

**Pforzheimer
Werkstofftag
2017**

Photothermie als neue Methode für zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schorr

Steinbeis-Transferzentrum Tribologie in Anwendung und Praxis,
Duale Hochschule Karlsruhe

Kurzfassung

Das Steinbeis-Transferzentrum Tribologie in Anwendung und Praxis an der Dualen Hochschule in Karlsruhe beschäftigt sich mit der Reduzierung von Verschleiß in tribologischen Systemen. Dies erfolgt analytisch anhand der Vermessung und Bewertung von Oberflächen- und Materialeigenschaften. Für deren Untersuchung steht im Steinbeis-Transferzentrum eine umfassende Ausstattung an modernen Messmöglichkeiten zur Verfügung. Wir sind in vielen Branchen tätig und führen Analysen und Beratungen als Dienstleistung für Industrieunternehmen oder als Kooperationspartner für Forschungseinrichtungen durch. Die Schwerpunkte liegen hierbei in den Bereichen Oberflächenmessungen, Schichtanalysen und Materialuntersuchungen. Das Steinbeis-Transferzentrum Tribologie arbeitet auf der wissenschaftlichen Grundlage einer Hochschule mit der Handlungskompetenz eines Industrieunternehmens.

In diesem Beitrag zum Pforzheimer Werkstofftag 2017 wird die **Photothermie** als neue Methode für eine zerstörungsfreie Werkstoffprüfung vorgestellt. Bei der Photothermie wird mit einem Laser das Messobjekt lokal erwärmt und anschließend die reflektierten Wärmewellen mit einem Infrarotdetektor registriert.

Die photothermische Methode liefert zwei- bzw. dreidimensionale Informationen zur jeweiligen Messgröße und nicht nur punktuell lokal eng begrenzte Eigenschaften. Mit der photothermischen Methode können alle physikalischen Größen gemessen werden, welche die Diffusionseigenschaften des Materials beeinflussen. Dies sind Werkstoffinhomogenitäten, Schichteigenschaften, physikalische Werkstoffeigenschaften, Füllstoffe in Kunststoffen, Gefügeveränderungen in Zusammenhang mit ermüdungsbedingten Ausfällen uvm. Diese Eigenschaften werden mit der Photothermie zerstörungsfrei gemessen. Damit lassen sich auch die Auswirkungen von Prozessänderungen in der Fertigung untersuchen, ohne dass Schliffe angefertigt werden müssen.

Funktionsprinzip Photothermie

Bei dem photothermischen Messverfahren trifft ein intensitätsmodulierter Laserspot auf eine Objekt Oberfläche (siehe Abbildung 1). Die Strahlung wird auf der Oberfläche absorbiert und erzeugt einen Wärmestrom, der sich in das Bauteilinnere in Form von thermischen Wellen ausbreitet. Die Wellen haben dieselbe Frequenz wie das eingestrahlte Laserlicht. Die weitere Ausbreitung der thermischen Wellen wird durch die thermischen Eigenschaften des Materials beeinflusst, wie z.B. Kristallstrukturänderungen, Grenzflächen, Defekte oder Inhomogenitäten. Diese führen dazu, dass die Wellen zurückreflektiert und an der Oberfläche als Wärme abgestrahlt werden. Der Wärmewiderstand des Materials sorgt allerdings auch dafür, dass die Wärmewelle zeitlich verzögert durch das Material wandert und damit die Phase der abgestrahlten Wärme versetzt zum eingestrahlichten Laserlicht ist. Ändern sich die thermischen Eigenschaften des Materials macht sich dies im Phasenversatz bemerkbar. Die Rauheit der Oberfläche beeinflusst hingegen die Amplitude des Messsignals. Dies bedeutet, dass die Messgröße Phase(nversatz) nahezu unabhängig von der Rauheit ist. [1]

