

Flächige Dickenmessung von Beschichtungen durch Anwendung der Mehr-Puls-Thermografie

Daniel HOFFMANN¹, Henriette QUITTER², Martin BASTIAN¹, Giovanni SCHOBER¹

¹ SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

² Julius-Maximilians-Universität, Würzburg

Kontakt E-Mail: d.hoffmann@skz.de

Kurzfassung. Die aktive Thermografie stellt eine vielversprechende Technik für die Qualitätsüberwachung von Beschichtungen im industriellen Umfeld dar. Die in diesem Beitrag angewendete Mehr-Puls-Thermografie kann als Kombinationstechnik aus konventioneller Puls- und Lock-in-Thermografie angesehen werden und bietet bei der Schichtdickenmessung Vorzüge gegenüber den beiden konventionellen Thermografie-Methoden. Bei der Technik wird das Bauteil mit einer periodischen Blitzsequenz erwärmt und die Oberflächentemperatur zeitgleich mit einer Infrarotkamera gemessen. Nach einem Kalibriervorgang und durch pixelweise Auswertung von Phasen-Frequenz-Kurven kann aus dem Temperaturverhalten orts aufgelöst auf die Beschichtungsdicken des Bauteils rückgeschlossen werden. In diesem Beitrag wird die Mehr-Puls-Thermografie unter Verwendung einer neu vorgestellten Auswertetechnik an verschiedenen beschichteten metallischen Bauteilen demonstriert und der Einfluss der Kameraausrichtung zur Bauteiloberfläche auf das Messergebnis untersucht.

Einführung

Beschichtungen spielen für viele Industriezweige eine zentrale Rolle. Gewichts-optimierungen und Kosteneinsparungen durch effiziente Ressourcennutzung sind bei einer in Deutschland produzierten Lackmenge von jährlich über 2 Mio. t enorm wichtige Faktoren für die Lackindustrie und setzen voraus, dass möglichst dünne Schichten und eine homogene Dickenverteilung vorliegen [1]. Gleichzeitig werden immer größere Anforderungen an die Beschichtungsmaterialien gestellt und die Bauteilgeometrien werden stetig komplexer, wodurch die Lack- und Beschichtungsindustrie kontinuierlich größeren Herausforderungen ausgesetzt ist. Die Ermittlung der Dicke von aufgetragenen Schichten ist hierbei eine wesentliche Voraussetzung – sowohl zur Kontrolle bereits während der Produktion als auch, um eine Veränderung während des Bauteilbetriebes durch z. B. Abrieb bzw. Korrosion zu überwachen. Da die Bauteilbeschichtung häufig am Ende der Prozesskette steht, ist der wirtschaftliche Schaden bei fehlerhaft beschichteten Bauteilen aufgrund der fehlenden Möglichkeit bzw. des hohen Aufwands einer Reparatur meist sehr groß. Zur Überwachung der Schichtdicke haben sich bereits verschiedenste Messtechniken im industriellen Umfeld etabliert. Einen immer größeren Anteil nehmen hierbei zerstörungsfreie Messmethoden ein, wozu auch die aktive Thermografie zählt, die eine attraktive Technik darstellt, weil große Flächen mit mehreren Quadratmetern in verhältnismäßig kurzer Messzeit lokal aufgelöst und



berührungslos gemessen werden können [2]. In diesem Beitrag wird die sog. Mehr-Puls-Thermografie für die flächige Schichtdickenmessung eingesetzt, die bereits in früheren Publikationen beschrieben wurde, und ein neuer Ansatz zur Auswertung von thermografischen Daten vorgestellt [3].

1. Grundlagen

1.1 Mehr-Puls-Thermografie

Die am weitesten verbreiteten thermografischen Verfahren sind die Lock-in- und die Puls-Thermografie. Bei der Lock-in-Thermografie wird das Bauteil meist intensitätsmoduliert über einen längeren Zeitraum periodisch erwärmt und zeitgleich das Temperaturverhalten an der Bauteiloberfläche mit einer Infrarot (IR)-Kamera untersucht [4]. Resultierende Thermogramme werden mittels einer diskreten Fourier-Analyse ausgewertet, um Amplituden- bzw. Phasenwerte frequenzselektiv darzustellen [5, 6]. Im Gegensatz dazu wird das Bauteil bei der Puls-Thermografie über einen oder mehrere energieintensive Pulse erwärmt und Unterschiede im Abkühlverhalten mit der IR-Kamera detektiert [4]. Für die Puls-Thermografie werden Auswertetechniken sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich eingesetzt. Im Zeitbereich werden z. B. lokal auftretende Temperatur-Unterschiede ermittelt, die auch Rückschlüsse auf die Tiefenlage einer Grenzfläche im Bauteil zulassen. Bei einer Auswertung im Frequenzbereich werden, ähnlich der Lock-in-Thermografie, Amplituden- und Phasenbilder frequenzabhängig generiert.

