

Zerstörungsfreie Prüfung durch aktive Thermografie im kontinuierlichen Bauteildurchlauf

Christian THIEMANN, Michael F. ZÄH,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
(*iwb*), Technische Universität München

Kurzfassung. Die thermografische Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf bietet die Möglichkeit, Bauteile mit länglicher Geometrie zerstörungsfrei zu prüfen sowie kontinuierliche Fertigungsprozesse fortlaufend zu überwachen. Die Vorteile gegenüber stationären Prüfaufbauten liegen in der verringerten Prüfzeit und der einfachen Automatisierbarkeit des Verfahrens. Für eine optimale Darstellung aller fertigungsrelevanten Fehlstellen mit größtmöglichem Fehlerkontrast müssen dabei zahlreiche Parameter des Messsystems auf die Materialeigenschaften und den Aufbau des Prüfkörpers sowie auf die Randbedingungen des Produktionsumfelds abgestimmt werden. Insbesondere für Bauteile mit Fehlstellen in unterschiedlichen Tiefenlagen muss für den optimalen Beobachtungszeitpunkt in der Abkühlungsphase stets ein Kompromiss zwischen hoher Prüfgeschwindigkeit und hohem Fehlerkontrast gefunden werden. Im Rahmen dieses Beitrags wird eine Methode präsentiert, mit welcher die optimalen Parameter für die Prüfung im Durchlauf aus einfachen stationären Voruntersuchungen an Probekörpern abgeleitet werden können. Hierdurch wird der experimentelle Aufwand für die Konfiguration der Durchlaufprüfung deutlich reduziert.

Einführung

Im Wettbewerb um Marktanteile mit Niedriglohnländern können hiesige Unternehmen selten durch den Preis eines Produkts als vielmehr durch hohe Qualitätsstandards und hohe Liefertreue bestehen. Da eine absolute Fehlerfreiheit von Produktionsprozessen in der Realität jedoch selten erreicht werden kann, ist oftmals eine 100%-Kontrolle der gefertigten Produkte, beispielsweise bei hoher Sicherheitsrelevanz oder vor einem Prozessschritt mit hoher Wertschöpfung, erforderlich. Als zerstörungsfreies Prüfverfahren für die Detektion verborgener Defekte eignet sich in vielen Anwendungsbereichen die aktive Thermografie. Der automatisierte Einsatz dieses Prüfverfahrens verringert personelle Prüfkosten, erlaubt konstante Prüfbedingungen und minimiert Prüfzykluszeiten, wodurch eine zuverlässige 100%-Prüfung verschiedenster Produktionsschritte im Fertigungstakt ermöglicht wird [1] [2]. Dabei eignet sich für Bauteile mit länglicher Geometrie sowie für kontinuierlich arbeitende Fertigungsprozesse insbesondere die thermografische Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf [3] [4]. Für den Einsatz als automatisiertes Prüfverfahren in industrieller Umgebung sind hierbei zum einen geringe Prüfzeiten und zum anderen eine zuverlässige Detektion aller qualitätsrelevanten Fehlstellen eine essentielle Voraussetzung.

1. Aktive Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren

Bei der so genannten aktiven Thermografie wird im Bauteil zunächst ein Wärmefluss ange-regt. Die durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten im Prüfkörper entstehenden Tempe-raturunterschiede an der Bauteiloberfläche werden mit Hilfe einer Infrarotkamera berüh-rungslos erfasst und visualisiert. Als berührungslose Quellen für die Wärmewellenanregung werden meist optische Strahler im sichtbaren (Halogenstrahler, Fotoblitze, Laser) oder infra-roten Wellenlängenbereich eingesetzt [5] [6] [7]. Metallische Bauteile und Komponenten können zudem durch induktiv angeregte Wirbelströme berührungslos erwärmt werden [8]. Des Weiteren kann der Wärmefluss auch durch mechanische Belastungen (Ultraschall) erzeugt werden [9], wobei diese Art der Anregung für die Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf weniger geeignet ist, da eine stationäre Ultraschalleinkopplung an bewegten Ob-jekten kaum realisierbar ist. Je nach Position von Anregungsquelle und Infrarotkamera rela-tiv zur Oberfläche des Prüfobjekts wird zwischen Reflexions- (gleichseitige Anordnung) und Transmissionsanordnung (gegenüberliegende Anordnung) unterschieden [6]. Die Wahl einer geeigneten Anordnung erfolgt entsprechend der Bauteilzugänglichkeit und der Tie-fenlage der relevanten Fehlstellen.

Zur Auswertung der aufgenommenen Wärmebildsequenzen hinsichtlich möglicher Fehlstellen kommen im Wesentlichen drei alternative Methoden in Betracht. Die einfachste Möglichkeit ist die Abkühlungsthermografie [7] [10], bei welcher die Bilder der stärksten Fehlerkontraste ermittelt und Fehlstellen durch einen Vergleich mit intakten Bauteil- oder Referenzbereichen identifiziert werden. Alternativ hierzu kann auch der Verlauf der Ober-flächentemperatur über mehrere Bilder im Beobachtungszeitraum beispielsweise mittels zeitlicher Ableitungen oder der Fast-Fourier-Transformation ausgewertet werden [7] [10]. Die beiden letztgenannten Verfahren weisen gegenüber der einfachen Kontrastauswertung eine deutlich geringere Empfindlichkeit gegenüber Störgrößen wie beispielsweise Reflexi-onen oder lokalen Emissivitätsunterschieden auf und erzielen daher im Allgemeinen einen höheren Fehlerkontrast.

2. Thermografische Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf

2.1 Prüfaufbau und Prüfparameter

Für die zerstörungsfreie Prüfung länglicher Bauteilgeometrien oder kontinuierlicher Ferti-gungsprozesse bietet sich die Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf an, da hierbei durch Eliminierung von Positionierungszeiten für die Messeinrichtung sowie durch räumliche Verlagerung der Fehlerkontrastmessung deutlich kürzere Prüfzeiten erreicht werden kön-nen. Abbildung 1 (links) zeigt einen thermografischen Aufbau in Reflexionsanordnung für die Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf. Das zu prüfende Objekt wird hierbei mit der Geschwindigkeit v entlang einer Anregungsquelle mit der Intensität I_{Anr} und der wirksamen Anregungsbreite a bewegt. Dabei erfolgt eine fortlaufende pulsformige Erwärmung infini-tesimaler vertikaler Bauteilbereiche.

