Flächige photothermische Schichtdicken- und Materialcharakterisierung an Ein- und Mehrschichtsystemen

Johannes RITTMANN [1], Marc KREUTZBRUCK [1]
[1] Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart

Kontakt E-Mail: johannes.rittmann@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Die hohe Beleuchtungsstärke auf dem Niveau von Blitzlampen bei einer gleichzeitig hohen zeitlichen Flexibilität mit einer vollflächigen Abstrahlungscharakteristik in einem VCSEL-Array lässt die beiden Regime Puls- und Lockinanregung in einer einzigen Anregungsquelle verschmelzen und macht dies zu einer überlegenen Anregungsquelle in der aktiven Thermografie. In Kombination mit einer schnellen Thermografiekamera kann das (zerstörungsfreie) Prüfverfahren zu einem flächig abbildenden Messverfahren zur quantitativen Bestimmung von Schichtdicken und zur Materialcharakterisierung erweitert werden. Insbesondere kann damit bei bekannter Schichtdicke die lokale Verteilung der Temperaturleitfähigkeit in dünnen Materialien ermittelt werden. In diesem Beitrag wird die Leistungsfähigkeit des VCSEL-Arrays zur flächigen Materialcharakterisierung an ebenen Bauteilen aufgezeigt und mit der analytischen Lösung sowie bestehenden Referenzverfahren zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit und der Schichtdicke verglichen. Die bestehenden Modelle eines Einschichtsystems werden innerhalb dieses Beitrags um einen Ansatz für Mehrschichtsysteme erweitert. Viele der untersuchten Kunststoffe sind im Infraroten teiltransparent, wodurch neue Ansätze zur tiefenaufgelösten Anregung und Auswertung herangezogen werden müssen. Abschließend werden die Grenzen der flächigen photothermischen Charakterisierung von (teiltransparenten) Schichtsystemen aufgezeigt.

Lizenz: https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.de

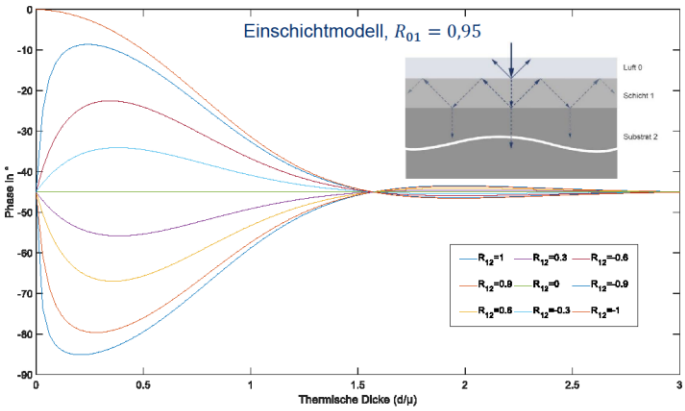
Universität Stuttgart

IKT KUNSTSTOFF TECHNIK STUTTGART

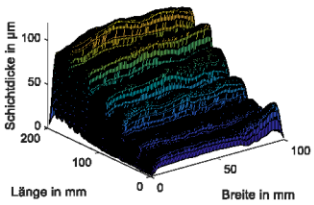
Flächige photothermische Schichtdicken- und Material-charakterisierung an Ein- und Mehrschichtsystemen

Stand der Technik/These

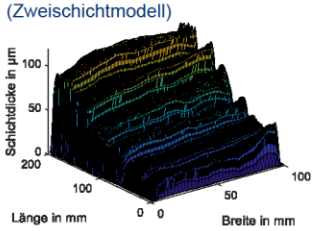
Die Lockin-Thermografie ist ein schnelles flächiges Prüfverfahren und wird häufig zur qualitativen Bestimmung von thermischen Grenzflächen in dünnen Strukturen eingesetzt. Die photothermische Radiometrie (punktuell) und auch die flächige Anregung mit kostspieligen Diodenlasern werden vereinzelt zur quantitativen Bestimmung der Schichtdicke oder der Temperaturleitfähigkeit eingesetzt. Seit einiger Zeit werden VCSEL-Arrays in zur Erwärmung über IR-Strahlung in industriellen Prozessen eingesetzt. In diesem Beitrag wird die Leistungsfähigkeit eines VCSEL-Arrays zur flächigen Materialcharakterisierung aufgezeigt und mit der analytischen Lösung sowie bestehenden Referenzverfahren zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit und der Schichtdicke verglichen. Die bestehenden Modelle eines Einschichtsystems werden um einen Ansatz für Mehrschichtsysteme erweitert. Viele der untersuchten Kunststoffe sind im Infraroten teiltransparent, wodurch neue Ansätze zur tiefenaufgelösten Anregung und Auswertung herangezogen werden müssen. Abschließend werden die Grenzen der flächigen photothermischen Charakterisierung von (teiltransparenten) Schichtsystemen aufgezeigt.