Entscheidende Vorteile der konventionellen Lock-in-Thermografie sind das hohe Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und der verhältnismäßig geringe Einfluss von äußeren Störfaktoren. Von Nachteil sind dagegen die meist lange Messdauer und die Beschränkung auf eine auswertbare Frequenz und damit Tiefenlage. Dadurch wird ein Vorwissen zur Schichtdicke vorausgesetzt, um mehrere aufeinanderfolgende Messungen zu vermeiden. Die als Anregungsquellen oftmals verwendeten Halogenstrahler sind außerdem relativ träge, wodurch die Höhe der Anregungsfrequenz limitiert ist, während die ebenfalls eingesetzten Laser meist kostenintensiver sind und eine flächige Anregung schwer möglich ist. Die Puls-Thermografie zeichnet sich durch eine i. d. R. deutlich kürzere Messdauer und damit Inlinefähigkeit sowie das multifrequente Pulssignal aus, wodurch unterschiedliche Dickenbereiche betrachtet werden können, allerdings auch eine erhebliche Verringerung des SNR resultiert. Bei der Puls-Thermografie wird außerdem meist mit einem einzigen energiereichen Lichtblitz angeregt, was zu einer stärkeren Bauteilerwärmung führt, die Kunststoffe und dünne temperaturempfindliche Beschichtungen nachhaltig schädigen kann [7]. Bei einer Auswertung im Zeitbereich sind die Ergebnisse zudem verhältnismäßig stark von Störeinflüssen wie einer inhomogenen Erwärmung, schwankenden Umgebungstemperaturen oder einem lokal variierenden Emissionsgrad abhängig [8].

Bei der in diesem Beitrag angewendeten Mehr-Puls-Thermografie wird das zu untersuchende Bauteil mittels einer periodischen Pulssequenz angeregt, wodurch sich insbesondere in Hinblick auf die Schichtdickenmessung Vorzüge im Vergleich zu den konventionellen Techniken ergeben. Aufgrund des pulsförmigen Signals sind verschiedene Frequenzkomponenten auswertbar, die durch die periodische Abfolge mit definiertem Pulsabstand zur Steigerung des SNR stärker gewichtet werden können. Die sägezahnähnliche Form des thermischen Messsignals führt bei periodischer Anregung zusätzlich auch zu einer Ausprägung der Frequenzen aller harmonischen Vielfachen. Dadurch sind auch bei größeren Pulsabständen, die z. B. bei thermisch sensiblen Materialien notwendig sind, hohe Frequenzen auswertbar und eine Schichtdickenberechnung über ganze Phasen-Frequenz-Kurven möglich (vgl. Abschnitt 4.1). Mit den eingesetzten Anregungstechniken können

außerdem Pulssequenzen mit hoher Frequenz im Hertz-Bereich realisiert werden. Je nach Anwendungsfall und -anforderungen können somit die Messdauer, die thermische Beanspruchung und das SNR flexibel über z. B. die Einzelpulsintensität, die Pulsanzahl und den Pulsabstand angepasst werden [7]. Durch die Auswertung der Phaseninformation kann hierbei die Beeinflussung des Resultats durch Stör- bzw. Umgebungseinflüsse vermieden werden. In zahlreichen Publikationen wird außerdem auf weitere potenzielle Vorteile einer Mehr-Puls-Thermografie in Form einer effizienteren Energieeinkopplung bei der Prüfung [9], einer Linearisierung der erzeugten Wellen in longitudinale Richtung [10] und einer Beeinflussung der Frequenzkomponenten des Signals [11, 12] hingewiesen.

1.2 Schichtdickenmesstechniken

Grundlegend lassen sich Techniken zur Schichtdickenbestimmung in zerstörende und zerstörungsfreie Messverfahren untergliedern. Zu den am häufigsten eingesetzten Methoden zählen die Wirbelstrom-Technik und das magnetinduktive Verfahren, bei denen die Schichtdicke auf metallischen Grundmaterialien gemessen werden kann. Hierbei wird ein magnetisches Wechselfeld von einer Sonde erzeugt, die auf der Beschichtung positioniert wird. Abhängig vom Abstand der Sonde zum Grundmaterial verändert sich das Magnetfeld, wodurch Rückschlüsse über die Schichtdicke möglich sind [13, 14]. Bei kapazitiven Techniken hingegen wird die Schichtdicke von isolierenden Beschichtungen auf elektrisch leitendem Substrat über eine Veränderung der elektrischen Kapazität gemessen [14]. Bei Ultraschall-Verfahren ebenso wie bei den Terahertz- oder Mikrowellen-Techniken wird i. d. R. die Laufzeit oder die Amplitude der Schallwellen bzw. der Strahlung für die Ermittlung der Schichtdicke genutzt [15, 16]. Bei den bisher genannten Techniken kann die Schichtdicke punktuell bestimmt werden. Auf Röntgenstrahlung basierende Messtechniken sind beispielsweise die energiedispersive Röntgenfluoreszenz-analyse (RFA), bei der die emittierende Röntgenfluoreszenzstrahlung nach einer Bestrahlung des Bauteils genutzt wird, oder die Röntgenreflektometrie (XRR), bei der anhand der reflektierten Röntgenstrahlung die Schichtdicke ermittelt werden kann [17, 18]. Weiterhin bestehen noch im optischen Spektralbereich messende Verfahren wie die Weißlichtinterferometrie oder konfokal-chromatische Verfahren, die bei transparenten Beschichtungen eingesetzt werden können [19, 20]. Bei photothermischen bzw. thermografischen Verfahren wird der betrachtete Prüfkörper gezielt durch z. B. optische Strahlung erwärmt. Das thermische Verhalten an der Bauteiloberfläche gibt Aufschluss über die Laufzeit der thermischen Wellen und damit über die Schichtdicke [21, 22, 23].

