

FORSCHUNGSBERICHT

Flächige Schichtdickenmessung für den industriellen Einsatz durch Entwicklung einer Mehr-Puls-Thermografie

Thermo-Thickness-Detection

Daniel Hoffmann, Christian Kolb, Polina Lisinetskaya, Luis Wachter,
Giovanni Schober, Benjamin Baudrit, Thomas Hochrein, Martin Bastian

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Danksagung

Das Vorhaben 21678 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Forschungseinrichtung SKZ-KFE gGmbH dankt dem BMWK und der AiF für die Förderung sowie der Forschungsvereinigung für die Unterstützung bei der Durchführung des Vorhabens.

Darüber hinaus dankt die Forschungseinrichtung den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die Unterstützung bei der Bearbeitung des Forschungsprojektes und für die konstruktive Diskussion zu diversen Fragestellungen.

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 zu überwachen. Unter den verfügbaren direkt-bildgebenden Prüfverfahren zur Schichtdickenmessung ist die Thermografie eine vielversprechende Technik, da sie im Prozess zerstörungsfrei und berührungslos eingesetzt werden kann. Die in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Kombinationstechnik aus Puls- und Lock-in-Thermografie, die sog. Mehr-Puls-Thermografie (MPT), vereint die Vorzüge der beiden konventionellen Thermografie-Methoden und ermöglicht eine flächige Bestimmung der Dicken von Beschichtungen mit einer Auflösung im ein- bis zweistelligen Mikrometerbereich. Hierfür wird das Bauteil mit mehreren Lichtblitzen flächig erwärmt und die Oberflächentemperatur zeitgleich mit einer Infrarotkamera gemessen. Durch Berechnung des Phasenbildes aus den Temperaturdaten können daraus bereits Schichtdickenunterschiede visualisiert werden, wobei für die absolute Bestimmung der Schichtdicke noch ein Kalibriervorgang notwendig ist. Die MPT konnte sowohl an Metall- als auch an Kunststoffbauteilen erfolgreich eingesetzt werden. Die flexible Einstellung der Pulsenergie, der Pulsanzahl und des Pulsabstandes ermöglicht beim Einsatz eine anwendungsspezifische Kompromissfindung aus Messdauer, thermischer Beanspruchung des Bauteils und Auflösungsvermögen. Die MPT ist dabei relativ unabhängig von geometrischen Faktoren wie der Ausrichtung der Anregungstechnik oder der Infrarotkamera und ermöglicht somit auch eine Schichtdickenbestimmung an komplexeren Bauteilen ohne orthogonale Ausrichtung zur Oberfläche. Relevante Ergebnisse und Erkenntnisse bei unterschiedlichen Anwendungsszenarien und mit Kamertechnik aus unterschiedlichen Preiskategorien sind in diesem Forschungsbericht zusammengefasst.

Abstract

Nowadays, coatings play a central role in many branches of the industry. Determining the coating thickness is an essential requirement –for quality control during production as well as for monitoring changes during the application. Among the available test methods for coating thickness measurement, thermography is a promising technology as it can be used inline in a non-destructive and non-contact manner. The combination technique of pulse and lock-in thermography developed in this research project, defined as multi-pulse thermography (MPT), combines the advantages of the two conventional thermography methods and allows a measurement of the thickness over a large area with a resolution in the one to two-digit micrometer range. For this purpose, the component is heated with several flashes of light and the surface temperature is measured simultaneously with an infrared camera. By calculating the phase image from the temperature data, differences in coating thickness can be visualized, although a calibration process is still necessary for the quantification of the coating thickness. The MPT has been successfully used on both metal and plastic components. The flexible adjustment of the pulse energy, the number of pulses and the pulse spacing allows an application-specific compromise to be found for measurement duration, thermal stress on the component and resolution. The MPT is relatively independent of geometric factors such as the orientation of the excitation unit and the infrared camera and therefore also enables a thickness measurement on more complex components without orthogonal alignment to the surface. Relevant results for different application scenarios and by using infrared cameras from different price categories are summarized in this research report.

1	Einleitung.....	2
2	Stand der Technik.....	3
	2.1 Schichtdickenmessmethoden.....	3
	2.2 Aktive Thermografie.....	4
3	Versuchsaufbau und -durchführung	7
4	Herstellung und Anschaffung von Prüfkörpern.....	10
	4.1 Referenzprüfkörper.....	10
	4.2 Industrielle Bauteile.....	14
5	Referenzmessungen zur Bestimmung der Schichtdicke	15
6	Anwendung der Puls-Thermografie zur Darstellung von Schichtdickenunterschieden	23
	6.1 Theoretischer Zusammenhang zwischen Phase und Schichtdicke.....	23
	6.2 Experimentelle Untersuchung des Phasen-Dicken-Zusammenhangs.....	26
	6.2.1 Ein-Puls-Anregung und Variation der Auswertefrequenz	26
	6.2.2 Mehr-Puls-Anregung zur Gewichtung der relevanten Frequenz.....	28
	6.3 Entwicklung der Messmethode.....	31
	6.3.1 Einfluss von Pulsenergie und Pulsanzahl	33
	6.4 Vergleich von Ein-Puls- und Mehr-Puls-Anregung	37
7	Absolute Bestimmung der Schichtdicke mittels Mehr-Puls-Thermografie	40
8	Einfluss von geometrischen Faktoren und der Kamertechnik.....	49
	8.1 Variation des Anregungswinkels	49
	8.2 Variation des Aufnahmewinkels.....	51
	8.3 Variation des Abstands zwischen Anregungsquelle und Probe.....	53
	8.4 Variation des Abstands zwischen Objektiv und Probe.....	55
	8.5 Einfluss der Fokussierung.....	56
	8.6 Variation der Kamertechnik.....	58
9	Zusammenfassung	61
10	Literaturverzeichnis	65

1 Einleitung

Die Beschichtungs- und Lackindustrie umfasst bundesweit ein jährliches Marktvolumen von ca. 2,2 Milliarden Euro [1]. Davon wird ein Großteil in Deutschland durch die Branchen umgesetzt, die sich durch zahlreiche kleine und mittelständische Zulieferunternehmen auszeichnen. Gewichtsoptimierungen und Kosteneinsparungen durch effiziente Ressourcennutzung sind bei einer jährlich in Deutschland produzierten Lackmenge von über 2 Mio. t enorm wichtige Faktoren für die Lackindustrie und setzen voraus, dass immer dünnere Schichten mit einer möglichst homogenen Dickenverteilung eingesetzt werden [2]. Die Dicke und Homogenität der Schichten tragen entscheidend zur Standzeit der Lacke bei. Gleichzeitig werden aber immer größere Anforderungen an die Beschichtungsmaterialien gestellt und die Bauteilgeometrien werden stetig komplexer, wodurch die Lack- und Beschichtungsindustrie immer 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 oder 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. Gleichzeitig stehen lediglich Schichtdickenmesssysteme zur Verfügung, die verfahrenstechnisch zum Großteil noch stark limitiert sind und daher den Anforderungen des Marktes nicht gerecht werden. Während mikroskopische Verfahren zerstörend arbeiten und alleine deswegen für viele Anwendungsbereiche nicht in Frage kommen, erlauben zerstörungsfreie Messsysteme auf Basis Ultraschall, Wirbelstrom, Mikrowellen- oder Terahertzstrahlung technisch bedingt nur punktuelle Messungen, wodurch eine 100 %-Kontrolle (wenn überhaupt möglich) mit großem zeitlichem und technischem Aufwand verbunden ist. Für viele existierende Verfahren sind außerdem eine Berührung der Oberfläche des Bauteils oder spezielle Materialanforderungen notwendig, wodurch sich weitere Limitierungen ergeben. Unter den wenigen verfügbaren direkt-bildgebenden und zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Schichtdickenmessung ist das einzige inlinefähige und mobil einsetzbare Verfahren die Thermografie. Existierende Thermografie-Techniken weisen allerdings noch gravierende Einschränkungen auf. Mit der konventionellen Puls-Thermografie geht eine hohe thermische Beanspruchung der Bauteile, wodurch insbesondere bei den überwiegend eingesetzten

Kunststoffbeschichtungen irreversible Schäden entstehen können, ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und eine starke Abhängigkeit des Ergebnisses von Umgebungseinflüssen einher. Bei der konventionellen Lock-in-Thermografie hingegen sind anregungsbedingt eine geringe Auflösungsgrenze sowie generell eine lange Messdauer die wesentlichen Nachteile. In diesem Forschungsprojekt wurde deswegen eine Kombinationstechnik aus Puls- und Lock-in-Thermografie entwickelt, die sog. Mehr-Puls-Thermografie (MPT), bei der die Vorzüge beider thermografischen Methoden genutzt und gleichzeitig die o. g. Einschränkungen minimiert werden können.

2 Stand der Technik

2.1 Schichtdickenmessmethoden

Grundlegend lassen sich bereits eingesetzte Techniken in zerstörende und zerstörungsfreie Messverfahren untergliedern. Nachfolgend wird der Fokus auf zerstörungsfreie Methoden gelegt, da ausschließlich diese zu der im vorliegenden Forschungsprojekt forcierten MPT konkurrieren. Bei der Wirbelstromtechnik und bei magnetinduktiven Verfahren kann die Schichtdicke durch Veränderung elektromagnetischer Felder gemessen werden [3, 4]. Hierfür ist eine vorherige Kalibrierung des Messsystems notwendig [5, 6, 7]. Beide Verfahren setzen spezielle Materialeigenschaften voraus [8, 9, 10]. Aufgrund der Abstandsabhängigkeit lässt sich die Schichtdicke nahezu ausschließlich berührend und nur bei verhältnismäßig glatten Beschichtungen zuverlässig messen. Diese Einschränkungen und die punktuelle Messweise werden durch Anwendung der MPT umgangen. Kapazitive Techniken, bei welchen die Schichtdicke über Veränderung der elektrischen Kapazität gemessen wird, weisen ebenfalls Einschränkungen durch eine punktuelle und berührende Messung sowie hinsichtlich Materialanforderungen auf [4, 11, 12]. Auf Röntgen basierende Messtechniken wie die energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) oder die Röntgenreflektometrie (XRR) nutzen die emittierende Röntgenfluoreszenzstrahlung bzw. reflektierte Röntgenstrahlung nach einer Bestrahlung des Bauteils [13, 14]. Einschränkungen sind insbesondere durch die hohen Systemkosten, die ionisierende Strahlung und den damit verbundenen hohen organisatorischen Aufwand im Unternehmen durch Strahlenschutzmaßnahmen gegeben. Weiterhin ist der messbare Bauteilumfang durch die Größe der Messkammer limitiert (XRR) oder der Einsatz ist auf bestimmte Elemente beschränkt (RFA) [15]. Bei Ultraschallverfahren wird die Laufzeit von Schallwellen und die zugehörige materialabhängige Schallgeschwindigkeit für die Ermittlung

der Schichtdicke genutzt [16, 17, 18]. Die berührende und punktuelle Arbeitsweise schränkt den Einsatz der Technik neben der physikalisch bedingt starken Temperatur- und damit Umgebungsabhängigkeit ebenso wie dem hohen Wartungsaufwand mediengeführter Leitungen, die für das Koppelmedium notwendig sind, erheblich ein [19]. Zwar existieren auch berührungslos arbeitende Ultraschallsysteme, jedoch sind diese aufgrund der zu geringen Frequenzbandbreite nicht für dünne Schichten einsetzbar. Bei Terahertz (THz)-Techniken wird ebenso die Laufzeit der in diesem Fall elektromagnetischen Wellen betrachtet [20, 21, 22]. THz-Techniken stehen für den Industrie-Einsatz z. B. aufgrund von empfindlichen optischen Komponenten und hohen Preisen vor zusätzlichen Herausforderungen. Eine Ausrichtung des Sensors senkrecht zur Oberfläche ist notwendig, um eine angemessene Einkopplung zu gewährleisten, was mit einem enormen Peripherieaufwand in Form von z. B. Robotern verbunden ist [23]. Zusätzlich können auch hier nur punktuell Schichtdicken gemessen werden. Beispiele für optische Messverfahren sind Weißlichtinterferometrie oder konfokal-chromatische Verfahren [24, 25, 26]. Der sichtbare Spektralbereich grenzt deren Einsatzgebiet jedoch auf transparente Bauteile ein.

2.2 Aktive Thermografie

Jeder Körper emittiert entsprechend seiner Temperatur elektromagnetische Wellen, wobei ein Teil der emittierten Strahlung im infraroten Spektralbereich liegt [27]. Durch Einsatz von Infrarotkameras (IR-Kameras) lässt sich die Temperatur eines Bauteils oberflächenabhängig und berührungslos messen [28]. Grundsätzlich wird zwischen der aktiven und der passiven Thermografie unterschieden [29]. Bei der passiven Thermografie wird die prozessbedingt vorhandene Wärme etwa aus einem Verarbeitungsprozess genutzt, um Informationen über den Prozess oder den Zustand des Bauteils zu erhalten. Bei der aktiven Thermografie wird hingegen der betrachtete Prüfkörper gezielt durch z. B. optische Strahlung erwärmt und das thermische Verhalten an der Bauteiloberfläche gemessen. Die aktive Thermografie bietet sich für Schichtdickenmessung insbesondere deshalb an, weil große Flächen mit mehreren Quadratmetern in verhältnismäßig kurzer Messzeit lokal aufgelöst und berührungslos gemessen werden können. Das Anwendungsspektrum der Thermografie ist dabei kaum durch Anforderungen an das Substrat- oder Beschichtungsmaterial wie Leitfähigkeit, Transparenz oder Ferromagnetismus beschränkt. Bei der Produktion erlaubt zudem eine direkte Inline-Einsetzbarkeit bestmögliche Voraussetzungen zur Prozessüberwachung [30, 31, 32].

Bei der Lock-in-Thermografie wird das Bauteil moduliert über einen längeren Zeitraum periodisch angeregt. Die zeitgleich gemessenen Temperaturdaten werden mittels einer diskreten Fourier-Analyse ausgewertet, um Amplituden- bzw. Phasenwerte frequenzselektiv darzustellen [33, 34, 35]. Bei der konventionellen Puls-Thermografie wird das Bauteil über einen energieintensiven Puls kurzzeitig erwärmt und Unterschiede im Abkühlverhalten betrachtet [36]. Es stehen Auswertemöglichkeiten im Zeit- und Frequenzbereich zur Verfügung. Im Zeitbereich werden z. B. lokal auftretende Temperatur-Unterschiede ermittelt, die auch Rückschlüsse auf die Tiefenlage einer Grenzfläche zulassen. Bei einer Auswertung im Frequenzbereich werden, ähnlich der Lock-in-Thermografie, Amplituden- und Phasenbilder frequenzselektiv generiert.

Bei einer Fourier-Analyse spielt für beide Methoden die Eindringtiefe μ eine wichtige Rolle, die die Tiefenreichweite der Wärmewellen beschreibt und sich unter Kenntnis der Temperaturleitfähigkeit α für eine Frequenz f wie folgt abschätzen lässt [37, 38]:

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

Für Messungen an Beschichtungen bedeutet eine kleinere Schichtdicke konsequenterweise eine größere Auswertefrequenz, die für Schichtdicken im unteren μm -Bereich im ein- bis zweistelligen Hertz-Bereich liegt [39, 40]. Entscheidende Vorteile der konventionellen Lock-in-Thermografie sind das hohe SNR und der geringe Einfluss von Störfaktoren. Von Nachteil sind dagegen die verhältnismäßig lange Messdauer und die Beschränkung auf eine auswertbare Frequenz und damit Tiefenlage (vgl. Gleichung 1), die ein Vorwissen zur Schichtdicke voraussetzt, um mehrere sequenzielle Messungen zu vermeiden. Bis dato existierende Messsysteme auf Basis der Lock-in-Thermografie weisen außerdem aufgrund der oftmals eingesetzten, relativ trägen Halogenstrahler Limitationen auf, die laut Aussagen der jeweiligen Thermografie-Systemanbieter nicht zur Quantifizierung von Schichten im unteren Mikrometerbereich geeignet sind. Alternativ werden kostenintensive Laser eingesetzt, die allerdings keine flächige Anregung erlauben und damit das Potenzial der Thermografie nicht ausschöpfen können. Die konventionelle Puls-Thermografie zeichnet sich durch eine deutlich kürzere Messdauer und damit In-linefähigkeit sowie das multifrequente Pulssignal aus, wodurch entsprechend der Gleichung 1 unterschiedliche Dickenbereiche betrachtet werden können, wobei allerdings

auch eine erhebliche Verringerung des SNR mit einhergeht. Bei existierenden Puls-Thermografie-Systemen wird außerdem mit einem einzigen energiereichen Lichtblitz angeregt, was zu einer hohen Oberflächenerwärmung führt, die Kunststoffe und dünne temperaturempfindliche Beschichtungen nachhaltig schädigen kann [41, 42]. Puls-Thermografie-Systeme sind zudem meist stark von Störeinflüssen wie einer inhomogenen Erwärmung, schwankenden Umgebungstemperaturen oder einem lokal variierenden Emissionsgrad abhängig [43, 44].

Die im Forschungsprojekt eingesetzte Mehr-Puls-Thermografie kann als Kombination aus Puls- und Lock-in-Thermografie gesehen werden. Dabei wird das zu untersuchende Bauteil mittels einer periodischen Pulssequenz angeregt und zeitgleich die Temperaturentwicklung mit einer IR-Kamera gemessen. Durch eine FFT können daraus analog zu den konventionellen Thermografie-Methoden Amplituden- und Phaseninformationen erlangt werden. Aufgrund des pulsförmigen Signals sind ebenfalls verschiedene Frequenzkomponenten auswertbar, allerdings können durch die periodische Abfolge mit definiertem Pulsabstand bestimmte Frequenzkomponenten im Signal stärker gewichtet werden. Die nachfolgende Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Pulsabstand d und der gewichteten Frequenzkomponente f :

$$d = \frac{1}{f} \quad (2)$$

Durch den Pulsabstand wird demnach die Periodendauer T der Schwingung vorgegeben. Durch die Aufteilung der einzubringenden Gesamtenergie auf eine Sequenz von Einzelpulsen mit geringerer Teilenergie kann die thermische Belastung des Bauteils und ggf. auch der Anregungsquelle ohne Beeinträchtigung des SNR reduziert werden. Ebenso kann aber auch der Energieeintrag durch Anregung mit mehreren Pulsen bei maximaler Pulsenergie erhöht und damit das SNR maximiert werden [42]. Je nach Anwendungsfall und -anforderungen können somit die Messdauer, die thermische Beanspruchung und das SNR flexibel über die Einzelpulsintensität, den Pulsabstand und die Pulsanzahl angepasst werden [42, 45]. Durch die Auswertung der Phaseninformation kann hierbei die Beeinflussung des Resultats durch Stör- bzw. Umgebungseinflüsse vermieden werden. Die große Prüffläche und der kostengünstige Messaufbau sind weitere Vorteile der MPT, die einen industriellen Einsatz begünstigen und die Akzeptanz bei potenziellen Anwendern fördern. In zahlreichen teils simulationslastigen Publikationen wird außerdem auf weitere potenzielle Vorteile einer MPT in Form einer effizienteren Energieeinkopplung bei der

Prüfung [41], einer Linearisierung der erzeugten Wellen in longitudinale Richtung [46] und einer Beeinflussung der Frequenzkomponenten des Signals [47, 48] hingewiesen.

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Für die in dem Forschungsprojekt vorgesehenen Untersuchungen wurde ein aus dem abgeschlossenen Vorgängerprojekt mit IGF-Förderkennzeichen 18166 N bestehender Versuchsstand angepasst, um unterschiedliche IR-Kameras und Anregungstechnik zu verwenden und Bauteile in unterschiedlicher Größe und Geometrie einspannen zu können. Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau, bei dem die Blitzlampe VH3-6000 der Firma Hensel-Visit GmbH & Co. KG und die IR-Kamera TIM QVGA der Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG exemplarisch angebracht sind und sich Probe 2 in der Halterung befindet. Durch die eingesetzten Halterungen, die angebrachten Längen- und Winkelskalen sowie die Arretiermöglichkeiten können die IR-Kamera und die Anregungstechnik reproduzierbar eingesetzt und unterschiedliche Bauteile untersucht werden. Dabei können sowohl Abstände als auch Winkel zwischen Hardware und Bauteil variiert werden. Weiterhin sind aufgrund des modularen Aufbaus die Kamera- und Anregungstechnik austauschbar, wodurch sich auch die Anregungstechnik orthogonal vor dem Bauteil positionieren lässt, um beispielsweise eine homogene Erwärmung zu realisieren.

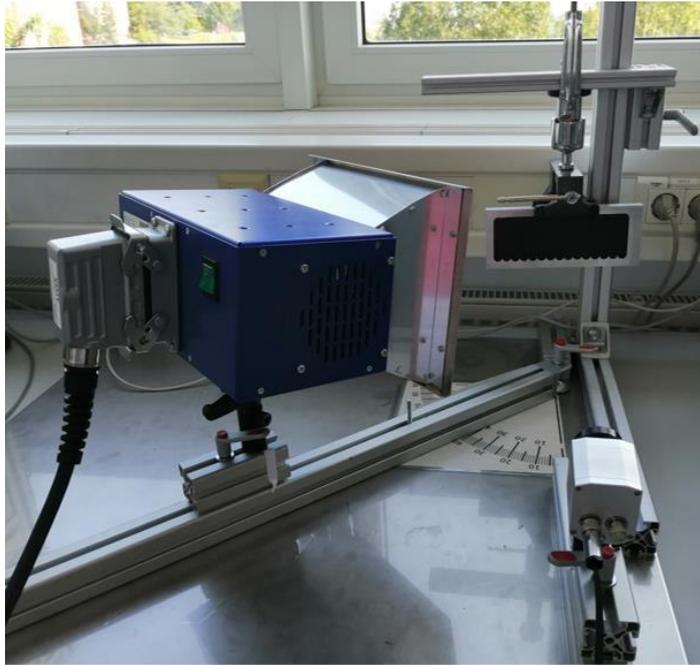


Abbildung 1: Foto des konstruierten Versuchsaufbaus für die Mehr-Puls-Thermografie mit der Blitzlampe VH3-6000, der IR-Kamera TIM QVGA und einer Probe in der Halterung

Zur Anregung wurde u. a. das Blitzsystem VH3-6000 der Firma Hensel-Visit GmbH & Co. KG verwendet. Dieses besteht aus einer Blitzlampe und einem stationären Generator, mit dem sich bis zu sechs Blitze mit einer maximalen Energie von 1.650 J pro Blitz sowie der Abstand der Pulse bzw. die Pulsfrequenz einstellen lassen. Die Pulsenergie wird dabei sowohl durch die Spannung der Lampe, die von 100 V bis 900 V einstellbar ist, als auch durch die Leuchtzeit, die zwischen 100 μ s und 3000 μ s variiert werden kann, definiert. Weiterhin wurden zwei Blitzlampen D2 1000 der Firma Profoto AB eingesetzt, die über eine am SKZ entwickelte Steuereinheit auf Basis eines Arduino-Mikrocontrollers von einem PC angesteuert werden können. Damit ist es möglich, eine Pulssequenz mit definiertem Pulsabstand und definierter Pulsanzahl zu triggern.

