

Prinzip der Lockin-Thermographie

Alle ZfP-Verfahren beruhen prinzipiell darauf, daß das zu untersuchende Bauteil in irgendeiner Weise angeregt und sein Antwortverhalten zur Charakterisierung des Bauteils verwendet wird. Bei den akustischen Verfahren wird ein Schallimpuls oder eine Kraftoszillation in das Bauteil eingebracht. Die Echos oder die mechanische Antwort liefern dann Informationen über den Zustand des Bauteils. Die Anregung kann aber auch thermisch erfolgen, und das sogar berührungslos, nämlich durch Absorption von Strahlung (z.B. intensitätsmodulierter Beleuchtung), die dann zu einem zeitlich oszillierenden Temperaturfeld führt, das ebenfalls berührungslos (z.B. mit einem Infrarotdetektor) erfaßt werden kann. Dieses "photothermische" Meßverfahren ermöglicht die Messung des thermischen Antwortverhaltens an einem Probenpunkt /1/. Sind Defekte in der Probe, so beeinflussen sie Amplitude oder Phase des Detektorsignals, wenn sie nicht zu tief unter der Oberfläche liegen. Die entscheidende Größe ist hierbei die "thermische Eindringtiefe μ ", die von der Modulationsfrequenz f und der Temperaturleitfähigkeit α des Werkstoffs abhängt:

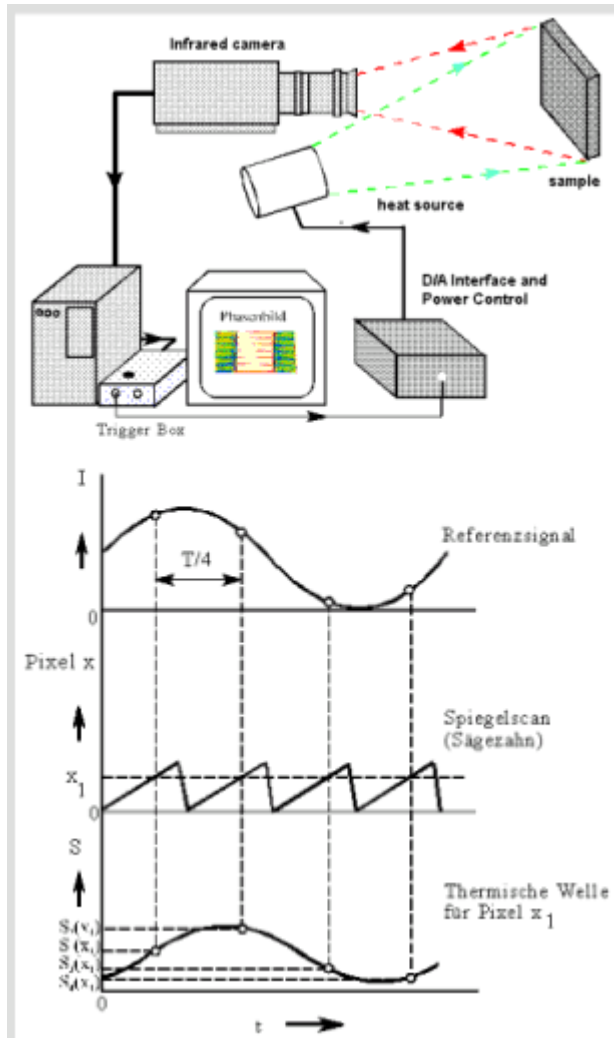
$$\mu = \sqrt{\alpha / \pi f}$$

Interessanterweise ist die Tiefenreichweite 2μ , wenn man die Signalphase verwendet, und μ , wenn man die Amplitude nimmt. Größere Reichweiten bedingen aber immer tiefere Frequenzen. Konkret bedeutet das, daß die Messung eine Minute dauert, wenn man in Kunststoffen eine Tiefe von mehr als 1 mm erreichen will. Ein tiefrequent modulierter Leistungsstrahler (statt des auf einen Punkt fokussierten Laserstrahls) und eine Thermographiekamera, die die Temperaturmodulation an allen Oberflächenpunkten zugleich verfolgen kann, werden eingesetzt. Die Ermittlung von Amplitude und Phase des zeitlichen Temperaturverlaufs an jedem Bildpunkt übernimmt der Rechner, und zwar durch pixelweise Fourieranalyse der vielen aufeinanderfolgenden Thermographieaufnahmen. Hierbei wird also die Funktion des Lockin-Verstärkers, der bei der Ein-Punkt-Messung der Photothermik eingesetzt wird, durch eine Rechenoperation simuliert. Darum nennt man die Multiplex-Photothermik, auch "phasenempfindliche Modulationsthermographie" oder abkürzend (nach dem ersetzten Meßgerät) "Lockin-Thermographie" /5-7/. Der Meßaufbau ist in Bild 1 dargestellt. Besonders einfach wird diese Fourieranalyse, wenn man die Lampenintensität sinusartig moduliert und geeignete Mittelungsprozesse durchführt, so daß letztlich nur vier Thermographiebilder (S1 bis S4) übrig bleiben, die zeitlich äquidistant in einer Modulationsperiode liegen /7/. Der wesentliche Punkt des Verfahrens liegt in der Synchronisation zwischen Anregung und Detektion der thermischen Wellen. Die Anregungsquelle läßt sich generell mit einem adaptiven Regelkreis auf einen zeitlich sinusartigen Temperaturverlauf auf der Probenoberfläche einstellen /8/.

$$\varphi(x_1) = \operatorname{arctg} \left[\frac{S_1(x_1) - S_3(x_1)}{S_2(x_1) - S_4(x_1)} \right]$$

$$A(x_1) = \sqrt{[S_1(x_1) - S_3(x_1)]^2 + [S_2(x_1) - S_4(x_1)]^2}$$

Bild 2 veranschaulicht die zeitlichen Abläufe und die Rekonstruktion der thermischen Welle aus vier Primärmeßdaten für einen beliebigen Bildpunkt x_1 : Für jedes x_1 ergeben sich vier zeitlich äquidistante Meßdaten (S_1 bis S_4), aus denen die thermische Welle an diesem Punkt x_1 vollständig rekonstruierbar ist. Ihr Phasenwinkel j und Amplitude A sind dann an dieser Stelle gegeben durch /7/



Bei der Berechnung der Phase kürzen sich alle Effekte, die durch Inhomogenität der Beleuchtung, der optischen Absorption bzw. der infraroten Emission auf der Oberfläche auftreten könnten, weg. Die lokale Phasenverschiebung ist ein störunanfälliger und empfindlicher Indikator für Grenzflächendefekte /9/

Die thermische Anregung erfolgte bisher (Bild 1) durch Absorption elektromagnetischer Strahlung im Prüfobjekt. Die Bilder der Lockin-Thermographie zeigen Amplitude oder Phase des modulierten Wärmetransports, der durch Defekte gestört wird. Solche Bilder zeigen verborgene Defekte aufgrund der durch sie verursachten Änderung von Amplitude und Phase. Aber auch elastische Wellen (z.B. Ultraschall) werden in Werkstoffen absorbiert ("Verlustwinkel") und führen auf diesem Weg ebenfalls zu Erwärmung. Man kann also statt der Lampe einen Ultraschallsender verwenden, den man an einer Bauteillecke befestigt: Die Wellen breiten sich im ganzen Bauteil aus und werden überall geschwächt und erzeugen dabei Wärme. Werden sie überall gleich stark ge-

schwächt? Der Hystereseeffekt, der die Umsetzung mechanischer Energie in Wärme bewirkt, ist nicht überall gleich stark. Besonders groß ist er in Defektbereichen, z.B. infolge Spannungskonzentration oder Reißuferreibung. Die Defekte werden auf diese Art selektiv stärker geheizt als intakte Bereiche. Wenn der Ultraschall periodisch ein- und ausgeschaltet wird (oder noch besser: sinusartig amplitudenmoduliert wird), hat man wieder ein oszillierendes Temperaturfeld, das nun aber von den Defekten ausgeht, während die intakten Probenbereiche "dunkel" bleiben. Wenn man mit dieser Ultraschallquelle die Lampe ersetzt, erhält man ein mit amplitudenmoduliertem Ultraschall erzeugtes Lockin-Thermographiebild! Das Amplitudenbild zeigt wie bei einer Dunkelfeldmethode nur die Defekte. Die Heizung erfolgt also im Vergleich zu optischen Anregung besonders günstig, denn in den intakten Bereichen geht praktisch keine Leistung "verloren".

