

LED-angeregte Pulskompressions-Thermografie

Pierre PFEFFER¹, David HANNIBAL¹, Giovanni SCHOBER¹

¹ SKZ - KFE gGmbH, Würzburg

Kurzfassung. Die Thermografie ist eine in unterschiedlichsten Industriezweigen verbreitete Methode zur Produktprüfung und Qualitätssicherung. Die Erschließung neuer Anwendungsfelder wird derzeit besonders durch die eher geringe Tiefenreichweite und die in zunehmender Tiefe abnehmende Auflösung limitiert. Um diese Defizite zu verringern, wird die Anwendung von fortschrittlichen Methoden der Bauteilanregung und der Signalverarbeitung, insbesondere die der Pulskompression, als Lösung herangezogen. Die Methoden der Pulskompression nutzen modulierte Anregungssignale wie Chirps oder binäre Signale und erzeugen nach Korrelation der Messdaten mit dem Anregungssignal zeitlich aufgelöste Daten mit hohem Signal-zu-Rausch Verhältnis (SNR). In den hier vorgestellten Arbeiten wird die Anwendung der Pulskompression anhand verschiedener Beispiele demonstriert. Die Besonderheit bildet dabei die Verwendung eines speziell für die Thermografie entwickelten LED-Strahler-Systems, das eine energieeffiziente und vielseitige Art der Probekörperanregung ermöglicht.

Einführung

Von der Vielzahl der etablierten ZfP-Methoden ist die Thermografie für viele Anwendungszwecke besonders interessant. Durch das Untersuchen der ausgehenden Wärmestrahlung eines Objekts können schnell und gefahrlos Erkenntnisse über dessen innere Beschaffenheit gesammelt werden. Auf diesem Weg können Fehler in verschiedenen Tiefen im Material gefunden und Aussagen über deren Art und Größe gemacht werden. Die Verwendbarkeit der Thermografie für großflächige Messungen, das kontaktlose Messprinzip sowie günstige Systempreise fördern einen verbreiteten Einsatz. Für Untersuchungen mittels aktiver Thermografie sind derzeit zwei Ansätze besonders verbreitet: Die Lock-In Thermografie und die Puls-Thermografie.

Für die Lock-In Thermografie wird das zu testende Material mithilfe eines periodische modulierten Anregungssignals über einen längeren Zeitraum erwärmt. Dabei liegt die übertragene Energie in einer schmalbandigen Frequenzverteilung, was zu einem hohen SNR im erhaltenen Ergebnis führt. Jedoch führt diese kleine Frequenzbandbreite zu Informationen aus einem ebenfalls sehr begrenzten Tiefenbereich, sodass für ganzheitlichere Untersuchungen mehrere Messdurchläufe nötig sind.

Die Puls-Thermografie hingegen verwendet für die Erwärmung einen kurzen, hochenergetischen Impuls, der viele thermische Wellen in einem breiten Frequenzspektrum an der Bauteiloberfläche erzeugt. Dies kann beispielsweise mithilfe einer Blitzlampe erreicht werden. Die hohe Frequenzbandbreite erlaubt es, Fehlstellen in verschiedenen Tiefen im Bauteil gleichzeitig zu erfassen. Allerdings erzeugt dies auch einen großen Anteil an ungewollten Teilinformationen, was das SNR des erhaltenen Signals und damit die Qualität des resultierenden Bildes verschlechtert. Weiterhin benötigt die Puls-Thermografie für ein

gutes Ergebnis einen möglichst energiereichen Impuls, womit die erreichbare Messqualität durch die Leistungsstärke der verwendeten Wärmequelle und durch die thermische Stabilität der Probekörperoberfläche beschränkt wird.

Um die Schwächen dieser Messmethoden zu überwinden, wurden in den letzten Jahren verschieden neue Techniken vorgeschlagen, mit dem Ziel, die Vorteile beider Methoden zu vereinen. Zu diesen Ansätzen gehört unter anderem die Anwendung der Pulskompression zur Steigerung der Ergebnisqualität. Die Pulskompression wird bereits in der Radar-, Sonar- und Ultraschalltechnik angewendet, um eine effektive Rauschfilterung und eine erhöhte, zeitliche Auflösung zu erzielen. Hierbei wird zur Anregung ein breitbandiges, codiertes Signal erzeugt, welches beim mit den zeitabhängig gemessenen Thermografiedaten kreuzkorreliert wird, um eine möglichst genaue Annäherung der Impulsantwort zu erhalten und somit SNR, Tiefenreichweite und Genauigkeit der Tiefenbestimmung zu optimieren. [1, 2, 3]

1. Grundlagen der Pulskompression

Die Pulskompression ist eine Methode zur Signalverarbeitung in linearen, zeitinvarianten (LZI) Systemen. Ihr Hauptmerkmal ist, dass sie es ermöglicht, empfangene Signale auch bei starker Überlagerung mit Rauschkomponenten erkennen zu können. Bei der konventionellen Pulsthermografie wird das zu untersuchende Objekt durch einen kurzen Anregungsimpuls stark erwärmt. Da dieser Impuls für gewöhnlich sehr viel kürzer als die Abkühlzeit des Materials ist, kann er innerhalb des LZI Systems als ein unendlich kurzer Dirac-Delta-Stoß $\delta(t)$ angegeben werden. Die korrespondierende Impulsantwort $h(t)$ wird daraufhin durch Erfassung der zeitlichen Temperaturentwicklung pixelweise erhalten. Durch Analyse des Erwärmungs- und Abkühlrends von $h(t)$ über eine erwartete Zeitdauer T_h können nützliche Informationen über das Objekt gewonnen werden [1, 2, 4, 5]. Im Gegensatz zu diesem Verfahren wird für die Pulskompression ein längeres, codiertes Signal $s(t)$ zur thermischen Anregung eingesetzt. Weiterhin wird ein Optimalfilter $\Psi(t)$ genutzt, dessen Faltung mit $s(t)$ eine Annäherung an der Dirac-Delta-Stoß ergibt.

