient bei der verwendeten Lichtquelle

Auch das Substratmaterial (hier Beton) muss hinsichtlich seiner thermischen Effusivität bekannt sein. Bei den aufgezählten bekannten Eingangsparametern werden dann nicht nur die unbekannte Schichtdicke gefittet, sondern üblicherweise auch die eingebrachte Heizenergie-dichte und der thermische Verlustparameter. Letztere zwei Parameter sind in der Regel nicht mit der notwendigen Genauigkeit bekannt, um sie als feste Eingangsparameter verwenden zu können.

Der in besagtem Vorgängerprojekt entwickelte Prototyp ist in Abb. 1 gezeigt. Es wird hier eine Halogenlampe als Heizquelle verwendet, welche senkrecht nach unten ausgerichtet ist, um einen Bereich des beschichteten Betonbodens des Parkhauses zu beleuchten, welcher während Aufheizung und anschließender Abkühlung von oben mit einer IR-Kamera erfasst wird.

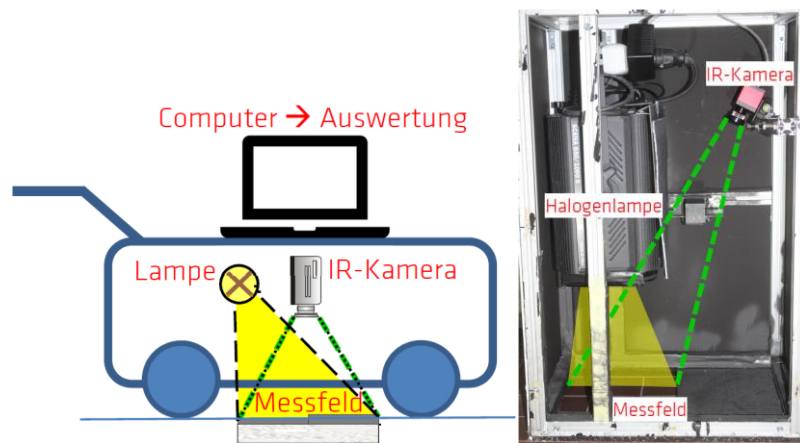


Abb. 1. Entwickelter Prototyp zur Vermessung der Beschichtungsdicke von Betonböden. Schema und reale Ausführung.

In Abb. 2 ist eine typische Messkurve einer einlagigen Polymerschicht auf einem Betonsubstrat gezeigt. Beide Achsen sind mit logarithmischer Skala versehen. Während der Heizphase ist eine ansteigende Temperatur auf der Oberfläche zu verzeichnen, welche bei Beendigung des Heizvorgangs schlagartig abzukühlen beginnt. Bei dieser doppeltlogarithmischen Auftragung sind die Steigungen fast linear. Die Abweichungen vom linearen Verhalten sind hier im Wesentlichen durch die thermischen Übergänge zwischen Beschichtung und Substrat verursacht, und deren Zeitpunkte werden im Rahmen des Modells verwendet, um die Dicke der Beschichtung zu ermitteln. Es ist ersichtlich, dass der Fit durch das Modell sehr gut die Messdaten widerspiegelt, wobei hier eine Beschichtungsdicke von 1.9 mm ermittelt wurde.

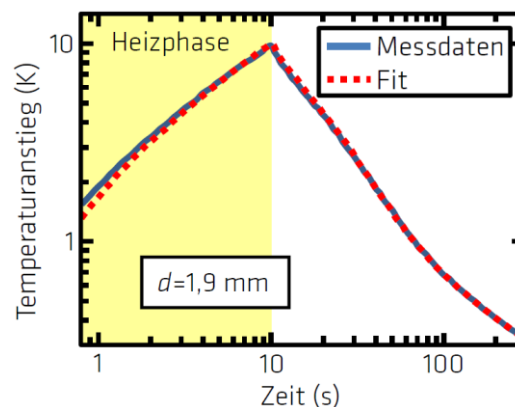


Abb. 2. Typischer Zeitverlauf der Oberflächentemperatur einer einlagig beschichteten Betonfläche während Aufheizung (gelb gefärbter Zeitabschnitt) und Abkühlung in doppeltlogarithmischer Darstellung.

