

Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie

Entwicklung einer Ingenieurplattform

Dissertation

zur Erlangung des Grades der
Doktorin der Ingenieurwissenschaften

der

Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
Chemie, Pharmazie und Werkstoffwissenschaften

der

Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Ulrike Siemer

Saarbrücken

2010

Tag des Kolloquiums: 16. März 2010

Dekan: Prof. Dr.-Ing. S. Diebels

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. M. Kröning
Dr. rer. nat. H. Wiggenhauser

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. R. Busch

Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. F. Aubertin

VORWORT

„Wer immer tut, was er schon kann, bleibt immer das, was er schon ist“,

Henry Ford

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit im Konzernlabor der Volkswagen AG in Wolfsburg. Aktuelle Fragestellungen aus dem Labor, der Produktion sowie der Forschung und Entwicklung flossen dort zusammen. Damit bot sich die Chance, Methoden und Herangehensweisen zu entwickeln, um die Nutzbarkeit zerstörungsfreier Prüftechniken unter der Berücksichtigung industrieller Anforderungen zu erweitern. Für diese Möglichkeiten möchte ich an dieser Stelle danken. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Christian Achmus für seine umfangreiche fachliche Unterstützung und die zahlreichen konstruktiven Hinweise beim Erstellen dieser Arbeit. Ebenso danken möchte ich meinen Kollegen des Teams Zerstörungsfreie Prüfverfahren für die anregenden Gespräche, ihren Ideenreichtum und die allzeit gute Zusammenarbeit.

Herrn Professor Kröning danke ich für die Übernahme des Referats meiner Arbeit. Die fördernden Diskussionen sowie die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IzFP) in Saarbrücken haben zur erfolgreichen Bearbeitung des Themas beigetragen. Für die universitäre Begleitung gilt mein Dank Herrn Dr. Netzelmann.

Für das entgegengebrachte Interesse an den behandelten Themen meiner Arbeit, die wertvollen Anregungen und die Übernahme des Koreferats danke ich Herrn Dr. Wiggenhauser von der Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung (BAM) in Berlin.

Abschließend möchte ich das Doktorandenkolleg der Volkswagen AG hervorheben: für die vielen gemeinsamen und arbeitsreichen Stunden im Mobile Life Campus, die das Vorankommen sehr viel angenehmer gestaltet haben, danke ich Euch. Außerdem ist allen Korrekturlesern mein großer Dank sicher.

KURZFASSUNG

Neuartige Thermografieverfahren eröffnen eine Vielzahl von Potentialen im industriellen Umfeld. Um diese besser nutzen zu können, wird eine Systematik erarbeitet, um zerstörungsfreie Prüfverfahren für spezielle Einsätze in der Automobilindustrie zu qualifizieren. Die beschriebenen Abläufe gründen auf Forderungen aus dem Qualitätsmanagement und gelten für alle zerstörungsfreien Prüftechniken.

Speziell für die Thermografie wird eine Methodik entwickelt, die den Anwender unterstützt, neue Prüflösungen innerhalb des Unternehmens zu etablieren. Thermografieverfahren zeichnen sich durch ihre hohe Vielfalt an Modifikationen und damit verbundenen Einsatzmöglichkeiten aus. Für die Konfiguration thermografischer Prüfsysteme werden Prüfabläufe strukturiert und die Prüfmodule charakterisiert. Es wird ein Expertensystem zur Auswahl geeigneter Prüfkfigurationen entwickelt, das den Transfer von Expertenwissen ins Unternehmen fördert. Eine praxisorientierte Vorgehensweise zur Durchführung virtueller Thermografieprüfungen wird vorgestellt. Die Simulation der Prüfung mit der finiten Elemente Methode ermöglicht eine wirkungsvolle Anpassung von Anregungs- und Auswertetechniken an die Prüfaufgabe. Sie verschafft frühe Erkenntnisse und trägt bei geringen Kosten zur Verkürzung der Prüfverfahrensentwicklung bei.

Ausgewählte Praxisanwendungen bestätigen die Vorzüge der entwickelten Ingenieurplattform und zeigen u.a. die erfolgreiche Einführung der Thermografie in die Produktionslinien der Automobilindustrie.

ABSTRACT

Novel thermal testing techniques open up a wide range of opportunities in the industry. In order to carry these opportunities into practice, a systematic approach is developed to qualify non-destructive testing techniques for special operations in the automotive manufacturing process. It is derived from general regulations which must be fulfilled within the framework of quality management.

A modular strategy is created to support the user, who is implementing new testing solutions. Thermal testing techniques are featured by a diverse range of modifications leading to a high variety of possible applications. The testing procedure is transferred into a process chain that includes specific modules of the various testing options. These thermography modules are characterised systematically and become the basis for a selection tool to find appropriate test configurations. A practical approach for the use of finite element models for thermographic testing is demonstrated. The virtual thermography experiment allows for an effective adaption of thermal excitation and data evaluation. Simulations provide early findings and contribute to lower cost with both shortening development times and reducing effort.

Selected practical applications demonstrate the benefits obtained from the integration of the specific modules. One of the examples leads to a thermal testing procedure that ensures the product quality in the production line in the automotive industry.

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen. Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Publications about the content of this work require the written consent of Volkswagen AG. The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen AG.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung / Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	V
Verzeichnis der Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
2 Zielstellung	3
2.1 Motivation und Festlegung der Entwicklungsziele	3
2.2 Vorgehen und Aufbau der Arbeit	4
3 Kenntnisstand	7
3.1 Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren	7
3.2 Angewandte Methoden der Thermografie	8
3.2.1 Thermografiertechniken	8
3.2.2 Auswerteverfahren	17
3.2.3 Simulationsmethoden	22
3.3 Anwendungen und Möglichkeiten der Thermografie	25
3.4 Normative Anforderungen an zerstörungsfreie Prüfverfahren	28
4 Entwicklung einer Ingenieurplattform	31
4.1 Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren	31
4.1.1 Normativer Hintergrund	31
4.1.2 Stufenmodell zur Umsetzung	32
4.2 Ingenieurplattform für Thermografieprüfungen	36
5 Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme	39
5.1 Modellentwicklung	39
5.1.1 Ansatz mittels Expertensystem	39
5.1.2 Strukturbildung	40
5.2 Charakterisierung der Thermografiemodule	42
5.2.1 Fehlerarten und Merkmale	42

5.2.2	Rahmenbedingungen	43
5.2.3	Anregungsarten/-quellen zur Signalerzeugung	44
5.2.4	Infrarot-Kameratechnik zur Signalerfassung	69
5.2.5	Algorithmik zur Signalanalyse	74
5.3	Expertensystem zur Auswahl der Prüfkonfiguration	76
5.3.1	Definition der Prüfverfahrenskonfigurationen	76
5.3.2	Ableitung der Anforderungsprofile	79
5.3.3	Ergebnisgenerierung	83
6	Die virtuelle Thermografieprüfung	87
6.1	Virtuelle Prüfung mit Hilfe Finiter Elemente	87
6.2	Entwicklung thermografischer Simulationsmodelle	88
6.2.1	Aufbau finiter Elemente Modelle	88
6.2.2	Vorgehen anhand eines Beispiels	89
6.3	Anwendung für thermografische Prüfprobleme	93
6.3.1	Machbarkeitsabschätzung	93
6.3.2	Störgrößenanalyse	94
6.3.3	Parameteroptimierung	95
7	Beispiele aus der Prüfpraxis	97
7.1	Applikation Instrumententafel	97
7.1.1	Auswahl der Prüfkonfiguration	97
7.1.2	Serienumsetzung Instrumententafelprüfung	99
7.2	Applikation Lagerrohr	100
7.2.1	Auswahl der Prüfkonfiguration	100
7.2.2	Stichversuch Lagerrohruntersuchung	102
7.3	Applikation Widerstandsschweißpunkt	103
7.3.1	Auswahl der Prüfkonfiguration	103
7.3.2	Simulation der Prüfaufgabe	105
8	Diskussion und Ausblick	113
	Literaturverzeichnis	117
A	Normative Anforderungen an Prüfverfahren im Qualitätsmanagement	131
B	Kontrollliste zur Einführung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens	141
C	Bewertungsmatrizen Expertensystem	143

Abkürzungen

CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
FEM	Finite Elemente Methode
LW	Langwellige Infrarotstrahlung (<i>longwave infrared</i>)
MW	Mittelwellige Infrarotstrahlung (<i>mid wave infrared</i>)
QM	Qualitätsmanagement
SW	Kurzwellige Infrarotstrahlung (<i>short infrared</i>)
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

1 Einleitung

Infolge des steigenden Wettbewerbsdrucks auf den internationalen Absatzmärkten sind Innovationen und deren rasche Umsetzung in hochwertige Produkte für das Bestehen von Unternehmen zwingend erforderlich. Die Produkte der Automobilindustrie müssen vielseitigen Anforderungen und Erwartungen der Kunden genügen, neben Qualitäts-, Komfort- und Sicherheitsansprüchen sind Umwelt und Kostenaspekte zu berücksichtigen. In diesem Kontext gewinnen Aspekte wie die Gewichtsreduzierung für die Fahrzeugentwicklung besondere Relevanz. Die Reduzierung des Fahrzeuggewichtes wird auf alle Bauteile heruntergebrochen, und ihr kann mit dem Einsatz modifizierter Werkstoffe oder mit optimierten Bauteilgeometrien entsprochen werden. Neue Konzepte erfordern angepasste Strategien zur Überwachung der Produktqualität. Insbesondere aufgrund der Bauteilbelastung nahe ihrer Belastungsgrenze rückt die Aufgabe für das produzierende Unternehmen mehr und mehr in den Vordergrund, über sichere Methoden zur Gewährleistung einer gleichbleibenden Produktqualität zu verfügen.

Mit den stetig ansteigenden Anforderungen an die Produktqualität und die Effizienz der Produktionsprozesse wächst die Bedeutung der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) im industriellen Umfeld. Die Vorteile zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) kommen dem Streben der Automobilindustrie nach schlanken und robusten Prozessen in großem Maße entgegen. Prüfkosten für die Überwachung der Produktqualität können durch die Substitution zeitintensiver Prüfungen mit hohem Personalaufwand oder durch die Reduktion von Schrottkosten insbesondere bei hochpreisigen Komponenten gesenkt werden. Damit wird nachhaltig überragende Qualität bei wettbewerbsfähigen Kosten gewährleistet. Die Einsparpotentiale der Qualitätssicherung innerhalb der Produktion werden durch neue, erweiterte Möglichkeiten im Prüflabor z.B. zur Schadenanalyse ergänzt. Unter Zuhilfenahme zerstörungsfreier Prüftechniken können Material- und Bauteileigenschaften wie innere Strukturen, Materialungängen/-inhomogenitäten ebenso erkannt werden wie z.B. Verbindungsqualitäten. Die Funktionalität der Bauteile wird bei der Prüfung nicht beeinträchtigt, so dass auch 100%-Prüfungen zur Absicherung der Serienqualität realisierbar sind.

Im Fokus aktueller Entwicklungen stehen neuartige Verfahren, die den heute etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren wie z.B. der konventionellen Ultraschallprüftechnik und der Magnetpulverprüfung technisch und wirtschaftlich überlegen sind. Es zählen hierzu u.a. die bildgebenden, automatisierten Ultraschallprüftechniken (Gruppenstrahler-

Systeme), die Röntgen-Computertomografie, die auf elektromagnetischen Sensoren basierenden Prüfverfahren sowie die thermografischen Prüfmethoden. Als Methode ist die Thermografie seit langem bekannt, sie gewinnt aber aufgrund der enormen Weiterentwicklung leistungsfähiger Hard- und Software immer mehr an Bedeutung. Aktuell verfügbare kostengünstige Thermografiesysteme machen deren Einsatz für Industrieanwendungen bereits wirtschaftlich attraktiv.

Je nach vorgesehener Applikation liegen für das Prüfverfahren spezifische, zumeist sehr komplexe Anforderungsprofile vor. Für die Einführung neuer Prüfkonzepte in eine Serienfertigung ist eine aufwändige Absicherung der jeweiligen Verfahrenseignung gemäß gesetzlicher Anforderungen und hinsichtlich wirtschaftlicher Aspekte notwendig. Häufig fehlt es den verantwortlichen Ingenieuren jedoch an Erfahrung und umfassenden Fachwissen, um eine sichere Umsetzung schnell und kosteneffektiv voranzutreiben.

Die nachfolgende Arbeit bringt Transparenz in die Anforderungsprofile der Automobilindustrie und die notwendigen Abläufe, um ZfP-Verfahren regelkonform zu integrieren. Um zukünftige Umsetzungen sicher und kostengünstig zu gestalten, wird eine Ingenieurplattform entwickelt, welche eine systematische Vorgehensweise zur Einführung von ZfP-Verfahren vorgibt. Weitere Aspekte werden spezielle Methodiken sein, um die Potentiale der Thermografie zur Lösung aktueller Problemstellungen in der Industrie greifbarer zu gestalten. Es ist hierfür eine enge Verknüpfung zwischen den in der Wissenschaft gewonnenen Erkenntnissen und den Anforderungen aus der industriellen Praxis zu schaffen, was einen Nutzen für beide Seiten darstellt.

2 Zielstellung

2.1 Motivation und Festlegung der Entwicklungsziele

Die Thermografie bietet vielfältige Möglichkeiten zur Qualitätsabsicherung in der Produktion und bei Laboranwendungen. Die Nachfrage aus der Automobilindustrie nach dieser Methode ist aufgrund ihrer zunehmenden Wirtschaftlichkeit stark anwachsend. Aktueller Bedarf, zerstörungsfreie Prüfkonzepte zu etablieren, besteht zum Beispiel für die Prüfung von Fügeverbindungen im Karosseriebau, die Online-Prüfung von Instrumententafeln, sowie die Prüfung von Strukturteilen aus dem Aggregatebereich. Diese Fragestellungen geben unter anderem Anstoß für diese Arbeit.

Bei den ZfP-Verfahren, zu denen die Thermografie zählt, handelt es sich um physikalische Messtechniken, deren Ergebnisse in Beziehung zu den Qualitätsmerkmalen der untersuchten Bauteile gebracht werden müssen. Dies sind im Allgemeinen komplexe Zusammenhänge, die ein tiefes Verständnis der Methoden erfordern, um zu geeigneten Messkonfigurationen zu gelangen. Ebenso bestehen umfassende Anforderungen aus dem normativen Umfeld, die ein anwendungsreifes Prüfverfahren erfüllen muss. Prozesseigner in den Fertigungsbereichen werden hinsichtlich der Vorgehensweise und der Durchführung der notwendigen Schritte für eine regelgerechte Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren mit einem schwer überschaubaren Anforderungskatalog konfrontiert. An dieser Stelle wird der Bedarf an Unterstützung für den verantwortlichen Ingenieur deutlich.

Um die Potentiale der ZfP und im besonderen Fall die der Thermografie besser nutzen zu können, soll eine Plattform entwickelt werden, die vom initial bestehenden Prüfproblem bis hin zur Serienprüflösung unterstützend für den Anwender bereit steht. Vor dem Hintergrund normativer Anforderungen wird auf eine Systematisierung des Vorgehens abgezielt, mit deren Hilfe die Aufgaben bei der Implementierung eines ZfP-Verfahrens effektiv und effizient gestaltet werden können. Weitere Ansätze, wissenschaftliche Erkenntnisse in industriell anwendbare Methoden einfließen zu lassen, sind darüber hinaus erstrebenswert.

2.2 Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Um ein ZfP-Verfahren für spezielle Anwendungen in die Prozesse der Automobilindustrie einzubringen, ist ein umfangreicher Qualifizierungsprozess erforderlich. Eine exemplarische Abfolge von Qualifizierungsschritten (Q_1 bis Q_5), wie sie in der aktuellen Praxis angetroffen wird, zeigt die Abbildung 2.1, oben. Zu den ersten Schritten einer Verfahrensqualifizierung gehört z.B. die Definition der Prüfaufgabe, die in der gezeigten symbolischen Darstellung dem ersten Qualifizierungsschritt (Q_1) zuzuordnen ist. Die Ermittlung von Machbarkeiten mit Fragen wie „Ist die Erkennung einer Pore im vorliegenden Bauteil grundsätzlich möglich?“ erfordert in der Regel eine Reihe von Experimenten ($Q_{2_{exp}}$). Im weiteren Verlauf muss der Fähigkeitsnachweis für den angestrebten Prüfprozess geführt werden, darunter fällt die Ermittlung von Prüfprozessfähigkeitsgrößen in Versuchsreihen unter produktionsnahen Bedingungen (Q_3). Für die Beantwortung von Fragen wie „Ist das Prüfergebnis unter Einfluss aller möglichen Störgrößen gültig?“ fallen vielzählige Versuchsreihen mit verstärktem experimentellen Aufwand ($Q_{4_{exp}}$) an. Beim gesamten Vorgehen sind Wiederholschleifen z.B. aufgrund versäumter Untersuchungen möglich. Letzte Schritte bilden meist die umfassende Dokumentation der Aktivitäten bzw. die Erstellung einer Prüfanweisung (Q_5).

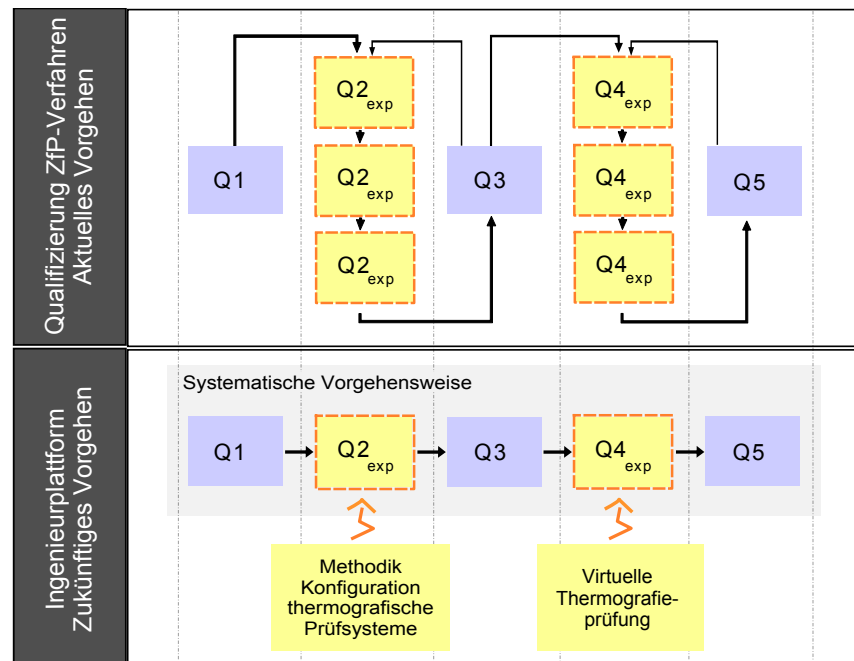


Abbildung 2.1: Vorgehen zur Qualifizierung von ZfP-Verfahren (Einzelschritte Q_1 bis Q_5 mit experimentellen Umfängen Q_{exp}); Oben: Aktuelles Vorgehen, Unten: Ingenieurplattform - Systematische Vorgehensweise und Methoden zur Reduzierung des organisatorischen und experimentellen Aufwandes

In dieser Arbeit sollen die notwendigen Aktivitäten für eine Verfahrensqualifizierung definiert und in eine für die effiziente Bearbeitung sinnvolle Reihenfolge gebracht werden. Um die Einhaltung geltender Normen zu gewährleisten, wird eine Analyse der Regelwerke des Qualitätsmanagements durchgeführt. Eine *systematische Vorgehensweise zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren* bildet die Basis für die in Kapitel 4 entwickelte Ingenieurplattform. Der experimentelle Aufwand kann durch den Einsatz weiterer Hilfswerkzeuge wie der *Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme* und der *virtuellen Thermografieprüfung* reduziert werden, wie die Abbildung 2.1, unten zeigt.

Im Rahmen von Machbarkeitsuntersuchungen sind beispielsweise weniger Experimente erforderlich, wenn bereits im Vorfeld präzisere Prüfverfahrenskonfigurationen festgelegt werden können. Die Auswahl einer geeigneten Prüfmethode für das vorliegende Prüfproblem soll für den Anwender mit Hilfe eines Expertensystems vereinfacht werden. Vorhandene Thermografiertechniken werden so aufbereitet, dass sie in ein Expertensystem einfließen können. Die Anforderungen der Prüfaufgabe werden der Methodenvielfalt der Prüfmethode gegenüber gestellt und dem Anwender mit Hilfe der in Kapitel 5 bereitgestellten Hilfswerkzeuge geeignete Prüfverfahrenskonfigurationen vorgeschlagen.

Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung des experimentellen Aufwands wird durch die Entwicklung von Simulationsmodellen in Kapitel 6 verfolgt. Durch den Einsatz von Simulationsmethoden zur virtuellen Thermografieprüfung können derzeitige Planungsprozesse verkürzt und kostengünstiger dargestellt werden.

Die Anwendung der erarbeiteten Methoden und Werkzeuge erfolgt in Kapitel 7 am Beispiel einzelner Projekte, die bis zu dem jeweils erzielbaren Umsetzungsgrad erprobt und validiert werden. Eine erfolgreiche Umsetzung in industrielle Prozesse anhand der Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren wird am Beispiel der Einführung der Online-Prüfung von Instrumententafeln gezeigt. Die Wirksamkeit und speziellen Vorzüge der zusätzlichen Methoden werden darüber hinaus anhand der Beispiele Rissprüfung und Widerstandsschweißpunktprüfung nachgewiesen.

3 Kenntnisstand

3.1 Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren

Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) werden für die Überwachung der Prozess- und Produktqualität seit langem routinemäßig in der Industrie eingesetzt. Materialinhomogenitäten wie z.B. Lunker, Poren, Risse, Einschlüsse und Haftungsfehler sind in der Herstellung oft technisch nicht zu vermeiden. Deren Lage, Art und Ausdehnung entscheiden in Verbindung mit der vorgesehenen Bauteilbelastung über ihre Tolerierbarkeit. Ziel bei der zerstörungsfreien Prüfung ist das Erkennen von Inhomogenitäten, die ab einer festgelegten Häufigkeit oder Größe als Fehler gelten. Einzelne Prüfmethoden sind nicht für alle Prüfprobleme gleichermaßen geeignet. Deren Eignung ist eng mit der geforderten Fehlernachweisgrenze verknüpft und abhängig von Randbedingungen wie z.B. von den Prozessanforderungen und der Prüfumgebung. Die Prüffähigkeit eines Verfahrens muss für jede Anwendung sorgfältig nachgewiesen werden, wobei die Anforderungen an das Prüfverfahren unter Einfluss aller möglichen Störgrößen erfüllt werden müssen.

Mit ihren verschiedenen Verfahrensmodifikationen bietet die Thermografie flexible Einsatzmöglichkeiten. Thermografische Prüftechniken zeichnen sich beispielsweise dadurch aus, dass sie für schnelle, großflächige Inspektionen unter den Einsatzbedingungen der Prüfpraxis in Produktion und Service eingesetzt werden können. Weitere besondere Vorteile ergeben sich aus der Kombination der Eigenschaften

- bildgebende, zeitaufgelöste Erfassung von Objektmerkmalen,
- Integrierbarkeit in Industrieumgebungen,
- Automatisierbarkeit der Auswertung,
- schnelle Merkmalerfassung großer Objektflächen,
- berührungslose Signalerfassung,
- Prüfbarkeit komplexer Geometrien (bzw. Formgebungen).

Als ZfP-Verfahren erkennt die Thermografie berührungslos Unregelmäßigkeiten unter der Oberfläche, aber auch die flächen- bzw. bildhafte Temperaturbestimmung gehört zu ihren Anwendungsfeldern. Bezeichnend ist die Vielfalt an Prüfverfahrensmodifikationen, die auf verschiedenen physikalischen Prinzipien basieren.

Einen Überblick über Besonderheiten der thermografischen Prüfmethode, über verschiedene Verfahrensarten und Einsatzmöglichkeiten geben z.B. Maldague [Mal00] sowie Bauer et al. [BMN04].

3.2 Angewandte Methoden der Thermografie

3.2.1 Thermografietechniken

In der Thermografie wird zwischen aktiven und passiven Verfahren unterschieden. Während bei der passiven Thermografie die auf Eigenwärme zurückzuführende thermische Signatur von Prüfobjekten betrachtet wird, so grenzen sich aktive Methoden dadurch ab, dass zum Zweck der Untersuchung ein zusätzlicher Wärmefluss in das Bauteil eingebracht wird [Deu04a]. Nach DIN 54190-1 erfolgt darüber hinaus eine Einteilung in die Thermografie und die thermografische Prüfung, sowie in die qualitative und die quantitative Thermografie. In Abbildung 3.1 sind die Begriffsdefinitionen und Charakteristika der einzelnen Methoden aufgeführt.

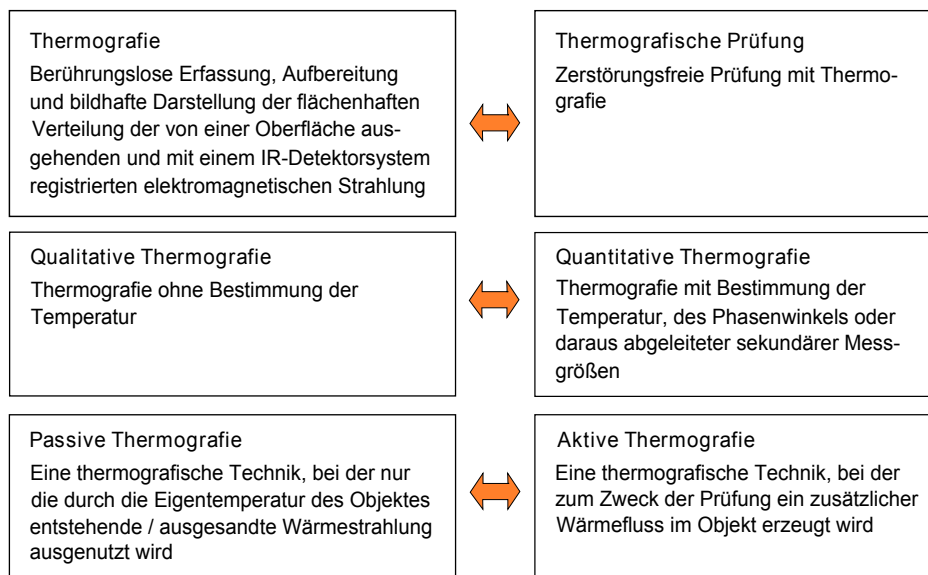


Abbildung 3.1: Begriffsdefinitionen nach DIN 54190 - Teil 1: Allgemeine Grundlagen

Bei der passiven Thermografie wird anhand der Infrarotstrahlungsverteilung direkt auf Eigenschaften der Objekte geschlossen, z.B. bei der Temperaturbestimmung oder Hot Spot Analyse. Die zerstörungsfreie Materialcharakterisierung mittels aktiver Thermografie basiert auf der zeitaufgelösten Analyse instationärer Wärmeleitprozesse, die durch eine thermische Anregung hervor gerufen werden. Die aktive Thermografieprüfung lässt sich in die folgenden Teilschritte gliedern:

1. Thermische Anregung des Prüfobjektes [Wärmeinitiierung/-eintrag]
2. Wärmeausbreitung im Bauteil [Wärmeleitung/-dissipation]
3. Thermische Strahlung und deren Erfassung [Infrarotabstrahlung und -detektion]
4. Verarbeitung und Bewertung der erfassten Infrarotsignale [Auswertung]

Die Grundlagen der einzelnen Vorgänge werden anschließend in Verbindung mit den relevanten Materialkenngrößen und Parametern erläutert.

Wärmeinitiierung /-eintrag

Nach einer örtlichen Erwärmung des Prüfobjekts setzen abhängig von den Materialeigenschaften Temperaturengleichvorgänge ein. Die temporären Temperaturunterschiede auf der Objekt Oberfläche können erfasst und bewertet werden. Abbildung 3.2 zeigt die Grundelemente der aktiven Thermografie und Möglichkeiten der thermischen Anregung, bei denen auf verschiedene Methoden des Wärmeeintrags zurückgegriffen wird.

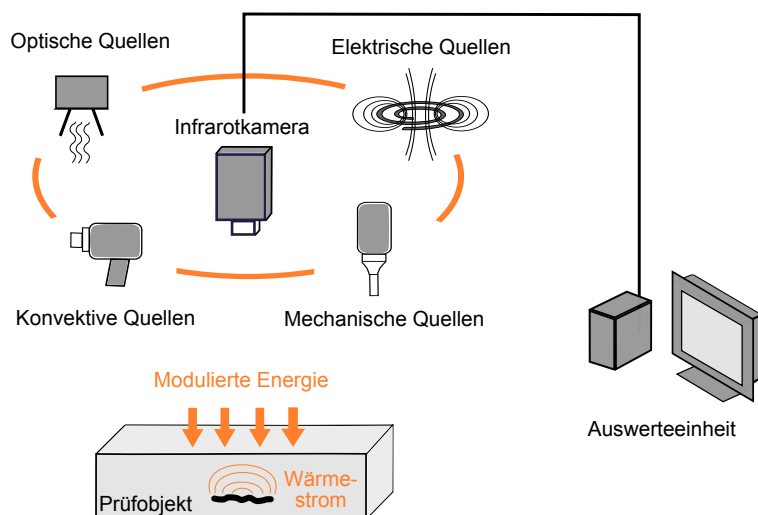


Abbildung 3.2: Grundprinzip aktive Thermografie

Übliche Anregungstechniken sind die Blitz-, Laser-, Halogenstrahleranregung (optische Quellen), die Ultraschallanregung (mechanische Quellen), die Induktivanregung (elektrische Quellen) und die Heiß-/Kaltluftanregung (konvektive Quellen). Abkühlungen sind als Anregungsmöglichkeiten mit negativem Wärmeeintrag zu betrachten. Die Nachweisbarkeit der vermuteten Fehler bestimmt die Auswahl einer Methode. Einige machen sich inhomogene Wärmeströme aufgrund von Materialinhomogenitäten zu nutze, wohingegen bei anderen Methoden Fehlstellen, wie z.B. Risse, selektiv erwärmt werden. Die Initiierung von Wärmequellen im Prüfobjekt lässt sich in der Regel auf einen der folgenden physikalischen Vorgänge zurückführen:

OPTISCHE ANREGUNG

Trifft elektromagnetische Strahlung auf die Oberfläche eines Prüfobjekts, so wird sie entsprechend der Oberflächeneigenschaften teilweise reflektiert, absorbiert und transmittiert. Der absorbierte Anteil der elektromagnetischen Strahlung wird aufgrund des photothermischen Effektes in einer oberflächennahen Grenzschicht in Wärme umgewandelt [AP96, RG76]. Die von optischen Quellen erzeugte Strahlung besitzt unterschiedliche Frequenzspektren, die Frequenzen reichen typischerweise vom sichtbaren Spektrum bis weit in den Infrarotbereich hinein (z.B. Temperaturstrahler). Die Laser- oder Leuchtdiodenanregung zeichnet dahingegen aus, dass das Spektrum auf einzelne Frequenzen begrenzt ist.

ULTRASCHALLANREGUNG

Die Einkopplung von hochfrequentem Leistungsschall in ein Prüfobjekt versetzt dessen Material in Schwingungen. Die einsetzende Energiedissipation durch innere Reibung bzw. Absorption im Material führt zu charakteristischen Wärmeverteilungen. Thermische Effekte sind an Defekten zu erwarten, bei denen es durch Grenzflächenreibung oder durch plastische Deformationen zu einer Umwandlung von mechanischer Energie in Wärmeenergie kommt. Innere Grenzflächen agieren selbst als Wärmequelle, was die Methode als defektselektiv auszeichnet. Das bedeutet, dass der zu detektierende Fehler erwärmt wird, während der Untergrund idealerweise unbeeinflusst bleibt. Die Ultraschallanregung wurde von Homma [Hom07] umfangreich untersucht und dargestellt. Weitere Anwendungsmöglichkeiten wurden u.a. von Netzelmann [NAW05] gezeigt.

INDUKTIVANREGUNG

Nach dem Induktionsgesetz erzeugt eine mit Wechselstrom durchflossene Spule in leitenden Materialien ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld, das oberflächennahe Wirbelströme induziert. Durch die Joule'sche Erwärmung wird in dieser Schicht Wärme freigesetzt. Je nach gewählter Frequenz kann die Eindringtiefe des elektrischen Feldes beeinflusst werden (Skin-Effekt). An Inhomogenitäten im Material kommt es durch Ablenkung der regulären Feldlinienverläufe zu Feldliniendichteschwankungen. An Orten erhöhter Feldliniendichte, wie sie z.B. an Rissenden auf-

treten, kommt es zu höheren ohmschen Verlusten und folglich zu einer stärkeren Aufheizung. Lokale Erwärmungen sind in diesen Fällen mit Materialinhomogenitäten korrelierbar. Umfassende Untersuchungen erfolgten u.a. in den Arbeiten von Riegert [Rie07] und Vrana [VG05, Vra08].

KONVEKTIVE ERWÄRMUNG BZW. ABKÜHLUNG

Bei der konvektiven Erwärmung und Abkühlung erfolgt die Wärmeübertragung durch Teilchentransport. Dieser Mechanismus ist auf das Vorhandensein von Flüssigkeiten oder Gasen an der Grenzfläche zum Feststoff angewiesen. Durch Anströmen der Materialoberfläche z.B. mit Luft wird dem Prüfkörper je nach gewähltem Temperaturunterschied entweder thermische Energie hinzugefügt oder entzogen. Einsatzmöglichkeiten der Warmluftanregung beschreiben u.a. Wu [Wu96] und Goldammer [GH06], eine Anwendung der Kaltluftanregung ist in der Patentanmeldung EP1914542 [Eur08] beschrieben.

Für die thermografische Prüfung ist entscheidend, welche Temperaturdifferenzen an welchen Orten, zu welchen Zeiten und mit welcher Modulation durch die jeweilige Anregungsquelle realisiert werden. Diese Charakteristika müssen für jede Untersuchung prüfproblemspezifisch ausgewählt und angepasst werden, um hinsichtlich der Fehlererkennbarkeit optimale Wärmeflüsse zu induzieren. Die thermische Anregung von Prüfobjekten erfolgt entweder kontinuierlich, amplitudenmoduliert oder impulsartig.

Wärmeleitung /-dissipation

Nach der thermischen Anregung breitet sich in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften ein Wärmestrom in Körpern aus. Wichtige Materialparameter, die sich auf die Ausbreitung der Wärme auswirken, sind die Diffusivität α (Temperaturleitfähigkeit) und die thermische Effusivität e_{ff} (Wärmeeindringkoeffizient). Beide setzen sich aus der Wärmeleitfähigkeit κ , der spezifischen Wärmekapazität c_{therm} und der Dichte ρ zusammen, wie in Gleichungen 3.1 und 3.2 beschrieben. Während die Diffusivität beschreibt, wie schnell Temperaturunterschiede in Materialien ausgeglichen werden, ist die Effusivität ein Maß für die Wärme, die beim thermischen Kontakt zweier Medien übertragen wird. Die Effusivität ist eine wichtige Größe für thermische Grenzflächen. Sind zwei Körper miteinander in Kontakt oder liegen Materialbereiche innerhalb eines Körpers nebeneinander vor, entstehen Grenzflächen. Beim Durchgang eines Wärmestroms kommt es an diesen Grenzflächen zu Reflexionen, sofern die Effusivitäten der Materialien voneinander verschieden sind.

$$\text{Diffusivität} \quad \alpha = \frac{\kappa}{\rho \cdot c_{therm}} \quad (3.1)$$

$$\text{Effusivität} \quad e_{ff} = \sqrt{\kappa \cdot \rho \cdot c_{therm}} \quad (3.2)$$

Bei der Wärmeleitung handelt es sich um einen Diffusionsprozess. Wird die Temperatur zeitlich periodisch moduliert, bilden sich charakteristische Erwärmungsmuster im Körper aus. Aufgrund der zeitlichen und örtlichen Periodizität werden diese Erscheinungen als thermische Wellen betrachtet, die zuerst von Fourier und Ångström beschrieben wurden [Fou26, Ang53]. Die Theorie der thermischen Wellen wird für die Thermografie genutzt und dient als mathematische Grundlage für spezielle Auswertemethoden, wie beispielsweise von Busse und Maldague [BWK92, MGZ02] gezeigt wird.

Solche als thermische Wellen betrachteten Vorgänge werden im Material stark gedämpft. Spezifische Kenngrößen, die von Maldague [Mal01] definiert wurden, beschreiben die Eigenschaften dieser thermischen Wellen. Sie haben eine wellenlängenspezifische Ausbreitungsgeschwindigkeit ν_{therm} , welche neben der Temperaturleitfähigkeit von der Modulationsfrequenz der Anregung $\omega_{therm} = 2\pi f_{therm}$ abhängt:

$$\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit} \quad \nu_{therm} = \sqrt{2 \cdot \alpha \cdot \omega_{therm}} \quad (3.3)$$

Aufgrund der Dämpfung ergibt sich eine spezifische Diffusionslänge μ_{therm} , die auch als Funktion der Modulationsfrequenz und der Diffusivität ausgedrückt wird:

$$\text{thermische Diffusionslänge} \quad \mu_{therm} = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega_{therm}}} \quad (3.4)$$

Die thermische Wellenlänge λ_{therm} ist definiert als

$$\text{thermische Wellenlänge} \quad \lambda_{therm} = 2 \cdot \pi \cdot \mu_{therm} . \quad (3.5)$$

Die Wärmeausbreitung in dreidimensionalen Körpern wird durch die allgemeine Wärmeleitungsgleichung, auch Fourier-Gleichung genannt [IDW02, AP96], beschrieben. Mit ihr kann die Temperaturverteilung, die sich in einem Körper aufgrund von Wärmeleitungsvorgängen einstellt, berechnet werden. Anhand der Hauptsätze der Thermodynamik ergibt sich Gleichung 3.6, in der $T(x, y, z, t)$ die orts- und zeitabhängige Temperatur, $Q(x, y, z, t)$ externe und interne Wärmequellen oder -senken sind [CJ59]. In der allgemeinen Form sind die Parameter κ , ρ und c_{therm} orts- und temperaturabhängig, für homogene und isotrope Materialien und für kleine Temperaturspannen können und werden sie hier als konstant angenommen.

$$\kappa \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + Q = \rho \cdot c_{therm} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.6)$$

Eine Lösung der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung für den idealisierten Fall eindimensionaler Wärmeflüsse in halbbunendlichen Körpern zeigt die Gleichung 3.7 für sinusförmige Temperaturmodulationen [Bus05, FH98], wie sie bei Lockin-Methoden (s. Kap. 3.2.2) angewendet werden. Dabei beschreibt T_0 den initialen Wärmeunterschied verursacht durch eine äußere Wärmequelle (z.B. Halogenstrahler):

$$T(z, t) = T_0 \cdot e^{-\frac{z}{\mu_{therm}}} \cdot \cos\left(\frac{z}{\mu_{therm}} - \omega \cdot t\right) \quad (3.7)$$

Die impulsartige Erwärmung der Bauteiloberfläche, wie sie z.B. bei einer thermischen Anregung mittels eines Blitzlichtimpulses vorliegt, wird näherungsweise als Dirac Impuls in der Oberflächengrenzschicht des Bauteils betrachtet. Die zeitliche Temperturverteilung wird vereinfacht in Gleichung 3.8 beschrieben [IC05, CJ59], in der Q_0 die an der Oberfläche absorbierte Energie darstellt:

$$T(z, t) = T_0 + \frac{Q_0}{\sqrt{\kappa \cdot \rho \cdot c \cdot \pi \cdot t}} \cdot e^{-\frac{z^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}} \quad (3.8)$$

Infrarotabstrahlung und -detektion

Messtechnisch betrachtet basiert die Thermografie auf der Erfassung stationärer oder instationärer Infrarotabstrahlcharakteristiken, die jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes aussendet. Die Infrarotstrahlung wird mit Hilfe von Infrarotsensoren erfasst, um das räumliche und zeitliche Temperaturverhalten des Prüfobjektes auszuwerten. Die Infraroteinzelbilder oder -sequenzen bilden die Ausgangsbasis (Rohdaten) für die thermografische Bewertung.

Die Thermografie nutzt das elektromagnetische Spektrum zwischen dem sichtbaren Bereich ($< 800 \text{ nm}$) und den Mikrowellen ($> 1 \text{ mm}$). Aufgrund der spezifischen Absorption der Atmosphäre (Beispiel für eine Entfernung von 750 m siehe Abbildung 3.3) und der entsprechend verringerten Reichweiten einzelner Strahlungsanteile, kommen für die Nutzung in thermografischen Untersuchungen nach DIN 54190-3 [Deu06a] typischerweise Strahlungen in drei Wellenlängenbereichen in Frage:

- kurzwellige Infrarotstrahlung (*short infrared*) SW 0.8 - 2 μm
- mittlere Infrarotstrahlung (*mid wave infrared*) MW 2 - 5 μm
- langwellige Infrarotstrahlung (*longwave infrared*) LW 8 - 12 μm

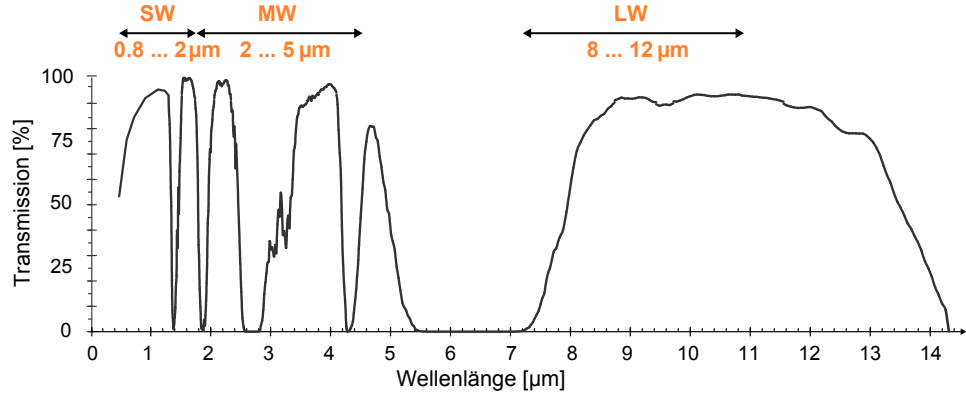


Abbildung 3.3: Spektrale Atmosphärentransmission (in Anlehnung an Albertz [Alb01] für eine Distanz von 750m) mit spektralen Fenstern im Infrarotbereich

Wie im Planck'schen Gesetz beschrieben, strahlen Objektoberflächenelemente dA eines idealen Strahlers richtungsabhängig ein ihrer Objekttemperatur entsprechendes elektromagnetisches Spektrum ab. Die spektrale Strahldichte L bei der Wellenlänge λ_{em} in den Halbraum (Raum- Ω und Polarwinkel β) beträgt

$$L_{\Omega\lambda_{em}}(\lambda_{em}, T) \cos(\beta) dA d\lambda d\Omega = \frac{2 \cdot h \cdot c_{vis}^2}{\lambda_{em}^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c_{vis}}{\lambda_{em} \cdot k_b \cdot T}} - 1} \cos(\beta) dA d\lambda d\Omega, \quad (3.9)$$

mit der Boltzmann-Konstante k_b , der Planck-Konstante h und der Lichtgeschwindigkeit c_{vis} . Die spektrale spezifische Ausstrahlung M_λ beschreibt die in den gesamten Halbraum abgegebene Strahlung:

$$M_{\lambda_{em}}(\lambda_{em}, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c_{vis}^2}{\lambda_{em}^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c_{vis}}{\lambda_{em} \cdot k_b \cdot T}} - 1} \quad (3.10)$$

Die über alle Frequenzen und Richtungen des Halbraumes integrierte Strahlung ist die spezifische Ausstrahlung M . Sie ist im Stefan-Boltzmann-Gesetz mit Hilfe der Stefan-Boltzmann-Konstante σ wie folgt mit der Temperatur verknüpft:

$$M(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (3.11)$$

Die Abbildung 3.4 veranschaulicht die Zunahme der integralen Strahlungsintensität über die Wellenlängen mit ansteigender Temperatur. Dieser Zusammenhang stellt die Basis dafür dar, um über die Erfassung der Infrarotabstrahlungsintensität auf die vorherrschende Temperatur und Temperaturänderungen an der Objektoberfläche zu schließen. Das Wien'sche Verschiebungsgesetz besagt, dass die Wellenlänge $\lambda_{em,max}$, bei der die größte

Strahlungsintensität vorliegt, sich mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen hin verschiebt.