$$s(t) * \Psi(t) = \tilde{\delta}(t) \approx \delta(t) \quad (1)$$

Der große Vorteil der Pulskompression mit codierten Signalen ist, dass die zeitliche Dauer T_s und die Frequenzbandbreite B des Inputsignals unabhängig voneinander sind. Dieser Umstand erlaubt es, die Signaldauer zu erhöhen, ohne dabei die Bandbreite zu beeinflussen, um für ein besseres SNR zu sorgen [4]. Der erreichbare Gewinn zum SNR durch die Pulskompression verglichen mit der Pulsthermografie ist ungefähr das Zeit-Bandbreiten-Produkt $T_s \cdot B$ [1, 2, 5]. Ein Nachteil ist jedoch, dass durch die rechnerische Annäherung $\tilde{\delta}(t)$ ungewollte Störeinflüsse eingeführt werden. Dies resultiert aus der endlichen Dauer und Bandbreite von $s(t)$ und äußert sich in Seitenkeulen von $\tilde{\delta}(t)$ (vgl. auch Abbildung 4) [2]. Um die Auswirkungen dieser Seitenkeulen zu minimieren, müssen das Inputsignal und der verwendete Pulscompressionsalgorithmus optimiert werden. Es hat sich gezeigt, dass für das Erreichen eines möglichst hohen SNR-Wertes, die Definition des Optimalfilters als das zeitlich Inverse des Eingangssignals am besten geeignet ist [1].

$$\Psi(t) = s(-t) \quad (2)$$

Um die entstehenden Seitenkeulen noch weiter zu verringern, kann zur Optimierung stattdessen ein Wiener-Filter Ψ_w eingesetzt werden. Dieser ist im Frequenzbereich gegeben durch:

$$\Psi_w(f) = \frac{\Psi(f)}{|\Psi(f)|^2 + a + b \cdot |f|} = \frac{s^*(f)}{|s(f)|^2 + a + b \cdot |f|} \quad (3)$$

Die Parameter a und b stellen hierbei Regulatoren dar. Der Parameter a reguliert die Filterstärke über die gesamte Bandbreite, während b höhere Frequenzen unterdrückt [1, 2, 4, 5].

1.1 Geeignete Signalformen

Für die thermografische Pulskompression eignen sich als Signalform für die thermische Anregung unter anderem Chirps und binäre Codes, darunter Barker- und Golay-Codes:

1.1.1 Chirps

Ein Chirp bezeichnet ein codiertes, frequenzmoduliertes Signal, dessen momentane Frequenz sich mit Verlauf der Zeit stetig verändert. Für einen realen Chirp ist eine allgemeine Definition gegeben mit

$$s(t) = \cos(\phi(t)) \quad (4)$$

Hierbei wird durch $\phi(t)$ die momentane Phase des Signals als eine nichtlineare Funktion der Zeit beschrieben. Abhängig von der zeitlichen Entwicklung der Phase lassen sich Chirps in lineare und nichtlineare Chirps (wie z. B. logarithmische Chirps) eingruppiieren. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Amplituden- und Frequenzverlauf eines linearen Chirps.

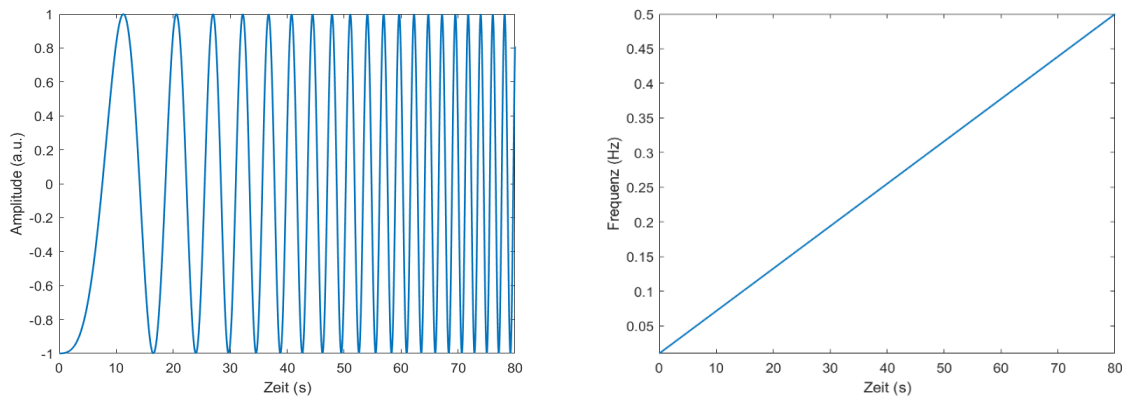


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf eines linearen Chirps (links) und dessen Frequenz (rechts) mit einer Frequenzspanne von 10 MHz bis 500 MHz und einer Signaldauer von 80 s.