3. Erweiterung des Anwendungsbereichs

Es wurde in verschiedenen Veröffentlichungen, die im Rahmen des Vorgängerprojekts entstanden sind [3][4][5], gezeigt, dass das Verfahren für einlagige Beschichtungen anwendbar ist und die Schichtdicke in der gewünschten Genauigkeit bestimmt werden kann. Ziel des aktuell laufenden Folgeprojekts ist es zum einen, das Verfahren zu normieren, und zum anderen zu ermitteln, ob das Verfahren auch auf mehrlagige Beschichtungen angewendet werden kann, da sehr viele Beschichtungssysteme für Fußböden in der Praxis mehrlagig sind. Dabei ist das Ziel, möglichst die Dicken der einzelnen Teilschichten separat zu bestimmen. Zudem werden in der Praxis einzelne Polymerschichten mit Sandeinstreuungen versehen, um diese widerstandsfähiger gegenüber mechanischen Belastungen zu machen. Daher gilt es zu testen, ob das Verfahren auch auf Schichtenfolgen mit Sandeinstreuungen anwendbar ist. Dies würde den Anwenderkreis für eine mögliche Norm erheblich vergrößern und die Praxisrelevanz deutlich erhöhen. In Abb. 3 ist ein typischer mehrlagiger Beschichtungsaufbau gezeigt. Links ist ein schematischer Querschnitt durch das dreilagige Beschichtungssystem OS11 dargestellt. Rechts ist eine entsprechend beschichtete Probe gezeigt, wobei die einzelnen Schichten stufenweise freigelegt wurden, um deren Zusammensetzung und Oberflächenbeschaffenheit zu zeigen. Direkt auf den Betonuntergrund ist eine dünne Grundierung (Polymerschicht (1)) aufgetragen. Diese enthält eine Sand-Einstreuung. Darüber befindet sich eine Polymerschicht (Polymerschicht 2), welche im unteren Bereich keine Sandeinstreuungen enthält und im oberen Bereich mit Sand abgestreut ist. Darüber befindet sich eine dünne Deckschicht aus einem dritten Polymer (Polymerschicht 3).

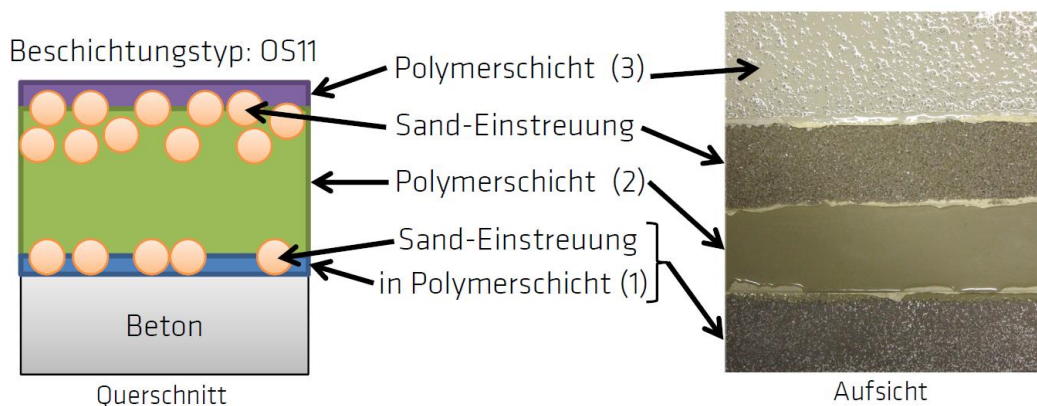


Abb. 3. Mehrlagiges Beschichtungssystem OS11. Links: Schematischer Querschnitt, Rechts: Einzelne Schichten stufenweise freigelegt

Das Modell konnte auf den Fall von drei Schichten erweitert werden. In Abb. 4 ist eine Messkurve für ein dreilagiges System gezeigt. Die Messdaten werden gut durch den Datenfit entsprechend dem dreilagigen Modell wiedergegeben. Die thermischen Materialparameter der drei Beschichtungsmaterialien und des Substrats wurden als feste Größen eingegeben und die Dicken der drei Schichten mittels Fit ermittelt.