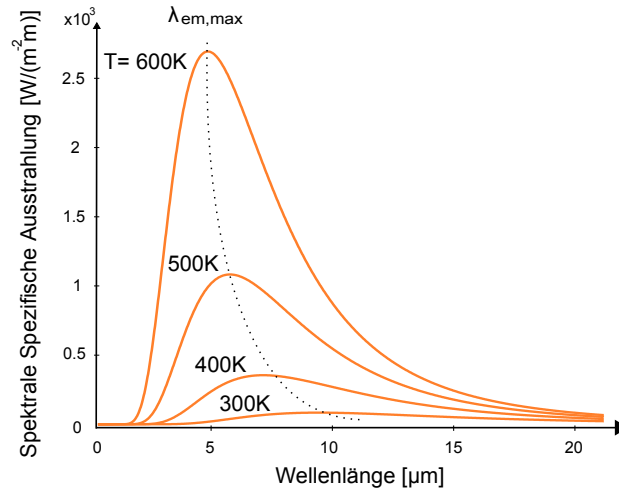


Abbildung 3.4: Planck'sche Strahlungsspektren bei verschiedenen Temperaturen

Reale Objekte besitzen selten die Eigenschaften eines idealen schwarzen Strahlers, so ergeben sich je nach Material- und Oberflächeneigenschaften abweichende Infrarotabstrahlcharakteristika. Jeder Körper wird mit einem spezifischen Emissionsgrad ϵ beschrieben (s. Gl. 3.12), der das Verhältnis der Objekttemperatur zur abgegebenen Strahlung angibt. Für ideale schwarze Strahler, deren Infrarotabstrahlung maximal ist, gilt $\epsilon = 1$. Als graue Strahler werden Körper bezeichnet, bei denen ϵ konstant und $0 < \epsilon < 1$ ist. Der Emissionsgrad ist typischerweise abhängig vom Material an sich, den Oberflächeneigenschaften, dem Betrachtungswinkel, der betrachteten Wellenlänge, der Temperatur, sowie zahlreicher weiterer variabler Größen mit geringer Bedeutung für das thermografische Ergebnis.

$$\epsilon(\text{Material}, \lambda_{em}, T, \text{Betrachtungswinkel}, \dots) = [0 \dots 1] \quad (3.12)$$

Wichtigste Auswirkung auf die thermografische Untersuchung ist, dass mit niedrigerer Emissivität des Prüfobjektes die erzielbare Signalintensität für die Auswertung sinkt. Die spezifische Ausstrahlung M_{gS} eines Körpers mit der Emissivität ϵ eines grauen Strahlers beträgt

$$M_{gS}(T) = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4. \quad (3.13)$$

Die für die Messung relevante, auf den Detektor auftreffende Energie, wird durch die Bestrahlungsstärke E und den Strahlungsfluss Φ pro Fläche, beschrieben:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \int_{\Omega} L \cos\beta \, d\Omega \quad (3.14)$$

Ein wichtiger Aspekt bei der Erfassung von Infrarotstrahlungsrohdaten ist der Einfluss von Störstrahlung. Die Ursprünge der Infrarotstrahlungsanteile, die bei einer Messung typischerweise auftreten, sind in Abbildung 3.5 skizziert (vgl. [Mal93]). τ_{atm} gibt den Transmissionsgrad der Atmosphäre an.

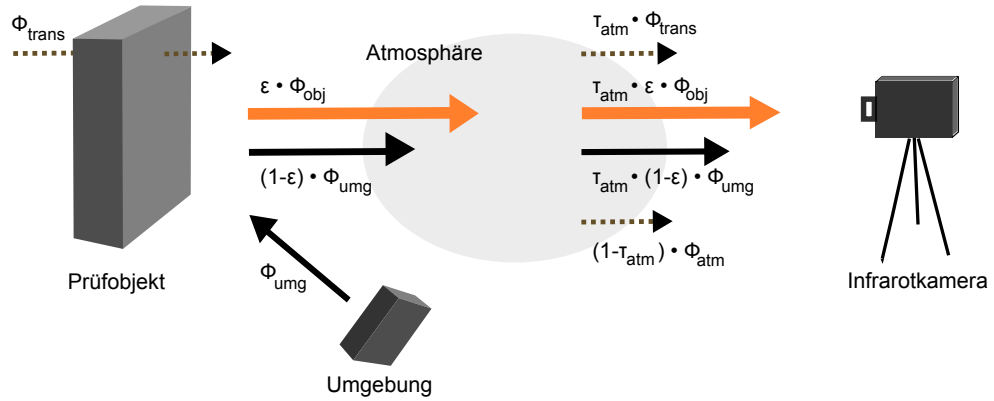


Abbildung 3.5: Strahlungsanteile bei der Erfassung von Infrarotsignalen

Die auf den Kameradetektor auftreffende Infrarotstrahlung Φ_{det} setzt sich zusammen aus der Eigenstrahlung des Prüfobjekts Φ_{obj} , bei (teil-)transparenten Materialien ggf. aus durch das Prüfobjekt transmittierte Strahlung Φ_{trans} , aus Störreflexionen an der Prüfobjektoberfläche aus der Umgebung Φ_{umg} und der Strahlung der Atmosphäre Φ_{atm} (s. Gl. 3.15).

$$\Phi_{det} = \underbrace{\tau_{atm} \cdot \epsilon \cdot \Phi_{obj}}_{\text{Eigenstrahlung Prüfobjekt}} + \underbrace{\tau_{atm} \cdot \Phi_{trans}}_{\text{Transmission Prüfobjekt}} + \dots \quad (3.15)$$

$$\underbrace{\tau_{atm} \cdot (1 - \epsilon) \cdot \Phi_{umg}}_{\text{Reflexionen Umgebung}} + \underbrace{(1 - \tau_{atm}) \cdot \Phi_{atm}}_{\text{Atmosphärenstrahlung}}$$

Da in der Regel mit geringen Entfernungen von Messsystem und Prüfobjekt sowie unter normalen Klimabedingungen gearbeitet wird, kann die Atmosphärenstörstrahlung bei

der Prüfung meist vernachlässigt und die Transmission durch die Atmosphäre als ideal angenommen werden. Das Messsignal der Infrarotkamera Φ_{kam} kann für opake Prüfobjekte in guter Näherung wie folgt beschrieben werden:

$$\Phi_{kam} = \epsilon \cdot \Phi_{obj} + (1 - \epsilon) \cdot \Phi_{umg} \quad (3.16)$$

Das erfasste Signal bei der Thermografieuntersuchung ist eng mit dem Emissionsgrad des Materials verknüpft. Idealerweise liegt dieser bei einer Messung nahe 1. Je niedriger der Emissionsgrad des Prüfobjektes ist, desto höher ist der Anteil an störenden Reflexionen aus der Umgebung, und die Realisierung einer aussagekräftigen Messung gestaltet sich zunehmend schwieriger.

3.2.2 Auswerteverfahren

Als Rohdaten werden mit einem Detektorenarray aus Infrarotsensoren pixelweise die zeitlichen Verläufe der Strahlungsintensitäten erfasst. Abhängig von der Aufnahme­frequenz, der Aufnahmedauer und der Detektorgröße entstehen Sequenzen aus N Infrarotbildern mit $x \cdot y$ Pixeln (s. Abb. 3.6), die die Orts- und Zeitinformationen für die anschließende Analyse bereitstellen. Die Signaldiskretisierung erfolgt pro Pixel T_{xy} mit einem Zeitintervall Δt im gewählten Zeitbereich $w(t)$, in dem die Messwerte aufgenommen werden.

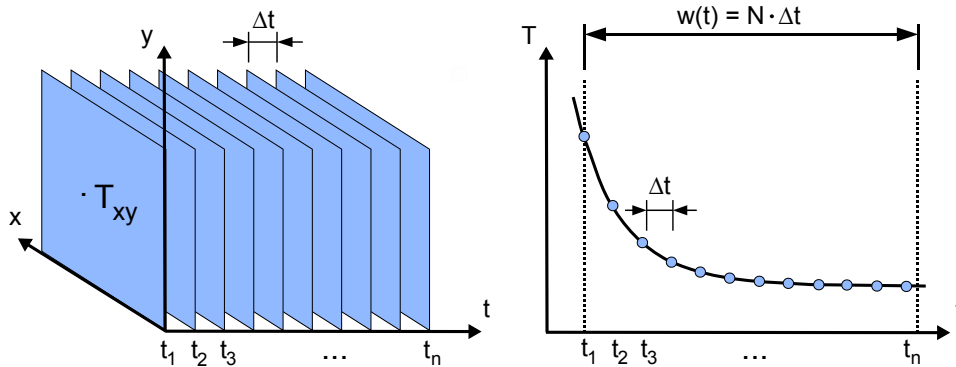


Abbildung 3.6: Thermogramm-Sequenzen bei der Datenerfassung

Nach der Rohdatenerfassung können Filtertechniken die Signalqualität verbessern und die Datenmengen reduzieren. Speziell in der Thermografie werden z.B. Filter eingesetzt, bei denen die detektierten Signale an Polynome aus e- bzw. ln-Funktionen gefittet und rekonstruiert werden [She01, MGZ02]. Temperaturabkühlverläufe lassen sich in der Regel wahrheitsgetreu abbilden, so dass nahezu ohne Informationsverlust eine starke Reduktion

der Datenmenge erreicht wird. Zudem kann aufgrund der Wirkung als Tiefpaßfilter mögliches Rauschen unterdrückt werden. Weiterführende Grundlagen zu logarithmischen Filtern siehe Shepard und Benitez [SHLA05, SHL04, BICL⁺06].

Die Wahl der Analyseverfahren hängt davon ab, ob ein aktives oder passives Verfahren gewählt wird und welches Abstrahlverhalten bzw. welcher Oberflächenkontrastverlauf für die Merkmalerkennung erwartet wird. Eine Abfolge etablierter Signalverarbeitungs- und Analyseverfahren zeigt die Abbildung 3.7.

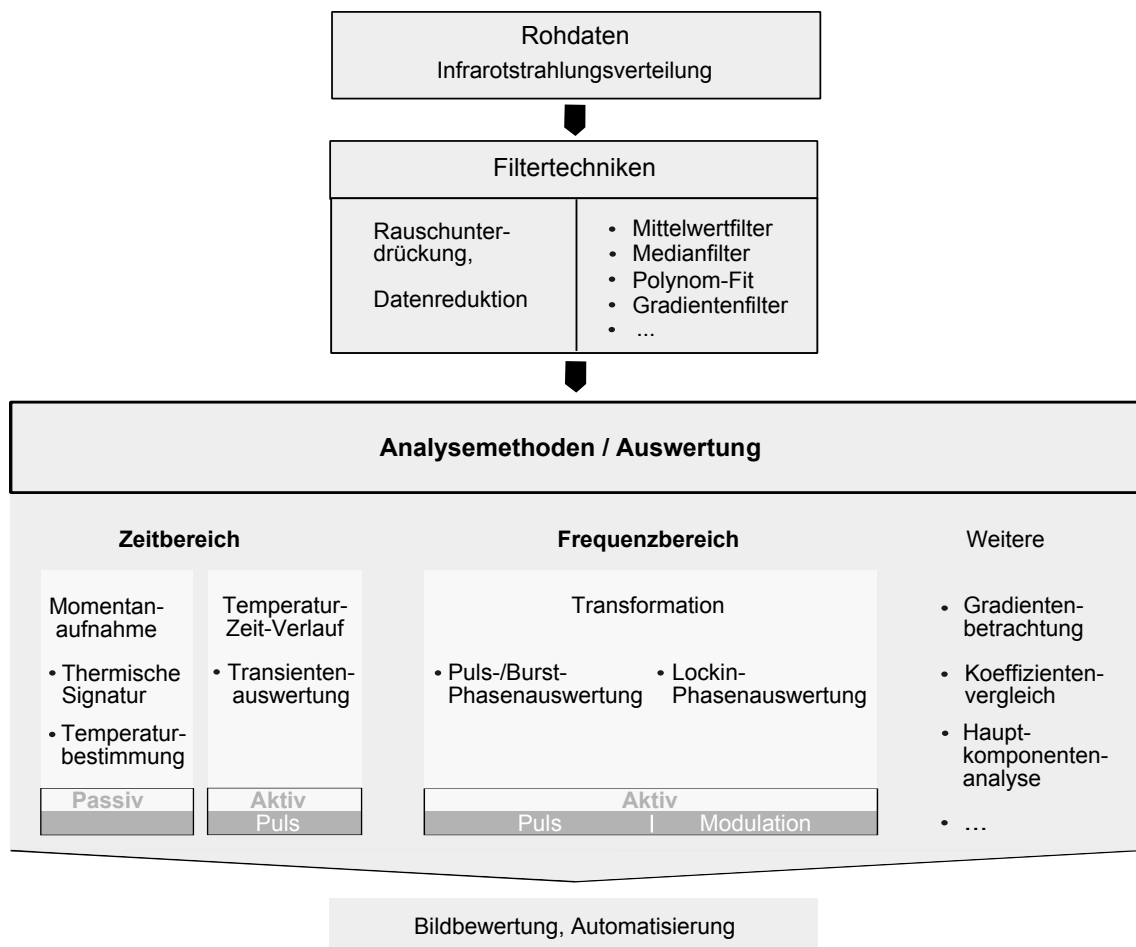


Abbildung 3.7: Datenfluss und Analysemethoden in der Thermografie

Gängige Analysen der Daten werden im Zeit- oder im Frequenzbereich vorgenommen [Net05], wie sie nachfolgend beschrieben werden. In die abschließende Bildbewertung können Algorithmen wie z.B. Schwellwertverfahren einbezogen werden, um die Bewertungsqualität zu verbessern und ggf. automatisierte Auswertungen zu stützen.

Auswertung im Zeitbereich

Auswertungen im Zeitbereich erfolgen anhand von Temperatur-Zeit-Verläufen (Transientenauswertung) oder von Momentanaufnahmen (Betrachtung der thermischen Signatur, Temperaturbestimmung), wobei örtliche und ggf. zeitliche Auffälligkeiten betrachtet werden. Die erfasste Infrarotstrahlung wird softwareseitig meist unter Annahme eines einheitlichen Emissionsgrades umgerechnet und als Temperatursignal weiterverarbeitet, so dass der absolute Wert der vorliegenden Emissivität sowie dessen Schwankung direkten Einfluss auf die Messung haben. Die Bestimmung absoluter Objekttemperaturen setzt die Kenntnis der Emissionsgrade betreffender Oberflächenbereiche voraus und allgemein gilt, dass es besonders bei geringen Emissionsgraden und niedrigen Objekttemperaturen zu Störungen durch Umgebungsreflexe kommt (vgl. Abb. 3.5).

Während bei der passiven Thermografie vorrangig Temperaturzustände beobachtet werden, erfolgt bei der aktiven Thermografieprüfung eine Analyse charakteristischer Temperaturverläufe infolge einer thermischen Anregung. Grundlage für eine klassische Auswertung ist die impulsartige Erwärmung der Prüfobjektoberfläche, der sich typischerweise die in Abbildung 3.8(a) gezeigte Abkühlung anschließt.

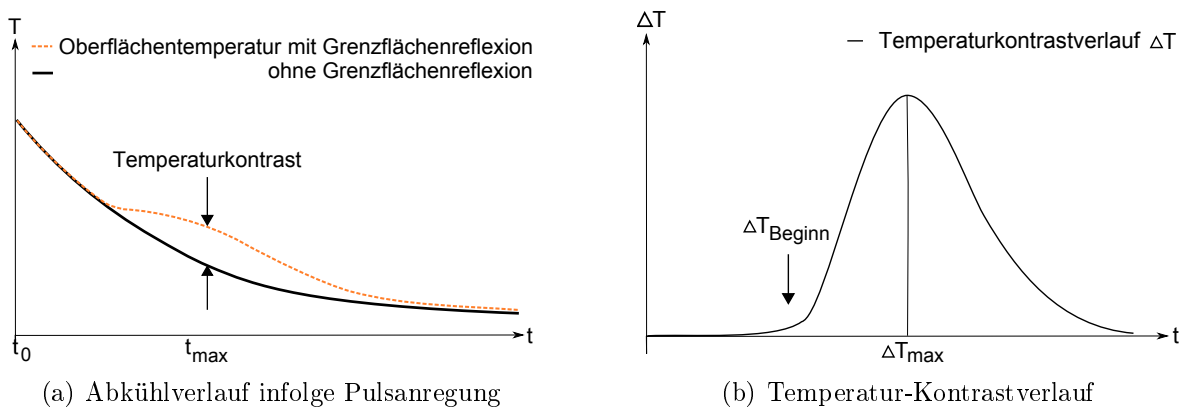


Abbildung 3.8: Bewertungsgrundlage bei der Transientenauswertung

In den Abkühlverläufen zeigen sich Unterschiede zwischen ungestörten Materialbereichen und solchen mit inneren Grenzflächen. Aufgrund einer verringerten Wärmeableitung an Fehlstellen kommt es zu einem Wärmestau [MGS03], der sich bei ausreichender Größe in einem bestimmten Zeitfenster als temporärer Wärmekontrast (s. Abb. 3.8(b)) an der Oberfläche abzeichnet [MNVW98]. Die Zeitverzögerung und der Kontrast werden primär von den Eigenschaften des Materials und der Ausdehnung sowie der Lage der Grenzflächen bestimmt. Dieses Verfahrensprinzip, auch Impuls-Video-Thermografie genannt, beschreiben u.a. Walle und Netzelmann [WDMN93, Wal94, NWKM99, NWK04].

Auswertung im Frequenzraum

Die Basis für Auswertungen im Frequenzbereich sind Temperaturmodulationen, die sich aufgrund lokal variierender Materialeigenschaften verschieden schnell im Material fortpflanzen. Inhomogenitäten bzw. Defekte lassen sich anhand veränderter Amplituden- und Phaseninformationen detektieren, die mit Hilfe einer Fourier-Transformation aus dem Infrarotsignal gewonnen werden (vgl. [Vre03]). Bei der Transformation wird der zeitliche Verlauf der Temperatur $T(N)$ über die Anzahl von N Thermogrammen in jedem Pixel in eine Frequenzfolge F_{ω_k} überführt, die einen Vektor aus $N/2$ Elementen darstellt. Aus der Zeitschrittlänge Δt zwischen den Bildern und der für die Auswertung gewählten Anzahl N an Thermogrammen ergeben sich mit der Zählvariablen $k = 1, 2, 3, \dots$ aus Gleichung 3.17 die Auswertefrequenzen f_{therm_k} [Mal01]. Niederfrequente Anregungen dringen tiefer ins Material ein als höherfrequente, weshalb die Informationen zu den Materialeigenschaften für verschiedene Temperaturmodulationsgeschwindigkeiten aus verschiedenen Tiefenlagen stammen (vgl. [MGZ02]).

$$f_{therm_k} = \frac{k}{N \cdot \Delta t} \quad (3.17)$$

Für die Auswertung im Frequenzraum werden verschiedene Modelle der thermischen Anregung angenommen, die sich in ihrer Anregungsform unterscheiden. Die aktiven Thermografiemethoden können wie folgt unterteilt werden:

- I. Lockin-/Modulations-Thermografie
- II. Puls-Phasen-Thermografie
- III. Burst-Phasen-Thermografie

Der Lockin-Thermografie liegt eine periodisch oft sinusförmig modulierte Amplitudenmodulation mit einer bestimmten Frequenz zugrunde, und die Temperaturantwort des Prüfobjekts wird bei genau dieser Frequenz ausgewertet [BWK92, Wu96]. Ausgehend von einer impulsartigen Erwärmung wird bei der Puls-Phasen-Thermografie mit dem Fourieransatz die Temperaturantwort mathematisch in eine Vielzahl von Wellen aufgeteilt, so dass Auswertungen bei verschiedenen Frequenzen möglich sind [MM96]. Bei der Burst-Phasen-Thermografie wird eine breitbandige Anregung (Rechteckimpuls) mit einer Pulsbreite von typischerweise einigen hundertstel bis zu einigen Sekunden vorgenommen und so ein Wellenzug mit endlicher Breite (Burst) induziert [Bus05, DB01, Rie06].

Die verfügbaren Frequenzgehalte im thermischen Antwortspektrum des Prüfkörpers hängen von der Impulshöhe und -breite der Anregung ab (vgl. [MGZ02]). Diesen Zusammenhang zeigt die Frequenzanalyse zweier Rechteckimpulse in Abbildung 3.9 schematisch

auf. Mit länger andauernder Erwärmung wird das Frequenzspektrum schmäler und die eingebrachte Energie konzentriert sich auf niedrigere Frequenzen. Um vergleichbare Amplituden im Frequenzraum zu erreichen, sind bei schmalen Impulsen wesentlich höhere Amplituden im Zeitbereich erforderlich, die eine optimale Auswertung ermöglichen.

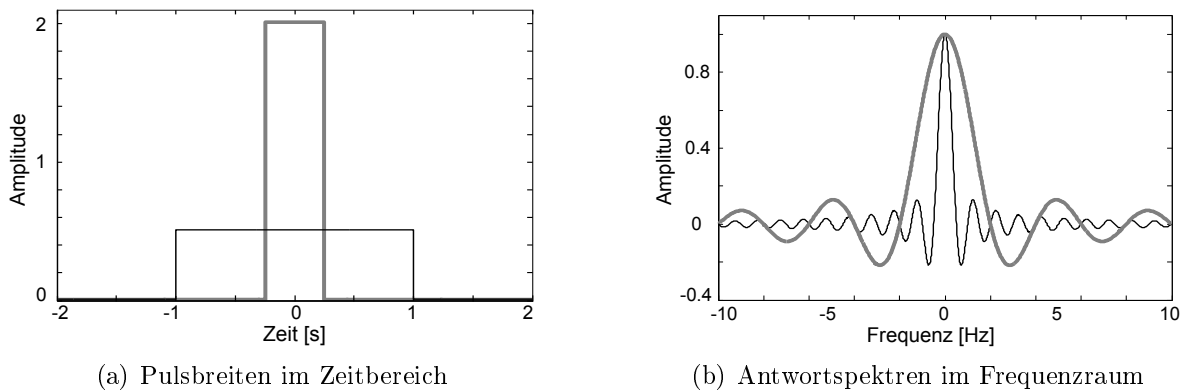


Abbildung 3.9: Frequenzanalyse von Rechteckimpulsen

Sind die Parameter der Phasenauswertung optimal gewählt, werden nur Signalanteile mit Informationsgehalten zu den Prüfmerkmalen verarbeitet. Störfaktoren wie inhomogene Infrarotabstrahlung aufgrund von Emissionsgradschwankungen werden mathematisch eliminiert, so dass sich das Verfahren z.B. gegenüber Oberflächenverschmutzungen verhältnismäßig robust verhält. Für den Transfer der thermografischen Prüftechnik vom Laboreinsatz in Richtung Serienüberwachung und Automatisierung stellt die erhöhte Robustheit einen großen Vorteil dieser Auswertemethode dar (vgl. [MPWB99]).

Weitere Analysemethoden

Andere Analysemethoden legen weitere Vorgehensweisen in der Signalverarbeitung zugrunde. Bei der Koeffizientenbetrachtung nach Shepard [She01], die ebenfalls im Zeitbereich erfolgt, werden die Abkühlverläufe mittels eines Polynoms auf Basis von \ln -Funktionen nachgebildet. Für die Analyse werden nur noch die Koeffizientenbilder miteinander verglichen, was zu einer enormen Datenreduktion führt. Die Hauptkomponentenanalyse gründet auf speziell ausgewählten Basisfunktionen, welche die realen Abkühlverläufe bestmöglich beschreiben. Bewertet werden einzelne Hauptkomponenten dieser Funktionen, wie es z.B. von Marinetti [MGB⁺04, Mar06] beschrieben wird. Eine weitere Möglichkeit der Bewertung von Materialeigenschaften ist die Beurteilung charakteristischer Verteilungen von Temperaturgradienten [BNDG04, KNJ03].

3.2.3 Simulationsmethoden

Anwendungen

Als Ergänzung zum thermografischen Experiment wird der Wärmefluss im Inneren von Prüfkörpern mit der finiten Elemente Methode (FEM) simuliert. Die Simulation dient z.B. der Überprüfung von Auswertalgorithmen oder zeigt mögliche Optimierungspotentiale auf. Diverse kommerziell erhältliche Simulationssoftwarepakete¹ bieten umfangreiche Möglichkeiten für eine modellhafte Betrachtung der bei der thermografischen Prüfung ablaufenden Vorgänge.

Simulationen werden für ein breites Spektrum an Wärmeeinträgen wie z.B. Blitz-, Laser-, Induktionsanregung durchgeführt und für einfache Prüfkörpergeometrien im 2D-Raum bereits als Dienstleistung angeboten [Car]. Die von Vavilov entwickelte Software ThermoCalc-3D™Pro ermöglicht darüber hinaus, Abschätzungen auch für 3D-Objekte durchzuführen [Vav98].

Bei den meisten veröffentlichten Arbeiten über die FEM-Simulation thermografischer Prüfungen handelt es sich um Grundlagenuntersuchungen, die für das nähere Verständnis der Abläufe bei z.B. neuen Anregungsverfahren genutzt werden. Hierzu sind Arbeiten zur Ultraschallanregung von Bilgram [Bil05] und zur Induktivanregung von Zenzinger, Carl, Bamberg und Oswalt-Tranta [ZBD04, CZ05, BNZ05, OTWO06] zu nennen. Die Weiterentwicklung von Auswertalgorithmen zur Werkstoffcharakterisierung ist ein bedeutendes Thema der aktuellen Forschung [KNJ03, PW98].

Mathematische Beschreibung des thermischen Problems

Voraussetzung für die Simulation ist ein geeignetes Modell des Prüfproblems. Für die Abbildung der Vorgänge der Thermografieprüfung sind viele Idealisierungen vorzunehmen, wobei nach physikalischen Prinzipien abstrahierte Prüfabläufe zu umfangreichen Gleichungssystemen zusammengeführt werden. Weil die analytische Lösung aufgrund der Komplexität oft nicht durchführbar ist, werden FEM-Methoden und numerische Näherungsverfahren eingesetzt, die die Bearbeitung großer Berechnungsumfänge zulassen. Je nach Realitätstreue des Modells und Eignung der Lösungsmethode sind Vorhersagen zu Ergebnissen einer realen Prüfung möglich.

Für die mathematische Beschreibung der Thermografieprüfung sind die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen physikalischen Vorgänge, beginnend mit der thermischen Anregung des Prüfkörpers durch verschiedene Quellen, gefolgt von der Wärmeausbreitung im Prüfkörper durch Wärmeleitung, sowie der abschliessenden Abgabe der Wärme durch Wärmestrahlung so zu formulieren, dass sie in die Gleichungssysteme einfließen können. Die

¹z.B. COMSOL Multiphysics™, ANSYS®

Temperaturausgleichsvorgänge im Inneren des Prüfkörpers werden durch die allgemeine Wärmeleitungsgleichung (s. Gl. 3.6) beschrieben. Thermische Anregungen können entweder als innere Wärmequelle oder -senke berücksichtigt werden oder über die Definition als Randbedingung. In Form von Randbedingungen gehen auch die experimentelle Vorgehensweise und die Umgebungseinflüsse in das Modell ein, die Ausgangssituation zur Zeit t_0 wird mit Anfangsbedingungen festgelegt.

Mögliche Anfangs- und Randbedingungen lassen sich folgendermaßen kategorisieren, interpretieren und mathematisch beschreiben [MN07]:

Anfangsbedingung

beschreibt die Temperaturverteilung an jeder Stelle des Prüfkörpers und der Umgebung zum Anfangszeitpunkt t_0 (meist $t_0 = 0$)

$$T(x, y, z, t = t_0) = T_0(x, y, z)$$

Randbedingung 1. Art - Dirichlet Randbedingung

legt die Temperatur am Rand bspw. bei $x = x_0$, als Funktion der Zeit und des Ortes fest

$$T(x = x_0, y, z, t) = T_0(y, z, t)$$

Randbedingung 2. Art - Neumann Randbedingung

gibt die Wärmestromdichte am Rand bspw. bei $x = x_0$ als Funktion der Zeit und des Ortes vor und ergibt sich aus:

$$\dot{q}(x = x_0, y, z, t) = -\kappa \cdot \left. \frac{\delta T(x, y, z, t)}{\delta x} \right|_{x=x_0}$$

Ein Sonderfall ist die Isolation: $\dot{q}(x = x_0) = 0 \Leftrightarrow \left. \frac{\delta T}{\delta x} \right|_{x=x_0} = 0$

Randbedingung 3. Art - Newton'sche oder Robin'sche Randbedingung

beschreibt den konvektiven Wärmeübergang an der Randfläche des Festkörpers bei z.B. $x = x_0$ zu einem Fluid der Temperatur T_F mit dem Wärmeübergangskoeffizienten h und ergibt sich aus:

$$\dot{q}(x = x_0, t) = h \cdot [T_F - T(x = x_0, t)] = -\kappa \cdot \left. \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right|_{x=x_0}$$

Randbedingung 4. Art - Stefan'sche Randbedingung (Nichtlinear)

gibt den Wärmeübergang an der Oberfläche durch Strahlung in die Umgebung mit der Temperatur T_U vor; die von einem Körper abgestrahlte Wärmestromdichte ergibt sich für schwarze Strahler mit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ aus:

$$\dot{q}(x = x_0, t) = \sigma \cdot [T(x = x_0, t)^4 - T_U^4] = -\kappa \cdot \left. \frac{\delta T(x, t)}{\delta x} \right|_{x=x_0}$$

Mathematisch handelt es sich bei der Behandlung thermografischer Prüfaufgaben um die Lösung von Anfangs- und Randwertproblemen der instationären Wärmeleitungsgleichung. Nähere Erklärungen zu den theoretischen Zusammenhängen gibt Lewis [LNS04].

Gleichungssystem und Diskretisierung

Zur Aufstellung der Matrix der Ausgangsgleichungen für die finite Elemente Berechnung wird das Prüfobjekt in eine Vielzahl kleinster Elemente unterteilt. Bei der in dieser Arbeit verwendeten Software COMSOL Multiphysics™ werden standardmäßig Dreiecks- und Tetraederelemente zur örtlichen Diskretisierung der Gebiete in 2D bzw. in 3D verwendet, die das sogenannte Netz bilden. Die Feinheit des Netzes hängt vom gewählten Abstand der Knotenpunkte ab. Die Interpolations- oder Formfunktion der Elemente wird ausgewählt, um mit deren Hilfe die Variation einer Feldgröße, hier des Temperaturfeldes, über ein Element zu beschreiben. In jedem Knotenpunkt bzw. Element werden Differentialgleichungen zum Wärmeleitverhalten des Prüfkörpers aufgestellt, und die aus den Gleichungen entstehende Gesamtmatrix ist unter Berücksichtigung der vorliegenden Anfangs- und Randbedingungen zu lösen.

Für die Lösung stationärer Fragestellungen sind dies häufig direkte Löser wie z.B. das Gauß-Verfahren, welches zeitaufwändige Eliminationsverfahren zur Lösung der aufgestellten Gleichungsmatrizen verwendet. Die Herangehensweise an instationäre Probleme wird in der Regel mit iterativen Lösern realisiert, die zu Näherungslösungen führen. Es wird eine zeitliche Diskretisierung vorgenommen, die durch die Wahl der Zeitschrittweite in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der betrachteten Vorgänge festgelegt wird, wobei die Anzahl der Iterationsschritte die Güte der Näherung bestimmt.

Weiterführende theoretische Erläuterungen geben Zienkiewicz und Klein [Zie71, Kle03].

Genauigkeit von Simulationsergebnissen

Die FEM-Methode ist ein leistungsfähiges numerisches Verfahren der Ingenieurwissenschaft. Sollen die Ergebnisse der Berechnung mit dem Verhalten von Körpern bzw. Systemen gut übereinstimmen, müssen folgende Punkte sorgfältig betrachtet werden:

- Wahl der Netzfeinheit
- Eignung des gewählten Elementtyps und Formfunktion
- Numerische Genauigkeit der Rechnung
- Exaktheit der verfügbaren Werkstoffdaten
- Korrektheit der Rand- und Anfangsbedingungen

Bei der Vernetzung des Körpers ist sowohl die Feinheit der Vernetzung als auch die Art der gewählten Elemente (Typ und Formfunktion) wichtig für die Qualität der Berech-

nung. Der Rechenaufwand und die Genauigkeit der Lösung müssen stets gegeneinander abgewägt werden. Inwieweit der Grad der Vernetzung zugunsten der Rechenzeiten reduziert werden kann, steht in engem Zusammenhang mit dem gewählten Modell. Z.B. können eng begrenzte Temperatursprünge mit örtlich groben Vernetzungen nicht abgebildet werden. Eine optimale Anpassung des Elementtyps (z.B. Stab-, Dreiecks-, Viereckselemente) kann die Ergebnisqualität bei gleichbleibender Vernetzung erhöhen. Komplizierte Geometrien werden häufig aus Dreieckselementen aufgebaut, weil im Vergleich zu Viereckselementen der Rand der Geometrie besser vernetzt werden kann. Desweiteren kann der Polynomgrad der Ansatzfunktion erhöht werden, um die Genauigkeit zu erhöhen. Lineare Elemente können durch quadratische ersetzt werden, so dass mit mehr Freiheitsgraden genauere Approximationsergebnisse erzielt werden können. Das Materialverhalten kann bei den kleinen in der Thermografie auftretenden Temperaturunterschieden als quasi linear angenommen werden. Für die Beschreibung von linearem Materialverhalten eignen sich lineare Elementtypen, und höhere Polynome in der Formfunktion sind in der Regel nicht erforderlich. Bei speziellen Anregungsverfahren können sie jedoch hilfreich sein. Limitierender Faktor ist dann die Rechengeschwindigkeit und der Hauptspeicher des verwendeten Rechners. Auf die Methoden der numerischen Berechnung, die für verschiedene Problemstellungen noch unterschiedliche Beiträge zum Berechnungsfehler hinzufügen, wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen und auf einschlägige Quellen [Zie71], [MG97], [KW08] verwiesen.

Neben den methodischen und numerischen Verbesserungsmöglichkeiten sind die verfügbaren Werkstoffdaten ein wichtiger Aspekt. Die Dichte ρ , die spezifische Wärmekapazität c_{therm} und die Wärmeleitfähigkeit κ sind Eingangsgrößen bei der Berechnung. Die Standardwerte der Werkstoffdaten sind experimentell bestimmt und zum Teil mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Die Rand- und Anfangsbedingungen, mit denen das Prüfproblem abgebildet wird, beeinflussen je nach Vereinfachung und Realitätstreue das Ergebnis mehr oder weniger stark.

3.3 Anwendungen und Möglichkeiten der Thermografie

Die Thermografie im industriellen Umfeld entwickelt sich rasant, nicht zuletzt weil die Möglichkeiten für ihren Einsatz in Produktion und Labor immer intensiver betrachtet werden. Die rapide Weiterentwicklung von Prüfgeräten und Auswertalgorithmen bei gleichzeitig sinkenden Kosten für Kamerasysteme haben das Anwendungsspektrum der Thermografie in den letzten Jahren enorm erweitert und dem Einsatz der Methoden eine hohe wirtschaftliche Bedeutung gegeben. Es stehen zahlreiche Verfahrensmodifikationen zur Verfügung, deren Funktionsprinzipien in Kapitel 3.2 gezeigt sind.

Erste industrielle Thermografieanwendungen sind vermehrt in der Luft- und Raumfahrtbranche zu finden. Dort werden besonders hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit

der eingesetzten Komponenten gestellt. Für die Absicherung der Produktqualität muss deshalb ein entsprechender Aufwand für die Entwicklung neuer Prüfverfahren betrieben werden. Eine bereits etablierte Applikation ist bspw. die Lockin-Thermografieprüfung an Verklebungen von Flugzeugstrukturen, wie sie u.a. zur Flugzeuginspektion eingesetzt wird [Wou07b]. Hohe Potentiale zeigt die Lockin-Thermografie auch für die Prüfung von Delaminationen und Impactschäden an Komponenten aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) [WZSB98, Zwe00, RZDB04].

Mit der Entwicklung von geeigneten Verfahren für die Prüfpraxis verbreiten sich neuartige Prüfkonzepte im industriellen Umfeld. Dies zeigen z.B. die Blitzimpuls-, die Heißluft- und die Ultraschall-Thermografieprüfung an Turbinenschaufeln, die im Energiesektor bereits als Serienprüfung integriert sind [HZS⁺03, Hie05]. Beim Spiegeln bekannter Anwendungen auf die Bedarfssituation der Automobil- und Zulieferindustrie lassen sich eine Vielzahl von Applikationsfeldern ausmachen [SA05]. Aktuelle Fragestellungen und neue Potentiale der Thermografie, die Ergebnis einer Bestandsaufnahme mit besonderem Fokus auf den Karosseriebereich sind, werden in Abbildung 3.10 aufgezeigt.

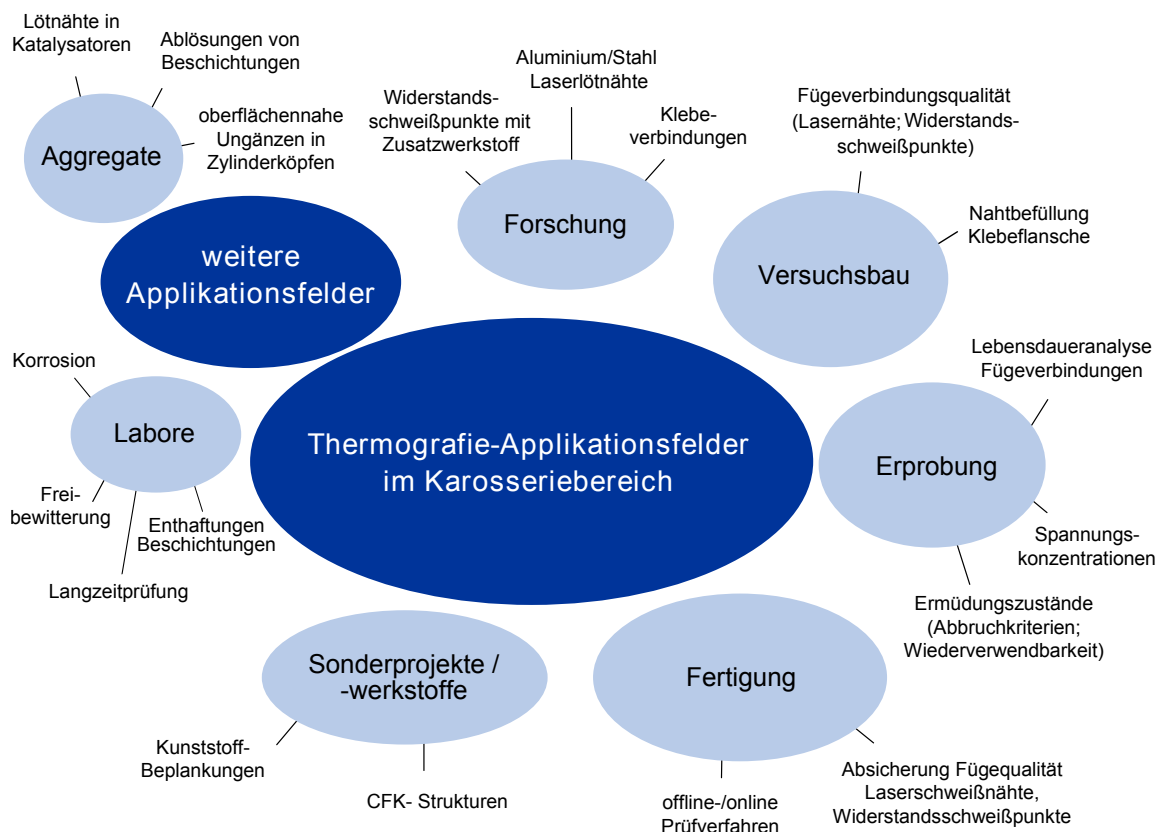
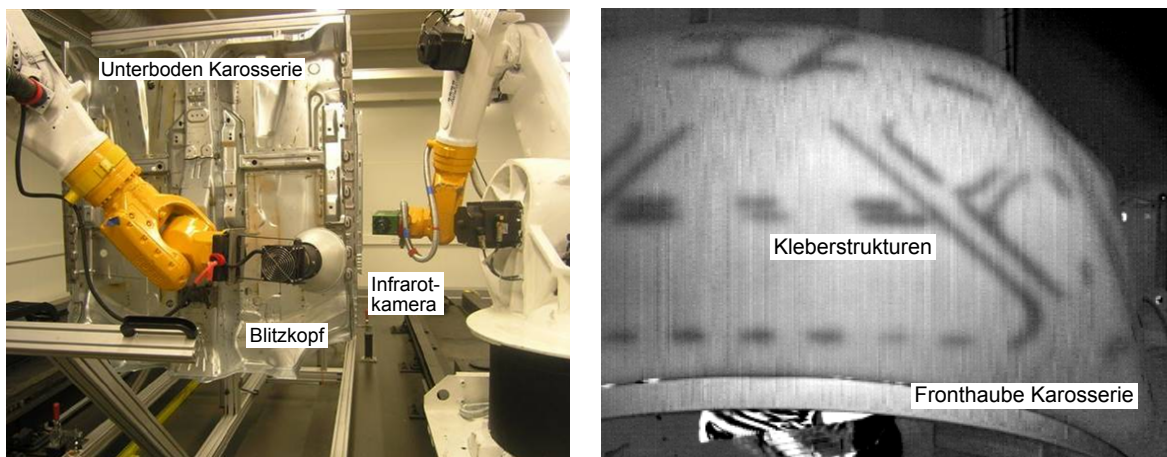


Abbildung 3.10: Neue Applikationsfelder der Thermografie

Bislang haben nur wenige Prüfkonzepte in der Automobilindustrie Anwendungsreife für den Einsatz in der Serienfertigung erlangt. Im Karosseriebau wird die Thermografie z.B. zur Serienüberwachung der Anbindungsqualität von Laserschweißnähten eingesetzt [Wou07a], wie es in Abbildung 3.11(a) gezeigt ist. Eine Prüfung, die unter Fertigungsbedingungen noch nicht im gewünschten Umfang genutzt werden kann, ist die Detektion von Karosseriekleber. Über die Lage von Dickschichtverklebungen hinter homogenen Blechstrukturen sind im Labor bereits gute Aussagen möglich (s. Abb. 3.11(b)). Begonnene Prüfverfahrensentwicklungen sind die Erkennung von Verklebungen an komplexen Strukturen, die Durchmesserbestimmung von Widerstandsschweißpunkten und die Risserkennung an komplexen Bauteilen. Hier bedarf es noch einer Vielzahl an grundlegenden Untersuchungen, Anpassungen und Weiterentwicklungen der verfügbaren Verfahren mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung, bis eine Umsetzung in die Serie erfolgen kann.



(a) Serienanwendung - Laserschweißnahtprüfung im Karosseriebau (Quelle: Auto 5000 GmbH) (b) Laboranwendung - Kleberdetektion hinter Karosserieblech an einer Fronthaube

Abbildung 3.11: Industrielle Anwendungen der Thermografie

Die Qualifizierung eines Prüfkonzeptes für den Serieneinsatz erfordert umfassendes Wissen über die Fähigkeiten des Verfahrens und dessen Einflussfaktoren. Um diese mittels einer praktischen Erprobung feststellen zu können, sind Referenzteile erforderlich, die als Grenzmuster für minimal zu erkennende Fehlergrößen dienen. Idealerweise werden diese aus der laufenden Serie entnommen. Können keine Teile bereit gestellt werden, wird in der Regel auf Musterkörper mit künstlich nachgebildeten Fehlern zurückgegriffen.