Abbildung 1 (rechts) zeigt das typische zeitliche Temperaturverhalten fehlerhafter Bauteilbereiche. Sind in dem Bauteil Fehlstellen enthalten, so beginnt sich nach einer Zeit t_{Start} ein Fehlerkontrast auszubilden, der ein Maximum zum Zeitpunkt $t_{\Delta T_{max}}$ erreicht und bis zum Zeitpunkt t_{Ende} wieder abklingt. Je nach Art und Tiefenlage der Fehlstelle treten unter-schiedliche charakteristische Zeitpunkte nach einer pulsformigen Anregung auf.

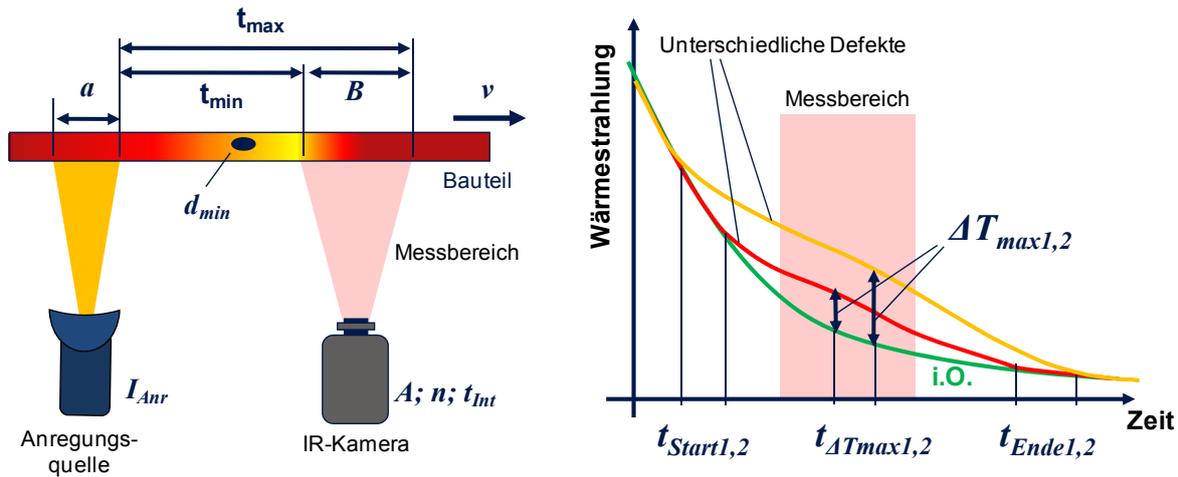


Abbildung 1. Parameter der kontinuierlichen Durchlaufprüfung (links); zeitliches Temperaturverhalten von Fehlstellen (rechts)

Da die kleinste qualitätsrelevante Fehlstelle d_{min} eine räumliche Mindestauflösung der Oberflächentemperaturmessung vorgibt, kann bei vorgegebener Prüfgeschwindigkeit nur ein zeitlicher Ausschnitt (hellrot markierter Bereich zwischen t_{min} und t_{max}) aus der Abkühlungssequenz erfasst werden. Um dennoch eine größtmögliche Entdeckungswahrscheinlichkeit potenzieller Fehlstellen zu gewährleisten, wird die Infrarotkamera daher hinter der Anregungsquelle derart positioniert, dass der maximale Fehlerkontrast innerhalb des Messbereichs der Breite B auftritt. Der notwendige räumliche Abstand zwischen Anregungsquelle und Infrarotkamera kann dabei aus der Zeit $t_{\Delta T_{max}}$ und der Durchlaufgeschwindigkeit v des Prüfkörpers ermittelt werden. Weitere zu berücksichtigende Prüfparameter sind die Kameraauflösung A , welche die Größe des Messbereichs definiert, sowie die Bildaufnahme­frequenz n , die mit der Integrationszeit t_{Int} der Kamera korreliert. Eine geringe Integrationszeit ist insbesondere bei hohen Prüfgeschwindigkeiten notwendig, um konturscharfe Abbildungen zu generieren.

2.2 Anwendbare Auswertungskonzepte

Bei der Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf muss die zu bewertende thermische Abkühlungssequenz zunächst aus den Rohdaten der Infrarotkamera erzeugt werden, da das Bauteil während der Aufnahmezeit nicht stationär und die Bildinformation somit bewegt ist. Abbildung 2 zeigt die Funktionsweise eines Algorithmus zur Vorverarbeitung der thermografischen Rohdaten, die einem mehrfachen Linien-Scan analog ist. Jede Detektor­spalte der Infrarotkamera repräsentiert aufgrund ihres räumlichen Abstands von der Anregungsquelle einen definierten Auswertungszeitpunkt nach dem thermischen Anregungspuls (Abbildung 2.1). Aus der während des Bauteildurchlaufs detektierten Kamerabildsequenz (Abbildung 2.2) können somit durch die Extraktion und Aneinanderreihung der jeweils gleichen Spalten eines jeden Sequenzbildes (Abbildung 2.3) Abkühlungssequenzen für das gesamte Bauteil generiert werden (Abbildung 2.4). Die dabei generierten Einzelbilder visualisieren die gesamte Bauteiloberfläche und sind somit großformatiger als der eigentliche Messbereich der Infrarotkamera.

