

Tiefenaufgelöste Defekterkennung mit optisch angeregter Lockin-Thermografie

A. GLEITER, C. SPIEBERGER, G. BUSSE, Institut für Kunststofftechnik, Abteilung Zerstörungsfreie Prüfung (IKT-ZfP), Universität Stuttgart

Kurzfassung: Die optisch angeregte Lockin-Thermografie ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, dessen Tiefenreichweite in gewissen Grenzen einstellbar ist. Durch Verwendung des Phasenverlaufs über verschiedene Lockin-Frequenzen erhält man Informationen über die Tiefe thermischer Grenzflächen („Thermische Tomographie“).

Einführung

Die optisch angeregte Lockin-Thermografie (OLT) ist ein berührungsloses und zerstörungsfreies Prüfverfahren mit breitem Einsatzgebiet. Im Gegensatz zur üblichen Thermografie (die als Pulsthermographie ebenfalls zur Defekttomographie eingesetzt wurde [4]) wird bei OLT die thermische Anregung moduliert und nur der Temperaturwechsel bei der Anregungsfrequenz erfasst. Nach einer Fourieranalyse erhält man Phasen- und Amplitudenbilder der lokalen Temperaturänderung bei dieser Frequenz. Besonders aussagekräftig sind die Phasenbilder: Sie sind robust gegen äußere Störungen, geben thermische Strukturen (d.h. Grenzflächen) wieder und enthalten zudem Informationen über die Tiefenlage der Defekte. Allerdings wird die Tiefeninformation bisher nur wenig genutzt, obwohl sie zu einer genaueren Charakterisierung der Fehler beiträgt. Im Folgenden wird gezeigt, wie man die Tiefeninformation aus OLT-Messungen extrahieren kann.

1. Optisch angeregte Lockin-Thermografie (OLT)

1.1 Thermische Wellen

Wird die Oberfläche einer Probe einer periodischen Temperaturänderung ausgesetzt (z.B. durch sinusartige Beleuchtung), so setzt sich die Temperaturmodulation in das Probeninnere als „thermische Welle“ fort, die für den stationären Fall die Lösung der homogenen Wärmediffusionsgleichung darstellt [1,2],

$$T(z, t) = T_0 \cdot e^{-z/\mu} \cdot e^{i(\omega t - z/\mu)} \quad (a)$$

wobei z die Tiefe kennzeichnet, ω die Lockin-Kreisfrequenz, μ die thermische Diffusionslänge und t die Zeit. Thermische Wellen sind stark gedämpft: Nach einer Wellenlänge ($2\pi\mu$) fällt die Amplitude auf ungefähr 0,2 % des Anfangswerts. Da jedoch die thermische Diffusionslänge von der Lockin-Frequenz f abhängt,

$$\mu = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f}} \quad (2)$$

(wobei α die Temperaturleitfähigkeit ist) kann die Tiefenreichweite des Verfahrens prinzipiell frei gewählt werden. Wie man aus mehreren Messungen zu verschiedenen Lockin-Frequenzen eine Tiefeninformation erhält, wird in Abschnitt 2 erläutert.

1.2. Messprinzip und Versuchsaufbau

Das Messprinzip beruht darauf, dass thermische Wellen simultan auf der ganzen Probenoberfläche durch Absorption von intensitätsmoduliertem Licht erzeugt werden. Die Temperaturüberlagerung mit der an verborgenen Defekten reflektierten thermischen Welle wird von einer IR-Kamera aufgenommen und mit einem PC ausgewertet (siehe Abb. 1).