Zur Aufnahme wurden verschiedene IR-Kameras aus unterschiedlichen Preissegmenten und von unterschiedlichen Herstellern eingesetzt. Zum einen wurde die SC5500 der Firma Flir Systems Inc., die von edevis GmbH zur Verfügung gestellt wurde, eingesetzt und eine hochpreisige Quantendetektorkamera darstellt. Weiterhin wurde die TIM QVGA der Firma Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG sowie die Pi 640 und Pi 450i, die von der Optris GmbH zur Verfügung gestellt wurden, verwendet. Hierbei handelt es sich um kostengünstige Mikrobolometerkameras, die jeweils unterschiedliche

thermische und geometrische Auflösungen besitzen. Außerdem wurde die VarioCAM hr der Firma Infratec GmbH verwendet, die ebenfalls einen Mikrobolometer-Detektortyp verwendet und sich in der mittleren Preiskategorie befindet. Die Aufnahme fand teilweise über eine eigens entwickelte Software und teilweise über die Herstellersoftware statt, wobei die Messdaten in Form von Thermogramm-Sequenzen gespeichert wurden. Die Messdaten konnten in eine im Zuge des Projekts am SKZ entwickelte Auswertesoftware geladen werden, mit der u. a. die Anwendung üblicher Signalverarbeitungstechniken, die Anzeige und Anpassung von Temperatur-Zeit-Daten und Spektren, eine frequenzselektive Visualisierung von Amplituden- und Phasenbildern sowie eine Berechnung von Schichtdickenbildern möglich ist. Die Software wurde im Laufe des Forschungsprojektes kontinuierlich erweitert und optimiert, sodass bis zum Projektende alle im Antrag vorgesehenen Anforderungen umgesetzt werden konnten. Abbildung 2 stellt die finale Auswertesoftware sowie einzelne Funktionen exemplarisch dar. In die Software sind Messdaten geladen, die grafisch dargestellt ist. Über das in der Abbildung links aufgeführte Menü lassen sich alle relevanten Auswertungen vornehmen. Über den Schieberegler unterhalb der Anzeige kann der jeweilige Zeitpunkt bzw. für Amplituden- und Phasenbilder die jeweilige Frequenz eingestellt werden, während über die Schieberegler am rechten Rand die Anzeigeskala angepasst werden kann. Oberhalb des Anzeigefelds kann außerdem zwischen den relevanten Darstellungsformen (u. a. Thermogramm, Amplituden-, Phasen- und Dickenbild) gewechselt werden.

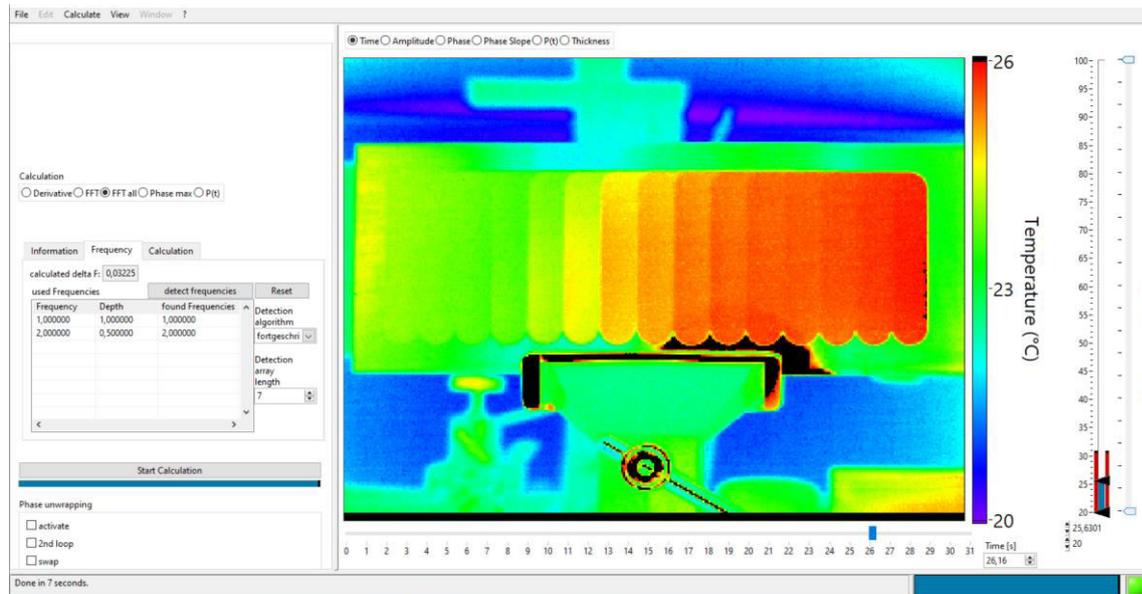


Abbildung 2: Exemplarisches Foto der Thermografie-Auswertesoftware

4 Herstellung und Anschaffung von Prüfkörpern

Zur Entwicklung und Evaluierung der Schichtdickenmesstechnik wurden sowohl repräsentative Referenzprüfkörper hergestellt, bei denen die Dicke der Beschichtung gezielt variiert wurde, als auch industrielle Bauteile angeschafft, um die Eignung der Messtechnik anwendungsnah zu erproben.

4.1 Referenzprüfkörper

Zunächst wurden Literaturrecherchen durchgeführt und industriell relevante Materialien in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss identifiziert. Aufbauend darauf wurden Prüfkörper für das Forschungsprojekt hergestellt. Hierzu wurde ein Lackierstand angeschafft und aufgebaut, mittels dem die notwendigen Lackieraufgaben realisiert werden konnten (vgl. Abbildung 3).



Abbildung 3: Exemplarisches Foto des Lackierstands mit beschichtetem Prüfkörper

Die Prüfkörper variieren hinsichtlich Substrat- und Beschichtungsmaterial, um ein möglichst breites Anwenderspektrum zu adressieren. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die hergestellten Prüfkörper und den verwendeten Materialien. Dabei wurden sowohl metallische Substrate, die den größten Markt für Beschichtungen ausmachen, als auch polymere Substrate, die aufgrund eines ähnlichen Eigenschaftsprofils zu Beschichtungsmaterialien die größte Herausforderung darstellen, eingesetzt. Auf die Schichtdicken der entsprechenden Prüfkörper wird in Kapitel 5 eingegangen.

Tabelle 1: Überblick über die hergestellten Referenz-Prüfkörper

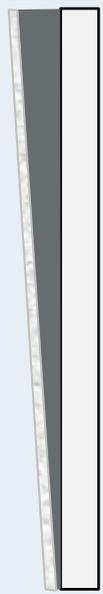
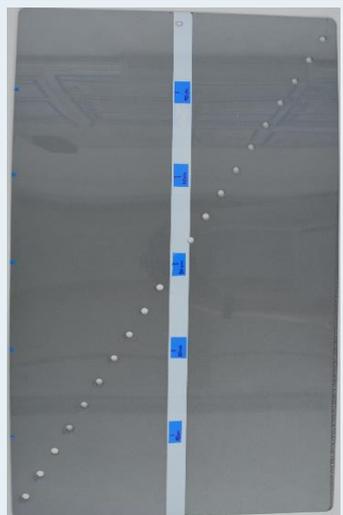
	Substrat	Beschichtung	Schema	Foto
Probe 1	Stahl-Blech	Alkydharz-Lack (grün) – die Schichtdicke nimmt stufenförmig zu		
Probe 2	Aluminium-Block mit Vertiefungen	Acryllack (schwarz) – die Schichtdicke nimmt stufenförmig zu		
Probe 3	Aluminium-Block mit Vertiefungen	Acryllack (blau) – die Schichtdicke verändert sich stufenförmig		

Probe 4	Polypropylen (PP)-Bauteil	Alkydharz-Lack (grün) – die Schichtdicke nimmt stufenförmig zu		
Probe 5	Polyethylen (PE)-Bauteil	Alkydharz-Lack (grün) – die Schichtdicke nimmt stufenförmig zu		
Probe 6	Polyvinylchlorid (PVC)-Block	Acryllack (schwarz) – die Schichtdicke nimmt stufenförmig zu		

4.2 Industrielle Bauteile

Weiterhin wurden Industrieteile von Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (pbA) angeschafft, die eine anwendungsnahe Evaluierung der entwickelten Messtechnik ermöglichen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in diesem Abschlussbericht vorgeführten Bauteile. Auch hierzu sind die Schichtdickenwerte, die über Referenzmessungen ermittelt wurden, in Kapitel 5 aufgeführt.

Tabelle 2: Überblick über industrielle Prüfkörper, an denen die MPT angewendet wurde

	Substrat	Beschichtung	Schema	Foto
Probe 7	Stahl-Blech	Acryllack (grau) – die Schichtdicke nimmt keilförmig zu		
Probe 8	Stahl-Blech	2-Schicht-System aus Basislack (anthrazit) und Klarlack – die Schichtdicke des Basislacks nimmt keilförmig zu		

Probe 9	Stahl-Blech	2-Schicht-System aus Basislack (anthrazit) und Klarlack – die Schichtdicke des Basislacks nimmt keilförmig zu	
Probe 10	Stahl-Plättchen	Chromnitrid-Beschichtung mit der Dicke 1, 2, 4, 6 und 10 µm	

5 Referenzmessungen zur Bestimmung der Schichtdicke

Zur Referenzierung der Schichtdicken von den hergestellten und angeschafften Prüfkörpern wurden verschiedene Messtechniken eingesetzt, die sich abhängig von der Größe, der Schichtdickenverteilung und dem vorliegenden Material als geeignet erwiesen haben. Die Prüfkörper mit Vertiefungen, in denen das Beschichtungsmaterial gefüllt wurde (Probe 2 und 3), wurden vor dem Beschichtungsprozess gemessen, während Prüfkörper mit stufenweise aufgebrachtem Lack, ebenso wie industrielle Bauteile, nach erfolgter Beschichtung gemessen wurden. Dabei wurden das magnetinduktive Verfahren, Weißlichtinterferometrie, Laserlinienscanner, die Terahertz-Technik, die Computertomografie sowie eine Bügelmessschraube eingesetzt. Je nach Verfahren konnten die Schichtdicken punktuell oder durch Einsatz von Verfahrenseinheiten auch entlang von Messlinien bestimmt werden.

Zur Messung der Referenzschichtdicken der Proben 1, 2 und 3 wurde u. a. das Dualscope FMP40 in Kombination mit der Sonde FD13H der Firma Helmut Fischer GmbH verwendet. Es wurde für jede Stufe eine Schichtdicke bestimmt, die einen mittleren Wert aus fünf Einzelmessungen darstellt. Für jede Messung wurde die Messsonde zentral in der jeweiligen Stufe positioniert. Die ermittelten Dickenwerte sind in Tabelle 3 aufgeführt. Zusätzlich wurden die beiden gefrästen Prüfkörper, Probe 2 und 3, mittels eines Laserlinienscanners vor dem Beschichtungsvorgang gemessen. Die resultierenden Tiefenprofile sind in Abbildung 4 aufgeführt.

Tabelle 3: Referenzdickenwerte der Stufen von Probe 1, 2 und 3, die mittels Dualscope FMP40 und der Sonde FD13H ermittelt wurden

Bezeichnung der Stufe	Probe 1		Probe 2		Probe 3	
	Schichtdicke (μm)	Stabw. (μm)	Schichtdicke (μm)	Stabw. (μm)	Schichtdicke (μm)	Stabw. (μm)
1	35,12	0,55	38,47	1,06	77,88	0,65
2	56,11	0,41	88,47	0,74	143,25	0,77
3	81,29	2,34	145,89	1,37	194,96	1,71
4	123,36	0,28	205,60	0,94	235,47	0,65
5	167,42	0,69	265,17	1,60	244,04	0,33
6	194,87	0,45	311,20	0,55	265,86	1,06
7	228,79	0,67	364,14	1,22	253,43	0,63
8			388,23	0,56	283,77	0,49
9			432,37	0,45	328,12	0,34
10			479,09	1,18	362,31	0,73
11			517,16	0,52	412,04	0,29
12			537,83	1,73	457,84	0,17
13			585,76	0,89	302,72	0,56
14			614,66	0,37	340,07	0,56
15			642,40	3,77	380,20	0,84

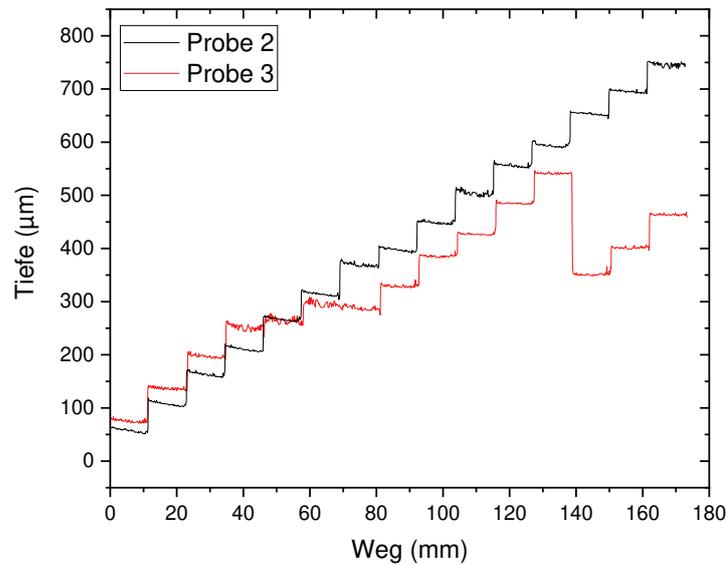


Abbildung 4: Tiefenprofile der Probe 2 und Probe 3, die mittels Laserlinienscanner vor dem Beschichtungsvorgang gemessen wurden

Für die beschichteten Kunststoff-Prüfkörper wurde das Ultraschall-Messgerät Quintsonic T der Firma ElektroPhysik Dr. Steingroever GmbH & Co. KG und eine elektronische Bügelmessschraube mit einer Auflösung von $1\ \mu\text{m}$ verwendet, da sich konventionelle Methoden wie das magnetinduktive oder das Wirbelstromverfahren aufgrund des Kunststoff-Substrats nicht geeignet sind. Für jede Messung mittels Quintsonic T wurde die Messsonde zentral in der jeweiligen Stufe positioniert. Die Bügelmessschraube wurde für die Messung der Probe 6 eingesetzt, da hier die für die Ultraschall-Messung benötigte Schallgeschwindigkeit nicht vorlag. Hierfür wurde die linke Seite jeder Stufe gemessen (vgl. Tabelle 1), da die Bügelmessschraube nicht mittig positioniert werden konnte. Die ermittelten Dickenwerte, ebenso wie die angenommene Schallgeschwindigkeit, sind in Tabelle 4 aufgeführt. Weiterhin wurde ein Dickenverlauf entlang einer mittigen Messlinie von Probe 4 unter Verwendung der Terahertz-Technik erstellt (vgl. Abbildung 5). Hierfür wurde ein Brechungsindex von 1,8 angenommen.

Tabelle 4: Referenzdickenwerte der Stufen der Kunststoff-Proben 4, 5 und 6, die durch Mittelung dreier Messwerte ermittelt wurden. Für die Messung der Proben 4 und 5 wurde das Ultraschall-Messgerät Quintsonic T und für die Messung der Probe 6 eine Bügelmessschraube eingesetzt.

	Probe 4		Probe 5		Probe 6	
Schallgeschwindigkeit	2200 ms		2200 ms		-	
Bezeichnung der Stufe	Schichtdicke (μm)	Stabw. (μm)	Schichtdicke (μm)	Stabw. (μm)	Schichtdicke (μm)	Stabw. (μm)
1	23,02	3,8	39,48	0,4	125	-
2	34	0,46	58,8	0,27	167	-
3	45,28	0,88	88,24	3,73	245	2
4	70,64	0,61	129,43	0,71	306	2
5	138,54	0,47	167,48	1,65	349	1
6	159,46	1,25	202,62	1,22	517	4
7	196,36	1,43	272,92	1,42	626	7
8					725	1
9					833	4
10					908	3
11					1003	2
12					1122	1
13					1249	8
14					1359	5
15					1583	3

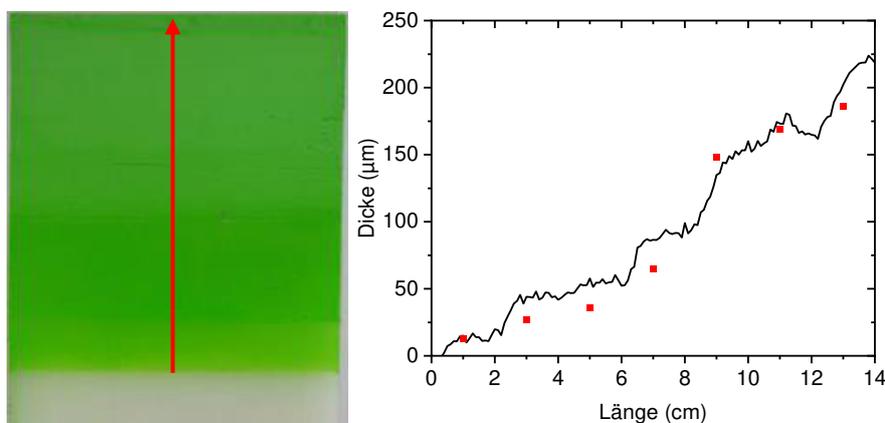


Abbildung 5: Foto der Probe 4 mit aufgeführter Messlinie (links) und der mit der Terahertz-Technik gemessene Schichtdickenverlauf entlang der Messlinie (rechts). Im Diagramm sind außerdem die mittels Bügelmessschraube ermittelten Werte (rot) dargestellt.

Für die Messung der Schichtdicken von den industriellen Proben 7, 8 und 9 wurden zunächst Messpunkte und -linien definiert, die in Abbildung 6 aufgeführt sind. Die in rot dargestellten Messpositionen wurden jeweils für Kalibriervorgänge verwendet (vgl. Kapitel 6), während die in blau dargestellten Messlinien durch Messungen im Abstand von ca. 5 mm abgebildet wurden. Für alle aufgeführten Referenzmessungen wurde das Dualscope FMP40 in Kombination mit der Sonde FD13H verwendet. Die erhaltenen Schichtdicken der roten Messpunkte stellen jeweils Mittelwerte aus fünf Einzelmessungen dar und sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Referenzdickenwerte entlang der blauen Messlinien sind grafisch in Abbildung 7 dargestellt. Bei den Proben 8 und 9 muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich bei den gemessenen Schichtdicken um die Gesamtdicke der Beschichtung handelt, die aus einer Klarlack- und einer Basislack-Schicht besteht.

Bei den Proben 10 handelt es sich um separate Bauteile, die jeweils eine homogene Beschichtung unterschiedlicher Dicke aufweisen. Die Schichtdicken wurden von den Herstellern zur Verfügung gestellt und wurden nicht erneut bestimmt (vgl. Tabelle 2).

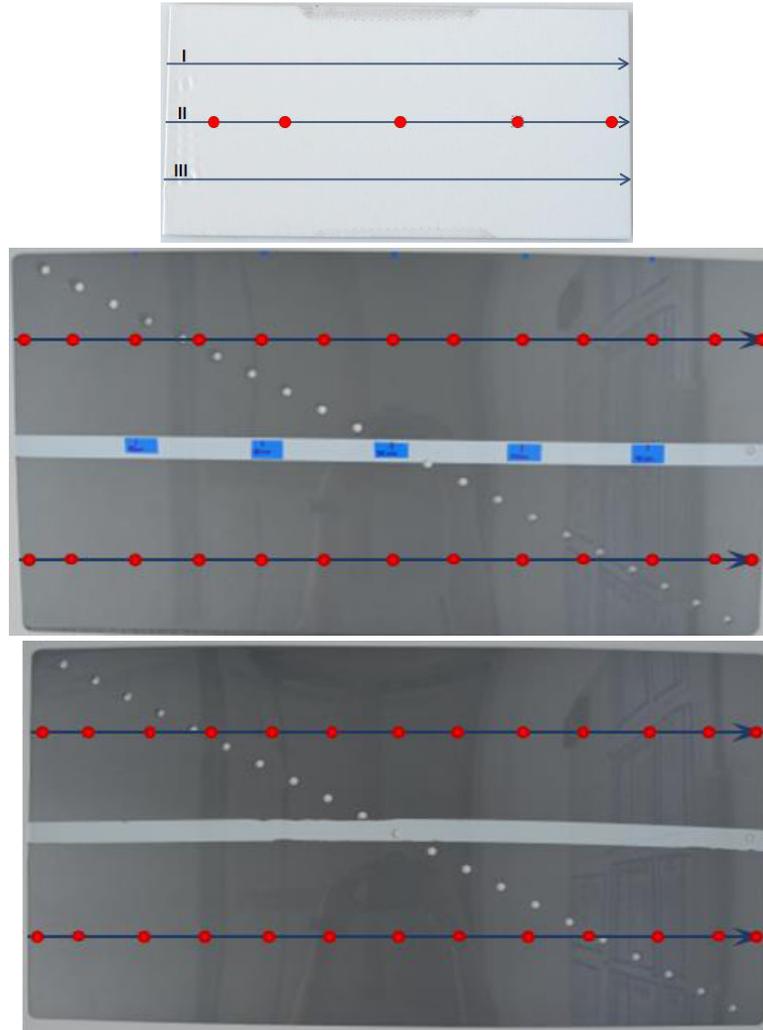


Abbildung 6: Fotos der Probe 7 (oben), Probe 8 (Mitte) und Probe 9 (unten) mit den definierten Messpunkten (rot) und -linien (blau), an denen Referenzmessungen vorgenommen wurden.