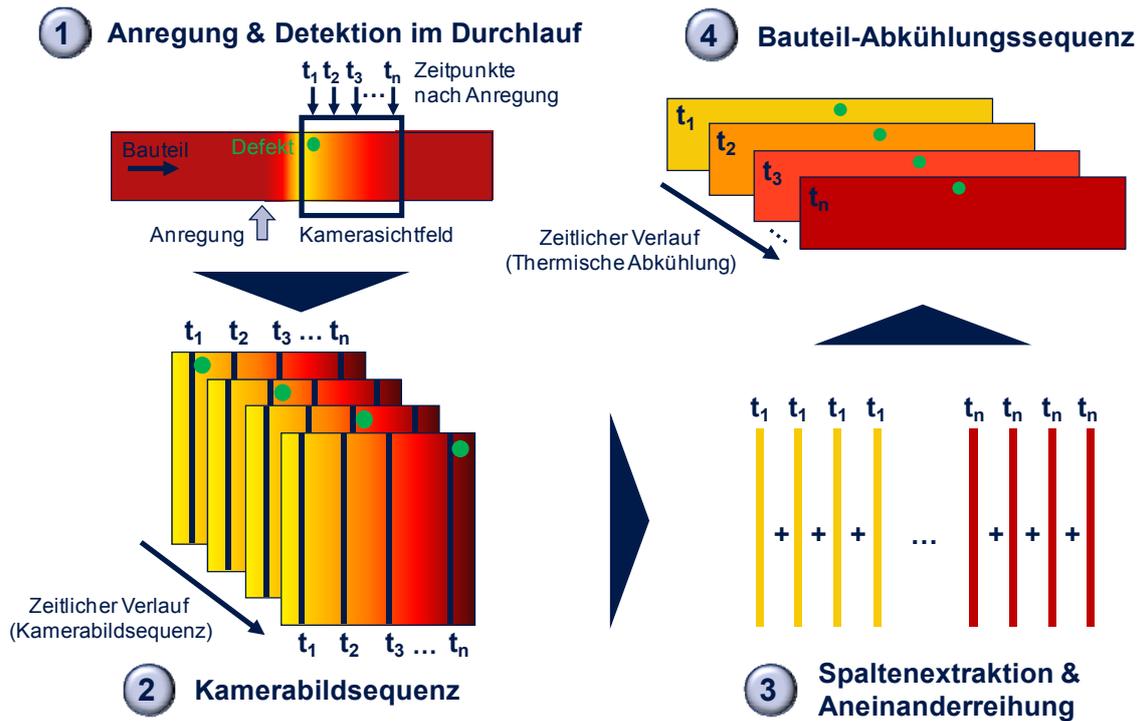


Abbildung 2. Vorgehensweise zur Generierung von Bauteil-Abkühlungssequenzen bei der Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf

Die in Abschnitt 1 erläuterten thermografischen Auswertungskonzepte für stationäre Prüfungen können prinzipiell auch für die generierten Abkühlungssequenzen der kontinuierlichen Durchlaufprüfung eingesetzt werden. Im Gegensatz zur stationären Prüfung kann hierbei jedoch nur ein zeitlich begrenzter Ausschnitt der Abkühlungssequenz erfasst und ausgewertet werden (vgl. Abbildung 1, hellrote Bereiche). Das einfachste Auswertungskonzept stellt die singuläre Kontrastauswertung dar (Abbildung 3, links), bei welcher ein einzelnes Bild mit dem stärksten Fehlerkontrast verwendet wird. Da hier lediglich eine einzelne Spalte ausgewertet wird, wäre hierfür auch die Verwendung einer Zeilenkamera anstelle eines Detektorarrays ausreichend. Zwar ist der Auswertungsaufwand gering, jedoch steht keine zeitliche Information zum Temperaturverlauf zur Verfügung, so dass die generierten Kontrastbilder mit Störgrößen (lokale Emissivitätsschwankungen, Reflexionen) behaftet sein können.

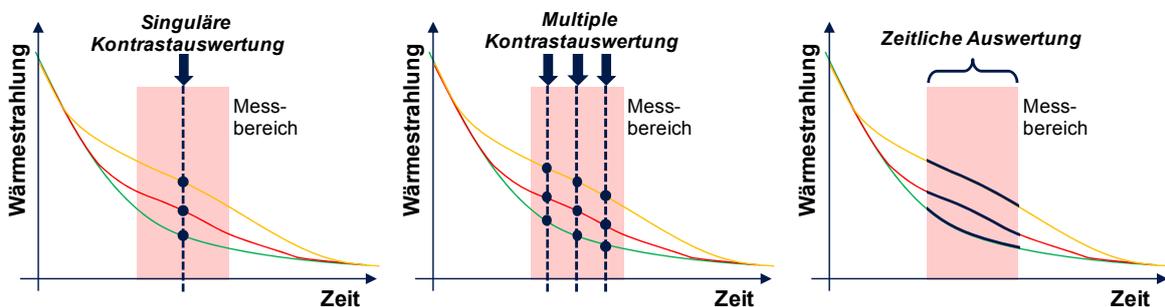


Abbildung 3. Thermografische Auswertungskonzepte für die Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf

Eine Erweiterung der singulären Kontrastauswertung ist die multiple Kontrastauswertung (Abbildung 3, Mitte), bei welcher mehrere Spalten der Infrarotkamera zur Erstellung mehrerer Kontrastbilder herangezogen werden. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Fehlerarten mit ihrem jeweils stärksten Kontrast abzubilden und so die Zuverlässigkeit der Detektion zu steigern. Die Bilder können dabei auch zu einem einzelnen Ergebnisbild

durch einfache Addition überlagert werden. Als drittes Konzept bietet sich die Auswertung des zeitlichen Temperaturverhaltens des verfügbaren Sequenzabschnitts an (Abbildung 3, rechts). Dabei können sowohl zeitliche Ableitungen als auch die aus der stationären Infrarotthermografie bekannte Fast-Fourier-Transformation eingesetzt werden.

2.3 Problemstellung und Optimierungsbedarf

Zwischen den dargestellten Parametern der kontinuierlichen Durchlaufprüfung bestehen einerseits vielfältige Abhängigkeiten untereinander, zum anderen entsteht ein Zielkonflikt zwischen geringen Prüfzeiten, d.h. hohen Durchlaufgeschwindigkeiten, und einem hohen Kontrast für alle qualitätsrelevanten Fehlstellen. Wird beispielsweise die Geschwindigkeit v erhöht, so verkürzt sich gleichzeitig der Zeitraum, in welchem der Fehlerkontrast erfasst werden kann. Diese Problematik wird insbesondere dann relevant, wenn Fehler in unterschiedlichen Tiefenlagen erkannt werden müssen, da diese eine jeweils unterschiedliche zeitliche Charakteristik aufweisen. Die Bestimmung optimaler Prüfparameter erfolgt derzeit weitgehend empirisch in aufwendigen Versuchsreihen.

