

Optimierung der Mehr-Puls-Thermografie für flächige Schichtdickenmessungen

Daniel HOFFMANN¹, Sebastian LULEI², Christian KOLB¹, Thomas HOCHREIN¹,
Martin BASTIAN¹, Giovanni SCHOBER¹

¹ SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

² Julius-Maximilians-Universität, Würzburg

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

Kurzfassung. Beschichtungen spielen heutzutage für viele Industriezweige eine zentrale Rolle. Dabei ist die Ermittlung der Dicke eine wesentliche Voraussetzung, sowohl zur Qualitätskontrolle 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 sehr groß. Neben einer Vielzahl an bereits existierenden meist nur punktuell einsetzbaren Schichtdickenmessverfahren kann die für viele Industrieanwendungen bereits etablierte aktive Thermografie für die Schichtdickenmessung eingesetzt werden, die als zerstörungsfreies, berührungsloses und flächig einsetzbares Messverfahren immer stärker in den Fokus rückt. Bei konventionellen thermografischen Verfahren findet die Erwärmung meist amplitudenmoduliert über Halogenstrahler oder mittels eines kurzen energieintensiven Lichtblitzes statt. Bei der in diesem Beitrag vorgeführten Mehr-Puls-Thermografie wird das Bauteil mit einer Sequenz von Blitzen thermisch angeregt. Dadurch kann eine geringere thermische Belastung des Bauteils und ein größeres und damit besseres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) im Vergleich zur konventionellen Puls-Thermografie sowie eine kürzere Messdauer und ein größerer auswertbarer Schichtdickenbereich im Vergleich zur Lock-in-Thermografie realisiert werden. Schichtdickenunterschiede werden hierbei über die Phaseninformation des thermischen Empfangssignals ermittelt. In diesem Beitrag wurde der flächige Einsatz der Mehr-Puls-Thermografie zur Messung von Schichtdicken im μm -Bereich anhand von Simulationen und experimentell demonstriert.

Einführung

Eine für die zerstörungsfreie Prüfung weit verbreitete Methode ist die aktive Thermografie, bei der das zu untersuchende Bauteil über Anregungsquellen erwärmt und die thermische Antwort meist mit einer Infrarotkamera gemessen wird. Bei der sog. **Lock-in-Thermografie** wird das Bauteil moduliert über einen längeren Zeitraum periodisch angeregt. Die zeitgleich gemessenen Temperaturdaten werden i. d. R. mittels einer diskreten Fourier-Analyse ausgewertet, um Amplituden- bzw. Phasenwerte frequenzselektiv darzustellen [1, 2]. Bei der konventionellen **Puls-Thermografie** wird das Bauteil hingegen über einen energieintensiven Puls kurzzeitig erwärmt und Unterschiede im Abkühlverhalten zur Ermittlung von Inhomogenitäten oder Fehlern untersucht [3]. Es stehen hierbei Auswertemöglichkeiten im Zeit- und Frequenzbereich zur Verfügung. Im Zeitbereich können z. B. lokal auftretende



Temperaturunterschiede Informationen zum Inneren des Bauteils liefern, wobei hierbei auch Rückschlüsse über die Tiefenlage von vorhandenen Grenzflächen gezogen werden können. Bei einer Auswertung im Frequenzbereich werden ähnlich der Lock-in-Thermografie Amplituden- und Phasenbilder frequenzselektiv generiert [4]. Bei einer Fourier-Analyse spielt für beide Methoden die thermische Eindringtiefe μ eine wichtige Rolle. Diese beschreibt die Tiefenreichweite der Wärmewellen und lässt sich unter Kenntnis der Temperaturleitfähigkeit des Materials α für eine Auswertefrequenz f wie folgt abschätzen [5, 6]:

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f}} \quad (1)$$

Für Messungen an Beschichtungen ist bei einer kleineren Schichtdicke entsprechend Gleichung 1 eine größere Auswertefrequenz nötig, die für Schichtdicken im unteren μm -Bereich im ein- bis zweistelligen Hertz-Bereich liegt [7, 8]. Entscheidende Vorteile der konventionellen Lock-in-Thermografie sind das hohe Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und der geringe Einfluss von Störfaktoren. Von Nachteil sind dagegen die verhältnismäßig lange Messdauer von mehreren Minuten und die Beschränkung auf eine auswertbare Frequenz und damit Tiefenlage (vgl. Gleichung 1), die ein Vorwissen zur Schichtdicke voraussetzt, um mehrere aufeinanderfolgende Messungen zu vermeiden. Die konventionelle Puls-Thermografie zeichnet sich durch eine i. d. R. deutlich kürzere Messdauer und damit ein größeres Potential zur Inlinemessung sowie das multifrequente Pulssignal aus, wodurch entsprechend Formel 1 unterschiedliche Dickenbereiche mit einer Messung untersucht werden können. Dabei kann allerdings auch eine erhebliche Verringerung des SNR einhergehen. Bei existierenden Puls-Thermografie-Systemen wird außerdem mit einem einzigen energiereichen Lichtblitz angeregt, was zu einer stärkeren Bauteilerwärmung führt, die Kunststoffe und dünne temperaturempfindliche Beschichtungen nachhaltig schädigen kann. Konventionelle Puls-Thermografie-Messungen sind außerdem meist stark von Störeinflüssen wie einer inhomogenen Erwärmung, schwankenden Umgebungstemperaturen oder einem lokal variierenden Emissionsgrad abhängig [9]. Die Mehr-Puls-Thermografie stellt eine Kombination der beiden Methoden dar, mit der Vorzüge der beiden konventionellen Techniken vereint und Limitationen überwunden werden können. Nachfolgend wird der Einsatz dieser Technik für Schichtdickenmessung vorgestellt und die Ermittlung der Schichtdicke anhand von Simulationen und experimentellen Untersuchungen vorgeführt.