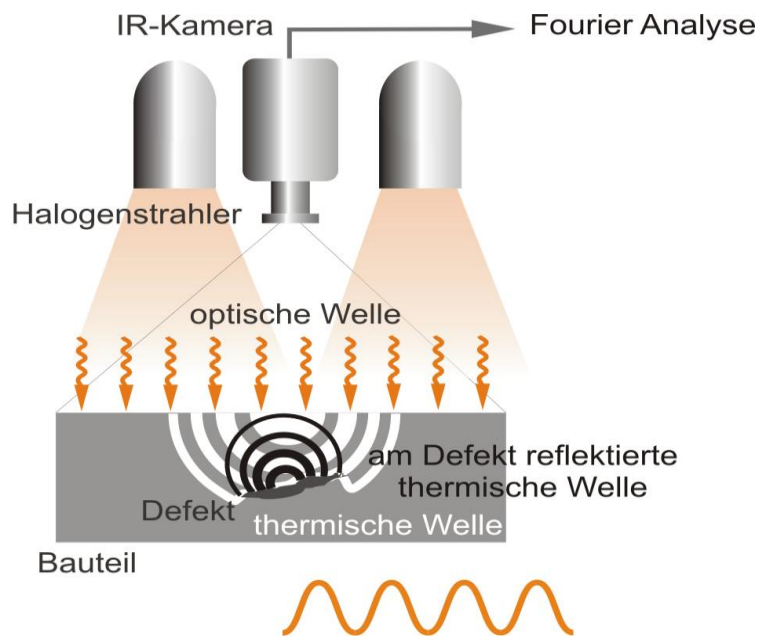


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau

Bei der verwendeten IR-Kamera handelt es sich um das Modell „Emerald“ der Firma Cedip mit folgenden Kennwerten:

Spektrale Empfindlichkeit	3-5 μm
Detektor	FPA InSb 640 x 512 Pixel
NETD	15 mK @ 25°C
Maximale Bildwiederholrate	80 Hz im full-frame Modus
Objektiv	MW 25 mm F2

Die Reflexion der thermischen Wellen an inneren Grenzflächen gibt Auskunft z.B. über Delaminationen und Risse. Nach einer pixelweisen Fouriertransformation des aufgenommenen Bildstapels bei der Modulationsfrequenz erhält man ein Amplituden- und ein Phasenbild, wobei insbesondere die Phasenbilder Rückschlüsse auf die Tiefenlage der Fehler in der Probe zulassen.

Die Tiefenreichweite von OLT ist etwa das 1,6-Fache der thermischen Diffusionslänge μ (siehe Formel (2)). Da diese frequenzabhängig ist, können mit tieferen Frequenzen tiefer liegende Defekte detektiert werden. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2. Die PMMA-Probe hat

Sacklochbohrungen auf der Rückseite (Probenskizze s. Abb. 4). In Abb. 2 rechts sieht man die Phasenwerte entlang der roten Geraden. Die Tiefenreichweite liegt hier demnach zwischen 1,0 mm und 1,2 mm. Der theoretische Wert liegt bei 1,1 mm.

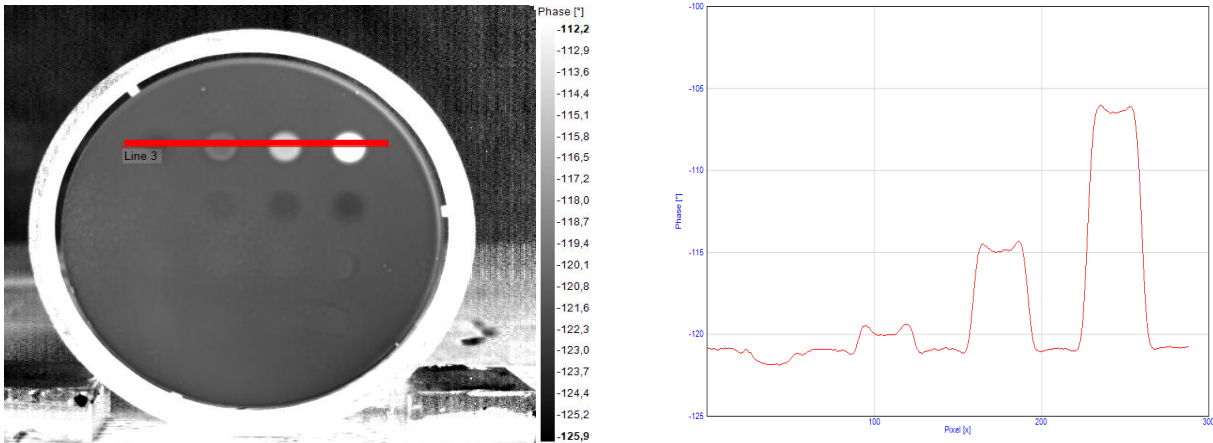


Abbildung 2: Phasenbild einer Probe mit unterschiedlichen Sacklochtiefen. Lockin-Frequenz von 0,08 Hz.