Um unter industriellen Einsatzbedingungen eine sowohl zuverlässige als auch den Fertigungstaktzeiten angemessene thermografische Prüfung zu ermöglichen, sind geeignete Optimierungsstrategien für kurze Prüfzeiten bei gleichzeitig hohem Fehlerkontrast erforderlich. Der bisher hohe experimentelle Aufwand zur Ermittlung geeigneter Prüfparameter soll zudem durch eine zielgerichtete Vorgehensweise bei der Entwicklung von Prüfsystemen, die auf einem kontinuierlichen Durchlauf basieren, verringert werden. Dabei sollen die optimalen Prüfparameter aus stationären thermografischen Untersuchungen an Probekörpern abgeleitet werden.

3. Experimentelle Grundlagenuntersuchungen

3.1 Vorgehensweise

Ziel einer Vereinfachung der Systementwicklung für die Durchlaufprüfung ist es, optimale Prüfparameter bereits aus stationären Vorversuchen an fehlerbehafteten Probekörpern abzuleiten. Hierzu muss in Grundlagenuntersuchungen zunächst überprüft werden, inwieweit eine derartige Vereinfachung möglich ist und ob dabei die gleichwertige Ergebnisse wie durch eine stationäre Prüfung erzielt werden können. Zudem sind die Abhängigkeiten der zeitlichen Fehlercharakteristik von den Prüfparametern wie beispielsweise Anregungspulsdauer oder Anregungsintensität zu evaluieren, um eine spätere zielgerichtete Systemkonzeption zu ermöglichen. Die Untersuchungen sollen zunächst an einem idealisierten Probekörper werden (Abbildung 4).

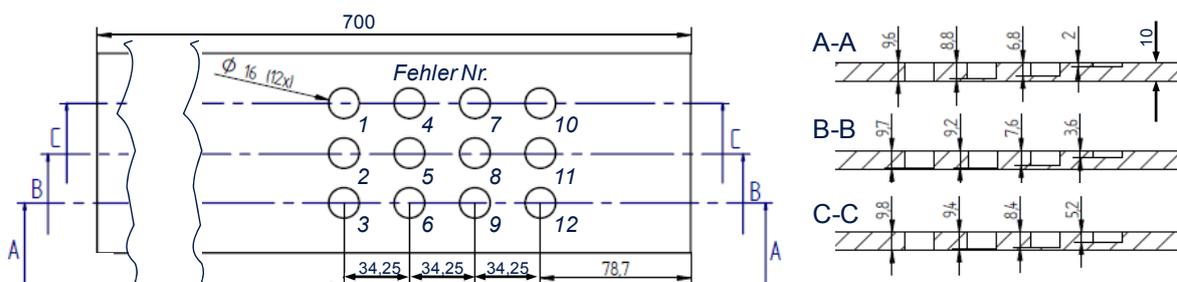


Abbildung 4. Verwendeter Probekörper mit Sackloch-Bohrungen

Hierzu wurde eine Kunststoffplatte (Dicke = 10 mm) mit Sacklochbohrungen (Durchmesser = 16 mm) versehen, deren Restwandstärken zwischen 0,2 mm und 8,0 mm variiert wurden. Die in den folgenden Untersuchungen dargestellten Ergebnisse referenzieren auf die in Abbildung 4 dargestellte Nummerierung der simulierten Fehlstellen.

3.3 Einfluss der Anregungsintensität auf die zeitliche Fehlercharakteristik

In einer ersten Untersuchung wurde evaluiert, inwieweit die Intensität des Anregungspulses die zeitliche Fehlercharakteristik bei stationärer Pulsthermografie beeinflusst. Die Leistung einer optischen Blitzanregung (3500 J) wurde dabei zwischen 40% und 100% in 4 Stufen variiert, die Pulsdauer blieb technisch bedingt konstant. Abbildung 5 zeigt exemplarische Ergebnisse des Fehlerkontrastverlaufs für die Fehlstelle 6 (Restwandstärke = 1,2 mm).

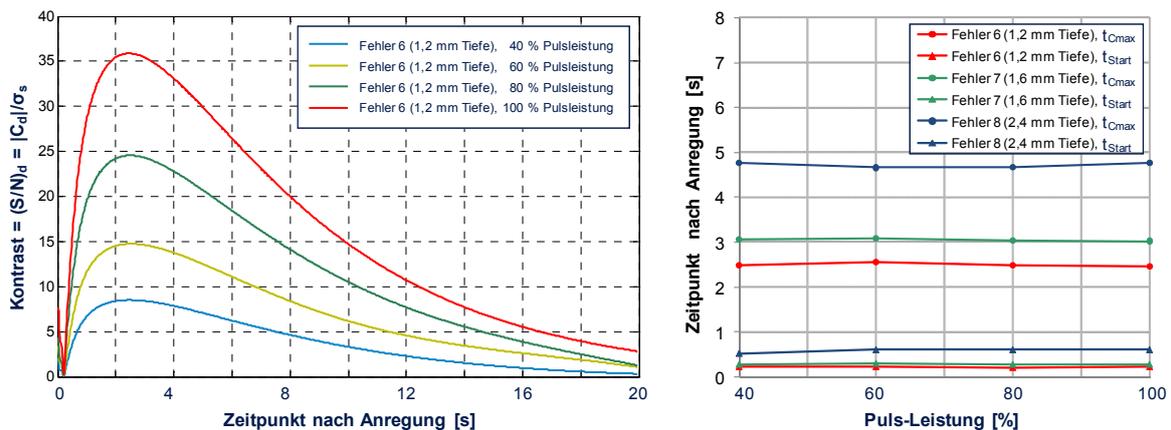


Abbildung 5. Fehlerkontrastverlauf bei unterschiedlicher Pulsleistung (links); Zeitpunkte für Beginn und Maximalkontrast ausgewählter Fehlstellen in Abhängigkeit der Pulsleistung (rechts)

Der Fehlerkontrast wurde aus der Differenz von Fehlstellenintensität zu intaktem Bauteilbereich C_d in Relation zum Signalrauschen fehlerfreier Bauteilbereiche σ_s gebildet. Eine Fehlstelle gilt als zuverlässig detektierbar, wenn dieses Verhältnis größer als 3 ist, sich das Fehlersignal also deutlich vom Messrauschen abhebt. Die Ergebnisse verdeutlichen erwartungsgemäß, dass sowohl der Zeitpunkt des Fehlerkontrastbeginns t_{Start} als auch des maximalen Fehlerkontrasts t_{Cmax} nicht von der Pulsleistung abhängen. Eine möglichst hohe Pulsleistung ermöglicht damit einen hohen Fehlerkontrast, der eine wichtige Voraussetzung für eine zuverlässige Detektion auch tiefer liegender Fehlstellen ist. Aus den Untersuchungen lässt sich zudem folgern, dass die Fehlercharakteristik eines Bauteils nicht verändert wird, wenn die Intensität der Durchlauf-basierten Anregung mit Schwankungen behaftet ist.