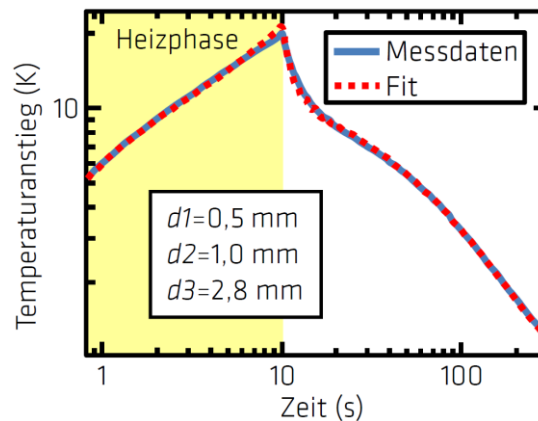


Abb. 4. Typischer Zeitverlauf der Oberflächentemperatur einer dreilagig beschichteten Betonfläche während Aufheizung (gelb gefärbter Zeitabschnitt) und Abkühlung in doppeltlogarithmischer Darstellung.

4. Weitere Untersuchungen für die Normierung

Damit ist gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, auch mehrlagige Beschichtungen zu vermessen. Allerdings ist im Detail im Hinblick auf eine Normierung des Verfahrens zu untersuchen, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit die Dickenbestimmung zuverlässig auch an mehrlagigen Beschichtungssystemen funktioniert. Dabei ist etwa zu untersuchen, wie genau die thermischen Eigenschaften des Substratmaterials bekannt sein müssen, oder wie empfindlich die Methode z.B. auf Inhomogenitäten des Substratmaterials ist. Dann ist zu untersuchen, wie genau die thermischen Eigenschaften der Beschichtungsmaterialien für eine zuverlässige Dickenbestimmung bekannt sein müssen und durch welche Messungen diese Parameter am besten zu bestimmen sind, da diese bei vielen Beschichtungsstoffen nicht bekannt sind. Ebenso ist die Eindeutigkeit der Fits zu untersuchen, da bei mehr als drei zu fittenden Parametern, hier also der Schichtdicken, auch mehrere Kombinationen von Schichtdicken in sehr ähnlichen Messkurven resultieren können. Schließlich muss noch untersucht werden, welchen Effekt die Sandeinstreuungen auf die Methode haben. Dabei ist zu ermitteln, wie sich die mit Sand durchsetzten Polymerschichten thermisch verhalten, ob dabei etwa effektive Mischgrößen aus Polymereigenschaften und Sandeigenschaften angenommen werden können.

4.1 Eigenschaften des Substrats (Beton)

In Abb. 5 ist die Messkurve von einer einlagigen relativ dünnen Polymerbeschichtung auf Betonuntergrund dargestellt. In der doppeltlogarithmischen Darstellung sind in blau die Messdaten gezeigt. Die rote Kurve zeigt den Datenfit. In der linken Darstellung wurde als Substratmaterial Leichtbeton angegeben, mit einem entsprechend niedrigen Wert für die Effusivität, der in vorhergehenden Messungen an anderen beschichteten Betonproben ermittelt worden war. Die thermischen Parameter für das Beschichtungsmaterial waren bekannt und wurden als feste Werte der Fitprozedur übergeben. Es ist deutlich ersichtlich, dass die Messdaten nicht gut angefittet werden können. In der rechten Abbildung wurde die Effusivität des Betonsubstrats angepasst, d.h. deren Wert wurde erhöht, bis ein guter Fit (also Übereinstimmung zwischen blauer und roter Kurve) möglich war. Der Wert der Effusivität des Betons entspricht dann eher den Werten für Schwerbeton. Dieses „Spiel“ mit dem thermischen Parameter des Substratmaterials zeigt deutlich auf, dass das Verfahren der thermografischen Schichtdickenbestimmung zumindest bei dünnen Schichten empfindlich auf die thermischen Eigenschaften des Substratmaterials reagiert. Bei einer möglichen Normierung des Verfahrens muss daher darauf eingegangen werden, wie die Effusivität des verwendeten Betons zu bestimmen ist. Es sei darauf hingewiesen, dass dieser große Einfluss

des Betonsubstrats sich eher bei den dünnen Beschichtungen zeigt, während mit dicker werdender Beschichtung der Einfluss des Betonuntergrundes immer mehr abnimmt.