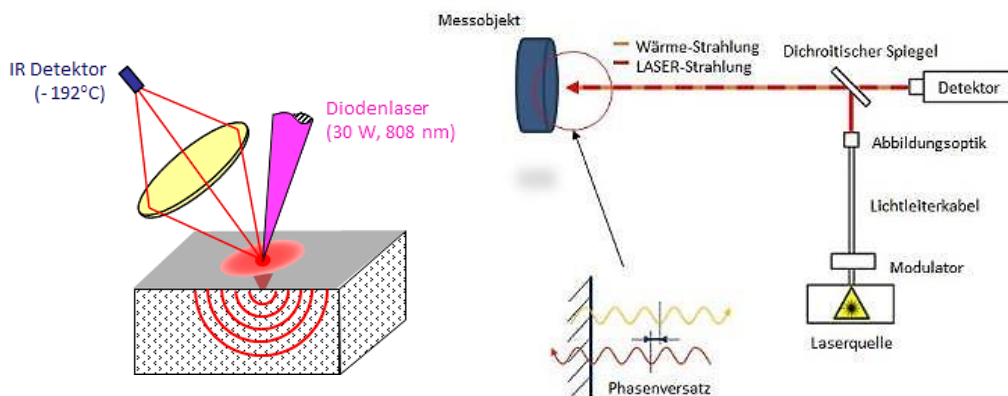
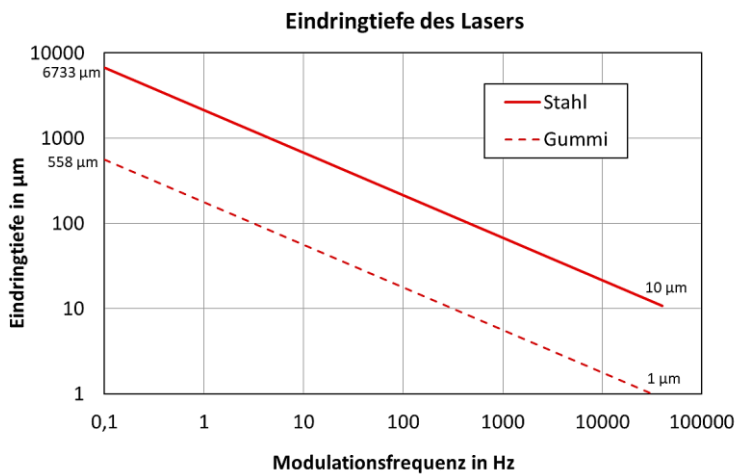


Abbildung 1: Funktionsprinzip Photothermie [1]

Zur Messung der Wärmestrahlmissionen (thermische Wellen) wird ein Infrarotdetektor eingesetzt und mit einem Lock-in-Detektor der Phasenversatz erfasst. Dieser wird zur Erhöhung der Empfindlichkeit auf -192 °C heruntergekühlt, entweder mit Flüssigstickstoff oder mit einem Stirlingkühler. [1]

Die Ausbreitung der oszillierenden Wärmewelle ins Materialinnere (Eindringtiefe) wird durch die eingestellte Modulationsfrequenz des Lasers und den thermischen Eigenschaften des Materials bestimmt (siehe Abbildung 2). Sie kann über die in

nachstehender Abbildung aufgeführte Formel berechnet werden. Die bei einer bestimmten Eindringtiefe des Lasers zurückreflektierten Wärmewellen beinhalten die Materialinformationen von der Oberfläche bis zur theoretischen Eindringtiefe.



$$t = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \cdot f \cdot \rho \cdot c_p}}$$

t: Eindringtiefe
 λ : Wärmeleitfähigkeit
 f: Modulationsfrequenz
 ρ : Dichte
 c_p : spez. Wärmekapazität

Abbildung 2: Eindringtiefe des Lasers für Stahl und Gummi

Hohe Frequenzen im kHz-Bereich werden beispielsweise für Schichtanalysen verwendet und tiefe Frequenzen im Hz-Bereich beispielsweise für Materialanalysen. Die nachstehende Abbildung zeigt einen sogenannten Tiefen-/Frequenzscan. In diesem ist die Phase über der Eindringtiefe für einen Stahl mit einer beschichteten Oberfläche dargestellt. Die Beschichtung wirkt sich noch auf den Phasenversatz bis zu einer theoretischen Eindringtiefe des Lasers von ca. 40 μm aus.