2. Prüfkörper

Es wurden Untersuchungen an drei unterschiedlichen Prüfkörpern durchgeführt, die jeweils eine variierende Schichtdickenverteilung aufweisen. Schematische Darstellungen mit den jeweiligen Schichtnummern und Fotos der Prüfkörper sind in Abb. 1 aufgeführt. Zur Herstellung von Probe A wurde ein 13 mm dicker Aluminiumblock mit Fräsungen unterschiedlicher Tiefe versehen und schichtweise mit Acryllack befüllt. Die Schichtdicke nimmt von ca. 40 μm bis 650 μm stufenweise zu. Die Oberfläche wurde im Anschluss abgeschliffen und poliert, um eine homogene Topografie zu gewährleisten. Probe B wurde durch Beschichtung einer Stahlplatte mit wasserbasierten Acryllack von der Fa. Chemische Industrie Erlangen GmbH hergestellt. Die Schichtdicke nimmt keilförmig von ca. 20 μm bis 330 μm zu. Bei Probe C wurde der Lack schichtweise auf die Oberfläche einer Stahlplatte appliziert, sodass stufenweise zunehmende Schichtdicken von ca. 35 μm bis 250 μm realisiert werden konnten. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Prüfkörper.

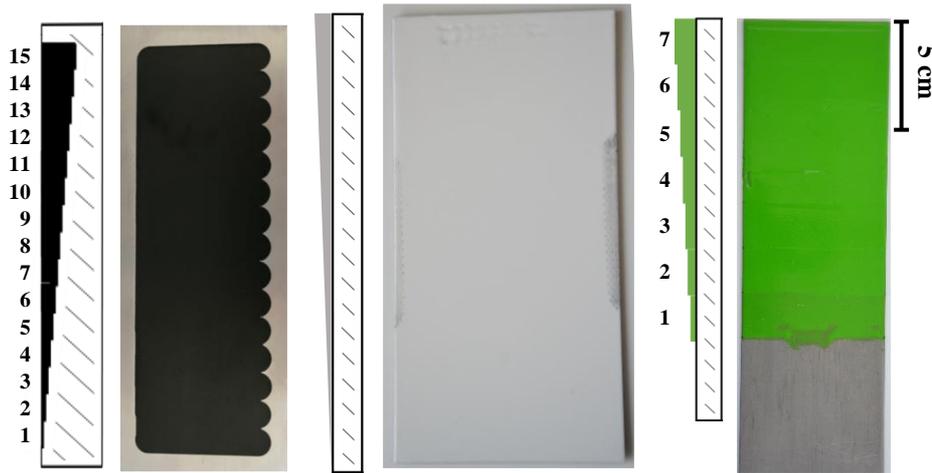


Abb. 1. Schematischer Querschnitt und Foto (jeweils Draufsicht) des Prüfkörpers A (links), B (Mitte) und C (rechts) mit Angabe der jeweiligen Schichtnummer

Tabelle 1. Übersicht über Prüfkörper

Bezeichnung	Substrat	Beschichtungsmaterial	Charakteristika
Probe A	Aluminium	Acryllack	matt, schwarz
Probe B	Stahl	Acryllack	matt, hellgrau
Probe C	Stahl	Alkydharzlack	glänzend, grün

3. Messaufbau und -durchführung

Der verwendete Thermografie-Messaufbau besteht aus der Blitzeinheit VH3-6000 (Hensel-Visit GmbH & Co. KG) zur Pulsanregung, einer IR-Kamera zur Datenaufnahme und einer Halterung zur Fixierung der Probe (vgl. Abb. 2). Es kamen die IR-Kamera SC5500 (FLIR Systems Inc.), die von der Fa. edevis GmbH zur Verfügung gestellt wurde, und die IR-Kamera VarioCam hr (InfraTec GmbH) zum Einsatz. Für die Anregung wurde eine Pulssequenz von 6 Pulsen im zeitlichen Abstand von 5 s verwendet, wobei eine Pulsenergie von ca. 1600 J gewählt wurde. Die Aufnahmen erfolgten mit einer Aufnahme­frequenz von 50 Hz und die Probekörper wurden im Abstand von ca. 50 cm zur IR-Kamera und ca. 40 cm zur Blitzlampe platziert. Die Schichtdicken der Prüfkörper wurden für den Kalibriervorgang und zur Verifizierung der gemessenen Schichtdicken zusätzlich mit dem Messgerät Leptoskop 2042 der Fa. Karl Deutsch GmbH bestimmt.