2. Thermische Tomografie

Für eine feste Probendicke d ändert sich das Oberflächentemperaturfeld in Abhängigkeit der Lockin-Frequenz f [3],

$$T(z, f) \propto \frac{(1 + R)(1 + R e^{-2d\sigma})}{f(1 - R^2 e^{-2d\sigma})} \quad (4)$$

mit: $\sigma = (1 + i) \sqrt{\pi f / \alpha}$ und dem thermischen Reflexionskoeffizient R , dessen Betrag für die Grenzfläche Luft/Festkörper meistens knapp unter 1 liegt, so dass Diskontinuitäten hinter solchen Grenzflächen nicht zu erkennen sind (wie bei Ultraschall). Der Frequenzgang der Phase ist in Abbildung 3 dargestellt.

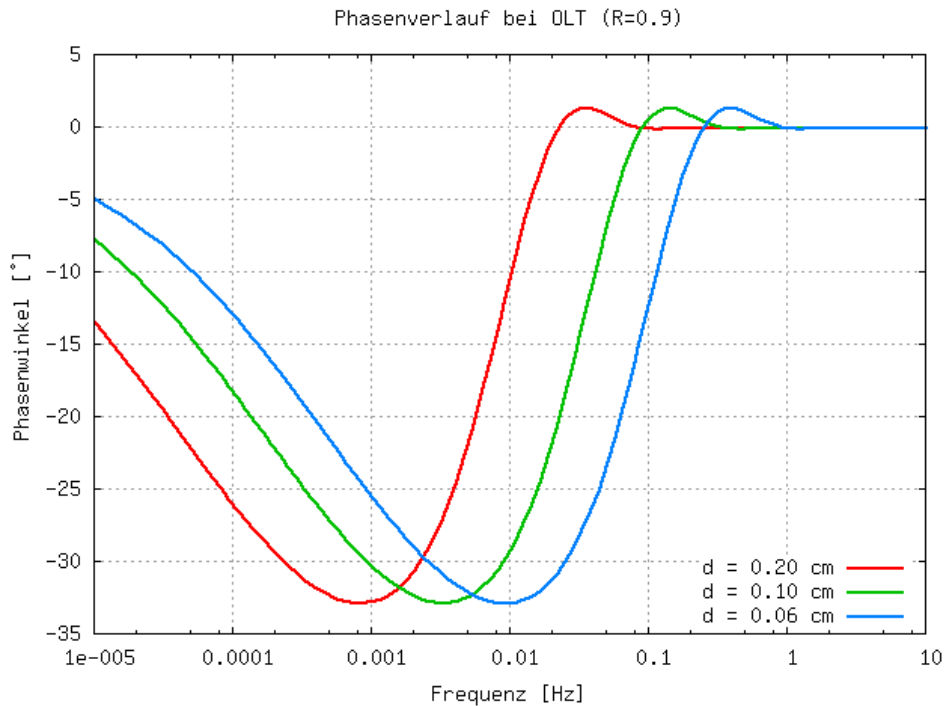


Abbildung 3: Theoretischer Frequenzgang für PMMA bei unterschiedlicher Probendicke (d).

Um ein thermisches Tomografiebild zu erstellen, verwendet man mehrere OLT-Messungen bei verschiedenen Lockin-Frequenzen, um Frequenz-Phasen-Kurven von jedem Bildpixel zu ermitteln. Als neuer bildgebender Parameter wird nun die Frequenz gewählt, bei der der Phasenverlauf ein Extremum besitzt. Diese Frequenzen entsprechen einer bestimmten Bauteildicke. Es muss also noch anhand bekannter Restwandstärken kalibriert werden.

3. Beispielmessung an einer Modellprobe

Die hier verwendete kreisförmige Modellprobe besteht aus Polymethylmethacrylat (PMMA). Von der Rückseite wurden Sacklöcher mit verschiedenen Restwandstärken eingebracht (siehe Abb. 4).