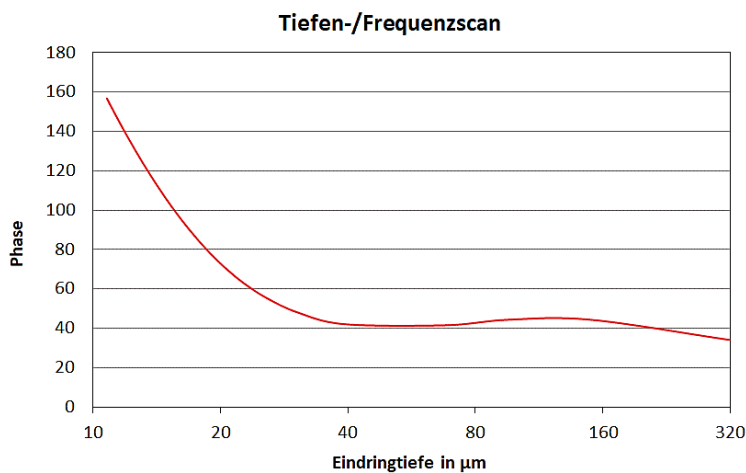


Abbildung 3: Tiefen-/Frequenzscan

Weil die Ausbreitung der thermischen Wellen von den thermischen Eigenschaften des Materials abhängt, kann alles, was diese beeinflusst, durch die Photothermie gemessen werden. Es handelt sich um ein indirektes Messverfahren. Es lassen sich Werkstoffinhomogenitäten (Einschlüsse, Versetzungen, Risse, ...), physikalische Werkstoffeigenschaften (Härte, ...) Schichteigenschaften (Haftung, Dicke, ...) uvm. messen. Die Größe des Laserspot liegt im Millimeterbereich und die des Messflecks des Infrarotdetektors im Bereich von wenigen 100 μm Durchmesser. Je nach gewählter Größenkombination werden vertikale oder laterale Materialeigenschaften erfasst. Um Informationen flächenhaft an einem Objekt zu erhalten, erfolgt dieses durch Abrastern. Hierzu wird die Probe translatorisch oder rotatorisch positioniert und an jeder Stelle die Phase in einer definierten Tiefe gemessen.

Einsatzgebiete Photothermie

Aufgrund des Messprinzips ergeben sich vielfältigste Einsatzgebiete für die Photothermie. Es sind alle Größen messbar, die sich auf die Diffusionseigenschaften des Materials auswirken. Die Diffusionseigenschaften werden hauptsächlich durch die Wärmeleitfähigkeit λ , die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p beschrieben. Somit sind selbst dünnste Schichten, wie z.B. Reaktionsschichten mit einer Dicke von ca. 100 nm, messbar.

In der Abbildung 3 sind die wichtigsten Einsatzgebiete der Photothermie aufgeführt. Diese werden dann im nachfolgenden Teil des Beitrages vorgestellt.

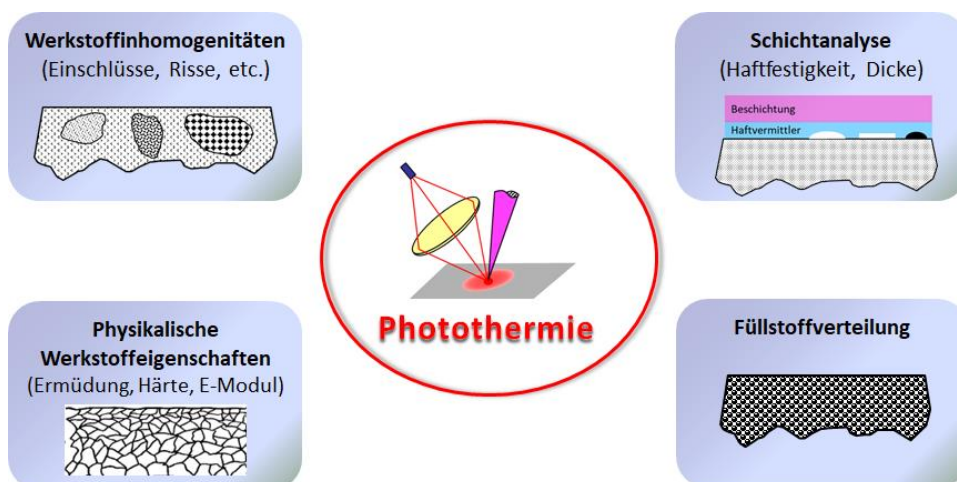


Abbildung 3: Einsatzgebiete Photothermie

Werkstoffinhomogenitäten

In der Abbildung 4 ist beispielhaft dargestellt wie das Ergebnis der Messung von Werkstoffinhomogenitäten durch eine flächenhafte Messung in konstanter Eindringtiefe des Lasers sich darstellt. Damit lassen sich Einschlüsse, Versetzungen und Risse im Materialinneren erfassen.