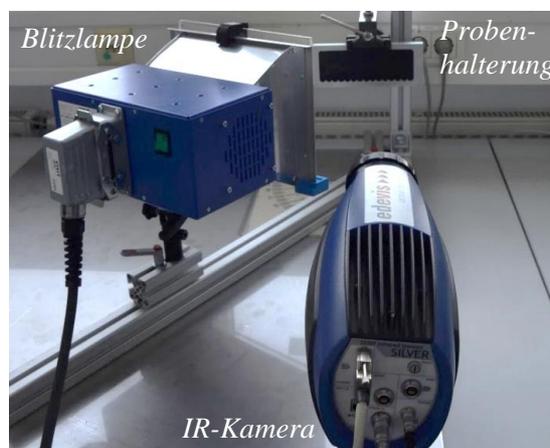


Abb. 2. Messaufbau bestehend aus der Blitzeinheit VH3-6000, der IR-Kamera SC5500 und einer Probenhalterung, in der exemplarisch Prüfkörper A fixiert ist

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Auswertetechnik

In Abb. 3 ist exemplarisch das aufgenommene Temperatur-Zeit-Diagramm eines Messpunktes bei periodischer Anregung der Probe A mit 6 Blitzen im Abstand von 5 s aufgeführt. Wie bereits in Abschnitt 1 beschrieben, können daraus über eine Fourier-Analyse (FFT) die frequenzabhängigen Amplituden- und Phasenwerte ermittelt werden. Das resultierende Amplitudenspektrum ist in Abb. 4 (oben) dargestellt und zeigt, dass sowohl bei der Grundfrequenz (200 mHz) als auch bei deren Vielfachen lokale Maxima aufgrund des sägezahnähnlichen thermischen Messsignals vorliegen. Bei diesen Frequenzen kann demnach der größte Informationsgewinn erzielt werden, wenngleich entsprechend der Puls-Phasen-Thermografie auch andere Frequenzen untersucht werden können [12]. Für die Schichtdickenberechnung können folglich nicht nur die Phasenwerte bei der Grundfrequenz, sondern auch die Werte bei den Frequenzen aller harmonischen Vielfachen berücksichtigt werden. Mathematisch lässt sich der Zusammenhang zwischen Phase, Frequenz und Schichtdicke folgendermaßen beschreiben [25, 26]:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{-2R \cdot e^{-2\frac{d}{\mu}} \cdot \sin\left(2\frac{d}{\mu}\right)}{1 - \left(R \cdot e^{-2\frac{d}{\mu}}\right)^2} \right) - 45^\circ \quad (1)$$

In der mathematischen Beschreibung wird vereinfachend von einem Ein-Schicht-Modell und einer Ausbreitung der thermischen Wellen ausschließlich in longitudinaler Richtung mit einer einheitlichen Temperaturleitfähigkeit und einem stetigen lokalen und zeitlichen Temperaturverhalten ausgegangen. Neben der Schichtdicke d hängt die Phase vom Reflexionskoeffizienten R und der thermischen Eindringtiefe μ ab. R lässt sich durch die thermischen Effusivitäten des Grund- und Beschichtungsmaterials beschreiben, die wiederum von Materialkennwerten wie der Temperaturleitfähigkeit α , der spez. Wärmekapazität und der Dichte abhängen, während die thermische Eindringtiefe von α und der Auswertefrequenz f abhängt [4, 27]:

$$R = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \quad (2)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f}} \quad (3)$$

Eine Darstellung der Phasenwerte über die Frequenzen aller Harmonischen resultiert in den Phasen-Frequenz-Kurven, die in Abb. 4 (unten) für unterschiedliche Schichtdicken der Probe A dargestellt sind. Entsprechend dem in Gleichung 1 beschriebenen Zusammenhang fällt die Phase mit zunehmender Frequenz bei größeren Schichtdicken (Schicht 8) schneller ab als bei kleineren Schichtdicken (Schicht 2). Durch einen Fit dieser Phasen-Frequenz-Kurven kann die Schichtdicke des jeweiligen Pixels bestimmt werden, sofern die materialabhängigen Parameter R und α bekannt sind. Diese lassen sich unter Kenntnis der einfließenden Materialparameter berechnen (vgl. Gleichung 2 und 3), können aber auch durch einen zusätzlichen Kalibrierschritt bestimmt werden, indem Schichtdicken über eine Referenzmessmethode bestimmt werden. Für Letzteres hat es sich als zielführend erwiesen, einen Messbereich mit maximaler Schichtdicke, einen mit minimaler Schichtdicke und einen

mit mind. einer Schichtdicke, die sich dazwischen befindet, zu wählen. Anschließend können die Schichtdicken und Phasen-Frequenz-Kurven für diese Messbereiche ermittelt werden und R und α durch Einsetzen der Werte in Gleichung 1 bestimmt werden.