1. Dickenmessung von Beschichtungen

1.1 Etablierte zerstörungsfreie Messmethoden

Grundlegend lassen sich Techniken zur Schichtdickenbestimmung in zerstörende und zerstörungsfreie Messverfahren untergliedern. Nachfolgend werden bereits etablierte zerstörungsfreie Prüfverfahren kurz dargestellt. Zu den am häufigsten eingesetzten Methoden zählen die **Wirbelstrom-Technik** und das **magnetinduktive Verfahren**, bei denen die Schichtdicke durch Veränderung elektromagnetischer Felder gemessen werden kann [10, 11]. Bei **kapazitiven Techniken** hingegen wird die Schichtdicke von isolierenden Beschichtungen auf elektrisch leitendem Substrat über eine Veränderung der elektrischen Kapazität gemessen [11]. 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 [12, 13]. Bei den bisher genannten Techniken kann die Schichtdicke punktuell bestimmt werden. Für eine flächige

Messung der Schichtdicke ist somit eine kosten- und zeitintensive Abrasterung des Bauteils notwendig. Auf **Röntgen** basierende Messtechniken sind beispielsweise die energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (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 [14, 15]. Zuletzt bestehen noch im **optischen Spektralbereich** messende Verfahren, wie die Weißlichtinterferometrie oder konfokalchromatische Verfahren, die bei transparenten Beschichtungen eingesetzt werden können [16, 17]. Bei **photothermischen bzw. thermografischen Verfahren** wird der betrachtete Prüfkörper gezielt durch z. B. optische Strahlung erwärmt und das thermische Verhalten an der Bauteiloberfläche gibt Aufschluss über die Schichtdicke. Diese Technik bietet sich für Schichtdickenmessung insbesondere dadurch an, weil große Flächen in verhältnismäßig kurzer Messzeit lokal aufgelöst und berührungslos gemessen werden können, wenn z. B. Blitzlampen oder LED-Arrays zur Anregung und IR-Kameras zur Datenaufnahme eingesetzt werden. Bei der Produktion erlaubt zudem eine direkte Inline-Einsetzbarkeit bestmögliche Voraussetzungen zur Prozessüberwachung [18, 19].

1.2 Mehr-Puls-Thermografie

In der Literatur wurden in den letzten Jahren bereits einige Möglichkeiten vorgestellt, Schichtsysteme mit Thermografie zu untersuchen [7, 8, 20]. In diesem Beitrag wird ein neuer thermografischer Ansatz zur Schichtdickenmessung vorgestellt, die sog. **Mehr-Puls-Thermografie**, bei der das Bauteil periodisch mit einer Sequenz von Pulsen angeregt wird [21]. Durch die Mehr-Puls-Anregung mit Blitztechnik kann ein höheres SNR und eine geringere thermische Belastung im Vergleich zur konventionellen Puls-Thermografie erzielt werden [22]. Gleichzeitig werden größere Anregungsfrequenzen als bei der konventionellen Lock-in-Thermografie mit Halogenstrahlern ermöglicht und die Systemkosten sind im Verhältnis zur Laseranregung gering.

Die thermografischen Messdaten werden, ähnlich wie bei der Puls-Phasen-Thermografie (PPT), über eine Fourier-Transformation in Amplituden- und Phasenwerte überführt [23]. Über den Pulsabstand können gezielt einzelne Frequenzanteile stärker gewichtet werden, um bei der Auswertung dieser Frequenzen ein höheres SNR zu erzielen. In Abb. 1 ist exemplarisch das Temperatur-Zeit-Diagramm eines Messpunktes bei periodischer Anregung mit 6 Blitzen im Abstand von 1,6 s aufgeführt. Da sich der Informationsgehalt je Frequenz insbesondere aus den Amplitudenwerten ablesen lässt, ist in Abb. 1 ebenso das Amplitudenspektrum dargestellt. Die sägezahnähnliche Form des thermischen Messsignals führt bei periodischer Anregung zusätzlich zu einer Ausprägung der Frequenzen der Oberschwingungen (vgl. Abb. 1). Dadurch sind auch bei größeren Pulsabständen, die z. B. bei thermisch sensiblen Materialien notwendig sind, hohe Frequenzen auswertbar, um dünne Schichten zu untersuchen. Entsprechend des Beispiels in Abb. 1 kann in diesem Fall bei einer Frequenz von 600 mHz und bei den entsprechenden Harmonischen der größte Informationsgewinn erzielt werden, wenngleich entsprechend der PPT auch andere Frequenzen untersucht werden können.

Je nach Anwendungsfall und Anforderungen können somit die Messdauer, die thermische Beanspruchung und das SNR flexibel über z. B. die Einzelpulsintensität und die Pulsanzahl angepasst werden [22]. Durch die Auswertung der Phaseninformation kann hierbei die Beeinflussung des Resultats durch Stör- bzw. Umgebungseinflüsse vermieden werden. In mehreren Publikationen wird außerdem auf weitere potenzielle Vorteile einer Mehr-Puls-Thermografie in Form einer effizienteren Energieeinkopplung bei der Prüfung, einer Linearisierung der erzeugten Wellen in longitudinale Richtung und einer Beeinflussung der Frequenzkomponenten des Signals hingewiesen [24, 25, 26].