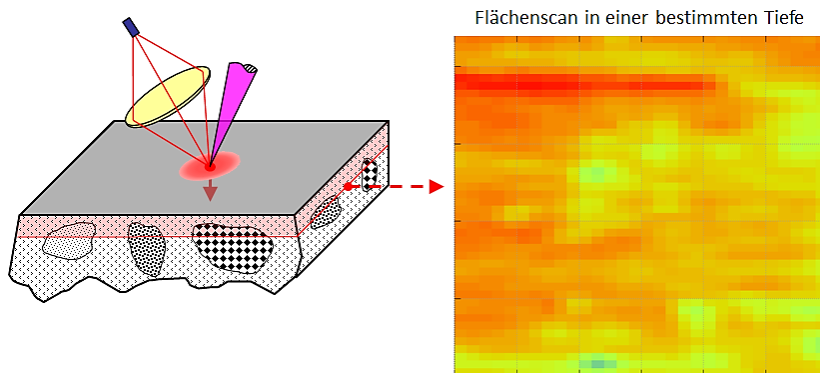


Abbildung 4: Photothermische Messung von Werkstoffinhomogenitäten

Schichtanalyse

Ein wichtiges Einsatzgebiet der Photothermie ist die Schichtanalyse. Bei dieser können durch Modulationsfrequenzen im kHz-Bereich die Schichthftung und die Schichtdicke vermessen werden. Die Photothermie liefert dabei in einem deutlich größeren Untersuchungsbereich Informationen zur Haftfestigkeit als die klassischen Verfahren, wie z.B. der Ritztest oder der Kalottenschliff, und das zerstörungsfrei. Die photothermischen Messungen können mit direkten Messverfahren korreliert werden, wodurch ein direkter Bezug zu bekannten physikalischen Größen, wie z.B. der Vickershärte, ermöglicht wird.

Die Abbildung 5 zeigt das Messergebnis der **Schichthftung** einer Verschleißschutzschicht mit Hilfe der Photothermie. Damit können Fehler in der Haftvermittlerschicht flächig auf einem Bauteil erfasst werden. Hingegen lässt der klassische Ritztest nur lokale Informationen zur Schichthftung zu. Lag die Prüfstelle jedoch nicht an jeder Fehlerstelle, so wird dieses erst später im Betrieb in Form der Schichtablösung mit evtl. Bauteilversagen feststellbar.

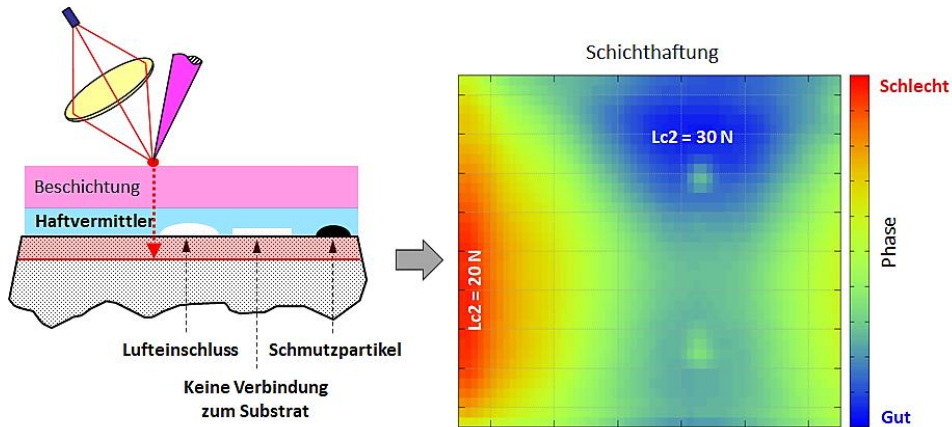


Abbildung 5: Schichthaftungsprüfung mit der Photothermie

Analog der Schichthaftung lässt sich auch die **Schichtdicke** photothermisch messen. Die Abbildung 6 zeigt eine Messung der Schichtdicke. Insbesondere bei gekrümmten Bauteilen können prozessbedingt durch das Abscheideverfahren unterschiedliche Schichtdicken auf einem Bauteil entstehen. Somit lässt sich mit Hilfe der Photothermie der Beschichtungsprozess bzgl. Gleichmäßigkeit optimieren.