Typische Probleme aus der Praxis sind z.B. inhomogene Emissivitätsverteilungen auf Bauteiloberflächen, die das Prüfergebnis empfindlich stören können. Emissivitätsunterschiede resultieren aus Werkzeugeindrücken oder Verschmutzungen, die innerhalb der

Fertigungsprozesse oft nicht zu vermeiden sind. Diese Herausforderung gilt es für die Entwicklung robuster Auswertemethoden für den Einsatz unter realen Bedingungen im Karosseriebau anzugehen. Die Ausweitung der eingesetzten Thermografiemethoden zur Qualitätsüberwachung der Laserschweißnähte auf die Prüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen stellt eine lang angestrebte Weiterentwicklung dar, zu der es viele abgeschlossene und laufende Aktivitäten gibt [SCPZ98],[THR03],[SM00].

Im Spannungsfeld zwischen dem Bedarf an Prüflösungen auf der einen Seite und den Möglichkeiten der Thermografie auf der anderen Seite offenbaren sich noch zahlreiche unerschlossene Potentiale. Dafür müssen Verfahrenskonfigurationen sorgfältig ausgewählt und auf das jeweilige Prüfproblem angepasst werden.

3.4 Normative Anforderungen an zerstörungsfreie Prüfverfahren

So wie alle im Automobilbau eingesetzten Prüfverfahren technischen, wirtschaftlichen und normativen Vorgaben unterliegen, so ist auch der Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren an die Erfüllung verschiedener Voraussetzungen geknüpft. Die Anforderungen sind aus Regelwerken des Qualitätsmanagements abzuleiten. Das normative Umfeld, wie es sich für den industriellen Einsatz zerstörungsfreier Prüfungen darstellt, zeigt Abbildung 3.12. Die hier ausgewählten Fachnormen und Regelwerke werden im Anhang A in Bezug zu den spezifischen Forderungen, denen sich zerstörungsfreie Prüfverfahren im Rahmen von Qualitätsmanagementsystemen stellen müssen, dargestellt. Die Schriften beziehen sich zunächst auf Prüfprozesse im Allgemeinen wie bspw. die DIN EN 10012 [Deu04b], der VDA Band 5 geht dahingegen nur auf geometrische Prüfprozesse ein. Die Inhalte sind mit einigen Anpassungen auf die Besonderheiten der ZfP übertragbar. Zusammengefasst ergibt sich die Forderung, einen Eignungsnachweis von Messsystemen für deren Einsatz zu führen. Dies spielt eine wichtige Rolle für die Entwicklung von Prüfverfahren bzw. bei der Erschließung neuer Anwendungsgebiete z.B. aus Kapitel 3.3. Für die Anwendung nicht normativ geregelter Verfahren ist nach DIN EN ISO/IEC 17025 [Deu05d] die Durchführung eines Eignungsnachweises für die vorgesehene Anwendung, eine sogenannte Validierung, vorgeschrieben.

Die Begriffe Validierung und Verifizierung werden nicht einheitlich verwendet. Eine Erörterung der Begrifflichkeiten wurde von Wessels [Wes99] vorgenommen. Verifizieren heißt, die Richtigkeit nachweisen, wohingegen Validieren gültig machen bedeutet. Die Verifizierung ist als Bestandteil der Validierung zu sehen, welche den umfassenden Nachweis beschreibt, dass festgelegte Forderungen erfüllt werden. In einigen Regelwerken werden beide Aspekte übergreifend auch als Qualifizierung bezeichnet, so dass im Folgenden die Validierung und die Qualifizierung eine gleichwertige Bedeutung tragen sollen.

3.4 Normative Anforderungen an zerstörungsfreie Prüfverfahren



Abbildung 3.12: Normatives Umfeld für zerstörungsfreie Prüfverfahren

Speziell für die Qualifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren wurde der DIN-Fachbericht CEN/TR 14748 „Zerstörungsfreie Prüfung - Vorgehensweise zur Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen“ [Deu04c] erarbeitet. Die erforderlichen Aktivitäten zur Qualifizierung sind in fünf Phasen aufgeteilt mit Nennung der relevanten Kernelemente:

Phase 1 - Vor der ZfP-Qualifizierung

Phase 2 - Vorbereitung der ZfP-Qualifizierung

Phase 3 - Durchführung der ZfP-Qualifizierung

Phase 4 - Annahme der ZfP-Qualifizierung

Phase 5 - Umsetzung der qualifizierten ZfP

3 Kenntnisstand

Der DIN-Fachbericht CEN/TR 14748 stellt einen Leitfaden dar und gibt Anhaltspunkte, wie bei der Erprobung und der Anwendung neuer Prüfprozesse vorzugehen ist.

Für den Ingenieur sind die Erfordernisse eines Fähigkeitsnachweises für ZfP-Verfahren jedoch weiterhin schwer zu überschauen, weshalb eine Systematisierung der notwendigen Abläufe große Vorteile bietet.

4 Entwicklung einer Ingenieurplattform

4.1 Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren

4.1.1 Normativer Hintergrund

Wie in Kapitel 3.4 gezeigt, wird für industriell verwendete Messsysteme eine Validierung, d.h. ein Eignungsnachweis für den speziellen Einsatz, gefordert. Insbesondere im unregulierten Bereich sind beim Einsatz nicht genormter Verfahren besondere Maßnahmen zu ergreifen. Die Sicherstellung der erforderlichen Schritte verantwortet der Hersteller.

Nach DIN EN ISO/IEC 17025 [Deu05d] ist eine Validierung durchzuführen für

- nicht in normativen Dokumenten festgelegte Verfahren,
- selbstentwickelte Verfahren,
- Verfahren nach normativen Dokumenten, die außerhalb des vorgesehenen Anwendungsbereichs angewendet werden, sowie deren Erweiterungen.

„Die Validierung soll eine möglichst lückenlose Verfahrenscharakterisierung unter Berücksichtigung der vorliegenden Randbedingungen beinhalten. Anhand derer wird fundiert ermittelt, inwieweit die (Kunden-)anforderungen erfüllt werden können“ - so heißt es in [Taf08]. Taffe greift die normativen Forderungen für den Stahlbetonbau auf und zeigt, wie bei der Validierung eines quantitativen ZfP-Verfahrens, inklusive der statistischen Absicherung, im Stahlbetonbau vorzugehen ist.

Auf Basis der Anforderungen aus den in Kapitel 3.4 aufgezeigten Normen und Regelwerken wird die nachfolgende systematische Vorgehensweise zur prüfaufgabenorientierten Validierung von ZfP-Verfahren entwickelt. Die Systematik erhält eine praxisnahe Beschreibung der erforderlichen Aktivitäten.

4.1.2 Stufenmodell zur Umsetzung

Unter Berücksichtigung der Normen wird ein Stufenmodell für die Umsetzung zerstörungsfreier Prüfkonzepte innerhalb der Fertigungsprozesse erarbeitet, dem das in Abbildung 4.1 gezeigte mehrstufige Vorgehen zugrunde liegt. Die geführte Vorgehensweise beginnt mit der Prüfaufgabendefinition und ersten Stichversuchen, in denen die prinzipielle Eignung ausgewählter zerstörungsfreier Prüfverfahren für ihren Einsatz in den Produktionsabläufen festgestellt wird. Anschließend werden erweiterte Laboruntersuchungen durchgeführt, denen möglichst anwendungsnahe Reihenversuche folgen. Sind die Ergebnisse positiv, kommt es zur Pilotanwendung unter Serienbedingungen. Die entscheidenden Merkmale des angestrebten Verfahrenskonzepts werden entlang der einzelnen Phasen der Prüfprozessenerprobung bestimmt, die gleichermaßen den Reifegrad des Verfahrenskonzeptes wiedergeben. An wiederkehrenden Entscheidungspunkten jeweils an den Übergängen zur nächst höheren Stufe wird die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit wiederholt überprüft und festgelegt, ob das betreffende Projekt weiterverfolgt oder abgebrochen werden soll. Für erfolgreich qualifizierte Verfahrenskonzepte wird eine Standardisierung empfohlen, sofern zukünftig weitere Anwendungen vergleichbarer Art angestrebt sind.

Mit dieser Vorgehensweise kann eine optimale Einführung neuer Prüftechniken erreicht werden, die aufgrund ihrer Transparenz und Überprüfbarkeit komplexe Abstimm- und Erprobungsprozesse erleichtert.

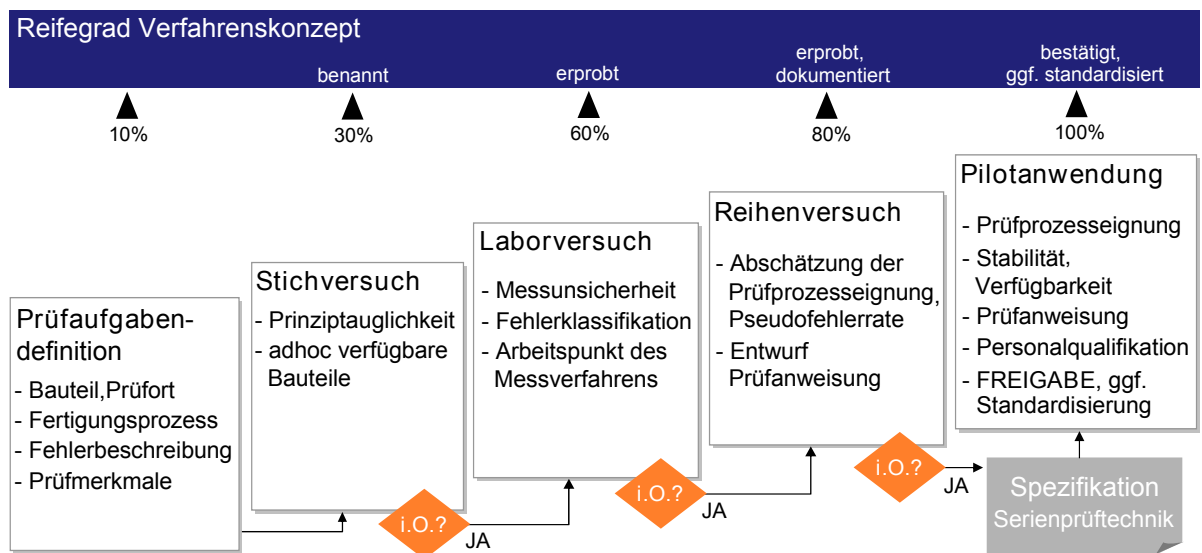


Abbildung 4.1: Stufenmodell zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren - Systematische Vorgehensweise zur prüfaufgabenorientierten Validierung

In der industriellen Praxis bedeutet das für den Verantwortlichen der Prüfprozessein-

führung, dass die einzelnen Arbeitspunkte im Stufenmodell angemessen bearbeitet und die Anweisungen eingehalten werden. Im Einzelnen sind dies:

Prüfaufgabendefinition: In dieser Phase werden alle Randbedingungen zur vorliegenden Prüfaufgabe zusammengestellt, die für potenziell einzusetzende Messverfahren relevant sein können. Hierzu gehören bauteilspezifische Details (Abmessungen, Material, usw.), Informationen zum vorgesehenen Einsatz- bzw. Prüfort (Zugänglichkeiten, Umgebungs-/Störeinflüsse, usw.), sowie Prozessvorgaben z.B. in Form geforderter Taktzeiten. Die zu detektierenden Fehlerarten, Fehlergrößen/-ausdehnungen und Fehlerlagen müssen festgelegt werden. Die Wahrscheinlichkeit für ihr örtliches und zeitliches Auftreten sollte bekannt sein. Spätere Änderungen dieser Annahmen erfordern einen weiteren Iterationsschritt, d.h. einen Neudurchlauf von der ersten Stufe des Entwicklungsprozesses an.

Stichversuch: Im Stichversuch werden die als geeignet eingeschätzten Messverfahren anhand ad hoc verfügbarer Bauteile auf ihre Tauglichkeit für die vorgesehene Prüfaufgabe untersucht. Hierbei gilt es festzulegen, über welche physikalischen Zusammenhänge die Fehler erfasst werden können, und die Grenzen der Fehlererkennbarkeit zu untersuchen. Mit den als tauglich befundenen Verfahren werden weiterführende Laborversuche gestartet.

Laborversuch: Im Laborversuch sind die Fehlernachweisgrenzen des Messverfahrens zu bestimmen. Der Nachweis verschiedener Fehler erfolgt unter Laborbedingungen anhand von Referenzteilen. Die Referenzteile sollten eine Reihe von Fehlern mit Größen rund um die erwartete Nachweisfähigkeit des ZfP-Verfahrens enthalten. Mindestens aber müssen Fehler ausreichend klein gewählt werden, um die kritischen Fehlergrößen zu unterschreiten, welche das Prüfverfahren im Hinblick auf die Produkteigenschaften des Prüfobjektes noch sicher erkennen muss. Die Referenzteile stammen idealerweise aus der laufenden Produktion, können aber durch geeignete Musterkörper ersetzt werden. In Anlehnung an Band 5 des VDA [Ver03] wird der Unsicherheitsbereich des Messverfahrens ermittelt und auf die Zulässigkeitsbereiche des vorliegenden Prüfprozesses bezogen.¹ Es ist die Aussage zu treffen, ob das Verfahren die notwendige Nachweisfähigkeit erbringt. Eine Einflussgrößenanalyse für das Messverfahren wird durchgeführt, z.B. mit Hilfe des Ursache-Wirkungs-Diagramms von Ishikawa [Ish76, KB03]. Im Verlauf des Validierungsprozesses zusätzlich erkannte Einflussgrößen sind ggf. hinzuzufügen. Als Ergebnis des Laborversuchs werden die technischen Anforderungen, die Parametrierung der Messgeräte, usw. im Hinblick auf den späteren Anwendungsfall

¹Siehe Entscheidungsregeln für den Spezifikationsnachweis in DIN EN ISO 14253-1 [Deu99b] und Abbildung A.2

spezifiziert. Die Anforderungen an Wiederholgenauigkeit, Auflösung, Stabilität und Linearität können bereits abgeschätzt werden.

Reihenversuch: Der Eingang in den Reihenversuch bedingt eine funktionsfähige Prüftechnik mit bekannter Nachweisgrenze bzw. Unsicherheitsbereich. Um weitere Einflüsse auf das Ergebnis des Prüfprozesses (Personal, Umgebung, Verschleiß, Chargeneinflüsse) und statistisch abgesicherte Aussagen zu ermitteln, sind Messungen an einer größeren Anzahl von Teilen notwendig. Es werden die Auswirkungen aller wichtigen Einflüsse ermittelt, sofern dies bereits mit dem verfügbaren Aufbau möglich ist. Der Reihenversuch ist möglichst seriennah zu gestalten, um die anschließende Pilotanwendung zu erleichtern. Die Erfahrungen des Reihenversuches und die im Weiteren gewonnenen Erkenntnisse fließen in den Entwurf einer Prüfanweisung ein.

Pilotanwendung: Als Pilotanwendung ist der serienbegleitende Einsatz des neuen oder modifizierten Verfahrens unter Serienbedingungen zu verstehen. Idealerweise geschieht dies parallel zur bisher eingesetzten Prüftechnik. Die Qualifikation des Messverfahrens ist aus den Laborversuchen hervorgegangen und konnte im Reihenversuch bestätigt werden. Es kommt die nunmehr optimierte Messtechnik zum Einsatz, deren Grenzen der Fehlererkennung sowie deren statistische Eigenschaften bekannt sind, und die den Anforderungen an die Prozessintegration genügt. Eine detaillierte Prüfanweisung mit Regelung der Verantwortlichkeiten und mit Konzepten zur Schulung des Prüfpersonals wird aus den Erfahrungen erarbeitet.² Die Wirksamkeit wird in der Pilotanwendung bestätigt. Zum endgültigen Serieneinsatz muss die Erfüllung aller Anforderungen und die Berücksichtigung aller Einflüsse aus den vorhergehenden Untersuchungen gewährleistet sein.

Standardisierung: Sind weitere Anwendungen mit ähnlichen Anforderungen absehbar kann eine Standardisierung sinnvoll sein. Für ein erfolgreich eingeführtes Verfahrenskonzept werden der zulässige Anwendungsbereich, die Anlagenspezifikation und die Prüfabläufe festgelegt, dokumentiert und veröffentlicht. Damit wird die Validierung weiterer Serienumsetzungen vereinfacht und beschleunigt, was die Verbreitung geeigneter ZfP-Verfahrenskonzepte im industriellen Einsatz fördert.

Die Maßnahmen zur Qualifizierung von Prüfverfahren, wie sie nach gültigen Regelwerken und dem Stand der Technik gefordert werden, sind in einer Kontrollliste

²Aspekte der Prüforganisation, dazu zählen Fragen zu Personal, Verantwortlichkeiten und der Organisation, werden hier nicht abgebildet. Deren Regelung wird in einer Norm erfolgen und ist als Ausblick zu sehen.

4.1 Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren

zusammengefasst, wie sie die Abbildung 4.2 auszugsweise zeigt. Eine detaillierte Aufschlüsselung aller Abfragen für die systematische Einführung von ZfP-Verfahren befindet sich im Anhang B.

Kontrollliste für Einführung von ZfP-Verfahren in Anlehnung an VDA Bd. 5:2003 / CEN/TR 14748:2004		Umsetzungsstand / Reifegrad			
		Beratung Prüfaufgabe	Stichversuch	Laborversuch	Reihenversuch
Meßverfahren					
Messprinzip					
	Messgröße	Vorschlagen	Benennen		
	physikalischer Zusammenhang	Beschreiben	Bestätigen	Untersuchen	
	Einflussgrößen			Benennen	Untersuchen
Prinzip-tauglichkeit					
	Prüfmerkmale		Bestätigen		
	Fehlererkennbarkeit		Bestätigen		
	Fehlerklassifizierung (Art, Ort, Verteilung, Größe)		Abschätzen	Bestätigen	
Eigenschaften Messgeräte					
	Verfügbarkeit			Benennen / Erproben	Bestätigen
	Parametrierung			Benennen / Erproben	Bestätigen
	Auflösung			Benennen / Erproben	Bestätigen
	Genauigkeit			Benennen / Erproben	Bestätigen
Geräte-Messunsicherheit					
	Kalibrierunsicherheit			Abschätzen	Bestätigen
	Wiederholungsunsicherheit			Abschätzen	Bestätigen
	Linearitätsunsicherheit			Abschätzen	Bestätigen
	Gerätstabilität				Abschätzen / Fordern
	Ishikawa-Diagramm (Einflussgrößenanalyse)			Erstellen	Bestätigen
	weitere Beiträge aus Fehlereinflussanalyse			Abschätzen	Bestätigen
	Prüfmittelfähigkeit				Bestätigen

keine Aktion / keine Ergebnisse vorhanden
 Aufgabe mit vorläufigem Ergebnis / v orläufiges Ergebnis vorhanden
 Aufgabe mit verbindlichem Ergebnis / v verbindliches Ergebnis vorhanden

Abbildung 4.2: Auszug aus der ZfP-Kontrollliste zur Einführung von ZfP-Verfahren

In der ZfP-Kontrollliste (Abb. B.1, B.2) werden die abgefragten Positionen, die während der Bearbeitung zu erfüllen sind, mit unterschiedlichen Aktivitäten oder Attributen belegt (z.B. bereitstellen, vergleichen, bestätigen, abschätzen, untersuchen, benennen, erproben). Es wird eine farbliche Unterscheidung zwischen den geforderten „vorläufigen Ergebnissen (gelb)“ und den „verbindlichen Ergebnissen (grün)“ vorgenommen. Die Kontrollliste ist von oben ausgehend zu bearbeiten, beginnend mit Aspekten zum Prüfproblem, Messverfahren, Prüfprozess und schließlich zum Prüfkonzept. Der Reifegrad des Prüfverfahrens steigt mit der Anzahl der erfolgreich bearbeiteten Schritte in Leserichtung. An festgelegten Entscheidungspunkten an den jeweiligen Übergängen von Stichversuch zu Laborversuch, zum Reihenversuch und zur Pilotanwendung werden nochmals übergreifend alle Mindest erfüllungskriterien abgeprüft. Erst nach deren Bestätigung ist die Weiterführung der Aktivitäten im Folgeschritt sinnvoll und zulässig. So wird gewährleistet, dass die Validierung bei Nichterfüllung gewisser Kriterien abgebrochen wird und nur eine normkonforme und wirtschaftliche Lösung die Umsetzungsphasen vollständig durchläuft.

Die zuverlässige Bewertung der Prüfsystemfähigkeit unter Berücksichtigung aller relevanten Störeinflüsse mit den resultierenden Unsicherheiten ist für den Einsatz der ZfP-Verfahren Grundvoraussetzung. Die Freigabe des Verfahrenskonzepts erfolgt letztlich auf Basis der nachgewiesenen und dokumentierten Verfahrenseignung aus allen Phasen des Validierungsprozesses. Die Dokumentation setzt sich, angelehnt an DIN EN ISO/IEC 17025 und Taffe [Deu05d, Taf08], zusammen aus

1. der Charakterisierung des Verfahrens,
2. dem Vergleich mit Qualitätsanforderungen,
3. dem Nachweis der Erfüllung und
4. der Prüfanweisung.

Die Charakterisierung des Verfahrens umfasst die Beschreibung der ermittelten Leistungsfähigkeit. Elementare Inhalte sind

- die systematische Untersuchung und Festlegung der Einflussgrößen,
- der Vergleich mit anderen Prüfverfahren,
- die Ermittlung der Verfahrensgrenzen mit einer Abschätzung der Unsicherheiten (Meßmittelfähigkeit: Wiederholpräzision, Genauigkeit, Linearität, Vergleichspräzision; Prüfmitteleignung: Fehlererkennung, Fehlernachweissicherheit, Pseudofehler).

Die Langzeitfähigkeit des Verfahrens wird noch in der Anfangsphase des Serieneinsatzes abgesichert. Nach erfolgreicher Umsetzung sollten weiterführende Aktivitäten zudem der Standardisierung der Abläufe für Folgeprojekte gelten. Die gewonnenen Potentiale erfolgreich gestalteter Umsetzungen sollen übertragbar sein und deren Verbreitung gefördert werden.

4.2 Ingenieurplattform für Thermografieprüfungen

Für den Aufbau einer Ingenieurplattform für Thermografieanwendungen dient die zuvor entwickelte Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren als Basis. Die vorangehend noch allgemein für die ZfP gehaltene Systematik wird für Anwendungen in der Thermografie konkretisiert. Ergänzungen erfolgen unter spezieller Berücksichtigung der Belange thermografischer Prüfprobleme. Der verfolgte Lösungsansatz für die Bereitstellung der Ingenieurplattform stellt in einem ersten Schritt die Einhaltung der ge-

setzlichen Anforderungen sicher. In einem zweiten Schritt werden spezifische Methoden für die Thermografie entwickelt, welche die Einführung thermografischer Prüfverfahren vereinfachen, beschleunigen und somit effizienter und wirtschaftlicher gestalten.

Die an eine solche Ingenieurplattform gestellten Anforderungen sind im Folgenden aufgeführt und die jeweiligen Lösungsansätze genannt:

- Berücksichtigung der Forderungen aus dem normativen Umfeld an den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren, sowie die Absicherung ihrer Einhaltung
 - durch die geführte Vorgehensweise zur Einführung von ZfP-Verfahren mit der ZfP-Kontrollliste, siehe Kapitel 4.1 und Anhang B
- Verkürzung der Entwicklungs- und Erprobungszeiten
 - durch die virtuelle Prüfung unter Zuhilfenahme von FEM-Simulationen, Durchführung von Machbarkeitsabschätzungen, Störgrößenanalysen und die Ermittlung von Optimierungspotentialen, siehe Kapitel 6
- Schaffung von Transparenz und Nutzung der hohen Flexibilität und Verfahrensvielfalt der Thermografie
 - durch eine Modularität, offene Schnittstellen und Charakterisierung mittels nachvollziehbarer Bewertungskriterien, siehe Kapitel 5.1.2 und 5.2
- Steigerung der praktischen Anwendbarkeit thermografischer Prüfmethoden
 - durch die Nutzung eines Expertensystems als Auswahlhilfe für Prüflösungen; eine Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme stellt Wissen für den industriellen Anwender bereit, bezieht neue Erkenntnisse ein und verbessert sich kontinuierlich, siehe Kapitel 5.3

Eine Plattform, die die vorangehend gestellten Maßgaben erfüllt, ist ein umfassendes Konstrukt für eine ganzheitliche Herangehensweise zur Erfüllung einer Prüfaufgabe. Das entwickelte Modell der Ingenieurplattform, gezeigt in Abbildung 4.3 agiert prinzipiell auf zwei Ebenen. Die Basis stellt der Stufenprozess zur Validierung zerstörungsfreier Prüfverfahren dar, auf der verschiedene Hilfswerkzeuge aufsetzen.

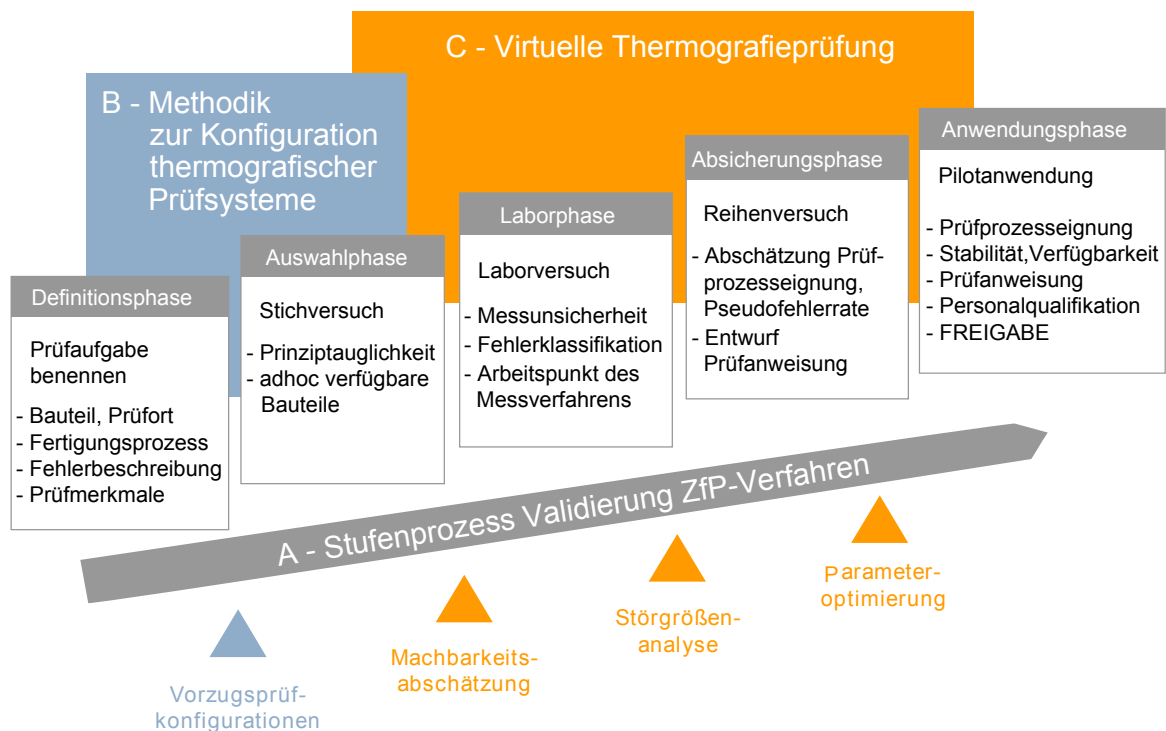


Abbildung 4.3: Elemente der Ingenieurplattform:

A - Stufenprozess zur Validierung von ZfP-Verfahren

B - Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme

C - Virtuelle Thermografieprüfung

Die in der Ingenieurplattform zum Einsatz kommende Werkzeuge, die speziell für Thermografieanwendungen entwickelt werden, sind:

Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme

Expertensystem zur Findung und Auswahl aussichtsreicher Prüflösungen bzw. der Vorzugskonfigurationen thermografischer Prüfaufgaben

Virtuelle Thermografieprüfung

Machbarkeitsabschätzungen, Störgrößenanalysen und Parameteroptimierung mit Hilfe Finiter Elemente Simulationsmethoden (FEM), welche den experimentellen Aufwand stark reduzieren

Das Expertensystem zur Ermittlung von Vorzugsprüfverfahrenskonfigurationen für thermografische Prüfaufgaben und die bereitgestellten (Simulations-) Werkzeuge vereinfachen und beschleunigen die Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren und machen sie so wirtschaftlicher.

5 Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme

5.1 Modellentwicklung

5.1.1 Ansatz mittels Expertensystem

Umfassende Analysen stehen am Anfang einer jeden wirtschaftlichen Umsetzung thermografischer Prüfsysteme. *Stich- und Laborversuche* bilden die Grundlage für ein erfolgreiches Vorgehen gemäß der in Kapitel 4.1 gezeigten *Systematik zur Einführung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens*. Nach Ermittlung der Randbedingungen für das betrachtete Prüfproblem ist es die Aufgabe des verantwortlichen Ingenieurs, die geeignetsten Prüfverfahrenskonfigurationen für den *Stichversuch* zu benennen. Die Prüfkonfigurationen der Thermografie sind vielfältig, doch in der Regel sind nur wenige für die vorliegende Prüfaufgabe geeignet. Das für solche Entscheidungen notwendige Fachwissen kann im Arbeitsfeld eines Ingenieurs selten in der erforderlichen Breite bereit gestellt werden, und es kommt möglicherweise zu Engpässen bei der Einführung thermografischer Prüflösungen. Für die Generierung geeigneter Prüfverfahrenskonfigurationen soll ein Expertensystem entwickelt werden, um die Arbeit des Anwenders zu erleichtern.

Expertensysteme sind wissensbasierte Computerprogramme, mit denen das Spezialwissen qualifizierter Fachleute - den Experten - in einem Arbeitsgebiet nachgebildet wird (vgl. [CS93]). Experten zeichnet aus, dass sie in einem speziellen Themenbereich überdurchschnittliche Fähigkeiten besitzen, mit denen sie Schlussfolgerungen ziehen und Probleme zufriedenstellend lösen. Das gelingt ihnen auch mit unsicherem und unvollständigem Wissen. Diese Fähigkeiten in ein anwenderunabhängiges System zu überführen, stellt die Herausforderung einer Umsetzung dar.

An ein Expertensystem werden im Allgemeinen folgende Anforderungen gestellt:

- Expertenwissen aus bestimmten Anwendungsbereichen zur Lösung von Problemen bereitstellen,
- Problemlösungen insbesondere in Grenzbereichen von Entscheidungssituationen

schneller und kostengünstiger ermöglichen,

- die Wissensbasis explizit und erklärend darstellen und
- lernfähig durch das Einfließen neuer Erkenntnisse sein.

Für ein Expertensystem muss das verfügbare Wissen aufbereitet werden, welches der Experte für eine Entscheidung heranzieht. Die Grundlage ist gewöhnlich eine Ansammlung von Fakten, die den aktuellen Kenntnisstand in der betreffenden Teildisziplin wiedergibt. Als Wissensbasis sollen neben explizitem Expertenwissen auch Informationen aus z.B. (Labor-)Berichten und Veröffentlichungen zum Tragen kommen. Das gesammelte Wissen wird klassifiziert und logische Zusammenhänge werden hergestellt, so dass mit Hilfe eines Algorithmus verschiedene auf das Prüfproblem angepasste Ergebnisvarianten generiert werden können.

5.1.2 Strukturbildung

Das Ziel einer thermografischen Prüfung ist die Fehler- bzw. Merkmalerkennung, die als Bewertungsgrundlage für die Qualität der Bauteile oder auch als Kenngröße zur Prozessführung dienen kann, darunter z.B. die Detektion von Poren- und Rissen sowie die Bestimmung von Bauteiltemperaturen in den Produktionsabläufen. Eine Prüfaufgabe hat stets vielfältige Randbedingungen, aus denen die Anforderungen an die potentiellen Prüflösungen resultieren. Zum Aufbau eines Expertensystems für Thermografieanwendungen wird den einzelnen Elementen der Prüfung eine klare Struktur gegeben. Die Prüfmethode Thermografie ist letztlich eine Art Werkzeugkasten mit geeigneten Modulen, aus denen die verschiedenen Variationsmöglichkeiten abgeleitet werden können. Ein einfacher Austausch der einzelnen Module minimiert den Aufwand, verschiedenen Anforderungsprofilen zu entsprechen.

Folgende Schritte sind durchzuführen:

- Schematisierung des Prüfablaufes durch Identifikation von Schnittstellen
- Aufbau einer modularen Struktur
- Charakterisierung der Module mit Beschreibung der Möglichkeiten und Grenzen
- Definition der Anforderungsprofile an eine Prüflösung
- Bereitstellung verschiedener Auswahlmöglichkeiten und Ergebnisgenerierung

Der Ablauf einer Thermografieprüfung lässt sich in die Elemente Anregung, Aufnahme

und Auswertung einteilen, die gemeinsam die Prüfablaufkette in Abbildung 5.1 bilden. Innerhalb dieser Elemente gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Signalerzeugung, Signalerfassung und Signalanalyse, welche im Folgenden die einzelnen Thermografie-module darstellen. Durch die Variation der Module, z.B. der Auswahl der optischen Anregung als Wärmequelle, der Nutzung einer Infrarotkamera mit Halbleiterdetektor und einer Auswertung mittels Phasenanalyse, gelangt der Anwender zu einer problemangepassten Prüflösung.

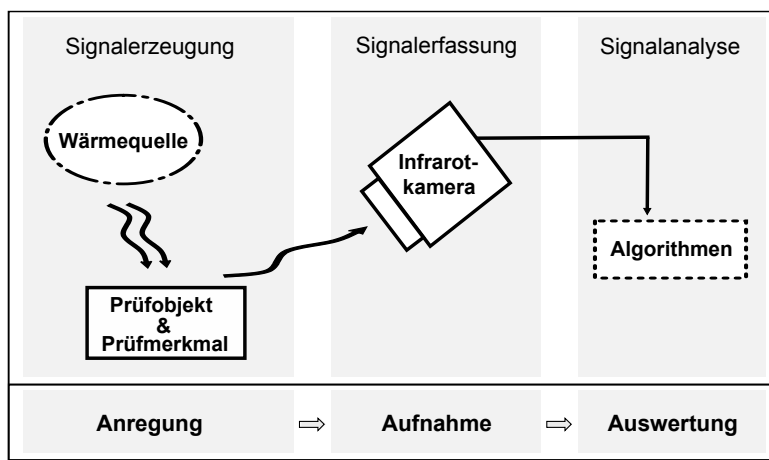


Abbildung 5.1: Modulare Prüfablaufkette Thermografie

Die Module der Thermografieprüfung werden im Hinblick auf das Ziel der Fehler- bzw. Merkmalerkennung unter speziellen Rahmenbedingungen in folgender Abfolge charakterisiert:

- ZIEL → Fehler- bzw. Merkmalerkennung
- RAHMENBEDINGUNGEN aufgrund spezieller Prozessanforderungen
- ANREGUNG - Signalerzeugung : Anregungsarten/-quellen
- AUFNAHME - Signalerfassung : Infrarot-Kameratechnik
- AUSWERTUNG - Signalanalyse : Algorithmik zur Fehler-/Merkmalsbewertung

5.2 Charakterisierung der Thermografiemodule

5.2.1 Fehlerarten und Merkmale

Bei der Herstellung von Rohmaterialien und der Weiterverarbeitung zu Bauteilen kommt es aufgrund von Prozessschwankungen zu Abweichungen vom Materialsollzustand. Inhomogenitäten machen das Produkt nicht notwendigerweise unbrauchbar, erst wenn sie eine funktionsbeeinträchtigende Größe überschreiten, handelt es sich um eine Ungänze bzw. einen Fehler. Für die vorgesehene Anwendung und erwartete Beanspruchung des Bauteils sind maximal zulässige Fehler abhängig von der Fehlerart, -lage und -größe mit entsprechend eingeplanten Sicherheiten festzulegen. Mögliche Fehlerarten sind in der Regel eng an das Bauteil, das Material, den Herstellprozess, etc. gebunden. Dennoch gibt es auch allgemeine Unterteilungen von Fehlern, z.B. in innere und äußere, sowie in volumen- und flächenhafte Defekte. Äußere Fehler sind zur Oberfläche hin geöffnet, innere dahingegen von außen nicht sichtbar. Volumen- und flächenhafte Fehler unterscheidet die Art der eingeschlossenen Hohlräume: entweder weisen sie ein kompaktes Volumen auf, oder sie stellen im Grenzfall einer flächigen Ablösung lediglich die Kontaktflächen voneinander getrennter Materialbereiche dar. Für alle Fehlstellen kann angenommen werden, dass sie thermografisch etwa bis zu einer Tiefe detektierbar sind, die ihrer lateralen Ausdehnung entspricht [ADG⁺05].

Temperaturkontraste werden je nach Eigenschaften der Fehlstellen auf unterschiedliche Weise erzeugt. Deshalb eignen sich einzelne Prüfverfahrenskonfigurationen für die thermografische Prüfung mehr oder weniger gut. Um die in der Thermografie darstellbaren Fehlerarten zu erfassen und hinsichtlich der genannten Aspekte zu gruppieren, werden für das Expertensystem die Fehlerarten, zwischen denen zunächst unterschieden werden soll, wie folgt definiert:

Riss: Ein Riss definiert sich als flächenhafte Materialtrennung mit einem Verhältnis von Breite zu Tiefe zu Länge von typischerweise 1:10:100. Risse liegen sowohl in Form innerer als auch äußerer Fehler vor.

Pore, Lunker: Poren und Lunker zählen zu den kompakten Volumenfehlern, die zumeist im Inneren des Materials aufzufinden sind und in der Regel Luft einschließen. Während Lunker erstarrungsbedingt eher rauhe, klaffende Innenhohloberflächen aufweisen, sind Poren glatt und nahezu rund.

Ablösung, Delamination: Ablösungen und Delaminationen sind flächige Materialtrennungen, die nahezu keine Tiefen- aber eine große Breitenausdehnung aufweisen. Die Haftung in Tiefenrichtung ist bei dieser Fehlerart gestört oder nicht mehr vorhanden. Es handelt sich häufig um oberflächennahe Fehler.

Neben der Fehlerprüfung ist die Bestimmung von Merkmalen ein wichtiger Bestandteil der Qualitätsüberwachung, der Produktentwicklung und der Schadenanalytik. Thermografisch untersuchte Merkmale sind:

Schichtdicke: Bei Ein- und Mehrschichtsystemen sind Schichtdicken als Qualitätsmerkmal zu bestimmen. Die Homogenität der Schicht stellt ein wichtiges Merkmal dar, das sich auf die spätere Funktion auswirken kann.

Vorhandensein, Lage, Dimension: Das Vorhandensein, die Lage und die Dimension äußerlich nicht sichtbarer Bauteilgeometrien können thermografisch erkannt werden. Innere Strukturen können z.B. Kleberauppen hinter Blechstrukturen oder verschmolzene Fügstellen sein.

Temperatur: Ein bedeutendes Qualitätsmerkmal bei einer Vielzahl von Fertigungsabläufen ist die Temperatur. Beispielsweise bei der Wärmebehandlung von Stählen wirkt sie sich entscheidend auf die Bauteileigenschaften aus, so dass die Ermittlung der absoluten Temperaturen sowie deren örtliche Verteilung und die Erkennung auffällig warmer oder kalter Bereiche von Interesse ist.

5.2.2 Rahmenbedingungen

Das Prozessumfeld einer Thermografieprüfung gibt gewisse Rahmenbedingungen für den Prüfablauf und -aufbau vor. An eine Laborprüfung sowie an stichprobenhafte Serienprüfungen werden andere Anforderungen gestellt als an 100 %-Prüfungen, die online in der Produktionslinie ablaufen. Bei der Auswahl der Prüfmethode für linienintegrierte Prüfungen sind die vom Produktionsprozess vorgegebenen Taktzeiten zu beachten, innerhalb derer eine Prüfung möglich ist. Umgebungseinflüsse aus dem Produktionsumfeld, die als Störquellen wirken können wie z.B. Störstrahlungsquellen im Reflexionswinkel, Oberflächenbelegungen (Verschmutzungen, Staub, Öl, etc.), Temperaturschwankungen und auftretende Konvektion durch z.B. Zugluft, müssen hinsichtlich ihrer Auswirkungen einer ausführlichen Analyse unterzogen werden.

Besonders ist auch der Platzbedarf für die Prüfsystemkomponenten zu beachten. Neben räumlichen Einschränkungen bestimmt die Prüfteilstruktur durch ihre Geometrie (einfach oder komplex) wesentlich die Anordnung des Prüfaufbaus. Im Reflexionsaufbau sind die Wärmequelle(n) und das Kamerasystem auf derselben Seite positioniert, beim Transmissionsaufbau befinden sich diese auf gegenüberliegenden Seiten des Prüfobjektes (s. Abb. 5.2). Die Prüfung in Transmission ist nur möglich, sofern die Bauteildicke und -geometrie einen geeigneten Wärmedurchgang zulassen und sich ausreichende Temperaturkontraste an der Betrachtungsseite abzeichnen.

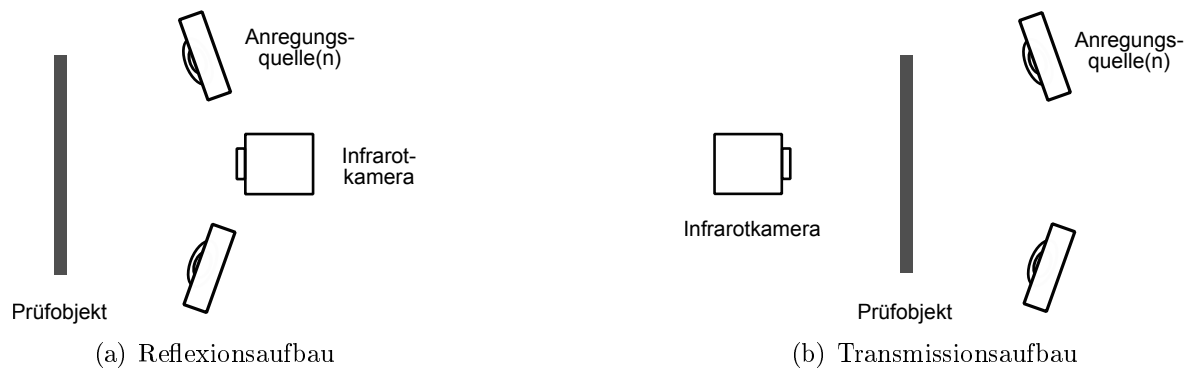


Abbildung 5.2: Prüfanordnungen

Welche Prüfanordnung am geeignetsten ist, hängt von vielen Faktoren ab und ist in Voruntersuchungen zu klären. Im Regelfall ist die Transmissionsanordnung die robustere Methode, vor allem weil die Gefahr von Störreflexionen durch die Anregungsquelle geringer ist. Die genaue Positionierung von Kamera und Anregungsquelle in Relation zu Fehler bzw. Merkmal hängt im Allgemeinen von der Anregungsart, von den Einschränkungen durch Störeinflüsse und von der Zugänglichkeit (ein- oder zweiseitig) ab.

5.2.3 Anregungsarten/-quellen zur Signalerzeugung

Grundvoraussetzung für die aktive Thermografie ist die Erzeugung initialer Temperaturunterschiede. Die Wärmeezeugung kann auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen, z.B. optischen, induktiven, mechanischen und konvektiven Effekten (vgl. Kap. 3.2.1). Um die in der Thermografie verfügbaren Anregungsquellen und -arten zu charakterisieren und den Vergleich untereinander zu vereinfachen, werden folgende Kriterien zur Bewertung für thermografische Anwendungen herangezogen:

- A. Physikalischer Effekt
- B./C. Diversifizierung und Ausprägungen der Gerätetechnik
- D./E./F. Signalform, Energiemenge und Selektivität der Anregung
- G. Weitere Eigenschaften: Kontakt/berührungslos, Zerstörungsfreiheit, Störeinflüsse, Platzbedarf, Flexibilität, Kosten, usw.

Zur Charakterisierung der Anregungsquellen/-arten werden entlang der genannten Kriterien A. bis G. die in Tabelle 5.1 aufgeführten Fragen gestellt, um die Besonderheiten im Hinblick auf die thermografische Prüfung zu zeigen und zu beschreiben.