1.1.2 Barker Codes

Barker Codes sind eine besondere Gruppe von endlichen Binärsequenzen, die aus einer Abfolge von zwei unterschiedlichen Elementen bestehen. Ihr hervorstechendes Merkmal ist, dass sie von allen Binärsequenzen die besten Autokorrelationseigenschaften besitzen, d. h., dass bei der Autokorrelation von Barker Codes nur sehr niedrige Seitenkeulen neben dem Hauptmaximum entstehen (vgl. Abbildung 2). Dadurch sind sie besonders gut für die Verwendung bei der Pulskompression geeignet, da bei deren Verwendung auch bei der Kreuzkorrelation zwischen Anregungs- und Messsignal die Seitenkeulen unterdrückt werden und somit das Maximum besonders gut ermittelbar ist. [1]

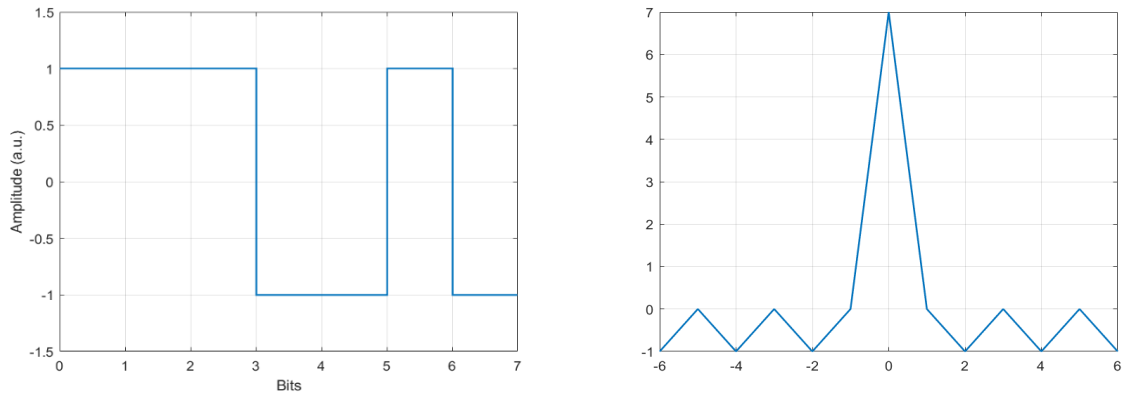


Abbildung 2: Eine Barker Sequenz der Länge $N = 7$ (links) und ihre Autokorrelation (rechts).

1.1.3 Komplementäre Golay Codes

Neben Barker Codes existieren noch weitere Formen von endlichen Binärsequenzen, die für die Nutzung in der Pulskompression geeignet sind. Eine besondere Variante stellen hierbei Paare komplementärer Golay Codes dar. Bei dieser Signalform handelt es sich um ein Paar zweier endlicher binärer Sequenzen gleicher Länge N , welches die Eigenschaft besitzt, dass die Seitenkeulen der jeweiligen Autokorrelationen entgegengesetzte Vorzeichen aufweisen. Eine Aufsummierung der Ergebnisse der Autokorrelationen führt somit zu einer Eliminierung der Seitenkeulen [6, 7, 8, 9]. Die folgenden Abbildungen 3 und 4 stellen dies anhand eines Code-Paares der Länge 8 exemplarisch dar:

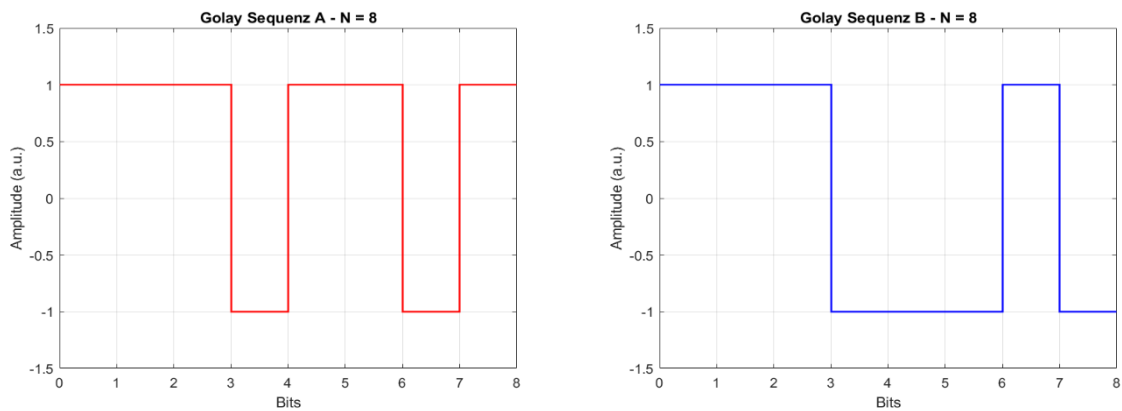


Abbildung 3: Ein Paar komplementärer Golay Codes der Länge $N = 8$.