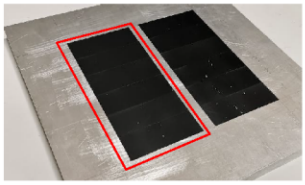
Topologie-Vergleichsmessung (Weißlichtinterferometer)



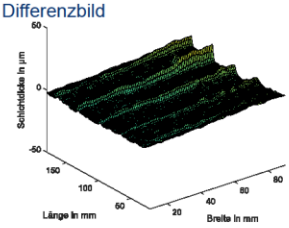
Vermessung mittels Thermografie (Zweischichtmodell)



Prüfkörper (20 mm Aluminiumplatte)



Differenzbild



Lösungsansatz

Zur quantitativen Bestimmung der Schichtdicke oder thermischer Messgrößen werden die eindimensionalen Grundlagen der photothermischen Radiometrie angewandt. Eine harmonische Modulation der Oberflächentemperatur eines Prüfkörpers sendet eine thermische Welle in den Prüfkörper aus. Bei individueller Betrachtung des 1D-Wärmeflusses an jedem Bildpunkt einer Thermografiekamera kann sich der einstellende Phasenverlauf ϕ einer Lockin-Messung mit der Schichtdicke und den thermischen Materialeigenschaften des Prüfkörpers gleichgesetzt werden.

$$\phi = \arg\big(T(0,t)\big) = \arg\left(T_0 e^{i\omega t}\,\frac{1 + R_{12}e^{-2d\sigma}}{1 - R_{01}R_{12}e^{-2d\sigma}}\right)$$

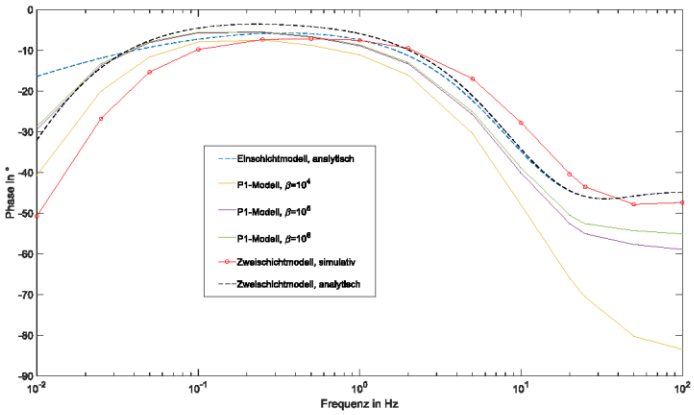
Die vorliegende Gleichung gilt für ein Einschichtmodell (Luft, Prüfkörper, thermisch unendlich dicke Schicht) mit der Temperaturamplitude T_0, der Kreisfrequenz ω, der Schichtdicke des Prüfkörpers d, den Reflexions-koeffizienten R_{01} und R_{12} sowie der komplexen Wellenzahl σ.

Aus mehreren Prüffrequenzen können pixelweise Antwortphasen bestimmt werden, um die nicht eindeutigen Phasenwerte, über mehrere Messungen hinweg, einer eindeutigen Schichtdicke oder Temperaturleitfähigkeit zuordnen zu können. Für komplexere Schichtaufbauten wurde die analytische Gleichung um einen Zwei- bzw. Mehrschichtansatz erweitert.

Fazit und Ausblick

Durch das VCSEL-Array entstand mittels Thermografie die Möglichkeit der flächigen Schichtdickenbestimmung von dünnen Kunststoffbeschichtungen unabhängig von ihrem Trägersubstrat. Für die Anwendung in realen Messumgebungen müssen jedoch weitere Faktoren wie die Verwendung eines Mehrschichtmodells und die Teiltransparenz von Kunstoffen berücksichtigt werden. Beide Faktoren wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht und ihre Auswirkung auf die Phasenlage von Lockin-Messungen ermittelt. Obwohl es auch für einfache teiltransparente Anwendungsfälle analytische Lösungen gibt, wurden diese hier numerisch betrachtet um zukünftig mit den Modellen weitaus komplexere Anwendungsfälle, wie die Betrachtung einer Teiltransparenz im Spektrum des Detektionssystems berücksichtigen zu können. Langfristig soll dadurch die Lockin-Thermografie als Messsystem zur schnellen und flächigen Vermessung von Mehrschichtsystemen eingesetzt werden können.

Simulative Betrachtung der Teiltransparenz mit dem P1-Modell



Die hier vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) geförderten Forschungsprojekts, 400857558.

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Ansprechpartner
M. Sc. Johannes Rittmann
Pfaffenwaldring 32
johannes.rittmann@ikt.uni-stuttgart.de