Signalverläufe bei Impulsanregung und LockIn an einfachen Beispielen

Bei den beiden Anregungstechniken impulsartig und moduliert treten mit sofortiger Wirkung Wärmeflüsse, ausgehend von der Oberfläche, in das Material auf. Die zeitlichen Effekte sind aufgrund der Materialeigenschaften festgelegt, so dass bei beiden Verfahren Einflüsse aus der Tiefe (z.B. Dicke des Materials, Fehlertiefe) zur selben Zeit auftreten. Lediglich die Temperaturgradienten sind verschieden. Dies veranschaulicht der folgende Sachverhalt beispielhaft an einer gestuften Probe.

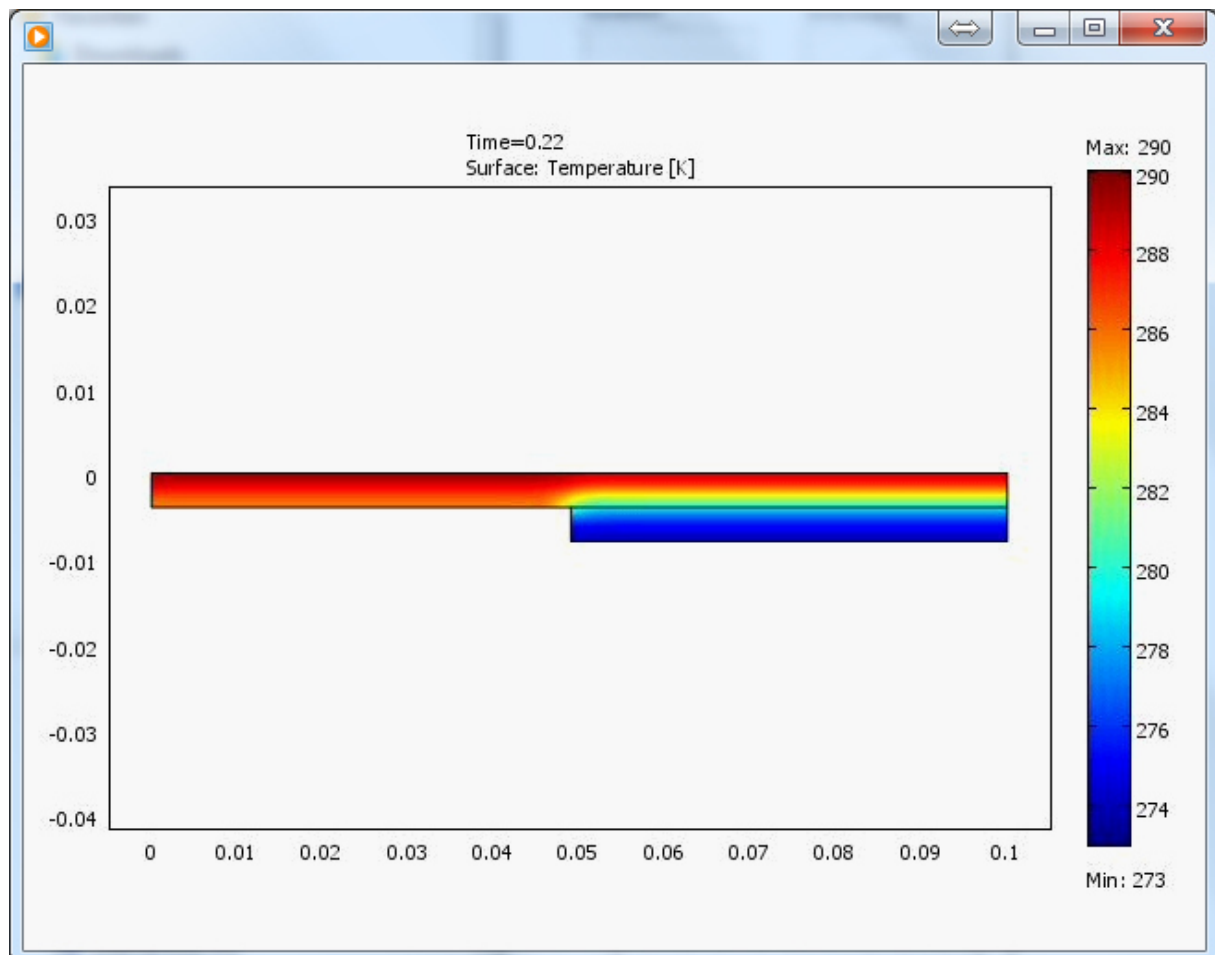


Bild 2: Simulation einer Prüfung mit einer gestuften Probe

Die Probe besteht aus zwei unterschiedlich dicken Seiten und wird von oben thermisch angeregt.

- Mit einem Impuls der Größenordnung 10.000 J/m^2
- Mit einer harmonischen Anregung der Größenordnung 1000 J/m^2

Das Material wird in dem Simulationsprogramm als Inconel definiert, einem typischen Turbinenwerkstoff. Die Oberfläche ist ideal absorbierend und es treten keine weiteren Verluste auf. Die Berechnung erfolgt mit dem FE Programm Comsol.

Nachfolgend werden die Unterschiede in den verschiedenen Anregungsmoden dargestellt und diskutiert.

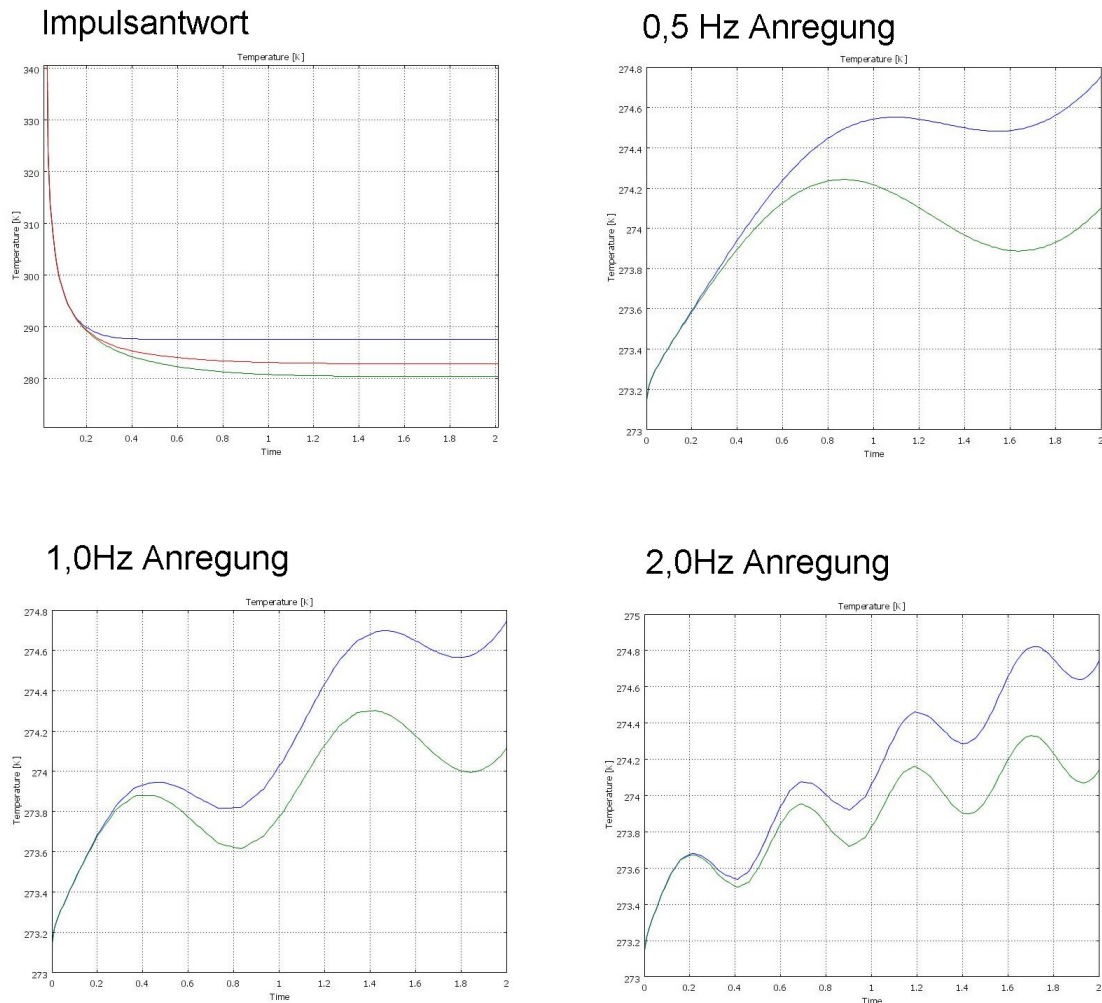


Bild 3: Ergebnisse der Oberflächenmessung an der dünnen und dicken Stelle des Testkörpers aus Bild 2. Der rote Kurvenverlauf bei der Impulsantwort liegt genau auf der Übergangskante.