Tabelle 5: Aus fünf Einzelmessungen gemittelte Referenzdickenwerte an den definierten Messpositionen (vgl. rote Markierungen in Abbildung 6), die mittels Dualscope FMP40 und der Sonde FD13H bestimmt wurden

Posi- tion	Probe 7		Probe 8				Probe 9			
			oben		unten		oben		unten	
	Schicht- dicke (μm)	Stabw. (μm)								
0,5	38,13	3,21	45,12	0,10	39,25	0,12	34,06	0,29	33,69	2,79
5	97,41	0,81	45,72	0,42	42,18	0,15	40,71	0,39	43,13	0,13
10	218,60	1,43	47,47	0,10	46,33	0,32	47,53	0,51	48,61	0,21
15	307,45	1,27	49,67	0,26	46,48	0,31	55,40	0,21	55,13	0,30
20	351,85	1,32	54,20	0,15	48,96	0,18	57,38	0,20	57,69	0,09
25			55,92	0,09	49,55	0,32	66,17	0,27	66,52	0,35
30			59,35	0,32	54,69	0,25	65,93	0,10	72,26	0,17
35			63,77	0,35	56,46	0,26	69,90	0,07	74,19	0,21
40			68,01	0,16	59,01	0,22	76,73	0,17	78,13	0,09
45			71,04	0,28	63,59	0,34	77,96	0,10	85,07	0,08
50			73,74	0,12	65,57	0,25	82,86	0,08	97,45	0,42
55			71,34	0,17	67,26	0,24	91,52	0,23	94,91	0,21
59,5			70,60	0,22	65,97	0,27	167,18	19,85	210,81	10,69

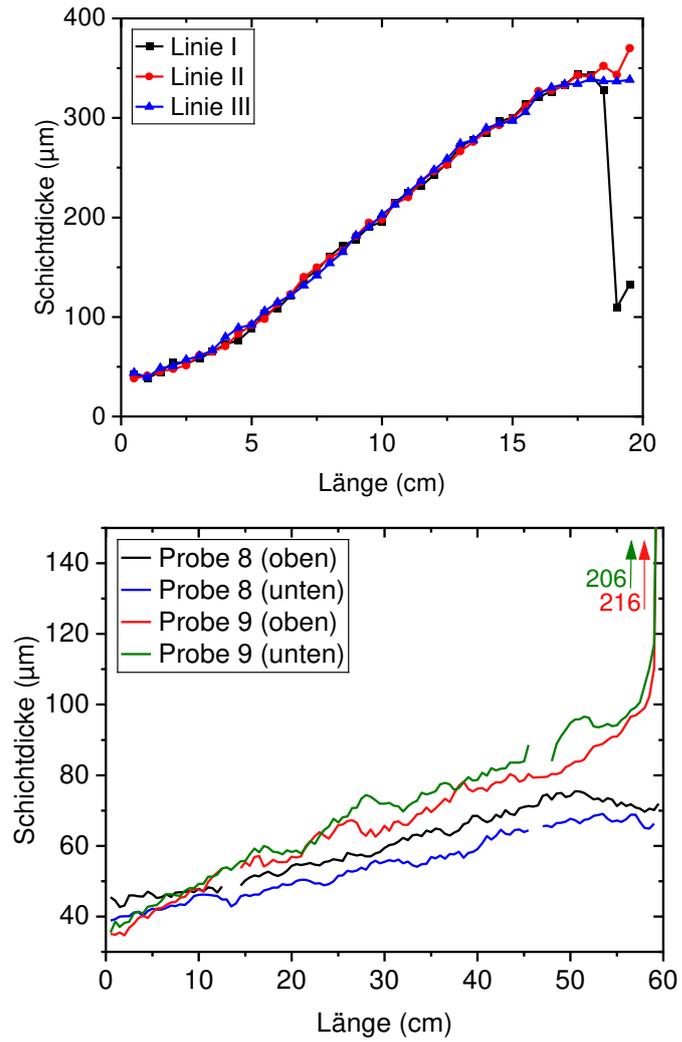


Abbildung 7: Schichtdickenverläufe der Probe 7 (oben), Probe 8 und Probe 9 (unten) entlang der Messlinien aus Abbildung 6, die mit dem Dualscope FMP40 in Kombination mit der Dualsonde FD13H ermittelt wurden

6 Anwendung der Puls-Thermografie zur Darstellung von Schichtdickenunterschieden

6.1 Theoretischer Zusammenhang zwischen Phase und Schichtdicke

Um die Umrechnung des thermischen Messsignals in Schichtdicken zu ermöglichen und darauf aufbauend eine industrietaugliche Messtechnik zu entwickeln, wurden zunächst grundlegende Untersuchungen anhand von Simulationen durchgeführt. Hierfür wurde ein aus der Literatur bekanntes mathematisches Modell als Grundlage verwendet, das sich aus der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung ableiten lässt und das die Ausbreitung, Reflexion und Interferenz von thermischen Wellen in einem Bauteil beschreibt [38, 39, 40, 49]. Vereinfachend wird dabei von einem Ein-Schicht-System aus Beschichtung und Substrat ausgegangen, bei dem das Substrat deutlich dicker als die thermische Eindringtiefe μ ist (vgl. Gleichung 1). Weiterhin werden laterale Wärmeflüsse aufgrund der großen dimensional Unterschiede zwischen Beschichtungsdicke und -breite vernachlässigt und es wird von einer Entstehung der thermischen Wellen ausschließlich an der Oberfläche ausgegangen. Letzteres setzt somit voraus, dass ein Beschichtungsmaterial vorliegt, das im Spektralbereich des Anregungslichts intransparent ist. Aus dem mathematischen Modell lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Phase des thermischen Messsignals und der Schichtdicke herleiten, der folgendermaßen beschrieben werden kann:

$$\varphi = \arctan \left[\frac{-2R \cdot e^{-2\frac{d}{\mu}} \cdot \sin\left(2 \cdot \frac{d}{\mu}\right)}{1 - \left(R \cdot e^{-2\frac{d}{\mu}}\right)^2} \right] - \frac{\pi}{4} \quad (3)$$

Neben der Schichtdicke d hängt die Phase vom Reflexionskoeffizienten R und der Eindringtiefe μ ab. R beschreibt hierbei den thermischen Reflexionskoeffizienten zwischen Beschichtungs- und Grundmaterial:

$$R = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \quad (4)$$

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 [38, 49]:

$$e = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (5)$$

Die Gleichungen 4 und 5 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 an der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Grundmaterial, wodurch ein größerer Anteil zurück zur Oberfläche diffundiert und sich auf das Temperaturverhalten auswirkt. Der Betrag von R ist am größten, wenn große Unterschiede zwischen den thermischen Effusivitäten, respektive der Dichte oder den thermischen Eigenschaften, des Beschichtungs- und des Substratmaterials vorliegen. Große Unterschiede liegen beispielsweise bei einer Kunststoffbeschichtung auf einem Metallsubstrat vor. Dies stellt einen typischen Anwendungsfall dar, bei dem die Beschichtung u. a. eine protektive Funktion hat und vor Korrosion oder Abrieb schützen soll. Hingegen liegen bei kunststoffbasierten Beschichtungen auf Kunststoffbauteilen ähnliche Materialeigenschaften vor, weswegen R einen betragsmäßig kleinen Wert aufweist, ein geringerer Anteil zurück zur Oberfläche diffundiert und somit die Schichtdickenmessung eine größere Herausforderung darstellt.

Die durch Gleichung 3 beschriebene Korrelation zwischen Phase und Schichtdicke ist in Abbildung 8 grafisch veranschaulicht. In Abbildung 8 (links) ist die Phase über die sog. thermische Dicke d/μ aufgetragen und der Einfluss von R dargestellt. Da auf der Abszisse die thermische Dicke aufgetragen ist, die die Dicke d in Relation zur Eindringtiefe μ setzt, ist die Grafik unter Berücksichtigung von R universell einsetzbar. In Abbildung 8 (rechts) ist hingegen die Phase über die Schichtdicke für unterschiedliche Auswertefrequenzen dargestellt. Zur Berechnung dieser frequenzabhängigen Verläufe wurde ein Reflexionskoeffizient von $-0,9$ angenommen und eine Temperaturleitfähigkeit von $0,085 \text{ mm}^2/\text{s}$ verwendet. Letzteres entspricht der ermittelten Temperaturleitfähigkeit des Acryllacks, der z. B. bei der Herstellung von Probe 2 verwendet wurde. Anhand der Kurve bei einer Frequenz von 1 Hz (blauer Graph) ist erkennbar, dass im Bereich zwischen $50 \text{ }\mu\text{m}$ und $200 \text{ }\mu\text{m}$ ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Phase und Schichtdicke vorliegt, während bei einer Frequenz von $0,3 \text{ Hz}$ zum Teil mehrere Dickenwerte von einem Phasenwert repräsentiert werden und eine eindeutige Zuordnung nicht möglich ist. Bei einer Frequenz von 4 Hz hingegen lassen sich Schichtdicken ab $150 \text{ }\mu\text{m}$ aufgrund geringerer Phasenunterschiede kaum noch unterscheiden. Die Kurve kann demnach über die Auswertefrequenz an den vorliegenden Schichtdickenbereich angepasst werden, sodass

sich die Korrelation zwischen Phase und Schichtdicke annähernd linear verhält. Liegen größere Schichtdickenunterschiede vor, die bei keiner Frequenz im annähernd linearen Bereich der Kurve liegen, sind hingegen mehrere Messungen bzw. Auswertungen mit unterschiedlichen Auswertefrequenzen notwendig.

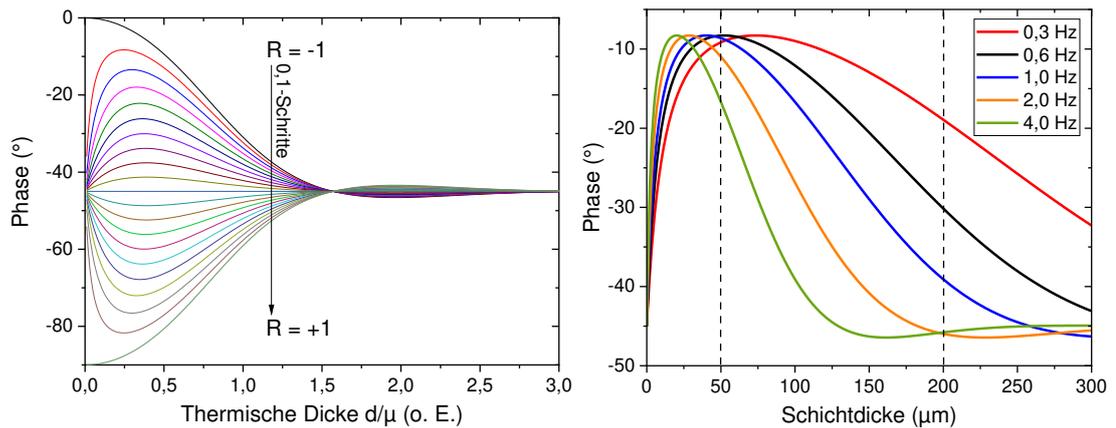


Abbildung 8: Grafische Veranschaulichung der Korrelation zwischen Phase und thermischer Dicke d/μ in Abhängigkeit vom Reflexionskoeffizienten R (links) und Darstellung der frequenzabhängigen Phasen-Dicke-Korrelation für Acryllack bei einem Reflexionskoeffizienten von -0,9 (rechts)

6.2 Experimentelle Untersuchung des Phasen-Dicken-Zusammenhangs

6.2.1 Ein-Puls-Anregung und Variation der Auswertefrequenz

Der in Kapitel 6 beschriebene Zusammenhang zwischen Phase und Schichtdicke wurde in diesem Abschnitt experimentell anhand der Proben 1 und 3 untersucht. Hierfür wurde die konventionelle Puls-Thermografie unter Verwendung der IR-Kamera VarioCAM und der Blitzeinheit VH3-6000 angewendet. Die Anregung fand mit einer Pulsenergie von 1.650 J statt und es wurde eine Aufnahme­frequenz von 50 Hz verwendet, um die pulsförmige Temperaturänderung ausreichend abtasten zu können. Aus dem Temperaturverhalten bei der Anregung mit einem einzelnen Puls kann entsprechend der Puls-Phasen-Thermografie von Maldague die Phaseninformation der thermischen Wellen gewonnen werden [47, 48, 50]. Das thermische Signal wurde für die Auswertung auf ein Intervall von 4 s gekürzt, wobei als Startzeitpunkt das Pulsmaximum gewählt wurde, und frequenzabhängigen Phasenwerte wurden für jeden Pixel über eine FFT ermittelt. In Abbildung 9 sind die Phasenbilder der Probekörper bei einer Frequenz von 1 Hz sowie definierte Messbereiche mit einer Größe von 15 x 15 Pixel je Schicht dargestellt. Anhand der Phasenbilder ist ersichtlich, dass die vorliegenden Schichtdickenunterschiede nur bedingt visualisiert werden können. Die Schichtdickenveränderung ist anhand des Farbgradienten ersichtlich, wobei dünnere Schichtdicken (in der Abbildung unten) zu einem größeren Phasenwert führen. Die Stufenform ist allerdings nur vereinzelt erkennbar und die Phasenbilder weisen ein hohes Rauschniveau auf, wie insbesondere anhand der dünneren Schichten bei Probe 1 ersichtlich ist. Um das Rauschniveau im Phasenbild zu verringern, wäre es denkbar, den Energieeintrag und folglich die Erwärmung zu erhöhen oder den Anteil der relevanten Frequenzkomponente im thermischen Signal zu stärken. Beide Ansätze lassen sich durch eine Mehr-Puls-Anregung realisieren, wie in den nachfolgenden Kapiteln im Detail beschrieben wird. Weiterhin fällt anhand der Phasenbilder auf, dass bei der Probe 1 der gesamte Schichtdickenbereich mit einer Auswertefrequenz von 1 Hz abgebildet werden kann, während bei Probe 3 ab der Stufe 9 ein Plateau erreicht wird und dickere Schichten nicht mehr unterscheidbar sind. Dies lässt sich auf dem in Abbildung 8 gezeigten nichtlinearen Zusammenhang zwischen Phase und Schichtdicke zurückführen und kann durch Anpassung der Auswertefrequenz optimiert werden, wie anhand von Abbildung 10 verdeutlicht wird. Diese zeigt die Korrelation zwischen den Phasenwerten und der thermischen Dicke für beide Proben bei verschiedenen Frequenzen aus dem Bereich von 0,1 Hz bis 4 Hz. Die Auftragung über die thermische Dicke ermöglicht es dabei,

wie bereits bei den theoretischen Kurven in Abbildung 8, den nichtlinearen Zusammenhang und den Einfluss der Auswertefrequenz deutlicher darzustellen. Da die kleinste Schichtdicke der Probe 3 ca. $75\ \mu\text{m}$ beträgt und davon ausgegangen wird, dass sich der Phasenumkehrpunkt für die untersuchten Frequenzen bei kleineren Schichtdicken befindet, beginnen alle Graphen in Abbildung 10 (links) im annähernd linearen Bereich, wohingegen die Verläufe der Probe 1 (Abbildung 10, rechts) einen Umkehrpunkt bei etwa 0,5 aufzeigen. Anhand der dargestellten Standardabweichung ist außerdem das hohe Rauschniveau bei der Ein-Puls-Anregung ersichtlich, das zu dünneren Schichten tendenziell einen höheren Wert einnimmt. Die Grafiken verdeutlichen, dass die Wahl einer für den jeweiligen Schichtdickenbereich passenden Auswertefrequenz entscheidend ist, um eine annähernd lineare Korrelation zwischen Phase und Schichtdicke zu erhalten und somit Dickenunterschiede anhand der Phasenwerte eindeutig voneinander differenzieren zu können. Bei größeren Schichtdickenunterschieden können dabei auch mehrere Auswertefrequenzen genutzt werden, um einen monotonen Zusammenhang zwischen Phase und Schichtdicke herzustellen. Es ist erkennbar, dass 2 Hz für Probe 1 und 0,6 Hz für Probe 3 geeignete Frequenzen darstellen, da hier ein annähernd linearer Verlauf für die untersuchten Schichtdicken vorliegt und der Verlauf den maximalen Phasenunterschied in diesem Bereich aufweist.

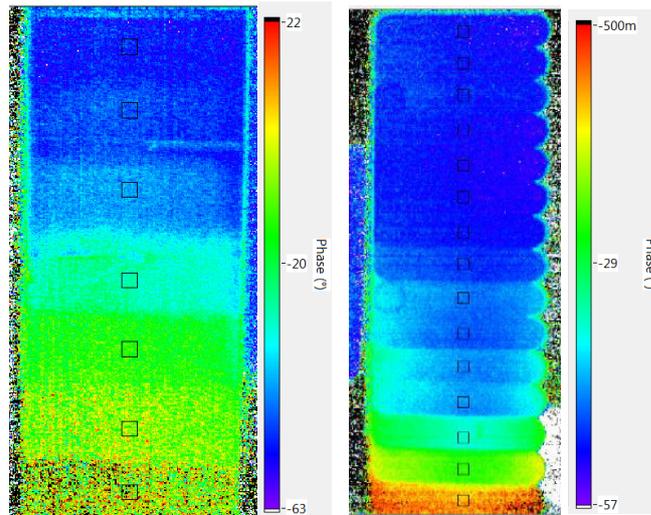


Abbildung 9: Phasenbilder der Probe 1 (links) und Probe 3 (rechts) bei einer Auswertefrequenz von 1 Hz aus einer konventionellen Puls-Thermografie-Messung. Für die Berechnung wurde das thermische Signal über 4 s ab dem Pulsmaximum verwendet. Die Markierungen (schwarze Quadrate) zeigen die definierten Messbereiche auf.

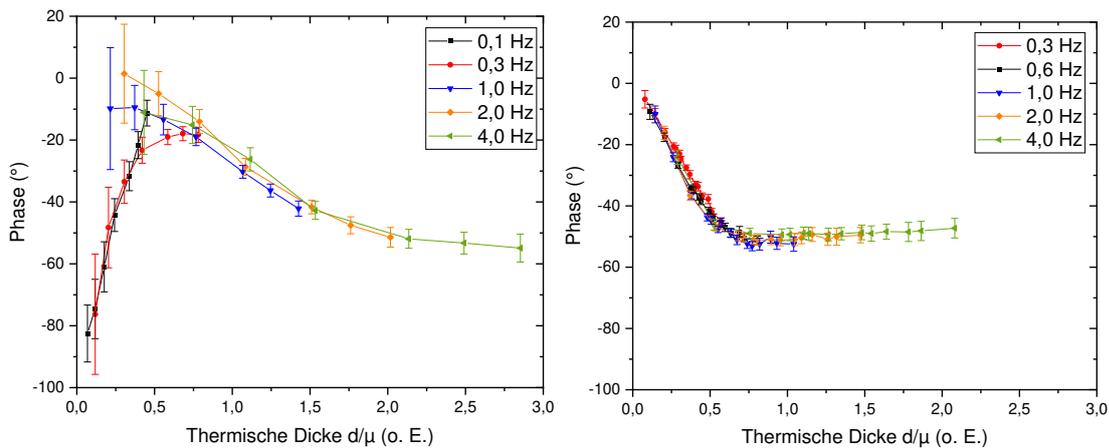


Abbildung 10: Korrelation der Phase mit der thermischen Dicke für Probe 1 (links) und Probe 3 (rechts). Für die Berechnung der thermischen Dicke wurden die in Tabelle 3 aufgeführten Werte verwendet.

6.2.2 Mehr-Puls-Anregung zur Gewichtung der relevanten Frequenz

Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, bietet die Mehr-Puls-Thermografie mehrere Vorteile für die Bestimmung der Schichtdicke. Ein Vorteil liegt in der Möglichkeit, bestimmte, relevante Frequenzen gezielt stärker zu gewichten, indem die entsprechende Periodendauer T oder ein Vielfaches davon als Pulsabstand eingestellt wird. Dies soll anhand der nachfolgenden Messreihe verdeutlicht werden, bei der die Frequenzen, die sich für die Probe 1 und Probe 3 als geeignet erwiesen haben, durch den entsprechenden Pulsabstand

stärker gewichtet werden. Dafür wurden die Proben mit einer Sequenz von bis zu 6 Pulsen angeregt, wobei die Energie der einzelnen Pulse bei größerer Pulsanzahl verringert wurde, sodass die eingebrachte Gesamtenergie bei jeder Messung in Summe gleich war. Als Pulsabstand wurde für Probe 1 0,5 s ($= 1/(2 \text{ Hz})$) und für Probe 3 1,67 s ($= 1/(0,6 \text{ Hz})$) gewählt. Abbildung 11 zeigt die berechneten Phasenbilder beider Proben bei einer Anregung durch 6 Pulse mit einer Pulsenergie 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 Phasenverläufe veranschaulichen, die in Abbildung 12 dargestellt sind. In den Diagrammen sind ebenfalls Referenzwerte dargestellt, die bei der Probe 1 mit einer Bügelmessschraube ermittelt wurden und bei der Probe 3 über eine Profilmessung vor dem Beschichtungsprozess (vgl. Kapitel 4.1). Hieraus ist erkennbar, dass die Phasenwerte bei der gewählten Auswertefrequenz trotz des nichtlinearen Zusammenhangs die Schichtdickenunterschiede bereits deutlich wiedergeben. Lediglich bei der tiefsten Schicht der Probe 3 (bei ca. 40 mm) wird das Plateau bei der Phasen-Dicken-Kurve erreicht.