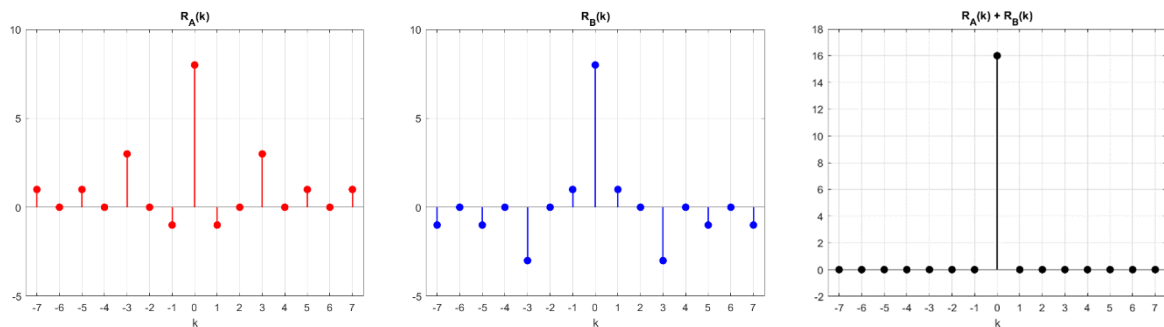


Abbildung 4: Die Autokorrelationen zweier komplementärer 8-Bit Golay Sequenzen A (links) und B (mittig), sowie die Summe der Autokorrelationen (rechts). Bei den einzelnen Autokorrelationen treten deutliche Seitenkeulen neben des Hauptmaximums auf. Nach der Aufsummierung löschen sich diese gegenseitig aus.

2. Verwendete Hardware und Methoden

Als Versuchsobjekt für die nachfolgend dargestellten Messungen wurde ein Probekörper aus kohlestofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) verwendet. Auf der Rückseite der quaderförmigen Platte mit den Maßen 253 mm x 112 mm x 6,4 mm wurden in regelmäßigen Abständen zylindrische Fräsungen eingefügt. Die Fräsungen besitzen dabei, spaltenweise angeordnet, unterschiedliche Durchmesser (4,5 mm bis 10,5 mm) und Tiefen (1 mm bis 6 mm). Die Messungen wurden von der ebenen Vorderseite aus in Reflektionsanordnung durchgeführt. Der Probekörper wurde dabei so positioniert, dass in den Ergebnisbildern die Defektdurchmesser von oben nach unten abnehmen und der Abstand von der Oberfläche von links nach rechts zunehmen. Abbildung 5 zeigt Fotos des Prüfkörpers von beiden Seiten.

Als Anregungsquellen wurden kommerziell verfügbare Halogenstrahler (viermal 500 W) sowie ein eigens dafür hergestelltes LED-Strahler-System der Fa. TRILITEC GmbH verwendet (siehe Abbildung 6). Letzteres setzt sich aus acht Modulen mit jeweils 56 einzelnen, blauen LEDs zusammen. Die elektrische Gesamtleistung des LED-Systems beträgt 448 W.

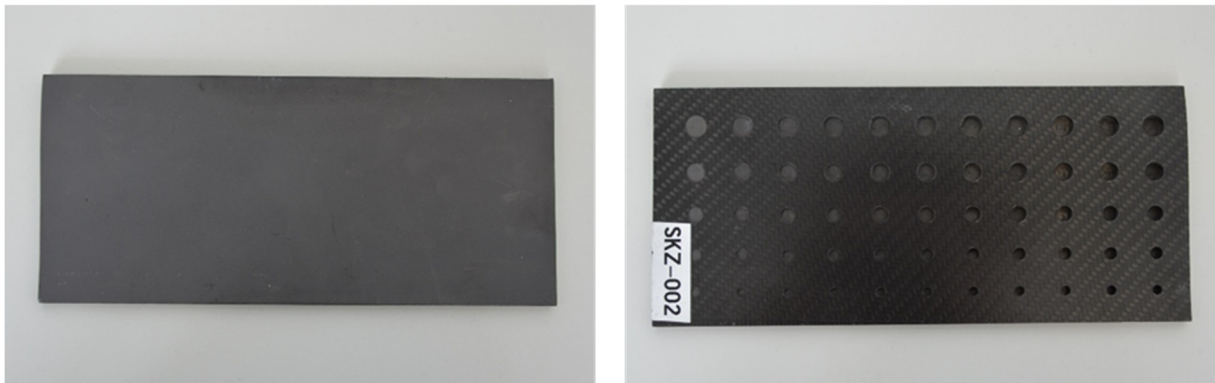


Abbildung 5: Bilder des gemessenen Probekörpers von der Vorder- (links) und Rückseite (rechts)