3.4 Vergleich von stationärer und Durchlauf-basierter Pulsanregung

Die Parametrierung einer Prüfung im Durchlauf wird wesentlich vereinfacht, wenn die zeitliche Charakteristik der Fehlstellen in stationären Vorversuchen durchgeführt werden kann. Hierfür ist jedoch zunächst zu evaluieren, inwieweit die Ergebnisse der stationären Prüfung übertragbar sind, da bei der Durchlaufprüfung die Pulsanregung durch das Zusammenwirken aus dauerhaft strahlender Anregungsquelle, Blende und Bauteilbewegung und nicht durch einen einzelnen Blitz entsteht. Abbildung 6 zeigt die Prüfaufbauten, mit denen die stationäre und die Durchlauf-basierte Pulsanregung verglichen wurden. Für die stationäre optische Anregung wurde ein Blitz mit 3500 J eingesetzt. Für die Durchlaufanregung wurde ein linienförmiger Infrarotstrahler mit 1200 Watt verwendet, dessen effektive Strahlungsbreite auf der Bauteiloberfläche zudem durch eine Blende variiert werden kann.

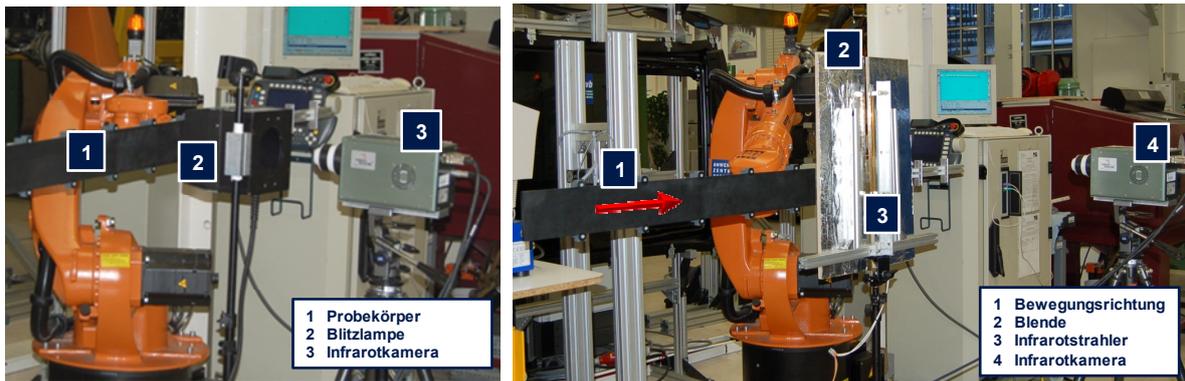


Abbildung 6. Versuchsaufbau zur Ermittlung der zeitlichen Fehlercharakteristik; stationäre Anordnung (links) und Durchlaufprüfung (rechts)

Abbildung 7 (links) zeigt die interpolierten Kontrastverläufe aller Fehlstellen des Probekörpers nach einer stationären optischen Blitzanregung. Die jeweiligen Zeitpunkte des maximalen Kontrasts wurden mit mathematischen Methoden bestimmt. Abbildung 7 (rechts) zeigt den Vergleich mit den Zeitpunkten für den Maximalkontrast, die in der Durchlauf-Anordnung ermittelt wurden. Hierbei kann eine sehr gute Übereinstimmung beobachtet werden. Die Variation der Blendenbreite zwischen 20 mm und 60 mm sowie die Variation der Anregungsleistung zeigten zudem keinen signifikanten Einfluss auf den Zeitpunkt des maximalen Fehlerkontrasts. Hierdurch ist es möglich, die Fehlercharakteristik in stationären Versuchen mit geringem Aufwand zu ermitteln und für die Parametrierung der Durchlaufprüfung zu verwenden. Für die Fehlstellen 1-3 konnten in der Durchlaufprüfung keine Zeitpunkte für den maximalen Kontrast ermittelt werden, da diese bereits vor dem Messbereich der Kamera auftraten. Die Fehlstellen 10-12 waren mit starkem Rauschen behaftet, so dass sich die Bestimmung der Kontrastzeitpunkte als schwierig erwies.

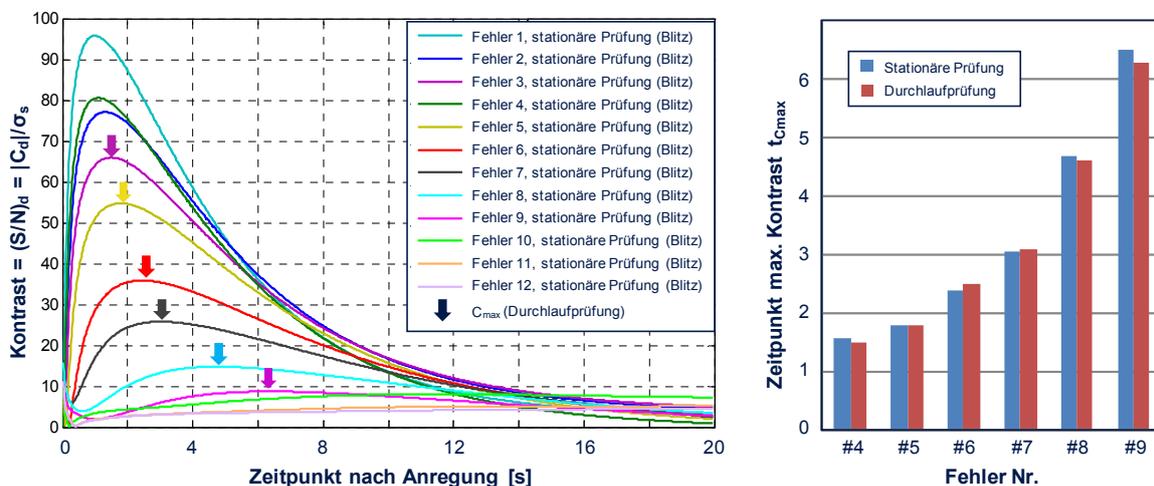


Abbildung 7. Fehlerkontrastverläufe im Probekörper bei stationärer Prüfung (links); Vergleich der Zeitpunkte des maximalen Kontrasts zwischen stationärer Prüfung und Durchlaufprüfung (rechts)