Um den Einfluss der Gewichtung zu verdeutlichen, wurden weiterhin Messungen an Probe 1 durchgeführt, bei der die aufgewendete Gesamtenergie auf mehrere Pulse im Abstand von 1 s aufgeteilt wurde. Abbildung 13 zeigt die resultierenden Phasenverläufe, die durch Variation der Pulsanzahl bei gleicher Gesamtenergie (1.600 J) ermittelt wurden. Da die Anregung nicht synchron zur Aufnahme erfolgt ist, können keine Rückschlüsse aus den absoluten Phasenwerten gezogen werden. Stattdessen liegt der Fokus auf den relativen Änderungen der Phasenwerten, weswegen alle Phasenverläufe ausgehend vom Phasenwert 0 überlappend dargestellt sind. Ein Vergleich zeigt, dass eine Verstärkung der jeweils relevanten Frequenzen (entsprechend der vorliegenden Schichtdicken) durch Anregung mit mehreren Pulsen im richtigen Abstand zu einer Rauschminderung führt, obwohl durch die zeitliche Streckung der Anregung zusätzliche „Energieverluste“ eintreten. Die Reduzierung des Rauschniveaus ist in den vorgestellten Ergebnissen bei den dünnsten Schichten am deutlichsten erkennbar. Zusätzlich reduziert die Aufteilung der Energie auf mehrere Pulse insbesondere bei thermisch sensiblen Beschichtungsmaterialien das Risiko einer Schädigung des Bauteils, wengleich sich die Messdauer dadurch erhöht. Da der „Energieverlust“ aufgrund der zeitlichen Streckung der Rauschoptimierung, die durch die stärkere Gewichtung der jeweiligen Frequenzkomponente erzielt wird, entgegenwirkt, ist die Energieaufteilung auf mehrere Pulse allerdings nur bis zu

einer anwendungsabhängigen Pulsanzahl sinnvoll. Ebenfalls muss hier der zunehmende „Energieverlust“ mit zunehmenden Pulsabstand, respektive mit abnehmender Anregungsfrequenz, berücksichtigt werden. Dabei reicht i. d. R. eine Energieaufteilung auf wenige Pulse aus, um die thermische Belastung des Bauteils deutlich zu reduzieren und somit eine Schädigung von thermisch sensiblen Materialien zu vermeiden [42]. Bei thermisch weniger empfindlichen Materialien könnte hingegen auch der Energieeintrag vervielfacht werden, indem die jeweils maximal verfügbare Pulsenergie bei der Anregung mit mehreren Pulsen verwendet wird, wodurch eine zusätzliche Erhöhung des SNR realisiert werden kann.

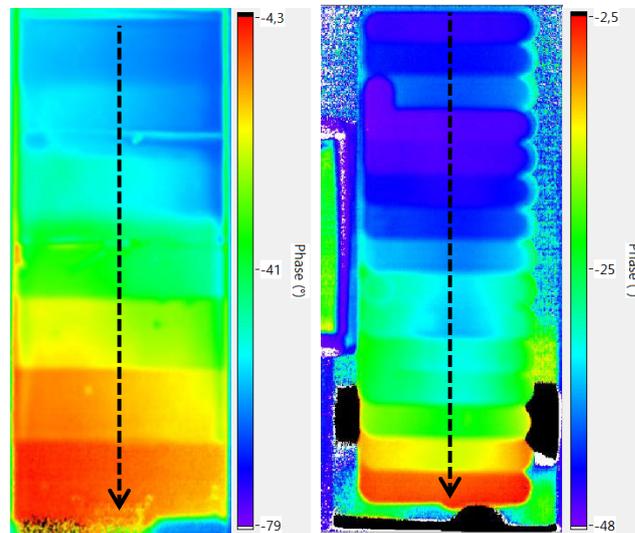


Abbildung 11: Phasenbilder der Probe 1 (links) und Probe 2 (rechts) bei Anregung mit einer Sequenz von 6 Pulsen. Die Pulsabstände wurden entsprechend der für die Schichtdicken relevanten Frequenz(en), die in Kapitel 6.2.1 ermittelt wurden, gewählt (Probe 1: 2 Hz, Probe 3: 0,6 Hz).

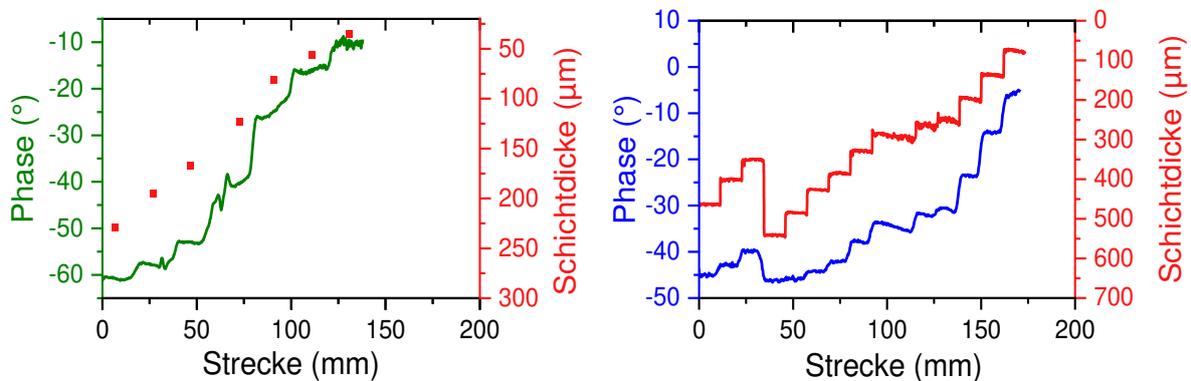


Abbildung 12: Phasenverlauf und Schichtdickenwerte für Probe 1 (links) und Probe 3 (rechts). Die Phasenwerte sind entlang der gestrichelten Linien aus Abbildung 11 aufgeführt. Die Referenzierung wurde bei Probe 1 mit dem Dualscope FMP40 und bei Probe 3 mit dem Surfscan durchgeführt.

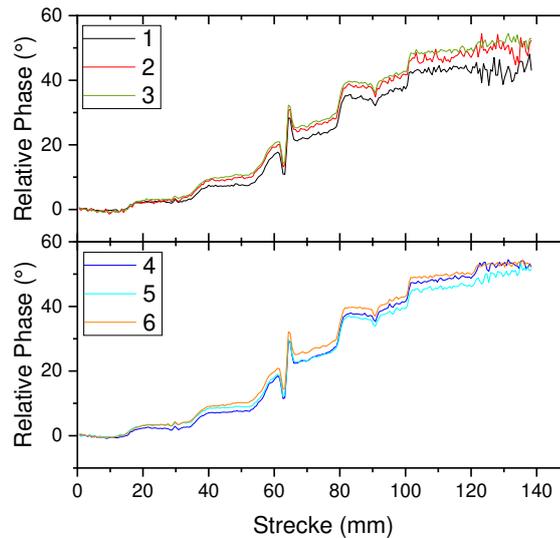


Abbildung 13: Phasenverläufe der Probe 1 bei Anregung mit variierender Pulsanzahl (1 bis 6). Die Phasenwerte sind entlang der gestrichelten Linien aus Abbildung 11 aufgeführt. Für jede Messung wurde die gleiche Gesamt-Pulsenergie verwendet und zur besseren Vergleichbarkeit sind die Phasenverläufe überlappend dargestellt, beginnend ab einem Phasenwert von 0° . Die Legende führt die Pulsanzahl auf.

6.3 Entwicklung der Messmethode

Bei der konventionellen Lock-in-Thermografie wird, wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, gezielt sinusförmig mit einer Modulationsfrequenz angeregt, weswegen separate Messungen für die Betrachtung mehrerer Frequenzen notwendig sind. Bei der konventionellen Puls-Thermografie wird hingegen mit einem kurzzeitigen, leistungsstarken Puls angeregt, der zu einem entsprechenden pulsförmigen Temperatursignal führt. Dieses enthält ein breites Spektrum an Frequenzen, wodurch die Auswertung unterschiedlicher Frequenzen anhand von einer Messung ermöglicht wird, wie es bei der Puls-Phasen-Thermografie genutzt wird [47, 48, 50]. Allerdings ist jede Frequenzkomponente aufgrund des breiten Spektrums nur zu einem geringen Anteil im Signal enthalten, wodurch das Rauschniveau im Vergleich zur Lock-in-Thermografie deutlich höher ist, wie die experimentellen Untersuchungen in Kapitel 6.2.1 verdeutlicht haben. Mithilfe der Mehr-Puls-Thermografie ist es hingegen möglich, gezielt mehrere Frequenzkomponenten im Messsignal zu gewichten. In Abbildung 14 (links) ist das resultierende Temperatur-Zeit-Diagramm aus der Messung von Probe 2 aufgeführt, in dem die pulsförmige Temperaturantwort und die Periodizität des Messsignals erkennbar ist. Wird das Signal über eine FFT in den Frequenzraum überführt, resultiert das Amplitudenspektrum, das in Abbildung 14 (rechts) dargestellt ist. Anhand des Amplitudenspektrums ist ersichtlich, welche Frequenzkomponenten

zu welchem Anteil im Messsignal enthalten sind. Die enthaltenen Frequenzkomponenten können dabei über den Pulsabstand flexibel eingestellt werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass ein größerer Pulsabstand zwar zu einer kleineren Schrittweite führt, aber die Messdauer bei gleicher Pulsanzahl dadurch auch erhöht wird und der Energieeintrag zeitlich gestreckt wird, wodurch größere „Energieverluste“ auftreten [42]. Ebenso müssen hardwareseitige Limitationen wie die Aufnahmefrequenz oder der minimal einstellbare Pulsabstand berücksichtigt werden.

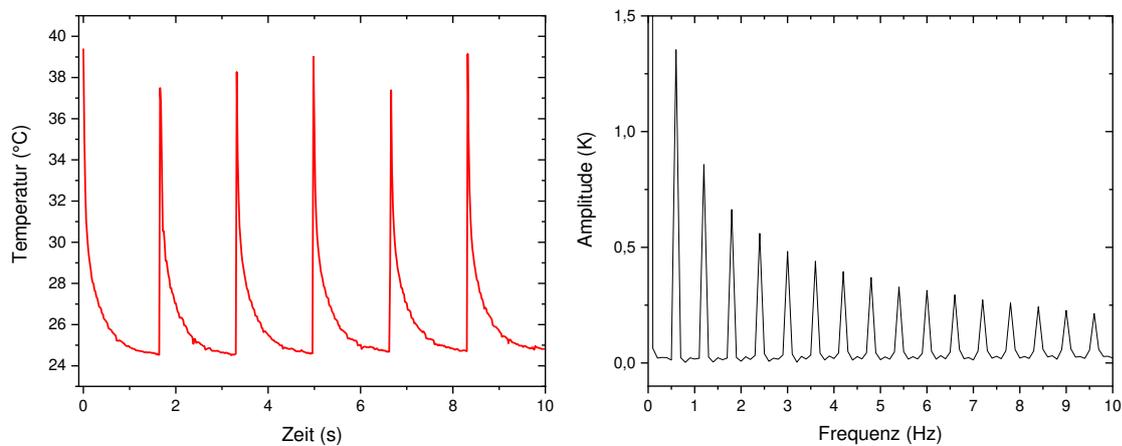


Abbildung 14: Temperaturverlauf über die Zeit (links) und durch FFT generiertes Amplitudenspektrum (rechts) der Probe 2 bei Anregung mit sechs Pulsen im Abstand von 1,67 s

Anhand der Phaseninformation lassen sich zwar bereits Schichtdickenunterschiede erkennen, für die Quantifizierung der Schichtdicke ist allerdings noch ein weiterer Kalibriervorgang notwendig, bei dem die im mathematischen Zusammenhang involvierten Parameter bestimmt werden (vgl. Gleichung 3). Dadurch kann eine eindeutige Zuordnung von Phase und Schichtdicke in Abhängigkeit von der Frequenz für die vorliegende Materialkonstellation realisiert werden. Bei den unbekannt Parametern handelt es sich um den Reflexionskoeffizient R und die in der thermischen Eindringtiefe enthaltene Temperaturleitfähigkeit α des Beschichtungsmaterials. Für die Bestimmung von R wird wiederum die Dichte, Temperaturleitfähigkeit und Wärmekapazität beider Materialien benötigt.

Einen Ansatz zur Bestimmung der unbekannt Parameter stellt die Untersuchung der jeweiligen Materialien mit etablierten Messverfahren dar, sodass die relevanten Kenngrößen ermittelt werden können. Allerdings ist die Bestimmung der Materialkennwerte

aufwändig. Ebenso ist auch unter Kenntnis dieser Kennwerte nicht sichergestellt, dass die anschließend mittels Mehr-Puls-Thermografie berechnete Schichtdicke dem realen Wert entspricht, da beim mathematischen Modell Vereinfachungen getroffen wurden und potenzielle Störfaktoren nicht berücksichtigt werden können. Einen weiteren Ansatz stellt die Referenzierung der Schichtdicke an bestimmten Positionen dar, an denen auch mittels Mehr-Puls-Thermografie gemessen wird. Dadurch können die Phasen-Frequenz-Verläufe den entsprechenden Schichtdicken zugeordnet werden und die unbekannt Parameter für die vorliegende Materialkonstellation bestimmt werden. Dafür ist es notwendig, dass eine Zuordnung bei unterschiedlichen, relevanten Schichtdicken stattfindet, sodass mehrere Gleichungen vorliegen und alle unbekannt Parameter ermittelt werden können. Es hat sich als zielführend erwiesen, einen Messbereich mit maximaler Schichtdicke, einen Bereich mit minimaler Schichtdicke und mindestens einen Bereich mit einer Schichtdicke, die sich dazwischen befindet, zu wählen. Unter Kenntnis der Schichtdickenwerte können die Phasen-Frequenz-Verläufe gefittet werden und die unbekannt Größen R und α für die Materialkonstellation bestimmt werden. Der zweite Ansatz stellt hierbei eine industrietauglichere Variante dar, da potenzielle Messfehler aufgrund von falsch bestimmten Materialkennwerten, dem vereinfachten mathematischen Modell oder weiteren potenzielle Störgrößen vermieden werden können und eine Schichtdicken-Referenzmessung i. d. R. leichter für Anwender umsetzbar ist.

Nach erfolgter Bestimmung der Parameter R und α kann die Schichtdicke von unbekannt Bereichen schließlich berechnet werden, indem die entsprechenden Phasen-Frequenz-Verläufe gefittet werden. Wird dies für das Messsignal jedes Kamerapixels durchgeführt, der sich auf der Probe befindet, kann demnach flächig die Schichtdicke bestimmt werden.

6.3.1 Einfluss von Pulsenergie und Pulsanzahl

Um den Einfluss der Pulsenergie und der Pulsanzahl auf das Messergebnis zu evaluieren, wurden Messungen mit variierenden Einstellungen an Probe 2 durchgeführt. Für die Messreihe wurde die IR-Kamera VarioCAM und die beiden Blitzlampen D2 1000 verwendet. Die Aufnahme fand mit einer Aufnahmefrequenz von 50 Hz statt und die Anregung erfolgte mit 10 Pulsen im Abstand von 5 s. Das resultierende Phasenbild ist in Abbildung 15 aufgeführt und verdeutlicht, dass bei einer Auswertefrequenz von 200 mHz der komplette Schichtdickenbereich von ca. 40 bis ca. 640 μm aufgelöst werden kann.

In Abbildung 16 (links) sind die Phasenwerte entlang der Messlinie (vgl. Abbildung 15) für unterschiedliche Pulsenergien darstellt. Um einen Vergleich der Phasenverläufe zu ermöglichen, wurden diese relativ zueinander verschoben. Dies ist möglich, da bei der Messreihe ausschließlich relative Änderungen am Verlauf und keine absoluten Phasenwerte untersucht werden. Anhand der Phasenverläufe ist erkennbar, dass die Schichtdickenunterschiede der Probe 2 bei einer Pulsenergie von 125 J oder weniger nicht mehr zuverlässig unterschieden werden können. Dies wird auch durch das mit zunehmender Pulsenergie abnehmende Rauschniveau der jeweiligen Phasenbilder verdeutlicht, das von der Standardabweichung der Phasenwerte in Abbildung 16 (rechts) abgeleitet werden kann. Ein Vergleich der mittleren Standardabweichung aller 15 Stufen deutet darauf hin, dass eine Verdopplung der Blitzenergie in etwa zu einer Halbierung des Rauschniveaus führt.

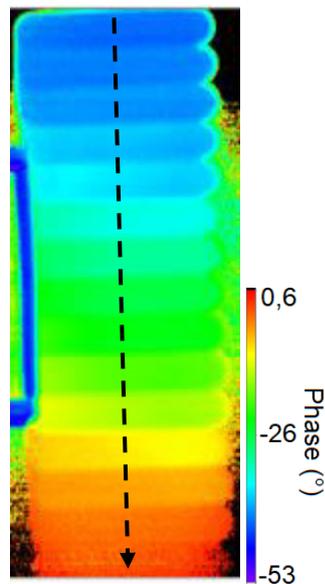


Abbildung 15: Phasenbilder der Probe 2 bei einer Auswertefrequenz von 200 mHz. Die gestrichelte Messlinie wurde für nachfolgende Untersuchungen verwendet.

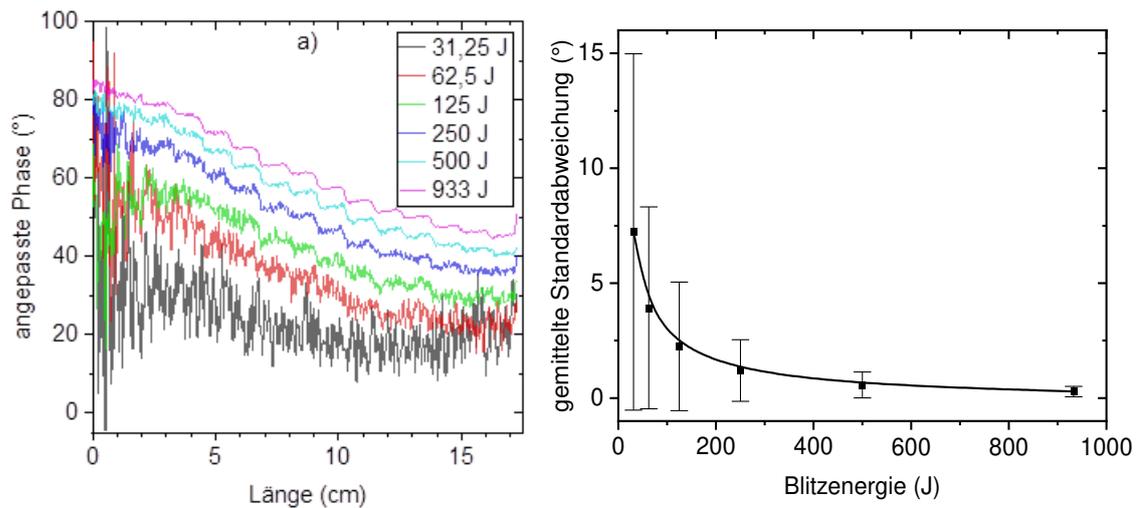


Abbildung 16: Links: Phasenverlauf der Probe 2 bei einer Auswertefrequenz von 200 mHz entlang der Linie in Abbildung 15 mit unterschiedlichen Pulsenergien. Rechts: Aus den Phasenverläufen resultierende mittlere Standardabweichung für die entsprechenden Pulsenergien.

In Abbildung 17 sind exemplarisch die Phasenverläufe und die entsprechenden mittleren Standardabweichungen der Messreihe mit variierender Pulsanzahl aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Schichtdickenunterschiede bei jeder der untersuchten Pulsanzahl visualisiert werden konnten und ab einer Pulsanzahl von ca. 6 für Probe 2 kaum noch eine Verringerung der Standardabweichung und damit des Rauschniveaus resultiert, während die Messdauer mit zunehmender Pulsanzahl zunimmt.

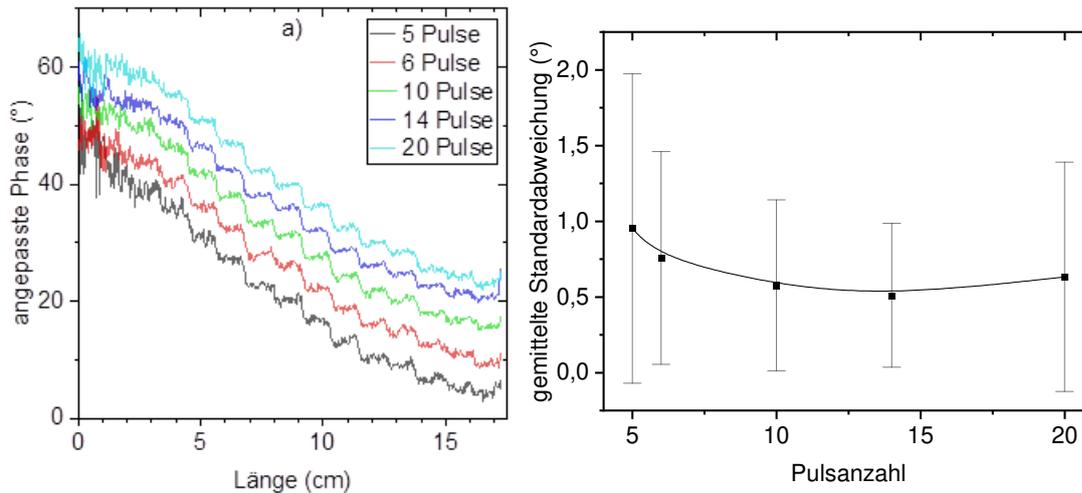


Abbildung 17: Links: Phasenverlauf der Probe 2 bei einer Auswertefrequenz von 200 mHz entlang der Linie in Abbildung 15 mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsen. Rechts: Aus den Phasenverläufen resultierende mittlere Standardabweichung für die entsprechende Pulsanzahl. Die entsprechenden Fehlerschläuche sind in grau dargestellt.

Dieser Zusammenhang zwischen Phasenrauschen, Pulsenergie und Pulsanzahl kann nicht nur bei der Grundfrequenz, sondern auch bei allen harmonischen Vielfachen festgestellt werden, wie die Phasen-Frequenz-Verläufe der Stufe 8 (Probe 2) zeigen, die in Abbildung 18 aufgeführt sind. Die Phasen-Frequenz-Verläufe wurden jeweils durch Mittelung von neun Messpixeln berechnet und wurden zur Vergleichbarkeit wieder zueinander verschoben. Auch hier zeigt sich, dass eine Verdoppelung der Pulsenergie in etwa zu einer Halbierung des Rauschlevels führt. Insbesondere am Plateau, das ab ca. 3 Hz erreicht wird, ist außerdem erkennbar, dass mit zunehmender Blitzenergie auch die Schwankungen der Phasenwerte um den Grenzwert immer geringer werden. Im Vergleich dazu weisen die Phasen-Frequenz-Verläufe bei Variation der Pulsanzahl, die in Abbildung 18 (rechts) gezeigt sind, deutlich geringer ausgeprägte Unterschiede auf. Berücksichtigt werden muss hierbei auch, dass eine deutlich kleinere Skalierung aufgrund der geringeren Schwankung gewählt wurde. Anhand der Phasen-Frequenz-Verläufe lässt sich eine geringfügige Verbesserung des Rauschens anhand der Standardabweichung feststellen, die mit zunehmender Pulsanzahl geringer wird.

Zusammenfassend konnte somit festgestellt werden, dass die Pulsenergie einen großen Einfluss auf die Detektion von Schichtdickenunterschieden nimmt, wohingegen die Anzahl an Pulsen eine geringere Rolle spielt.