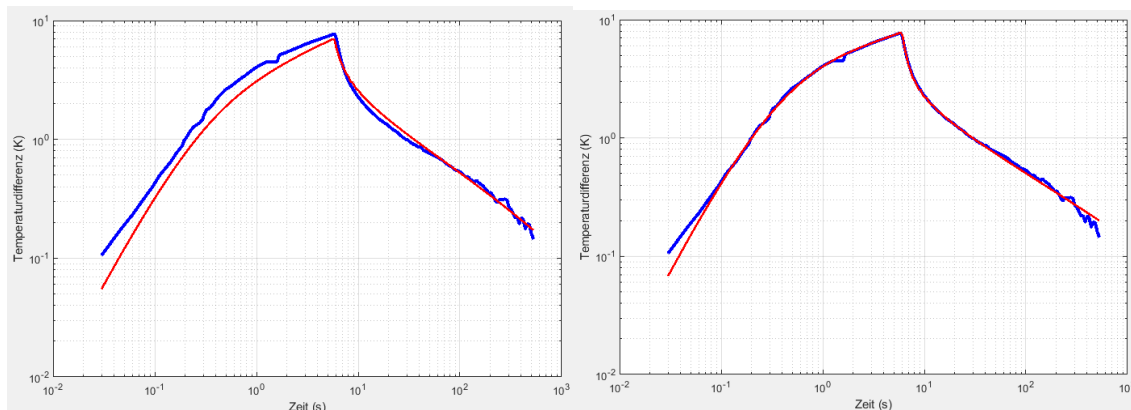


Abb. 5. Anwendung des Verfahrens zur Schichtdickenbestimmung auf Betonuntergrund. Dicke der Beschichtung: 420 µm. Links: Zu niedriger Wert für die Effusivität des Betonsubstrats. Rechts: Angepasster, erhöhter Wert der Effusivität.

Obiges Ergebnis zeigt, dass die Eigenschaften des Substratmaterials einen Einfluss auf die Schichtdickenbestimmung haben. Es wird aber auch klar, dass die Methode zur Schichtdickenbestimmung auch „umgekehrt“ werden kann, um bei bekannten thermischen Eigenschaften des Beschichtungsmaterials und bei bekannter Dicke der Beschichtung die Effusivität des Substratmaterials zu erhalten. Denkbar ist hier etwa eine nachträgliche zerstörende Prüfung zur Ermittlung der exakten Beschichtungsdicke an einigen Probenstellen, die davor thermografisch vermessen worden sind.

4.2 Eigenschaften des Beschichtungsmaterials

In einem nächsten Schritt wurde der Frage nachgegangen, wie die thermischen Eigenschaften des Beschichtungsmaterials bestimmt werden können. Dieser Schritt, ist, wie oben bereits geschrieben wurde, oft notwendig, weil die für dieses thermografische Messverfahren benötigten thermischen Materialparameter bei vielen Beschichtungssystemen nicht komplett vorliegen. Im Prinzip handelt es sich um eine Art Kalibriermessung, die vor der eigentlichen Schichtdickenbestimmung auf der Baustelle einmal im Labor durchgeführt werden muss. Hierbei wird nun die umgekehrte Vorgehensweise gewählt. Eine einlagige Schicht mit bekannter Schichtdicke des zu untersuchenden Beschichtungsmaterials wird auf ein hinsichtlich der thermischen Parameter bekanntes Substrat aufgetragen. Die Messkurve wird dann aber anders gefittet: Die bekannte Schichtdicke ist nun kein freier Parameter, sondern wird eingegeben und „festgehalten“, während die Materialparameter gefittet werden. Anstatt Beton wird als Substratmaterial eine Stahlprobe mit bekannten thermischen Materialeigenschaften verwendet. Dies hat den Vorteil, dass die Schichtdicke zerstörungsfrei magnetinduktiv mit einer kommerziell erhältlichen Messsonde gemessen werden kann: Die Messsonde wird auf die Beschichtung gedrückt, und der Abstand zwischen Messsonde und Stahlsubstrat ermittelt. Dieser Abstand entspricht dann der Dicke der Beschichtung.