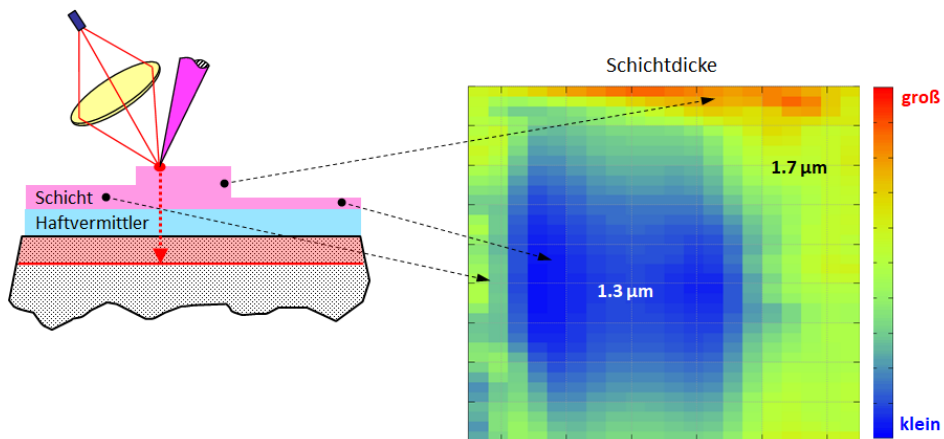


Abbildung 6: photothermische Schichtdickenmessung

Physikalische Werkstoffeigenschaften

Da die Diffusionseigenschaften des Materials von den physikalischen Werkstoffeigenschaften abhängen, können mit Hilfe der Photothermie die entsprechenden physikalischen Größen erfasst werden.

Ermüdung

Die Photothermie lässt sich in Zusammenhang mit ermüdungsbedingten Bauteilausfällen einsetzen. Zum einen zur Optimierung einer gleichmäßigen Materialbeanspruchung und zum anderen zur Verkürzung von Erprobungszeiten. Die Gefügeveränderung einer Wälzlagerlaufrolle nach einer bestimmten Lastspielanzahl zeigt Abbildung 7. Hier die unterschiedliche lokale Beanspruchung erkennbar. Somit liefert die photothermische Messung Informationen, um in Form einer gleichmäßigen Beanspruchung die Lebensdauer der Laufrolle zu erhöhen.

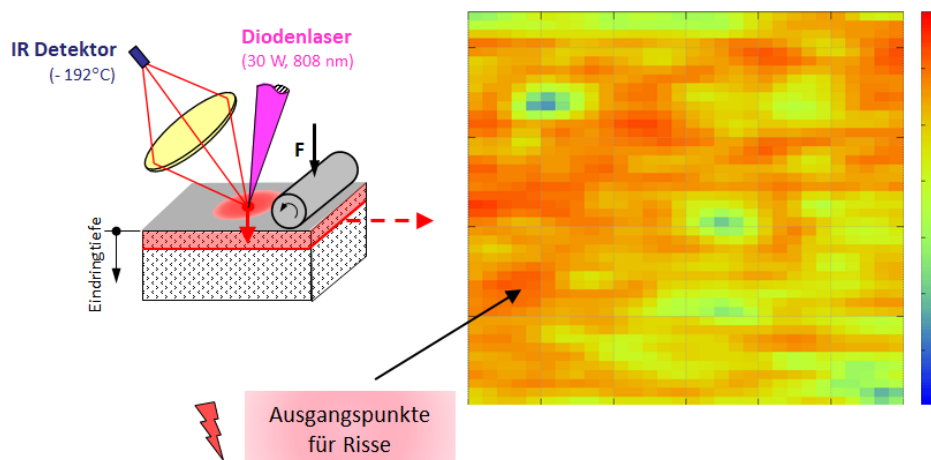


Abbildung 7: Photothermische Messung von Materialveränderungen

Wird ein Bauteil dynamisch beansprucht, beispielsweise durch Kontaktpressung, so versagt dieses nach Erreichen der maximalen Schadenssumme infolge Ermüdung. Jedes Lastspiel verursacht eine Veränderung im Materialinneren bis Versagen durch Ermüdungsausfall auftritt. Das Material verändert sich mit jedem Lastspiel. Man vermisst nun zu bestimmten Lastspielanzahlen bzw. Zeitpunkten die Laufrolle photothermisch. Anschließend dient die mittlere Phase über dem Messbereich als quantifizierbares Bewertungskriterium für die Gefügeveränderungen. (siehe Abbildung 8).