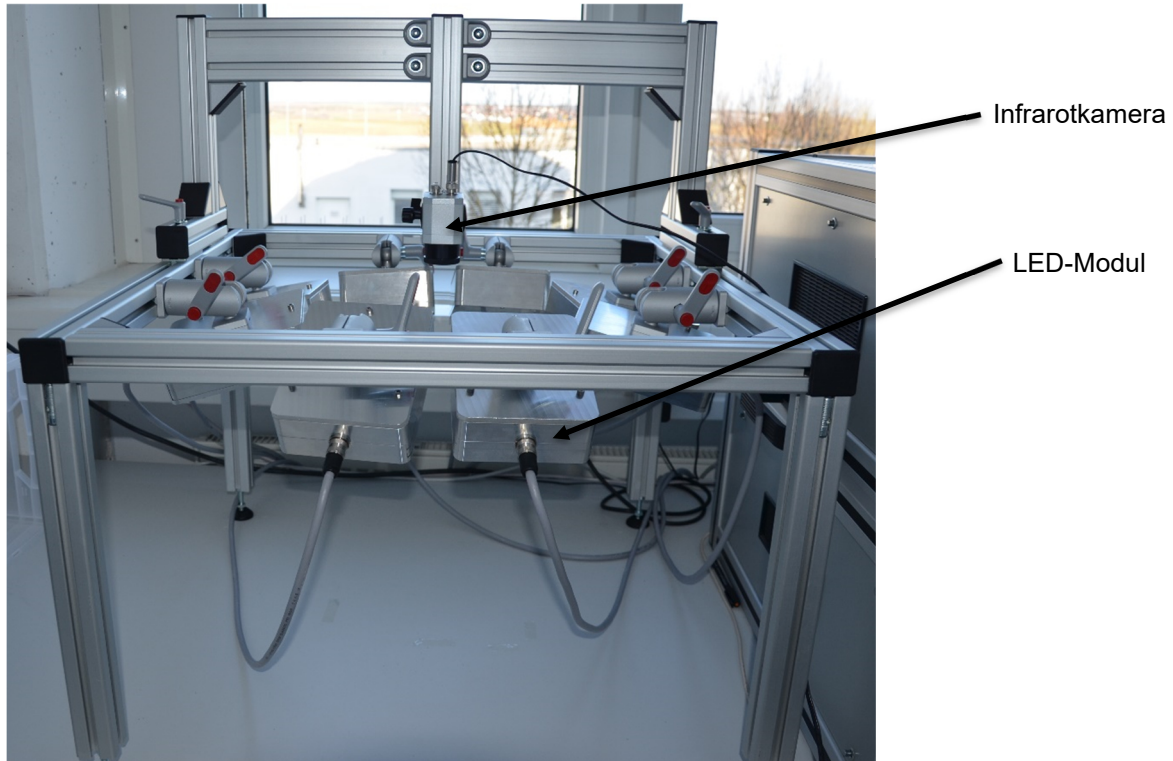


Abbildung 6: LED-Strahler-System. Die Probekörper werden mittig unter dem System platziert.

Nach Aufnahme der Messdaten wurden die Polynomfunktion $y_{SQ}(t)$ an diese angepasst und der daraus resultierende Kurvenverlauf von den ursprünglichen Messdaten subtrahiert [1, 2]:

$$y_{SQ}(t) = a_1 t + a_2 t^{0.9} + a_3 t^{0.8} \quad (5)$$

Beispielhafte Messdaten sind zusammen mit der angepassten Fitkurve $y_{SQ}(t)$ in Abbildung 7 links und nach Abzug von $y_{SQ}(t)$ rechts zu sehen.

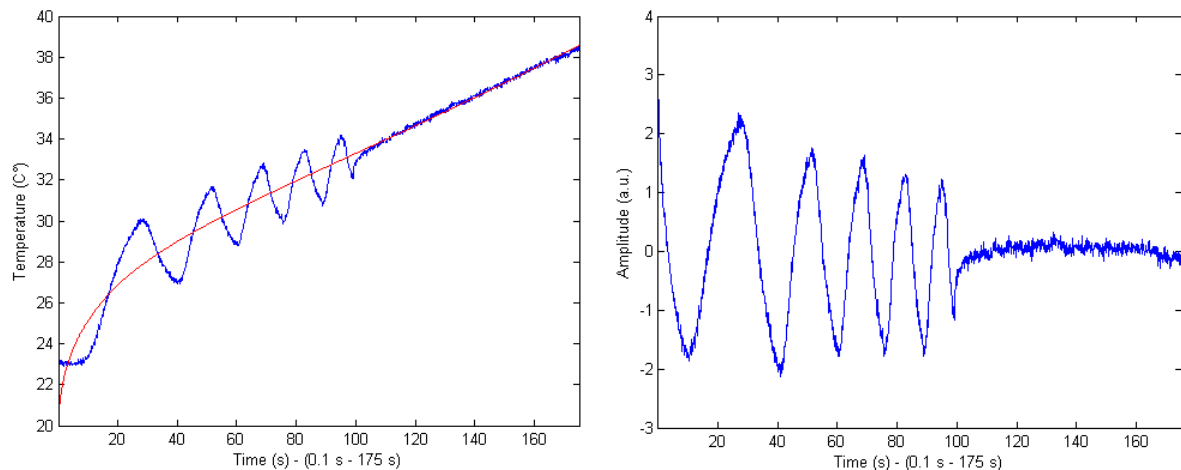


Abbildung 7: Links: Gemessener Temperaturverlauf Anregung (blau) und Fitfunktion y_{SQ} (rot). Rechts: Für die weitere Verwendung geeigneter Signalverlauf nach Subtraktion von y_{SQ} .

Mittels der angepassten Messdaten wurde anschließend ein Pulscompressionsalgorithmus einzeln für jeden Pixel des zu untersuchenden Probekörper-Bereichs angewendet. Dieser liefert für jeden Pixel die Impulsantwort $h(t)$. Für den dabei angewandten Wiener-Filter wurden die Parameter $a = b = 0,1$ verwendet.

Um die Qualität der erhaltenen Thermogramme quantitativ festlegen zu können, wird im Folgenden auf die Ermittlung des SNR zurückgegriffen. Das SNR wird dabei anhand der folgenden Formel berechnet:

$$SNR_{Def}(t) = \frac{h_{Def}(t) - \overline{h(t)}}{\sigma_h(t)} \quad (6)$$

Hierbei beschreibt $h_{Def}(t)$ den räumlichen Mittelwert der Impulsantworten der Pixel des Defekts, $\overline{h(t)}$ den Mittelwert der Impulsantworten eines ausgewählten Referenzbereichs und $\sigma_h(t)$ ihre Standardabweichung [1, 2, 5]. Das SNR gibt Aufschluss über die momentane Stärke des Kontrastes zwischen Defekt- und Referenzbereich. Als Referenzbereich kann zum Beispiel die gesamte untersuchte Fläche des Bauteils oder ein Ausschnitt mit geringem Einfluss möglicher Fehlstellen gewählt werden, für welchen während der Anregung ähnliche Gegebenheiten vorlagen wie für den untersuchten Defekt. Der Wert und zeitliche Verlauf des SNR können stark von der Größe und Position der gewählten Bereiche beeinflusst werden. Für alle nachfolgend dargestellte Ergebnisse wurde jeweils der Zeitpunkt, an dem das SNR lokal ein Maximum erreichte, für die Auswertung herangezogen.