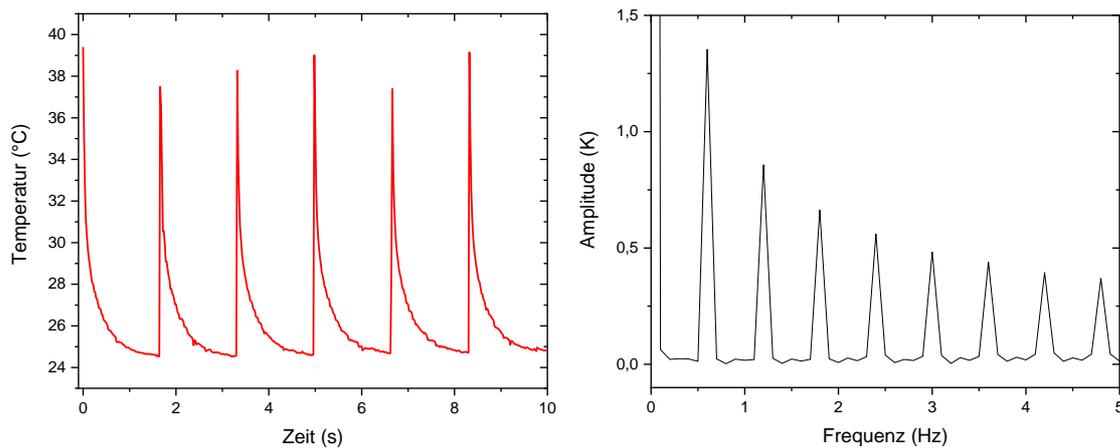


Abb. 1. Temperaturverlauf über die Zeit (links) und durch FFT generiertes Amplitudenspektrum (rechts) der Probe A (siehe Tabelle 1)

2. Prüfkörper

Für die im Beitrag beschriebenen Untersuchungen wurden Probekörper hergestellt, die stufenweise zunehmende Schichtdicken aufweisen. Für Probe A wurde eine 13 mm dicker Aluminiumblock mit Fräsungen unterschiedlicher Tiefe versehen und schichtweise mit Lack befüllt (vgl. Abb. 2 aufgeführt ist). Die Frästiefen entsprechen den Schichtdicken, die in Tabelle 3 aufgeführt sind. Die Oberfläche wurde im Anschluss abgeschliffen und poliert, um eine homogene Topografie zu gewährleisten. Probe B wurde durch schichtweise Applikation des Lacks auf die Oberfläche einer Stahlplatte hergestellt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Probekörper.

Tabelle 1. Übersicht über Probekörper

Bezeichnung	Substrat	Beschichtungsmaterial	Charakteristika
Probe A	Aluminium	Acryllack	glänzend, blau
Probe B	Stahl	Alkydharzlack	glänzend, grün

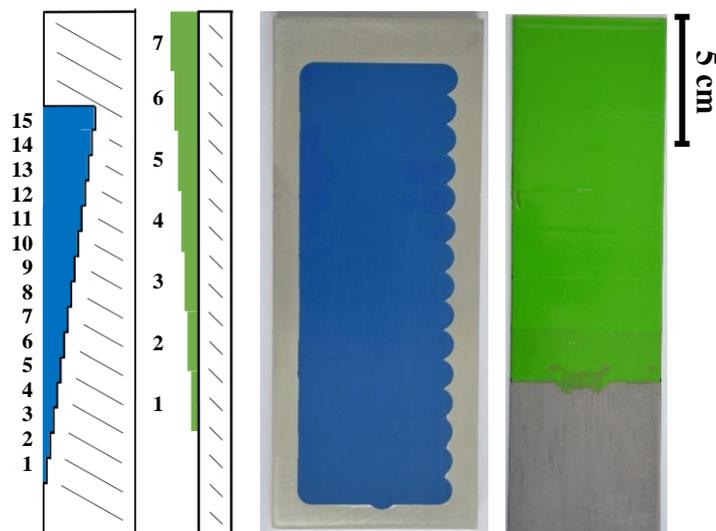


Abb. 2. Schematischer Querschnitt der Probekörper A (links) und B (Mitte links) mit Angabe der jeweiligen Schichtnummer sowie ein Foto der Probe A (Mitte rechts) und der Probe B (rechts) (jeweils Draufsicht)

3. Messaufbau

Der Messaufbau besteht aus der Blitzeinheit VH3-6000 (Hensel-Visit GmbH & Co. KG, Würzburg) zur Pulsanregung, der IR-Kamera VarioCam hr (InfraTec GmbH, Dresden) zur Datenaufnahme und einer Halterung zur Fixierung der Probe (vgl. Abb. 3). Für die Erwärmung der Prüfkörper wurden Blitze mit einer Pulsenergie von bis zu 1.650 J ausgelöst. Die Pulsanzahl wurde zwischen einem Puls und sechs Pulsen variiert. Ebenso wurde der Pulsabstand Δt je nach Auswertefrequenz ($\Delta t = 1/f$) angepasst und bei allen Messungen wurde eine Aufnahme­frequenz von 50 Hz verwendet. Die Probekörper wurden im Abstand von 56 cm zur IR-Kamera und 35 cm zur Blitzlampe platziert.