Beiden Anregungsarten gemein ist, dass eine Wärmewelle / Wärmefront in das Bauteil mit der gleichen Geschwindigkeit eindringt. Ist die dünne Stelle durchdrungen, ändert sich der Wärmestrom und auf der Oberfläche ist ein Unterschied im zeitlichen Verhalten messbar und zwar dort, wo sich die Kurven der beiden Messpunkte voneinander trennen. In allen vier Diagrammen geschieht dies zur gleichen Zeit.

Die Aufgabe des Prüfers ist es, genau diesen Unterschied mit Hilfe verschiedener Auswerteverfahren herauszuarbeiten. Dabei hat sich bei der aktiven Thermografie das Auswerteverfahren der Phasenauswertung etabliert, da dieses Verfahren das zeitliche Verhalten der sich ändernden Oberflächentemperatur mathematisch charakterisiert und genau diese Änderungen grafisch darstellen kann.

Ohne an dieser Stelle hier auf mathematische Details eingehen zu wollen (näheres findet man in der Literatur, siehe Anhang), sei nur erwähnt, dass sich jeder Kurvenverlauf mathematisch durch eine Vielzahl von Sinusschwingungen darstellen und berechnen lässt. Das Verfahren, das hier zur Anwendung kommt nennt sich Fourier Analyse (FT, FFT, DFT sind mehr oder weniger komplexe Abarten der Fourier Analyse). Hierbei wird der FFT Analyse die Kurve eines Messpixels zugeführt und als Er-
Copyright by: Carl Messtechnik, Dipl. – Ing. V. Carl, Thyssenstrasse 183, 46545 Dinslaken, Sep 2015

gebniss liefert die FFT Amplituden und Phasenverschiebungen der Messperiode, inklusive aller ihrer harmonischen Glieder. Dies verdeutlicht folgende Darstellung.

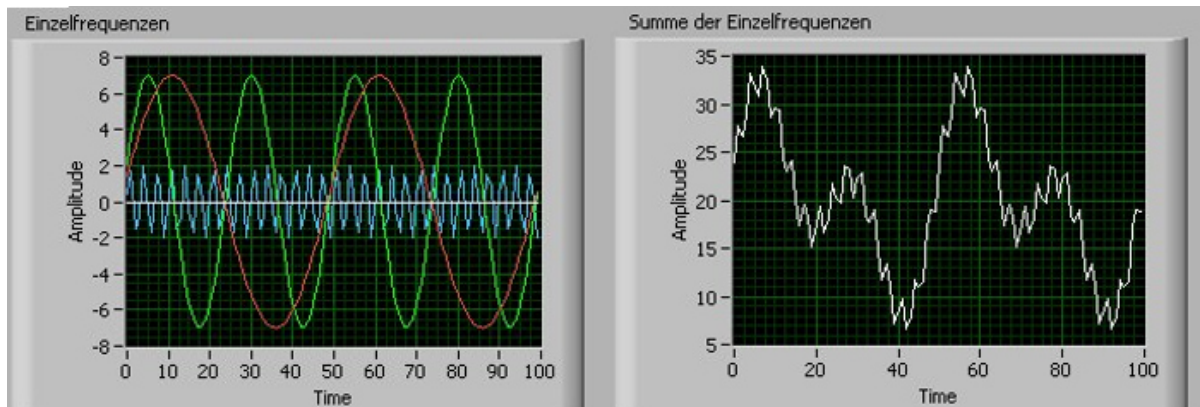


Bild 3: allgemeine FFT eines Signals

In Bild 3 sind links drei harmonische Schwingungen dargestellt, die unterschiedliche Amplituden und Phasengänge haben. Addiert man die drei Schwingungen, resultiert daraus der Kurvenverlauf rechts. Führt man diesen Kurvenverlauf einer FFT zu, berechnet diese dann genau die drei Anteile aus dem Bild links, inklusive der Frequenz der Schwingung.

FFT bei LockIn Anregung

Bei der LockIn Anregung wird eine spezielle Art der Fourier Analyse angewendet, und zwar die DFT (direct Fourier Transformation). Auch hier wird auf mathematische Details verzichtet, nur so viel zum Verständnis erwähnt, das bei der Auswertung das Messintervall die Grundfrequenz darstellt (also gleich $1/\text{Messzeit}$) und alle anderen Frequenzen höhere harmonische davon sind (also Grundfrequenz, $2 \times \text{Grundfrequenz}$, $3 \times \text{Grundfrequenz}$ usw.). Auch hier soll ein Beispiel dies verdeutlichen.

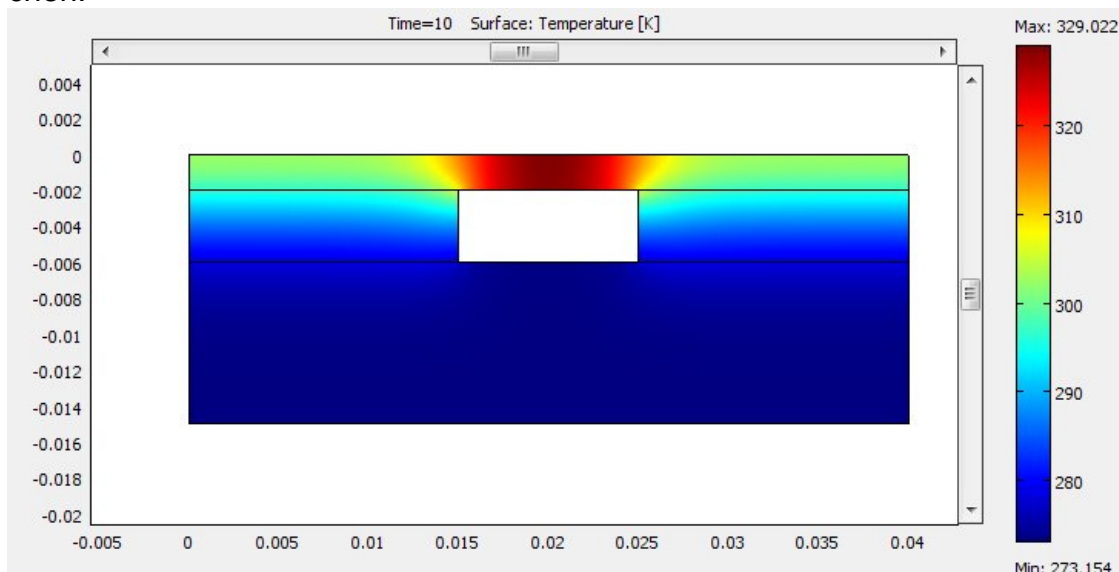


Bild 4: Simulationsmodell mit Fehler in 2mm Tiefe

Ähnlich wie im Simulationsmodell aus Bild 1, wird hier nun ein Fehler in einer Tiefe von 2mm simuliert. Bei einem lateral stark ausgeprägten Fehler entspricht das Ergebnis dem der dünnen Platte.