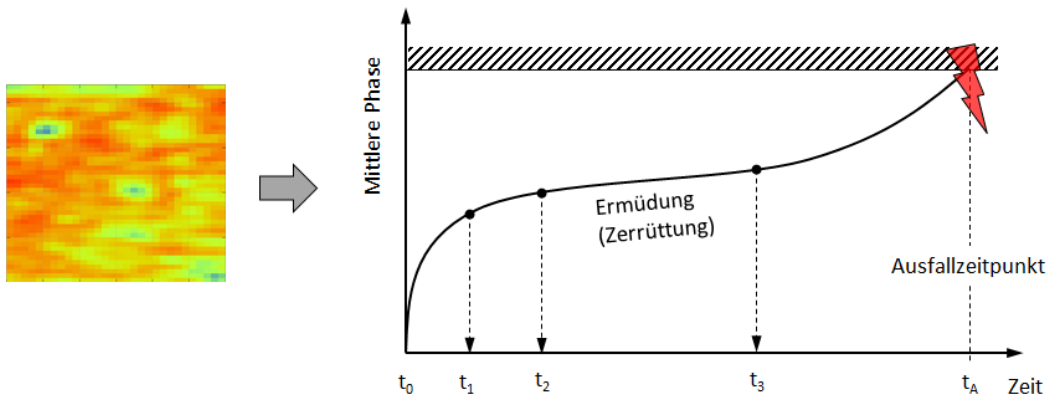


Abbildung 8: Materialveränderungen durch dynamische Beanspruchung

Ist der funktionale Zusammenhang zwischen der mittleren Phase und der Lastspielanzahl bzw. der Zeit eines dynamisch beanspruchten Bauteils bekannt, so kann der Ausfallzeitpunkt auf Basis der zerstörungsfreien Zwischenmessungen zu den Zeitpunkten t_1 , t_2 , t_3 extrapoliert werden. Dadurch kann die erforderliche Erprobungszeit für ermüdungsbedingte Ausfälle deutlich verkürzt werden. Umgekehrt kann aus dieser Messung bei bekanntem Funktionszusammenhang zur Lastspielanzahl auf die Beanspruchung rückgeschlossen werden.

Füllstoffverteilung

Auch Kunststoffe können mit der Photothermie bei geringer Laserleistung untersucht werden. Füllstoffe und Weichmacher führen zu einer Veränderung der Diffusionseigenschaften. Somit kann die Füllstoffverteilung oder der Alterungszustand von Kunststoffen zerstörungsfrei analysiert werden. In der Abbildung 9 ist die photothermische Messung eines Dichtringes dargestellt. In dieser ist die unterschiedliche Füllstoffverteilung von zwei Dichtringen, die in unterschiedlichen Kavitäten gespritzt wurden, gut erkennbar.

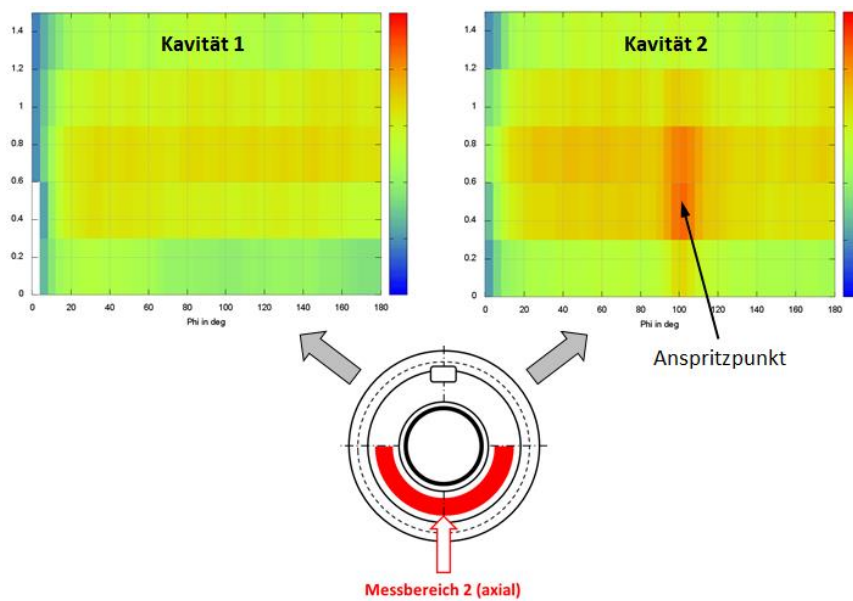


Abbildung 9: Photothermische Messung eines Dichtringes

- [1] Prof. Dr. Dietmar Schorr et al.: Basiswissen Verschleiß & Verschleißschutz,
1. Auflage, WOTech Gbr 2017, ISBN: 978-3-9814687-4-8

Kontakt

Steinbeis Transferzentrum
Tribologie in Anwendung und Praxis
Leiter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schorr
E-Mail: info@steinbeis-analysezentrum.com
Tel: +49 721 9735 831
Mobil: +49 172 9057349
Erzbergerstr. 121
76133 Karlsruhe
www.steinbeis-analysezentrum.com