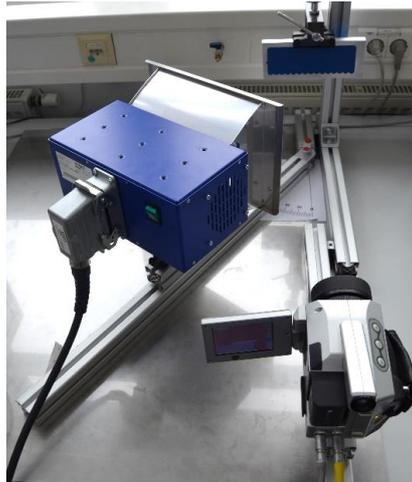


Abb. 3. Messaufbau bestehend aus der Blitzeinheit VH3-6000, der IR-Kamera VarioCAM hr und einer Probenhalterung, in der exemplarisch Probe A fixiert ist

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ermittlung der Materialeigenschaften und der Schichtdicke

Für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden zunächst relevante Kennwerte (Dichte, Temperaturleitfähigkeit) der verwendeten Materialien bestimmt. Die Dichte der Beschichtungsmaterialien wurde über das Eintauchverfahren nach ISO 1183-1 ermittelt und die Temperaturleitfähigkeit des Acryllacks konnte über eine Laser-Flash-Analyse (Netzsch LFA 447) bestimmt werden. Die Materialkennwerte für Aluminium konnten dem Datenblatt und die des Stahls der Literatur entnommen werden [27]. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die ermittelten Materialdaten. Auf die Schichtdicke der Probe A konnte durch eine 3D-Profilmessung der Fräsungen vor deren Befüllung rückgeschlossen werden. Die Schichtdicke der Probe B wurde mittels einer Bügelmessschraube (Toleranz: 1 μm) bestimmt. Die resultierenden Schichtdickenwerte sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 2. Übersicht über die Kennwerte der verwendeten Materialien. Die kursiv gesetzten Werte wurden experimentell bestimmt. Alle weiteren Werte wurden den Datenblättern und der Literatur entnommen.

Bezeichnung	Dichte in g/cm^3	Temperaturleitfähigkeit in mm^2/s
Aluminium EN AW 5083	2,66	46 - 58
Edelstahl	7,84	11 - 15
Alkydharzlack	<i>1,10</i>	0,085 - 0,134
Acrylharz	<i>1,22</i>	<i>0,085 \pm 0,003</i>

Tabelle 3. Übersicht über die gemessenen Schichtdickenwerte der jeweiligen Probekörper.

	Schichtdicke in μm							
Schichtnummer*	1	2	3	4	5	6	7	8
Probe A	75,07 $\pm 0,35$	136,74 $\pm 0,31$	196,71 $\pm 0,41$	250,72 $\pm 0,62$	264,36 $\pm 0,74$	295,86 $\pm 0,73$	286,99 $\pm 0,50$	328,91 $\pm 0,29$
	9	10	11	12	13	14	15	
	384,88 $\pm 0,27$	426,67 $\pm 0,17$	484,69 $\pm 0,18$	541,31 $\pm 0,22$	350,55 $\pm 0,22$	401,23 $\pm 0,26$	463,61 $\pm 0,23$	
Schichtnummer*	1	2	3	4	5	6	7	
Probe B	39 \pm 1	66 \pm 1	100 \pm 1	137 \pm 2	191 \pm 3	222 \pm 3	255 \pm 3	

Schichtnummer*: Siehe Abb. 2.

4.2 Simulation der Phasen-Dicken-Korrelation

Das Verhalten zwischen den Phasenwerten φ und der Dicke der Beschichtung d lässt sich mathematisch wie folgt beschreiben [3, 4, 8]:

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

Hierfür wird vereinfachend von einem Ein-Schicht-Modell und einer Ausbreitung der thermischen Wellen ausschließlich in z -Richtung mit einer einheitlichen Temperaturleitfähigkeit und einem stetigen lokalen und zeitlichen Temperaturverhalten ausgegangen. R beschreibt hierbei den thermischen Reflexionskoeffizienten zwischen Beschichtungs- und Grundmaterial:

$$R = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \quad (3)$$

Die Materialparameter e_1 und e_2 stellen die thermische Effusivität des Beschichtungsmaterials (1) und des Substratmaterials (2) dar und können aus der Wärmeleitfähigkeit λ , der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c ermittelt werden [6]:

$$e = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (4)$$

Die Gleichungen 3 und 4 verdeutlichen, dass die Reflexion neben der Dichte ausschließlich von den thermischen Eigenschaften beider Materialien abhängt. Ein betragsmäßig großer Reflexionskoeffizient führt zu einer starken Reflexion der thermischen Wellen, wodurch prinzipiell eine höhere Genauigkeit bei der Schichtdickenmessung möglich ist. Dies ist insbesondere bei großen Unterschieden zwischen den thermischen Effusivitäten des Beschichtungs- und des Substratmaterials der Fall. Abb. 4 (links) veranschaulicht die aus Gleichung 2 ermittelte Korrelation zwischen Phase und Schichtdicke für verschiedene Reflexionskoeffizienten grafisch. Da auf der Abszisse die sog. thermische Dicke aufgetragen ist, die die Dicke d in Relation zur Eindringtiefe μ setzt, ist die Grafik unter Berücksichtigung des Reflexionskoeffizienten universell einsetzbar. Bei gleicher Materialkonstellation (konstanter Temperaturleitfähigkeit) und gleicher Auswertefrequenz ist die Eindringtiefe μ konstant (vgl. Gleichung 1) und Phase und Schichtdicke stehen demnach in direktem Zusammenhang. Durch Variation der Auswertefrequenz lässt sich wiederum die