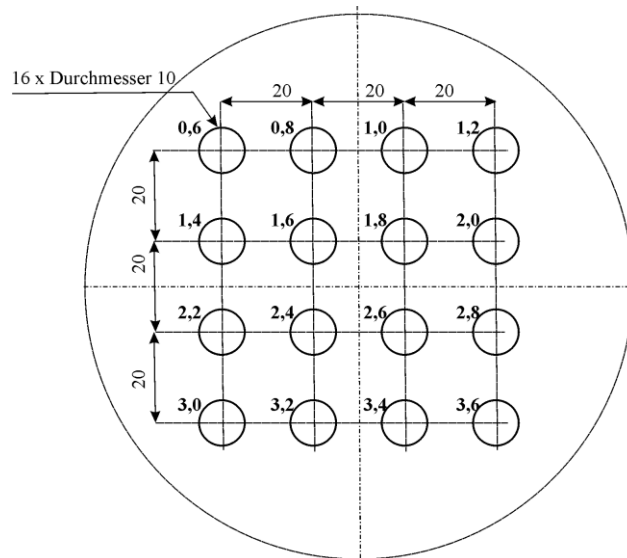
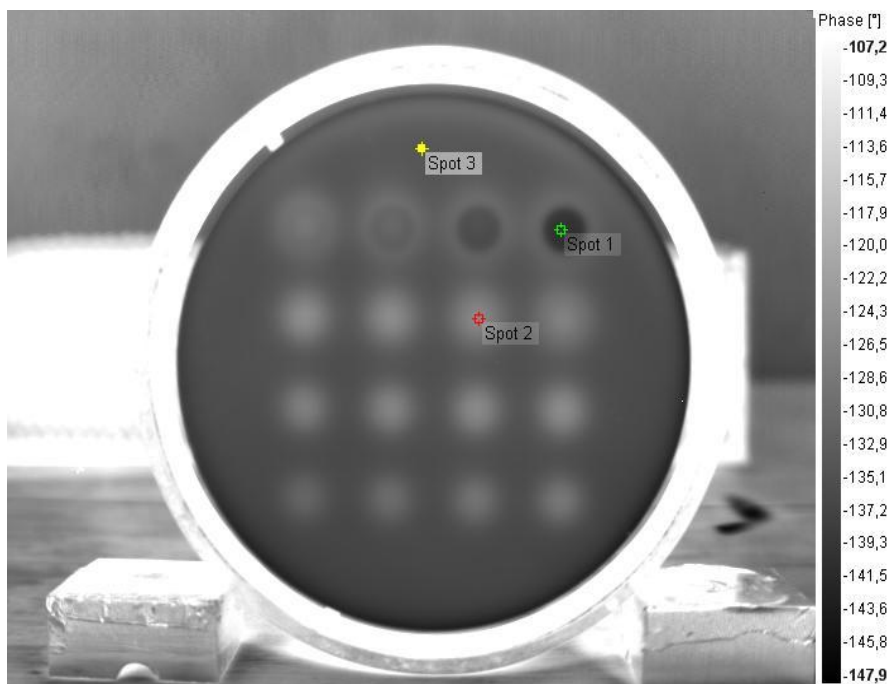


Abbildung 4: Skizze der Modellprobe (Rückseitenansicht)

Die Probe wurde mit optischer Lockin-Thermografie bei Anregungsfrequenzen zwischen 2.25 Hz und 0.04 Hz gemessen. Abbildung 5 zeigt die Phasen-Frequenzkurve exemplarisch an 3 Bildpunkten: Spot 1 und 2 befinden sich über zwei Sacklöchern der Probe, während Spot 3 außerhalb der Bohrungen liegt. Der Frequenzgang von Spot 1 und 2 enthält jeweils ein Maximum. Um die zugehörigen Frequenzen zu ermitteln ist es zweckmäßig, Differenzkurven zu betrachten: Zieht man vom Frequenzgang jedes einzelnen Pixels die Kurve eines Referenzpixels mit maximaler Bauteildicke ab, erhält man Kurven mit einem globalen Maximum (siehe Abb. 6).