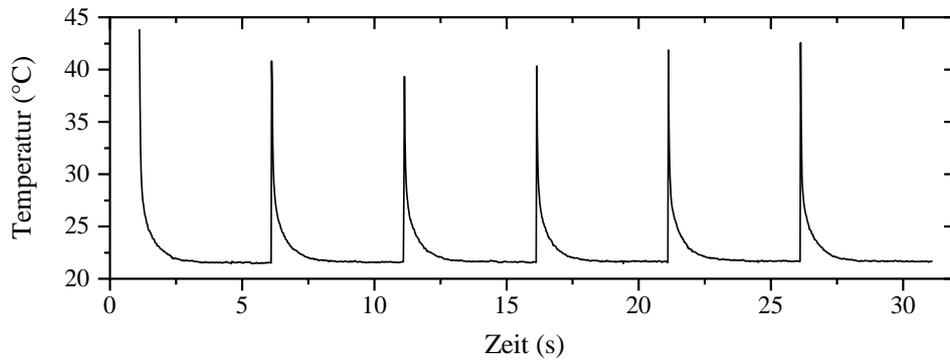


Abb. 3. Temperatur-Zeit-Diagramm bei Anregung der Probe A mit 6 Pulsen im Pulsabstand von 5 s

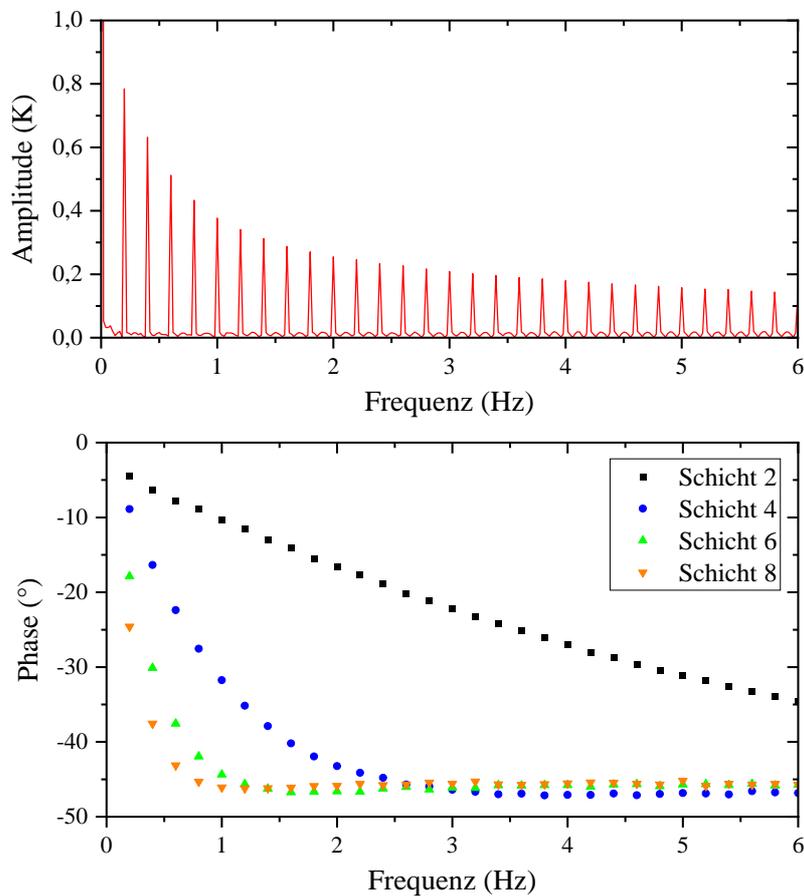


Abb. 4. Durch eine FFT generiertes Amplitudenspektrum (oben) und Phasen-Frequenz-Verlauf bei den Auswertefrequenzen für unterschiedliche Schichten der Probe A (unten)

4.2 Flächige Schichtdickenmessung

Die in Abschnitt 4.1 beschriebene Auswertetechnik wurde nachfolgend eingesetzt, um die Schichtdicke der Proben A und B flächig zu quantifizieren. Die Parameter R und α wurden hierbei über einen zusätzlichen Kalibrierschritt bestimmt, indem drei (Probe A) und fünf (Probe B) Messbereiche mit unterschiedlicher Schichtdicke definiert und die Schichtdicken aus Referenzmessungen den jeweiligen Phasen-Frequenz-Kurven zugeordnet wurden. Unter Kenntnis von R und α konnten anschließend die Schichtdicken jedes Pixels durch einen Fit der entsprechenden Phasen-Frequenz-Kurve bestimmt werden. Abb. 5 zeigt die daraus resultierenden Schichtdickenbilder, in denen die vorliegenden Schichtdickenverteilungen deutlich erkennbar sind. Um die ermittelten absoluten Werte zu verifizieren, wurden die Schichtdickenwerte entlang der Messlinie aus Abb. 5 den Referenzwerten gegenübergestellt (vgl. Abb. 6). Die Schichtdicken beider Proben stimmen größtenteils gut überein. Lediglich zu größeren Schichtdicken hin nimmt die Abweichung zu (ab ca. $550 \mu\text{m}$ bei Probe A und ab ca. $260 \mu\text{m}$ bei Probe B). Die Schichtdicken unterscheiden sich dabei bis zu maximal 10 % von den Referenzwerten. Diese größere Abweichung der Messwerte bei größeren Schichtdicken kann zum einen auf die im mathematischen Modell getroffenen Vereinfachungen zurückgeführt werden. Insbesondere die vereinfachte Annahme, dass sich thermische Wellen ausschließlich in z -Richtung und nicht lateral ausbreiten, führt bei größeren Schichtdicken zu einem höheren Fehler und könnte die zunehmende Abweichung bei höheren Schichtdicken begründen. Zum anderen könnten aber auch fehlerbehaftete Referenzwerte oder generelle Messungenauigkeiten mögliche Ursachen für die erkennbaren Schichtdickenabweichungen sein.