3.5 Einfluss von Auswertungsverfahren auf die zeitliche Fehlercharakteristik

Die vorhergehenden Untersuchungen zur zeitlichen Fehlercharakteristik wurden anhand einfacher Kontrastauswertungen der Abkühlungssequenzen durchgeführt. Alternative Auswertungsmethoden generieren andere Fehlercharakteristiken mit abweichenden Zeitpunkten für den Beginn und das Maximum der Fehlerkontraste. BALAGEAS et al. haben diesen Sachverhalt anhand von fehlerbehafteten CFK-Probekörpern demonstriert. Die Auswertung

mittels zeitlicher Ableitungen der Abkühlungskurven generiert Fehlerkontraste, die früher über der Rauschschwelle liegen, als dies bei rein interpolierten Kontrastkurven der Fall ist (Abbildung 8). Zwar ist der absolute Fehlerkontrast bei letztgenanntem Verfahren höher, jedoch bildet sich dieser erst später als die Maxima der zeitlichen Ableitungen ersten und zweiten Grades aus [11]. Dieses Verhalten kann dazu verwendet werden, die Prüfzeit der Durchlaufprüfung bei einem gleichwertigen Fehlerkontrast zu reduzieren. Entsprechende Ausführungen folgen in einem späteren Abschnitt.

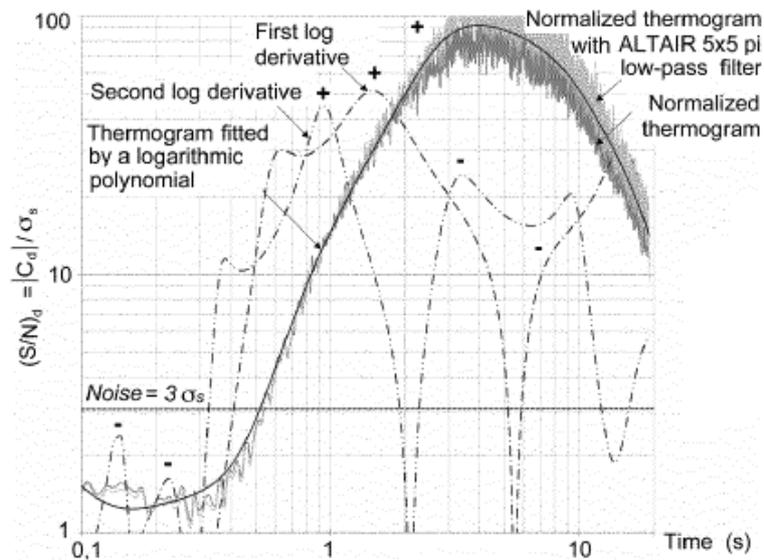


Abbildung 8. Zeitlicher Verlauf der Fehlerkontrastausbildung im Thermogramm und dessen erster und zweiter Ableitung in einem CFK-Probekörper [11]

4. Methodischer Ansatz zur optimierten Prüfparameterauswahl

4.1 Überblick über das methodische Gesamtkonzept

Die Qualifizierung der thermografischen Durchlaufprüfung für ein neues Bauteil erfordert eine zielgerichtete methodische Vorgehensweise, um geeignete Prüfparameter für eine optimale Fehlerdetektion zu identifizieren und gleichzeitig den Versuchsaufwand gering zu halten. Hierfür wird die in Abbildung 9 dargestellte Vorgehensweise vorgeschlagen. Zunächst sind die Prüfanforderungen wie qualitätsrelevante Fehlerarten und Fehlergrößen sowie die minimale Prüfgeschwindigkeit zu ermitteln. Hierauf basierend werden fehlerbehaftete Probekörper hergestellt, die in stationären thermografischen Versuchen mit geeigneten Anregungsquellen zerstörungsfrei geprüft werden. Hierauf aufbauend kann die zeitliche Fehlercharakteristik mit alternativen Auswertungsverfahren ermittelt und in einem Detektionsdiagramm visualisiert werden. Hierin können anschließend optimale Prüfzeitpunkte ermittelt werden, die eine sichere Detektion aller qualitätsrelevanten Fehlstellen bei gleichzeitig geringstmöglicher Dauer der Durchlaufprüfung erlauben. Abschließend ist die Parametrierung des Prüfsystems hinsichtlich geometrischer Anordnung und Auswahl einer geeigneten Infrarotkamera möglich. In den folgenden Abschnitten werden die letzten Schritte der Methodik genauer betrachtet.

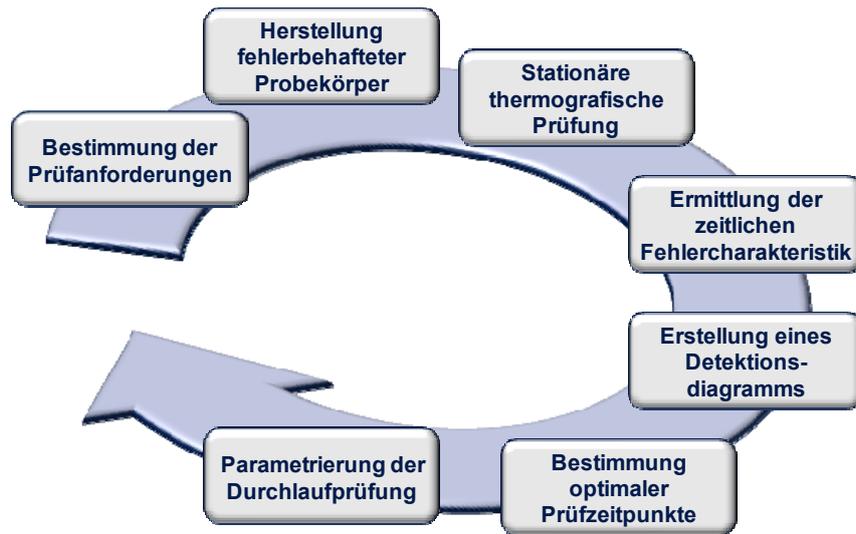


Abbildung 9. Vorgehensweise zur Ermittlung optimaler Parameter für die thermografische Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf