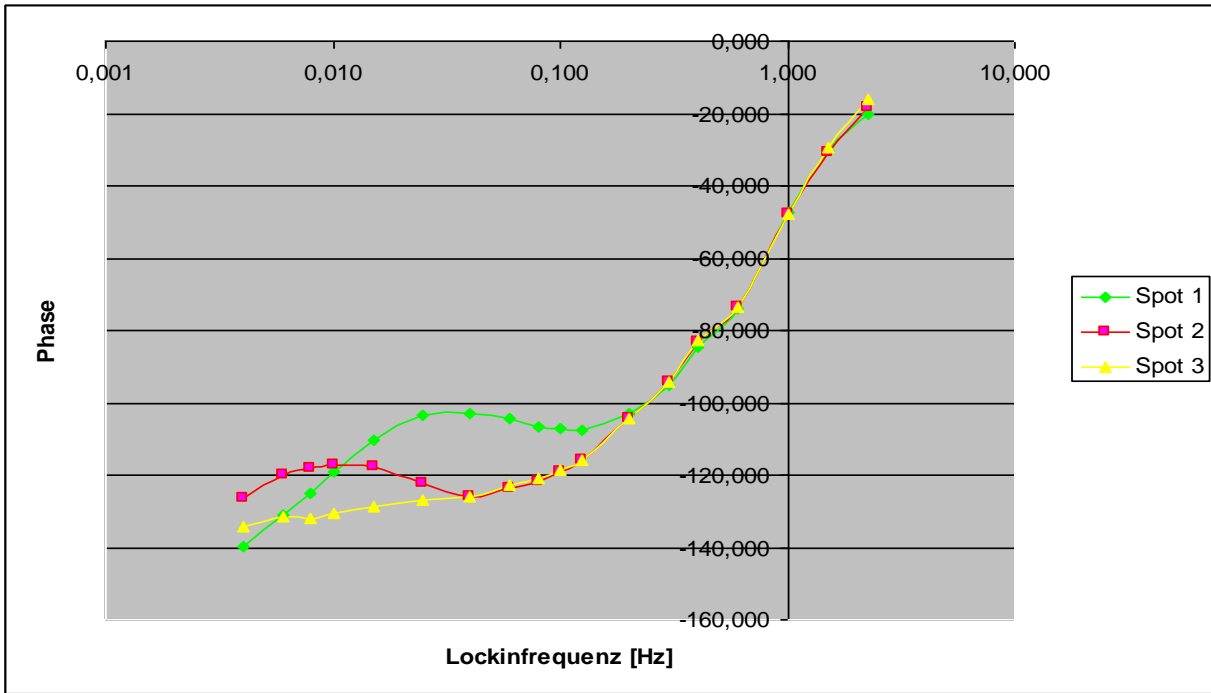


Abbildung 5 : Frequenz-Phasen-Kurven als Ergebnis von OLT-Messungen

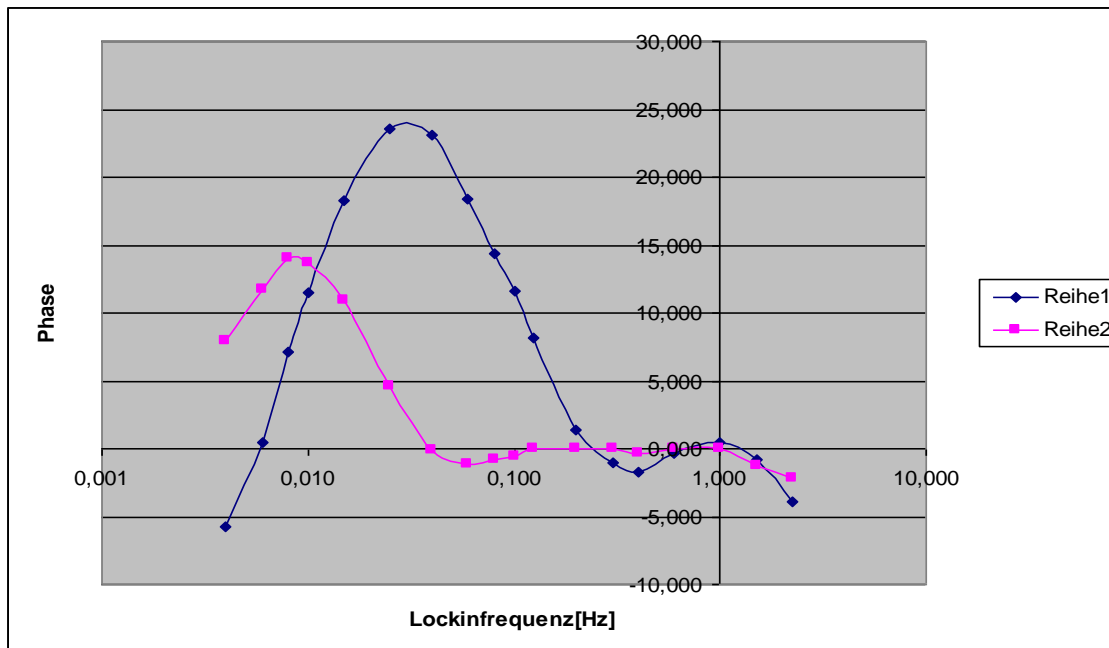


Abbildung 6: Frequenz-Phasen-Kurve aus der Differenz von Spot 1/2 zu Spot 3

Als neuen bildgebenden Parameter verwendet man nun die Lockin-Frequenz zum jeweiligen Maximum. Um die Dynamik zu erhöhen wurde ein Parabelfit angewendet. Abbildung 7 zeigt das auf diese Weise entstandene Frequenzbild und Abbildung 8 die Frequenzprofile entlang der roten Linie, wobei die Struktur durch dreidimensionale Wärmeleitungseffekte (insbesondere laterale Wärmeleitung) verursacht wird.