Korrelationsfunktion zwischen Phase und Schichtdicke an den vorliegenden Dickenbereich anpassen (vgl. Abb. 4 (rechts)). Zur Berechnung dieser frequenzabhängigen Verläufe wurde ein Reflexionskoeffizient von $-0,9$ angenommen und die ermittelte Temperaturleitfähigkeit des Acryllacks von $0,085 \text{ mm}^2/\text{s}$ verwendet. Die Abbildung verdeutlicht beispielsweise, dass im Bereich zwischen $50 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$ bei einer Frequenz von 1 Hz ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Phase und Schichtdicke vorliegt, während ein Phasenwert bei einer Frequenz von $0,3 \text{ Hz}$ zum Teil mehrere Dickenwerte repräsentiert und nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Bei einer Frequenz von 4 Hz hingegen lassen sich Schichtdicken ab $150 \mu\text{m}$ aufgrund geringer Phasenunterschiede kaum noch unterscheiden.

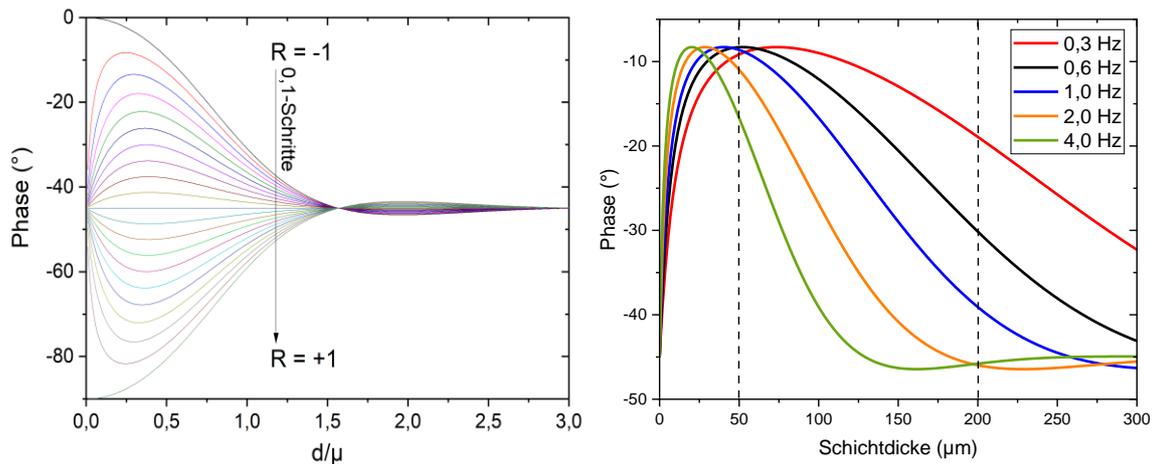


Abb. 4. Grafische Veranschaulichung der Korrelation zwischen Phase und thermischer Dicke d/μ in Abhängigkeit vom Reflexionskoeffizienten R (links) und Darstellung der frequenzabhängigen Phasen-Dicke-Korrelation für Acryllack bei einem Reflexionskoeffizienten von $-0,9$ (rechts)

4.3 Bestimmung der optimalen Anregungsfrequenz

Das in Abschnitt 4.2 beschriebene Verhalten zwischen Phase und Schichtdicke wurde experimentell anhand der Proben (vgl. Tabelle X) validiert. Aus dem Abkühlverhalten bei der Anregung mit einem einzelnen Puls kann entsprechend der PPT die Phaseninformation der thermischen Wellen gewonnen werden. Die frequenzabhängigen Phasenwerte wurden für jeden Pixel aus dem thermischen Signal, beginnend ab dem Maximum des Pulses, bestimmt. In Abb. 5 sind die Phasenbilder der Probekörper bei einer Frequenz von 1 Hz sowie die definierten Messbereiche mit einer Größe von 15×15 Pixel je Schicht dargestellt. Abb. 6 zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen den Phasenwerten und der thermischen Dicke für verschiedene Frequenzen aus dem Bereich von $0,1 \text{ Hz}$ bis 4 Hz . Da die kleinste Schichtdicke der Probe A ca. $75 \mu\text{m}$ beträgt und sich der Phasenumkehrpunkt für die untersuchten Frequenzen bei kleineren Schichtdicken befindet, beginnen alle Graphen in Abb. 6 (links) im annähernd linearen Bereich, wohingegen die Verläufe der Probe B (Abb. 6, rechts) einen Umkehrpunkt bei etwa 180 aufzeigen. Je nach Schichtdickenbereich ist die Wahl der passenden Anregungsfrequenz entscheidend, um Phasenwerte am annähernd linear verlaufenden Abschnitt des Graphen zu erhalten und somit Dickenunterschiede anhand der Phasenwerte eindeutig voneinander differenzieren zu können. Anhand der Graphen ist erkennbar, dass $0,6 \text{ Hz}$ (Probe A) und 2 Hz (Probe B) geeignete Frequenzen darstellen, da hier ein annähernd linearer Verlauf für die untersuchten Schichtdicken vorliegt und der Graph den maximalen Phasenunterschied in diesem Bereich aufweist.