3. Ergebnisse

Im Folgenden werden Messergebnisse, die unter der Verwendung von binären Codes bei Nutzung des LED-Strahler-Systems erlangt wurden, dargestellt:

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen zwei Ergebnisbilder derselben Messung bei Verwendung eines komplementären 8-Bit Golay-Codes. Die zeitliche Länge eines Bits betrug bei der Anregung 10 s. In Abbildung 8 ist für jeden Pixel die Impulsantwort zu der Zeit, bei der das SNR des markierten Defekts maximal ist, als Graustufenwert dargestellt. Abbildung 9 zeigt die Impulsantwort entsprechend für die Zeit des dort markierten Defekts. Die einzelnen SNR wurden für einen je 9 mal 9 Pixel großen Defektbereich (rot in den Abbildungen) bestimmt. Für den Referenzbereich (grün markiert) wurde ein Rechteckrahmen mit den Seitenlängen 33 mal 33 Pixel um den Defektbereich gewählt. Die Defekte sind nach dem Schema $n \times m$ durchnummeriert, wobei n für die Zeile und m die Spalte der Defektposition steht. Die Tiefenlagen der Defekte nehmen von links nach rechts zu, die Durchmesser von oben nach unten ab.

Es zeigt sich, dass bei optimierter Auswertung für den tiefer liegenden Defekt 2x5, wie zu erwarten, die Darstellung der rechten Defektspalten deutlich besser wird, die Amplituden der linken, flacher liegenden Defekte, jedoch abnehmen.

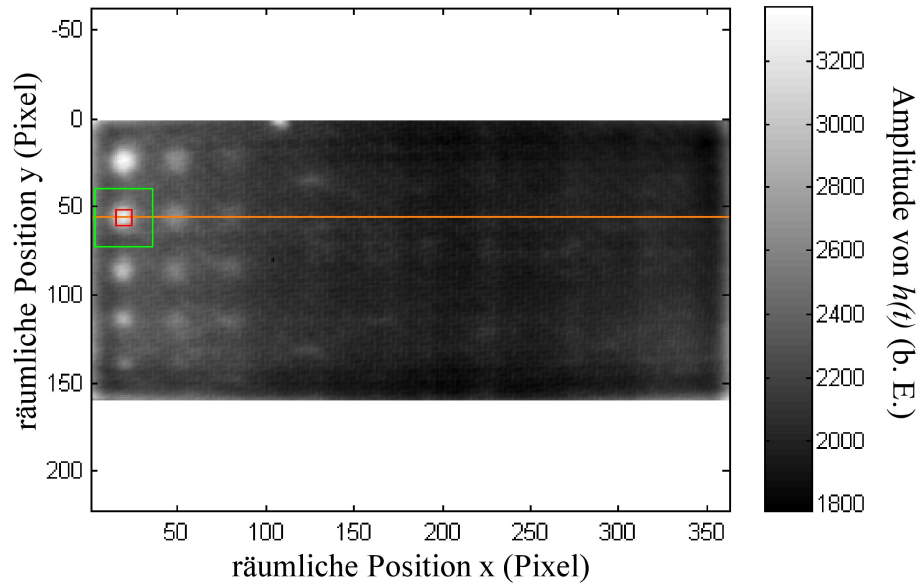


Abbildung 8: Grauwertdarstellung des pulskomprimierten Signals $h(t)$ mit dem markierten Defekt 2x1 als Berechnungsgrundlage für den verwendeten Zeitpunkt t . Verwendetes Anregungssignal: komplementärer Golay-Code (8-Bit). Anregungsdauer: 80 s. Anregungsquelle: LED-Strahler. Rotes Rechteck: Defektbereich. Grünes Rechteck: Referenzbereich. SNR = 4,55.

Abbildung 10 vergleicht das SNR für Defekte gleicher Größe aber unterschiedlicher Tiefenlagen für die Anregung mittels verschiedenen Barker- und Golay Codes. Es wird dabei eine leichte Überlegenheit der Golay-Codes sichtbar, die allerdings mit dem deutlichen Nachteil der aufwändigeren Messdurchführung (jeweils doppelte Messdatenaufnahme aufgrund der aus zwei Teilen bestehenden komplementären Codes) einhergeht.