Um die Grenzen und im Allgemeinen die Robustheit der Auswertetechnik, insbesondere im Hinblick auf die Auswertung von höheren Frequenzen und auf potenzielle Störeinflüsse, zu evaluieren, sind noch weitere umfassendere Untersuchungen am SKZ geplant.

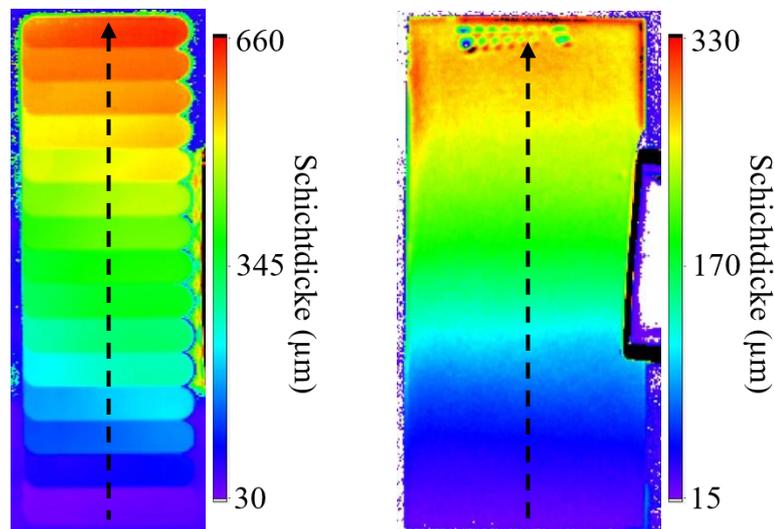


Abb. 5. Berechnetes Schichtdickenbild der Probe A (links) und Probe B (rechts). Die gestrichelten Linien wurden für die nachfolgende Linienauswertung verwendet. Die Aufnahmen wurden mit der SC5500 durchgeführt.

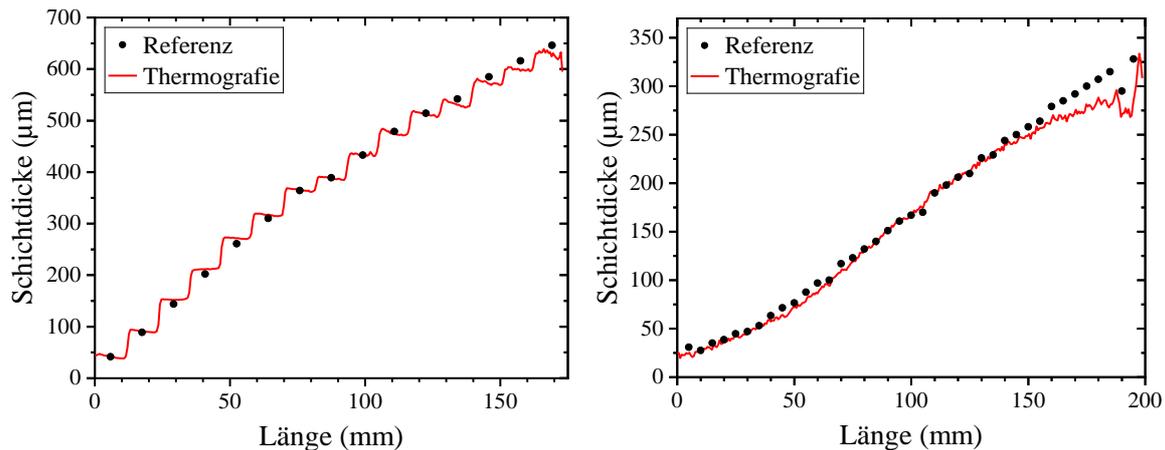


Abb. 6. Durch Mehr-Puls-Thermografie bestimmte Schichtdickenverläufe sowie durch Referenzmethoden bestimmte Schichtdicken entlang der in Abb. 5 dargestellten Messlinie für Probe A (links) und Probe B (rechts). Die Referenzierung fand mit dem Leptoskop 2042 statt.