Anregungsarten/-quellen	A. Physikalischer Effekt	B. Diversifizierung	C. Ausprägung	D. Signalform	E. Energiemenge	F. Selektivität	G. Weitere Eigenschaften Kontakt / berührungslos Zerstörungsfreiheit Störeinflüsse Platzbedarf Flexibilität Kosten ...
Optisch Ultraschall Induktiv Konvektiv usw.	Physikalisches Prinzip? Besonderheiten für thermografische Anwendung?	Verschiedene Quellenarten?	Vorhandene Abwandlungen? Bauarten?	Zeitlicher Verlauf der Anregung? Temperaturhub? Temperaturänderungsgeschwindigkeit?	Eingekoppelte Energie? Erreichbare Temperaturen? Besonderheiten? Spezielle Eigenschaften? Verhalten der Reichweite?	Örtliche Verteilung der eingebrachten Energiemenge? Temperaturverteilung? Homogenität der Wärmebringung?	Kontakt erforderlich oder berührungslos? Zerstörungsfrei? Sonstige Störeinflüsse? Platzbedarf? Besondere Anordnung notwendig / möglich? Gerätetechnik flexibel? Preisrahmen für Gerätetechnik?

Tabelle 5.1: Fragen zur Charakterisierung verschiedener Anregungsquellen/-arten

Zunächst sind die physikalischen Mechanismen zu klären, anschließend stellen sich Fragen zur Gerätetechnik. Quellenarten der konvektiven Anregung sind z.B. Kaltluftdüsen und Heißluftföne, die in unterschiedlichen Bauarten verfügbar sind. Die Signalformen, die eingebrachten Energiemengen sowie deren Selektivität sind wichtige Charakteristika, was der Vergleich von Heißluft- und Blitzlichtanregung veranschaulicht. Eine langsame Erwärmung durch Heißluft unterscheidet sich in ihrem zeitlichen Verlauf stark von der kurzzeitigen Blitzlichtanregung, wobei beide ähnliche flächige Erwärmungsmuster erzeugen können. Ein weiterer Aspekt ist die Gewährleistung der Zerstörungsfreiheit, z.B. sind bei der Ultraschallanregung wegen der hohen Energieeinbringung mechanische Schädigungen des Grundmaterials möglich.

Optische Anregung

A. PHYSIKALISCHER EFFEKT

Bei der optischen Anregung fällt elektromagnetische Strahlung auf das Prüfobjekt und erzeugt in einer je nach Material dünnen oder dickeren Schicht einen Temperaturhub. Die Energieumsetzung hängt stark von der Oberflächenbeschaffenheit des Prüfobjekts ab, glatte Oberflächen reflektieren weit mehr Energie als rauhe. Der Absorptionsgrad beschreibt, wie viel der angebotenen Strahlungsenergie über die Oberfläche aufgenommen wird und zu einer Temperaturerhöhung führt. Die von der Quelle auf das Prüfobjekt treffende Strahlung teilt sich in einen von dem Objekt absorbierten, einen reflektierten und einen transmittierten Anteil auf (s. Abb. 5.3). Für die thermografische

Untersuchung relevant ist die Emission des Prüfobjekts, die durch die hierbei geführte Temperaturerhöhung verursacht wird. Hohe absorbierte und emittierte Anteile infolge der Bestrahlung sind von Vorteil für ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis. Aufgrund der Gefahr von Störreflexionen sollten von der Lichtquelle ausgehende Strahlungsanteile im Empfindlichkeitsbereich der Kamera weitestgehend eliminiert werden.

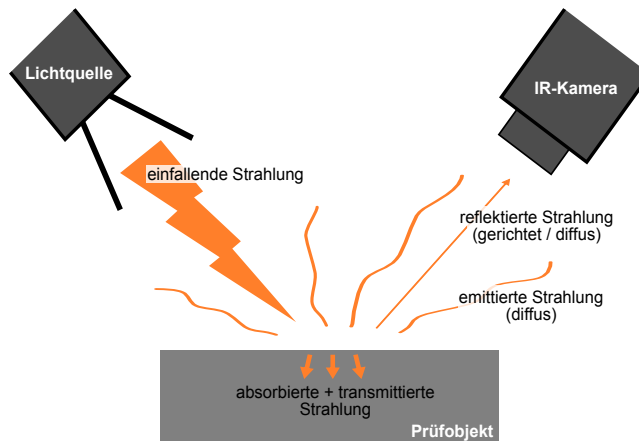


Abbildung 5.3: Strahlungsanteile bei der optischen Anregung

Absorptions- und Emissionsfähigkeiten von Objektflächen sind nicht über alle Wellenlängenbereiche gleich. Das Strahlungsspektrum der Lichtquelle bei einer optimalen Anregung ist derart zu gestalten, dass es maximal vom Prüfobjekt absorbiert wird. Für den gezielten Einsatz optischer Anregungsquellen muss deren Abstrahlcharakteristik mit ihren zeitlichen, spektralen und räumlichen Merkmalen bekannt sein. In der Praxis sind die spektralen und richtungsabhängigen Kenngrößen jedoch selten spezifiziert und nach Möglichkeit in Voruntersuchungen zu bestimmen.

B. DIVERSIFIZIERUNG

Einen guten Querschnitt durch die Menge optischer Anregungsquellen stellen Blitzlampen und Temperaturstrahler dar. Unterschiede liegen vor allem in den Signalformen, den bereitgestellten Energiemengen und den ausgestrahlten Spektren.

B.1 BLITZLICHTANREGUNG

B.1.C. AUSPRÄGUNGEN

Der Einsatz von Gasentladungslampen zur Blitzlichtanregung ist in der aktiven Ther-

mografiertechnik seit einigen Jahren verbreitet. Es werden handelsübliche Blitzgeräte genutzt, wie sie z.B. in Abbildung 5.4 gezeigt sind, darunter Blitzköpfe mit trichterförmigem Reflektor sowie Sonderformen wie Ringblitze und Lichtwellenleiter.¹

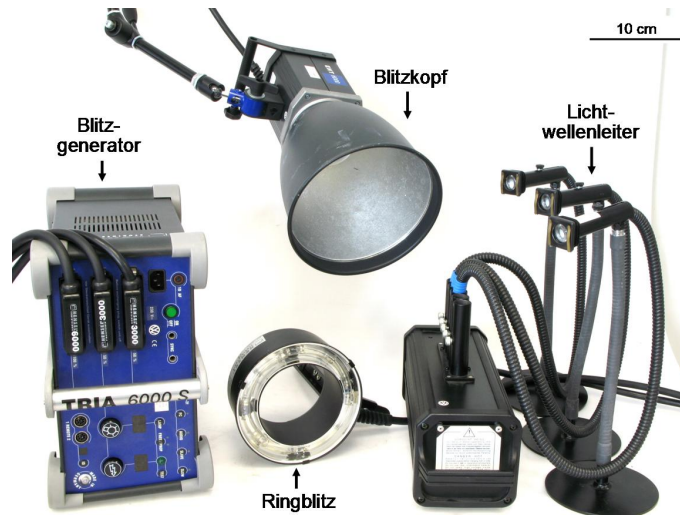


Abbildung 5.4: Blitzlichtanregungsquellen mit Blitzgenerator

B.1.D. SIGNALFORM

Die Blitzlichttechnik stellt pulsformige Erwärmungen von etwa 1 bis 5 ms bereit und weist hohe Temperaturänderungsgeschwindigkeiten auf. Eine typische Abblitzcharakteristik des Blitzkopfes EHT 6000 mit dem Generator TRIA 6000 S² mit einer maximal möglichen Energieausbringung von 6000 J zeigt die Abbildung 5.5. Die maximale Blitzenergie wird nach einer Anstiegszeit von 0.05 ms ausgestrahlt, nach weniger als 8 ms ist die Energie bereits wieder auf 10 % dieser Amplitude abgefallen.

¹Technische Daten der Geräte siehe *Produktkatalog Generatoren, Lichtformer und Blitzköpfe* der Firma HENSEL Studioteknik GmbH & Co. KG [HENb]

²Technische Daten siehe *Bedienungsanleitung TRIA S Generatoren* der Firma HENSEL Studioteknik GmbH & Co. KG [HENa]

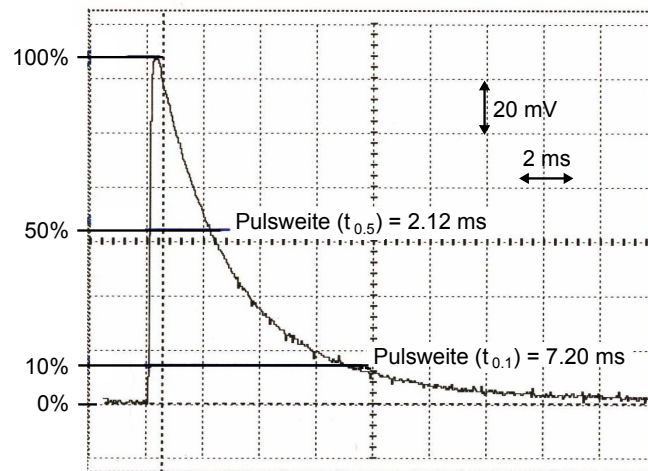


Abbildung 5.5: Blitzcharakteristik (Lichtverlauf) des Blitzkopfes EHT 6000 mit dem Generator TRIA 6000 S, Energieeinstellung 10 (Quelle: Firma HENSEL Studiotechnik GmbH & Co. KG)

Um ein Beispiel für einen realen Temperaturverlauf an einem Bauteil aufzuzeigen, werden Abkühlkurven nach dem Auslösen des EHT 6000 Blitzkopfes an einer geschwärzten Kunststoffoberfläche bei einer Ausgangstemperatur von 23.5°C aufgenommen und daran exemplarisch charakteristische Kenngrößen ermittelt (s. Abb. 5.6). Der mit verschiedenen Zeitabständen wiederholte Messablauf erfolgte mit der Infrarotkamera *ThermaVision™ SC6000 HS (InSb)*³ aus 50 cm Entfernung mit einer Aufnahme­frequenz von 1000 Hz. Die Blitzlichtquelle in Reflexionsanordnung weist einen Abstand von 1 m zur Objekt­oberfläche auf. Nach einem Maximum von etwa 87°C , welches nach 3 ms erreicht wird, fällt die Temperatur nach 10 ms auf 50 % und nach 25 ms auf 10 % der maximal entwickelten Temperatur ab. Die maximale Temperatur­differenz dieser Prüfk­onfiguration beträgt 64°C bei einer Streubreite von weniger als 0.2°C . Die im Detail gezeigte zeitliche Verschiebung der Temperaturspitzen ist ein Artefakt aufgrund eines Synchronisationsfehlers der Kamera, eine zeitversetzte Erfassung von 1 ms zieht sich durch die gesamten Temperaturkurven. Die Unterschiede bei Raumtemperatur ergeben sich primär aus der Erwärmung der Kunststoffprobe infolge der Wiederholmessungen. Deutlich wird dies durch den stetigen Temperaturanstieg von Messung 1 bis 5 sowie durch das nach längerer Abkühlzeit wieder gesunkene Temperaturniveau in Messung 6.

³Technische Daten siehe *Datenblatt ThermaVision™ SC6000 HS* der Firma Systems AB [Flia]

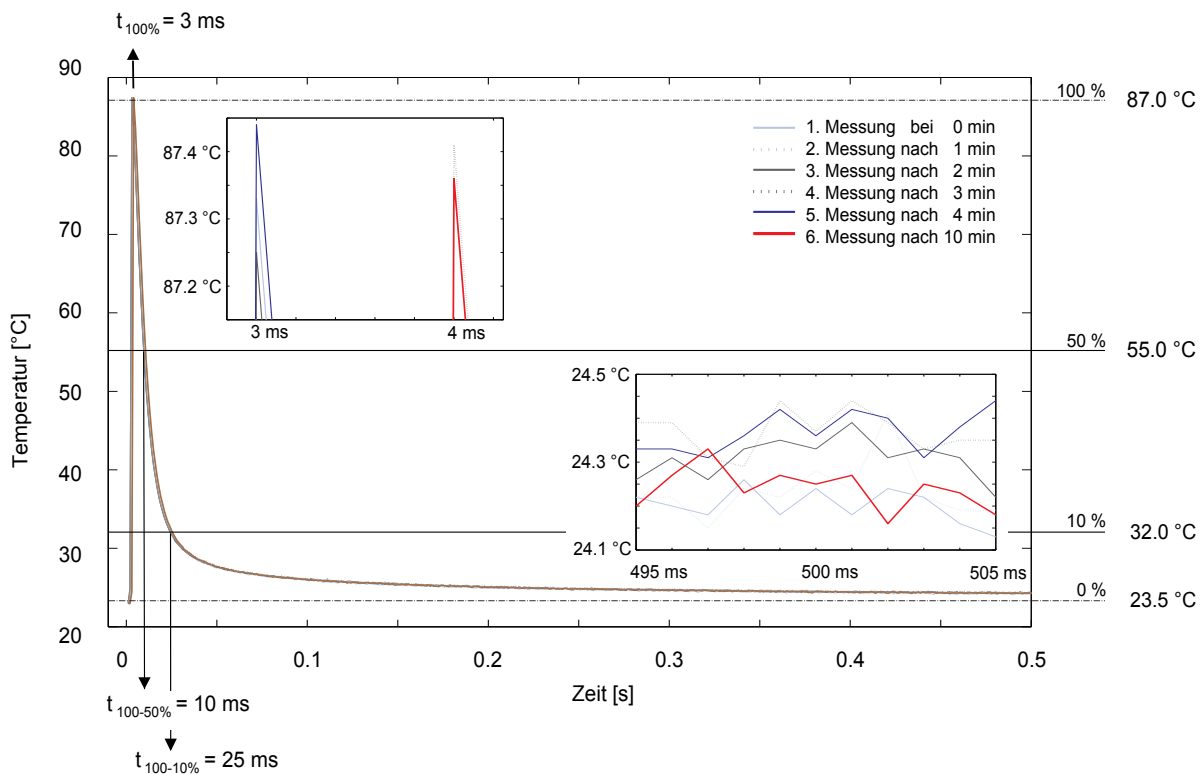


Abbildung 5.6: Temperatur-Zeitverläufe nach der Blitzlichtanregung (6 kJ) gemessen an geschwärzter Kunststoffprobe mit einem Aufnahmeintervall von 1 ms

B.1.E. ENERGIEMENGE

Bei typischen Abblitzdauern von wenigen Millisekunden setzt ein Einzelblitzkopf bis zu 10 kJ Lichtenergie um, wobei kurzzeitige Leistungen im Megawattbereich aufgebracht werden. Eine Besonderheit der Blitzlichtanregung ist die pulsformig eingebrachte Wärmeenergie, die eine Phasenauswertung bei unterschiedlichen Frequenzen mit verschiedenen Tiefenempfindlichkeiten zulässt (s. Kap. 3.2). Wird ein aus Abbildung 5.6 idealisiertes Temperatur-Zeit-Signal in den Frequenzraum transformiert, können die für eine Auswertung zur Verfügung stehenden Frequenzamplituden qualitativ abgeschätzt werden (s. Abb. 5.7). Hinsichtlich der verfügbaren Amplituden eignet sich die hier angenommene Blitzanregung für Phasenauswertungen in Frequenzbereichen von unter 1 Hz bis zu einigen 10 Hz. Mit Anregungen bei bspw. 1 Hz lassen sich in Bauteilen aus PVC-Kunststoffen Eindringtiefen von etwa 0.2 mm erreichen, mit 10 Hz stammen die Tiefeninformationen aus ca. 0.06 mm. Für Stahl lägen bei 1 Hz Eindringtiefen von 2.3 mm und bei 10 Hz von 0.74 mm vor.

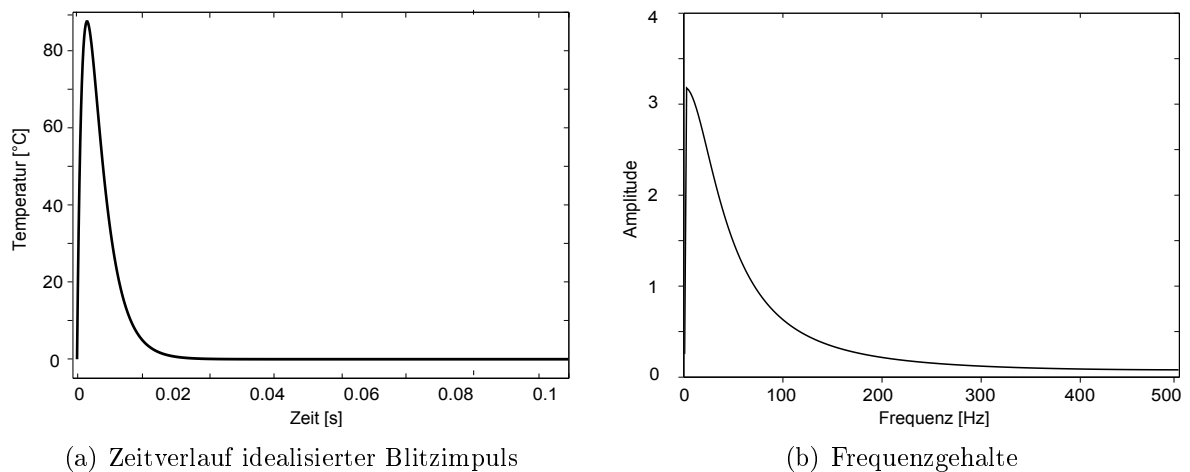


Abbildung 5.7: Transformation eines Blitzlichtimpulses in den Phasenraum

Die absoluten Energieeinträge hängen von der Leistung des Blitzkopfes und dem Absorptionsgrad des Prüfobjektes ab. Probleme bei der Anregung treten auf, wenn der absorbierte Anteil und damit die eingekoppelte Energie zu gering ist, wie z.B. bei blanken Metalloberflächen. Der Energieeintrag kann durch Schwärzung der Oberfläche mit einem matten Spray gesteigert werden, ein möglicher Einfluss der Schicht muss berücksichtigt werden.

Gemäß des Abstandsgesetzes ist von einer starken Abnahme der maximal erreichbaren Temperaturen mit zunehmender Distanz zwischen Quelle und Objekt auszugehen.

B.1.F. SELEKTIVITÄT

Die Erwärmung bei der Blitzanregung erstreckt sich in der Regel auf Bereiche der Bauteiloberfläche von bis zu etwa 0.5 m^2 . Inhomogene Absorptionsgradverteilungen können zu unregelmäßigen Energieeinträgen führen und undefinierte laterale Wärmeflüsse herbei führen. Ungleichmäßige Erwärmungsmuster sind insbesondere aufgrund der Geometrie der Blitzlichtquellen zu erwarten. Die Blitz- bzw. Reflektorform spielt eine wichtige Rolle, so dass z.B. Ringblitze für eine allseitig gleichförmige und rotationssymmetrische Beleuchtung des Prüfobjektes ausgelegt sind. Lichtwellenleiter dahingegen fokussieren die Lichtenergie punktuell.

B.1.G. WEITERE EIGENSCHAFTEN

Die Blitzlichtanregung als optische Erwärmung wird durch Lichtquellen berührungslos hervorgerufen, es ist kein Kontakt zum Prüfobjekt erforderlich.

Nach dem Abblitzen verwandelt sich die Anregungsquelle durch Eigenwärme in eine „warme Quelle“. Bei der Anregung im Reflexionsaufbau kann es bei der Aufnahme von Infrarotsequenzen zu Problemen durch Störreflexionen kommen, wenn das infrarote Nachleuchten des Blitzes an reflektiven Oberflächen als Störstrahlung auf den Detektor der Kamera gespiegelt wird. Untersuchungen an Materialien mit hohem Reflexionsgrad sind besonders gefährdet. Die Positionierung der Anregungsquelle im Reflexionswinkel zur Infrarotkamera sollte stets vermieden werden. Robustere Prüfungen erfolgen im Transmissionsaufbau, wo derartige Reflexionen nicht auftreten. Abhilfe kann auch ein in den Strahlengang eingesetzter Filter (z.B. Plexiglasscheibe) schaffen, der nur den visuellen Spektralbereich hindurch lässt. Damit der Filter nicht selbst zu einer warmen Quelle wird, kann er z.B. mit Kaltluft auf konstanter Temperatur gehalten werden. Die Erhöhung des Emissionsgrades durch eine Schwärzung reduziert alle Arten von Störreflexionen.

Der Platzbedarf für den Prüfaufbau richtet sich nach der Blitzkopf- bzw. Reflektorform und ist verhältnismäßig hoch. Für die robustere Anregung in Transmission gilt der Raumbedarf für beide Seiten des Prüfobjektes. Die einzelnen Geräteteile der Blitlichtanregung sind meist transportabel und können leicht montiert und flexibel justiert werden.

Die Kosten für Blitzgeräte sind moderat, für einen Blitzgenerator mit maximaler Ausgangsleistung von 6 kJ inklusive eines Blitzkopfes mit trichterförmigen Reflektor, wie in Abbildung 5.4 gezeigt, liegen sie z.B. bei einigen Tausend Euro (< 10.000 EUR). Blitzköpfe haben begrenzte Lebensdauern und müssen im Serieneinsatz regelmäßig gewechselt werden. Sie geben über ihre Lebensdauer etwa 100.000 Blitze ab, bei schneller Abblitzfolge und schlechten Abkühlbedingungen oft noch weniger.

B.2 TEMPERATURSTRAHLERANREGUNG

B.2.C. AUSPRÄGUNGEN

Weitere häufig eingesetzte optische Anregungsquellen sind die Temperaturstrahler, bei denen die ausgesandte Strahlung aus der Wärme der Strahlungsquelle stammt und von deren Temperatur abhängt. Die Strahlungsspektren der Temperaturstrahler sind langwelliger als die der Blitzlampen, und sie haben niedrigere Farbtemperaturen. Ihr Spektrum enthält oft visuelle Anteile, ein Großteil reicht aber weit in den Infrarotbereich hinein. Zwei Halogenstrahlerpanel bestehend aus jeweils vier Einzelstrahlern mit dazugehöriger Leistungselektronik⁴ sowie ein leistungsstarker Einzelstrahler⁵ werden in Abbildung 5.8 als typische Vertreter der Temperaturstrahler gezeigt.

⁴Geräte von der Firma MTD Medientechnik Duwe [MTD]; Technische Daten der Halogenstrahler siehe *Produktkatalog PAR Lampen* der Firma GE Consumer & Industrial Lightning [GE]

⁵Technische Daten siehe *Prospekt Halogen Netzleuchten* der Firma Kobold Licht Beleuchtungstechnik GmbH [Kob]

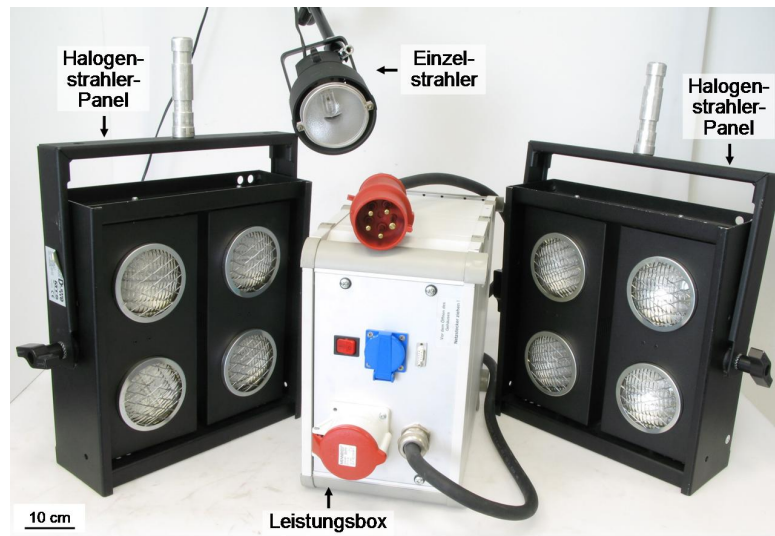


Abbildung 5.8: Temperaturstrahleranregungsquellen und Leistungselektronik

Neben einer Vielzahl unterschiedlicher Halogenstrahler gibt es verschiedene Bauarten von Keramik-, Quarzglas- und Carbonstrahlern. Grundsätzliche Unterschiede der Strahlungsquellen liegen in der spektralen Abstrahlcharakteristik. Die spektralen Strahlungsverteilungen einiger Temperaturstrahler sind in Abbildung 5.9 dargestellt. Spektren der Halogenstrahler haben meist hohe kurzwellige, visuelle Anteile, Carbonstrahler dahingegen geben ihre Strahlung im mittelwelligen, die Quarzglasstrahler im mittel-/kurzwelligem und die Keramikstrahler im langwelligem Bereich ab.

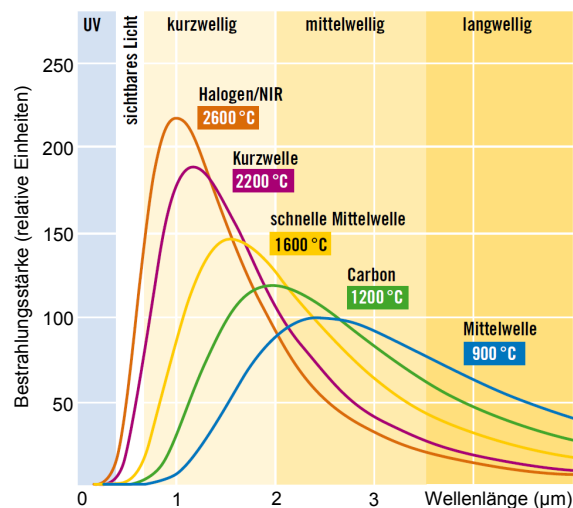


Abbildung 5.9: Spektrale Strahlungsverteilung von Temperaturstrahlern, auf gleiche Leistung normiert (Quelle: Firma Heraeus Noblelight GmbH [Her])

Kommerziell für industrielle Heizprozesse erhältliche Strahler werden von verschiedenen Anbietern bezüglich ihres Gebrauchs in kurz-, mittel- und langwellige Infrarotstrahler unterteilt. Dies zeigen z.B. die Produktportfolios der Firmen Heraeus Noblelight GmbH [Her] und INFRATEC Infrarot Strahler GmbH [INF].

B.2.D. SIGNALFORM

Temperaturstrahler zeichnen sich durch ihre hervorragende Amplitudenmodulierbarkeit bei geringen Temperaturänderungsgeschwindigkeiten aus. Besonders gut geeignet sind Temperaturstrahler für kontinuierliche Erwärmungsszenarien, häufig werden jedoch periodische Anregungen mit Sinusmodulation durchgeführt, die mit beliebig niedrigen Frequenzen bis zu etwa 1 Hz möglich sind. Rampenartige Erwärmungen weisen eine Zeitverzögerung bis zur Erreichung des Temperaturmaximums auf, die je nach Trägheit des Strahlers bis zu einigen Sekunden betragen kann.

Temperaturverläufe resultierend aus einer sinusförmigen Halogenstrahleranregung mit dem zuvor gezeigten Halogenstrahlerpanel werden als praxisnahes Beispiel in Abbildung 5.10 gezeigt. Verschiedene Anregungsfrequenzen werden an einer Aluminiumoberfläche in direktem Reflexionswinkel zum Wärmestrahler mit der *ThermaVision™ SC6000 HS (InSb)*⁶ im Empfindlichkeitsbereich des Kameradektors von 3-5 µm aufgenommen. Durch die Spiegelung an der Aluminiumoberfläche wird die von der Anregungsquelle abgestrahlte Wärme derart erfasst, wie sie auf die Prüfobjekttoberfläche trifft und in Wärme umgesetzt wird. Die Schwankungsbreiten der Wiederholmessungen sind anhand der Markierung von Min- und Maximalwerten verdeutlicht (s. Detailvergrößerung der 2 Hz Anregung). Bei den dargestellten Temperaturverläufen handelt es sich um nicht eingeschwungene Zustände, der instationäre Zustand zeigt sich durch die anhaltende Erwärmung des Bauteils. Wann sich quasistationäre Zustände mit gleichbleibenden Temperaturmittelniveaus einstellen, hängt von verschiedenen Faktoren (Lichtquelle, Material, usw.) ab und kann je nach Material und Prüfkörpergeometrie sehr lange (z.B. 5 min) dauern.

⁶Technische Daten siehe *Datenblatt ThermaVision™ SC6000 HS* der Firma Flir Systems AB [Flia]

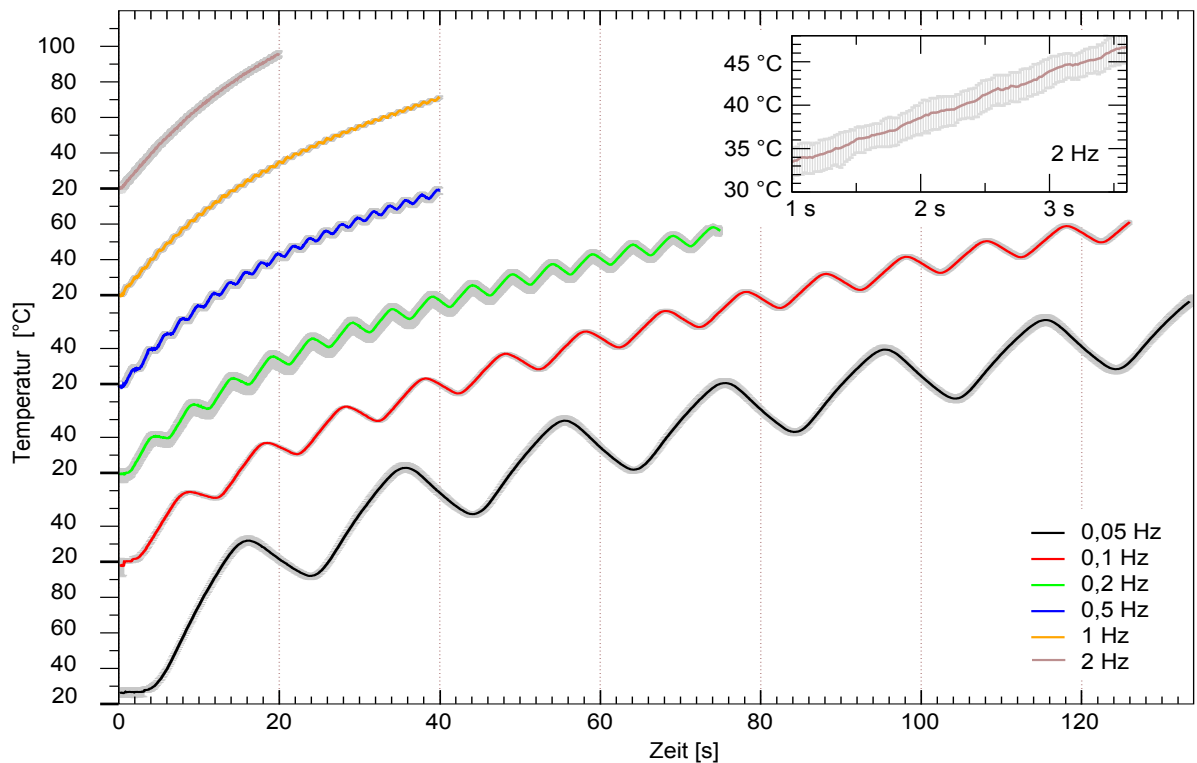


Abbildung 5.10: Sinusförmig amplitudenmodulierte Halogenstrahleranregung

Unter den Temperaturstrahlern sind die Halogen- sowie die Carbonstrahler als verhältnismäßig reaktionsschnell zu beschreiben, Quarzglas- und Keramikstrahler verhalten sich besonders träge. Die Dauer bis zur maximalen Erwärmung der Quarzglasstrahler beträgt bis zu einer Minute, sie sind damit nur bedingt für Taktprozesse einsetzbar. Die Erwärmungsdauern von Keramikstrahlern liegen im Minutenbereich, und sie werden daher vermehrt für kontinuierliche Prozesse eingesetzt.

B.2.E. ENERGIEMENGE

Die übertragenen Energiemengen sind bei der Temperaturstrahleranregung aufgrund u.a. langer Wirkungsauern hoch. Sie hängen von der Einzelstrahlerleistung und der Anzahl der eingesetzten Strahler ab. Ein Halogenstrahlerpanel aus Abbildung 5.8 gibt mit seinen vier Einzelstrahlern z.B. eine maximale Leistung von 2,6 kW bei Dauerstrahlung ab, der gezeigte Einzelstrahler eine maximale Leistung von 1 kW. Bei der Modulation der Heizquelle hängt die Energiemenge vom Gesamtdurchsatz ab. Besonderheiten der Anregung bei niedrigen Frequenzen sind die hohen Tiefenreichweiten der Wärmediffusion. Aufgrund der guten Modulierbarkeit mit niedrigen Frequenzen lassen sich Temperaturstrahler sehr gut für die Untersuchung schlechter Wärmeleiter

anwenden. Zu beachten ist die abnehmende Amplitude bei höheren Frequenzen als Konsequenz aus der Trägheit der Anregungsquelle, die den limitierenden Faktor für die Wahl höherfrequenter Anregungen und Auswertungen darstellt. Ebenso hat die thermische Trägheit des Prüfobjekts direkten Einfluss auf die Energieeinkopplung und den resultierenden Temperaturverlauf an der Prüfobjektoberfläche. Für Materialien mit hohen Temperaturleitfähigkeiten nimmt die Eignung der Temperaturstrahler als Anregungsquelle zunehmend ab. Amplituden für oft verwendete Frequenzen sind aus Abbildung 5.10 abgeleitet und in Abbildung 5.11 gezeigt.

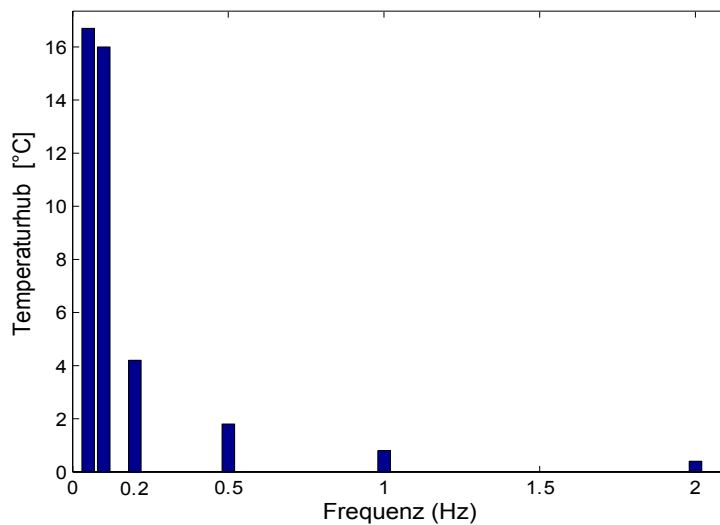


Abbildung 5.11: Temperaturhübe der Halogenstrahleranregung je Frequenz

Die Energieeinträge bei der Temperaturstrahleranregung sind verhältnismäßig hoch und gewöhnlich bei Abständen von bis zu wenigen Metern für die Erzeugung von Temperaturkontrasten ausreichend hoch. Abnehmende Energieeinträge infolge des Abstandsgesetzes fallen daher bei geringen Abständen weniger ins Gewicht als bei der Blitzanregung.

B.2.F. SELEKTIVITÄT

Die Homogenität und die Ausdehnung der erwärmten Oberfläche des Prüfobjektes steht in direkter Verbindung mit der Form, Größe und Anordnung der gewählten Temperaturstrahler. Es gibt verschiedenste Bauformen, darunter linien- und flächenhafte Strahler. Mit zunehmenden Abständen vom Prüfobjekt verringert sich der Geometrieinfluss, so dass mit Strahlerarrays großflächige, nahezu homogene Erwärmungen erzeugt werden können. Je nach Anzahl der eingesetzten Einzelstrahler bzw. Strahlerarrays können quasi beliebig große Flächen (z.B. mehrere m^2) erwärmt werden.

B.2.G. WEITERE EIGENSCHAFTEN

Temperaturstrahler bringen die Energie bei der Anregung wie das Blitzlicht berührungslos ein. Der Hauptstrahlungsanteil der Temperaturstrahler liegt im Infrarotbereich, daher kann nicht eingekoppelte Strahlung im Reflexionsaufbau als Störstrahlung auf den Detektor treffen. Durch geschickte Positionierung der Quelle außerhalb des Reflexionswinkels oder durch Schwärzung der Oberfläche können hohe Absorptionen realisiert und Reflexionsprobleme vermieden werden. Eine Schwärzung schließt Reflexionen weitestgehend aus und steigert die Energieeinkopplung. Um derartige Störeinflüsse im Vorfeld auszuschliessen, können Anregungsquellen mit Strahlungsspektren ohne Überdeckung mit dem Empfindlichkeitsbereich der Kamera gewählt werden, oder entsprechende Strahlungsbereiche werden mittels Spektralfilter herausgefiltert.

Der Platzbedarf bei der Temperaturstrahleranregung ist aufgrund der großen und sperrigen Anregungsquellen hoch. Ein Vorteil ist die flexible Montage und Justage der einzelnen Komponenten.

Die Produktpalette der Temperaturstrahler ist sehr groß und die Kosten variieren entsprechend stark. Preise beginnen bei unter 100 Euro für einfache Halogeneinzelstrahler und summieren sich bei großflächigen Strahleranordnungen bis zu einigen 1.000 Euro. Inklusiv der Leistungselektronik sind Kosten von etwa 10.000 Euro für eine Anregungseinheit aus Temperaturstrahlern üblich.

Die Standzeiten der Temperaturstrahler hängen stark von der Art der Modulierung ab. Da Temperaturstrahler grundsätzlich nicht für die schnellen Vorgänge bei thermografischen Messungen ausgelegt sind, ist ein häufiger Wechsel der Lampen üblich. Keramikstrahler haben im Einsatz für kontinuierliche Prozesse sehr lange Lebensdauern von etwa 40.000 Betriebsstunden, bei kurzzeitigen Erwärmungen und Abkühlungen fallen die Standzeiten rapide, nicht selten auf einige 1.000 Betriebsstunden, ab.

Ultraschallanregung

A. PHYSIKALISCHER EFFEKT

Bei der ultraschallangeregten Thermografie werden Fehler und Prüfmerkmale wie z.B. Risse, Grenzflächenablösungen und Klebstoffe selbst erwärmt. Eine Ultraschallsonotrode wird gegen das zu prüfende Bauteil gedrückt und regt dieses zu mechanischen Schwingungen im Ultraschallbereich bei üblicherweise um die 20 kHz an. Aufeinanderliegende Grenzflächen erzeugen unter zyklischer Belastung aufgrund der Hysterese zwischen Be- und Entlastung Reibwärme, die während der thermografischen Prüfung

sichtbar wird. Klebstoffe erwärmen sich aufgrund ihrer hohen Energieabsorption im Material, so dass anhand der Wärme an der Oberfläche ein Rückschluss auf das Vorhandensein und die Lage der Klebstoffe möglich ist. Aufgrund der starken lokalen Energieumsetzung bei der Ultraschallanregung ist die Prüfung hinsichtlich der Zerstörungsfreiheit häufig als kritisch zu bewerten.

B. DIVERSIFIZIERUNG

Für die ultraschallangeregte Thermografie hat sich der Einsatz von Leistungsultraschallgeräten bewährt, die ursprünglich für das Kunststoffschweißen vorgesehen waren. Für die Einkopplung der Ultraschallenergie werden verschiedene Gerätekombinationen verwendet, z.B. ein Standaufbau mit Ultraschallgenerator und fester Vorschubeinheit oder eine Kombination mit frei beweglicher Handsonotrode, wie sie die Abbildung 5.12 zeigt.⁷ Die Einkopplung der Ultraschallenergie beim Standaufbau erfolgt mittels fest installierter Vorschubeinheit, die Handsonotrode wird zur Energieübertragung manuell oder mit speziellen Spannvorrichtungen an das Bauteil gepresst. Durch ihre große Beweglichkeit ist die Handsonotrode sehr flexibel einsetzbar, mit dem Standaufbau dahingegen kann eine bessere Reproduzierbarkeit erzielt werden. Die Funktionsumfänge zur Signalmodulierung hängen vom eingesetzten Ultraschallgenerator ab. In dem hier gezeigten Fall lässt der Generator des Standaufbaus umfassendere Modulationen hinsichtlich der Zeit und der Ultraschallfrequenz zu als der der Handsonotrode.

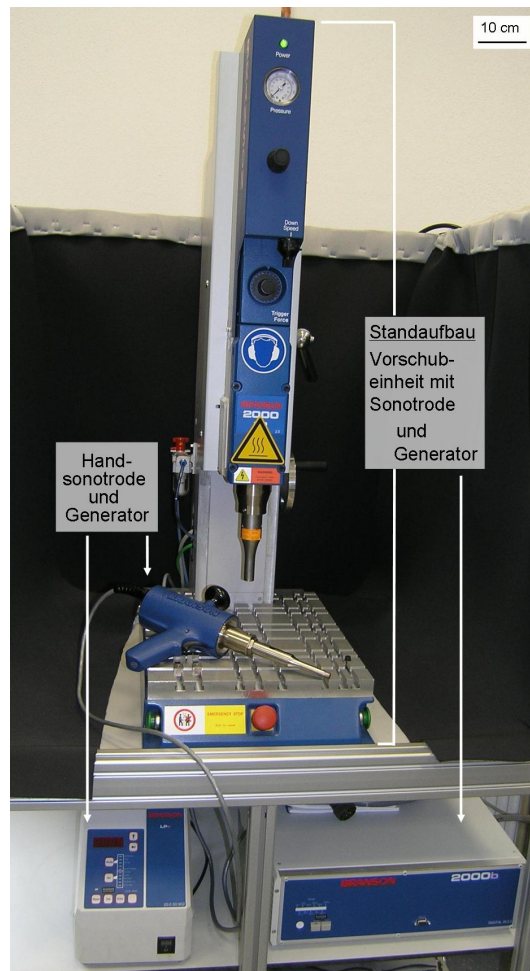


Abbildung 5.12: Ultraschallanregungsquellen

⁷Technische Daten und Funktionsumfänge der Ultraschall Geräte der Firma Branson siehe *Produktinformation Ultrasonic Welding* von Emerson Industrial Automation™ [Eme]

C. AUSPRÄGUNGEN

Zur Anregung werden üblicherweise Ultraschallgeneratoren mit Ultraschallfrequenzen von 20 oder 30 kHz verwendet. Spezielle Geräte ermöglichen darüberhinaus einen Sweep, d.h. der Generator kann über bestimmte Frequenzbänder (z.B. 15-20 kHz) durchgestimmt werden. Für die Sonotroden können verschiedene Materialien z.B. Stahl oder Titan verwendet werden, die unterschiedliche Ankoppeleigenschaften aufweisen.

D. SIGNALFORM

Die Energieamplitude der eingekoppelten Ultraschallfrequenz lässt sich verschiedenartig modulieren. Häufig eingesetzte Anregungsformen sind die Puls- bzw. Burstanregungen sowie die sinusförmige Modulation, wie sie in Abbildung 5.13 für verschiedene Pulsdauern (Δt_1 , Δt_2) und Modulationsfrequenzen (f_1 , f_2) schematisch gezeigt sind. Die Pulsdauern betragen je nach Stärke der Temperaturentwicklung am Fehler bzw. des Merkmals üblicherweise einige Hundertstel bis zu wenigen Sekunden, die Modulationsfrequenzen der sinusförmigen Anregung sind mit den verfügbaren Generatoren innerhalb der thermografisch interessanten Bereiche (z.B. 0.2 Hz, 1 Hz, 5 Hz) quasi frei wählbar.