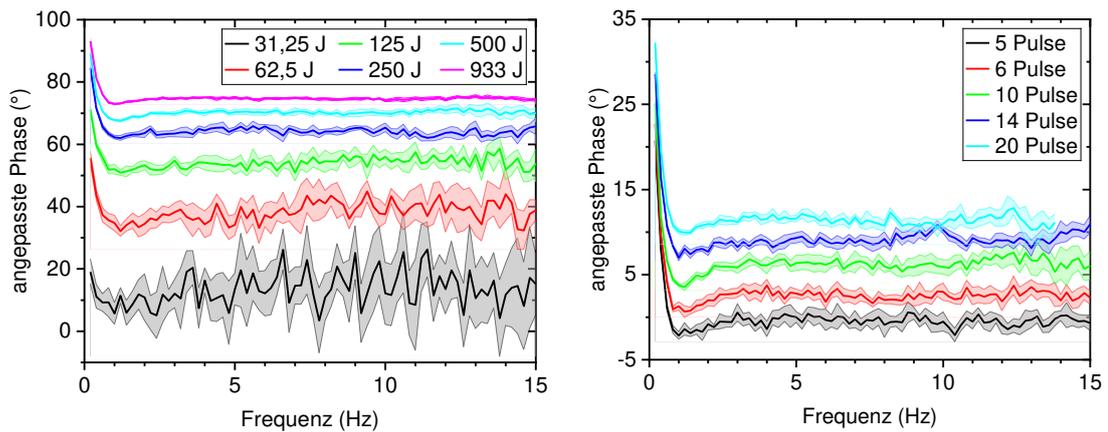


Abbildung 18: Mittlerer Phasen-Frequenz-Verlauf der Stufe 8 von Probe 2 bei Verwendung unterschiedlicher Pulsenergien (links) und einer variierenden Pulsanzahl (rechts). Die Standardabweichung ist anhand der Fehlerschläuche erkennbar.

6.4 Vergleich von Ein-Puls- und Mehr-Puls-Anregung

Bei der Verwendung von mehreren Pulsen muss berücksichtigt werden, dass eine größere Pulsanzahl zwar zu einer Zunahme der Messdauer und der Datenmenge führt, allerdings aber auch eine geringere Erwärmung und damit geringere thermische Belastung des Bauteils resultiert. Nachfolgend wird exemplarisch gezeigt, wie sich ein Einsatz von mehreren Pulsen im Vergleich zu einem Puls derselben Gesamt-Blitzenergie auf das Ergebnis auswirkt. Der Vergleich wurde an Probe 2 durchgeführt und soll weitere Vorzüge oder Limitationen des neuen Messansatzes aufzeigen. Bei der Mehr-Puls-Thermografie wurde die gleiche Blitzenergie wie bei der Ein-Puls-Thermografie verwendet, indem die Gesamtenergie des einen Pulses auf die einzelnen Pulse der Mehr-Puls-Thermografie aufgeteilt wurde. Zur Aufnahme wurde die SC5500 mit einer Aufnahme Frequenz von 100 Hz verwendet. Zur Anregung wurde die VH3-6000 unter Verwendung von einem Blitz mit 1650 J bzw. sechs Blitzen mit 277 J im Abstand von 5 s eingesetzt. Die Aufnahmedauer betrug bei beiden Messungen 30 s. Die resultierenden Phasenbilder sind in Abbildung 19 dargestellt und verdeutlichen, dass die Schichtdickenunterschiede mit beiden Methoden visualisiert werden können. Für einen Vergleich der Phasenwerte wurde auf jeder Stufe mittig ein Messbereich der Größe 5x5 Pixel definiert. Das Ergebnis zeigt, dass bei einer zur Anregung synchronisierten Aufnahme auch die absoluten Phasenwerte vergleichbar sind (vgl. Abbildung 20, links). Die Ergebnisse der Mehr-Puls-Thermografie weisen allerdings ein geringeres Rauschniveau auf, obwohl die Energieeinbringung hier über einen längeren Zeitraum erfolgt und damit zusätzliche „Energieverluste“ im Vergleich zur Puls-

Thermografie auftreten. Dies kann wieder anhand der Werte der Standardabweichung verdeutlicht werden, die in Abbildung 20 (rechts) aufgeführt ist. Auch eine Betrachtung der Phasen-Frequenz-Verläufe, die für drei Stufen jeweils exemplarisch in Abbildung 20 gezeigt sind, verdeutlicht die Unterschiede im Rauschniveau. In den Diagrammen sind erneut mittlere Phasen-Frequenz-Verläufe dargestellt, die aus einem Messbereich der Größe 3x3 Pixel berechnet wurden. Daran zeigt sich, dass eine Aufteilung der Pulsenergie auf sechs Pulse zu einer deutlichen Reduzierung des Phasenrauschens führt und auch die Schwankung der Phasenwerte bei unterschiedlichen Frequenzen deutlich abnimmt.

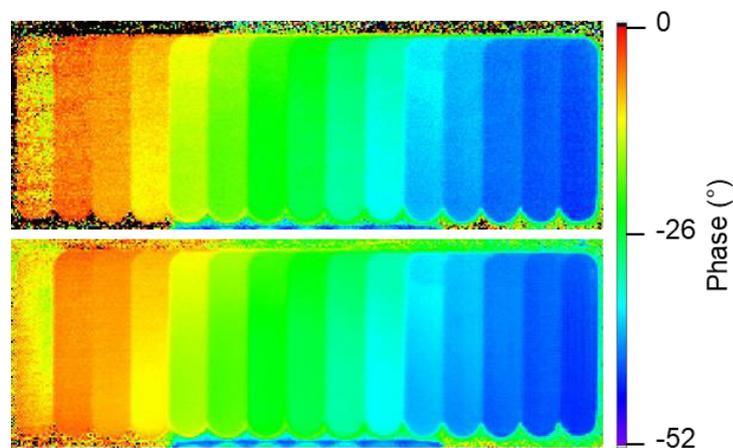


Abbildung 19: Phasenbilder der Probe 2 aus der Messung mit Puls-Thermografie (oben) und Mehr-Puls-Thermografie unter Verwendung von 6 Blitzen (unten)

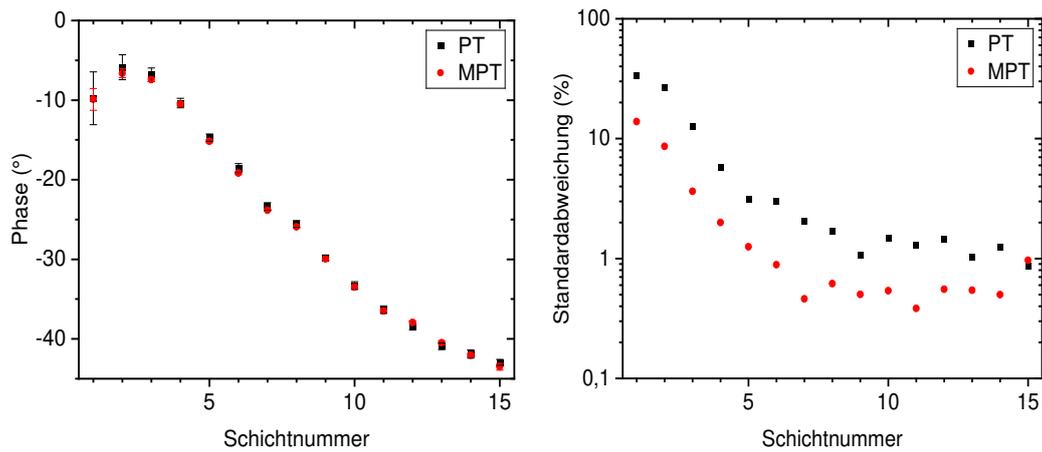


Abbildung 20: Mittlerer Phasenwert jeder Schicht der Probe 2 (links) sowie die entsprechende Standardabweichung (rechts) aus Puls-Thermografie (PT) und Mehr-Puls-Thermografie (MPT)

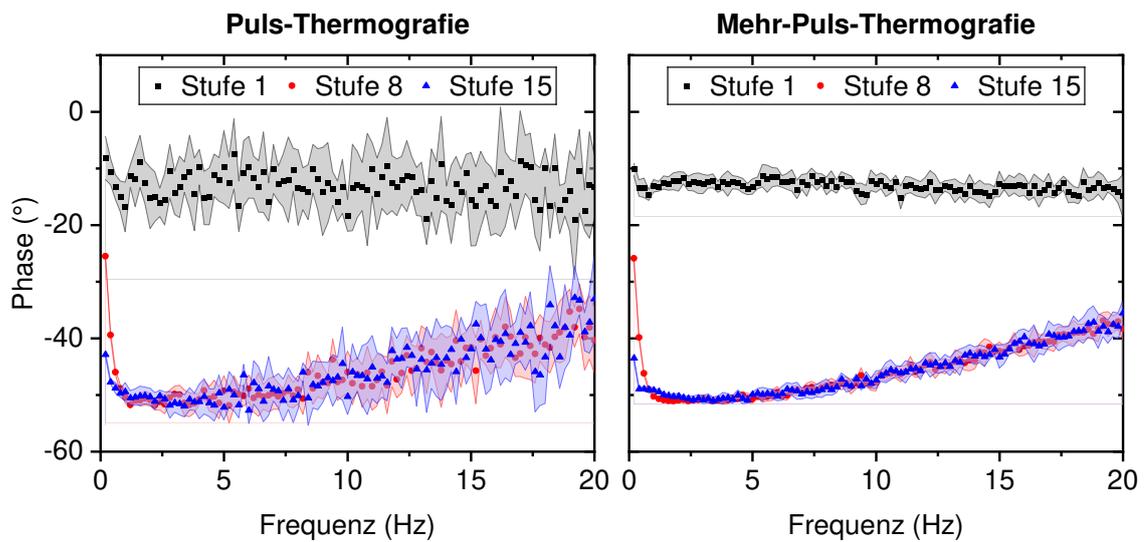


Abbildung 21: Mittlere Phasen-Frequenz-Verläufe der (Ein-)Puls-Thermografie (links) und Mehr-Puls-Thermografie (rechts). Die Verläufe wurden aus einem Messbereich der Größe 3x3 Pixel für die Stufen 1, 8 und 15 ermittelt. Die Standardabweichung ist anhand der Fehlerschläuche erkennbar.

7 Absolute Bestimmung der Schichtdicke mittels Mehr-Puls-Thermografie

In diesem Kapitel soll die Methode für die flächige Quantifizierung der Schichtdicke auf Basis der zuvor beschriebenen Überlegungen und gewonnenen Erkenntnisse entwickelt werden. Hierfür wird der in Kapitel 6.3 beschriebene Ansatz verfolgt, bei dem zunächst ein Kalibriervorgang zur Bestimmung der unbekannt Parameter durchgeführt wird und anschließend die Phasenwerte für alle Kamerapixel in Schichtdickenwerte umgerechnet werden. Das Vorgehen wird zunächst für Probe 2 vorgeführt und anschließend an allen weiteren Prüfkörpern evaluiert. Für den Kalibriervorgang wurden die Referenz-Schichtdickenwerte aus Tabelle 3 verwendet. Als Ergebnis konnte für R der Wert $-0,93$ und für α der Wert $0,14 \text{ mm}^2/\text{s}$ ermittelt werden. Diese liegen in einer Größenordnung, die im Vergleich zu den aus der Literatur bekannten Kennwerten realistisch ist.

Nach der Bestimmung der unbekannt Parameter kann für jeden weiteren Kamerapixel eine Schichtdicke bestimmt werden, indem der entsprechende Phasen-Frequenz-Verlauf gefittet wird. In Abbildung 22 (links) ist ein resultierendes Dickenbild der Probe 2 dargestellt, in dem die Schichtdickenunterschiede anhand der stufenweisen Farbänderung deutlich erkennbar sind. Um die Reproduzierbarkeit der Dickenwerte und einen Vergleich mit den Referenzwerten zu ermöglichen, wurde der Schichtdickenverlauf entlang der im Dickenbild aufgeführten Messlinie für fünf unterschiedliche Messungen betrachtet. In Abbildung 22 (rechts) ist der resultierende mittlere Schichtdickenverlauf sowie die Referenzwerte der jeweiligen Stufe aufgeführt. Anhand der kleinen Standardabweichung wird deutlich, dass sehr ähnliche Schichtdicken aus fünf Wiederholmessungen ermittelt werden können und somit eine hohe Reproduzierbarkeit gegeben ist. Lediglich an den Übergängen zwischen den Stufen ist vereinzelt eine Zunahme der Standardabweichung erkennbar, weil hier möglicherweise die Messlinien von Messung zu Messung leicht zueinander verschoben sind. Ein Vergleich mit den Referenzwerten zeigt, dass diese bei kleineren Schichtdicken gut übereinstimmen, während die Abweichung mit größeren Schichtdicken zunimmt. Eine zunehmende Abweichung bei größeren Schichtdicken lässt sich darauf zurückführen, dass für den Kalibriervorgang nicht der komplette Schichtdickenbereich abgebildet, sondern lediglich Stufe 1, 4 und 7 verwendet wurden. Allerdings muss auch berücksichtigt werden, dass bei größeren Schichtdicken auch laterale Wärmeflüsse, die im Modell vernachlässigt werden, einen größeren Einfluss nehmen.

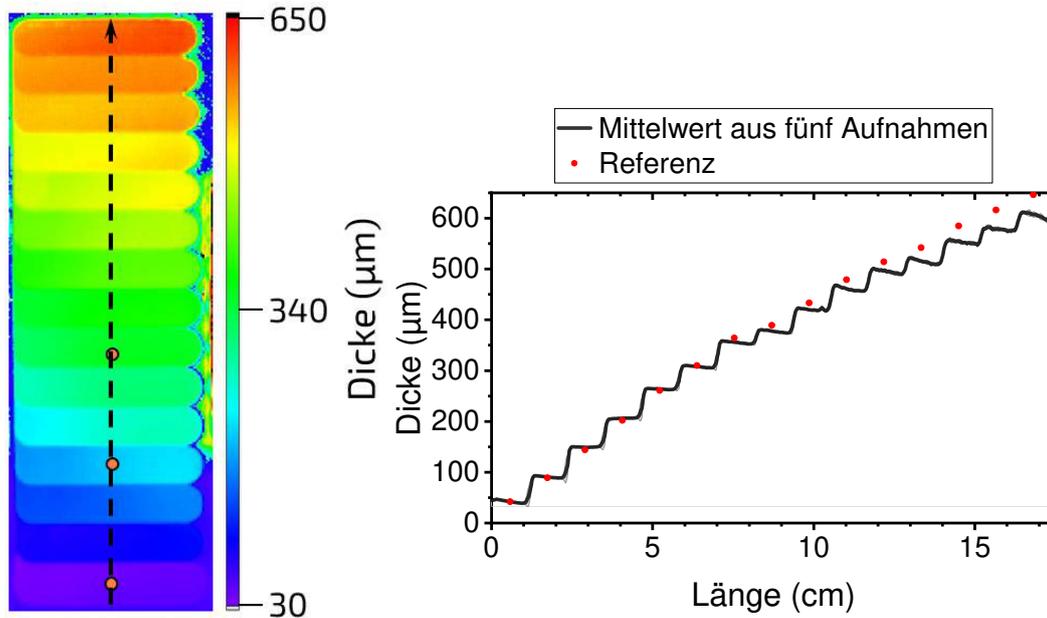


Abbildung 22: Dickenbild der Probe 2 (links) sowie ein mittlerer Dickenverlauf entlang der im Dickenbild aufgeführten Messlinie mit den entsprechenden Referenzschichtdicken (rechts). Im Dickenbild sind die für die Kalibrierung verwendeten Messpunkte (orange) aufgeführt. Für den mittleren Schichtdickenverlauf wurde die Messung fünf Mal wiederholt. Die Standardabweichung ist anhand der Fehler-schläuche erkennbar.

Die entwickelte Messmethode wurde nachfolgend an Probe 3 sowie auch an den Proben 4 und 5, die ein Kunststoffsubstrat aufweisen, erprobt. Bei Probe 3 konnte ein zur Probe 2 vergleichbares Dickenbild berechnet werden, wie Abbildung 23 (links) veranschaulicht. Auch hier stimmen die ermittelten Werte annähernd gut mit den Referenzwerten überein, wie die Linienverläufe aus Abbildung 23 (rechts) verdeutlichen. Da es sich bei den Referenzwerten um das Tiefenprofil handelt, das mit dem Laserlinenscanner vor der Beschichtung aufgenommen wurde, können Abweichungen auch aus Messfehlern oder Abweichungen der Referenzwerte resultieren. Insbesondere durch Aushärte- oder Alterungsprozesse kann der applizierte Lack auch über einen längeren Zeitraum noch schrumpfen, wodurch der reale Schichtdickenwert kleiner als der Referenzwert sein könnte. Dies hätte bei dickeren Beschichtungen einen größeren Einfluss, wodurch die größere Abweichung der Thermografie-Ergebnisse bei den großen Schichtdicken erklärt werden könnte.

Wie Abbildung 24 und Abbildung 25 veranschaulichen, kann die Messtechnik auch an Kunststoffsubstraten angewendet werden, obwohl hier an der Grenzfläche von Beschichtung zu Substrat ein deutlich geringerer Anteil der Wärmewellen reflektiert wird und der

Reflexionskoeffizient R betragsmäßig deutlich kleiner ist. In den Dickenbildern, die jeweils links dargestellt sind, sind die zur Berechnung verwendeten Kalibrierpunkte aufgeführt. Die Dickenbilder weisen mehrere Inhomogenitäten auf. Zum einen liegen innerhalb einer Stufe, insbesondere bei Probe 4, stärkere Schichtdickenschwankungen vor. Dies kann aus tatsächlich stärker ausgeprägten Schichtdickenunterschieden innerhalb der Stufe resultieren, aber auch durch den geringeren Anteil an nutzbaren Wärmewellen entstehen, wodurch das Rauschen generell höher und die Informationsausbeute niedriger ist. Zum anderen sind auch lokale Inhomogenitäten erkennbar, die auf Fehler wie Einschlüsse in der Beschichtung oder an der Oberfläche zurückgeführt werden können und die durch die händische Beschichtung entstanden sind. Weiterhin sind zum Teil auch in den Randbereichen der Ergebnisbilder abweichende Schichtdickenwerte erkennbar. Diese lassen sich möglicherweise auf unerwünschte Effekte am Probenrand zurückführen. Die Schichtdickenverläufe entlang den in den Dickenbildern gezeigten Messlinien sind in den Abbildungen rechts zusammen mit den Referenzwerten jeder Stufe dargestellt und zeigen ebenfalls, dass bei den Proben 3 und 4 eine weniger stark ausgeprägte Stufenform vorliegt. Dennoch zeigt der Vergleich mit den Referenzwerten, dass annähernd vergleichbare Schichtdickenwerte berechnet werden können. Die Schichtdickenunterschiede bei Probe 6 konnten hingegen nicht über ein Dickenbild visualisiert werden (vgl. Abbildung 26). Es wird angenommen, dass hierfür mehrere Ursachen vorliegen. Zum einen weist der Prüfkörper im Vergleich zu den anderen polymeren Prüfkörpern große Schichtdicken auf, die aufgrund des großen Verlustanteils durch Transmission an der Grenzfläche nicht messbar sind. Zum anderen wird angenommen, dass bei der Kombination aus Acryllack und PVC-Substrat sehr ähnliche Materialeigenschaften und folglich ein geringerer Reflexionsgrad als bei den anderen beiden Materialkonstellationen vorliegen. Zuletzt kann als Ursache der große Anteil an Lufteinschlüssen, die bei der Beschichtung der Probe 6 entstanden sind, angegeben werden. Diese führen zu zusätzlichen Grenzflächen in der Beschichtung, die die Wärmewellen reflektieren und das Messsignal negativ beeinflussen. Diese Fehler sind sowohl im Phasenbild als auch im resultierenden Dickenbild erkennbar, wie Abbildung 26 veranschaulicht.

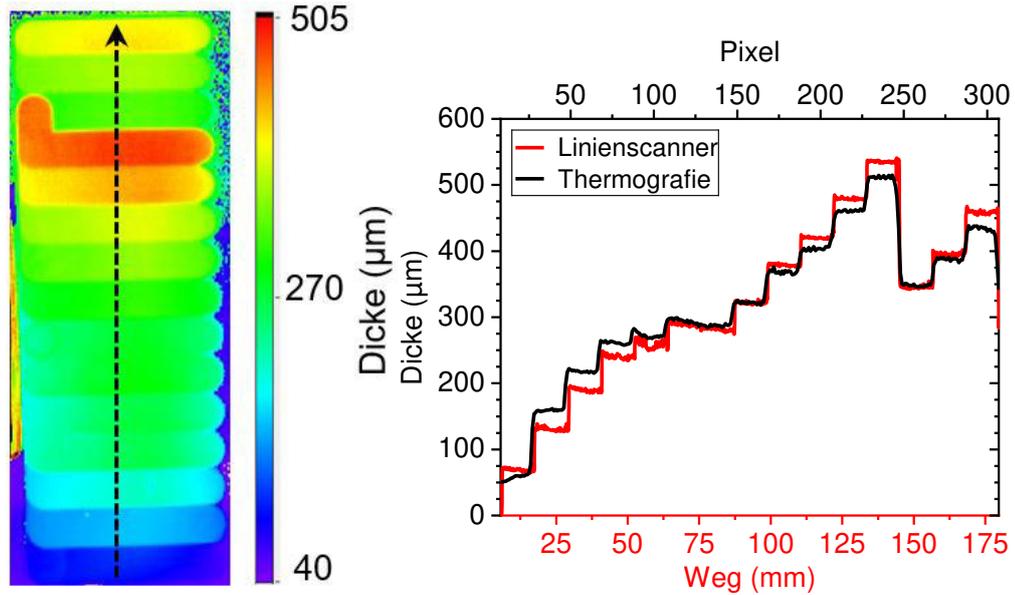


Abbildung 23: Dickenbild der Probe 3 (links) sowie der Dickenverlauf entlang der im Dickenbild aufgeführten Messlinie mit den entsprechenden Referenzschichtdicken (rechts). Als Referenz wurde das Tiefenprofil aus Abbildung 4 verwendet.