Weiterhin wurden experimentelle Untersuchungen an Probe C durchgeführt, bei denen die Ausrichtung der IR-Kamera zur Oberfläche gezielt variiert wurde, um den Einfluss der Bauteilorientierung zur IR-Kamera und damit auch die Einsetzbarkeit der Messtechnik bei komplexeren Bauteilen zu evaluieren und um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu untersuchen. Abb. 7 zeigt die resultierenden Schichtdickenbilder bei Ausrichtungswinkeln zur Oberfläche von 30° bis 80° . Es hat sich gezeigt, dass Schichtdickenunterschiede relativ unabhängig von der Kameraausrichtung visualisiert werden können. Auch bei einer Ausrichtung von 80° zur Bauteiloberfläche sind die Schichtdickenunterschiede noch deutlich erkennbar, wenngleich die absoluten Werte von Messung zu Messung lokale leichte Unterschiede aufweisen und ein geringfügig höheres Rauschniveau bei hohen Ausrichtungswinkeln vorliegt. Die leichte Abweichung absoluter Werte könnte hier aus Unterschieden im Messaufbau und damit einhergehenden Unterschieden im Erwärmungs- und Abstrahlverhalten resultieren. Eine Zunahme des Rauschniveaus mit größerem Winkel könnte hingegen auf die Winkelabhängigkeit des Emissionsgrads oder auf eine entsprechend dem Lambertschen Kosinuszgesetz geringere IR-Strahlungsstärke bei flacheren Abstrahlwinkeln zurückgeführt werden. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass bei einem größeren Ausrichtungswinkel ein Kamerapixel Infrarotstrahlung aus einem größeren Bereich des Bauteils aufnimmt und damit einen mittleren Schichtdickenwert für einen größeren Bereich liefert, wodurch die laterale Auflösung sinkt und lokale Inhomogenitäten möglicherweise nicht detektiert werden.

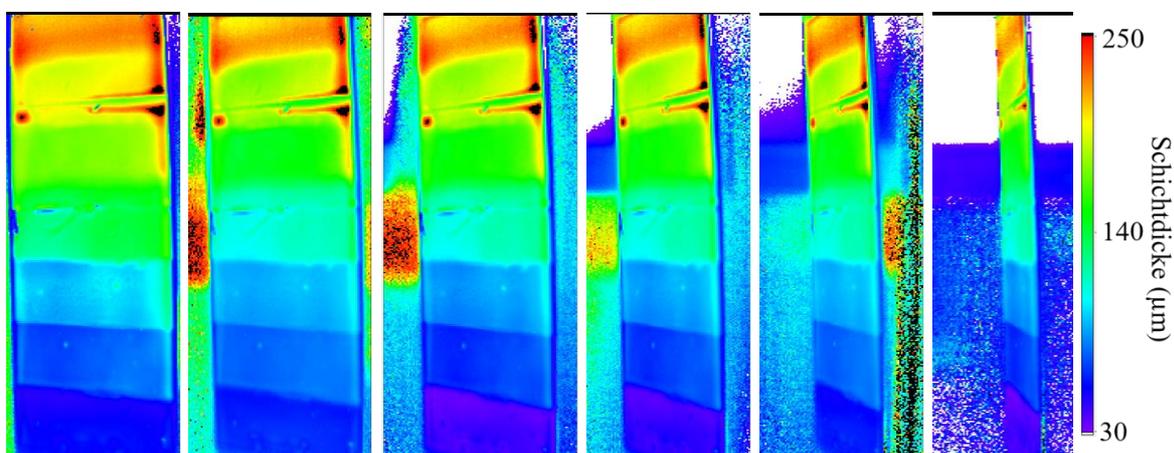


Abb. 7. Schichtdickenbilder der Probe C bei variierender Ausrichtung der IR-Kamera zur Probe (v.l.n.r.: 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80°). Die Aufnahmen wurden mit der VarioCam hr durchgeführt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde der Einsatz der Mehr-Puls-Thermografie zur flächigen Quantifizierung von Schichtdicken anhand von drei mit Acryl- und Alkydharzlack beschichteten metallischen Bauteilen mit Schichtdicken im zwei- und dreistelligen Mikrometerbereich demonstriert. Zur Berechnung der absoluten Schichtdickenwerte wurde eine neue Auswertetechnik vorgestellt, bei der schichtdickenabhängige Phasen-Frequenz-Kurven ermittelt werden und eine Kalibrierung und Umrechnung in Schichtdicken auf Basis eines in der Literatur beschriebenen mathematischen Modells erfolgt. In den resultierenden Ergebnisbildern konnten Schichtdickenunterschiede klar, annähernd unabhängig von der Ausrichtung der IR-Kamera und reproduzierbar visualisiert werden. Die absoluten Schichtdickenwerte, die nach erfolgtem Kalibrierschritt mit Referenzdickenwerten bestimmt werden konnten, stimmten insbesondere bei verhältnismäßig kleinen Schichtdicken sehr gut mit den aus Referenzmessungen ermittelten Schichtdickenwerten überein, lediglich bei größeren Schichtdicken wurde eine zunehmende Abweichung der Schichtdickenwerte von bis zu 10 % festgestellt. Es hat sich gezeigt, dass die Mehr-Puls-Thermografie eine gute Möglichkeit zur flächigen, orts aufgelösten und zerstörungsfreien Dickenmessung von Beschichtungen bietet, die potenziell auch inline eingesetzt werden kann. Die vorgestellte Messmethodik soll im Zuge aktueller Forschungsvorhaben am Kunststoff-Zentrum – SKZ, einem Mitglied der Zuse-Gemeinschaft, an weiteren Bauteilen, insbesondere auch mit kleineren Schichtdicken, erprobt und für den industriellen Einsatz optimiert werden. Interessierte Unternehmen sind aufgerufen, im Rahmen kostenneutraler Untersuchungen an unternehmensspezifischen Bauteilen die Eignung des neuen Verfahrens zu bewerten.