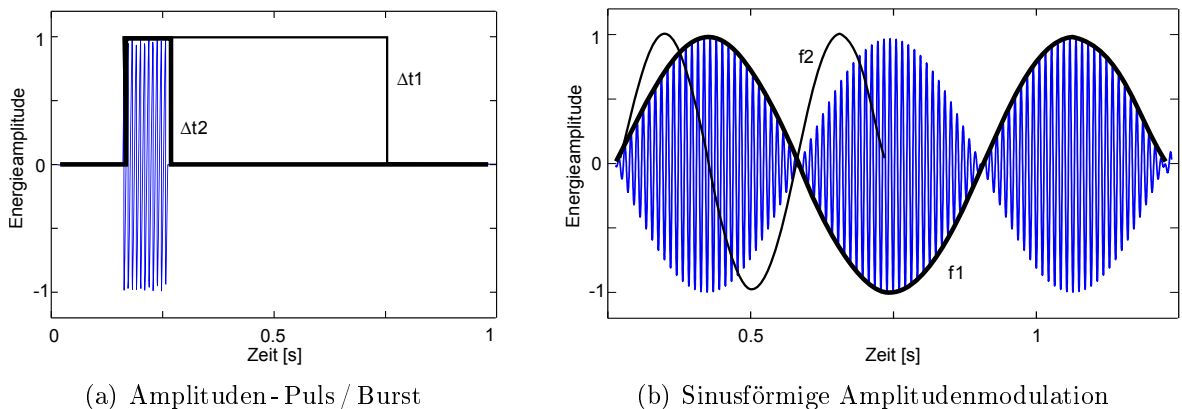


Abbildung 5.13: Modulationen der Ultraschallanregung (schematisch)

E. ENERGIEMENGE

Die eingebrachte Energiemenge lässt sich abhängig vom Ultraschallgenerator in weiten Grenzen variieren. Die entwickelten Temperaturen hängen stark vom Material und von der Fehler-/Merkmalgeometrie ab. Temperaturerhöhungen von etwa 5-10 °C an z.B. Rissspitzen in Metallen sind üblich.

Um störende Erwärmungsmuster zu vermeiden, die sich frequenzabhängig durch stehende Wellen im Material ausbilden, kann simultan zur Amplitudenmodulation ein Sweep über die Ultraschall-Frequenzen erfolgen. Abbildung 5.14(a) zeigt beispielhaft einen Amplitudenstoß mit mehreren Frequenzen und Abbildung 5.14(b) eine sinusförmige Amplituden-Frequenz-Modulation. Beim Frequenz-Sweep ist eine Absenkung der maximal erreichbaren Amplituden wahrscheinlich, da die Ausgangsleistung des Ultraschallgebers außerhalb seiner Hauptfrequenz meist geringer ist. Bei der Amplituden-Frequenz-Modulation ist außerdem zu beachten, dass die fehlerstellenrelevanten Ultraschallfrequenzen mit ausreichenden Energieamplituden erhalten bleiben. Mit einer verdoppelten Modulationsfrequenz der Frequenz im Vergleich zur Amplitude kann dies weitgehend ausgeschlossen werden.

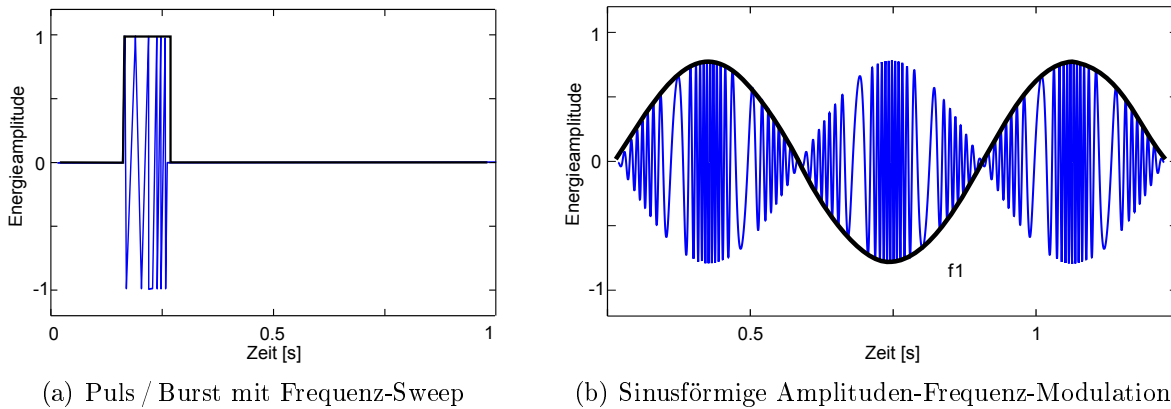


Abbildung 5.14: Anregungen mit Frequenz-Sweep (schematisch)

Eine Optimierung der Anregung ist auch durch die resonante Anregung nach Homma [Hom07] möglich. Der Gesamtenergieeintrag kann reduziert werden, indem nur das fehlerstellenrelevante Anregungsspektrum des Ultraschalls verwendet wird. Neben geringeren Energien, die zur Anregung aufgewendet werden müssen, ist die Gefahr der Materialschädigung geringer.

Reichweiten der Anregung sind aufgrund unterschiedlichen Dämpfungsverhaltens stark material- und geometrieabhängig, sie reichen von etwa 10 cm bis zu einigen Metern.

F. SELEKTIVITÄT

Aufgrund der selektiven Erwärmung zeichnen sich die Fehlstellen und Merkmale meist deutlich ab, so dass Störreflexionen bei der Aufnahme der Infrarotsequenzen weniger ins Gewicht fallen. Artefakte durch die Anregung können bei schlechter Ankopplung der Sonotrode auftreten, wenn an der Kontaktstelle verstärkt Wärme

erzeugt wird. Die Ultraschallsonotrode sollte optimalerweise außerhalb des betrachteten Bildbereiches liegen und nicht innerhalb der reflektierenden Umgebung.

G. WEITERE EIGENSCHAFTEN

Zur Anregung muss eine Kontaktfläche zur Ankopplung der Sonotrode zur Verfügung stehen, da die eingesetzten Leistungultraschallquellen berührend arbeiten. Verkippungen bzw. ein Verkanten der Sonotrode kann durch die mechanische Bewegung leicht zu Oberflächenbeschädigungen durch Kratzer führen.

Hinsichtlich des Platzbedarfes und der Flexibilität des Prüfaufbaus gibt es große Unterschiede zwischen den verschiedenen Gerätetechniken. Der Standaufbau mit der Vorschubeinheit ist eine feste Prüfeinrichtung hohem Platzbedarf. Es treten Einschränkungen für die Prüfobjekte hinsichtlich der Größe und der Geometrie auf, um sie unterhalb der Sonotrode positionieren zu können (vgl. Abb. 5.12). Die Handsonotrode hingegen ist mobil und nahezu frei an beliebigen Prüfobjekten fixierbar, bietet aber nicht die gleiche Reproduzierbarkeit.

Kosten für die Installation einer Ultraschallanregungsquelle liegen bei wenigen 1.000 Euro für den mobilen Aufbau mit Handsonotrode und bei etwa 20.000 bis 30.000 EUR für den Standaufbau mit Vorschubeinheit. Weitere Preisvariationen ergeben sich aus den jeweils verfügbaren Funktionsumfängen der Ultraschallgeneratoren, wie z.B. der Sweep-Funktionalität.

Induktivanregung

A. PHYSIKALISCHER EFFEKT

Bei der Induktivanregung werden in elektrisch leitfähigen Materialien Wirbelströme induziert, die in Abhängigkeit vom Material und der gewählten Wirbelstromfrequenz mehr oder weniger tief ins Material eindringen. Durch die elektrischen Verluste der induzierten Wechselfelder kommt es in homogen mit Wirbelströmen durchfluteten Oberflächenschichten zu einer gleichmäßigen Erwärmung ähnlich der optischen Anregung. Im Gegensatz dazu ist die induktive Erwärmung jedoch unabhängig von optischen Absorptionskoeffizienten. Risse oder ähnliche Inhomogenitäten lenken den elektrischen Stromfluss ab, so dass nahe der Fehlstellen (z.B. an den Rissspitzen) Bereiche mit erhöhten Feldliniendichten entstehen. Die verdichteten Feldlinien führen zu lokalen Temperaturüberhöhungen, die thermografisch nachgewiesen werden können.

B. DIVERSIFIZIERUNG

Für die induktive Erwärmung werden Hoch- und Mittelfrequenzgeneratoren mit Arbeitsfrequenzen in Bereichen von etwa 5 kHz bis 500 kHz und Ausgangsleistungen zwischen 1 kW und 10 kW eingesetzt, die gewöhnlich für die Metallbearbeitung z.B. zum Härten, Anlassen und Vorwärmen Verwendung finden (vgl. [CZ05]). Ein oft verwendeter Generator ist der HF AXIO 10/450 der Firma Hüttinger Electronics GmbH & Co. KG, dessen Generatoreinheit und Außenschwingkreis mit einem Ringinduktor in Abbildung 5.15 dargestellt sind.⁸ Die Arbeitsfrequenzen des gezeigten Gerätes können durch das Einsetzen von Kapazitäten in den Außenschwingkreis in Stufen zwischen 50 - 450 kHz variiert werden, der Generator besitzt eine maximale Leistung von 10 kW. Andere Generatortypen stellen nur eine einzige Arbeitsfrequenz zur Verfügung, die sich in Abhängigkeit von der angeschlossenen Induktorspule als Resonanzfrequenz einstellt, oder sie bieten z.B. flexiblere Ansteuerungen der eingekoppelten Leistung.



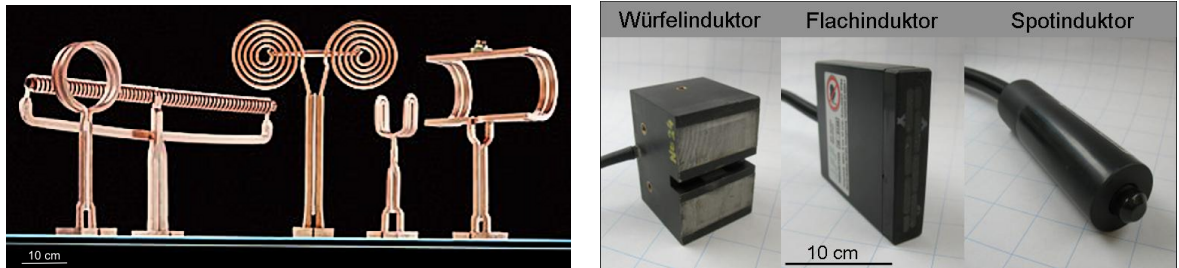
Abbildung 5.15: Induktionsgenerator mit Ringspule

C. AUSPRÄGUNGEN

Für die induktive Erwärmung werden Generatoren mit verschiedenen Induktoren eingesetzt. Um auswertbare Fehlersignale zu erzeugen, ist eine geeignete Auswahl bzw. Anpassung der Induktorform an die Fehler- und Bauteilgeometrie erforderlich. Der Induktor ist so auszulegen, dass die induzierten Ströme im Material möglichst senkrecht zur Ausdehnung der Fehlstellen verlaufen. Außerdem muss der Induktor ausreichend nah an das Bauteil herangeführt werden. Gebräuchliche Induktorgeometrien, darunter

⁸Technische Daten und Funktionsumfänge des Gerätes siehe *Produktinformation Induktionserwärmung* der Firma Hüttinger Electronics GmbH & Co. KG [Hüt]

wasserdurchflossene Kupferspulen sowie ungekühlte in Kunststoff gegossene Kompaktinduktoren sind in den Abbildungen 5.16(a) und 5.16(b) dargestellt. Eine Besonderheit der gezeigten Kompaktinduktoren für Mittelfrequenzgeneratoren der Firma IFF GmbH, die für die Klebstoffaushärtung vertrieben werden, ist das flexible Anschlußkabel der Spule zum Generator, für das aufgrund niedrigerer Arbeitsfrequenzen keine Kühlung erforderlich ist.



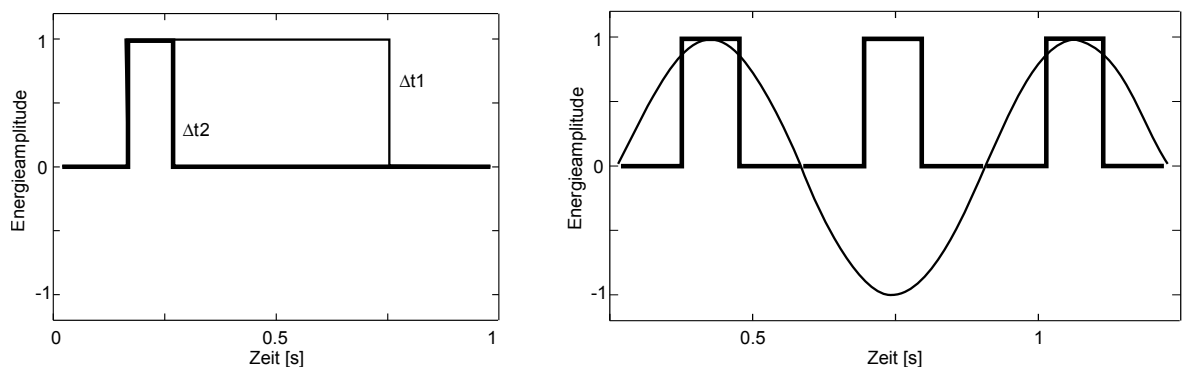
(a) Wassergekühlte Kupferinduktoren (Quelle: Firma Hüttinger GmbH & Co. KG)

(b) Ungekühlte Kompaktinduktoren der Firma IFF GmbH (Quelle: Firma INPRO mbH)

Abbildung 5.16: Verschiedene Induktorgeometrien für diverse Anwendungen

D. SIGNALFORM

Mittels der Induktivanregung können kurzzeitige Temperaturhübe von wenigen Millisekunden realisiert werden. Periodische Amplitudenmodulationen sind je nach Ausführung des Generators auf unterschiedliche Arten, rechteckförmig (An-/Aus-Modulation) oder auch sinusförmig (vgl. [RB04]), möglich. Anregungsformen der Induktivanregung sind schematisch in Abbildung 5.17 dargestellt.



(a) Amplituden Puls / Burst

(b) Sinusförmige und An-/Aus-Modulation

Abbildung 5.17: Anregungsformen der Induktivanregung (schematisch)

E. ENERGIEMENGE

Die Temperaturhübe werden über die eingebrachte Leistung reguliert. Abhängig vom Material sind problemlos 100 °C erreichbar. Um die thermografisch erforderlichen Temperaturkontraste zu erzeugen, wird das Leistungsangebot der eingesetzten Generatoren von z.B. 10 kW nur in geringem Maße genutzt. Der limitierende Faktor bei der Erwärmung ist oft die Belastbarkeitsgrenze des Materials, die selten 50-100 °C übersteigt. Der Grad der Erwärmung hängt stark vom Abstand des Induktors ab. Zur Erzeugung ausreichend hoher Temperaturhübe ist die Reichweite der Energiekopplung des Induktors zum Prüfobjekt in der Regel auf wenige Zentimeter begrenzt.

F. SELEKTIVITÄT

Anders als bei der Ultraschallanregung wirkt sich die Frequenz des Wirbelstroms auf die Eindringtiefen der Feldlinien (Skin-Effekt) und damit auf die Tiefe der erwärmten Schicht aus. Mit der Arbeitsfrequenz des Induktionsgenerators kann die thermische Anregungstiefe gezielt variiert werden. Erwärmungszonen erreichen für einen magnetischen Stahl je nach Permeabilität eine Tiefe von z.B. 0.03 mm, für einen nichtmagnetischen 0.8 mm [OT08]. Ein Frequenz-Sweep ist theoretisch möglich, wurde für die Thermografie bislang gerätetechnisch aber nicht umgesetzt. Vielversprechend ist die simultane Anregung bei mehreren zuvor festgelegten Frequenzen mit definierten Tiefenansteuerungen.

Bei den meisten Anwendungen wird die defektselektive Erwärmung genutzt, bei dem ähnlich wie bei der Ultraschallanregung die Fehlstelle selbst bzw. ihre angrenzende Umgebung erwärmt wird. Senkrecht zu den Stromlinien orientierte Fehlstellen erfahren eine Temperaturerhöhung, parallel liegende Risse bleiben kalt und unerkant.

Die Geometrien von Induktor und Prüfobjekt wirken sich stark auf die Erwärmungsmuster aus, so dass durch die starke Abstandsabhängigkeit Verkippungen bereits im Millimeterbereich zu inhomogenen Energieeinträgen führen. Weitere Artefakte sind Pseudoanzeigen durch Oberflächenunebenheiten und Kanteneffekte, die die Induktivanregung insgesamt etwas störanfälliger machen als die Ultraschallanregung. Weil sich die Fehlersignale meist aber deutlich vom weniger erwärmten Untergrund abheben, ist das Verfahren auch als verhältnismäßig robust einzuschätzen.

G. WEITERE EIGENSCHAFTEN

Die Erwärmung des Prüfobjektes bei der induktiven Anregung erfolgt berührungslos. Darüberhinaus zeichnen sich gekühlte Induktionsspulen durch ihre Eigenschaft als „kalte Quelle“ aus, die nahezu keine Störreflexionen erzeugt. Die Methode ist daher

gut für den Reflexionsaufbau geeignet, sofern die freie Sicht entlang des Induktors auf den Prüfbereich möglich ist. Weil der Induktor für die induktive Anregung nahe der Objektoberfläche positioniert werden muss, ist ein verhältnismäßig hohes Platzangebot erforderlich.

Da Induktionsspulen an die jeweilige Anwendung angepasst werden, ist der Prüfaufbau selten auf andere Prüfaufgaben übertragbar. Spezielle Anpassungen sind mit hohem Aufwand und oft mit hohen Kosten verbunden. Der Bau von Induktoren kostet einige 100 bis zu wenigen 1.000 Euro. Preise für den Induktionsgenerator liegen bei etwa 20.000 EUR, so dass für einen kompletten Prüfaufbau von Kosten bis zu 30.000 EUR ausgegangen werden kann.

Konvektive Anregung

A. PHYSIKALISCHER EFFEKT

Die konvektive Anregung basiert auf einer Abkühlung oder einer Erwärmung der Objektoberfläche durch einen Luft- oder allgemein einen Teilchenstrom und läuft ohne Einfluss von den optischen Oberflächeneigenschaften des Prüfobjektes ab. Um dem Prüfkörper entweder Wärme zuzuführen oder zu entziehen, kann beispielsweise herkömmliche Druckluft dienen.

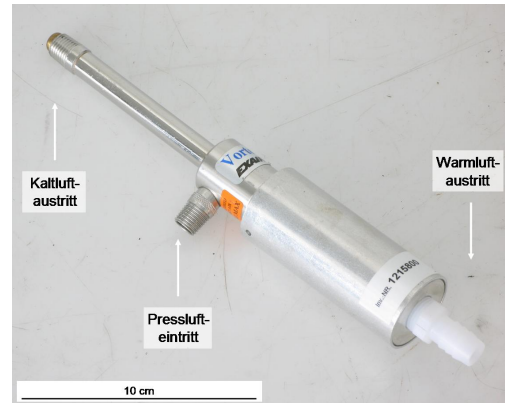
B. DIVERSIFIZIERUNG, C. AUSPRÄGUNGEN

Um die Erwärmungs- oder Abkühlwirkung der in der Industrie verfügbaren Druckluft zu verbessern, werden z.B. Heißluft-Föne zur Erzeugung warmer Luftströme und sogenannte Ranque-Hilsch Wirbelrohre zur Erzeugung kalter Luftströme eingesetzt. Mögliche Anregungsquellen zeigen beispielhaft die Abbildungen 5.18(a) und 5.18(b).⁹ Die weitere Vielfalt der konvektiven Anregungsquellen ergibt sich in erster Linie durch spezielle Instrumentierungen für unterschiedliche Signalansteuerungen.

⁹Technische Daten und Funktionsweisen der Geräte siehe *Produktkataloge und -informationen* der Firmen STEINEL Vertrieb GmbH [STE] und Exair Corp [Exa].



(a) Heißluft - Föhn



(b) Wirbelrohr

Abbildung 5.18: Quellen für die Warm- und Kaltluftanregung

D. SIGNALFORM

Bei den konvektiven Quellen, bei denen die Energie durch Luft übertragen wird, handelt es sich um verhältnismäßig träge Quellen. Aufgrund der Trägheit sind sie besonders geeignet für thermisch schlecht leitende Materialien. Häufig werden kontinuierliche oder pulsähnliche Anregungen gewählt. Mit entsprechenden Instrumentierungen (Klappen, Düsen, usw.) oder auch mittels einer Heizdrahtmodulation sind grundsätzlich periodisch modulierte Anregungsformen wie die Sinusmodulation möglich, die aber auf deutlich unter 1 Hz begrenzt bleiben. Eine weiterführende Entwicklung hin zu kürzeren Anregungsdauern ist die Kaltluft-Impulsanregung, bei der durch die Expansion von Luft aus Druckbehältern impulsartige Abkühlungen erreicht werden (siehe Gebrauchsmusterschrift und Patentanmeldung der INPRO mbH [Deu07, Eur08]).

Verschiedene Anregungsformen aus der Praxis sind in Abbildung 5.19 gegenüber gestellt, deren Verläufe nach der Anregung aus etwa 10 cm Entfernung an einer Kunststoffplatte ermittelt werden. Die Kaltluft-Impulsanregung hebt sich hinsichtlich der Temperaturänderungsgeschwindigkeiten von den anderen Verläufen ab. Im Gegensatz zu der Blitzlichtanregung ist der Temperaturanstieg aber als langsam zu beschreiben. Mittels einer Kaltluft-Impulsanregung wird innerhalb von ca. 0.4 s ein Temperaturhub von etwa 10 °C realisiert, bei der Wirbelrohranregung werden vergleichbare Temperaturhübe erst nach über 1 s erreicht. Die Warmluftanregung zeigt innerhalb gebräuchlicher Anregungsdauern von bis zu einigen Sekunden geringe Temperaturhübe, nach 1 s ist die Temperatur erst um etwa 4 °C angestiegen.

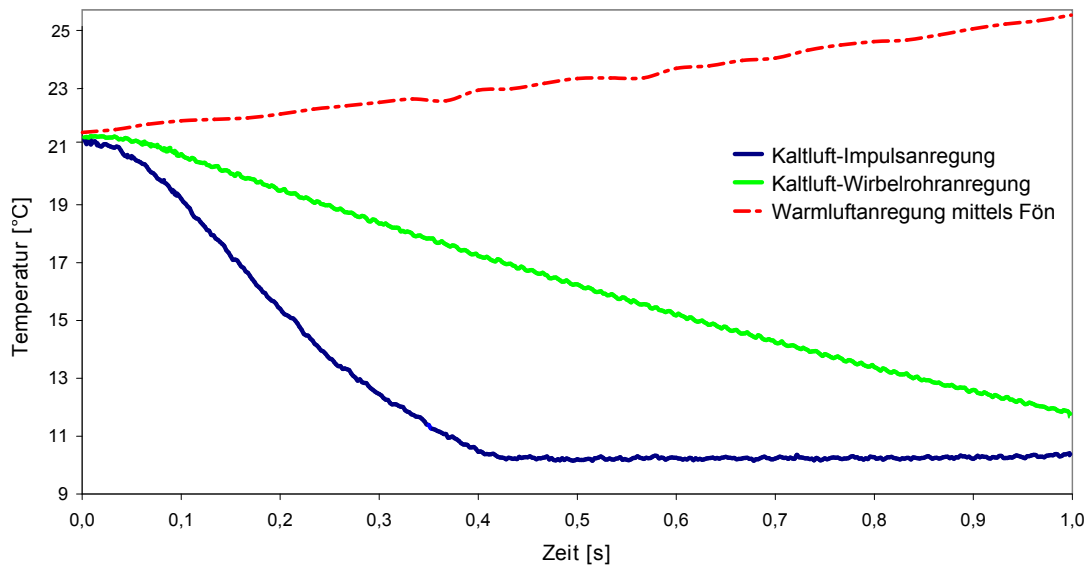


Abbildung 5.19: Temperatur-Zeit-Verläufe bei Kalt- und Warmluftanregung

E. ENERGIEMENGE

Der Gesamtenergieeintrag bei üblichen Anregungsdauern ist relativ gering. Typische Temperaturhübe und -senken bei der konvektiven Anregung übersteigen selten 10 °C. Größere Abkühlungen bzw. Erwärmungen werden in der Regel nur über längere Zeiträume von bis zu einigen Minuten erreicht, derart lange Prüfzeiten sind für thermografische Untersuchungen im Automobilbereich aber untypisch.

F. SELEKTIVITÄT

Mittels konvektiver Anregung können große Oberflächenbereiche homogen angeregt werden. Es sind dafür entsprechende Düsen zu entwerfen und an den Anwendungsfall anzupassen. Spezielle Düsenformen führen zu unterschiedlichsten Erwärmungsmustern, die durch die langsame Erwärmung aber nur verschmierte Begrenzungsbereiche aufweisen.

Ein Vorteil der konvektiven Anregung ist der emissionsgradunabhängige Energieeintrag ins Prüfteil. Dadurch ist die Energieeinkopplung unempfindlich gegenüber Emissivitätsschwankungen und zeigt aufgrund von z.B. Oberflächenverfärbungen und -verschmutzungen keine inhomogenen Energieeinträge.

G. WEITERE EIGENSCHAFTEN

Bei der konvektiven Anregung kann die Reflexion der Quelle auf der Prüfobjekt-oberfläche eine störende Wirkung haben. Bei der Kaltluftanregung ist die Auswirkung weniger kritisch als bei der Warmluftanregung, da die Strahlungsmengen aufgrund der niedrigen Temperaturen verglichen mit der Prüfobjekttemperatur gering sind. Insbesondere bei der Warmluftanregung sind Vorkehrungen zu treffen und z.B. durch Abschirmungen die Reflexionen der warmen Quelle aus dem Bildbereich zu eliminieren.

Die Kosten für die konvektive Anregung sind vergleichsweise niedrig. Gewöhnliche Druckluftdüsen, Heißluftföne und Wirbelrohre sind von unter Hundert bis zu einigen Hundert Euro erhältlich. Komplexere Geräte dahingegen, wie z.B. die Druckbehälter für die Pulsanregung, kosten einige Hundert bis wenige Tausend Euro.

Eigenschaften und Eignungstendenzen der Anregungsquellen im Überblick

Die Tabelle 5.2 stellt die Eigenschaften der gezeigten Anregungsquellen zusammenfassend dar und bietet einen guten Überblick und Vergleichsmöglichkeiten.

5 Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme

Anregungsarten/-quellen	A. Physikalischer Effekt	B. Diversifizierung	C. Ausprägung	D. Signalform	E. Energiemenge			F. Selektivität			G. Weitere Eigenschaften	
Optisch	elektromagnetische Strahlung	Blitz	Blitzkopf (~3...10 kJ)	pulsförmig (< 1 s)	kurzzeitig hohe Einkopplung abhängig von der Leistung	Gesamtmenge gering aufgrund kurzer Dauer	starker Einfluss der Emissivität, Winkel, usw.	mittelmäßig flächenhafte Anregung der Oberfläche	starke Winkelabhängigkeit hinsichtlich der Homogenität	großer Abstandseinfluss	- berührungslos - zerstörungsfrei, außer bei temperaturempfindlichen Oberflächen - Anfällig für Störreflexionen im Reflexionsaufbau - hoher Platzbedarf - flexibler Prüfaufbau - moderate Kosten	
			Ringblitz (~3...10 kJ)									
			Lichtwellenleiter (z.B. 3 kJ)									
		Temperaturstrahler	Halogenstrahler	kontinuierlich	Je nach Leistung	relativ hoch aufgrund langer Dauer	mittlerer Einfluss der Emissivität, Winkel, usw.	flächenhafte Anregung der Oberfläche	mittelmäßige Winkelabhängigkeit	mittlerer Abstandseinfluss		
				pulsförmig (> 1 s)		entsprechend der Dauer						
				periodisch (> 1 Hz)		je nach Modulationsgeschwindigkeit						
Infrarotstrahler	kontinuierlich	relativ hoch aufgrund langer Dauer	Energie an Fehlstelle je nach Bauteilgröße	emissionsgradunabhängig	defektselektiv	Wärmeerzeugung an Sonotrode bei schlechter Einkopplung (Verkipfung, ...)	Reichweite abhängig von Bauteilgröße und -form	- kontaktierend - hoher Platzbedarf - Zerstörungsfrei - Prüfaufbau - reproduzierbarer - spröden Materialien und empfindlichen Oberflächen - reproduzierbarer				
		pulsförmig (>> 1 s)							entsprechend der Dauer			
		periodisch (>> 1 Hz)							je nach Modulationsgeschwindigkeit			
Ultraschall	mechanische (akustische) Schwingungen	Standaufbau mit fester Vorschubeinheit	Generatoren mit diversen Ultraschallfrequenzen, verschiedenen Funktionalitäten und Sonotrodenmaterialien/-formen	pulsförmig	Je nach Ankopplung der Sonotrode; hohe Energie an Fehlstelle	Gesamtenergie je nach Grenzflächenreibung abhängig von Fehlstelle; ggf. Leistungsabfall durch Frequenz-Sweep	Energie an Fehlstelle je nach Bauteilgröße	defektselektiv	Wärmeerzeugung an Sonotrode bei schlechter Einkopplung (Verkipfung, ...)	Reichweite abhängig von Bauteilgröße und -form	- kontaktierend - hoher Platzbedarf - Zerstörungsfrei - Prüfaufbau - reproduzierbarer - spröden Materialien und empfindlichen Oberflächen - reproduzierbarer	
			Handgerät mit mobiler Sonotrode	kontinuierlich								periodisch
				pulsförmig								
Induktion	elektromagnetische Wechselfelder (Wirbelströme)	Induktionsgeneratoren verschiedener Funktionsweisen und Leistungen	Ausstattung mit diversen Induktionsspulen	pulsförmig	Je nach Generator Variation der Eindringtiefe möglich	Je nach Generator Rechteck (an/aus)-Modulation oder freie Modulierbarkeit der Amplitude, z.B. sinusförmig	defektselektiv	Eindringtiefen über bestimmtes Spektrum regulierbar (je nach Konduktivitäten)	oder flächig	- berührungslos - in der Regel zerstörungsfrei - hoher Installationsaufwand - hoher Platzbedarf - Prüfaufbau unflexibel - sehr teuer		
				periodisch								
Konvektion	Strömung / Konvektion	Kaltluft	Druckluft, Wirbelrohr	kontinuierlich	relativ niedrige Energieeinträge	emissionsgradunabhängig	großflächig	Homogenität je nach Düsenform	- berührungslos - zerstörungsfrei - Platzbedarf gering - Prüfaufbau flexibel - kostengünstig			
			Expansionsbehälter	pulsförmig (< 1 s)								
			Druckluft, Wirbelrohr	periodisch (> 1 Hz)								
		Warmluft	Heißluftföne mit diversen Instrumentierungen	kontinuierlich	relativ niedrige Energieeinträge	emissionsgradunabhängig	großflächig	Homogenität je nach Düsenform				
				pulsförmig (< 1 s)								
				periodisch (> 1 Hz)								

Tabelle 5.2: Zusammenstellung der Charakteristika verschiedener Anregungsquellen

Die Eignung der Anregungsquellen zur Signalerzeugung zeigt Tabelle 5.3.

Fehlererkennung	Riss			Pore, Lunker			Ablösung, Delaminationen		
	optisch Blitz	optisch T-Strahler	Ultraschall	optisch Blitz	optisch T-Strahler	Ultraschall	optisch Blitz	optisch T-Strahler	Ultraschall
Anregung Eignung	o	o	++	++	++	-	++	++	++
Anregung Eignung	Induktion	Konvektion	passiv	Induktion	Konvektion	passiv	Induktion	Konvektion	passiv
Anregung Eignung	++	-	-	o	+	+	+	+	o

Merkmal	Schichtdicke			Vorhandensein, Lage, Dimension			Temperatur		
	optisch Blitz	optisch T-Strahler	Ultraschall	optisch Blitz	optisch T-Strahler	Ultraschall	optisch Blitz	optisch T-Strahler	Ultraschall
Anregung Eignung	++	++	-	++	++	++	-	-	-
Anregung Eignung	Induktion	Konvektion	passiv	Induktion	Konvektion	passiv	Induktion	Konvektion	passiv
Anregung Eignung	o	o	-	+	+	o	-	-	++

- ungeeignet
o neutral
+ geeignet
++ gut geeignet

Tabelle 5.3: Eignung der Anregungsquellen zur Signalerzeugung

5.2.4 Infrarot-Kameratechnik zur Signalerfassung

Die Rohdaten für thermografische Untersuchungen werden mit Infrarotkameras erfasst, deren Eigenschaften für die Durchführung der Prüfung eine große Bedeutung haben. Weiterentwicklungen werden in der Regel vom Militär vorangetrieben, was sich durch sehr hohe Preise für die ersten zivil verfügbaren Kamerasysteme ausdrückt. Mit steigendem Absatz von Infrarotkameras für industrielle Anwendungen gibt es starke Tendenzen vom hochspeziellen hin zum kostengünstigen Massenprodukt, das entsprechend geringere Leistungsfähigkeiten aufweist.

Infrarotsysteme werden nach DIN 54190-2 [Deu05b] nach folgenden Eigenschaften spezifiziert:

- Temperatur-Messbereich
- Thermische Auflösung
- Geometrische Auflösung und Objektive
- Bildwiederholrate und zeitliche Auflösung
- Arbeitstemperaturbereich, Lagertemperaturbereich, Spektralfilter

Weitere wichtige Merkmale sind:

- die Integrationszeit (Belichtungszeit)
- die digitale Auflösung (Bit-Genauigkeit)
- der Detektorauslesemodus
- die Einzel-Temperatur-Messbereiche (Dynamik)
- die spektrale Empfindlichkeit
- die Baugröße
- die Kosten

Die Eigenschaften und Merkmale der Kamerasysteme sind in der DIN 54190 - Teil 2 und Teil 3 [Deu05b, Deu06a] definiert, weitere Erläuterungen sind im Merkblatt TH1 [DGZ99] zu finden. Zwischen manchen Eigenschaften bestehen Abhängigkeiten, z.B. können bei längeren Integrationszeiten höhere Temporaufösungen erreicht werden. Je nach Detektorauslesemodus sind Einschränkungen hinsichtlich der zeitlichen Auflösung möglich. Scanner-Kameras erfassen die Infrarotbilder recht zeitaufwendig zeilenweise mittels Spiegel- oder Prismensystem, so dass die Bildaufnahmeraten auf etwa 15-30 Bilder pro Sekunde begrenzt sind. Neue Systeme arbeiten nicht mehr mit einem einzelnen Detektor, sondern mit einem Detektor-Array (Focal-Plane-Array FPA), bei dem die Registrierung des Signals im Snapshot-Modus an vielen Einzeldetektoren gleichzeitig erfolgt.

Bei den Infrarotdetektoren wird zwischen Quanten- und Nichtquantendetektoren unterschieden, wobei die Technologie der Quantendetektoren auf Halbleitern basiert und die Systeme aufgrund ihrer Stirling-Kühlung als gekühlte Kameras bezeichnet werden. Sie weisen im Vergleich zu den ungekühlten Systemen bessere Leistungsdaten auf, sind aber gegenüber den Nichtquantendetektoren etwa 5- bis 10- mal so teuer. Ungekühlte Kamerasysteme mit nahe der Raumtemperatur temperaturstabilisierten Detektoren sind Bolometerkameras, deren Messprinzip auf die Widerstandsmessung aufbaut, sowie Pyrometerkameras, welche den pyroelektrischen Effekt ausnutzen. Die Detektorelemente der Bolometerkameras reagieren auf Infrarotstrahlung im langwelligen Spektralbereich (ca. 7.5 bis 13 μm) mit Erwärmungen. Dabei ist die Empfindlichkeit der Detektoren kaum vom Spektrum abhängig. Diese Erwärmung führt zu einer Widerstandsänderung, die als kamerainterne Messgröße dient und Temporaufösungen von etwa 100 mK zulässt. Die Masse der Detektorelemente wird so klein wie möglich gehalten, um die Ansprechzeiten zu minimieren. Dennoch sind die Reaktionszeiten auf 1 ms begrenzt und Detektoren dieser Art scheiden für Prüfungen mit hohen Zeitaufösungen aus. Verschiedene Wirkmechanismen und Bauarten von Kameras mit Nichtquantendetektoren sind von Hofmann [Hof08] beschrieben.

Bei den Quantendetektoren werden die Ladungsträger gemessen, die durch absorbierte Infrarot-Lichtquanten im Detektormaterial freigesetzt werden. Da es sich dabei um sehr schnelle Prozesse handelt, sind hohe Aufnahmezeiten bis zu mehreren kHz realisierbar. Mit der Stirling-Kühlung des Detektors auf 70 K, wie z.B. bei der ThermaCAM™ SC3000 der Firma Flir Systems AB, wird eine Tempurauflösung von 20 mK erreicht [FA].

Je nach verwendetem Detektormaterial liegen die spektralen Kameraempfindlichkeiten bei verschiedenen infraroten Wellenlängen, dabei werden die atmosphärischen Fenster (s. Abb. 3.3) berücksichtigt. Eine Besonderheit stellen die QWIP-Detektoren mit GaAs/AlGaAs-Basismaterial dar, dessen Empfindlichkeitsbereiche im mittel- bis langwelligem Bereich zwischen ca. 6 und 20 µm einstellbar sind. Weitere spezielle Detektoren lassen die Erfassung der Infrarotstrahlung zweier verschiedener Spektralbereiche zu (Dualband/Dualcolor). Einige Quantendetektoren und zum Einsatz kommende Materialien mit ihren Empfindlichkeitsbereichen und spezifischen Kenndaten (vgl. auch [Mal02]) sind in Tabelle 5.4 typischen Kenndaten ungekühlter Detektoren gegenüber gestellt.

	CMT	InSb	SL	QWIP / QWIP hqe (high quantum efficiency)	PtSi	Ungekühlt
Detektor-Material	HgCdTe	InSb	GaInSb/InAs	GaAs/AlGaAs	PtSi/Si	VO _x , a-Si, Ti...
Wellenlängenbereich	SW, MW, LW	SW, MW	MW, Dual Color	MW, LW, Dual Band	SW, MW	LW (MW)
Quanteneffizienz	bis 80 %	bis 70 %	bis 40 %	ca. 10 % bis 40 %	ca. 1 %	-
Kommerziell verfügbare maximale Bildformate	640 x 512 (1280 x 1024)	640 x 512 (1280 x 1024)	384 x 288	640 x 512	800 x 512	640 x 480
NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) bei 300 K	10 mK	20 mK	15 mK	10 mK 30 mK	60 mK	70 mK
Integrationszeiten für optimale NETD (300 K)	MW: 1 ms LW: 300 µs	1 ms	5 ms	20 ms 1 ms	33 ms	33 ms
Langzeitstabilität	MW: 20 h LW: 5 min	1 h	?	5 h	> 24 h	2 min

Tabelle 5.4: Spezifische Kenndaten von Infrarot-Detektormatrizen (Quelle: Firma Thermosensorik GmbH)

Die Detektordimension nimmt entscheidenden Einfluß auf die geometrische Auflösungsfähigkeit des Prüfsystems. Bildformate industriell eingesetzter gekühlter und ungekühlter Systeme reichen nach derzeitigem Stand der Technik in Europa von z.B. 80 x 80 Pixel bis 512 x 640 Pixel. Im amerikanischen Markt sind bereits Auflösungen von 1024 x 1024, z.B. bei der ThermaVision™ SC8000 der Firma Flir Systems AB [Flib], erhältlich.

Merkmale, die bei der Auswahl von Kamerasystemen für den industriellen Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung im Vordergrund stehen, mit typischen Leistungsdaten für Niedrig- und Hochpreisprodukte im Segment gekühlter und ungekühlter Systeme zeigt die Tabelle 5.5.

Detektortechnologie	Infrarotkamera			
	Bolometer		Halbleiter	
Preiskategorie	Niedrigpreis	Hochpreis	Niedrigpreis	Hochpreis
Kosten	5.000 EUR	50.000 EUR	40.000 EUR	120.000 EUR
Detektordimension	80 x 80 Pixel	640 x 480 Pixel	320 x 240 Pixel	640 x 512 Pixel
Thermische Auflösung	100 mK (bei 30°C)	70 mK (bei 30°C)	35 mK (bei 30°C)	15 mK (bei 30°C)
Baugröße	40 x 40 x 50 ... 120 x 150 x 220 cm*cm*cm		170 x 100 x 90 ... 400 x 180 x 170 cm*cm*cm	
Bildrate	30 Hz	50 Hz	100 Hz	50.000 Hz

Tabelle 5.5: Leistungsspektren der Infrarotkameras im europäischen Markt

Einige der üblichen Kamerasysteme, die exemplarisch das Spektrum der in Labor und in den Produktionsbereichen eingesetzten Infrarotkameras darstellen, zeigt Abbildung 5.20.¹⁰



Abbildung 5.20: Infrarotkameras der Firma Flir Systems AB
 links - gekühlte Halbleiterkamera ThermaVision™ SC6000 HS (InSb)
 mitte - ungekühlte Bolometerkamera üblicher Baugröße
 ThermaCAM™ SC2000
 rechts - miniaturisierte Bolometerkamera ThermaVision™ A10

¹⁰Technische Daten der Infrarotkameras siehe *Produktportfolio* der Firma Flir Systems AB [Flic]

Weitere Besonderheiten von Kamerasystemen sind hinsichtlich ihres Einsatzes zu beachten:

- Triggerung (hardware- oder softwaregetriggert)
- Einbindung in die Netzwerkumgebung / Peripherie
- Schnittstellen, Datenauslesung, -austauschformate
- spezifisches Kamerarauschen

In Abbildung 5.21 ist exemplarisch das Rauschverhalten der Infrarotkamera ThermaCAM™ SC3000¹¹ dargestellt. Das Signal wird nach einer vierstündigen kontinuierlichen Laufzeit der Kamera auf einem gleichtemperierten Objekt mit 50 Hz und 150 Hz erfasst, ein stationäres Verhalten stellt sich innerhalb von ca. 10 Minuten nach dem Einschalten der Kamera ein. Gezeigt sind jeweils für die Aufnahme­frequenz 50 Hz und 150 Hz die Temperaturverläufe an einem einzelnen Pixel und gemittelt über 1500 Pixel (links) bzw. 6000 Pixel (rechts).

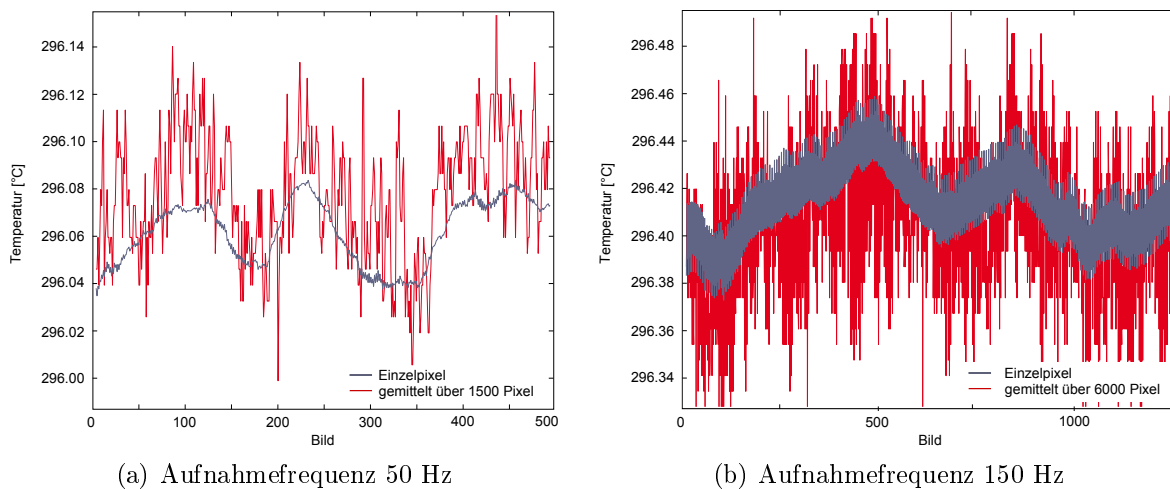


Abbildung 5.21: Grundrauschen der Infrarotkamera ThermaCAM™ SC3000;
Temperaturverläufe auf gleichtemperiertem Bauteil

Mittels Frequenzanalyse des mit 150 Hz abgetasteten Signals lässt sich ein deutlicher Störanteil mit einer Frequenz von 50 Hz erkennen, der Kreisfrequenz des Stromnetzes.