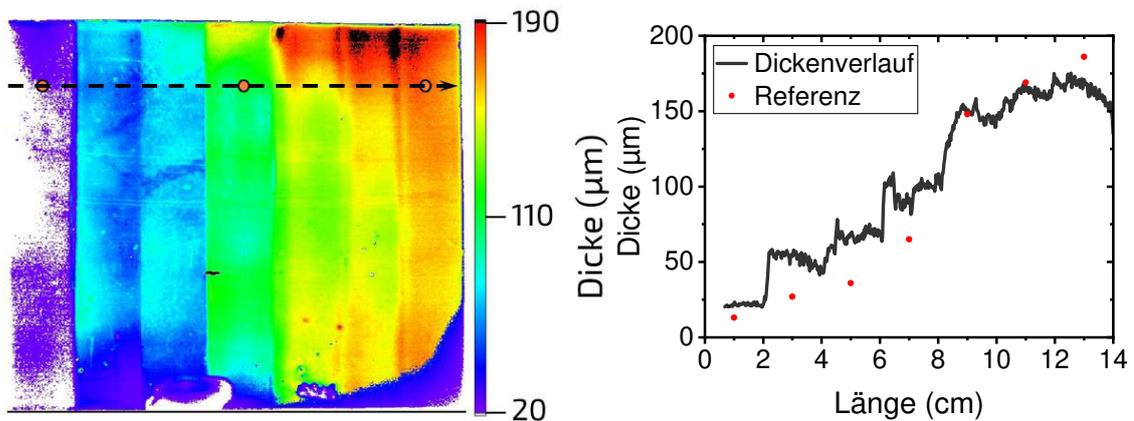


Abbildung 24: Dickenbild der Probe 4 (links) sowie der Dickenverlauf entlang der im Dickenbild aufgeführten Messlinie mit den entsprechenden Referenzschichtdicken (rechts). Im Dickenbild sind die für die Kalibrierung verwendeten Messpunkte (orange) aufgeführt.

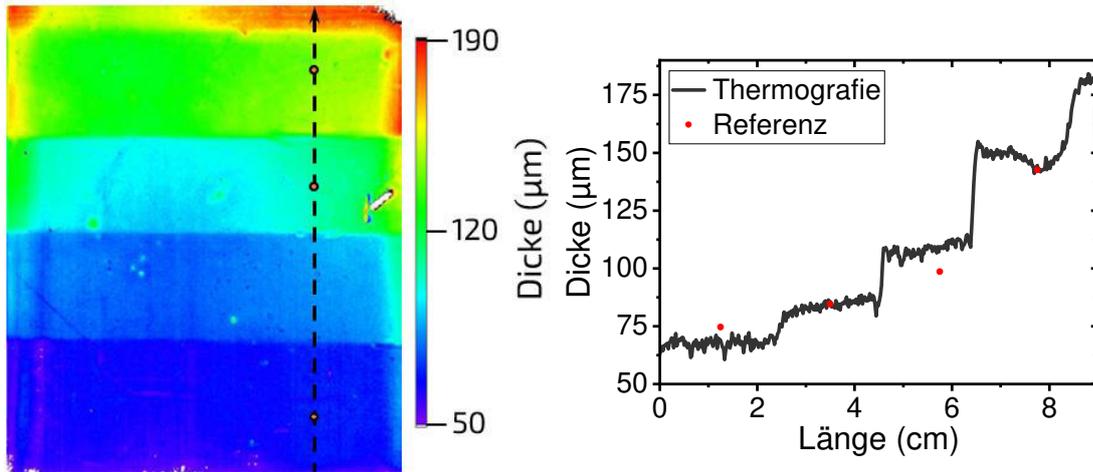


Abbildung 25: Dickenbild der Probe 5 (links) sowie der Dickenverlauf entlang der im Dickenbild aufgeführten Messlinie mit den entsprechenden Referenzschichtdicken (rechts). Im Dickenbild sind die für die Kalibrierung verwendeten Messpunkte (orange) aufgeführt.

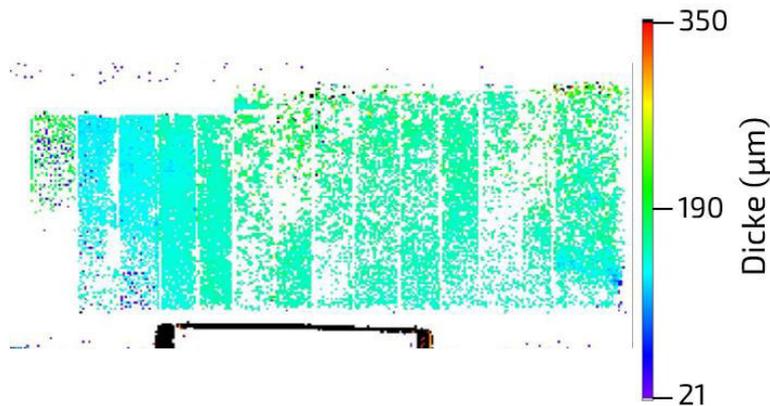


Abbildung 26: Dickenbild der Probe 6

Weiterhin wurde die entwickelte Messmethode an den industriellen Bauteilen erprobt, die von den Teilnehmern des pbA zur Verfügung gestellt wurden. Abbildung 27 (links) zeigt ein Dickenbild der Probe 7, bei der die Schichtdicke keilförmig zunimmt. Auch hier sind die verwendeten drei Kalibrierpunkte in der Abbildung aufgeführt. Die keilförmige Zunahme der Schichtdicke konnte im Dickenbild visualisiert werden. Insbesondere fällt hier auch der inhomogene Bereich an der oberen Seite der Probe auf, der sich auf eine herstellungsbedingte Schichtdickenschwankung zurückführen lässt. Auch im Vergleich zu den Referenzwerten lässt sich in dem vorliegenden Dickenbereich von ca. 35 μm bis ca. 370 μm eine gute Übereinstimmung feststellen, wie der Dickenverlauf in Abbildung

27 (rechts) zeigt. Eine größere Herausforderung stellt hingegen die Schichtdickenmessung bei Proben 8 und Proben 9 dar, da die Beschichtung jeweils aus zwei Komponenten, einem Basis- und einem Klarlack, besteht und da das Bauteil mit einer Länge von 60 cm verhältnismäßig groß ist. Um einen ausreichenden Energieeintrag zu gewährleisten und die Schichtdicken mit einer höheren geometrischen Auflösung ermitteln zu können, wurden die beiden Prüfkörper jeweils in sechs Bereiche unterteilt, die sich leicht überlappen und die jeweils separat untersucht wurden. Dabei wurde für jeden Bereich eine separate Kalibrierung mit fünf Kalibrierpunkten vorgenommen, um die sich verändernde mittlere Temperaturleitfähigkeit bei zunehmender Schichtdicke kompensieren zu können. Anschließend wurden die einzelnen Dickenbilder wieder zusammengefügt, sodass ein Gesamtdickenbild der Prüfkörper realisiert werden konnte. Das resultierende Gesamtdickenbild ist für Probe 8 in Abbildung 28 und für Probe 9 in Abbildung 28 dargestellt. Diese zeigt, dass es auch bei großen Bauteilen über separate Messungen möglich ist, eine flächige Schichtdickenverteilung zu erhalten. Weiterhin zeigen die Dickenbilder auf, dass auch die Schichtdicke von Zwei-Schicht-Systemen bestimmt werden kann, sofern der Energieeintrag und die Transmission an der Grenzfläche zwischen den beiden Schichten ausreichend hoch sind. Die Dickenverläufe, die in Abbildung 28 und Abbildung 28 links aufgeführt sind, zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten, wenngleich zwischen den separaten Messungen vereinzelt ein Versatz, z. B. bei Probe 8 bei einer Länge von 20 cm, vorliegt. Die vorliegenden Unterschiede können möglicherweise darauf zurückgeführt werden, dass das mathematische Modell auf einem Ein-Schicht-System beruht und das komplexere Verhalten bei einem Zwei-Schicht-Systemen nicht abbilden kann. Trotz dieses komplexen Verhaltens bei den vorliegenden Prüfkörpern konnten Schichtdickenunterschiede allerdings visualisiert und annähernd genau bestimmt werden.

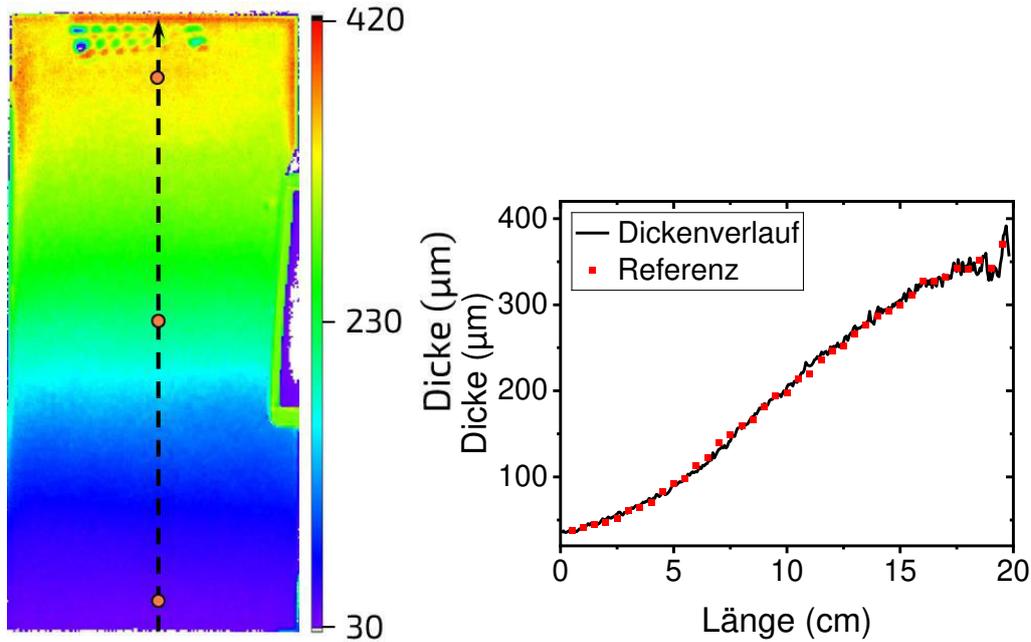


Abbildung 27: Dickenbild der Probe 7 (links) sowie der Dickenverlauf entlang der im Dickenbild aufgeführten Messlinie mit den entsprechenden Referenzschichtdicken (rechts). Im Dickenbild sind die für die Kalibrierung verwendeten Messpunkte (orange) aufgeführt.

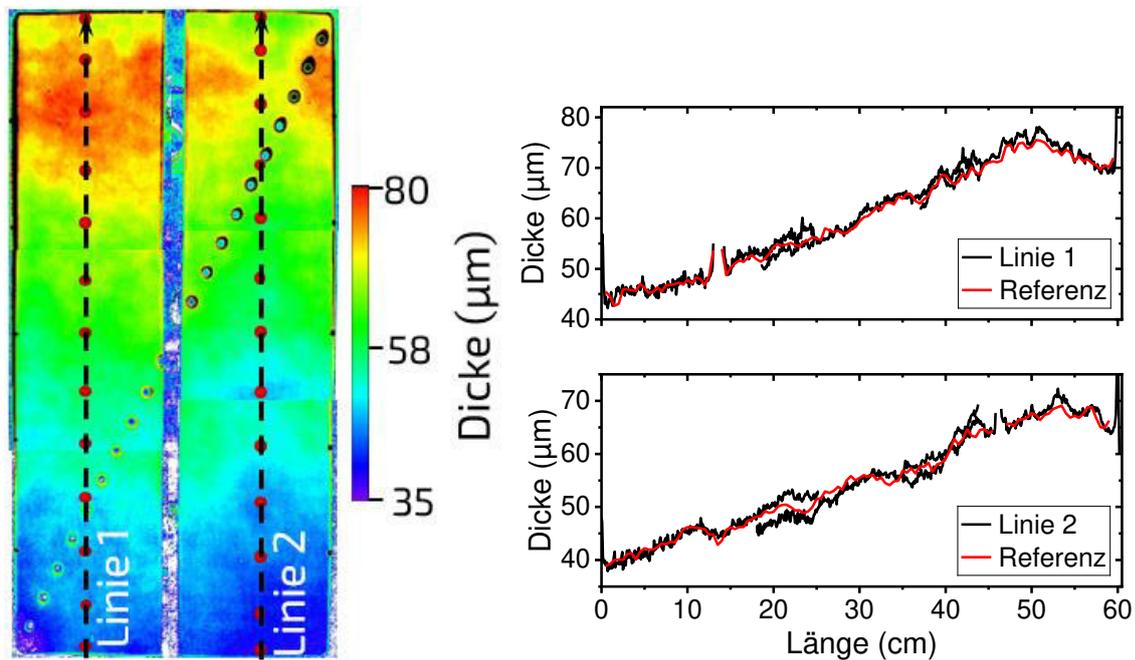


Abbildung 28: Zusammengesetztes Dickenbild der Probe 8 (links) sowie die Dickenverläufe entlang der im Dickenbild aufgeführten Messlinien mit den entsprechenden Referenzschichtdicken (rechts). Zur Erstellung des Dickenbilds wurden 6 Einzelmessungen durchgeführt und die Ergebnisbilder jeweils zusammengefügt. Im Dickenbild sind die für die Kalibrierung verwendeten Messpunkte (orange) aufgeführt.

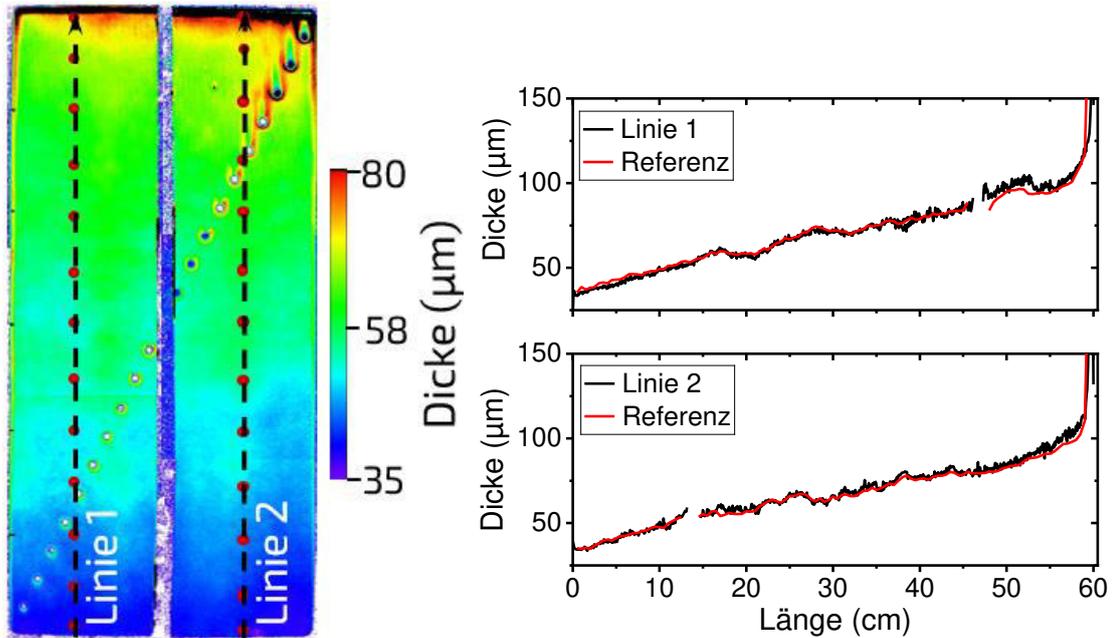


Abbildung 29: Zusammengesetztes Dickenbild der Probe 9 (links) sowie die Dickenverläufe entlang der im Dickenbild aufgeführten Messlinien mit den entsprechenden Referenzschichtdicken (rechts). Zur Erstellung des Dickenbilds wurden 6 Einzelmessungen durchgeführt und die Ergebnisbilder jeweils zusammengefügt. Im Dickenbild sind die für die Kalibrierung verwendeten Messpunkte (orange) aufgeführt.

In Abbildung 30 (links) ist das Phasenbild bei einer Auswertung von 9,8 Hz für die Proben 10 aufgeführt. Die Metallplättchen wurden jeweils mit Chromnitrid beschichtet und weisen Schichtdicken im einstelligen μm -Bereich auf. Aufgrund der ähnlichen Materialeigenschaften von Beschichtung zu Substrat und den kleinen Schichtdicken stellt die Messung der Schichtdicke hier ebenfalls eine große Herausforderung dar. Eine Berechnung des Dickenbildes war über den Phasen-Frequenz-Verlauf aufgrund der bei dem Material benötigten sehr hohen Frequenzen und dem zu erwartenden kleinen Reflexionskoeffizienten nicht möglich. Im Phasenbild können hingegen anhand der Grauwerte bereits Unterschiede zwischen den vorliegenden Schichtdicken detektiert werden. Abbildung 30 (rechts) zeigt die mittleren Phasenwerte für jedes Plättchen (vgl. Messbereiche im Phasenbild). Es ist zu erkennen, dass die Phasenwerte bei der gewählten Auswertefrequenz zwar mit steigender Schichtdicke zunehmen, aber aufgrund des nur geringfügig schwächeren Rauschniveaus keine eindeutige Zuordnung möglich ist.

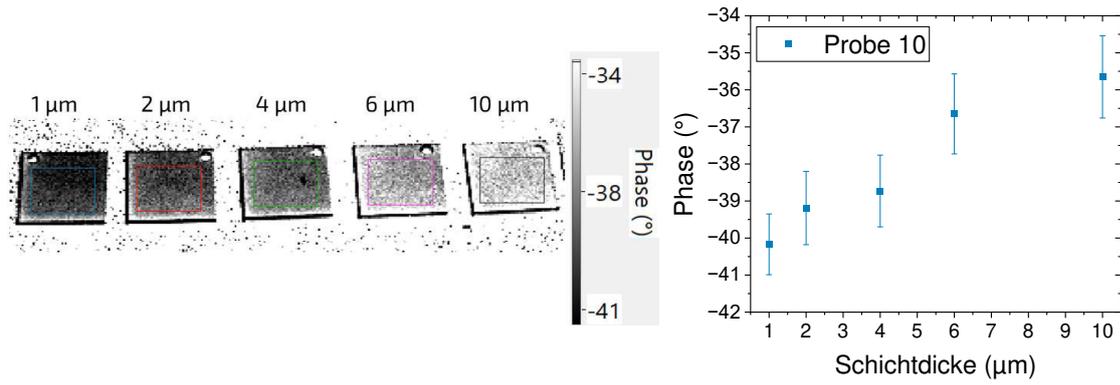


Abbildung 30: Phasenbild der Proben 10 bei 9,8 Hz (links) und mittlerer Phasenwert bei den jeweiligen Schichtdicken (rechts). Die Messbereiche sind in dem Phasenbild dargestellt.

8 Einfluss von geometrischen Faktoren und derameratechnik

Weiterhin wurden verschiedene für die Schichtdickenmessung relevante Einflussfaktoren untersucht, um die Möglichkeiten und Grenzen der Messtechnik auszuloten und die Anwendbarkeit für unterschiedliche Anforderungsprofile aufzuzeigen. Hierzu wurde der Einfluss von räumlichen Faktoren wie dem Abstand von IR-Kamera und Blitzlampe, dem Aufnahmewinkel und der Tiefenschärfe evaluiert und IR-Kameras aus unterschiedlichen Preissegmenten vergleichend eingesetzt. Für letzteres wurden die IR-Kameras TIM QVGA (Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG), VarioCAM hr (Fa. Infratec GmbH) und SC5500 (Fa. Flir Systems Inc.) eingesetzt. Für alle im Nachfolgenden dargestellten Messergebnisse wurde Probe 1 verwendet. Sofern nicht anders beschrieben erfolgte die Anregung mit der VH3-6000 unter Verwendung von 6 Pulsen im Abstand von einer Sekunde bei einer Pulsenergie von 1.650 J. Die Aufnahme fand standardmäßig mit der VarioCAM und einer Aufnahme Frequenz von 50 Hz statt. Da Anregung und Aufnahme nicht synchronisiert sind, lassen sich auch hier die absoluten Phasenwerte nicht vergleichen. Stattdessen wird die relativen Phasenveränderung anhand von Phasenverläufen betrachtet.

8.1 Variation des Anregungswinkels

Für die Variation der Anregung wurde im Winkelbereich zwischen 30° und 80° gemessen. Abbildung 31 zeigt den Verlauf der Amplitude für einen vertikalen Schnitt durch die Probenmitte von Stufe 1 zu Stufe 7 für die unterschiedlichen Anregungswinkel. Für kleine Winkel ist die Stufenform der Probe gut zu erkennen. Lediglich für Schicht 6 und 7 ist keine klare Grenze ersichtlich. Mit zunehmendem Winkel nimmt die Amplitude generell ab und damit auch die Unterscheidbarkeit der einzelnen Schichten.

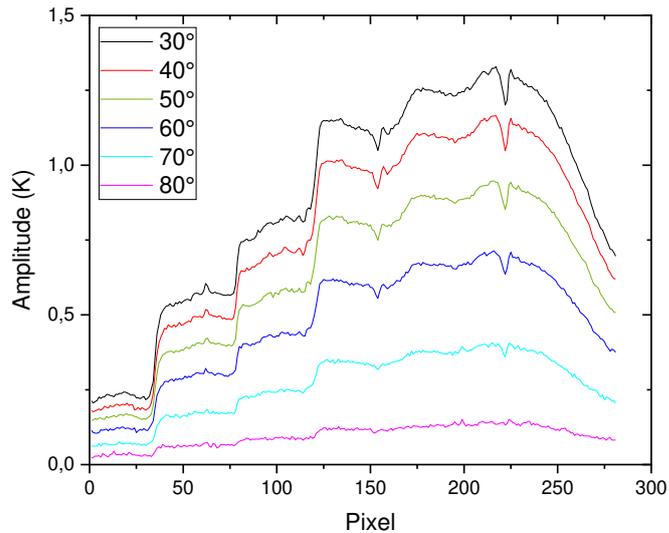


Abbildung 31: Amplitudenverläufe eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 bei verschiedenen Anregungswinkeln.

In Abbildung 32 sind die bei unterschiedlichen Winkeln aufgenommenen relativen Phasenwerte entlang der Stufenform bei einer Auswertung von 1 Hz aufgetragen. Anhand des kontinuierlich sinkenden Phasenwerts lässt sich feststellen, dass sich alle Werte im linearen Bereich der Phasen-Dicke-Korrelationskurve befinden. Für Winkel bis 70° lassen sich nur kleine Unterschiede in den relativen Phasenwerten feststellen. Aufgrund dem mit zunehmendem Winkel abnehmenden Energieeintrag nimmt das Rauschlevel geringfügig zu, wobei die Stufen dennoch gleichermaßen unterscheidbar sind. Dies zeigt, dass die Phase annähernd unabhängig vom Anregungswinkel und damit von der Anregungsenergie ist, sofern ein gewisser Mindestbetrag vorliegt. Für einen Anregungswinkel von 80° wird dieser Mindestbetrag der Anregungsenergie erreicht, weswegen das Rauschniveau hier deutlich zunimmt. Ein Trend bei den Phasenwerten längs der Schichten ist nicht erkennbar, weshalb auf eine bildliche Darstellung verzichtet wird.