Danksagung

Die Forschungsvorhaben 21678 N und 21365 N von der Forschungsvereinigung „Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e. V.“ werden über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken dem BMWK für die Bereitstellung der finanziellen Projektmittel.

Referenzen

- [1] *Die deutsche Lack- und Druckfarbenindustrie in Zahlen 2021*, Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e. V., 2021
- [2] N. Bauer: *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie: Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*, Fraunhofer-Allianz Vision, 2005
- [3] D. Hoffmann, et al.: *Optimierung der Mehr-Puls-Thermografie für flächige Schichtdickenmessungen*, DGZfP-Jahrestagung, 2021
- [4] X. Maldague: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*, Wiley-Verlag, 2001
- [5] D. Wu: *Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*, Dissertationsschrift, Universität Stuttgart, 1996
- [6] A. Gleiter, C. Spießberger und G. Busse: *Tiefenaufgelöste Defekterkennung mit optisch angeregter Lockin-Thermografie*, Thermografie-Kolloquium, 2007
- [7] G. Schober, et al.: *Multiple flash thermography for non-destructive testing of lightweight components*, Proceedings of the IRS², AMA Conferences, 2017
- [8] F. Bernhard: *Thermografie, Handbuch der Technischen Temperaturmessung*, VDI-Buch, Springer-Verlag, 2014
- [9] R. Krankenhagen und C. Maierhofer: *Einzelblitz vs. Multiblitz – Blitzthermografie mit mehreren Blitzen*, Thermographie-Kolloquium, 2015

- [10] S. Neuhäusler, et al.: *Optimierung der Impuls-Thermografie – Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen*, Thermografie-Kolloquium, 2003
- [11] A. Ziadi, F. Galmiche und X. Maldague: *Pulse shaping in infrared thermography for nondestructive evaluation*, Review of scientific instruments 74.1, 411-3, 2003
- [12] X. Maldague, F. Galmiche und A. Ziadi: *Advances in pulse phase thermography*, Infrared Physics & Technology 43.3-5, 175-81, 2002
- [13] D. Stegemann: *Der Einsatz von Wirbelströmen für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*, DVS Media, 2010
- [14] W. Reimche und R. Duhm: *Zerstörungsfreie Prüfung und Bewertung von Beschichtungen*, Moderne Beschichtungsverfahren, 323-47, 2004
- [15] R. Lerch, G. Sessler und D. Wolf: *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*, Springer-Verlag, 2009
- [16] T. Hochrein und I. Alig: *Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung*, Vogel Business Media, 2011
- [17] V. Röbiger und B. Nensel: *Analyse von Schichten mit Röntgenfluoreszenz*, Jahrbuch Oberflächentechnik, 195–225, 2004
- [18] M. Krumrey, M Hoffmann und M. Kolbe: *Schichtdickenbestimmung mit Röntgenreflektometrie*, PTB Mitteilungen 115.3, 202, 2005
- [19] S.-W. Kim und G.-H. Kim: *Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry*, Applied Optics, 1999
- [20] F. Hirth: *Schichtdickenmessung an gedruckten Polymerschichtsystemen*, Dissertationsschrift, Technische Universität München, 2011
- [21] C. A. Bennett und R. R. Patty: *Thermal wave interferometry: A potential application of the photoacoustic effect*, Applied Optics 21.1, 49-54, 1982
- [22] K. Ramspeck, et al.: *In-line thermography for reliable hot spot detection and process control*, Energy Procedia 55, 133-40, 2014
- [23] S. Lindemann und R. Schaller: *Laser-angeregte Lockin-Thermografie zur zerstörungsfreien und berührungslosen Schichtdickenmessung von thermisch gespritzten Beschichtungen*, DGZfP-Jahrestagung, 2017
- [24] D. Hoffmann, M. Bastian und G. Schober: *New approach for layer thickness measurements of coatings using pulsed lock-in thermography*, QIRT-Journal, 2020
- [25] J. Y. Zhang, X. B. Meng und Y. C. Ma: *A new measurement method of coatings thickness based on lock-in thermography*, Infrared Physics & Technology 76, 655-60, 2016
- [26] C. A. Bennett und R. R. Patty: *Thermal wave interferometry: a potential application of the photoacoustic effect*, Applied Optics 21.1, 49-54, 1982
- [27] C. Spiessberger: *Merkmalsanalyse mit thermischen Wellen in der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung*, Dissertationsschrift, Universität Stuttgart, 2011