¹¹Technische Daten siehe *Datenblatt ThermaCAM™ SC3000* der Firma Flir Systems AB [FA]

5.2.5 Algorithmik zur Signalanalyse

Im Hinblick auf die Fehler- und Merkmalerkennung und deren Bewertung lassen sich die in Kapitel 3.2.2 aufgezeigten Auswertemethoden in Verbindung mit den verschiedenen Anregungsverfahren und der gewählten Kamertechnik zur Signalerfassung einsetzen:

Fehlererkennung Für die Erkennung von Materialinhomogenitäten und Defekten haben sich Auswerteverfahren im Zeit- und Frequenzbereich bewährt. Zeitbereichsauswertungen erfolgen mittels Transientenbetrachtungen, bei Auswertungen im Frequenzraum werden die Amplituden- und Phasen bestimmter Frequenzen analysiert (vgl. Kap. 3.2.2). Durch eine Anpassung der Auswertefrequenz an die Eindringtiefe der „thermischen Wellen“ in Abhängigkeit von der thermischen Diffusionslänge aus Gleichung 3.4 ergeben sich verschiedene Tiefenempfindlichkeiten für die Fehlererkennung. Für die frequenzabhängige Bestimmung der Tiefenlage von Defekten können weiterführende Methoden wie die Bestimmung der „Blindfrequenz“ [IC05] und die DAC Methode (Differentiated Absolute Contrast Method) [SBIC⁺06] angewendet werden. Möglichkeiten zur Bestimmung der Größe von Defekten stellen u.a. Plotnikov und Winfree [PW98, PW97] sowie Almond [AL94, SA95] zur Verfügung.

Flächige Fehler können z.B. gut mit optischen und konvektiven Anregungen detektiert werden, Risse vornehmlich mit der Ultraschall- oder Induktivanregung. Dabei entstehende Temperaturkontraste können oft bereits im Zeitbereich mittels Transientenauswertung ausgewertet werden. Bei hoher Emissivitätsinhomogenität auf der Prüfobjektoberfläche werden bevorzugt Phasenauswertungen verwendet, denn sie zeichnen sich durch ihre Robustheit gegenüber Oberflächenverunreinigungen bzw. -verfärbungen aus. Ohne Anregung (passiv) können im Zeitbereich z.B. volumenhafte Fehler erkannt werden, sofern sich durch die Eigenwärme des Prüfobjektes ausreichend hohe Temperaturkontraste an der Oberfläche abzeichnen.

Schichtdickenbestimmung Über die Geschwindigkeit der materialabhängigen Ausbreitung eines Wärmepulses an der Objektoberfläche ist thermografisch die flächenhafte Bestimmung der Dicke von Schichten möglich [AP96], so z.B. die Dickenbestimmung von Lack- oder Schutzüberzügen (vgl. [GB02, BKC86, LWG02]). Definitionen und Erläuterungen zur Photothermischen Schichtdickenmessung werden in der Norm DIN EN 15042-2 [Deu06c] gegeben.

Zur thermischen Anregung werden vorzugsweise optische Anregungsquellen verwendet, da sie kurzzeitige Wärmepulse auf der Objektoberfläche initiieren. Für besonders dicke Schichten kann auch der Einsatz der wesentlich trägeren konvektiven Quellen in Betracht gezogen werden. Zu beachten ist stets die thermische Dicke der betrachteten Schicht. Ist sie aufgrund ihrer Materialeigen-

schaften thermisch nicht mehr durchdringbar, lassen sich deren Eigenschaften thermografisch nicht ermitteln.

Vorhandensein, Lage, Dimension Für die Erkennung der Lage und Dimension innerer Strukturen werden prinzipiell dieselben Auswertemethoden eingesetzt wie bei der Fehlererkennung. Es werden z.B. Geometrieeffekte durch aneinander liegende Ecken oder Kanten ausgenutzt, die in ähnlicher Form zur Signalerzeugung beitragen wie Risse oder Delaminationen. Vergleichbar mit der defektselektiven Fehlererkennung ist z.B. die Detektion von Klebeverbindungen, da die Strukturen selbst erwärmt und an der Oberfläche im Zeit- oder Frequenzraum detektiert werden können.

Temperaturmessung Die Temperaturbestimmung ist eine passive Anwendung, bei der keine zusätzlichen Anregungsquellen zum Einsatz kommen. Die Temperatur wird anhand der absoluten Strahlungswerte bestimmt, wofür der genaue Emissionsgrad des Prüfobjektes bekannt sein muss. Aufgrund von möglichen Störreflexionen, die bei niedrigen Emissionsgraden und niedrigen Objekttemperaturen besonders ins Gewicht fallen, sind Störquellen möglichst zu eliminieren. Mit Hilfe der Thermografie ist sowohl die örtliche als auch die zeitliche Bestimmung der Temperaturverteilung eines Objektes möglich. Die örtliche Bestimmung dient der Lokalisierung von Auffälligkeiten auf Objektflächen, die zeitliche Aufzeichnung zeigt z.B. unerwartete Temperaturwechsel an. Zur Vorgehensweise für die Temperaturmessung soll an dieser Stelle auf diverse VDI Richtlinien [VV96, VV95, VV01, VV05b, VV05a] verwiesen müssen.

Für Betrachtungen in unterschiedlichen Temperaturbereichen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an Signalerfassung und -verarbeitung. Bei niedrigen Temperaturen von etwa 0 bis 200 °C unterscheiden sich die Intensitäten der Infrarotstrahlung sowie deren Spektren stark von denen bei Temperaturen von etwa 500 bis 1000 °C (vgl. Abb. 3.4), so dass die Kamertechnik und Auswertalgorithmik entsprechend angepasst werden sollten.

5.3 Expertensystem zur Auswahl der Prüfkonfiguration

Die Zusammenführung des Wissens über die Thermografie zu einem Expertensystem zur Prüfkonfigurationsauswahl veranschaulicht die Abbildung 5.22. Einen Eingang in das System stellen die Prüfverfahrenskonfigurationen dar, die sich aus den zuvor charakterisierten Thermografiemodulen ergeben. Die Auswahlkonfigurationen werden auf eine Anzahl reduziert, die die Verfahren in ihren Grundzügen abbildet. Die Prüfverfahrensanforderungen für thermografische Prüfaufgaben werden definiert und fließen in Form von Abfragekriterien in das System ein. In Bewertungsmatrizen werden die Prüfmodule den Aspekten der Anforderungen gegenüber gestellt und einzeln mit Erfolgswahrscheinlichkeiten gewichtet. Eine Aussage zur Eignung der verschiedenen Prüfverfahrenskonfigurationen für die Prüfaufgabe wird mittels einer mathematischen Verknüpfung der Einzelwahrscheinlichkeiten generiert.

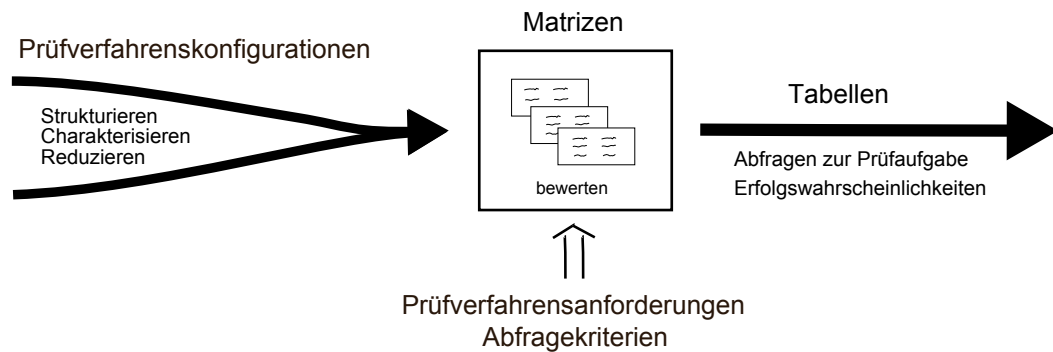


Abbildung 5.22: Ein- und Ausgang des Expertensystems

Als Ergebnis und Anwenderoberfläche für das Expertensystem gehen Tabellen hervor, in denen der Anwender Fragen zur vorliegenden Prüfaufgabe beantwortet. Daraus werden für die einzelnen Prüfverfahrenskonfigurationen Erfolgsfaktoren berechnet, die durch hohe Zahlenwerte die optimalen Prüflösungen anzeigen.

5.3.1 Definition der Prüfverfahrenskonfigurationen

Die Thermografiemodule sind anhand der Prüfablaufkette (s. Abb. 5.1) abgeleitet und in Kapitel 5.2 systematisch charakterisiert. Für die Implementierung in das Expertensystem werden die Ausprägungen der Module auf die Folgenden festgelegt, um die Besonderheiten hinsichtlich ihrer Anwendung abzudecken:

ANREGUNGSQUELLEN →

|| Blitzlicht || Temperaturstrahler || Ultraschallgeber || Induktionsgenerator ||
|| Warm- oder Kaltluftdüse ||

ANREGUNGSARTEN →

|| pulsartig (Impuls oder Burst) ||
|| periodisch moduliert (sinus- oder rechteckförmig) ||

AUSWERTEVERFAHREN →

|| Zeitbereich (Transientenauswertung oder Temperaturmessung) ||
|| Frequenzbereich (Puls-/Burst-Phasen- oder Lockin-Auswertung) ||

KAMERATECHNIK →

	Halbleiterkamera		Bolometerkamera			
	mittelwellig		langwellig		kurzwellig	
	Standard-Baugröße		miniaturisiert			

Bei den genannten Modulen sind die impulsartigen und die periodisch modulierten Anregungen zusammengefasst, da sie bezüglich ihrer Eignung zunächst sehr ähnlich bewertet werden. Auswerteseitig wird zwischen Zeit- und Frequenzbereichsauswertungen unterschieden, um ggf. die höhere Robustheit von Phasenauswertungen gegenüber Oberflächeninhomogenitäten in die Bewertung mit einfließen lassen zu können.

Werden die Ausprägungen der Anregungsquellen, -arten und Auswerteverfahren miteinander kombiniert, ergeben sich für das Expertensystem die in Tabelle 5.6 aufgeführten Prüfmodule 1 bis 6 zur ANREGUNG/AUSWERTUNG, wobei aus anwendungstechnischen Aspekten verschiedene Konfigurationen entfallen. So liegt bei Verwendung eines Blitzlichtes z.B. ausschließlich eine Impulsanregung vor, und bei der meist sinusförmig modulierten Temperaturstrahleranregung erfolgt gewöhnlich die (Lockin-)Phasenauswertung, die Betrachtung thermischer Signaturen in passiven Anwendungen ist generell auf den Zeitbereich beschränkt. Von einer Unterscheidung im Expertensystem zwischen pulsartigen und periodisch modulierten Anregungsformen sowie zwischen Zeit- und Frequenzbereichsauswertungen wird abgesehen, da die periodische Modulation ebenso wie die Phasenauswertung als Möglichkeit zur Qualitätssteigerung der Prüfergebnisse zu sehen ist und dieser Aspekt mit geringem Aufwand experimentell untersucht werden kann. Die Prüfmodule 7 bis 10 ergeben sich aus der Variation der Ausprägungen zur KAMERATECHNIK. Kurzwellige Kameras existieren nur auf Basis der Halbleitertechnologie, und für kurzwellige Kameras eröffnen sich andere Anwendungsgebiete als für mittel- und langwellige, weshalb diese Abgrenzung vorgenommen wird. Eine Besonderheit der stets langwelligen Bolometerkameras ist

das Angebot miniaturisierter Gehäusegrößen, die bei Anwendungen mit geringem Platzangebot zum Einsatz kommen können.

	Technik			Kamerasystem	Prüf-modul	Kurz-bezeichnung	
	Anregungs- -quelle	-form	Auswertung				
ANREGUNG / AUSWERTUNG	Blitzlicht	pulsartig	Transienten- oder Phasenauswertung		1	BlitzPuls	
	Temperatur- strahler	periodisch moduliert	Phasenauswertung		2	TempMod	
	Ultraschall	pulsartig oder periodisch moduliert	Transienten- oder Phasenauswertung		3	UltraPulsMod	
	Induktion	pulsartig oder periodisch moduliert	Transienten- oder Phasenauswertung		4	IndPulsMod	
	Kalt-/Warmluft	pulsartig oder periodisch moduliert	Transienten- oder Phasenauswertung		5	KonvPulsMod	
	-	(passiv)	Transienten- oder Temperaturmessung		6	Passiv	
KAMERA- TECHNIK				Halbleiter	kurzwellig	7	KW
					mittel-/langwellig	8	MLW
				Bolometer	Standardgröße	9	Bolo
					miniaturisiert	10	miniBolo
ZUSATZ- MODULE	Transmissionsaufbau		Reflexionsaufbau		11	PrAufb	
	Test auf Zerstörungsfreiheit				12	Zf	

Tabelle 5.6: Prüfmodule der Prüfverfahrenskonfigurationen im Expertensystem

Die ZUSATZMODULE 11 und 12 in Tabelle 5.6 decken Fragestellungen zu den Rahmenbedingungen hinsichtlich Prozessanforderungen und (Stör-)Einflüssen ab. Die Wahl des Prüfaufbaus in Reflexion- oder in Transmission kann durch den Platzbedarf für die gewählte Infrarotkamera und ggf. der Anregungsquelle und die Zugänglichkeit des Prüfobjektes eingeschränkt werden. Die Anregungsquelle sollte so positioniert werden, dass die Fehlstelle bestmöglich angeregt wird, die Lage des abgezeichneten Temperaturkontrastes bestimmt die Betrachtungsseite und damit die Position der Kamera.

Besondere Beachtung bei der aktiven Thermografieprüfung muss die Gewährleistung der Zerstörungsfreiheit finden. Verschiedene Laborversuche zeigen, dass vermeintlich zerstörungsfreie Prüftechniken das geprüfte Material nicht immer unversehrt belassen und ein Schädigungsrisiko besteht. Für spröde Materialien ist z.B. der Einsatz der Ultraschallanregung als kritisch einzustufen, weiterführende Untersuchungen der Wirkmechanismen bei dieser Anregungsart sind von Homma [Hom07] durchgeführt worden. Bei der optischen Anregung sind Oberflächenschädigungen durch überhöhte Temperatureinwirkung

möglich. Bei wärmeempfindlichen Materialien ist genauestens zu untersuchen, wie die Anregung mit dem Oberflächenmaterial in Wechselwirkung tritt und welche maximalen Temperaturamplituden zugelassen werden dürfen. Bei den zuvor genannten risikobehafteten Prüfverfahrenskonfigurationen müssen Vorversuche durchgeführt werden, welche die Zerstörungsfreiheit absichern und Vorschädigungen der Prüfobjekte sicher ausschließen. Hierzu werden Untersuchungen mit größeren Amplituden (inkl. Sicherheitsbereich) durchgeführt als sie bei der geplanten Prüfung auftreten können, um eine höhere Belastung im Vergleich zu den späteren Einsatzbedingungen zu simulieren.

5.3.2 Ableitung der Anforderungsprofile

Die Prüfverfahrensanforderungen für thermografische Prüfaufgaben werden anhand der erarbeiteten ZfP-Kontrollliste (s. Abb. B.1, B.2) mit den für eine ZfP - Aufgabe relevanten Fragestellungen hergeleitet. Die in der Kontrollliste enthaltenen Themengruppen *Prüfproblem*, *Messverfahren* und *Prüfprozess* und die dazugehörigen Teilaspekte sind in Abbildung 5.23 blau dargestellt. Fragestellungen, die sich bei der Übertragung auf die Thermografieprüfung ergeben, sind grün gekennzeichnet. Rot markiert sind schließlich die abgeleiteten Abfragen für das Expertensystem.

5 Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme

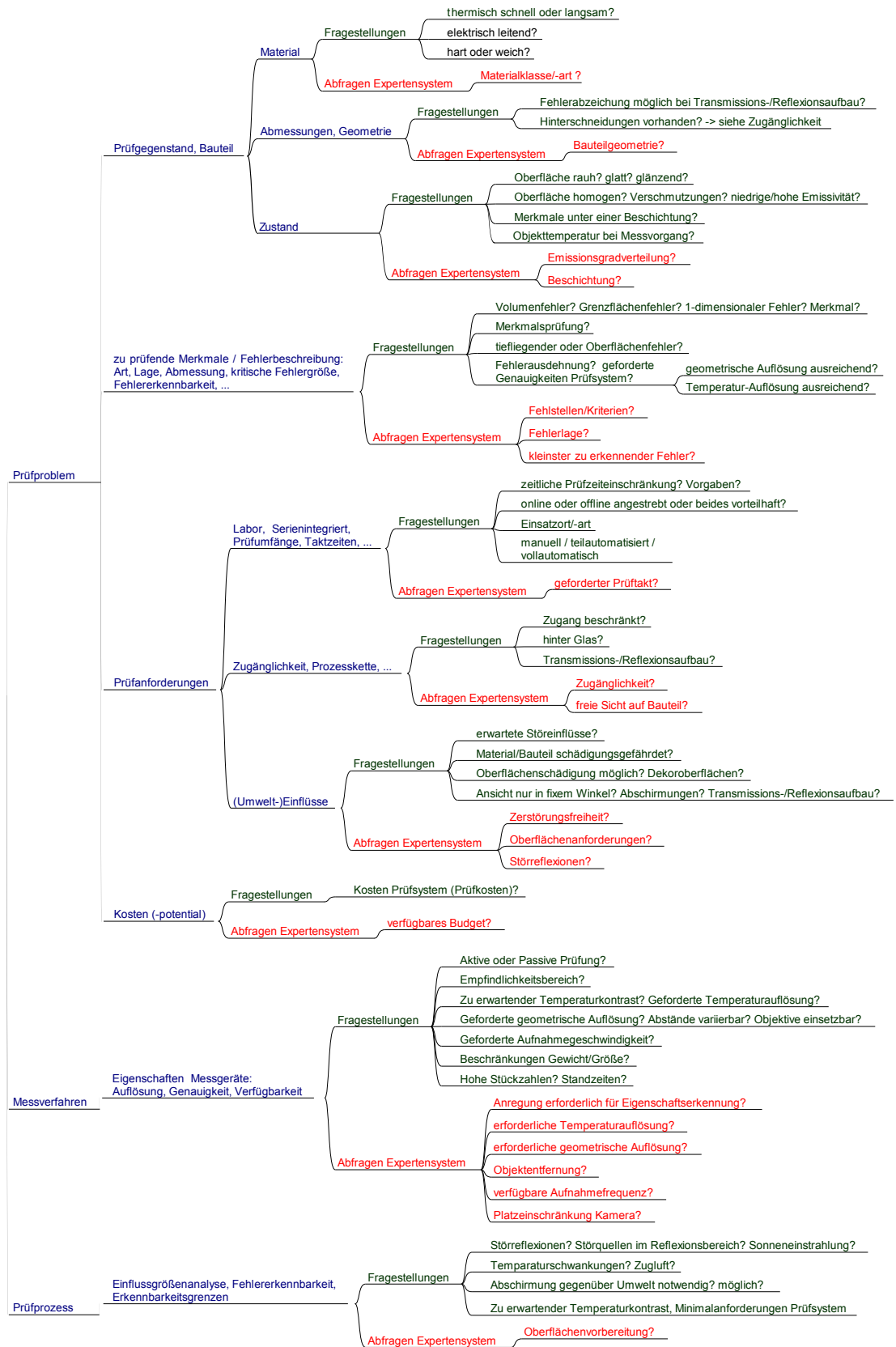


Abbildung 5.23: Ableitung der Abfragen anhand der ZfP-Kontrollliste

Zur Definition einer thermografischen Prüfaufgabe zur Ermittlung der Prüfverfahrensanforderungen werden folgende Fragestellungen im Expertensystem abgefragt:

1. Welches Material soll geprüft werden?
2. Nach welchem Prüfkriterium wird untersucht?
3. Wie ist die Fehlerlage im Prüfobjekt?
4. Wie groß ist der kleinste Fehler, der erkannt werden muß?
5. Wie ist die Emissionsgradverteilung auf der Prüfobjektoberfläche?
6. Ist das zu prüfende Material beschichtet?
7. Ist eine Oberflächenvorbereitung vorgesehen bzw. möglich?
8. Wie ist die Bauteilgeometrie?
9. Ist das Prüfobjekt und der Prüfort frei zugänglich?
10. Wie hoch ist die Objekttemperatur bei der Prüfung?
11. Ist eine freie Sicht auf das Prüfobjekt bzw. den Prüfort möglich?
12. Wie weit ist das Prüfobjekt von der Infrarotkamera entfernt?
13. Ist der Platz für die Infrarotkamera beschränkt?
14. Welche Detektordimension ist zur Auflösung notwendig?
15. Wie hoch muss die Aufnahmefrequenz der Infrarotkamera sein?
16. Welche Tempurauflösung ist erforderlich?
17. Liegen spezielle Anforderungen an die Oberfläche des Prüfobjektes vor?
18. Ist die Zerstörungsfreiheit gewährleistet?
19. Wie muß die die Eigenschaftserkennung erfolgen?
20. Wie hoch ist der geforderte Prüftakt?
21. Besteht die Gefahr durch Störreflexionen?
22. Welches Budget steht zur Verfügung?

Zu diesem Fragenkatalog werden die in Tabelle 5.7 gezeigten Antwortmöglichkeiten klassifiziert, die die besonderen Eigenschaften umfassen und Grenzfälle voneinander trennen.

5 Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Material	Kriterium	Fehlerlage	Minimaler Fehler	Emissionsgradverteilung	Beschichtung	Oberflächen-vorbereitung	Bauteil-geometrie	Zugäng-lichkeit	Prüfobjekt-temperatur	Sicht-freiheit
Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	
Kamera-technik			Kamera-technik					Prüfaufbau	Kamera-technik	Kamera-technik
Metall	Ablösung / Delamination	Tiefe < Ausdehnung	2 mm	homogen ≈ 0 bis 0.5	thermisch dünne Schicht	Schwärzung möglich	massiv, thermisch dick	2-seitiger Zugang	nahe Raum- temperatur	frei einsehbar
Kunststoff	Pore / Lunker	Tiefe > Ausdehnung	3-5 mm	homogen ≈ 0.5 bis 1.0	thermisch un- durchdringbar	Schwärzung nicht möglich	flach, ther- misch dünn	1-seitiger Zugang	>200°C	hinter Glas
CFK	Riss		≥10 mm	inhomogen, Differenz >0.5	unbeschichtet					
	hohe Temperatur									
	niedrige Temperatur									
	Schichtdicke									
	Vorhandensein, Lage, Dimension									

12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Objekt-entfernung	Ein-schränkung Kamera	Detektor-dimension	maximale Aufnahme-frequenz	geforderte Temperatur-auflösung	Oberflächen-anforderung	Zerstörungs-freiheit	Eigenschafts-erkennung	geforderter Prüftakt	Stör-reflexionen	Budget
Kamera-technik	Kamera-technik	Kamera-technik	Kamera-technik	Kamera-technik	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung	Anregung/ Auswertung
						Zerstörungs-freiheit				
0,5 m	ja	120x120	≤ 25 / 30 Hz	20 mK	Kratzer unkritisch	ohne Risiko	auch ohne Anregung	<1 min (Online-/ Serienprüfung)	keine oder abschirmbar	≤10.000 EUR
3-5 m	nein, Raum <150x150	≥ 320x240	50 Hz	80 mK	ritzbar, Kratzer unzulässig	Risiko thermisch	nur mit Anregung	<2 min (Offline-/ Serienprüfung)	nicht abschirmbar	15000 EUR
≥10 m	nein, Raum <60x60		≥ 150 Hz	≥ 100 mK	kratzbeständig	thermische Schädigung		frei (Laborprüfung)		40000 EUR
						Risiko mechanisch				100000 EUR
						mechanische Schädigung				

Tabelle 5.7: Abfragekriterien und festgelegte Antwortmöglichkeiten mit Kennzeichnung der Relevanz für die Prüfmodule ANREGUNG/AUSWERTUNG, KAMERA-TECHNIK und die ZUSATZMODULE Prüfaufbau & Zerstörungsfreiheit

Auswahlmöglichkeiten für die erforderliche Aufnahme-frequenz der Kamera sind z.B. die Ausprägungen $\leq 25/30$ Hz, 50 Hz und ≥ 150 Hz. Sie stellen typische Grenzwerte dar, bei denen für eine höhere zeitliche Auflösung ein anderes Kamerasystem gewählt werden muss. Bei den Auswahlmöglichkeiten des Prüfkriteriums wird zwischen der Messung von hohen und niedrigen Temperaturen unterschieden, weil sich für Temperaturbereiche von etwa 0 bis 200 °C und 500 bis 1000 °C unterschiedliche Anforderungen an die Gerätetechnik ergeben. Für die Ermittlung hoher Temperaturen bieten sich kurzweilige Kameras an, für Messungen im Raumtemperaturbereich eher langweilige. Die Auswahl des Materials wird eingeschränkt auf die Werkstoffklassen Metalle, Kunststoffe und CFK-Verbundwerkstoffe, die zu den häufig geprüften Materialien in der Automobilindustrie

gehören und sich bezüglich ihrer thermischen Eigenschaften stark unterscheiden. Als Prüftakte werden Zeiten angeboten, innerhalb derer die Durchführung bestimmter Prüfungen kritisch ist, z.B. ist eine periodisch angeregte Anregung mit Temperaturstrahlern an Kunststoffen in der Serienprüfung aktuell nicht unter 2 Minuten möglich.

5.3.3 Ergebniserzeugung

Zusammenführung der Module in Bewertungsmatrizen

In Tabelle 5.7 ist markiert, welche Abfragekriterien mit ihren Antwortmöglichkeiten mit welchen Prüfmodulen aus Tabelle 5.6 in den nachfolgenden Bewertungsmatrizen miteinander verknüpft werden. Das Vorgehen der Bewertung wird für die Prüfmodule der ANREGUNG/AUSWERTUNG in Abbildung 5.24 und für die der KAMERATECHNIK in Abbildung 5.25 gezeigt.

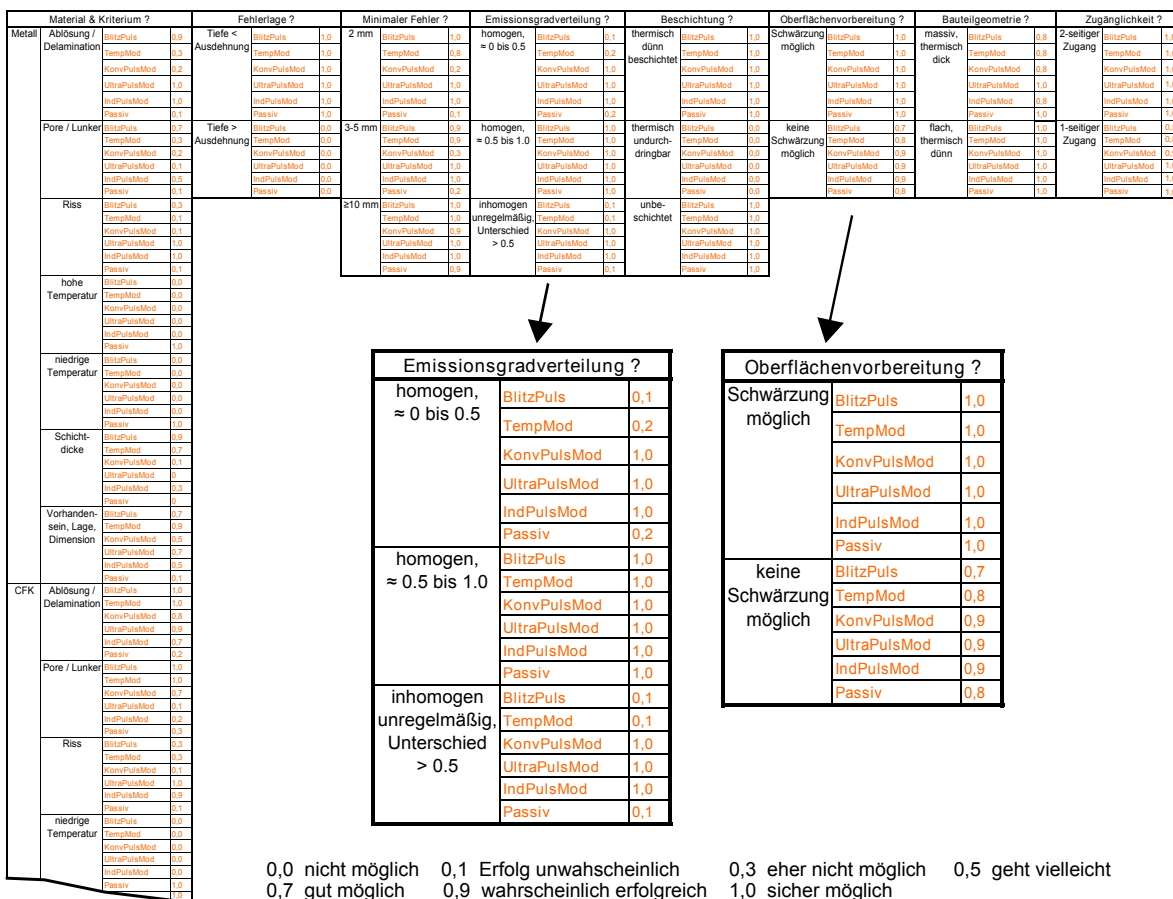


Abbildung 5.24: Bewertungsmatrix ANREGUNG/AUSWERTUNG (Abk. s. Tab. 5.6)

5 Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme

Die einzelnen Prüfmodule werden den Antwortmöglichkeiten der Abfragekriterien gegenüber gestellt und mit Faktoren von maximal 1 bewertet, die ein Maß darstellen, wie aussichtsreich eine Prüfung unter den betrachteten Bedingungen ist. Einschätzungen von Erfolgswahrscheinlichkeiten durch Experten und deren Erfahrungswerte bilden die Grundlage der Bewertung. Wechselwirkungen der Einzelelemente untereinander werden als ausreichend gering angesehen, um sie für eine erste Umsetzung zu vernachlässigen. Exemplarisch sind in den Abbildungen 5.24 und 5.25 Bewertungsblöcke vergrößert dargestellt, die Auflistung aller Bewertungen befindet sich im Anhang C. Die Abfrage *Material & Kriterium* wird vor der Bewertung zusammen gefasst, da eine kombinierte Betrachtung sinnvoll erscheint, z.B. wird das Merkmal *hohe Temperatur*, hier definiert als Temperatur zwischen 500 und 1000 °C, nur an Metallen ermittelt.

Material-Kriterium?	Minimaler Fehler?	Sicht?	Objektentfernung?	Kamera uneingeschränkt?	Detektordimension?	Aufnahmefrequenz?	Temperaturauflösung?	Budget ?
Metall	Ablösung / Delamination	2 mm	0,5 m	ja	120x120	≤ 25/30	20	≤ 10.000 EUR
MLW	MLW	frei einsehbar	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
KW	KW	MLW	KW	KW	KW	KW	KW	KW
Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo
miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo
0,7	0,2	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
Pore / Lunker	3-5 mm	hinter Glas	3-5 m	nein=150x150	≥ 320x240	50	80	15000 EUR
MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
KW	KW	KW	KW	KW	KW	KW	KW	KW
Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo
miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo
0,7	0,5	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Riss	≥10 mm	≥10 m	nein=60x60	MLW	MLW	MLW	MLW	40000 EUR
MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
KW	KW	KW	KW	KW	KW	KW	KW	KW
Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo	Bolo
miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo	miniBolo
0,7	1,0	1,0	0,3	0,0	0,0	0,0	1,0	0,2
hohe Temperatur								100000 EUR
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
0,3	0,3							1,0
niedrige Temperatur								
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
0,7	0,7							0,0
Schichtdicke								
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
0,7	0,7							0,0
Vorhandensein, Lage, Dimension								
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
0,7	0,7							0,0
CFK	Abriegelung							
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
1,0	1,0							1,0
Pore / Lunker								
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
1,0	1,0							1,0
Riss								
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
1,0	1,0							1,0
niedrige Temperatur								
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
1,0	1,0							1,0
Schichtdicke								
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
0,5	0,5							0,0
Vorhandensein, Lage, Dimension								
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
1,0	1,0							1,0
Kunststoff	Pore / Lunker							
MLW	MLW							MLW
KW	KW							KW
Bolo	Bolo							Bolo
miniBolo	miniBolo							miniBolo
1,0	1,0							1,0

Sicht?		
frei einsehbar	MLW	1,0
	KW	1,0
	Bolo	1,0
	miniBolo	1,0
hinter Glas	MLW	0,0
	KW	1,0
	Bolo	0,0
	miniBolo	0,0

Aufnahmefrequenz?		
≤ 25/30	MLW	1,0
	KW	1,0
	Bolo	1,0
	miniBolo	1,0
50	MLW	1,0
	KW	1,0
	Bolo	1,0
	miniBolo	0,0
≥ 150	MLW	1,0
	KW	1,0
	Bolo	0,0
	miniBolo	0,0

0,0 nicht möglich 0,1 Erfolg unwahrscheinlich 0,3 eher nicht möglich 0,5 geht vielleicht
 0,7 gut möglich 0,9 wahrscheinlich erfolgreich 1,0 sicher möglich

Abbildung 5.25: Bewertungsmatrix KAMERATECHNIK (Abk. s. Tab. 5.6)

Für die ZUSATZMODULE sind laut Tabelle 5.7 jeweils eine Abfrage im Expertensystem vorgesehen: die *Abfrage 9 - Zugänglichkeit* und die *Abfrage 17 - Zerstörungsfreiheit*, mit Hilfe derer folgende Kenntnisse zum Prüfaufbau und zur Gewährleistung der Zerstörungsfreiheit einfließen. Der Prüfaufbau kann nur in Reflexion erfolgen, wenn eine einseitige Zugänglichkeit vorliegt, ist diese zweiseitig, kann sowohl der Reflexions- als auch der Transmissionsaufbau gewählt werden. Ein Test auf Zerstörungsfreiheit muss

erfolgen, wenn für das vorliegende Prüfobjekt ein Schädigungsrisiko besteht. Das ist z.B. bei thermisch empfindlichen Oberflächen und der optischen Anregung der Fall, sowie bei weniger duktilen Materialien und der Ultraschallanregung. Für außerordentlich spröde und rissanfällige Materialien wird die ultraschallangeregte Thermografieprüfung ausgeschlossen.

Verknüpfung zu Ergebnistabellen als Anwenderoberfläche

Durch eine Multiplikation aller Einzelfaktoren aus den Bewertungsmatrizen wird eine Erfolgsaussicht bestimmt, wobei der höchste Wert die aussichtsreichste Prüfverfahrenskonfiguration anzeigt. Die Umsetzung in Ergebnistabellen zeigen die Abbildung 5.26 für die ANREGUNG/AUSWERTUNG und die Abbildung 5.27 für die KAMERATECHNIK, in die der Anwender seine Antworten zu den Abfragen 1 bis 21 einträgt. Im Hintergrund werden die Gesamtfaktoren berechnet und als Maß der Erfolgswahrscheinlichkeit für die einzelnen Prüfmodule im Vergleich zueinander, in einer Art Rangfolge, angezeigt. Die ZUSATZMODULE Zerstörungsfreiheit und Prüfaufbau sind als rot und gelb markierte Sonderausgaben im Modul ANREGUNG/AUSWERTUNG integriert. Mit Hilfe der Sonderausgaben werden spezielle Vorgaben bezüglich des Prüfaufbaus und der Prüfung auf Zerstörungsfreiheit gemacht.

Abfrage	Auswahl -> Antwort	Blitz Impuls	Temperaturstrahler Modulation	Konvektion Puls oder Modulation	Ultraschall Puls/Burst oder Modulation	Induktion Puls/Burst oder Modulation	Passiv
1/2 Material+Kriterium?	Metall + Riss	0.1	0.1	0.1	1.0	1.0	0.0
3 Fehlerlage?	Tiefe < Ausdehnung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4 minimaler Fehler?	3-5 mm	0.9	0.8	0.3	1.0	1.0	0.2
5 Emissivitätsverteilung?	homogen (0-0.5)	0.5	0.7	1.0	1.0	1.0	0.3
6 Beschichtung?	unbeschichtet	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7 Oberflächenvorbereitung?	Schwärzung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
8 Bauteilgeometrie?	massiv, thermisch dick	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
9 Zugänglichkeit?	zweiseitiger Zugang	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10 Objekttemperatur?	nahe Raumtemperatur	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
17 Oberflächenanforderung?	Kratzer unkritisch	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
18 Zerstörungsfreiheit?	Risiko mechanisch	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0
19 Eigenschaftserkennung?	nur mit Anregung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0
20 geforderter Prüftakt?	frei (Labor)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
21 Störreflexionen?	keine Störreflexe oder abschirmbar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
22 Budget?	100.000 EUR	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0
Erfolgswahrscheinlichkeit		0.04	0.05	0.02	0.50	0.80	0.00
Sonderausgabe Prüfaufbau		-> Transmissions- oder Reflexionsaufbau					
Zerstörungsfreiheit		-> Prüfung auf mechanische Zerstörungsfreiheit notwendig					

Abbildung 5.26: Eingabe- und Ergebnistabelle ANREGUNG/AUSWERTUNG

Für das angeführte Beispiel der Risserkennung in Metallen bedeutet dies, dass die In-

duktionsanregung als am vielversprechendsten gilt, gefolgt von der Ultraschallanregung. Weil eine mechanische Schädigung des Materials nicht ausgeschlossen werden kann, ist für den Einsatz der Ultraschallanregung eine Prüfung auf Zerstörungsfreiheit zwingend erforderlich. Optische und konvektive Anregungen sind als wenig geeignet eingestuft.

Abfrage	Auswahl -> Antwort	mittel-/ langwellige Kamera	kurzwellige Kamera	Bolometer-kamera	miniaturisierte Bolometerkamera
1/2 Material + Kriterium?	Metall + Riss	0.90	1.00	0.70	0.70
4 minimaler Fehler?	2 mm	1.00	1.00	0.50	0.20
10 Objekttemperatur?	nahe Raumtemperatur	1.00	0.50	1.00	1.00
11 Sicht?	frei einsehbar	1.00	1.00	1.00	1.00
12 Objektdistanz?	0,5 m	1.00	1.00	1.00	0.90
13 Kamera uneingeschränkt?	ja	1.00	1.00	1.00	1.00
14 Detektordimension?	≥ 320x240 Pixel	1.00	1.00	1.00	0.00
15 verfügbare Aufnahmezeit?	50 Hz	1.00	1.00	1.00	0.00
16 erforderliche Temperaturauflösung?	20 mK	1.00	1.00	0.00	0.00
22 Budget?	100.000 EUR	1.00	1.00	1.00	1.00
Erfolgswahrscheinlichkeit		0.90	0.50	0.00	0.00

Abbildung 5.27: Eingabe- und Ergebnistabelle KAMERATECHNIK

Als Aufnahmegerät wird eine mittelwellige Halbleiterkamera empfohlen. Kurzwellige Halbleiterkameran sind weniger geeignet, da bei einer Prüfung bei Raumtemperatur nur sehr wenig Strahlung vom Prüfobjekt in deren Empfindlichkeitsbereich (0.8 bis 2 µm) abgegeben wird. Beide Bolometerkameran scheidet aufgrund ihrer langsamen Aufnahme-geschwindigkeiten aus.

6 Die virtuelle Thermografieprüfung

6.1 Virtuelle Prüfung mit Hilfe Finiter Elemente

Unter der virtuellen Thermografieprüfung als Baustein der Ingenieurplattform werden Aspekte der Machbarkeitsuntersuchung, der Störgrößenanalyse und der Parameteroptimierung in den verschiedenen Phasen der Prüfverfahrensqualifizierung verstanden (s. Kap. 4.2). Versuchsreihen anhand theoretischer Modelle können die Entwicklung von Prüfapplikationen durch den Entfall experimenteller Aufwände in Stich-, Labor- und Reihenversuchen im Stufenmodell (s. Abb. 4.3) stark verkürzen. Die Parameteroptimierungen unterstützen die stetige Verbesserung der Prüfkonfiguration, wodurch der Forderung aus dem Qualitätsmanagement nachgekommen wird, Methoden zur kontinuierlichen Verbesserung bereitzustellen und einzusetzen (vgl. Anforderungen aus der DIN EN ISO 9000 in Anh. A).

Für die virtuelle Prüfung ist der thermografische Prüfablauf so zu beschreiben, dass er mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (FEM) nachgebildet werden kann. Einen Regelablauf der thermografischen Prüfung zeigt die Abbildung 6.1. Darin sind entlang der mittig dargestellten Kernelemente auf der linken Seite die experimentellen und rechts die Umfänge der Simulation gegenübergestellt. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus der Simulation und der Praxis ist in den letzten, markierten Schritten möglich.

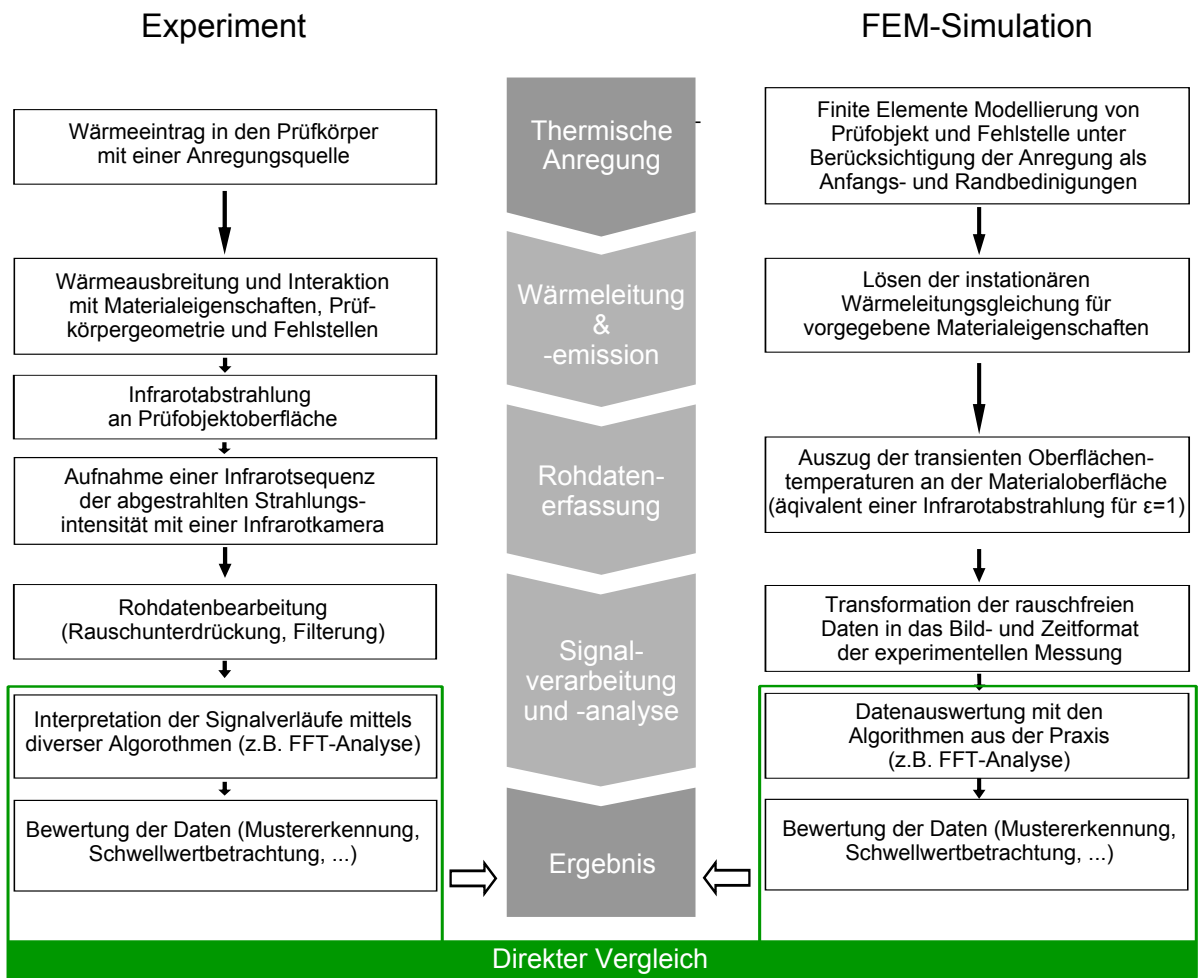


Abbildung 6.1: Kernelemente des thermografischen Experiments und der Simulation

6.2 Entwicklung thermografischer Simulationsmodelle

6.2.1 Aufbau finiter Elemente Modelle

In dieser Arbeit wird mit dem Softwarepaket COMSOL Multiphysics™ gearbeitet, mit dem die Beschreibung der physikalischen Abläufe während einer Thermografieprüfung möglich ist. Für die Modellierung des Prüfproblems müssen eine Vielzahl von Idealisierungen getroffen werden, um den Aufwand der anschließenden numerischen Berechnung in akzeptablem Rahmen zu halten. Mögliche Vereinfachungen sind sorgfältig in enger Verbindung mit der jeweiligen Prüfaufgabe zu wählen. Bei einer angepassten Schematisierung des Prüfablaufes, der korrekten Beschreibung durch die gegebenen Anfangs- und Randbedingungen, sowie hinreichend genauer Kenntnis der Materialkennwerte (vgl.