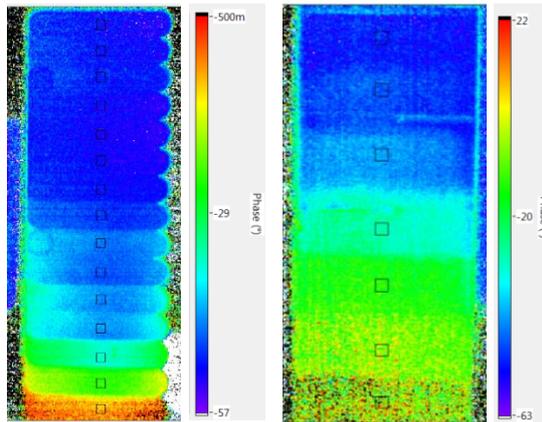


Abb. 5. Phasenbilder der Probe A (links) und Probe B (rechts) bei Erwärmung mit einem Puls. Für die Berechnung wurde das thermische Signal über 4 s ab dem Pulsmaximum verwendet. Die Markierungen (schwarze Quadrate) zeigen die definierten Messbereiche auf.

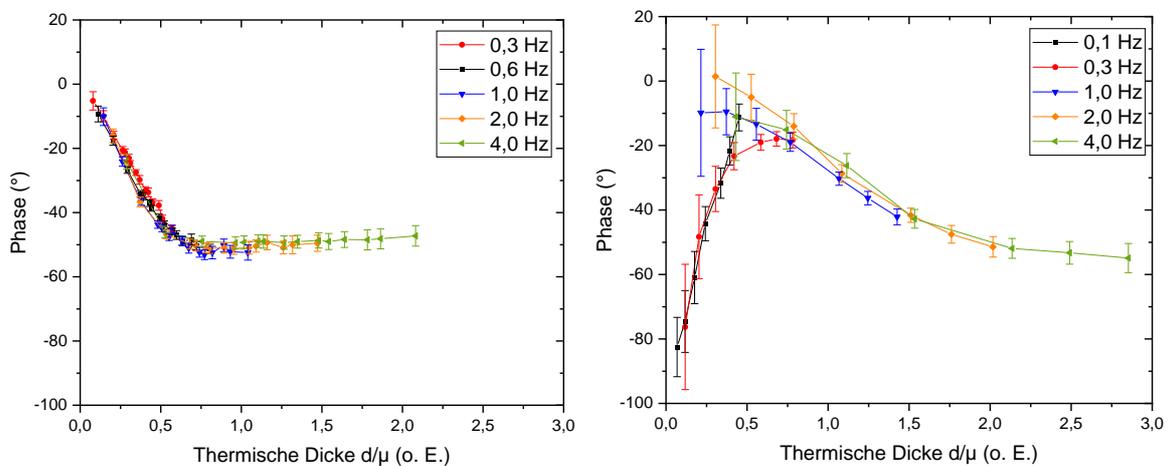


Abb. 6. Korrelation der Phase mit der thermischen Dicke für Probe A (links) und Probe B (rechts). Für die Berechnung der thermischen Dicke wurden die in Tabelle 2 und 3 aufgeführten Werte verwendet.

4.4 Anregung mit einer Pulssequenz der optimalen Frequenz

Entsprechend den Ergebnissen bei einer Ein-Puls-Anregung (vgl. Abschnitt 4.3) wurden die Proben mit einer Sequenz von bis zu 6 Pulsen unter Verwendung einer geeigneten Puls-Trigger-Frequenz angeregt, wobei die Energie der einzelnen Pulse bei größerer Pulsanzahl verringert wurde, sodass die eingebrachte Gesamtenergie bei jeder Messung in Summe gleich war. Abb. 7 (links und Mitte) zeigt die berechneten Phasenbilder beider Proben bei einer Anregung durch 6 Pulse mit einer Energie von 1.650 J. Die Phasenwerte sind mit deutlich geringerem Rauschen im Vergleich zur Ein-Puls-Messung behaftet und die Schichten unterschiedlicher Dicke können größtenteils deutlich voneinander separiert werden, wie die Linienverläufe in Abb. 7 (rechts) veranschaulichen. Im Diagramm der Probe A ist ebenfalls die über eine Profilmessung vor dem Beschichtungsprozess ermittelte Tiefe der Fräsungen dargestellt. Hieraus ist erkennbar, dass anhand der Phasenwerte die Schichtdicken mit Ausnahme der tiefsten Schicht (bei ca. 40 mm) eindeutig voneinander unterschieden werden können. Gleichzeitig ist allerdings zu berücksichtigen, dass kein lineares Verhalten zwischen Phase und Schichtdicke vorliegt (vgl. Abb. 4), weswegen die Phasenunterschiede zwischen den Schichten je nach Schichtdickenbereich variieren.

Die Graphen in Abb. 8 wurden durch Variation der Pulsanzahl bei gleicher Gesamtenergie (1.650 J) für Probe B generiert. Ein Vergleich zeigt, dass eine Verstärkung der jeweils

relevanten Frequenzen (entsprechend der vorliegenden Schichtdicken) durch Anregung mit mehreren Pulsen im richtigen Abstand und bei gleicher Gesamtenergie zu einer Rauschminderung führt und Schichtdicken demnach mit einer größeren Genauigkeit ermittelt werden können. Dies ist insbesondere bei den dünnsten Schichten deutlich erkennbar. Zusätzlich reduziert die Aufteilung der Energie auf mehrere Pulse insbesondere bei thermisch sensiblen Beschichtungsmaterialien das Risiko einer Schädigung des Bauteils. Da mit größeren Pulsabständen allerdings ein größerer Energieverlust aufgrund der zeitlichen Streckung der Anregung einhergeht, ist eine Verstärkung des jeweiligen Frequenzanteils durch Energieeinbringung über mehrere Pulse nur bis zu einem gewissen Pulsabstand sinnvoll, der bei den durchgeführten Messungen an Probe B größer als 1 s war (vgl. Abb. 8) [22]. Bei thermisch weniger empfindlichen Materialien könnte hingegen auch der Energieeintrag vervielfacht werden, indem die jeweils maximale Energie bei der Anregung mit mehreren Pulsen verwendet wird, wodurch eine zusätzliche Erhöhung des SNR realisiert werden kann.