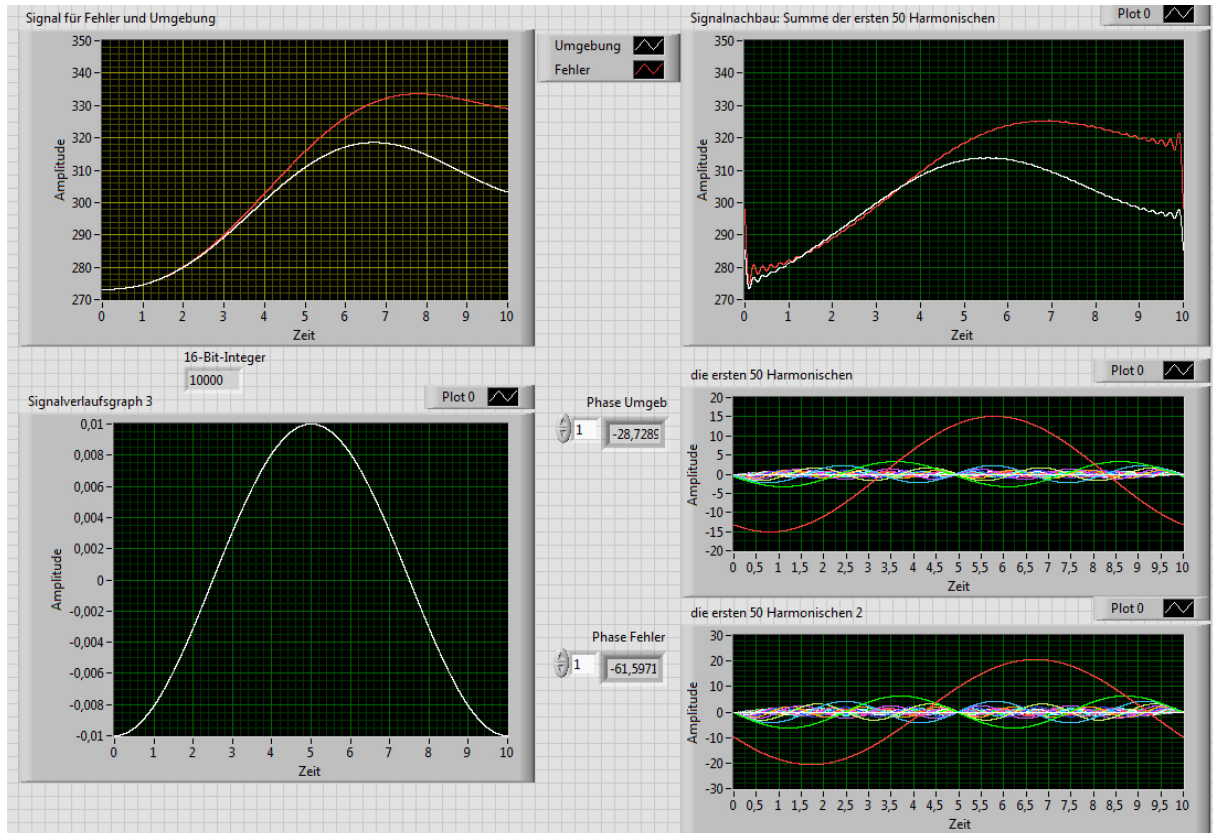


Bild 5: Analyse der LockIn Anregung mit 0,1 Hz

Die Anregung der Probe mit einem Halogen Licht erfolgt mit einer Frequenz von 0,1 Hz, das heißt die Meßdauer (Periodendauer) des Versuchs beträgt $1/f = 10$ Sekunden. Das Diagramm unten links zeigt die Ansteuerung der Halogenlampe. Die maximale Intensität der Lampe wird demzufolge bei 5 Sekunden erreicht.

Das Diagramm oben links zeigt die Temperaturverläufe oberhalb des Fehlers (rot) und neben dem Fehler (weiß) auf. Aufgrund der dünneren Stelle oberhalb des Fehlers ändert sich bei etwa 2,5 Sekunden der Kurvenverlauf. Die Wärme fließt nicht weiter ab und infolge dessen steigt die Temperatur auf der Oberfläche weiter an. Es ist noch zu bemerken, das – obwohl die Lampe abklingt nicht etwa auch die Temperatur der Oberfläche abklingt, da ja immer noch Wärme von der Lampe zugeführt wird. Vergleicht man nun die rote und die weiße Kurve miteinander fällt auf, das die Maxima der beiden Kurven zeitverschoben zueinander sind und insgesamt auch zeitverschoben zum Erregersignal der Lampe sind.

Die Berechnung der Phasenverschiebungen erfolgt nun über die angesprochene DFT. Es wird also nicht die Phasenverschiebung der absoluten Signale berechnet (Bild oben links), sondern die Phasenverschiebung der Grundharmonischen (Bilder unten rechts). Die Grundharmonische Schwingung hat die Frequenz 0,1 Hz für die Messperiode 10 Sekunden. Die DFT liefert nun eine Vielzahl von weiteren Oberschwingungen mit ihren Amplituden und Phasenverschiebungen (siehe auch hierzu

wieder Bild 3). Die Summation der ersten Grundschwingung und weiteren 50 harmonischen Unterschwingungen liefert das Diagramm oben rechts. Eine sehr gute Annäherung zum original Kurvenverlauf ist zu erkennen. Für die weitere Auswertung ist jedoch nur die Amplitude und insbesondere die Phasenlage der grundharmonischen Schwingung (rote Kurve im Diagramm unten rechts) von Interesse. Die Differenz zwischen der Phasenlage des Erregersignals (Halogenlampe) und den beiden Meßpixeln wird in den entsprechenden Ausgabefeldern (Bild 5) notiert.

Dieses Beispiel zeigt die Verhältnisse für eine spezielle Tiefenlage bei einer diskreten Anregungsfrequenz auf. Andere Tiefenlagen führen bei gleicher Frequenz zu anderen Phasenwerten. Genauso führen andere Anregungsfrequenzen bei gleicher Tiefenlage zu anderen Phasenwerten. Gemäß Formel 1 sind für definierte Tiefenlagen Anregungsfrequenzen zu berechnen, um Fehler meßtechnisch erfassen zu können.

Für das Beispiel in Bild in Bild 4 sind unterschiedliche Tiefenlagen mit unterschiedlichen Anregungsfrequenzen simuliert worden. Trägt man die berechneten Phasenlagen für alle Kombinationen auf, so erhält man folgendes Diagramm.

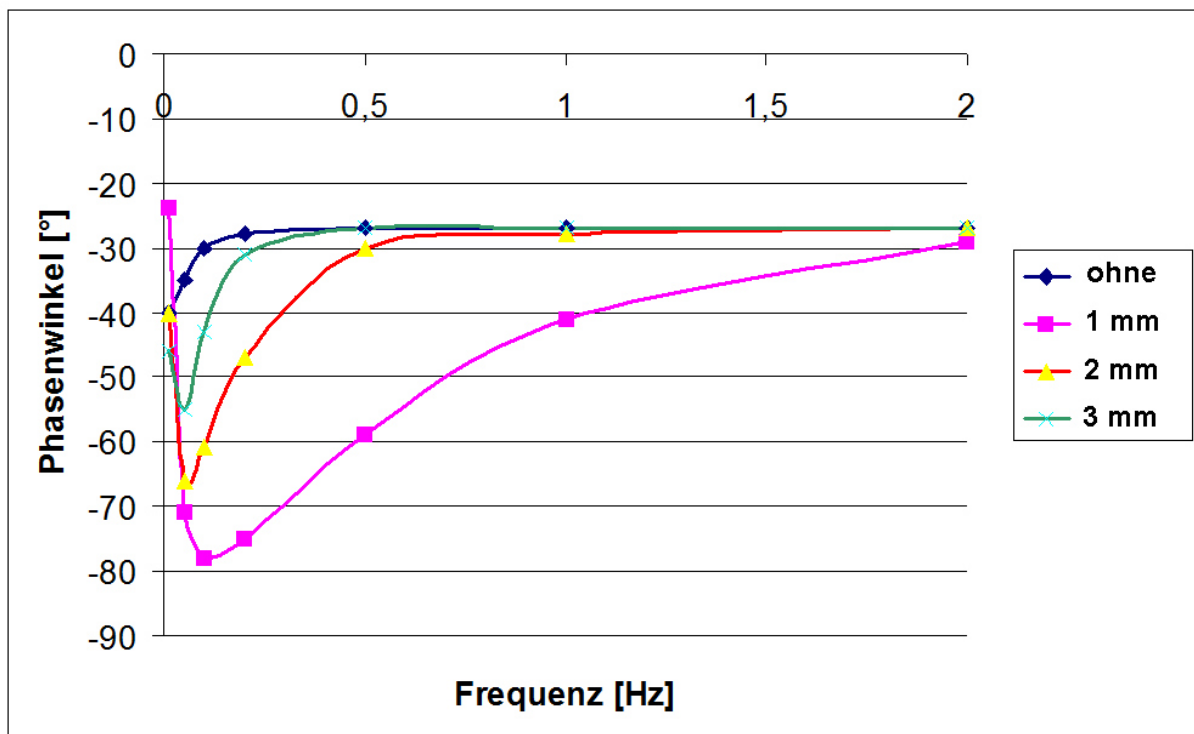


Bild 6: Phasenwinkel als Funktion der Anregungsfrequenz und der Fehlertiefe

Aus dem Diagramm lassen sich einige Erkenntnisse ziehen (Immer bezogen auf die Phasenlage des Erregersignals).

- Der Differenzphasenwinkel nimmt bei geringerer Fehlertiefe zu.
- Der Differenzphasenwinkel wird bei abnehmender Anregungsfrequenz größer
- Der Phasengang einer Fehlertiefe hat ein Maximum
- Um einen Fehler sichtbar zu machen, muss er einen großen Kontrast gegenüber der fehlerfreien Stelle besitzen.
- Bei kleinen Anregungsfrequenzen dreht sich der Kontrast um
- Der Phasenwert für kleinste Anregungsfrequenzen strebt im fehlerfreien Bereich gegen einen Grenzwert von -45°

FFT bei Impuls Anregung

Wird zur thermischen Anregung einer Oberfläche ein Wärmeimpuls benutzt, erwärmt sich die Oberfläche sehr schnell innerhalb der Impulsdauer und kühlt dann exponentiell ab. Der Kurvenverlauf verhält sich dabei mathematisch gemäß der Funktion $y = 1/x$. Da sich Änderungen bei dieser Darstellungsart zu späteren Meßzeiten schlecht darstellen lassen, wird der Kurvenverlauf entweder logarithmisch dargestellt oder invertiert ($1/y^2$ oder $1/y$ und \sqrt{x}). Bild 7 zeigt die Unterschiede auf.