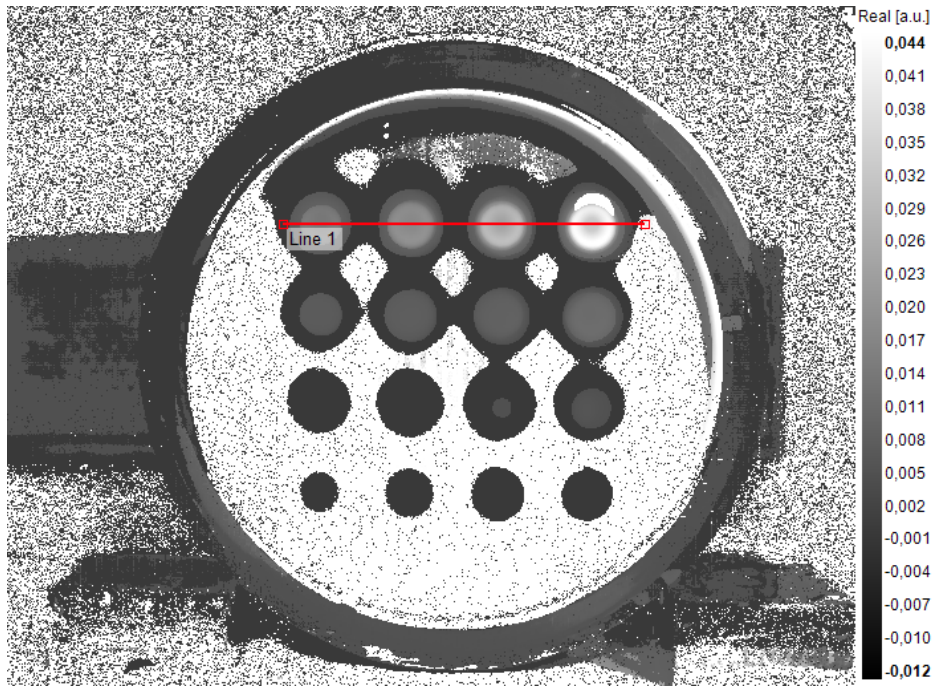


Abbildung 7: Frequenzbild

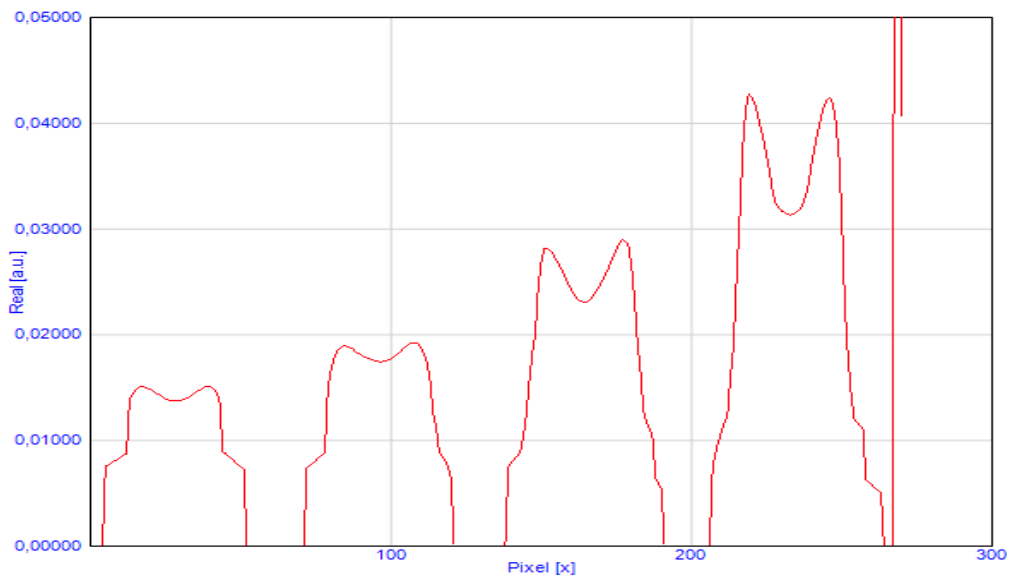


Abbildung 8: Frequenzwerteprofil aus vorherigem Bild

Die Tiefeninformation des Frequenzbildes kann in einem dreidimensionalen Plot dargestellt werden (siehe Abb. 9). Nach entsprechender Kalibrierung gibt die z-Achse die Restwandstärken in mm an.

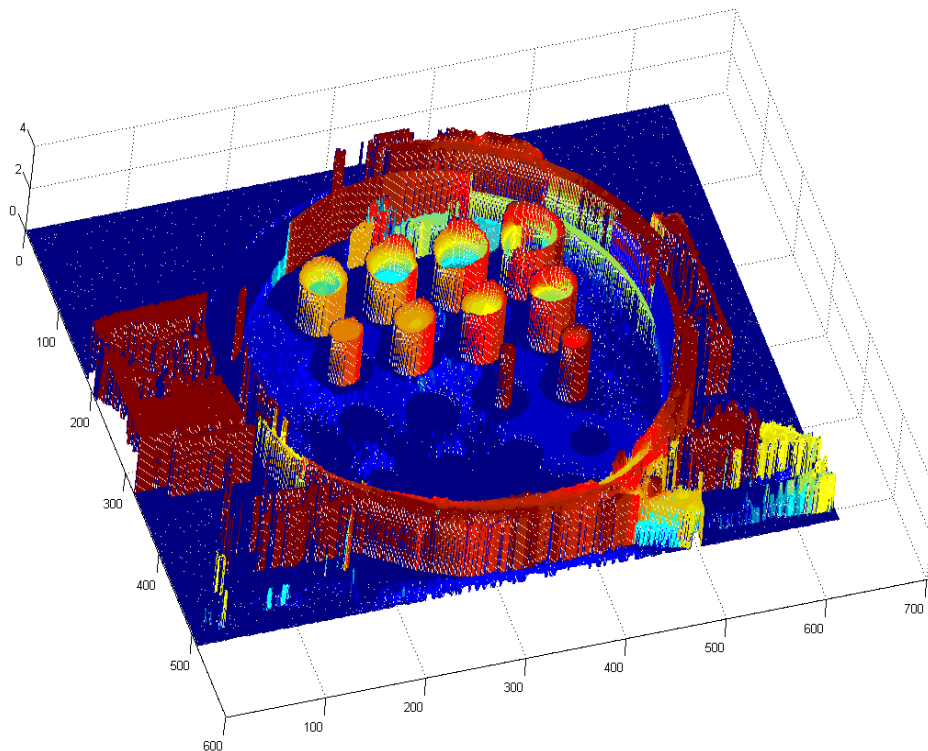


Abbildung 9: Tomografiebild der Lochprobe aus PMMA

4. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Tiefeninformation von Phasenbildern aus OLT-Messungen eine Tomographie der thermischen Grenzflächen ermöglicht. Im Unterschied zu üblichen Bildern aus Pulsthermografie-Messungen ist diese Phasentomografie unanfällig gegen Artefakte (Ausleuchtung, optische Oberflächenstruktur, Spiegelungen...). Zu erwähnen ist aber auch die Einschränkung, dass Defekte von davor liegenden Grenzflächen verdeckt werden können.

5. Referenzen

- [1] Busse, G.: *Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal*. Applied Phys. Lett. 35 (1979), S. 759-760
- [2] Busse, G.; Wu, D.; Karpen, W.: *Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography*. Appl. Phys. 71 8 (1992), S. 3962-3965
- [3] Mandelis, A., *Diffusion-Wave Fields*, Springer 2001
- [4] Vavilov, V., Maldague, X. and Picard, J.: *Dynamic thermal tomography: new NDE technique to reconstruct inner solids structure using multiple IR image processing*, In: Rev. of Progress in Quant. NDE, ed. by D.Thompson and D.Chimenti, Vol.11A, 1992, Plenum Press, N.Y., pp.425-432.