4.2 Ermittlung der zeitlichen Fehlercharakteristik und Erstellung eines Fehlstellen-Detektionsdiagramms

Anhand stationärer Versuche an den fehlerbehafteten Probekörpern können in Abhängigkeit der unterschiedlichen Fehlstellenarten und für unterschiedliche Auswertungsverfahren die Zeitpunkte für Beginn, Maximum und Ende der Fehlerkontraste ermittelt werden. Je nach Auswertungsverfahren werden dabei für ein und denselben Fehler unterschiedliche Zeitpunkte ermittelt. Aus den Daten kann anschließend ein Fehlstellen-Detektionsdiagramm erstellt werden, das eine übersichtliche Darstellung der gesamten zeitlichen Fehlercharakteristik des Referenzbauteils ermöglicht (Abbildung 10, links). Jede Linie repräsentiert für die entsprechende Fehlstelle ein Zeitintervall, in welchem die Fehlstelle zuverlässig detektierbar ist. Beginn und Ende des Fehlerkontrasts werden durch das Überschreiten der Rauschschwelle 3σ markiert.

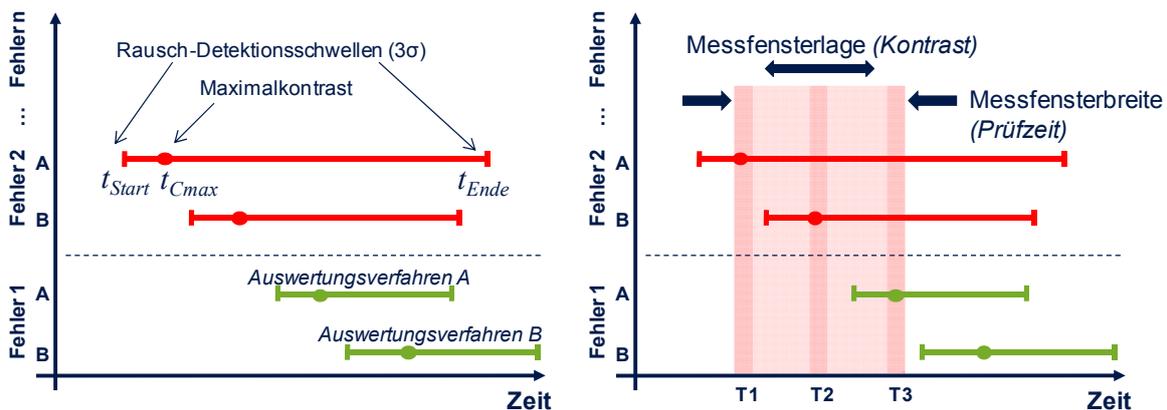


Abbildung 10. Diagramm zur Darstellung der zeitlichen Fehlercharakteristik eines Bauteils (links); Bestimmung optimaler Prüfzeitpunkte für ein zur Verfügung stehendes zeitliches Messfenster (rechts)

4.3 Bestimmung optimaler Prüfzeitpunkte

Je nach gewählter Auswertungsmethode für die thermografischen Bildsequenzen können aus dem Diagramm nun geeignete Prüfzeitpunkte und Prüfzeitfenster ermittelt werden. Abbildung 10 (rechts) zeigt beispielhafte Zeitpunkte $T1$ bis $T3$ für die singuläre Kontrastauswertung. Zeitpunkt $T1$ würde zwar eine optimale Detektion der Fehlstelle 2 mit Auswertungsverfahren A erlauben, jedoch liegt der Kontrast des Fehlers 1 zu diesem Zeitpunkt noch nicht über der geforderten Mindestschwelle. Der Prüfzeitpunkt $T3$ würde dagegen die Detektion der Fehler 1 und 2 mit dem Auswerteverfahren A (z.B. einfache Kontrastauswertung) erlauben, wobei Fehler 2 nur suboptimal dargestellt wird. Durch die Nutzung der multiplen Kontrastauswertung könnte hier eine weitere Optimierung erzielt werden. Hierbei wird die Infrarotkamera so positioniert, dass mit der linken Spalte der Detektormatrix der Zeitpunkt $T1$ und mit der rechten Spalte der Zeitpunkt $T3$ erfasst wird. Die Überlagerung beider Ergebnisbilder bietet den jeweils optimalen Kontrast. In dem Zeitintervall $T1$ bis $T3$ kann bei Verwendung einer Matrixkamera zudem eine zeitliche Auswertung z.B. mit Fast-Fourier-Transformation durchgeführt werden, um Störgrößen zu reduzieren. Ein Ansatz zur Prüfzeitreduktion besteht in der Kombination der Ergebnisse unterschiedlicher Auswertungsverfahren. Werden beispielsweise die Ergebnisse der beispielhaft dargestellten Verfahren A und B gleichzeitig genutzt, so reicht bereits das Messintervall von $T2$ bis $T3$ aus, um eine zuverlässige Detektion beider Fehlerarten zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass bei gleicher Kamerabildweite die Durchlaufgeschwindigkeit erhöht werden kann. Optimale Prüfzeitpunkte für ein gegebenes Fehlerspektrum können anhand des Diagramms mit einfachen mathematischen Methoden (Mittelwertbildung, kleinste Fehlerquadrate etc.) definiert werden.