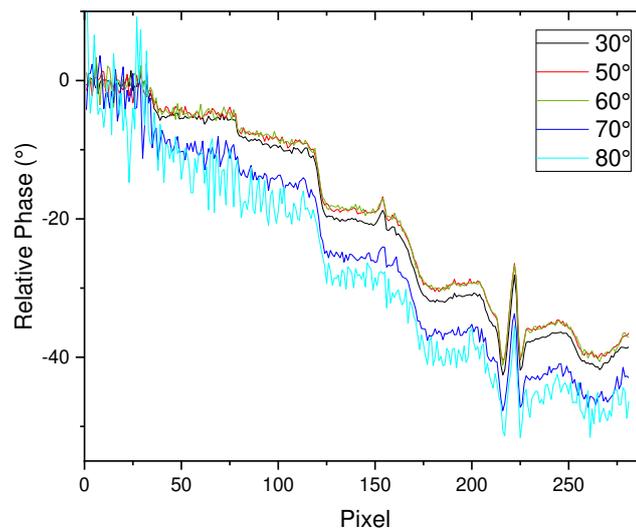


Abbildung 32: Phasenverläufe eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 bei verschiedenen Anregungswinkeln.

8.2 Variation des Aufnahmewinkels

Analog zur Variation des Anregungswinkels wurde auch der Aufnahmewinkel variiert. Um eine möglichst homogene Anregung zu erzielen, wurde die Lampe in dieser Messreihe gerade auf die Probe gerichtet. In Abbildung 33 sind die Amplitudenverläufe bei Aufnahmewinkeln von 30° bis 80° gezeigt. Bei quantitativer Betrachtung fällt auf, dass die absoluten Amplitudenwerte bis 50° näherungsweise konstant sind. Für größere Winkel ist eine zunehmende Abnahme der Amplitude beobachtbar. Bei der Variation der Aufnahme­richtung muss berücksichtigt werden, dass sich die aufgenommene Fläche pro Pixel mit zunehmendem Aufnahmewinkel vergrößert. Dadurch nimmt jeder Pixel Strahlung eines größeren Bereiches auf. Zwischen 30° und 80° verhält sich die Abnahme der Strahlungsintensität annähernd linear und entspricht demnach den ermittelten Amplitudenwerten.

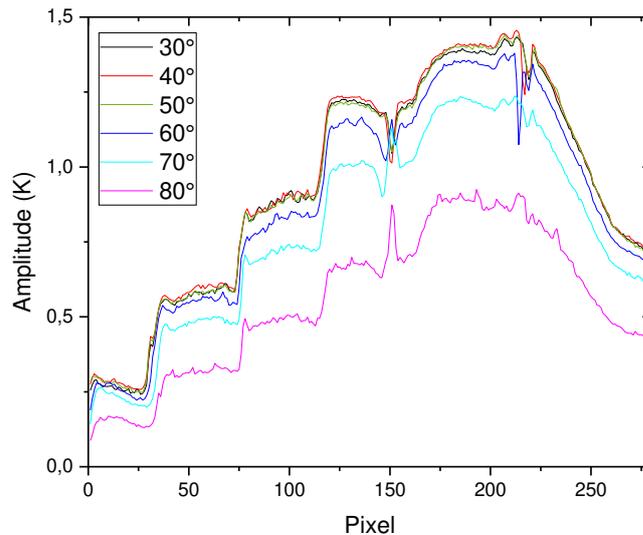


Abbildung 33: Amplitudenverläufe eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 bei verschiedenen Aufnahmewinkeln.

Bei der Betrachtung der Phase lassen sich wie schon beim Anregungswinkel kaum Unterschiede feststellen, wie Abbildung 34 veranschaulicht. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde darauf geachtet, die Position des Schnitts durch das Phasenbild exakt in der Mitte der Probe zu wählen bzw. diesen in die Drehachse zu legen. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass bei allen Winkeln annähernd der gleiche Bereich auf der Probe untersucht wurde. Die hieraus erhaltenen Phasenwerte sind mit denen bei Variation des Anregungswinkels vergleichbar. Trotz des potenziell variierenden Messbereichs unterscheiden sich die relativen Phasenverläufe kaum voneinander und zeigen die Robustheit gegenüber dieser räumlichen Einflussfaktoren auf, sofern ausreichend optische Energie jede Position des Bauteils erreicht und entsprechend ausreichend erwärmt.

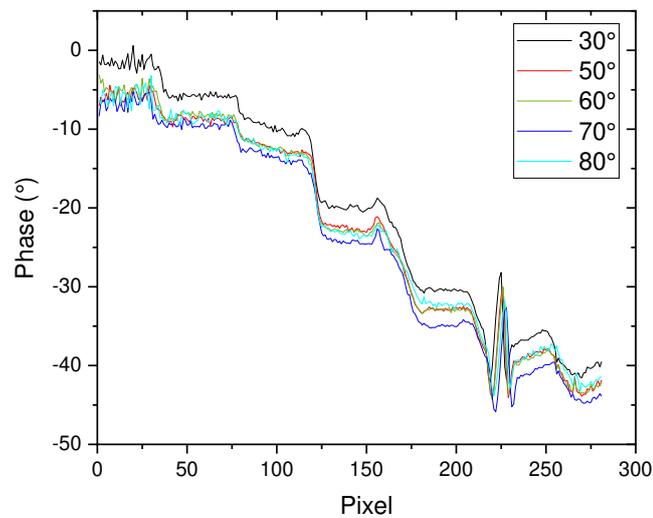


Abbildung 34: Phasenverläufe eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 für unterschiedliche Aufnahmewinkel.

8.3 Variation des Abstands zwischen Anregungsquelle und Probe

Zur Variation des Anregungsabstandes wurde die Blitzlampe senkrecht vor der Probe 1 platziert und mit einem Aufnahmewinkel von 30° aufgenommen. In Abbildung 35 ist der Amplitudenverlauf für 5 verschiedene Anregungsabstände im Abstand von 10 cm gezeigt. Die Verläufe erschienen qualitativ gleich. Quantitativ ist jedoch eine Abnahme der Amplitude zu erkennen, die sich durch das Abstandsgesetz erklären lässt, das eine Abnahme der auf die Probenoberfläche eingestrahelten Energie mit dem inversen quadratischen Abstand vorhersagt. Diese Gesetzmäßigkeit wird hier näherungsweise erfüllt.

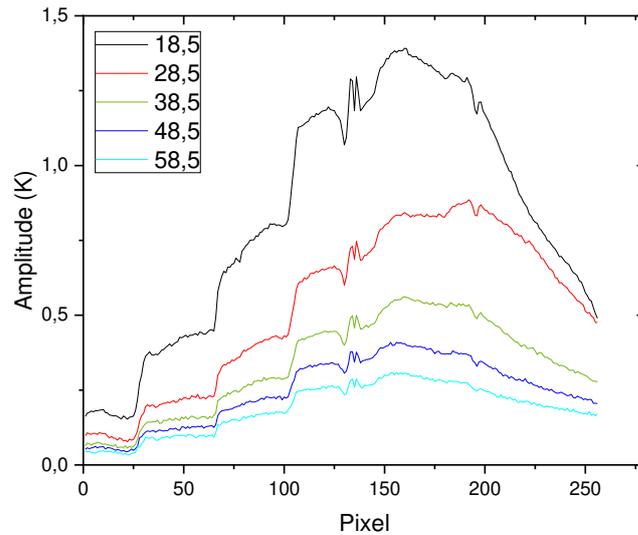


Abbildung 35 Amplitudenverläufe eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 bei unterschiedlichen Anregungsabständen. Die Abstände sind in der Legende aufgeführt und in cm angegeben.

Abbildung 36 zeigt die entsprechenden Phasenverläufe bei variierendem Anregungsabstand. Die Verläufe variieren in der üblichen Größenordnung, wobei sich die Signalqualität mit zunehmendem Abstand reduziert und folglich das Rauschniveau steigt, da der Energieeintrag auf der Probe gemäß $1/r^2$ abnimmt.

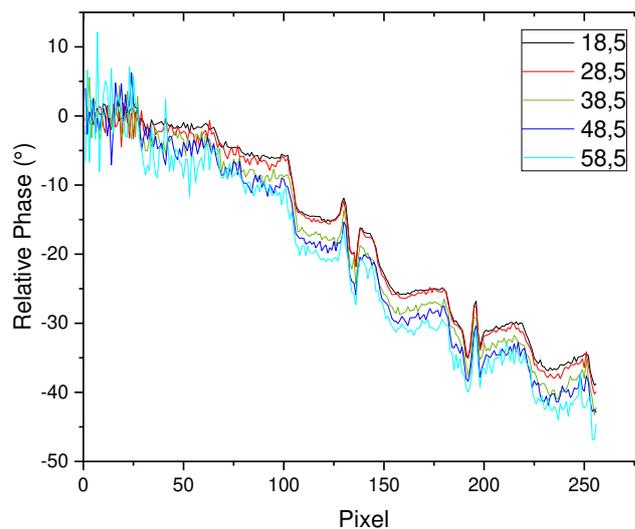


Abbildung 36 Phasenverläufe eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 für variierenden Anregungsabstand. Die Abstände sind in der Legende aufgeführt und in cm angegeben.

8.4 Variation des Abstands zwischen Objektiv und Probe

Die Anregung erfolgte bei dieser Messreihe aus einem Winkel von 30° im Abstand von 30 cm zur Probenoberfläche. Die Fokussierung wurde jeweils an den Abstand angepasst, sodass der Fokus immer auf der Probenoberfläche lag. Bedingt durch den größer werdenden Abstand wird auch die Zahl der auswertbaren Pixel geringer, wodurch sich die Kurve bei der bisher verwendeten Darstellung über die Pixel verschiebt (vgl. Abbildung 37, links). Um vergleichbare Verläufe zu erzielen, wurden diese bei größeren Abständen zusätzlich interpoliert und über die Anzahl der Datenpunkte geplottet (Abbildung 37, rechts). Analog dazu wurden auch die ursprünglichen Phasenverläufe interpoliert und somit vergleichbar dargestellt (vgl. Abbildung 38). Anhand der Amplituden- und Phasenverläufe bei unterschiedlichen Aufnahmeabständen sind kaum quantitative Unterschiede erkennbar. Bedingt durch die geringere Pixelauflösung verschlechtert sich jedoch mit zunehmendem Aufnahmeabstand die Auflösung. Kleinere Strukturen werden deshalb gar nicht mehr oder nur noch unzureichend dargestellt, wodurch lokale Inhomogenitäten möglicherweise nicht mehr detektiert werden. Im interpolierten Verlauf erscheinen deshalb die Kurven mit größerem werdendem Abstand glatter. Das Rauschen hingegen nimmt mit dem Abstand zu, da die Kamera nur noch einen kleineren Teil der reflektierten Strahlung aufnimmt.

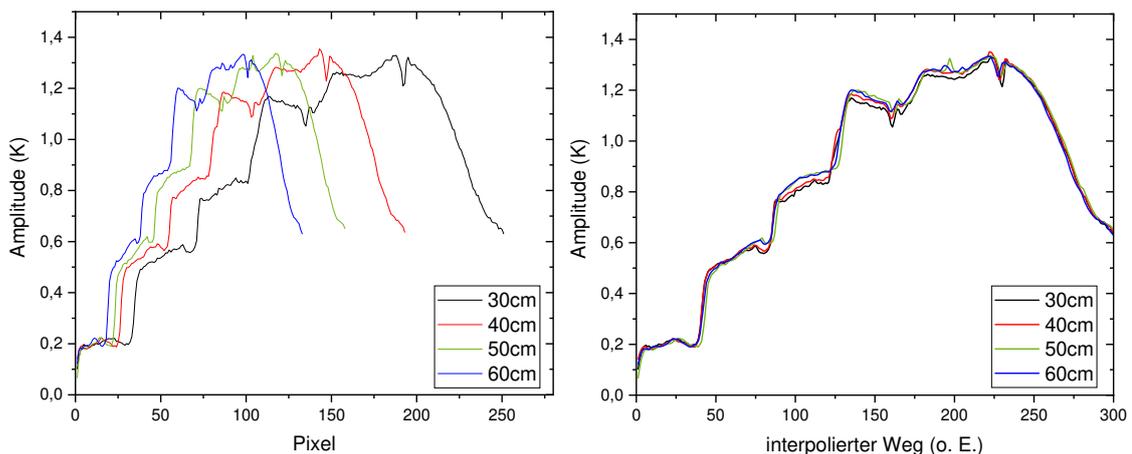


Abbildung 37: Amplitudenverläufe eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 bei verschiedenen Abständen zwischen Objektiv und Probe aufgetragen über die Position anhand der Bildpixel (links) und angepasst an die jeweils dargestellte Länge des möglichen Auswertebereichs (rechts).

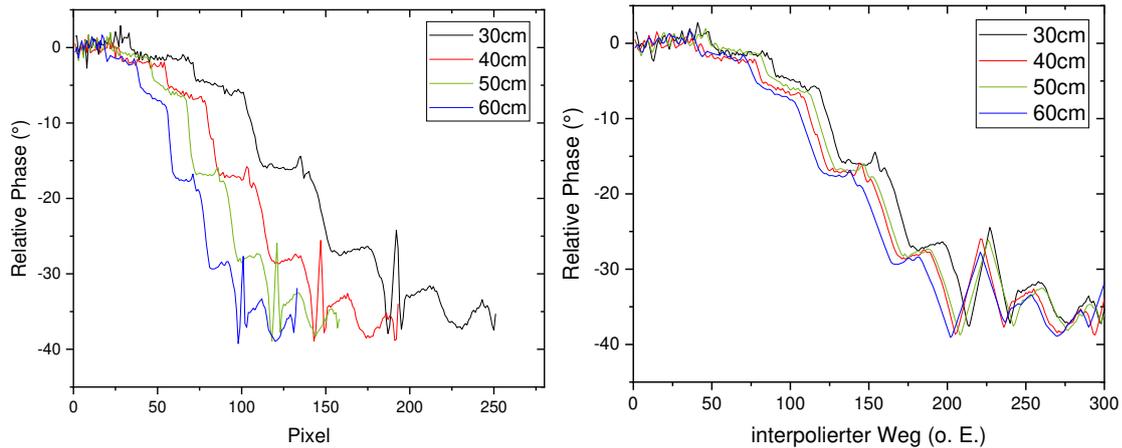


Abbildung 38: Phasenverläufe eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 bei verschiedenen Abständen zwischen Objektiv und Probe aufgetragen über die Position anhand der Bildpixel (links) und angepasst an die jeweils dargestellte Länge des möglichen Auswertebereichs (rechts).

8.5 Einfluss der Fokussierung

Weiterhin wurde auch der Einfluss der Fokussierung der Kamera untersucht. Zur Defokussierung wurde das Objektiv von der Probe wegbewegt und auf diese fokussiert. Anschließend wurde die Kamera wieder in die ursprüngliche Position gefahren, sodass der Fokuspunkt hinter der Probe liegt. Die ausgewählten Fokuspunkte lagen auf der Probenoberfläche und in Abständen von 10 cm, bis zu 40 cm hinter dieser.

In Abbildung 39 sind die entsprechenden Amplitudenverläufe dargestellt, anhand derer erkennbar ist, dass bei unterschiedlichen Fokuseinstellungen annähernd die gleichen absoluten Amplitudenwerte resultieren, wenngleich die Verläufe mit zunehmender Defokussierung verschwommener werden. Die klare Trennung der einzelnen Schichtdicken anhand von Stufen wird zu unscharfen Übergängen, die sich teils über die ganze Schichtbreite erstrecken.

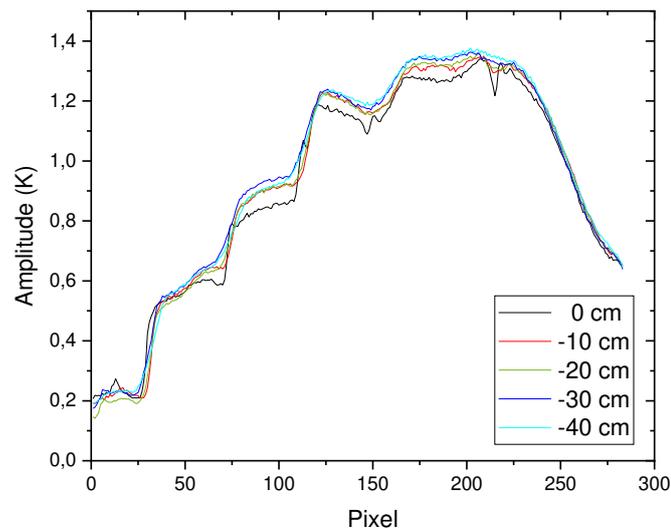


Abbildung 39: Amplitudenverlauf eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 bei unterschiedlichem Fokuspunkt. Die Fokussierung erfolgte auf Ebenen hinter der Probenoberfläche, weswegen die Legendenangaben negativ sind.

Im Phasenverlauf (Abbildung 40, links) ist wie bei der Amplitude kein quantitativer Unterschied zu erkennen. Auch hier lässt sich der Einfluss des Fokuspunkts anhand der schlechter werdenden Schärfe feststellen. Infolgedessen werden sowohl die Kanten als auch Feinheiten nicht mehr abgebildet. Dies wird insbesondere anhand eines Ausschnitts aus dem Phasenverlauf deutlich, der in Abbildung 40 (rechts) gezeigt ist. Die Phasenschwankung in der Mitte ist nur noch bei der geringsten Defokussierung zu erkennen und nimmt mit zunehmenden Fokussierabstand ab. Das Verstellen des Fokus hat somit eine ähnliche Wirkung wie der Abstand zwischen Objektiv und Probe, wenngleich die Auflösung hier nicht durch weniger auswertbare Pixel, sondern durch den weniger starken Kontrast zwischen den einzelnen Pixeln abnimmt.

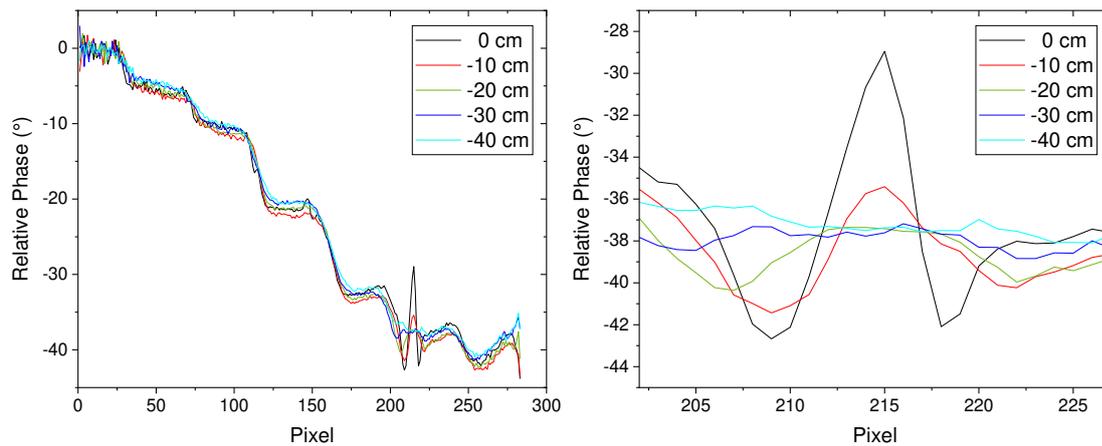


Abbildung 40: Phasenverlauf eines vertikalen Schnitts durch Probe 1 (links) und Ausschnitt aus dem Phasenverlauf (rechts) bei unterschiedlichem Fokuspunkt. Die Fokussierung erfolgte auf Ebenen hinter der Probenoberfläche, weswegen die Angaben negativ sind.

8.6 Variation derameratechnik

Dieameratechnik wurde bereits in den vorherigen Kapiteln variiert und es hat sich generell gezeigt, dass kameraunabhängig die Schichtdickenunterschiede aufgezeigt werden können, wenngleich berücksichtigt werden muss, dass sich die IR-Kameras hinsichtlich ihrer geometrischen und thermischen Auflösung unterscheiden (Abbildung 41). Die geometrische Auflösung bestimmt hierbei die lokale Auflösungsgrenze, während die thermische Auflösung insbesondere die Genauigkeit der Schichtdickenmessung beeinflusst. Die unterschiedliche geometrische Auflösung der IR-Kameras fällt in Abbildung 41 insbesondere anhand von den Messbereichen mit einer Größe von 10x10 Pixeln auf, die in den Phasenbildern aufgeführt sind und deren Größe stark variiert. Die entsprechenden mittleren Phasenwerte sind in Abbildung 42 für die jeweilige IR-Kamera aufgeführt. Ein Vergleich der Phasenwerte jeder Stufe zeigt, dass unabhängig von der geometrischen Auflösung vergleichbare Phasenunterschiede resultieren und mit der kostengünstigen IR-Kamera TIM QVGA somit ähnliche Messergebnisse wie mit der mittelpreisigen VarioCAM und der hochpreisigen SC5500 erzielt werden können. Dies konnte durch die Betrachtung der Phasenverläufe der entsprechenden Messungen, die in Abbildung 43 vergleichend dargestellt sind, ebenfalls bestätigt werden. Dennoch konnten messtechnische Grenzen und Herausforderungen der jeweiligen IR-Kamera festgestellt werden. Beispielsweise hat sich aufgrund der stärkeren Schwankung der Aufnahmezeit bei der kostengünstigen IR-Kamera gezeigt, dass für die Ableitung der Schichtdickenwerte aus den Phasenwerten ein

größerer Berechnungsaufwand notwendig ist und bei den Ergebnissen eine größere Messunsicherheit vorliegt. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Quantendetektorkamera SC5500 aufgrund der geringeren thermischen Empfindlichkeit auch ein geringfügig besseres Rauschniveau aufweist (vgl. Abbildung 43). Ebenso hat sich gezeigt, dass für die Quantifizierung der Schichtdicke aus den Phasen-Frequenz-Verläufen eine Synchronisierung von Anregung und Aufnahme essenziell ist, um frequenzabhängig Offsets im Phasen-Frequenz-Verlauf zu vermeiden und die Betrachtung der absoluten Phase zu ermöglichen. Somit ist eine flächige Detektion von Schichtdickenunterschieden mit IR-Kameras aus unterschiedlichsten Preissegmenten möglich, wenngleich durch die thermische Empfindlichkeit geringfügige Unterschiede bei der Genauigkeit der Schichtdicke erzielt werden können.