Kap. 3.2.3), können real zu erwartende Prüfergebnisse vorhergesagt werden.

Das im Folgenden beschriebene Vorgehen zum Erstellen von Simulationsmodellen zur thermografischen Prüfung ist grundsätzlich auf alle Methoden der Thermografie mit den verschiedenen Anregungsmöglichkeiten übertragbar. Die Simulation beginnt je nach Anregung mit der Wärmegenerierung selbst, wie z.B. bei der induktiven Erwärmung, oder mit einem Wärmeeintrag, der direkt als Randbedingung vorgegeben wird. Beispielsweise können optische Anregungen derart vereinfacht gut simuliert werden, indem als Wärmequelle die Oberflächenschicht des Prüfkörpers mit einer örtlich und zeitlich beschriebenen Temperaturverteilung beaufschlagt wird. Nach der Anregung folgt die Berechnung der thermischen Ausgleichsvorgänge, und als theoretisches Messergebnis wird die Oberflächentemperatur direkt als Signal ausgelesen.

Der Ablauf für die Simulation einer thermografischen Prüfaufgabe lässt sich wie folgt darstellen:

1. Schematisierung des Prüfablaufs
2. Simulative Abbildung des Prüfproblems:
 - a. Erstellung eines vereinfachten geometrischen Modells
 - b. Annahme einer idealisierten Anregung
3. Sensibilitäts-/Sensitivitätsanalyse für (Modell-)Parameter
4. Validierung des Modells (ggf. Abgleich mit Referenzkörper)
5. Durchführung standardisierter Simulationen zum Prüfproblem

Folgende Betrachtungen können damit anstatt experimentell auch simulativ erfolgen:

- 5a Machbarkeitsstudie
- 5b Analyse von Einfluss- und Störparametern
- 5c Ermittlung von Optimierungspotentialen

6.2.2 Vorgehen anhand eines Beispiels

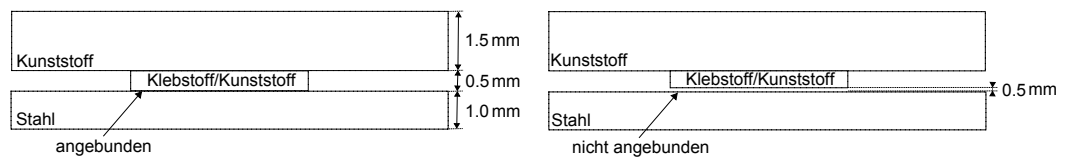
Die gezeigten Schritte sollen anhand eines Beispiels zur Prüfung der Klebeverbindung an einer Kunststoff-Stahl-Verklebung mittels optischer Blitzimpuls-Anregung ausführlicher dargestellt und erläutert werden:

(1) Schematische Darstellung des Prüfablaufs:

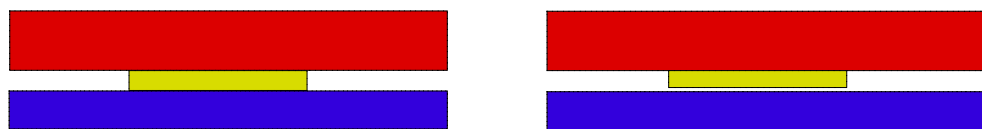
- Eingang = Anregung,
Einbringung eines definierten Temperaturgradienten
- Berechnung der thermischen Ausgleichsvorgänge
- Ausgang = Oberflächentemperatur Prüfteil,
Temperaturentwicklung/-verteilung über die Zeit

(2) Simulative Abbildung des Prüfproblems:

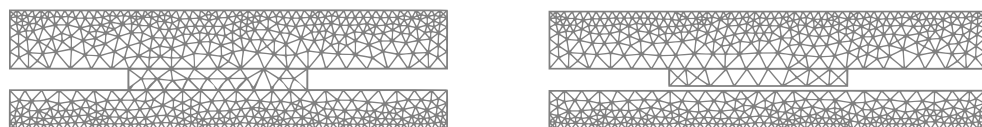
2a. Erstellung eines vereinfachten geometrischen Modells je nach Reduzierbarkeit der vorliegenden Geometrien (z.B. aufgrund von Symmetrien als 2D- oder 3D-Modell), sowie Belegung der Materialbereiche mit entsprechenden Gebietsbedingungen (Materialparameter, ...) und Vernetzung der Geometrie. Ein vereinfachtes Modell einer Kunststoff-Stahlblech-Verklebung, dessen Grundgeometrie und Vernetzung zeigt Abbildung 6.2.



(a) Vereinfachtes Modell



(b) Grundgeometrie mit Gebietsbedingungen



(c) Vernetzung

Abbildung 6.2: Verklebung Kunststoff-Stahl - links i.O. / rechts n.i.O.

2b. Zur Beschreibung der Anregung des Prüfobjektes werden idealisierte Annahmen als Randbedingungen getroffen. Um die charakteristischen Wärmeeinträge mathematisch zu beschreiben, werden Temperaturverläufe an die Quelle und deren Modulation angepasst, wodurch sich in Abbildung 6.3 schematisch gezeigte vereinfachte Formen der Anregungen ergeben. Für die optische

Blitzlichtanregung wird der angeregte Rand des Prüfobjekts mit einem kurzzeitigen Temperaturimpuls versehen, der der Temperaturerhöhung durch die Blitzlichtenergie entspricht. Für exaktere Beschreibungen können Blitzcharakteristiken des Herstellers oder eigene Messungen mit der Quelle selbst (s. Kap. 5.2.3) einfließen.

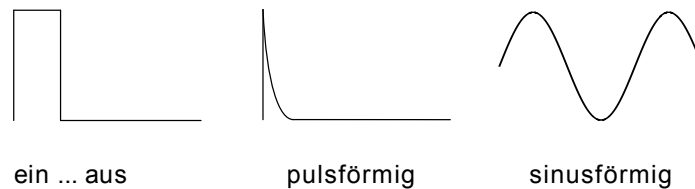


Abbildung 6.3: Formen der Anregungen als Randbedingung

Weitere Einflüsse durch den Prüfaufbau oder -ablauf (z.B. Zugluft) werden im Simulationsmodell ebenfalls in Form von Randbedingungen berücksichtigt.

(3) Sensibilitäts-/Sensitivitätsanalyse für (Modell-)Parameter:

Das Modell ist daraufhin zu prüfen, ob die getroffenen Vereinfachungen zulässig sind. Zum Beispiel ist zu validieren, dass der Einfluss feinerer, vernachlässigter Geometrien (z.B. Oberflächeneindrücke, Kerben) keine zu berücksichtigende Wirkung hat. Häufig sind die erforderlichen Modellparameter nicht in der gewünschten Genauigkeit verfügbar, so dass nur eingeschränkte Abschätzungen gemacht werden können. Dieser Problematik wird mit einer Sensitivitätsanalyse entgegnet, bei der ermittelt wird, welche Parameter sich auf das Prüfergebnis auswirken und einer genaueren Beschreibung bedürfen. Mindestens sind dies die Modellierung, die Materialparameter und die Anregung.

Ein Ziel der Modellierung ist es, wenig Rechenzeit aufzuwenden, z.B. durch möglichst grobe Netze. Mit zunehmender Maschenweite des Netzes nimmt die Genauigkeit üblicherweise jedoch ab und die Abweichung zu den exakten Ergebnissen ist anfangs nicht bekannt. An die optimale Vernetzung tastet man sich durch Variation der Netzfeinheit heran. Treten bei zunehmender Verfeinerung nur noch geringe Änderungen der Ergebnisse zum vorherigen Raster auf (bzw. liegen sie innerhalb des Toleranzbereiches), kann die Vernetzung als ausreichend fein angesehen werden.

Für die Sensitivitätsanalyse der Materialparameter wird hier ein Herangehen empfohlen, wie es nachfolgend am Beispiel der Wärmeleitfähigkeit gezeigt wird. Die Materialparameter werden zunächst aus Datenbanken¹ für den entsprechenden Werkstoff entnommen. Die Materialparameter werden über die Spannweiten der

¹für Metalle z.B. Werkstoffdatenbank WIAM (Werkstoffinformation und Auswahl Metalle) [IMA]

bekanntem Kennwert hinweg variiert (Min-Maximal-Annahmen) und die resultierenden Temperatur-Zeit-Verläufe auf eine Zielgröße hin untersucht. Die Zielgröße ist so zu wählen, dass sie dem vorgesehenen Prüfergebnis in seiner Charakteristik ähnelt. Für das Beispiel Blechverklebung erfolgt eine Sensibilitätsstudie auf Basis der Temperaturkontrast-Zeit-Verläufe von einem Oberflächenpunkt über der Verklebung im Vergleich zu einem Punkt auf dem Metall, der von der Verklebung unbeeinflusst bleibt (s. Abb. 6.4(a)). Betrachtet wird in Abbildung 6.4(b) der maximal auftretende Temperaturkontrast und der Zeitpunkt, zu dem der maximale Temperaturkontrast bei Variation der Wärmeleitfähigkeit eintritt. Verändert sich das Ergebnis merklich, muss die Wärmeleitfähigkeit mit entsprechendem Aufwand genauer festgelegt werden.

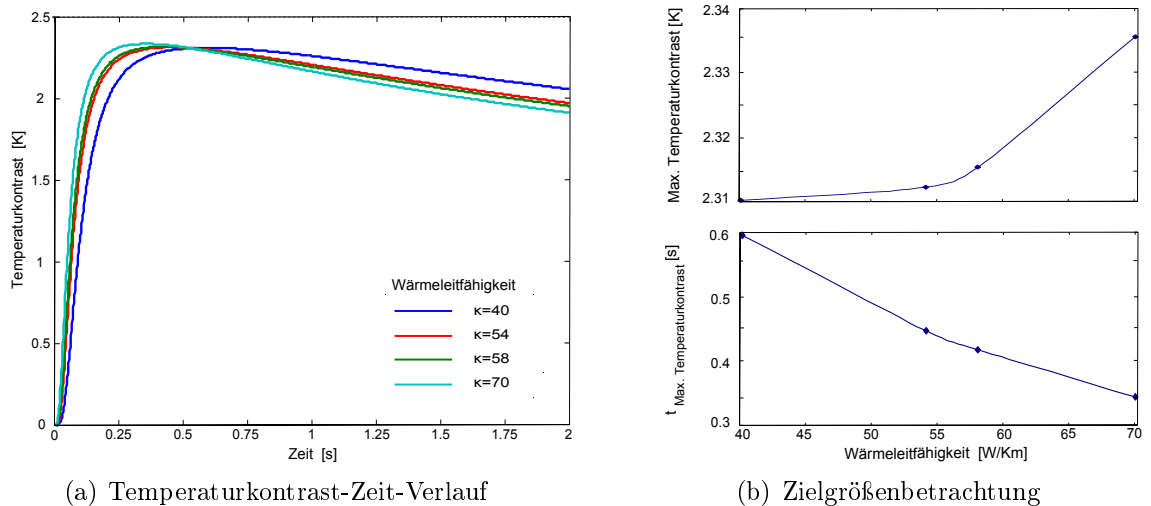


Abbildung 6.4: Sensibilitätsstudie bei Variation der Wärmeleitfähigkeit

Auf diese Weise lässt sich feststellen, welche Größen sich in der Simulation hinsichtlich der Zielgröße robust verhalten und welche präziser vorgegeben werden müssen.

(4) Validierung:

Um die Tragfähigkeit der Simulationsergebnisse sicherzustellen, wird ein Abgleich mit experimentellen Ergebnissen durchgeführt. Messungen an geeigneten Referenzkörpern, die das Prüfproblem in seiner Charakteristik abbilden, werden den Simulationsergebnissen gegenüber gestellt. Anhand der Abweichungen charakteristischer Temperaturverläufe im Bereich der Meßdatenauswertung wird entschieden, ob das Modell für die vorgesehen Aussagen über eine ausreichende Genauigkeit verfügt. Aus der Sensitivitätsanalyse ist der Einfluss der Simulationsparameter, sowie das Ausmaß der systematischen Unsicherheiten des Simulationsmodells weitgehend be-

kannt. Genauigkeiten können mit entsprechendem Aufwand gesteigert und gezielt nachjustiert werden.

6.3 Anwendung für thermografische Prüfprobleme

Voranehend wurden Vorgehensweisen zur Erstellung nutzenbringender Modelle für die virtuelle Prüfung entwickelt und vorgestellt. Die Modelle lassen zwar noch keine umfassenden Aussagen entlang der gesamten thermografischen Prüfkette zu, jedoch sind einzelne Aspekte der Thermografieprüfung mit Hilfe der FEM-Simulation mit geringem Aufwand gut nachstellbar und bieten die Möglichkeit, die experimentellen Umfänge stark zu reduzieren. Spezielle Anwendungen für die aktuelle Praxis, für die vorwiegend qualitative Aussagen genutzt werden, sind im Folgenden aufgezeigt.

6.3.1 Machbarkeitsabschätzung

Reale Fehler sind in der Praxis häufig nicht in ausreichender Vielfalt und größerem Umfang verfügbar, um die Registrierschwelle des vorgesehenen Prüfverfahrens umfassend zu bestimmen und die Grenzfehler zu beschreiben. Die Herstellung von Prüfkörpern mit künstlichen Fehlern ist meist teuer und mit großem Aufwand verbunden. Die simulative Betrachtung von Machbarkeiten ist im Hinblick auf Zeit- und Kostenersparnisse aufgrund kürzerer Entwicklungszeiten mit geringerem Hardwareinsatz erstrebenswert. Den Ablauf der simulativen Machbarkeitsuntersuchung zeigt Abbildung 6.5.

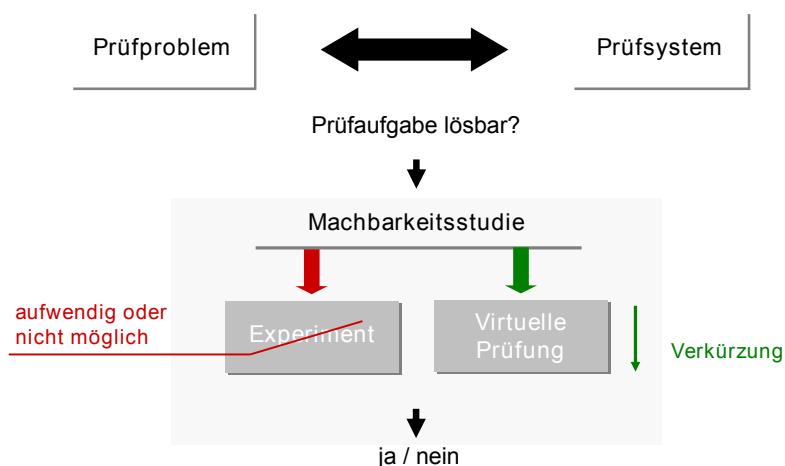


Abbildung 6.5: Marbarkeitsabschätzung mittels virtueller Prüfung

Zu gebräuchlichen Untersuchungen zählt die Erprobung von Anregungstechniken und Auswertemethoden bezüglich prinzipieller Machbarkeiten mit den verfügbaren Methoden und der vorhandenen Gerätetechnik. Betrachtungen sind u.a. Abschätzungen über die minimale Größe und maximale Tiefenlage detektierbarer Inhomogenitäten, zudem können Aussagen über Minimalanforderungen an Prüfsysteme abgeleitet werden.

6.3.2 Störgrößenanalyse

Im Rahmen von Messunsicherheitsbetrachtungen, wie sie u.a. in VDA Bd 5 [Ver03] beschrieben und gefordert sind, muss eine Analyse der möglichen Stör- bzw. Einflussgrößen durchgeführt werden. Die Erfassung wichtiger Einfluss- und Störparameter für die Thermografieprüfung erfolgt mit einem Ursache-Wirkungs-Diagramm in Abbildung 6.6 [Sie06b, Sie06a].

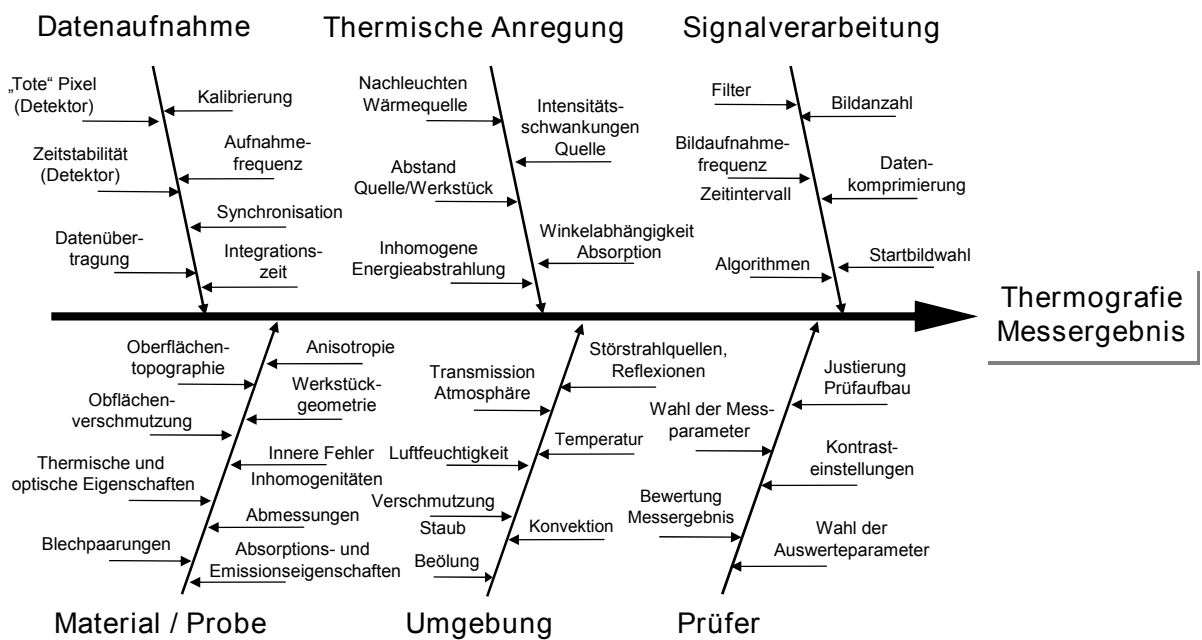


Abbildung 6.6: Parametereinfluss und Störgrößen

Mit Hilfe von Simulationen können Auswirkungen inhomogener Anregungen und der Einfluss von Reflexionen aus der Umgebung untersucht werden. Die Aufnahme mit verschiedenen Kameraaufnahmefrequenzen und unterschiedliche Startbildwahlen lassen sich abbilden, genauso wie Unsicherheiten bei der Synchronisation von Anregung und Auswertung.

6.3.3 Parameteroptimierung

Parameteroptimierungen kommen in verschiedenen Phasen zum Einsatz, so zählt die Entwicklung von Auswertalgorithmen ebenso dazu wie die Anpassung bzw. Optimierung von Anregungstechniken. Rückkopplungen zum Zweck der Optimierung sind in ihrem prinzipiellen Ablauf in Abbildung 6.7 gezeigt.

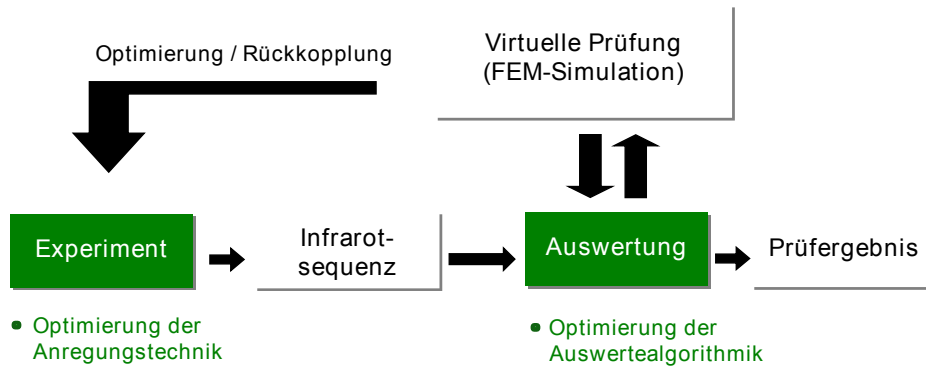


Abbildung 6.7: Prüfoptimierung mittels virtueller Prüfung

Mit der Durchführung von Simulationen können bspw. stark auf das Prüfergebnis einflussnehmende Parameter erkannt werden, die vorzugsweise für Optimierungen des Prüfaufbaus, des -ablaufes oder der Auswertung vorgesehen werden.

7 Beispiele aus der Prüfpraxis

Mit der entwickelten *Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren* können neue Einsatzmöglichkeiten der Thermografie im Automobilbau gewinnbringend genutzt und wirtschaftliche Potentiale erschlossen werden. Nach der Ermittlung einer geeigneten Prüfmethode mit Hilfe des *Expertensystems zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme* und dem erfolgreichen Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeiten, werden die Prüfverfahren zum Teil unter Zuhilfenahme der *virtuellen Thermografieprüfung* umfassend für den vorgesehenen Einsatz erprobt. Bei der nachfolgend gezeigten *Applikation Instrumententafel* steht die Vorgehensweise zur Einführung eines ZfP-Verfahrens im Vordergrund, bei der *Applikation Lagerrohr* wird die Notwendigkeit von Abbruchkriterien bei der Prüfverfahrenvalidierung deutlich, auf die das Expertensystem hinweist. Vorteile und der Nutzen von Simulationsmethoden wird bei der *Applikation Widerstandsschweißpunkt* gezeigt.

7.1 Applikation Instrumententafel

7.1.1 Auswahl der Prüfkonfiguration

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Instrumententafeln bestehen aus einem festen Kunststoffträger, einer weichen Zwischenschicht aus Kunststoffschäum mit einem elastischen Kunststoffüberzug, der sogenannten Slushhaut. Bei der Herstellung wird flüssige Kunststoffmasse zwischen Träger und Slushhaut gespritzt und in einem exothermen Vorgang aufgeschäumt. Danach ist innerhalb einer Taktzeit von etwa 30 Sekunden die gesamte Instrumententafel auf Poren und Lunker zu prüfen, die sporadisch ohne Warnhinweise auftreten können. Die ursprünglich in der Instrumententafelfertigung eingesetzte Qualitätsprüfung ist die Tastprüfung, die dem Prüfer eine andauernde hohe Konzentration abfordert. Das Ziel ist es, diese manuelle Prüfung durch eine objektivere zerstörungsfreie Serienprüfung zu ergänzen und ggf. zu ersetzen. Vorangegangene Aktivitäten erfolgten mit aktiven Thermografiemethoden, die lange Prüfzeiten von etwa 2 Minuten und ein hohes Budget erfordern. Es soll eine kostengünstigere Prüflösung gefunden werden, die innerhalb der Taktzeit für eine 100 %- Absicherung der Serienfertigung online einsetzbar ist (s. [ASQ06]).

7 Beispiele aus der Prüfpraxis

Nach Anwendung des Expertensystems ergibt sich das höchste Potential für eine passive Prüfung mit einer Bolometerkamera, angezeigt durch die Erfolgswahrscheinlichkeiten in Abbildung 7.1, weshalb diese Konfiguration als Prüflösung weiter verfolgt wird.

Abfrage	Auswahl -> Antwort	Blitz Impuls	Temperaturstrahler Modulation	Konvektion Puls oder Modulation	Ultraschall Puls/Burst oder Modulation	Induktion Puls/Burst oder Modulation	Passiv
1/2 Material+Kriterium?	Kunststoff+Pore/Lunker	0.8	1.0	0.7	0.0	0.0	0.5
3 Fehlerlage?	Tiefe < Ausdehnung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4 minimaler Fehler?	> 10 mm	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
5 Emissivitätsverteilung?	homogen (0.5-1.0)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6 Beschichtung?	unbeschichtet	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7 Oberflächenvorbereitung?	keine Schwärzung	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	0.8
8 Bauteilgeometrie?	massiv, thermisch dick	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
9 Zugänglichkeit?	einseitiger Zugang	0.5	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0
10 Objekttemperatur?	nahe Raumtemperatur	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
17 Oberflächenanforderung?	ritzbar, Kratzer unzulässig	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0
18 Zerstörungsfreiheit?	Risiko thermisch+mechanisch	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0
19 Eigenschaftserkennung?	auch ohne Anregung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
20 geforderter Prüftakt?	< 1 min. (Online-/Serienprüfung)	1.0	0.2	0.4	1.0	1.0	1.0
21 Störreflexionen?	keine Störreflexe oder abschirmbar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
22 Budget?	40.000 EUR	0.8	0.6	0.9	0.3	0.3	1.0
Erfolgswahrscheinlichkeit		0.09	0.03	0.17	0.00	0.00	0.32

Abfrage	Auswahl -> Antwort	mittel-/ langwellige Kamera	kurzwellige Kamera	Bolometerkamera	miniaturisierte Bolometerkamera
1/2 Material+Kriterium?	Kunststoff+Pore/Lunker	1.00	1.00	1.00	1.00
4 minimaler Fehler?	> 10 mm	1.00	1.00	1.00	1.00
10 Sicht?	frei einsehbar	1.00	1.00	1.00	1.00
11 Objekttemperatur?	nahe Raumtemperatur	1.00	0.50	1.00	1.00
12 Objektentfernung?	0,5 m	1.00	1.00	1.00	0.90
13 Kamera uneingeschränkt?	ja	1.00	1.00	1.00	1.00
14 Detektordimension?	≥ 320x240 Pixel	1.00	1.00	1.00	0.00
15 verfügbare Aufnahme Frequenz?	50 Hz	1.00	1.00	1.00	0.00
16 erforderliche Temperaturauflösung?	100 mK	1.00	1.00	1.00	1.00
22 Budget?	40.000 EUR	0.20	0.20	0.70	1.00
Erfolgswahrscheinlichkeit		0.20	0.10	0.70	0.00

Abbildung 7.1: Anwendung des Expertensystems für die Applikation Instrumententafel

Eine Unterscheidung zwischen Reflexions- und Transmissionsaufbau wird bei der passiven Prüfung nicht vorgenommen, genauso wenig ist eine Prüfung auf Zerstörungsfreiheit notwendig. Die Sonderausgaben Zugänglichkeit und Zerstörungsfreiheit entfallen daher für die passive Prüfung.

7.1.2 Serienumsetzung Instrumententafelprüfung

Das passive Thermografie-Prüfkonzept ist für die Poren-/Lunkerprüfung von Instrumententafeln bis zur Serienreife zu erproben. Die Prüfaufgabendefinition [**1. Prüfaufgabe benennen**] erfolgt im Zuge der Anwendung der *Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren*. Erste erfolgreiche Machbarkeitsstudien werden mit einer handgehaltenen Infrarotkamera ohne zusätzliche Bauteilerwärmung in der Produktionslinie [**2. Stichversuch**] durchgeführt. Im thermischen Strahlungsbild der Instrumententafel direkt nach dem Austritt aus dem Schäumwerkzeug (Abb. 7.2(a)) bei einer Eigenwärme von etwa 50 °C zeichnen sich Poren und Lunker deutlich ab. In umfangreichen Untersuchungen unter realen Prüfbedingungen in der Produktion (s. Abb. 7.2) werden einhergehend mit Laboruntersuchungen [**3, 4. Labor- und Reihenversuch**] die Eignung des Prüfverfahrens zur Absicherung der Fertigungsqualität bestätigt und die Parameter für den praktischen Einsatz optimiert. Um die Fehler in allen relevanten Bereichen der Instrumententafel abbilden zu können, müssen Infrarotbilder in zwei Prüfpositionen aufgenommen (s. Abb. 7.2(b)) werden.

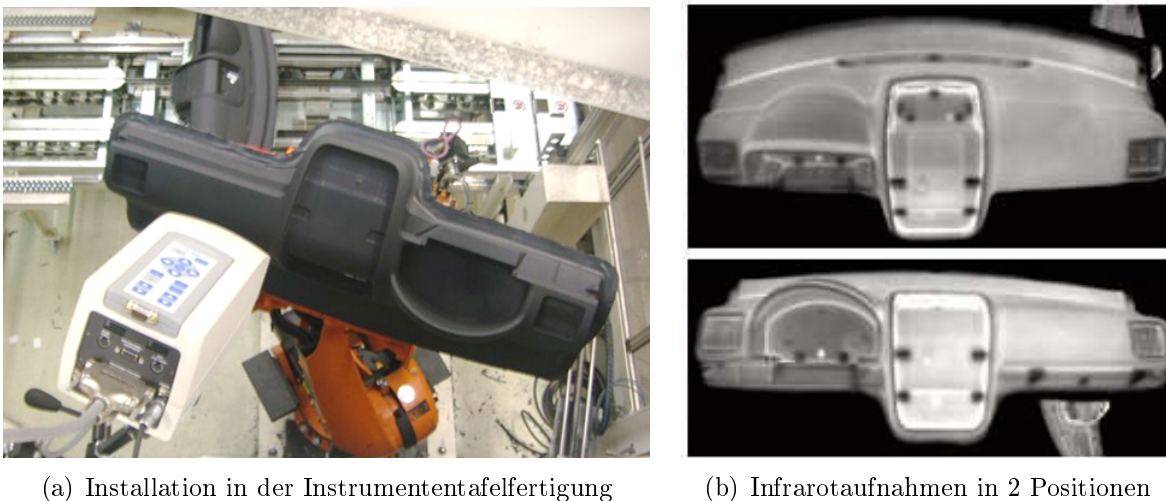


Abbildung 7.2: Passive Thermografie Online Prüfung im Reihenversuch

Die Korrelationen zwischen den Ausdehnungen der Fehlstellen im Schauminneren der Instrumententafeln mit den Anzeigen im thermischen Bild werden mittels Abgleich mit der Tastprüfung und der zerstörenden Prüfung (Schnitt) an einem angemessenen Umfang von Bauteilen ermittelt. Bei der aktiven Thermografieprüfung mit Temperaturstrahlern können Fehler bis 4 mm Durchmesser in 1 mm Tiefe erkannt werden. Bei der Online-Prüfung unter Fertigungsbedingungen werden Fehler bis zu 12 mm Durchmesser in 1 mm Tiefe detektiert. Ein Beispiel zur erreichbaren Sensitivität des Verfahrens gibt

die Abbildung 7.3, in der die Abmaße thermografisch detektierter Poren dargestellt sind. Die ermittelten Prüffähigkeiten werden nach Installation der Prüfanlage in der Serienanlaufphase [5. Pilotanwendung Serie] durch weitere begleitende Abgleiche bestätigt.

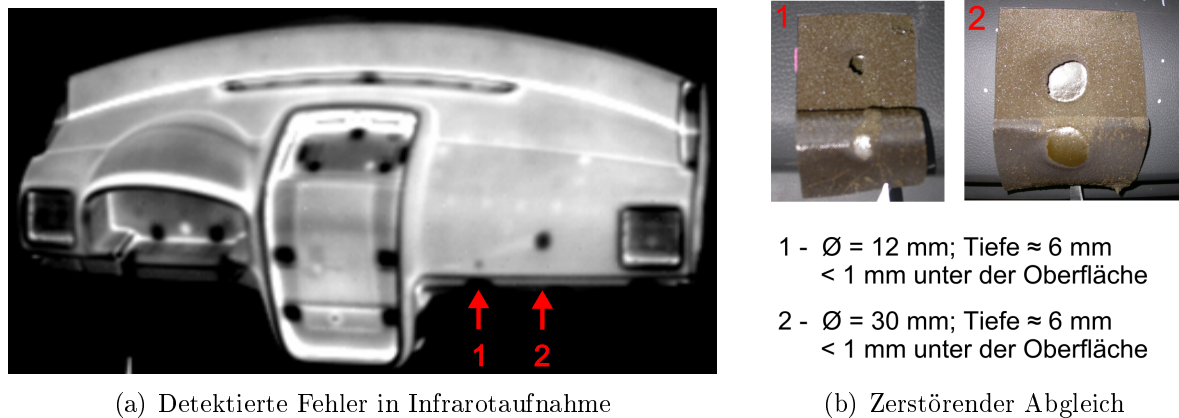


Abbildung 7.3: Ermittlung der Sensitivität der passiven Thermografieprüfung

Die ausreichende Sensitivität der passiven Thermografieprüfung für die gezeigte Anwendung kann durch eine Wärmeauslagerung bestätigt werden. Fehlerbehaftete Teile mit thermografisch noch sicher erkannten Poren werden mit Wärme bestrahlt, bei der sie für die Einhaltung der geforderten Qualitätsansprüche keine Beulenbildung aufweisen dürfen. Die untersuchten Teile verhalten sich unauffällig, so dass von einer zuverlässigen Erkennbarkeit aller kritischen Fehler auszugehen ist, die ein Risiko für den späteren Einsatz darstellen können.

Die 100%-Online-Prüfung beweist ihre Eignung für den industriellen Einsatz, wobei die Prüfempfindlichkeiten mindestens denen der manuellen Tastprüfung entsprechen. Das Verfahren befindet sich inzwischen im Serieneinsatz, weitere Aspekte der Umsetzung beschreiben Achmus [ASQ06] oder beteiligte Systemhersteller [WS08a, WS08b].

7.2 Applikation Lagerrohr

7.2.1 Auswahl der Prüfkongfiguration

Für die zerstörungsfreie Prüfung von Lagerrohren soll eine thermografische Prüfmöglichkeit gefunden werden, um in einem metallischen Bauteil Risse zu detektieren. Nach der Prüfaufgabendefinition und Anwendung des Expertensystems ergibt sich als empfohlene Prüfkongfiguration die induktiv- und die ultraschallangeregte Thermografie (s. Abb. 7.4).

7.2 Applikation Lagerrohr

Zur Aufnahme sollte eine gekühlte Kamera eingesetzt werden, wobei mittel-/langwellige Kameras aufgrund ihrer höheren Empfindlichkeit bei Raumtemperatur besser geeignet sind als kurzwellige Kameras.

Abfrage	Auswahl -> Antwort	Blitz Impuls	Temperaturstrahler Modulation	Konvektion Puls oder Modulation	Ultraschall Puls/Burst oder Modulation	Induktion Puls/Burst oder Modulation	Passiv
1/2 Material+Kriterium?	Metall + Riss	0.1	0.1	0.1	1.0	1.0	0.0
3 Fehlerlage?	Tiefe < Ausdehnung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4 minimaler Fehler?	3-5 mm	0.9	0.8	0.3	1.0	1.0	0.2
5 Emissivitätsverteilung?	homogen (0-0.5)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
6 Beschichtung?	unbeschichtet	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7 Oberflächenvorbereitung?	Schwärzung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
8 Bauteilgeometrie?	massiv, thermisch dick	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
9 Zugänglichkeit?	zweiseitiger Zugang	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10 Objekttemperatur?	nahe Raumtemperatur	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
17 Oberflächenanforderung?	Kratzer unkritisch	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
18 Zerstörungsfreiheit?	Risiko mechanisch	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0
19 Eigenschaftserkennung?	nur mit Anregung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0
20 geforderter Prüffakt?	frei (Labor)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
21 Störreflexionen?	keine Störreflexe oder abschirmbar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
22 Budget?	100.000 EUR	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	1.0
Erfolgswahrscheinlichkeit		0.07	0.07	0.02	0.50	0.80	0.00
Sonderausgabe Prüfaufbau		-> Transmissions- oder Reflexionsaufbau					
Zerstörungsfreiheit		-> Prüfung auf mechanische Zerstörungsfreiheit notwendig					

Abfrage	Auswahl -> Antwort	mittel-/ langwellige Kamera	kurzwellige Kamera	Bolometer-kamera	miniaturisierte Bolometerkamera
1/2 Material + Kriterium?	Metall + Riss	0.90	1.00	0.70	0.70
4 minimaler Fehler?	2 mm	1.00	1.00	0.50	0.20
10 Sicht?	frei einsehbar	1.00	1.00	1.00	1.00
11 Objekttemperatur?	nahe Raumtemperatur	1.00	0.50	1.00	1.00
12 Objektentfernung?	0,5 m	1.00	1.00	1.00	0.90
13 Kamera uneingeschränkt?	ja	1.00	1.00	1.00	1.00
14 Detektordimension?	≥ 320x240 Pixel	1.00	1.00	1.00	0.00
15 verfügbare Aufnahme Frequenz?	50 Hz	1.00	1.00	1.00	0.00
16 erforderliche Temperaturauflösung?	20 mK	1.00	1.00	0.00	0.00
22 Budget?	100.000 EUR	1.00	1.00	1.00	1.00
Erfolgswahrscheinlichkeit		0.90	0.50	0.00	0.00

Abbildung 7.4: Anwendung des Expertensystems für die Applikation Lagerrohr

Die ultraschallangeregte Thermografieprüfung stellt für spröde Werkstoffe eine Gefährdung dar, die gemäß der Sonderausgabe des Expertensystems für metallische Werkstoffe im Stichversuch eine umfassende Untersuchung auf Zerstörungsfreiheit erfordert.

7.2.2 Stichversuch Lagerrohruntersuchung

Die grundsätzliche Detektierbarkeit von Rissen mittels ultraschallangeregter Thermografieprüfung wird im Stichversuch festgestellt, wie es in Abbildung 7.5 gezeigt ist.

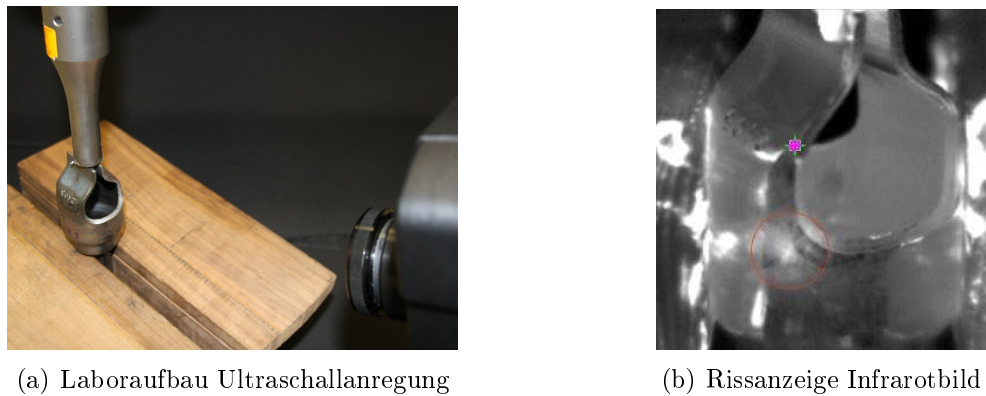


Abbildung 7.5: Aktive Thermografieprüfung Lagerrohr im Stichversuch

In der Voruntersuchung zur Zerstörungsfreiheit wird festgestellt, dass diese Art der Prüfung die Prüfobjekte nicht unversehrt belässt. Wie in Abbildung 7.6 zu erkennen ist, wächst der Riss durch die einwirkende Ultraschallenergie während des Prüfvorganges mit einer Modulationsfrequenz von 1 Hz. Von der erwarteten zyklischen Infrarotstrahlungsantwort, die aus dem Reiben der Rissflanken infolge der Ultraschallanregung mit 20 kHz resultiert, hebt sich im Kurvenverlauf insbesondere in Anregungsperiode 3 ein Wärmepeak ab, welcher auf die plastische Verformung im Rissgrund hindeutet.

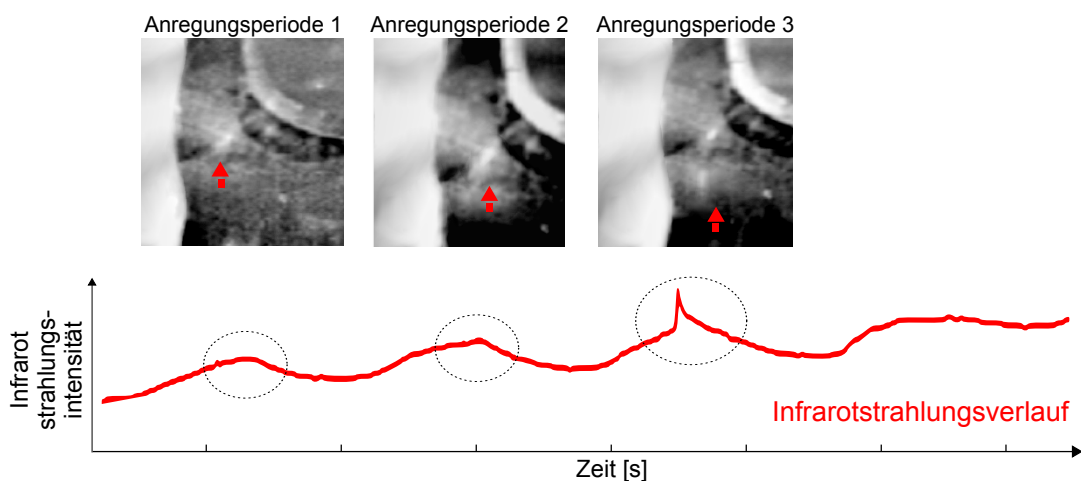


Abbildung 7.6: Infrarotbilder mit Rissfortschritt und Wärmepeaks im Strahlungsverlauf

Beim Abtesten der Verfahrensmöglichkeiten und -grenzen kann die Zerstörungsfreiheit der Bauteile nicht gewährleistet werden, daher werden die Untersuchungen an dieser Stelle eingestellt und wertvolle Ressourcen stehen für die Erprobung weiterer Potentialträger aus den Applikationsfeldern zur Verfügung.

7.3 Applikation Widerstandsschweißpunkt

7.3.1 Auswahl der Prüfkfiguration

Im Zuge der Qualitätssicherung werden Fügeverbindungen im Karosseriebau in bestimmten Zeitabständen zerstörend geprüft, darunter fallen auch Widerstandsschweißpunkte. Neben einem hohen Zeit- und Kostenaufwand werden die Ergebnisse stark verzögert ausgewertet, wodurch zeitnahe Prozessanpassungen bzw. -korrekturen nicht möglich sind. Mit zunehmendem Anteil an höchstfesten Karosserieblechen wird die zerstörende Prüfung zudem schwieriger und aufwendiger, und herkömmliche Prüfmethode gelangen bei der Bestimmung des Punkt- bzw. Linsendurchmessers als wichtigstes Qualitätskriterium der Widerstandsschweißpunktverbindungen an ihre Grenzen. Konkurrierend mit modernen Ultraschallprüftechniken zeigt die Thermografie methodenseitig große Potentiale für die zerstörungsfreie Charakterisierung von Widerstandsschweißpunkten [ALvA⁺08, ZSH⁺03].

Wird für die vorliegende Applikation das Expertensystem angewendet, werden die thermografische Prüfung mittels Blitzimpulsanregung und mittels Induktivanregung gleichermaßen favorisiert (s. Abb. 7.7), im Falle einer beidseitigen Zugänglichkeit ist die Prüfung in Reflexion oder in Transmission möglich. Um die Besonderheiten von Blitzimpuls- und Induktivanregung genauer abzubilden, müssen feinere Unterscheidungen im Expertensystem vorgenommen werden, die bislang nicht implementiert sind. Ein Vorteil der Induktivanregung gegenüber der optischen Anregung ist z.B. die emissionsgradunabhängige Erwärmung der Prüfobjektoberflächen. Bei einer stark inhomogenen Energieeinkopplung aufgrund von Emissionsgradschwankungen kann die Induktivanregung möglicherweise Abhilfe schaffen. Als Kamerasystem wird eine mittel- oder langwellige Halbleiterkamera empfohlen, da diese im Gegensatz zu den Bolometerkameras die erforderliche geometrische und thermische Auflösung bereitstellen kann.