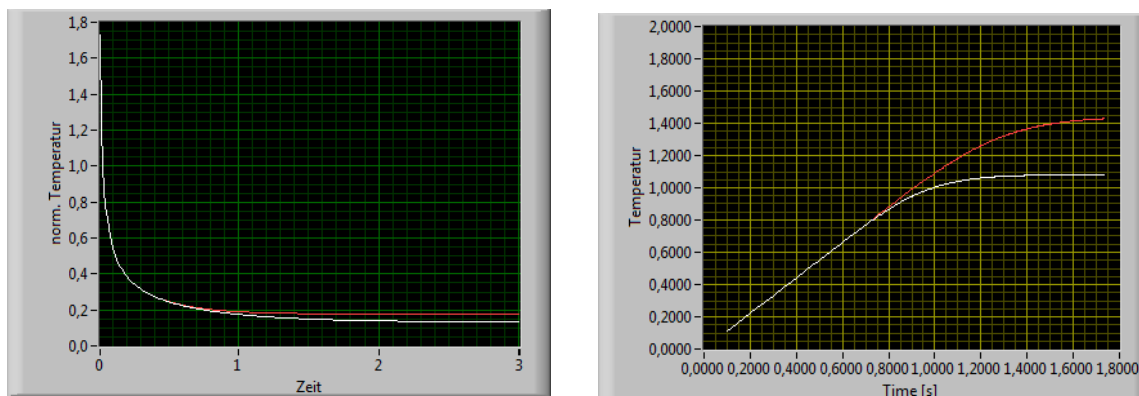


Bild 7: exponentiell abfallende Temperatur auf der Oberfläche nach einem Impuls und invertierte Darstellung zur besseren Analyse.

Bei dieser Darstellungsart ist die Analyse recht einfach. Solange eine Probe von der Wärmewelle / Wärmefront nicht durchdrungen ist, steigt die Gerade linear an. Ist die Probe durchdrungen, oder ist ein Fehler in bestimmter Tiefenlage vorhanden, dann knickt der Kurvenverlauf ab und verläuft parallel zur x – Achse. Wendet man den zuvor beschriebenen FFT Algorithmus auf dieses Problem an, so lässt sich auch dieser Kurvenverlauf nahezu perfekt durch eine Vielzahl von harmonischen Schwingungen angleichen. Dabei gibt es einen wesentlichen Unterschied zu beachten. Die Periodenlänge bei der Lock In Prüfung wurde durch die Meßzeit / Periodendauer fest vorgegeben. Bei der Phasenauswertung bei Impulsanregung muss die (Ersatz)Periodendauer zunächst definiert werden. Dazu empfiehlt sich natürlich Anfang und Ende der Messung. Daraus ergibt sich durch Kehrwertbildung die (Ersatz)Frequenz der Impulsmessung. Das heißt ähnlich wie bei der Lock In Auswertung wird bei der DFT nun die Grundharmonische und ihre Oberwellen dazu berechnet.

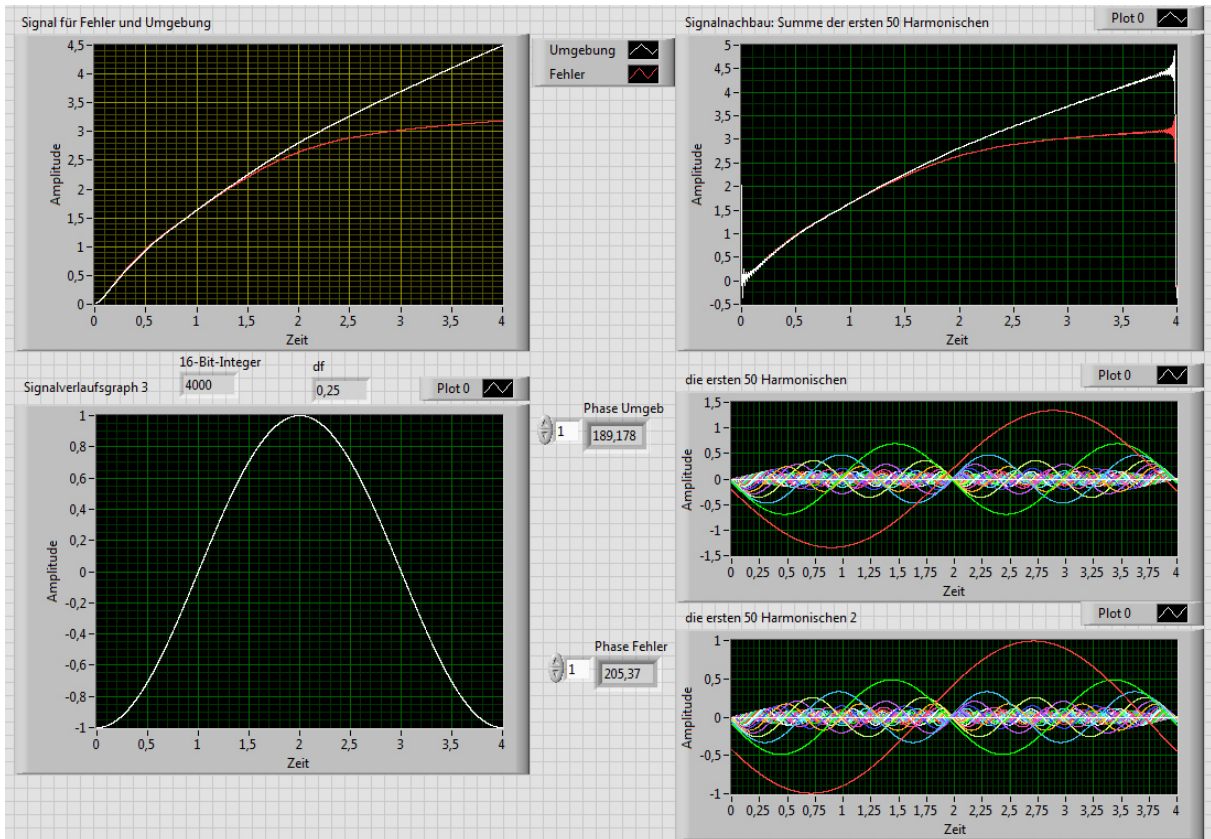


Bild 8: DFT bei der Impuls Anregung

Die Auswertung zeigt in den beiden Diagrammen rechts unten den Unterschied im Phasengang zwischen Fehler und Umgebung bei der Grundfrequenz auf. Ähnlich wie bei der Lock In Auswertung kann sich bei ungünstiger Wahl der Auswerteperiode, das Phasensignal invertieren. Prinzipiell kommen bei Lock In und Impuls Auswertung die gleichen Ergebnisse heraus. Der Vorteil der Impulsanregung ist, das im zeitlichen Signal nach dem Impuls alle Frequenzen enthalten sind, während bei der Lock In Prüfung nur mit einer definierten Anregungsfrequenz gearbeitet wird.

Grenzwerte bei der Fehlergröße

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf Fehler mit großen Ausbreitungen gegenüber ihrer Tiefenlage, so dass man von eindimensionaler Wärmeleitung sprechen kann. In diesem Fall trifft die Wärmewelle auf ein Hindernis und kann zunächst einmal nicht zur Seite schnell abfließen.