In Abb. 6 ist das Vorgehen der thermografischen Kalibriermessung dargelegt. Die mit einer einlagigen Polymerbeschichtung möglichst gleichmäßig überzogene Stahlprobe ist in Teilbild a) gezeigt. Die kreisförmige Markierung diente nur zur Orientierung für die mit der Messsonde zu messenden Stellen. In b) zeigt das Thermogramm der aufgeheizten Probe eine recht gleichmäßige flächige Erwärmung der Probe. Als Wärmequelle wurde hier ein Infrarotlaser mit einer Aufheizzeit von 0.5 s verwendet. Die Temperatur wurde über den rechteckigen Probenbereich in Teilbild b) gemittelt, und Teilbild c) zeigt diese gemittelte

Temperatur als Funktion der Zeit (in blau). Die Daten können sehr gut mit dem Modell für einlagige Beschichtung gefittet werden (rote Kurve). Für einen besseren Überblick über die Eingabe- und Fitparameter des Modells wurde eine Software mit graphischer Benutzeroberfläche entwickelt, die im oben genannten Prototyp in einer benutzerfreundlichen Variante schon zum Einsatz kommt. Unter Teilbild c) ist ein Teil dieses Parametersatzes als Ausschnitt der Benutzeroberfläche des Programms gezeigt. Die Dicke der Beschichtung (L1) beträgt hier 534 μm , wurde vorher mit der magnetinduktiven Messsonde ermittelt, und geht in den Fit als „fixer“ Parameter ein, genauso wie die ebenfalls grün markierte Effusivität des Substratmaterials (e2). Die gefitteten Werte sind rot markiert. Dies sind die Transparenz hinsichtlich der Wellenlänge der Beleuchtungsquelle (α_1), die thermische Diffusivität bzw. Temperaturleitfähigkeit des Polymer-Beschichtungsmaterials (D1) und die Effusivität des Beschichtungsmaterials (e1). Somit erlaubt die „umgekehrte“ Anwendung des Modells, also bei bekannter Schichtdicke, die Ermittlung der thermischen Parameter des Beschichtungsmaterials und damit die Kalibrierung der Schichtdickenmessung für eine bestimmte Materialkombination. Diese Daten stehen dann für die eigentliche Schichtdickenbestimmung zur Verfügung. Es ist daher geplant, auch die Kalibriermessung in die Norm aufzunehmen.

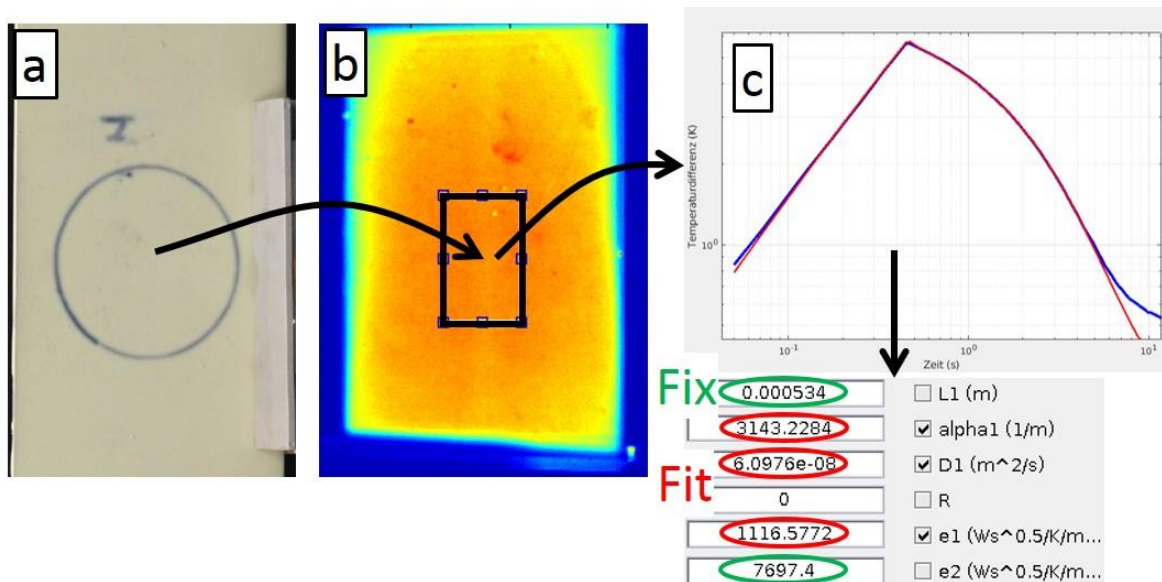


Abb. 6. Kalibriermessung zur Ermittlung der thermischen Parameter des Beschichtungsmaterials. a) Einlagig beschichtete Stahlprobe. b) Thermogramm der aufgeheizten Probe. c) Messkurve der Aufheizung und Abkühlung der Probe, darunter Eingabe- und Fitparameter: Eingabe bekannter Schichtdicke (L1) und Effusivität des Stahlsubstrats (e2), Fit der unbekannt thermischen Parameter des Beschichtungsmaterials Transparenz (α_1), thermische Diffusivität (D1) und Effusivität (e1).