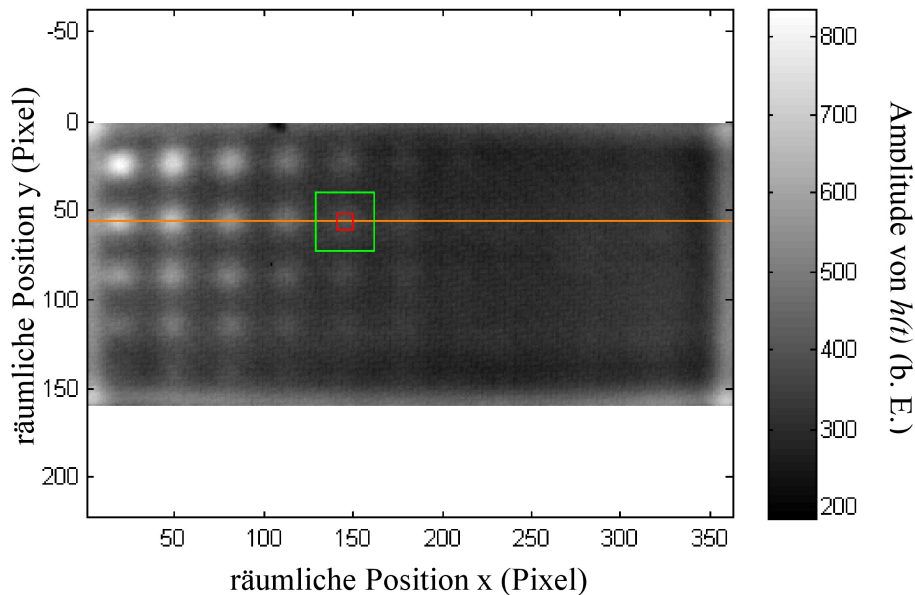


Abbildung 9: Grauwertdarstellung des pulskomprimierten Signals $h(t)$ mit markierten Defekt 2x5 als Berechnungsgrundlage für den verwendeten Zeitpunkt t . Verwendetes Anregungssignal: komplementärer Golay-Code (8-Bit). Anregungsdauer: 80 s. Rotes Rechteck: Defektbereich. Grünes Rechteck: Referenzbereich. SNR = 2,45.

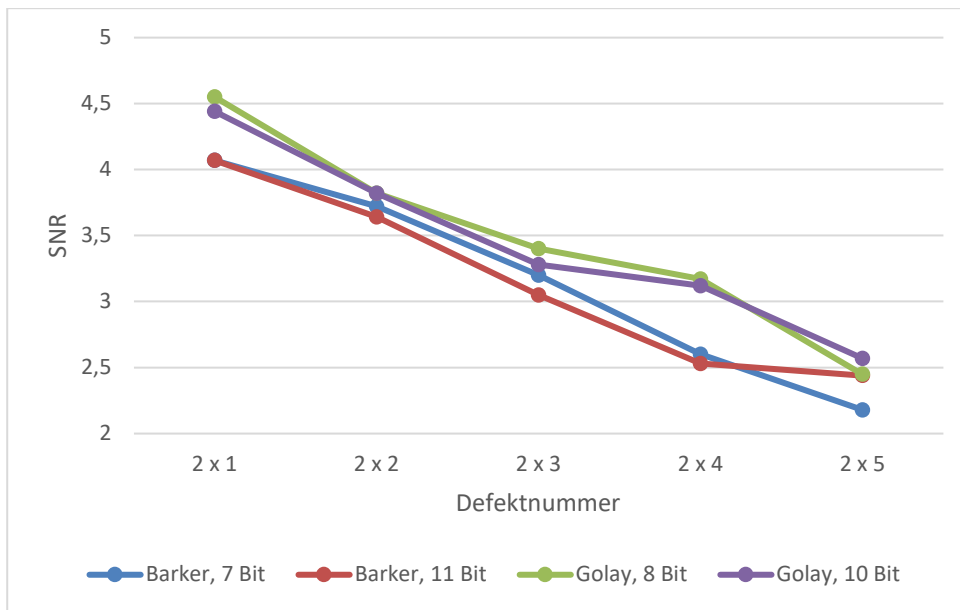


Abbildung 10: Berechnete SNR-Werte verschiedener Defekte bei Nutzung unterschiedlicher Anregungscodes. Anregungsquelle: LED-Strahler. Anregungsdauer: 10 s pro Bit.

Abbildung 11 vergleicht abschließend die Qualität der Defekterkennung bei der Nutzung von Halogen- und LED-Strahlern. Es wurden dabei sowohl lineare als auch logarithmische Chirps, jeweils mit einem Frequenzverlauf von 10 mHz bis 90 mHz, genutzt. Die absoluten SNR-Werte sind für Halogen- und LED-Strahler in derselben Größenordnung, teils nahezu identisch. Hervorzuheben ist hierbei, dass die elektrische Gesamtleistung des Halogenstrahler-Systems etwa viermal der Leistung des LED-Systems entspricht. Da jedoch die auf die Probe eingestrahlte Lichtleistung nicht bekannt ist, ist dieser Vergleich physikalisch wenig aussagekräftig. Aus technischer und praktischer Sicht kann es für einen Anwender jedoch von großem Vorteil sein, effiziente LED-Strahler mit geringer Leistungsaufnahme ohne Qualitätseinbußen zu nutzen.

Darüber hinaus hat die Form des Frequenzverlaufs eines Chirpsignals Auswirkungen auf die erreichbare Qualität des SNR. Während ein linearer Chirp für eine bessere Erkennbarkeit von oberflächennahen Defekten sorgt, kann das SNR für Fehler, welche sich tiefer im untersuchten Objekt befinden, durch Anwendung eines logarithmischen (aber in den Grenzwerten identischen) Frequenzverlaufs verbessert werden. Diese Entwicklung lässt sich darauf zurückführen, dass die momentane Frequenz eines logarithmischen Chirps sich länger im unteren Bereich des festgelegten Frequenzspektrums befindet als bei einem äquivalenten linearen Chirp. Somit wird ein größerer Anteil der anregenden Energie auf niedrigeren Frequenzen gesendet, die tiefer in das Material eindringen. Es sei weiterhin darauf verwiesen, dass in den präsentierten Messergebnissen das SNR für tiefe Defekte bei den LED-Strahlern im Vergleich zu den Ergebnissen der Halogenstrahler etwas reduziert ist. [8]