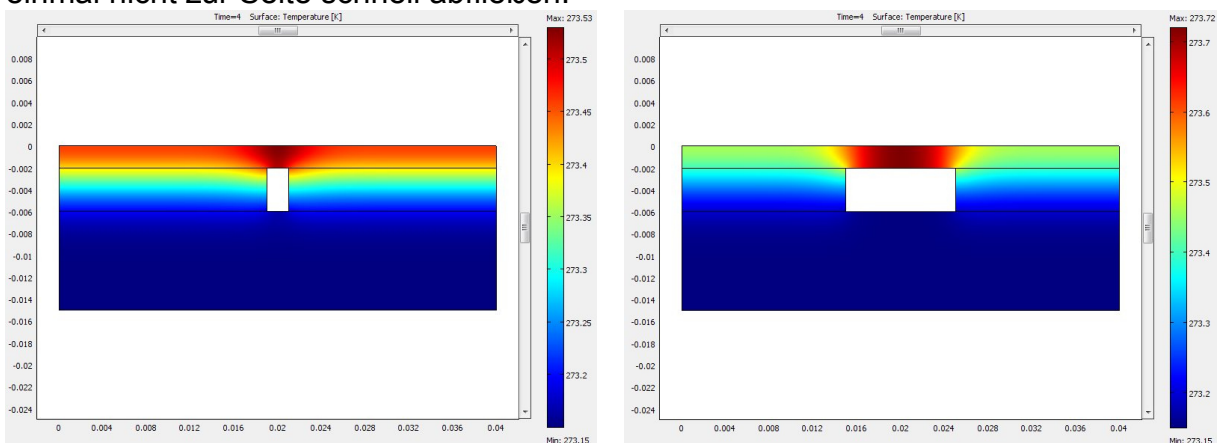


Bild 9: Kontrastschwächung bei kleiner Fehlerausbreitung

Wird ein Fehler bei gleicher Tiefenlage in seiner Ausbreitung schmaler, kann die Wärme leichter seitlich (lateral) abfließen. Das heißt der Kontrast ist für kürzere Zeit sichtbar und nimmt zudem ab.

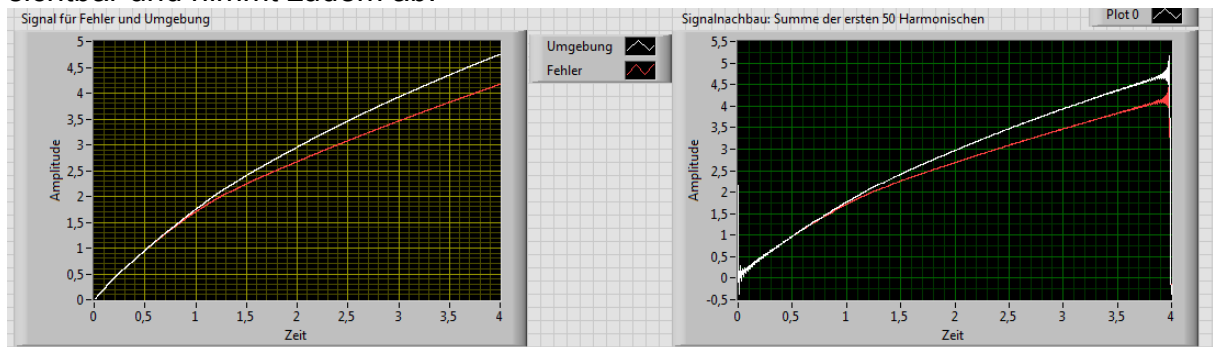


Bild 10: invertiertes zeitliches Verhalten eines lateral schwach ausgeprägten Fehlers

Vergleicht man Bild 10 und Bild 8 fällt auf, dass sich der Verlauf oberhalb des schmalen Fehlers immer mehr der Kurve der ungestörten Oberfläche nähert. Der Phasenunterschied wird sehr gering und je nach verwendeter Kamera geht der Unterschied im Grundrauschen der Kameraempfindlichkeit unter. Als Faustformel hat sich für homogene Werkstoffe ein Verhältnis von Tiefe zu Breite von 1 etabliert. Für Faserwerkstoffe wie CFK verschlechtert sich der Wert auf 5.

Anmerkungen zur Bildnormierung bei Impulsanregung

Die Phasenauswertung berücksichtigt nur zeitliche Aspekte bei der Änderung der Oberflächentemperatur nach einer Anregung. Dadurch spielen Intensitätsunterschiede (Amplitudenunterschiede) durch Lampenanordnungen und Emissionsunterschiede keine Rolle. Diese Effekte treten aber auf, wenn Einzelbilduntersuchungen durchgeführt werden und können zu folgenschweren Fehlinterpretationen führen. Das soll im folgenden an einem einfachen Beispiel demonstriert werden.

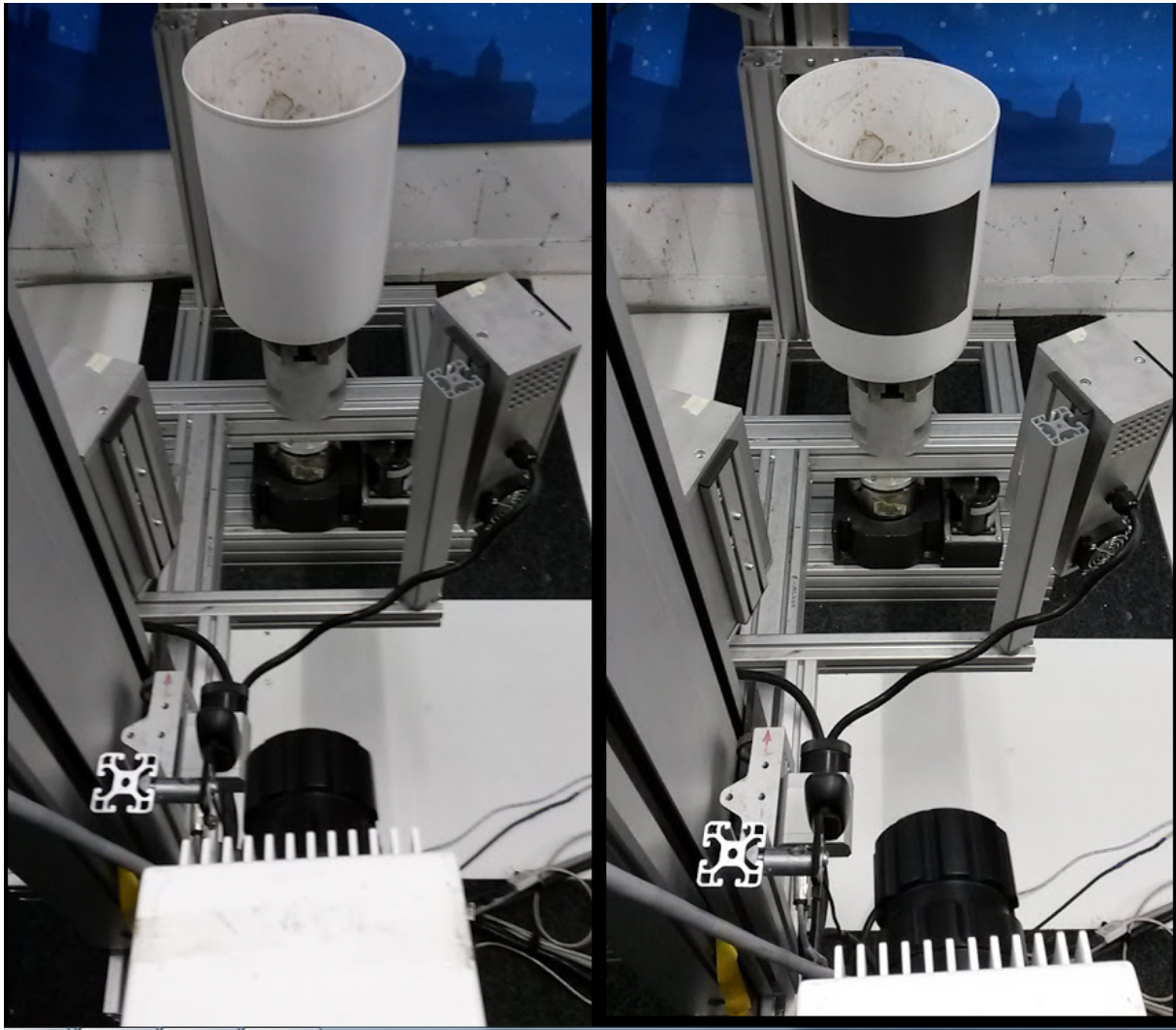


Bild 11: Eimertest zur Demonstration der Normierung

Folgendes Experiment wird durchgeführt. Ein Eimer aus Kunststoff mit leicht reflektierender Oberfläche wurde von innen mit einer Masse beklebt. Später wird die Oberfläche mit einer schwarzen Folie beklebt, um den Emissionskoeffizienten künstlich anzuheben.