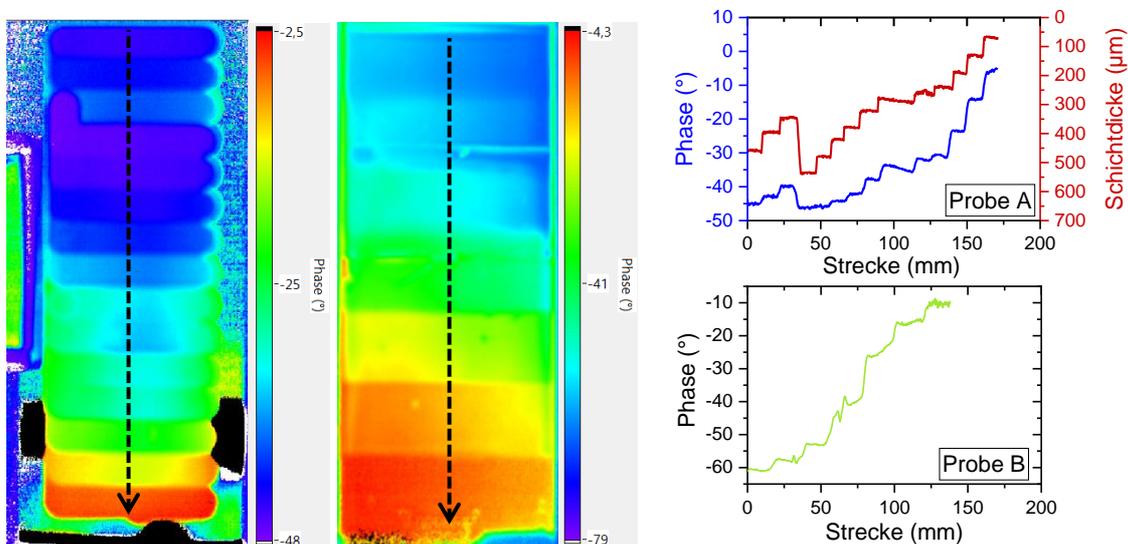


Abb. 7. Phasenbilder der Probe A (links) und Probe B (Mitte) bei Anregung mit einer Sequenz von 6 Pulsen. Die Pulsabstände wurden entsprechend der für die Schichtdicken relevanten Frequenz(en), die in Abschnitt 4.3 ermittelt wurden, gewählt (Probe A: 0,6 Hz, Probe B: 2 Hz). Die Diagramme rechts zeigen die Phasenwerte entlang der gestrichelten Linien in den Phasenbildern.

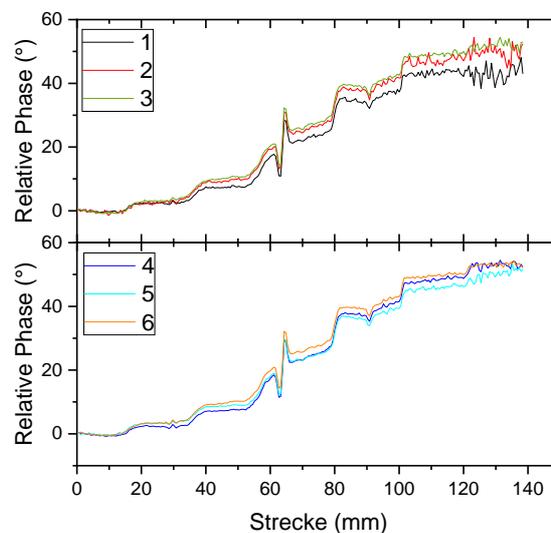


Abb. 8. Phasenverläufe (vgl. gestrichelte Linie in Abb. 7) der Probe B bei Anregung mit variierender Pulsanzahl (1 bis 6). Für jede Messung wurde die gleiche Gesamt-Pulsenergie verwendet. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Phasenverläufe überlappend dargestellt, beginnend ab einem Phasenwert von 0.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurde die Mehr-Puls-Thermografie zur flächigen Untersuchung von Schichtdicken anhand zweier mit Lack beschichteter Metall-Probekörper vorgeführt. Über Simulationsversuche wurde der aus der Literatur bekannte Zusammenhang zwischen den Phasenwerten, die aus den Temperaturdaten berechnet werden können, und der Schichtdicke für die beschichteten Metallproben veranschaulicht. Die Ergebnisse zeigen, dass neben den Eigenschaften des Beschichtungs- und Substratmaterials insbesondere die Auswertefrequenz eine entscheidende Rolle für die Ermittlung der Schichtdicke aus den Phasenwerten spielt, die passend für den vorliegenden Schichtdickenbereich gewählt werden muss. Über experimentelle Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, wie sich die relevante(n) Auswertefrequenz(en) anhand einer thermografischen Messung mit einer Ein-Puls-Anregung bestimmen lassen. Die experimentell generierten Ergebnisse haben hierbei gut mit den Simulationsergebnissen übereingestimmt. Die Mehr-Puls-Thermografie wurde unter Kenntnis der geeigneten Frequenzen ebenfalls an den Probekörpern angewendet. Dies ermöglicht zum einen eine Verstärkung des relevanten Frequenzanteils und somit eine Verringerung des Rauschniveaus, wie experimentell bestätigt werden konnte. Zum anderen kann durch die Anregung mit einer Pulssequenz je nach Anwendungsfall der Energieeintrag vervielfacht werden oder die thermische Beanspruchung minimiert werden. Durch Einsatz dieser Technik konnten Schichtdicken im Bereich von 70 μm bis 460 μm mit einer Schrittweite von ca. 50 μm bzw. Schichtdicken im Bereich von 30 μm bis 250 μm mit einer Schrittweite von ca. 30 μm klar voneinander unterschieden werden.