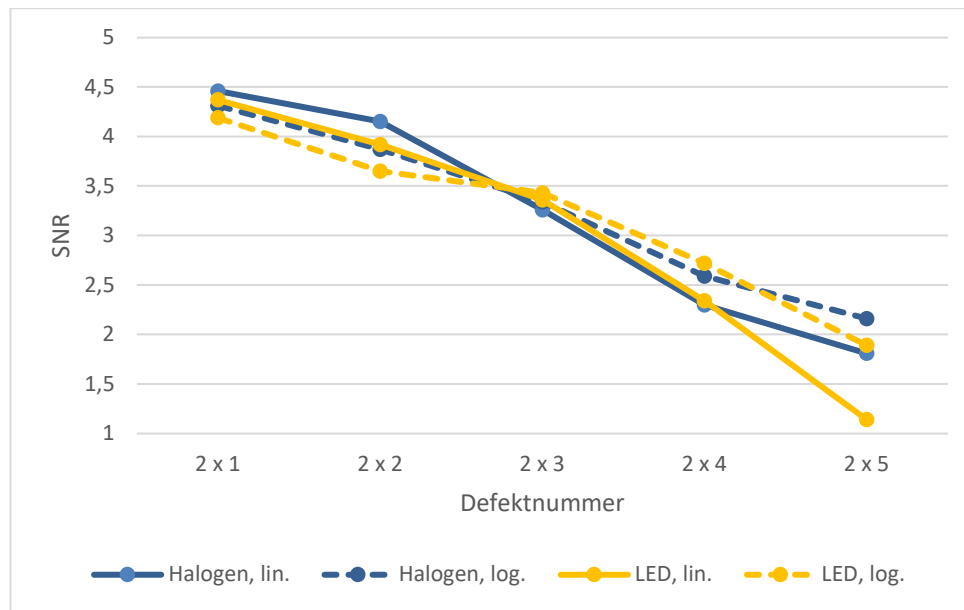


Abbildung 11: Vergleich der maximalen SNR Werte verschiedener Defekte bei Anregung durch lineare und logarithmische Chirps sowohl mit Halogen- als auch LED-Strahlern.

4. Fazit

Abschließend kann festgestellt werden, dass sowohl die Nutzung der Pulskompression als auch die Verwendung von LED-Systemen als zukunftstaugliche Techniken für die Thermografie angesehen werden können. Sowohl Chirps als auch binäre Codes, wie Barker- oder Golay-Codes, können dabei erfolgreich verwendet werden. Die Qualität der jeweils damit erzielten Ergebnisse liegt bei den vorgestellten Resultaten in einem vergleichbaren Rahmen. Zukünftige Untersuchungen können sich daher unter anderem darauf fokussieren, Vorzüge und Nachteile der unterschiedlichen Signalformen für konkrete Anwendungsfälle zu analysieren.

Referenzen

- [1] G. Silipigni, P. Burrascano, D. A. Hutchins, S. Laureti, R. Petrucci, L. Senni, L. Torre und M. Ricci, „Optimization of the pulse-compression technique applied to the infrared thermography nondestructive evaluation,“ *NDT and E International*, Bd. 87, pp. 100-110, April 2017.
- [2] S. Laureti, G. Silipigni, L. Senni, R. Tomasello, P. Burrascano und M. Ricci, „Comparative study between linear and non-linear frequency-modulated pulse-compression thermography,“ *Applied Optics*, Bd. 57, Nr. 18, pp. D32-D39, 20 Juni 2018.
- [3] P. Pfeffer, C. Kolb, D. Hoffmann und G. Schober, „Pulskompression mit luftgekoppeltem Ultraschall,“ *ZfP Heute*, 2020.
- [4] H. Malekmohammadi, S. Laureti, L. Senni, P. Burrascano und M. Ricci, „Comparison of optimization strategies for the improvement of depth detection capability of Pulse Compression Thermography,“ in *14th Quantative InfraRed Thermography Conference*, Berlin, Deutschland, 2018.
- [5] S. Laureti, S. Sfarra, H. Malekmohammadi, P. Burrascano, D. A. Hutchins, L. Senni, G. Silipigni, X. P. V. Maldague und M. Ricci, „The use of pulse-compression thermography for detecting defects in paintings,“ *NDT and E International*, Bd. 98, pp. 147-154, September 2018.

- [6] R. Mulaveesala, V. Arora und A. Rani, „Coded thermal wave imaging technique for infrared non-destructive testing and evaluation,“ *Nondestructive Testing and Evaluation*, Bd. 34, Nr. 3, pp. 243-253, 27 März 2019.
- [7] P. B. Borwein und R. A. Ferguson, „A complete description of Golay pairs for length up to 100,“ *Mathematics of Computation*, Bd. 73, Nr. 246, pp. 967-985, 1 Juli 2003.
- [8] M. Garcia-Rodriguez, Y. Yañez, M. J. Garcia-Hernandez, J. Salazar, A. Turo und J. A. Chavez, „Application of Golay codes to improve the dynamic range in ultrasonic Lamb waves air-coupled systems,“ *NDT and E International*, Bd. 43, Nr. 8, pp. 677-687, November 2010.
- [9] D. Hutchins, P. Burrascano, L. David, L. Stefano und M. Ricci, „Coded waveforms for optimised air-coupled ultrasonic nondestructive evaluation,“ *Ultrasonics*, Bd. 54, Nr. 7, pp. 1745-1759, September 2014.