Durch die Anordnung der Blitzlampen wird etwa in Eimermitte die meiste Energie absorbiert und ein Wärmefluss setzt unmittelbar ein. Durch die leicht reflektierende Oberfläche des Eimers sind die Blitzlampen teilweise im Messbild zu erkennen. Sobald die Wärme das Eimermaterial durchdrungen hat stößt sie auf den Fremdkörper an der Innenwand des Eimers. Hier wird nun weiterhin Wärme absorbiert, so dass die Oberflächentemperatur weiter absinkt. Im Bild stellen sich die Verhältnisse folgendermaßen dar:

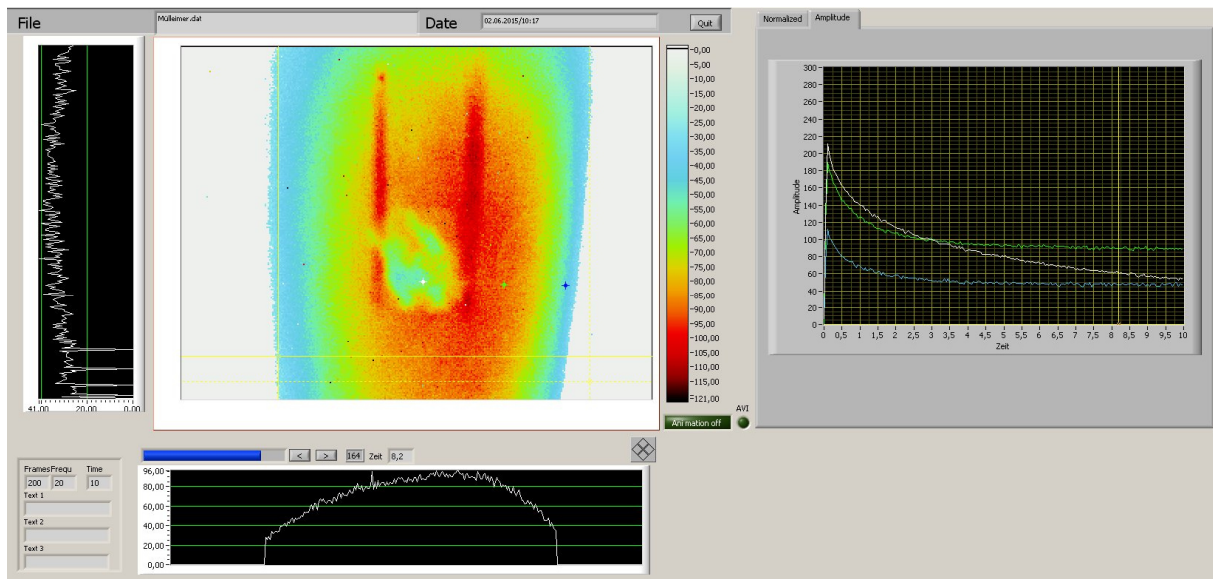


Bild 12: Für die drei Cursor Punkte im Meßbild sind entsprechend ihrer Farbe drei Kurvenverläufe im Diagramm rechts zu erkennen. Am Rand des Eimers wird wenig Energie absorbiert, daher ist die Anfangsintensität recht gering. Weiter zur Mitte hin steigt die Intensität. In Eimermitte ist sie am höchsten. Im mittleren Bereich des Bildes ist die angeklebte Masse zu erkennen. Im Diagramm wird die Masse identifiziert durch den abfallenden Temperaturwert, obwohl das Eimermaterial durchdrungen wurde (zu erkennen an den beiden anderen Cursorverläufen)

Außerdem im Bild (wir befinden uns zeitlich bei der gelben vertikalen Linie im Diagramm rechts) zu erkennen, sind die beiden sich reflektierenden Röhren. Die Schwierigkeit bei der Interpretation liegt darin, das kein farblicher Unterschied zwischen Randbereich des Eimers und angeklebter Masse (hellblau) besteht und bei Unkenntnis der Probengeometrie (angenommen der Eimer wurde von einer anderen Person geprüft) keine weiteren Rückschlüsse zulässt.

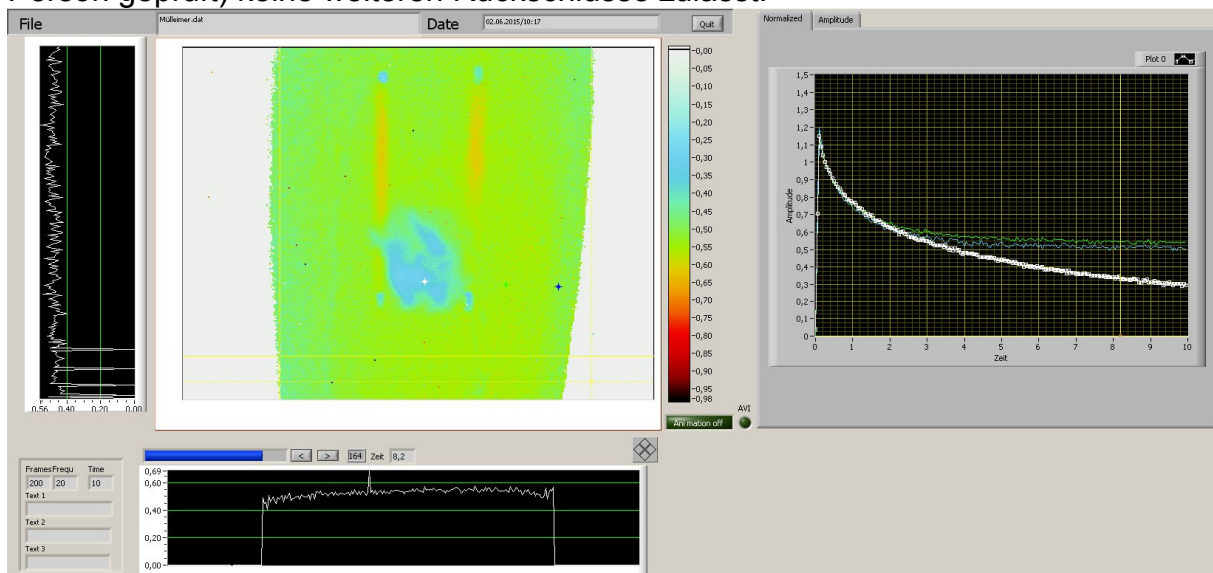


Bild 13: normiertes Bild, das heißt: alle Bilder aus der aufgenommenen Sequenz werden durch ein Bild kurz nach dem Impuls dividiert und auf den Intensitätswert 1 normiert.

Durch die Normierung werden die Kurven im Diagramm vergleichbar. Sie starten alle mit der gleichen Intensität, verlaufen zunächst gleich und im Falle einer Störung ver-

laufen sie unterschiedlich, so wir hier im Fall der eingeklebten Masse. Das normierte Bild ist nun sehr viel homogener und Vergleiche sind möglich. Die eingeklebte Masse fällt sofort auf und ist als Störung zu identifizieren. Einziger Nachteil immer noch in diesem Bild ist die Spiegelung der Röhren. Es wird nun eine schwarze Klebefolie aufgebracht um den Emissionsgrad zu steigern. Folgende Situation stellt sich ein:

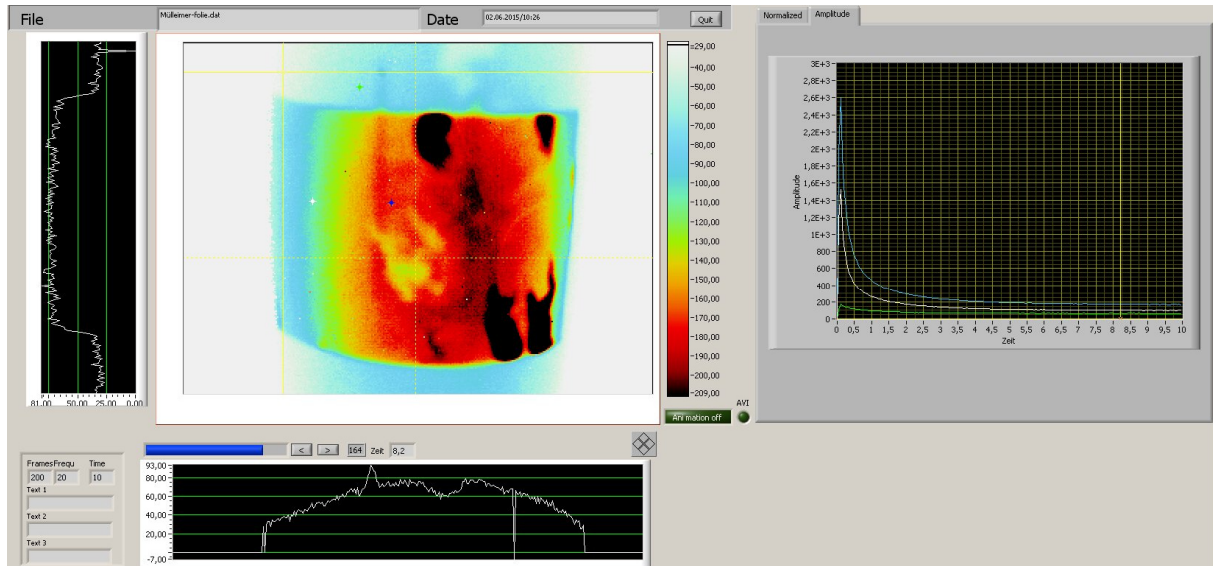


Bild 14: Insgesamt ist die Temperatur nun deutlich höher im Bereich der Klebefolie. Da es sich um ein Intensitätsbild handelt, ist hier wieder der Unterschied von Eimerseite zu Eimermitte deutlich zu erkennen. Außerdem sind nun auch noch deutlich wärmere Stellen zu erkennen, wo die Klebefolie offensichtlich keinen Kontakt zum Eimer hat, die Wärme dort also nicht abfließt. Wir normieren zunächst mit Bild 10 nach dem Blitz:

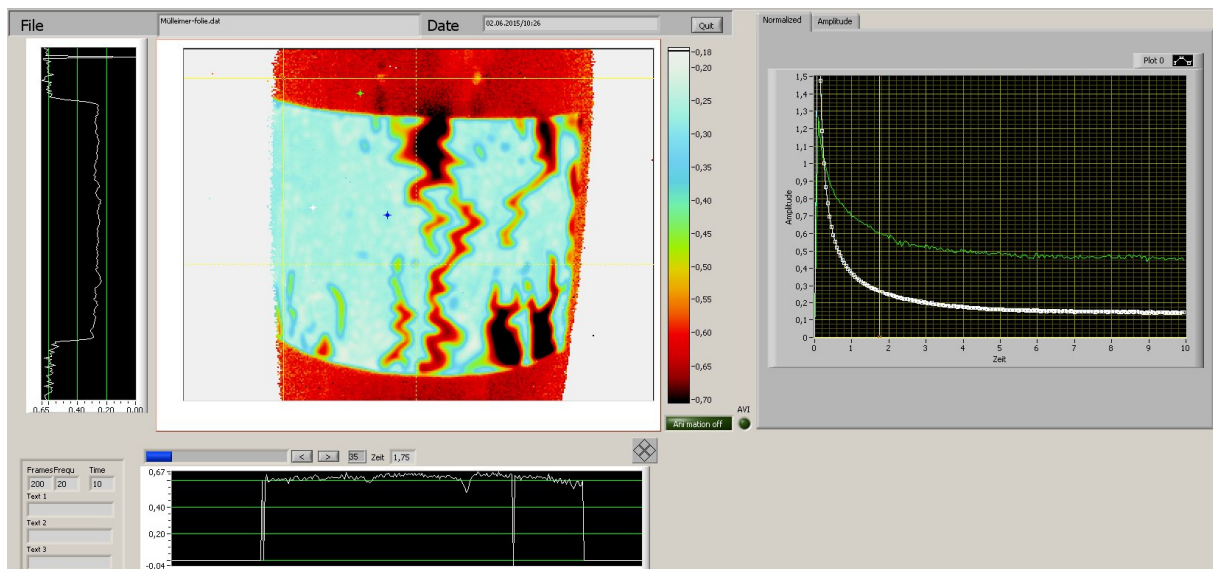


Bild 15: Homogenität stellt sich zwar insgesamt ein, aber es sind viele Bereiche zu erkennen die Klebemängel aufweisen, wo also die Folie keinen richtigen Kontakt zum Eimer hat.

Daraus wird deutlich, das es gefährlich ist, mit einem Bild zu normieren in dem bereits Fehler/Indikationen erhalten sind. Es ist streng darauf zu achten, das dies nicht der Fall ist, da sich ansonsten diese Fehler in jedem Bild darstellen. Normieren wir

also mit einem Bild, in dem noch keine Fehler zu sehen sind, wir uns also „in der Folie“ befinden, resultiert daraus folgendes Bild:

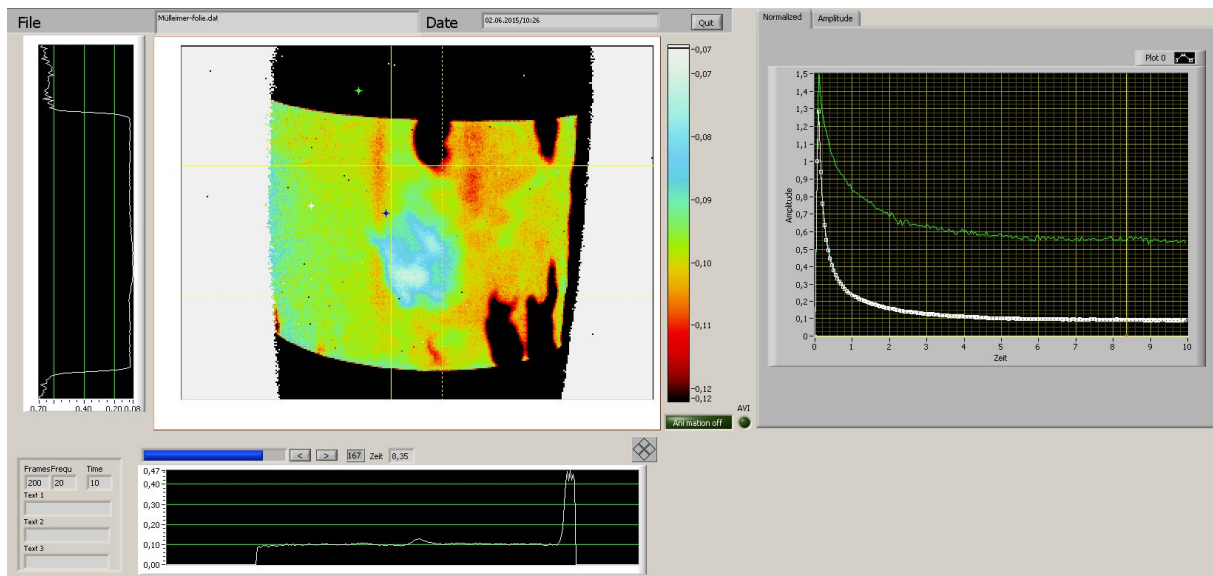


Bild 16: Normiert mit Bild 1 nach dem Blitz. Alle Flächen sind homogen. Die Klebmasse ist zu erkennen. Die Luftblasen im Kleber sind auch zu erkennen..

Fazit

Um einen Fehler sicher zu finden sind die unterschiedlichsten Auswertemethoden erlaubt. Ist die Geometrie der Probe einfach und die Ausleuchtung recht homogen, kann mit einem einfachen Differenzbild der Fehler kontrastreich dargestellt werden.

Ist die Probe nicht eben, sondern gekrümmt oder komplexer, muss auf jeden Fall das Differenzbild normiert werden. So werden Ausleuchtungsunterschiede und Emissionsgradunterschiede eliminiert.

Für kleinste Fehler die im Tiefen Breiten Verhältnis ungünstig sind und zudem auch noch unter komplexen Oberflächen zu finden sind, muss eine Phasenauswertung durchgeführt werden. Die Phasenauswertung greift nicht nur auf ein einziges Bild einer Sequenz zu, wie das Quotientenbild, sondern berechnet alle Bilder einer Sequenz. Führt dies nicht direkt zum Erfolg, muss die Auswerteperiode unter Umständen angepasst werden.

Literatur

1. Nordal P.-E.; Kanstad S.O.: Photothermal radiometry. In: Physica Scripta 20 (1979) S. 659-662
2. Busse G.: Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal. In: Appl. Phys. Lett. 35, 10 (1979) S. 759-760
3. Thomas R. L.; Pouch J. J.; Wong Y. H.; Favro L. D.; Kuo P. K.; Rosencwaig A.: Subsurface Flaw Detection in Metals by Photoacoustic Microscopy. In: J. Appl. Phys. 51 (1980), S. 1152-1156
4. Lehto A.; Jaarinnen J.; Tiusanen T.; Jokinen M.; Luukkala M.: Magnitude and Phase in Thermal Wave Imaging. In: Electr. Lett. 17 (1981), S. 364-365
5. Beaudoin J. L.; Merienne E.; Danjoux R.; Egee M.: Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry. In: Infrared Technology and Applications SPIE vol. 590 (1985) S. 287
6. Kuo P.K.; Feng Z.J.; Ahmed T.; Favro L.D.; Thomas R.L.; Hartikainen J.: Parallel thermal wave imaging using a vector lock-in video technique. In: Hess P. and Pelzl J. (Hrsg): Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Heidelberg: Springer-Verlag. 1987 S. 415-418
7. Busse G.; Wu D.; Karpen W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. In: J. Appl. Phys. 71 (1992) S. 3962-3965
8. Wu D.; Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung. Universität Stuttgart, Fakultät 13 Dissertation 1996
9. Wu D.; Busse G.: Zerstörungsfreie phasenempfindliche Modulationsthermographie, Prinzip und Anwendungen. In: Materialprüfung 36 10 (1994) S.393-399