4.3 Einfluss von Sandeinstreuungen ins Beschichtungsmaterial

Die Bestimmung der thermischen Parameter des Beschichtungsmaterials ist in jedem Fall bei Beschichtungen mit Sandeinstreuung erforderlich. Selbst wenn die thermischen Parameter des reinen Polymers bekannt sein sollten, so sind doch die thermischen Parameter des entsprechenden Systems mit Sandeinstreuungen unbekannt, zumal der Füllgrad der Sandeinstreuungen variieren kann und unterschiedliche Sandsorten mit unterschiedlicher Größe und Form der Sandkörner zur Anwendung kommen. Dabei stellt sich die Frage, ob die Mischungen sich makroskopisch wie ein einziges Material mit effektiven thermischen Mischparametern verhalten. Denn nur dann kann die oben beschriebene Methode sinnvoll angewendet werden. In Abb. 7 ist eine solche Beschichtung auf einem Strahlsubstrat gezeigt. Es handelt sich hier um ein Polymer mit einem hohen Füllgrad an Sandeinstreuung, welche

aus recht grobkörnigem Sand besteht. Die dadurch hervorgerufene Rauigkeit der Probenoberfläche ist anhand der Aufnahme gut zu erkennen. Erste Untersuchungen zeigen, dass das obige Vorgehen entsprechend Abb. 6 zur Bestimmung der thermischen Materialeigenschaften des Beschichtungsmaterials auch bei Proben wie der in Abb. 7 gezeigten, angewendet werden kann, wobei effektive Materialparameter für verschiedene Mischungen erhalten werden. Somit sollte das Verfahren zur Bestimmung der Schichtdicke auch bei Proben mit Sandeinstreuung prinzipiell möglich sein. Dies muss im Verlauf der weiteren Arbeit noch genauer untersucht werden, zumal diese Beschichtungen mit Sandeinstreuungen meist als Teilkomponenten von mehrlagigen Beschichtungssystemen Anwendung finden (siehe oben).



Abb. 7. Polymerbeschichtung auf Stahlsubstrat mit grober Sandeinstreuung (hoher Füllgrad)

5. Zusammenfassung

Es wurde dargelegt, dass die Methode der Schichtdickenbestimmung mittels aktiver Thermografie für einlagige Polymerbeschichtungen auf Beton funktioniert und die Anwendung prinzipiell auch auf mehrlagige Beschichtungen erweitert werden kann. Die für die praktische Umsetzung notwendige Kalibrierung zur Bestimmung von Materialparametern wurde genauer beschrieben. Dabei wird das gleiche Modell für die Berechnungen genutzt wie bei der Schichtdickenbestimmung. Wegen der Bedeutung der Kalibrierung soll diese ebenfalls Gegenstand des zu erarbeitenden Normentwurfs werden.

Im Hinblick auf die Normierung des gesamten Verfahrens sind jedoch noch einige Fragen offen geblieben, die derzeit intensiv bearbeitet werden. Dazu gehören etwa die Frage nach der Eindeutigkeit der Fits und der dazu nötigen Genauigkeit der Eingangsparameter als auch die Frage, wie Sandeinstreuungen zu behandeln sind.

Danksagung

Das WIPANO-Vorhaben 03TNG011A wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Referenzen

- [1] Engelfried R., Eisenkrein H., Schäden an polymeren Beschichtungen, Schadenfreies Bauen (Hrsg. Ralf Ruhnau), Band 26, 2012, Fraunhofer IRB Verlag
- [2] 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.
- [3] Altenburg S. J., Chien M., Bavendiek F., Krankenhagen R., Thermografische Schichtdickenbestimmung von Oberflächenschutzsystemen für Beton, Thermographie-Kolloquium 2017

- [4] Altenburg S. J., 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
- [5] 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