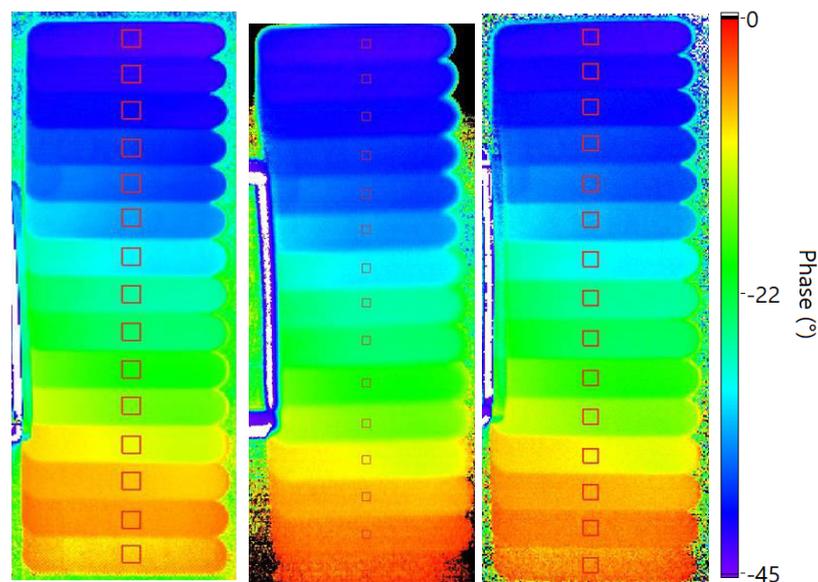


Abbildung 41: Vergleich der Phasenbilder bei 200 mHz der Probe 2 bei Verwendung von IR-Kameras aus unterschiedlichen Preissegmenten: Links: Hochpreisige SC5500; Mitte: Mittelpreisige VarioCAM; Rechts: Kostengünstige TIM QVGA. Die roten Quadrate entsprechen Messbereichen mit einer Größe von 10x10 Pixeln, die für nachfolgende Untersuchungen verwendet wurden.

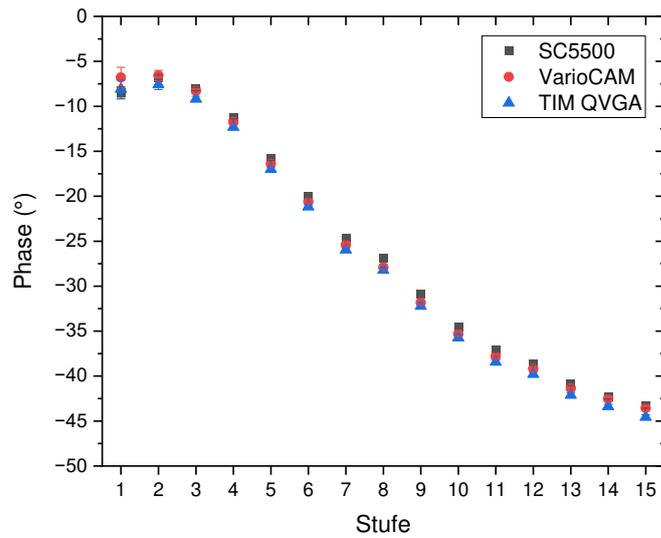


Abbildung 42: Mittlere Phasenwerte jeder Stufe der Probe 2 für die drei unterschiedlichen IR-Kameras (s. Legende). Zur Berechnung wurden die in Abbildung 41 dargestellten Messbereiche der Größe 10x10 Pixel verwendet.

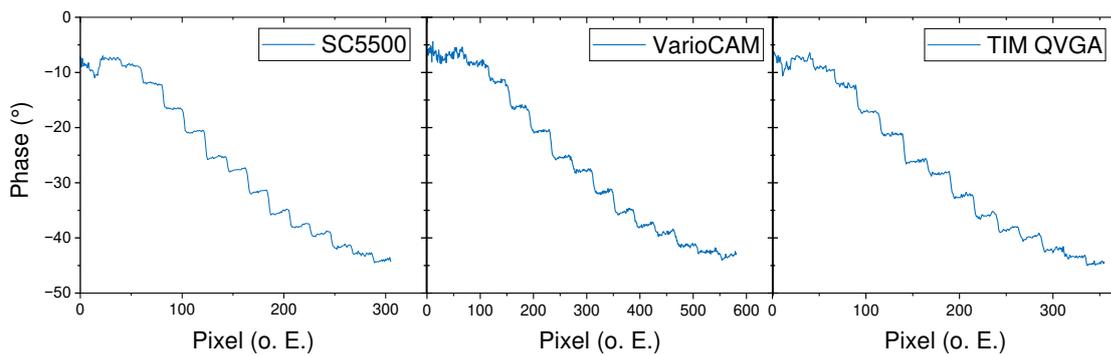


Abbildung 43: Phasenverläufe beim vertikalen Schnitt durch Probe 2 aus einer Messung mit der SC5500 (links), VarioCAM (Mitte) und SC5500 (rechts)

9 Zusammenfassung

In dem Forschungsprojekt wurde eine Messtechnik zur flächigen Bestimmung von Schichtdicken entwickelt. Hierfür wurde die Mehr-Puls-Thermografie eingesetzt, die als Kombination aus den konventionellen Methoden Puls- und Lockin-Thermografie angesehen werden kann und die sich in dem Projekt aufgrund von verschiedenen Vorzügen als vorteilhaft für die Schichtdickenmessung erwiesen hat. Insbesondere kann durch die Anregung mit einer periodischen Pulssequenz je nach Anwendungsfall der Energieeintrag, die Messdauer, die resultierende Datenmenge und die thermische Beanspruchung flexibel eingestellt werden. Es konnte eine flächige Visualisierung der Schichtdicke mit einer Messung und ohne Vorkenntnisse zum vorliegenden Schichtdickenbereich realisiert werden. Ebenso konnte das SNR im Vergleich zur konventionellen Puls-Thermografie entsprechend den im Antrag gestellten Arbeitshypothesen um ein Vielfaches verbessert werden und die thermische Belastung deutlich reduziert werden. Eine Quantifizierung der Schichtdicken konnte über einen einmaligen, zusätzlichen Kalibriervorgang an der entsprechenden Materialkonstellation ermöglicht werden, bei dem die Schichtdicke an mindestens drei Bereichen unterschiedlicher Schichtdicke referenziert wird und den Phasen-Frequenz-Verläufen zugeordnet wird. Dabei sollte möglichst der komplette, potenziell mögliche Schichtdickenbereich abgedeckt werden, indem ein Bereich mit maximaler Schichtdicke, mit minimaler Schichtdicke und mit einer Schichtdicke, deren Wert sich dazwischen befindet, gewählt wird. Es war allerdings auch möglich, Schichtdicken deutlich über den Kalibrierbereich hinaus zu bestimmen, wenngleich bei den durchgeführten Messungen die Abweichung mit größerer Entfernung tendenziell zugenommen hat.

Die entwickelte Mehr-Puls-Thermografie-Technik konnte erfolgreich an Referenz-Prüfkörpern und industriellen Bauteilen eingesetzt werden, wobei im Vergleich zu den konventionellen punktuellen Messtechniken für die Schichtdickenbestimmung desselben Messbereichs ein deutlich geringerer Zeit- und messtechnischer Aufwand nötig ist, wodurch die entsprechende Arbeitshypothese verifiziert werden konnte. Dabei wurden Bauteile mit Metallsubstrat und Kunststoffsubstrat mit Schichtdicken im ein- bis vierstelligen μm -Bereich untersucht. Auch hier konnten die im Antrag gestellten Arbeitshypothesen zur Anwendung an Kunststoffbauteilen und zur Auflösung von Schichtdicken im einstelligen Mikrometerbereich bestätigt werden, da die Methode an allen Prüfkörpern bis auf Probe 6 erfolgreich angewendet werden konnte. Ebenso war es möglich, die Gesamtschichtdicken von Metallbauteilen mit einem Zwei-Schicht-System zu bestimmen,

wenngleich beim verwendeten mathematischen Modell von einem Ein-Schicht-System ausgegangen wird. Es hat sich außerdem gezeigt, dass die Methode robust gegenüber Geometrieinflüssen wie den Anregungs- und Aufnahmewinkel, den Anregungs- und Aufnahmeabstand sowie den Fokuseinstellungen ist. Hierbei sind lediglich die miteinhergehenden Verringerungen der lateralen Auflösung und des SNR zu berücksichtigen. Weiterhin konnten schwankende Umgebungstemperaturen und lokal variierende Emissionsgrade durch die Auswertung von Phasen-Frequenz-Verläufen weitestgehend kompensiert werden. Somit konnten auch die gestellten Arbeitshypothesen zur geringen Beeinflussung durch Umgebungs- und Störfaktoren sowie durch die Bauteilgeometrie und die damit verbundene Fokussiergenauigkeit bestätigt werden. Aus den Forschungsergebnissen lassen sich folgende Handlungsempfehlungen für Anwender und Systemhersteller ableiten:

Für Anwender:

- Es hat sich gezeigt, dass eine flächige Detektion von Schichtdickenunterschieden unter Verwendung von IR-Kameras aus unterschiedlichsten Preissegmenten möglich ist. Die erzielbare Genauigkeit in der Schichtdickenermittlung ist für die meisten Anwendungen kameraunabhängig vergleichbar.
- Bei der Wahl der IR-Kamera sollte auf die geometrische Auflösung, die mögliche Aufnahmefrequenz und thermische Empfindlichkeit geachtet werden. Die geometrische Auflösung bestimmt die laterale Auflösung und hängt von der Größe des zu untersuchenden Bauteils ab. Die thermische Empfindlichkeit beeinflusst indirekt die Auflösungsgrenze der Schichtdickenmessung. Es wird empfohlen, eine IR-Kamera mit einer geometrischen Auflösung von mind. 320 x 250 Pixel und eine thermische Empfindlichkeit von 50 mK einzusetzen. Zur angemessenen Abtastung des thermischen Signals sollte eine Aufnahmefrequenz von mind. 20 Hz einstellbar sein.
- Bei der Wahl des Objektivs sollte auf einen geeigneten Öffnungswinkel geachtet werden, sodass in dem zum Bauteil benötigten Abstand gemessen werden kann und das Sichtfeld die Größe des relevanten Bereichs aufweist.
- Bei der Wahl der Blitzlampe sollte darauf geachtet werden, dass eine Pulssequenz mit gleichem Pulsabstand ausgelöst werden kann und der zu untersuchende Bauteilbereich komplett beleuchtet werden kann. Weiterhin sollte eine Blitzenergie

von mind. 500 J einstellbar sein. Durch einen höheren Wert kann der Energieeintrag und damit die Auflösung erhöht werden, allerdings nimmt dabei auch die thermische Belastung von Bauteil und Anregungstechnik zu.

- Durch einen größeren Pulsabstand wird die Schrittweite im Frequenzraum verringert, wodurch der Phasen-Frequenz-Verlauf besser abgetastet wird, wenngleich der Energieeintrag dadurch auch verringert wird und die Messdauer erhöht wird. 3 s stellt hier einen geeigneten Kompromiss für die bisher betrachteten Anwendungsfälle dar.
- Durch eine größere Pulsanzahl kann das SNR tendenziell verbessert werden, wenngleich damit auch die Messdauer und die resultierende Datenmenge größer wird. Eine Anzahl von fünf Pulsen stellt hier einen Kompromiss für die bisher betrachteten Anwendungsfälle dar.
- Da die MPT verhältnismäßig robust gegenüber variierenden Geometriefaktoren wie Winkel und Abstände ist, können auch komplexe Bauteilgeometrien untersucht werden, sofern die entsprechenden Bereiche durch die Blitzlampe ausreichend erwärmt werden und deren Oberflächentemperatur von der IR-Kamera erfasst werden kann.
- Für die absolute Bestimmung der Schichtdicke ist es notwendig, dass die Anregung synchronisiert zur Aufnahme erfolgt, sodass die absoluten Phasenwerte betrachtet werden können.
- Für den Kalibriervorgang wird empfohlen, einen Bereich mit minimal möglicher Schichtdicke, einen Bereich mit maximal möglicher und einen Bereich mit einer Schichtdicke dazwischen zu wählen.
- Die Auflösung der Messtechnik hängt insbesondere vom Energieeintrag, vom Reflexionskoeffizienten an der Grenzfläche und von der thermischen Sensitivität ab. Der Energieeintrag hängt vom Absorptionsgrad der Beschichtung im Spektralbereich der Anregungsstrahlung ab, kann aber auch durch die Anregungstechnik, den verwendeten Pulseinstellungen und der Positionierung erhöht werden. Der Reflexionskoeffizient ist hingegen ausschließlich von den vorliegenden Materialien abhängig. Die thermische Sensitivität hängt wiederum vom Emissionsgrad im infraroten Spektralbereich ab und kann durch eine höhere thermische Empfindlichkeit der IR-Kamera vergrößert werden.

Für Systemhersteller:

- Um die Messtechnik flexibel an die Anwendungsanforderungen anpassen zu können, sollte eine Variation der Pulsenergie (mind. 500 J), des Pulsabstandes (ab 0,5 s) und der Pulsanzahl (mind. 3) möglich sein.
- Für die absolute Bestimmung der Schichtdicke ist eine Synchronisierung von Anregung und Aufnahme erforderlich.
- Da der Energieeintrag einen großen Einfluss nimmt, sollte ein möglichst große Pulsleistung, mindestens aber 500 J, einstellbar sein.
- Ein konstanter zeitlicher Pulsabstand ist für die erfolgreiche Anwendung der Schichtdickenmesstechnik essenziell.
- Durch die Anregungstechnik sollte eine möglichst homogene Erwärmung des Bauteils bzw. des relevanten Bereichs möglich sein.
- Das Sichtfeld der IR-Kamera sollte möglichst auf den relevanten Bereich beschränkt sein, um eine möglichst hohe geometrische Auflösung zu erzielen und die für die Schichtdickenbestimmung benötigte Rechenzeit zu minimieren.
- Aufgrund der hellen und ggf. lauten Blitze sind möglicherweise Sicherheitsmaßnahmen wie ein Sicht- oder Lärmschutz notwendig.

10 Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.wirsindfarbe.de/statistiken/lacke-fuer-industrielle-anwendungen-in-deutschland-2018-1>, zuletzt aufgerufen am 07.09.2023
- [2] *Die deutsche Lack- und Druckfarbenindustrie in Zahlen 2018*, Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e. V., Frankfurt, 2018
- [3] D. Stegemann: *Der Einsatz von Wirbelströmen für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*, DVS Media, 2010
- [4] W. Reimche und R. Duhm: *Zerstörungsfreie Prüfung und Bewertung von Beschichtungen*, *Moderne Beschichtungsverfahren*, 323-347, 2004
- [5] J. C. Moulder, E. Uzal und J. H. Rose: *Thickness and conductivity of metallic layers from eddy current measurements*, *Review of Scientific Instruments*, 1992
- [1] H. Brenig: *Schichtdicken zerstörungsfrei messen*, *Journal für Oberflächentechnik* 56.4, 24-25, 2016
- [2] H.-P. Vollmar und P. Neumaier: *Schichtdickenmessung – Geht es ohne Kalibrierung?*, *Journal für Oberflächentechnik* 43.10, 112-115, 2003
- [3] L. B. Pedersen, K.-Å. Magnusson und Y. Zhengsheng: *Eddy current testing of thin layers using co-planar coils*, *Journal of Research in Nondestructive Evaluation* 12.1, 53-64, 2000
- [9] D. Zhang, et al.: *Thickness measurement of multi-layer conductive coatings using multifrequency eddy current techniques*, *Nondestructive Testing and Evaluation* 31.3, 191-208, 2006
- [10] British Standards BSI: *Metallic and other inorganic coatings: Review of methods of measurement of thickness*, 2009
- [11] J. B. Strand: *Apparatus for capacitive measurement of coating thickness utilizing a square wave source and galvanometer responsive to unidirectional discharge current*, U.S. Patent No. 3.243.701, 1966

- [12] R.-J. Zhang, S.-G. Dai und P.-A. Mu: *A spherical capacitive probe for measuring the thickness of coatings on metals*, Measurement Science and Technology 8.9, 1028, 1997
- [13] V. Rößiger und B. Nensel: *Analyse von Schichten mit Röntgenfluoreszenz*, Jahrbuch Oberflächentechnik, 195–225, 2004
- [14] M. Krumrey, M. Hoffmann und M. Kolbe: *Schichtdickenbestimmung mit Röntgenreflektometrie*, PTB Mitteilungen 115.3, 202, 2005
- [15] M. Fabich: *Messung der Schichtdicke – Das richtige Verfahren auswählen*, Journal für Oberflächentechnik 59.3, 21-23, 2019
- [16] R. Lerch, G. Sessler und D. Wolf: *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*, Springer-Verlag, 2009
- [17] A. Bulavinov: *Der getaktete Gruppenstrahler*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2005
- [18] D. Döring: *Luftgekoppelter Ultraschall und geführte Wellen für die Anwendung in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2011
- [19] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer-Verlag, 2013
- [20] V. K. S. Feige, et al.: *Berührungslose Mehrlagen-Schichtdickenmessung industrieller Beschichtungen mittels THz-Messtechnik*, Technisches Messen Plattform für Methoden, Systeme und Anwendungen der Messtechnik 79.2, 87-94, 2012
- [21] J. Hauck, et al.: *Industrielle Prozesswanddickenmessung in der Kunststoffrohrextrusion mittels zeitaufgelöster Terahertz-Systeme*, DGZfP-Jahrestagung 6.8.5, 2013
- [22] M. Yahyapour, et al.: *Non-contact contact thickness measurements with terahertz pulses*, Proceedings of WCNDT, 2016
- [23] T. Hochrein und I. Alig: *Prozessmesstechnik in der Kunststoffaufbereitung.*, Vogel Business Media GmbH & Co. KG, 2011

- [24] S.-W. Kim und G.-H. Kim: *Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry*, Applied Optics, 1999
- [25] U. Schnell, R. Dändliker und S. Gray: *Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target*, Optics Letters, 1996
- [26] F. Hirth: *Schichtdickenmessung an gedruckten Polymerschichtsystemen*, Dissertation, Technische Universität München, 2011
- [27] Verein Deutscher Ingenieure: VDI/VDE-Richtlinie 3511 Blatt 4.5: *Technische Temperaturmessung – Strahlungsthermometrie, Praktische Anwendung von Strahlungsthermometern*, Beuth Verlag, Berlin, 2014.
- [28] Neubig B. et al.: *Transmissions- und Emissionsgrade von Kunststoffhalbzeugen für die berührungslose Temperaturmessung in Thermoformmaschinen*, Proceedings, 23. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, 2013.
- [29] Sackewitz M.: *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermografie, Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*, Fraunhofer Verlag, 2011.
- [30] K. Ramspeck, et al.: *In-line thermography for reliable hot spot detection and process control*, Energy Procedia 55, 133-140, 2014
- [31] C. Meola, S. Boccardi und G. M. Carlomagno: *Infrared thermography for inline monitoring of glass/epoxy under impact and quasi-static bending*, Applied. Science 8.2, 301, 2018
- [32] B. Denkena, et al.: *Thermographic online monitoring system for automated fiber placement processes*, Composites Part B: Engineering 97, 239-243, 2016
- [33] D. Wu: *Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*, Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- [34] A. Gleiter, C. Spießberger und G. Busse: *Tiefenaufgelöste Defekterkennung mit optisch angeregter Lockin-Thermografie*, Thermografie-Kolloquium 2, 2-9, 2007
- [35] G. Busse, H. Gerhard und P. Menner: *Lockin interferometry: Principle and aerospace applications*, International Symposium of NDT in Aerospace, 2008

- [36] S. D. Holland und R. S. Reusser: *Material evaluation by infrared thermography*, Annual Review of Materials Research 46, 287-303, 2016
- [37] Z. Zeng, et al.: *Absolute peak slope time based thickness measurement using pulsed thermography*, Infrared Physics & Technology 55.2-3, 200-204, 2012
- [38] S. Lau, D. Almond und P. Patel: *Transient thermal wave techniques for the evaluation of surface coatings*, Journal of Physics D: Applied Physics 24.3, 428-436, 1991
- [39] S. Lindemann und R. Schaller: *Laser-angeregte Lockin-Thermografie zur zerstörungsfreien und beruehrungslosen Schichtdickenmessung von thermisch gespritzten Beschichtungen*, DGZfP-Jahrestagung, 2017
- [40] 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, 655-660, 2016
- [41] R. Krankenhagen und C. Maierhofer: *Einzelblitz vs. Multiblitz – Blitzthermografie mit mehreren Blitzen*, Thermographie-Kolloquium, 2015
- [42] G. Schober, et al.: *Multiple flash thermography for non-destructive testing of light-weight components*, Proceedings of the IRS², AMA Conferences, 2017
- [43] S. Soldan: *Sensordatenfusionsansätze in der Thermografie zur Verbesserung der Messergebnisse Vol. 3*, Kassel university press GmbH, 2014
- [44] F. Bernhard: *Thermografie*, Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 1395-1463, 2014
- [45] D. Hoffmann, et al.: *Tiefenaufgelöste Detektion von Fehlstellen in Faserverbundkunststoffen – Entwicklung eines Lock-in-Thermografie-Systems zur tomografischen Bauteilprüfung*, Shaker Verlag, 2019
- [46] S. Neuhäusler, et al.: *Optimierung der Impuls-Thermografie - Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen*, Thermografie-Kolloquium, 2003
- [47] A. Ziadi, F. Galmiche und X. Maldague: *Pulse shaping in infrared thermography for nondestructive evaluation*, Review of scientific instruments 74.1, 411-3, 2003

-
- [48] X. Maldague, F. Galmiche und A. Ziadi: *Advances in pulse phase thermography*, Infrared Physics & Technology 43.3-5, 175-81, 2002
- [49] C. Spießberger: *Merkmalsanalyse mit thermischen Wellen in der zerstörungsfreien Werkstoff- und Bauteilprüfung*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2012
- [50] X. Maldague und S. Marinetti: *Pulse phase infrared thermography*, Journal of applied physics 79.5, 2694-8, 1996