Die Mehr-Puls-Thermografie bietet somit eine Möglichkeit zur flächigen, zerstörungsfreien und schnellen Dickenmessung von Beschichtungen, die potentiell auch inline eingesetzt werden kann. Die vorgestellte Messmethodik wird im Zuge aktueller Forschungsvorhaben am Kunststoff-Zentrum – SKZ, einem Mitglied der Zuse-Gemeinschaft, weiterentwickelt und industrienah erprobt, um die Technik für spezifische Anwendungsfälle auszulegen und schließlich eine industrielle Umsetzung zu fördern.

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 Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir danken dem BMWi für die Bereitstellung der finanziellen Projektmittel.

Referenzen

- [1] D. Wu: *Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- [2] A. Gleiter, C. Spießberger und G. Busse: *Tiefenaufgelöste Defekterkennung mit optisch angeregter Lockin-Thermografie*. Thermografie-Kolloquium 2, 2-9, 2007
- [3] S. D. Holland und R. S. Reusser: *Material evaluation by infrared thermography*. Annual Review of Materials Research 46, 287-303, 2016
- [4] X. Maldague: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley-Verlag, 2001
- [5] D. Hoffmann: *Tiefenaufgelöste Detektion von Fehlstellen in Faserverbundkunststoffen – Entwicklung eines Lock-in-Thermografie-Systems zur tomografischen Bauteilprüfung*. Springer Verlag, 2019
- [6] C. Spießberger: *Merkmalsanalyse mit thermischen Wellen in der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung*. Dissertationsschrift, Universität Stuttgart, 2011

- [7] 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
- [8] S. Lindemann und R. Schaller: *Laser-angeregte Lockin-Thermografie zur zerstörungsfreien und berührungslosen Schichtdickenmessung von thermisch gespritzten Beschichtungen*. DGZfP-Jahrestagung, 2017
- [9] F. Bernhard: *Thermografie, Handbuch der Technischen Temperaturmessung*. 1395-463, 2014
- [10] D. Stegemann: *Der Einsatz von Wirbelströmen für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*. DVS Media, 2010
- [11] W. Reimche und R. Duhm: *Zerstörungsfreie Prüfung und Bewertung von Beschichtungen*. Moderne Beschichtungsverfahren, 323-47, 2004
- [12] R. Lerch, G. Sessler und D. Wolf: *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer-Verlag, 2009
- [13] T. Hochrein und I. Alig: *Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung*. Vogel Business Media, 2011
- [14] V. Rößiger und B. Nensel: *Analyse von Schichten mit Röntgenfluoreszenz*. Jahrbuch Oberflächentechnik, 195-225, 2004
- [15] M. Krumrey, M. Hoffmann und M. Kolbe: *Schichtdickenbestimmung mit Röntgenreflektometrie*. PTB Mitteilungen 115.3, 202, 2005
- [16] S.-W. Kim und G.-H. Kim: *Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry*. Applied Optics, 1999
- [17] F. Hirth: *Schichtdickenmessung an gedruckten Polymerschichtsystemen*. Dissertation, Technische Universität München, 2011
- [18] C. A. Bennett und R. R. Patty: *Thermal wave interferometry: A potential application of the photoacoustic effect*, Applied Optics 21.1, 49-54, 1982
- [19] K. Ramspeck, et al.: *In-line thermography for reliable hot spot detection and process control*. Energy Procedia 55, 133-40, 2014
- [20] Z. Zeng, et al.: *Absolute peak slope time based thickness measurement using pulsed thermography*. Infrared Physics & Technology 55.2-3, 200-4, 2012
- [21] D. Hoffmann, et al.: *Advantages of Multi-Pulse Thermography*. SHM-NDT-Tagung, 2018
- [22] G. Schober, et al.: *Multiple flash thermography for non-destructive testing of lightweight components*. Proceedings of the IRS², AMA Conferences, 2017
- [23] X. Maldague, S. Marinetti: *Pulse Phase Infrared Thermography*. Journal of Applied Physics 79.5, 2694-8, 1996
- [24] R. Krankenhagen und C. Maierhofer: *Einzelblitz vs. Multiblitz – Blitzthermografie mit mehreren Blitzen*. Thermographie-Kolloquium, 2015
- [25] S. Neuhäusler, et al.: *Optimierung der Impuls-Thermografie - Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen*. Thermografie-Kolloquium, 2003
- [26] A. Ziadi, F. Galmiche und X. Maldague: *Pulse shaping in infrared thermography for nondestructive evaluation*. Review of scientific instruments 74.1, 411-3, 2003
- [27] F. Richter: *Die physikalischen Eigenschaften der Stähle: Das 100-Stähle-Programm*. Arbeitskreis Thermophysik in der GEFTA, 2010