4.4 Parametrierung der Durchlaufprüfung

Nachdem die optimalen Prüfzeitpunkte bestimmt worden sind, kann nun die geometrische Anordnung der Prüfsystemkomponenten durchgeführt werden. Mittels der kleinsten qualitätsrelevanten Fehlstelle ist zunächst eine geeignete Bildfeldgröße der Infrarotkamera zu definieren. Die kleinste Fehlstelle sollte dabei über mindestens 3 Pixel abgebildet werden, um eine sichere Unterscheidung vom Messrauschen zu ermöglichen. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des zu überwachenden Fertigungsprozesses bzw. der geforderten minimalen Prüfzeit für das Prüfobjekt ist zudem eine Infrarotkamera mit geeigneter Bildwiederholrate auszuwählen. Während der Integrationszeit des Detektors sollte sich der beobachtete Bauteilausschnitt um maximal 2 Pixel bewegen, um ausreichend scharfe Abbildungen erzeugen zu können. In einem weiteren Schritt ist eine geeignete Anregungsquelle auszuwählen, welche in Intensität und resultierender Pulslänge vergleichbar mit der Pulsanregung der stationären Voruntersuchung ist. Dabei kann die Pulslänge bei Bedarf mittels einer Blende vor der Anregungsquelle entsprechend der Durchlaufgeschwindigkeit eingestellt werden. Die Länge des Zeitintervalls, welches für eine Auswertung der Abkühlungssequenz zur Verfügung steht, kann aus der Messbereichsbreite B und der Durchlaufgeschwindigkeit v berechnet werden. Hierin müssen die ermittelten optimalen Prüfzeitpunkte durch eine geeignete Wahl des Abstands zwischen Anregungsquelle und Infrarotkamera eingepasst werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der thermografischen Prüfung im kontinuierlichen Durchlauf ist eine Vielzahl von Prüfparametern zu berücksichtigen, um eine schnelle und zuverlässige Detektion aller qualitätsrelevanten Fehlstellen zu erlauben. Anhand von Grundlagenuntersuchungen an einer

Bohrlochplatte konnte nachgewiesen werden, dass die Ergebnisse stationärer Prüfungen dazu verwendet werden können, die Parameter der kontinuierlichen Durchlaufprüfung bereits im Vorfeld des Prüfsystemaufbaus mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Hierdurch kann der Versuchsaufwand bei der Inbetriebnahme deutlich verringert werden. In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Pulsanregung im Durchlauf eine identische zeitliche Fehlercharakteristik generiert wie eine stationäre Prüfanordnung. Die Anreizungsintensität beeinflusst die Zeitpunkte des Kontrastbeginns und des Maximalkontrasts nicht. Es konnte weiterhin eine Methode entwickelt werden, welche eine zielgerichtete Bestimmung optimaler Prüfparameter für die kontinuierliche Durchlaufprüfung erlaubt. Durch die simultane Verwendung unterschiedlicher Auswertungsverfahren wird dabei eine Prüfzeitreduktion erwartet.

Die Methodik wurde anhand eines industriellen Anwendungsbeispiels aus der Klebtechnik bereits in ersten Ansätzen verifiziert. Dabei konnte gezeigt werden, dass die methodisch ermittelten Prüfparameter sehr gut mit dem experimentell ermittelten optimalen Prüfzeitpunkt übereinstimmen. Weitergehende Untersuchungen befassen sich mit der Verifizierung der vorgeschlagenen Prüfzeitreduktion durch die simultane Verwendung alternativer Auswertungsverfahren.

Referenzen

- [1] Zaeh, M. F.; Thiemann, C.; Boehm, S. Srajbr C.; Lammel, C.; Noak, J. (2009): Cost-effective defect detection in bonded glass element modules using active thermography. *Non-destructive testing of adhesive bonds*. In: *Adhesive & Sealants Extra*, H. 10, p. 30–34.
- [2] Thiemann, C.; Zäh, M. F.; Srajbr, C.; Boehm, S. (2009): Automatisierte zerstörungsfreie Prüfung von Klebverbindungen. In: *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hg.): Thermografie-Kolloquium 2009*. Stuttgart, 08.-09. Oktober 2009. Berlin.
- [3] Märgner, V.; El-Abed, H.; Meinschmidt, P.; Schlüter, F.: Quality Control of Invisible Defects in the Laminating Process using a New Thermographic Online System. (Hrsg.): *7th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT)*, S. F3.1-F3.6.
- [4] Jüngert, A.; Große, C.; Aderhold, J.; Meinschmidt, P.; Schlüter, F.; Förster, T.; Felsch, T.; Elkmann, N.; Krüger, M.; Lutz, O.: Zerstörungsfreie robotergestützte Untersuchung der Rotorblätter von Windenergieanlagen mit Ultraschall und Thermographie. *ZfP-Zeitung* (2009) 6, S. 43-49.
- [5] Bauer, Norbert; Aderhold, Jochen (Hrsg.): *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie*. Erlangen: Fraunhofer-Allianz Vision 2005.
- [6] Maldague, X. P. V.; Moore, P. O. (Hg.) (2001): *Infrared and thermal testing*. 3. ed. Columbus, Ohio: American Society for Nondestructive Testing (*Nondestructive testing handbook / Robert C. McMaster, ed. American Society for Nondestructive Testing American Society for Metals, Vol. 3*).
- [7] Busse, G.: *Aktivitäten der Abteilung Zerstörungsfreie Prüfung in Forschung und Anwendung*. Stuttgart: 2008.
- [8] Riegert, G.: *Induktions-Lockin-Thermografie - ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung (Dissertation)*: Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart. Stuttgart (2007).
- [9] Zweschper, T.; Dillenz, A.; Riegert, G.; Busse, G.: Thermography with excitation by elastic waves: comparison of techniques (pulse, burst, lockin). (Hrsg.): *6th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT)*, S. 47-52.
- [10] Ibarra-Castaneda, C.; Bendada, A.; Maldague, X.: Thermographic Image Processing for NDT. In: *Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales (AAENDE) (Hrsg.): IV Conferencia Panamericana de END 2007*.
- [11] Balageas, D. L.; Chapuis, B.; Deban, G.; Passilly, F.: Quantitative assessment of the improvement of the detection of defects by pulse thermography thanks to the TSR approach in the case of a smart composite repair patch. In: *X.P.V. Maldague (Hrsg.): 10th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT)*. Québec, 27.-30. Juni 2010. Québec: É. du CAO 2010, S. 881-888.