7 Beispiele aus der Prüfpraxis

Abfrage	Auswahl -> Antwort	Blitz Impuls	Temperaturstrahler Modulation	Konvektion Puls oder Modulation	Ultraschall Puls/Burst oder Modulation	Induktion Puls/Burst oder Modulation	Passiv
1/2 Material+Kriterium?	Metall + Lage/Dimension	0.9	0.8	0.6	0.4	0.7	0.2
3 Fehlerlage?	Tiefe < Ausdehnung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
4 minimaler Fehler?	2 mm	1.0	0.7	0.2	1.0	1.0	0.1
5 Emissivitätsverteilung?	homogen (0-0.5)	0.5	0.7	1.0	1.0	1.0	0.3
6 Beschichtung?	unbeschichtet	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
7 Oberflächenvorbereitung?	keine Schwärzung	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	0.8
8 Bauteilgeometrie?	flach, themisch dünn	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	0.9
9 Zugänglichkeit?	zweiseitiger Zugang	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10 Objekttemperatur?	nahe Raumtemperatur	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9
17 Oberflächenanforderung?	Kratzer unkritisch	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
18 Zerstörungsfreiheit?	kein Risiko	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
19 Eigenschaftserkennung?	nur mit Anregung	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0
20 geforderter Prüftakt?	frei (Labor)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
21 Störreflexionen?	keine Störreflexe oder abschirmbar	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
22 Budget?	40.000 EUR	0.8	0.6	0.9	0.3	0.3	1.0
Erfolgswahrscheinlichkeit		0.25	0.17	0.08	0.11	0.21	0.00
Sonderausgabe Prüfaufbau		-> Transmissions- oder Reflexionsaufbau					
Zerstörungsfreiheit		-> keine Prüfung auf Zerstörungsfreiheit notwendig					

Abfrage	Auswahl -> Antwort	mittel-/ langwellige Kamera	kurzwellige Kamera	Bolometer-kamera	miniaturisierte Bolometerkamera
1/2 Material + Kriterium?	Metall+Lage/Dimension	0.90	1.00	0.70	0.70
4 minimaler Fehler?	2 mm	1.00	1.00	0.50	0.20
10 Sicht?	frei einsehbar	1.00	1.00	1.00	1.00
11 Objekttemperatur?	nahe Raumtemperatur	1.00	0.50	1.00	1.00
12 Objektentfernung?	0,5 m	1.00	1.00	1.00	0.90
13 Kamera uneingeschränkt?	ja	1.00	1.00	1.00	1.00
14 Detektordimension?	≥ 320x240 Pixel	1.00	1.00	1.00	0.00
15 verfügbare Aufnahmefrequenz?	≥ 150 Hz	1.00	1.00	0.00	0.00
16 erforderliche Temporauflösung?	20 mK	1.00	1.00	0.00	0.00
22 Budget?	100.000 EUR	1.00	1.00	1.00	1.00
Erfolgswahrscheinlichkeit		0.90	0.50	0.00	0.00

Abbildung 7.7: Anwendung des Expertensystems für die Applikation Widerstandsschweißpunkt

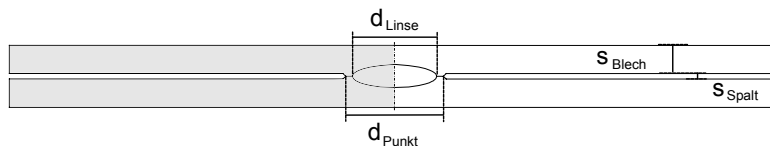
Aktuell befindet sich die blitzlichtangeregte Thermografieprüfung von Widerstandsschweißpunkten in der Erprobung und steht kurz vor dem Serieneinsatz. Die Anwendung ist bislang aber auf die Prüfung in Transmissionsanordnung beschränkt, bei der es sich um die robustere Methode handelt. Ein Nachteil dieser Technik ist die Einschränkung der Prüfumfänge, da stets eine beidseitige Zugänglichkeit gegeben sein muss, was bei einigen Fugestellen im Karosseriebereich nicht der Fall ist. Es wird deshalb eine Machbarkeitsanalyse durchgeführt, um Kenntnisse über die Prüfmöglichkeiten in Reflexionsanordnung zu erlangen.

7.3.2 Simulation der Prüfaufgabe

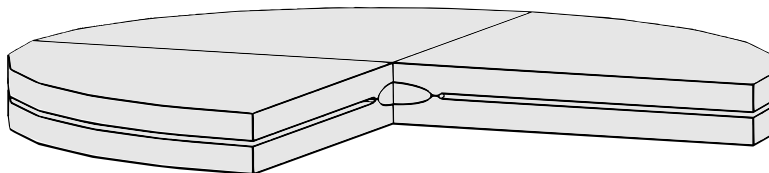
Um den Aufwand für die Machbarkeitsanalyse zur zerstörungsfreien Durchmesserbestimmung von Widerstandsschweißpunkten mittels Blitzlichtimpulsthermografie in Reflexionsanordnung möglichst gering zu halten, wird die *virtuelle Thermografieprüfung* eingesetzt und ein Simulationsmodell entickelt.

Aufbau Grundmodell

Die Grundgeometrie des Simulationsmodells (s. Abb. 7.8) wird an die Vorgaben der PV 6702 [Vol04] angelehnt. Die konzerninterne Prüfvorschrift der Volkswagen AG beschreibt ein Grenzmodell, welches den minimal zulässigen Punkt-/Linsendurchmesser einer Fügestelle in Abhängigkeit vom dünneren Blech vorgibt.¹ Für Blechdicken von $s_{Blech}=1.5\text{ mm}$ ergeben sich Mindestdurchmesser von $d_{Linse}=4.3\text{ mm}$ bzw. $d_{Punkt}=4.9\text{ mm}$, übliche Blechabstände werden mit einem Luftspalt von $s_{Spalt}=0.2\text{ mm}$ angenommen. Das Modell wird zweidimensional als 2D-Geometrie beschrieben und rotationsymmetrisch dreidimensional in 3D dargestellt. Von einer 3D-Simulation wird abgesehen, da nur geringfügig verbesserte Ergebnisse den erheblich gesteigerten Rechenaufwand nicht rechtfertigen. Für die Gebietsbedingungen wird isotropes Material vorausgesetzt und Parameter der Fachliteratur [Mal01] entnommen. Für mikrolegierten Stahl, z.B. einen HC320LA nach DIN EN 10268 [Deu06b], ist die Wärmeleitfähigkeit $\kappa=54\frac{W}{m\cdot K}$, die spezifische Wärmekapazität $c=465\frac{W\cdot s}{kg\cdot K}$ und die Dichte $\rho=7.833\frac{kg}{m^3}$.



(a) Zweidimensionales Grenzmodell mit Mindestdurchmessern in 2D



(b) Dreidimensionales 3D-Rotationsmodell aus der 2D-Geometrie

Abbildung 7.8: Grundgeometrie Simulationsmodell Widerstandsschweißpunkt

¹ $d_{Linse}(min) = 3.5 \cdot \sqrt{s_{Blech}}$ und $d_{Punkt}(min) = 1.15 \cdot \sqrt{s_{Blech}}$ nach Konzernnorm VW 01105-1 [Vol07] der Volkswagen AG

Für die Beschreibung der impulsartigen thermischen Anregung als Randbedingung wird der Verlauf mit Hilfe der Formel 7.1 qualitativ an die Charakteristik (Abblitzdauer, etc.) des verwendeten Blitzes (s. Abb. 5.5) angepasst.

$$\text{Anregungsenergie} \quad Q_A(t) = Q_0 \cdot \left(e^{-\frac{-t}{t_{Abfall}}} - e^{-\frac{-t}{t_{Anstieg}}} \right) \quad (7.1)$$

Die bereitgestellte Anregungsenergie Q_A wird mit einer Anstiegszeit von $t_{Anstieg}=0.05\text{ ms}$ und einer Abfallzeit von $t_{Abfall}=3\text{ ms}$ beschrieben, die Amplitude geht aus Voruntersuchungen hervor, in denen der qualitative Energieverlauf realen Temperaturhüben an der Prüfobjektoberfläche angeglichen wird. Wärmeverluste an der Oberfläche (Abstrahlung, Konvektion) oder Übergangswiderstände an inneren Grenzflächen werden im Modell in erster Näherung nicht berücksichtigt.

Die Sensitivitätsanalyse wird analog der in Kapitel 6.2 beschriebenen Vorgehensweise anhand des maximalen Temperaturkontrasts nach der Anregung durchgeführt. Der Einfluss von Oberflächeneindrücken mit Eindringtiefen von weniger als 0.1 mm erweist sich dabei z.B. als vernachlässigbar klein. Für die Validierung des Simulationsmodells werden in Abbildung 7.9 die Abkühlverläufe aus Simulation und Praxis gegenüber gestellt, wobei jeweils die Oberflächenabkühlungen im Schweißpunktmittelpunkt und in Abständen von $r = 4, 5$ und 10 mm mit jeweils einer Wiederholungsmessung bei der experimentellen Erfassung betrachtet werden.

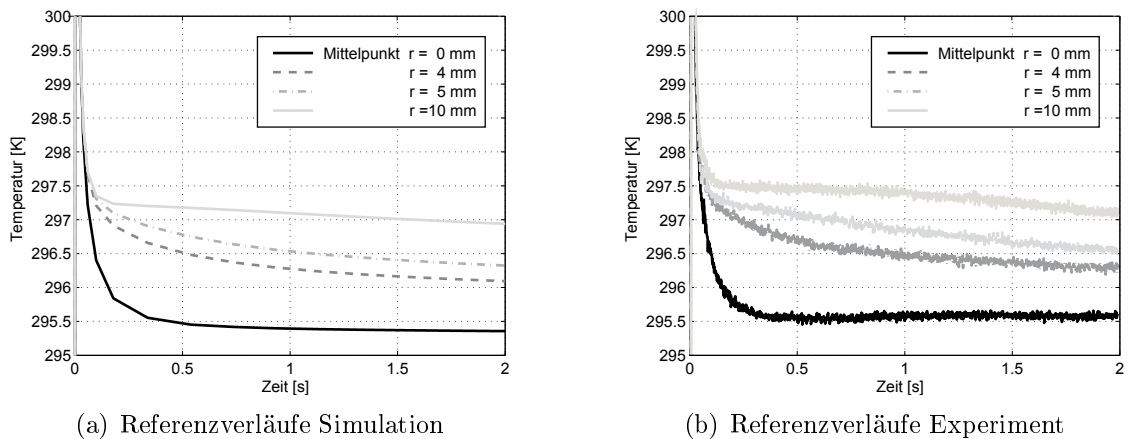


Abbildung 7.9: Vergleich der Simulation mit den gemessenen Temperaturverläufen am Widerstandsschweißpunkt nach der Blitz-Impulsanregung

Die Temperaturverläufe zeigen im Rahmen üblicher Messgenauigkeiten im Experiment eine gute Übereinstimmung. Das verwendete Simulationsmodell zeigt damit seine grundsätzliche Eignung für die angestrebte virtuelle Thermografieprüfung.

Machbarkeitsabschätzung

Um die Vorzüge der virtuellen Thermografieprüfung herauszustellen, wird ein Algorithmus zur thermischen Durchmesserbestimmung an Widerstandsschweißpunkten festgelegt und ausgewählte Aspekte einer Machbarkeitsanalyse gezeigt. Für eine spätere Anwendung sind weiterführende Untersuchungen erforderlich, z.B. umfassende Blechdicken-, Material- und Geometrievariationen zur Ermittlung der Korrelationen der ermittelten thermischen Durchmesser mit dem Punkt- bzw. Linsendurchmesser.

In der Machbarkeitsuntersuchung kommt aufgrund ihrer hohen Robustheit die Phasenauswertung zum Einsatz. Zur Festlegung der Auswertefrequenzen werden an einem metallografischen Schliffbild eines Widerstandsschweißpunktes (s. Abb. 7.10) spezifische Weglängen definiert, für die relevante Informationen über den Widerstandsschweißpunktdurchmesser im Infrarotsignal erwartet werden. Mit Hilfe der Gleichung 3.4 zur Berechnung der thermischen Eindringtiefe werden die Auswertefrequenzen 2 Hz, 1 Hz und 0.5 Hz berechnet, um die Bereiche von 1.5 mm bis zu 3 mm Tiefe abzudecken, was der einfachen und zweifachen Blechdicke der Widerstandsschweißpunktprobe entspricht.

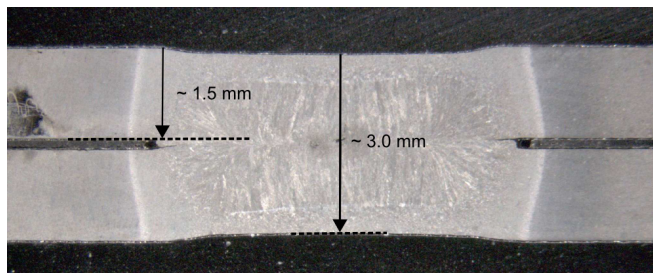


Abbildung 7.10: Schliffbild Widerstandsschweißpunkt mit spezifischen Weglängen

Die an der Oberfläche des Widerstandsschweißpunktes vorliegenden Phasenverschiebungen der Frequenzen 1 Hz, 2 Hz und 0.5 Hz werden für Simulationsmodelle mit Schweißpunktdurchmessern von 4 mm, 5 mm und 6 mm über dem Radius aufgetragen (s. Abb. 7.11). Als Kriterium zur thermischen Durchmesserbestimmung wird für dieses Anschauungsbeispiel der Radius bis zum ersten Minimum der Phasenverschiebungen betrachtet. Exemplarisch wird für die Auswertefrequenz von 1 Hz bei einem Realdurchmesser von 4 mm der thermische Durchmesser $d_{thermisch}$ zu 9.8 mm bestimmt.

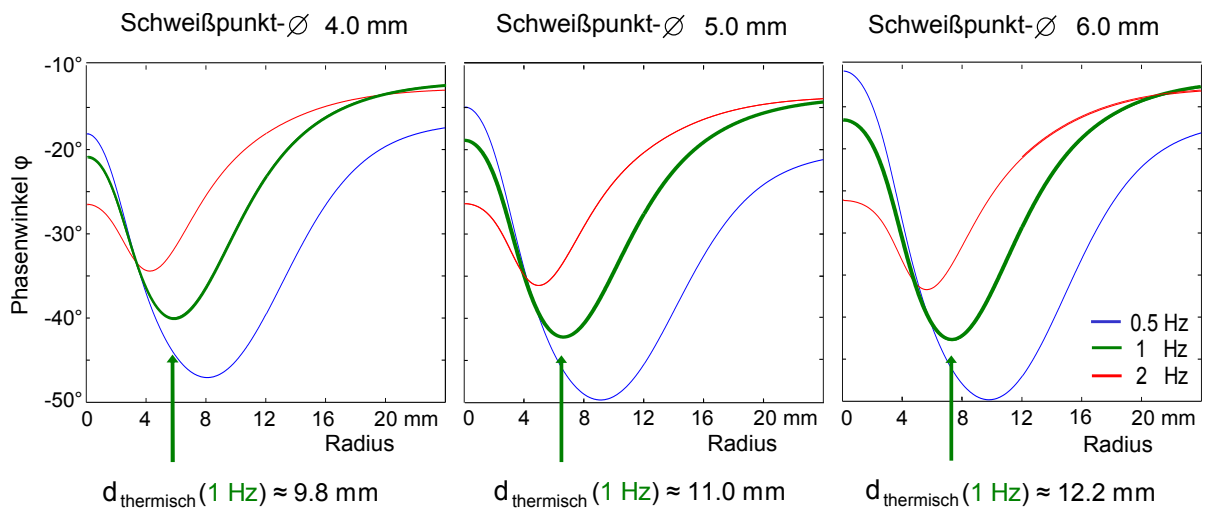


Abbildung 7.11: Radiale Phasenverläufe bei Variation des Schweißpunktdurchmessers

Das Minimum der Phasenverschiebungen und damit der dort definierte thermische Durchmesser vergrößert sich mit ansteigendem Schweißpunktdurchmesser des Simulationsmodells, was auf eine Eignung des Algorithmus hindeutet.

Störgrößenanalyse

Während der Prüfverfahrensqualifizierung muss die Messunsicherheit unter Einwirkung einer Vielzahl von Einflussgrößen ermittelt werden. Für die Durchmesserbestimmung vorgesehene Auswertalgorithmen müssen ausreichend robust gegenüber allen möglichen Störeinflüssen sein. Das Ergebnis der systematischen Ermittlung der Stör- und Einflussmöglichkeiten bei der thermografischen Prüfung von Widerstandsschweißpunktverbindungen zeigt die Abbildung 7.12.

Die Einflussanalyse erfolgt für einzelne Störgrößen mit Hilfe der virtuellen Thermografieprüfung mit stark reduziertem Aufwand. Um ein Beispiel aufzuzeigen, wird im Folgenden der Störeinfluss von Emissions- und Absorptionsgradschwankungen im Hinblick auf die zuvor festgelegte Auswertalgorithmik betrachtet.

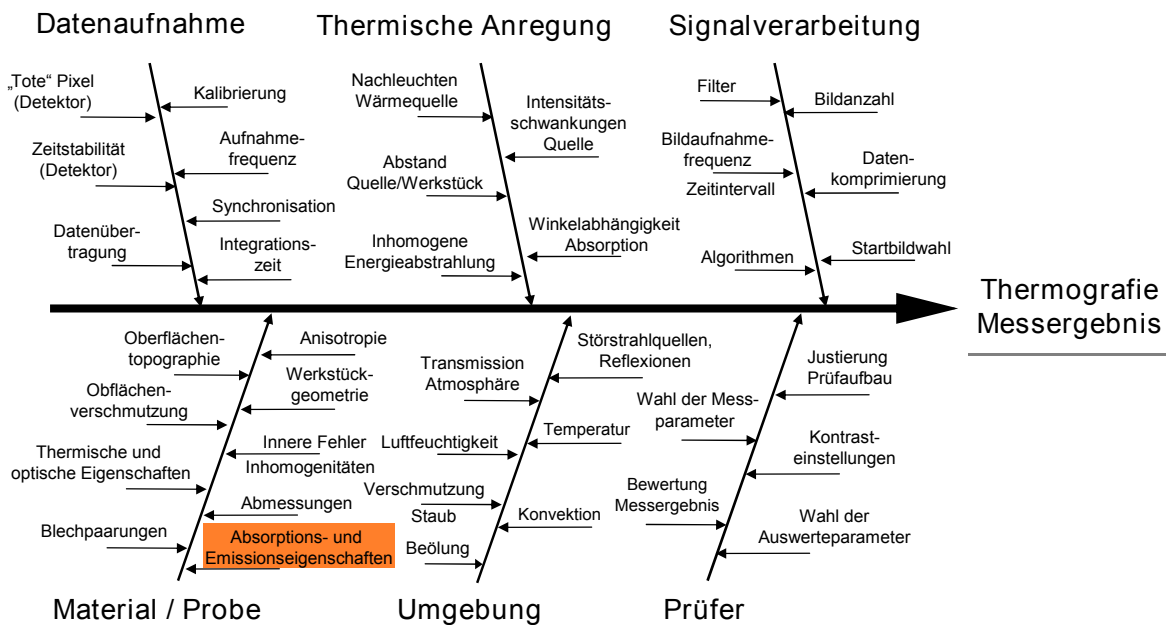


Abbildung 7.12: Aspekte der Störgrößenanalyse und Parameteroptimierung

Infolge des Fügeprozesses kommt es an Widerstandsschweißpunkten zu Veränderungen der Blechoberfläche, die sich auf ihr Emissions- und Absorptionsverhalten auswirken. In Voruntersuchungen werden Kenntnisse über das Spektrum realer Emissivitäten gewonnen, die einen Eindruck von typischen Emissivitätsverteilungen verschiedener Blechkombinationen mit unterschiedlichen Schweißgüten vermitteln. Die Oberflächen sind in Abbildung 7.13 jeweils mit visuellem Bild und dazugehörigem Infrarotbild bei homogenem Raumtemperaturniveau dargestellt. Die Aufnahme der Infrarotbilder erfolgte mit einer ThermoCAM™ SC3000 mit einer Detektorempfindlichkeit im Bereich von 8-9 μm [FA]. Jeweils rechts in den Bildern treten Referenzstreifen mit bekannter Emissivität von $\epsilon=0.9$ in Erscheinung, mittels derer die Temperaturskala eingestellt ist. Bei gleich temperierten Proben kommt es durch Emissionsgraddifferenzen zu scheinbaren Temperaturunterschieden. Mit Hilfe dieser Temperaturunterschiede werden Emissionsgradschwankungen technischer Oberflächen im langwelligen Infrarotbereich von $\Delta_\epsilon \approx 0.3$ abgeschätzt.

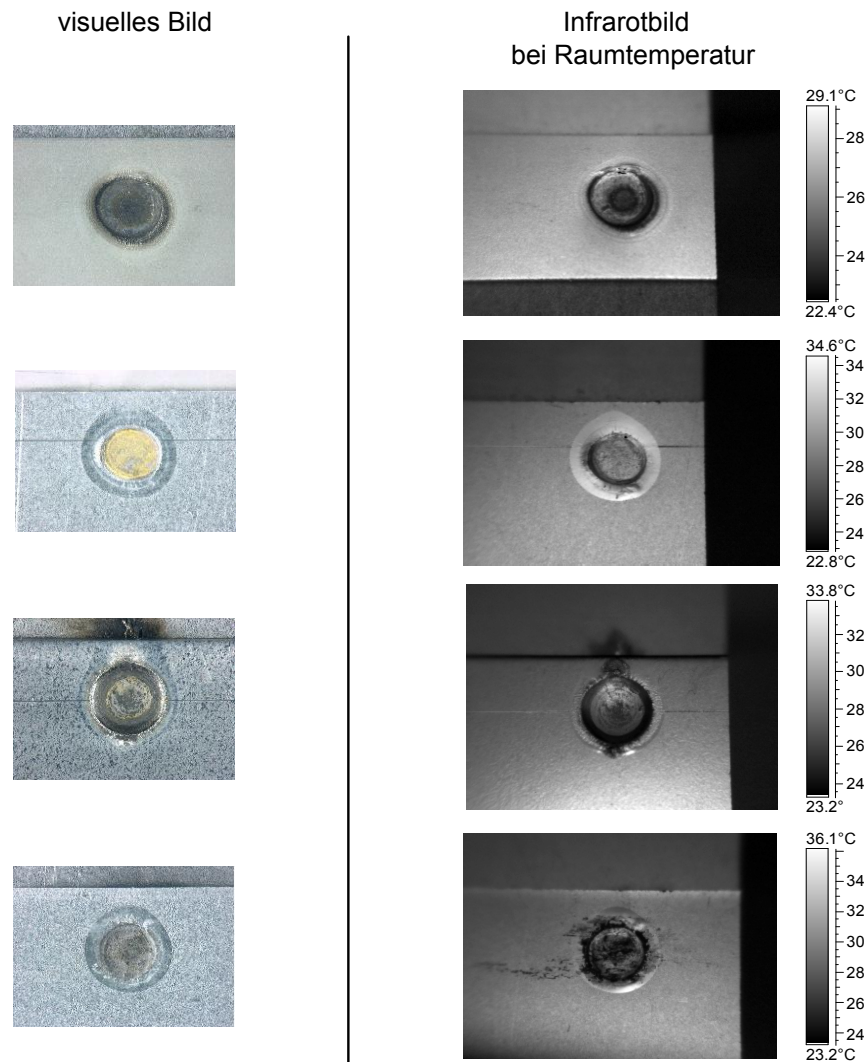


Abbildung 7.13: Emissivitätsverteilungen an typischen Schweißpunkt-oberflächen

Probleme bei der optischen Anregung in Reflexion treten aber weniger aufgrund inhomogener Emissionsgrade auf, da diese mittels mathematischer Algorithmen (s. Phasenauswertung in Kap. 3.2.2) eliminiert werden können. Schwankende Absorptionsgrade beeinträchtigen die Infrarotmessung, da sie zu ungleichmäßigen Energieeinträgen führen. Weil die Absorptionskoeffizienten der geschweißten Oberflächen für den Spektralbereich der verwendeten Lichtquelle (sichtbarer bis kurzweiliger Infrarotbereich) nicht vorliegen, wird vereinfacht angenommen, dass sie den ermittelten Infrarotemissivitäten bzw. -absorptionsfähigkeiten sehr ähnlich sind. Als Ausgangsbedingung für die Simulation von Emissions- und Absorptionsschwankungen werden demnach Absorptionsgrade von $\alpha_{min} = 0.6$ bis $\alpha_{max} = 0.9$ vorgegeben und entsprechend verringerte Energieabsorptionen berücksichtigt (s. Abb. 7.14). In einem Radius von 1.5 mm wird ein 2 mm breiter Ring

mit einem zum benachbarten Bereich um 0.3 erhöhten Absorptionsgrad für die Berechnungen vorgesehen, um ein typisches Muster der Widerstandsschweißpunktaufnahmen aus den Voruntersuchungen abzubilden.

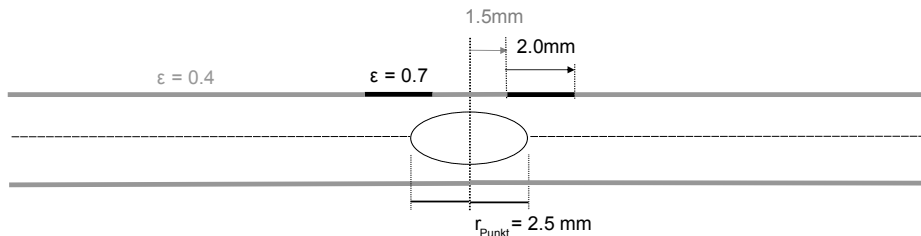


Abbildung 7.14: Simulative Abbildung von Emissions-/Absorptionsgradvariationen

Energieeintragsvariationen führen bei konstantem Realdurchmesser von 5 mm zu Veränderungen in den Phasenverschiebungskurven (s. Abb. 7.15). Allein durch die Eintragsvariationen ergeben sich Unterschiede im thermischen Durchmesser von über 1 mm. Die anfangs durchgeführte Auswertung auf Basis der Bestimmung des thermischen Radius am ersten Minimum der Verläufe nach dem Schweißpunktmittelpunkt führt zu keiner mit dem realen Durchmesser korrelierbaren Kenngröße.

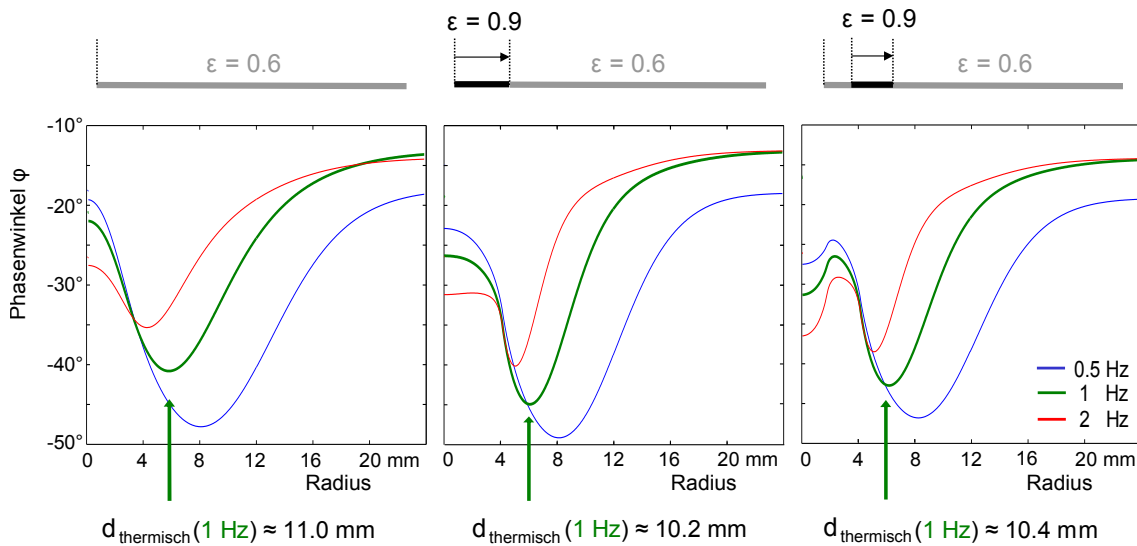


Abbildung 7.15: Radiale Phasenverläufe bei inhomogenen Energieeinträgen als Folge von Emissionsgradvariationen

Als Resultat der Störgrößenbetrachtung lässt sich festhalten, dass der gewählte Ansatz für eine Durchmesserstimmung an realen Widerstandsschweißpunkten nicht geeignet ist.

Eine Schwärzung der Schweißpunkte könnte Abhilfe schaffen, doch ist diese Art von Oberflächenvorbehandlung für eine Serienüberwachung u.a. aufgrund der Vielzahl an Proben nicht möglich. Um eine Methode zur Prüfung der Widerstandsschweißpunkte mittels der Blitzlichtthermografie in Reflexionsanordnung zu entwickeln, müssen andere Ansätze gewählt und bezüglich ihrer Robustheit abgesichert werden. Aussichtsreich erscheinen in diesem Zusammenhang noch die Induktivanregung, auch eine lokale punktuelle Aufheizung des Widerstandsschweißpunktes mittels eines Lasers kann zielführend sein.

8 Diskussion und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, dem industriellen Anwender Hilfestellungen an die Hand zu geben, damit die vielfältigen Potentiale der Thermografie umfangreicher wirtschaftlich genutzt werden können. Zu diesem Zweck wurden die *Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren*, *Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme* und die *virtuelle Thermografieprüfung* entwickelt, die sich im Endergebnis zu einer modular aufgebauten Ingenieurplattform zusammen fügen.

Die *Systematik zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren* stellt eine geeignete Absicherung dar, neue ZfP-Verfahren regelkonform in die Fertigungsprozesse eines Automobilherstellers einzubringen. Die Vielzahl von Aktivitäten eines Fähigkeitsnachweises fließen mit der ZfP-Kontrollliste in das Stufenmodell ein und werden neben wirtschaftlichen Faktoren wie z.B. Zeit- und Kostenersparnisse berücksichtigt. Den erfolgreichen Einsatz eines Thermografieverfahrens in der Produktionslinie zeigt die *Applikation Instrumententafel*, bei der das Stufenmodell zu einer effizienten Umsetzung beigetragen hat. Auch der frühzeitige Abbruch der Validierung bei der *Applikation Lagerrohr* belegt, dass eine Verschwendung von Ressourcen weitgehend vermieden wird. Die in der Arbeit beschriebenen Zusammenhänge gehen zukünftig in eine Konzernnorm der Volkswagen AG ein und können damit weltweit als Leitfaden für eine systematische Validierung zerstörungsfreier Prüfprozesse dienen. Über die behandelten Themen hinaus werden darin auch Regelungen zur Prüforganisation, zum Personal und deren Qualifizierung, sowie zu den Verantwortlichkeiten vorgegeben.

Die *Methodik zur Konfiguration thermografischer Prüfsysteme* befähigt den Anwender, Entscheidungen bei der Auswahl von Prüfkonfigurationen zu treffen. Ein hohes Maß an Hintergrundwissen von Thermografieexperten wurde aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Die Charakterisierung der Thermografiemodule für das *Expertensystem zur Prüfkonfigurationsauswahl* erfolgte nach einem einheitlichen Schema, welches prinzipiell auf beliebige neue Anregungsquellen anwendbar ist und spätere Erweiterungen mit geringem Aufwand ermöglicht. Die praktische Anwendbarkeit des Expertensystems fördert eine effiziente Bearbeitung der Aufgaben bei der Prüfverfahrensentwicklung und treibt den Wissenstransfer ins Unternehmen voran. Die Anwendung kann mittels speziell gestalteter Grafikoberflächen weiter gesteigert werden.

Bei der Expertensystemumsetzung gehen die Zusammenhänge der Thermografieprüfung in umfangreiche Matrizen ein. Eine Vielzahl von Einzelbewertungen zur Erfolgsaussicht jedes einzelnen Prüfmoduls unter verschiedenen Randbedingungen wurden vorgenommen, und daraus berechnete Gesamtfaktoren beschreiben die Erfolgswahrscheinlichkeiten der möglichen Prüfverfahrenskonfigurationen. Die Zahlenwerte können ausschließlich mit den Alternativen desselben Vorgangs verglichen werden, wobei keine absoluten Erfolgsprognosen zulässig sind. Um dem ausgegebenen Zahlenwert für eine durchgängige Vergleichbarkeit eine absolute Bedeutung beizumessen, sollte eine Erweiterung durch Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Abfrageblöcke angestrebt werden.

Das bereitgestellte Expertensystem eignet sich gut, den Anwender bei der generellen Entscheidungsfindung zu unterstützen. Hinsichtlich der Lernfähigkeit ist das System jedoch noch wenig flexibel. Neue Erkenntnisse z.B. aus der Praxis und Wissenschaft müssen mit den Ergebnissen des Expertensystems kontinuierlich abgeglichen werden und aufwendig über neue Einzelbewertungen in die Bewertungsmatrizen eingebracht werden. Auch Erhöhungen der Detaillierungsgrade z.B. von den Auswertemethoden erfordern umfassende Neubewertungen, da neue Module in die Bewertungsmatrizen einfließen. Lernfähige Lösungsansätze lassen sich mit Methoden des Maschinellen Lernens im Fachgebiet der Intelligenten Datenanalyse ausfindig machen, mit denen mit Hilfe spezieller Algorithmen in Datenmengen verborgene Gesetzmäßigkeiten entdeckt [Bor97] werden. Eine geeignete Datenbasis kann aus einer Variation der möglichen Antworten zu den 21 Abfragekriterien entstehen zusammen mit dem Ergebnis der geeigneten Prüfkongfiguration. Da das Expertenwissen der Thermografen verstärkt auf bekannten Regeln, meist physikalischen Zusammenhängen, gründet, sind regelbasierte Lösungen für den Aufbau eines Expertensystems zu präferieren. Zur Analyse der Datenmengen sowie zur Darstellung des generierten Wissens eignen sich Algorithmen zur Induktion von Entscheidungsbäumen, eine sehr bekannte Form von Klassifikatoren [BK98]. Für gute Ergebnisse muss eine bestimmte Anzahl von Datensätzen für die Regelinduktion zur Verfügung stehen. Sollte die vorliegende Datenmenge nicht ausreichen, können weitere Datensätze durch Befragungen von Anwendern und Experten gesammelt werden.

Im Rahmen der *virtuellen Thermografieprüfung* wurde gezeigt, dass mit der FEM-Simulation frühe Erkenntnisse gewonnen und experimentelle Umfänge reduziert werden können, was insgesamt zu einer Verkürzung von Entwicklungszeiten führt. Das beschriebene Vorgehen zum Erstellen thermografischer Simulationsmodelle stellt eine praktikable Methodik dar, Probleme der Thermografie simulativ zu betrachten. Sind genaue Übereinstimmungen von Simulations- und Messergebnissen auch stellenweise schwer erzielbar, kann das generelle Verhalten in Machbarkeitsanalysen oder auch die Wirkung von Einfluss- und Störgrößen auf das Prüfergebnis simulativ abgeprüft werden. Auswertelgorithmen können bspw. bezüglich ihrer Eignung untersucht werden sowie Anregungs- und Signalanalysetechniken angepasst oder weiterentwickelt werden. Durch

die enge Kopplung von Simulation und Experiment können Aspekte der virtuellen Analyse auf die spezifischen Prüfprobleme übertragen werden, so dass kurzfristig und ohne großen experimentellen Aufwand Prinzipaussagen verfügbar sind. Anhand der *Applikation Widerstandsschweißpunkt* wurde exemplarisch die Anwendung der virtuellen Thermografieprüfung gezeigt und die Vorteile herausgestellt. Äquivalente Vorgehen können für neue Anwendungen übernommen werden, wie z.B. für die Untersuchung der Prüfung von Karosserie-Klebeverbindungen.

Die aufgebaute Ingenieurplattform für Thermografieanwendungen bietet dem Anwender eine umfassende Unterstützung, neuartige Prüflösungen schnell und kostengünstig in die Prozesse einzubringen. Einzelne Schritte, die bei Umsetzungen erforderlich sind, werden mit den entwickelten Werkzeugen wirtschaftlicher gestaltet.

Literaturverzeichnis

- [ABB⁺99] AUDI, BMW, BOSCH, DAIMLERCHRYSLER, FIAT, FORD, OPEL, Q-DAS, TQM ITACA und VOLKSWAGEN: *Leitfaden der Automobilindustrie zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen*. Q-DAS GmbH (Leiter des Arbeitskreises), 2.0 D/E Auflage, 1999.
- [ADG⁺05] ADERHOLD, J., G. DOBMAN, M. GOLDAMMER, T. HIERL, V. MÄRGNER, P. MEINLSCHMIDT, U. NETZELMANN, T. NIEDERREITER, C. REUSS, R. SCHACHT und J. ZETTNER: *Grundlagen der Online-Thermografie*. In: FRAUNHOFER-ALLIANZ VISION (Herausgeber): *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie. Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*, Seiten 5–7. 2005.
- [AL94] ALMOND, D.P. und S.K. LAU: *Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment*. *Journal of Applied Physics*, 27: Seiten 1063–1069, 1994.
- [Alb01] ALBERTZ, J.: *Einführung in die Fernerkundung*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 2. Auflage, 2001.
- [ALvA⁺08] AUGNER, R., K.A. LOTH, R. v. AMSTERDAM, K. HARSCH, H. KRAUTER und G. MAIER: *Schweißverbindungsprüfung im Automobilbau - Entwicklung, Erprobung und Serienanwendung eines mobilen Ultraschall-Miniscanners*. In: *DACH-Jahrestagungsband*, St. Gallen, 2008.
- [Ang53] ANGSTRÖM, A.J.: *Einige Beobachtungen in Betreff der Wärme und deren Theorie*. *Annalen der Physik*, 164: Seiten 165–171, 1853.
- [AP96] ALMOND, D.P. und P. PATEL: *Photothermal Science and Techniques*. Chapman & Hall, 1. Auflage, 1996.
- [ASQ06] ACHMUS, C., U. SIEMER und M. QUOLL: *Qualitätsüberwachung geschäumter Instrumententafeln*. In: *Tagungsband Internationaler Kongress Kunststoffe im Automobilbau (VDI Kunststofftechnik)*, Mannheim, 2006.
- [BICL⁺06] BENITEZ, H., C. IBARRA-CASTANEDO, H. LOAIZA, E. CAICEDO, A. BENDADA und X. MALDAGUE: *Defect Quantification with Thermographic Signal Reconstruction and Artificial Neural Networks*. In: *Proceedings of 8th*

- Conference on Quantitative InfraRed Thermography QIRT*, Padova, Italien, 2006.
- [Bil05] BILGRAM, R.: *Signalerzeugung bei der ultraschallinduzierten Thermografie (Numerische Modellierung)*. In: *DGZfP-Berichtsband zum BMBF-Projekt Kombitherm - Aktive Thermografie: Fortschritte und neue Möglichkeiten - BB 92-CD*, Saarbrücken, 2005.
- [BK98] BORGELT, C. und R. KRUSE: *Attributauswahlmaße für die Induktion von Entscheidungsbäumen: Ein Überblick*. In: NAKHEIZADEH, G. (Herausgeber): *Data Mining: Theorie und Anwendungen*, Seiten 77–98. Physica-Verlag, 1998.
- [BKC86] BALAGEAS, D.L., J.C. KRAPEZ und P. CIELO: *Pulsed photothermal modeling of layered materials*. *Journal of Applied Physics*, 59/2: Seiten 348–357, 1986.
- [BMN04] BAUER, N., P. MEINLSCHMIDT und U. NETZELMANN: *Wärmefluss-Thermographie-Systeme - Allrounder für Inneres. Qualität und Zuverlässigkeit*, 5(49): Seiten 126–128, 2004.
- [BNDG04] BENDADA, A., N. NARDINI und C. DE-GRANDPRÉ: *Evaluation of internal thermal gradients from surface thermography measurements: application to process control*. In: *Proceedings 16th World Conference on Non Destructive Testing WCNDT*, Montreal, Canada, 2004.
- [BNZ05] BAMBERG, J., S. NEUHÄUSLER und G. ZENZINGER: *Induktions-Thermografie - Ein innovatives Rissprüfverfahren*. In: *DGZfP-Thermografie-Kolloquium Berichtsband BB 98-CD*, Stuttgart, 2005.
- [Bor97] BORGELT, C.: *Einführung in Datenanalyse und Data Mining mit intelligenten Technologien*. In: MIT GMBH (Herausgeber): *Seminarband Anwendungen in Datenanalyse und Data Mining*, 1997.
- [Bus05] BUSSE, G.: *Kunststoffprüfung*. Hanser Verlag, 2005.
- [BWK92] BUSSE, G., D. WU und W. KARPEN: *Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography*. *Journal of Applied Physics*, 71(8): Seiten 3962–3965, 1992.
- [Car] CARL INFRAROT MESSTECHNIK UND PRÜFSYSTEME (T-ZFP): *Firmendarstellung (Homepage)*. <http://www.t-zfp.de/html/simulation.html> [2008-11-12].
- [CJ59] CARSLAW, H.S. und J.C. JAEGER: *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, 1959.

- [CS93] CLAUS, V. und A. SCHWILL: *Duden Informatik*, Band 2. Dudenverlag, 1993.
- [CZ05] CARL, V. und G. ZENZINGER: *Signalerzeugung bei der Induktionsthermografie*. In: *DGZfP-Berichtsband zum BMBF-Projekt Kombitherm - Aktive Thermografie: Fortschritte und neue Möglichkeiten - BB 92-CD*, Saarbrücken, 2005.
- [Dai00] DAIMLER-CHRYSLER CORPORATION, FORD MOTOR COMPANY, GENERAL MOTORS CORPORATION: *QS-9000 Forderungen an Qualitätsmanagementsysteme*. International Automotive Sector Group, 2000.
- [DB01] DILLENZ, A. und G. BUSSE: *Ultraschall Burst-Phasen-Thermografie*. In: *DGZfP-Jahrestagungsband BB 75-CD*, Berlin, 2001.
- [Deu95] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 1319-1 Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*. Beuth Verlag, 1995.
- [Deu96] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 1319-3 Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*. Beuth Verlag, 1996.
- [Deu99a] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 1319-4 Grundlagen der Meßtechnik - Teil 4: Auswertung von Messungen; Meßunsicherheit*. Beuth Verlag, 1999.
- [Deu99b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 14253-1 Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen*. Beuth Verlag, 1999.
- [Deu99c] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN V ENV 10005 (GUM) Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. Beuth Verlag, 1999.
- [Deu04a] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 54190-1 Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen*. Beuth Verlag, 2004.
- [Deu04b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 10012 Messmanagementsysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel*. Beuth Verlag, 2004.
- [Deu04c] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN-Fachbericht CEN/TR 14748 - Zerstörungsfreie Prüfung - Vorgehensweise zur Qualifizierung von zerstörungsfreien Prüfungen*. Beuth Verlag, 2004.
- [Deu05a] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 1319-2 Grundlagen der Meßtechnik - Teil 2: Begriffe für Messmittel*. Beuth Verlag, 2005.

- [Deu05b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 54190-2 Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 2: Geräte*. Beuth Verlag, 2005.
- [Deu05c] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 9000:2005 Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Beuth Verlag, 2005.
- [Deu05d] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO/IEC 17025:2005-08 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005)*. Beuth Verlag, 2005.
- [Deu06a] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 54190-3 Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 3: Begriffe*. Beuth Verlag, 2006.
- [Deu06b] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 10268:2006-10 Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10268:2006*. Beuth Verlag, 2006.
- [Deu06c] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 15042-2:2006 Schichtdickenmessung und Charakterisierung von Oberflächen mittels Oberflächenwellen - Teil 2: Leitfaden zur photothermischen Schichtdickenmessung*. Beuth Verlag, 2006.
- [Deu07] DEUTSCHES PATENT- UND MARKENAMT: *Gebrauchsmusterschrift DE 20 2006 016 452 U1 - Vorrichtung zum Prüfen von Fügeverbindungen auf innere Fehler und/oder Oberflächenfehler mittels Thermografie*. INPRO Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, Berlin, 2007.
- [Deu08] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 9001:2008 Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*. Beuth Verlag, 2008.
- [DFG02] DAIMLER CHRYSLER, FORD und GENERAL MOTORS: *MSA - Measurement System Analysis (Manual for the use by a supplier to develop data responding to the requirements of assessment systems)*, 3. Auflage, 2002.
- [DGZ99] DGZFP-FACHAUSSCHUSS THERMOGRAPHIE: *Merkblatt TH1 - Charakterisierung von Thermographiesystemen*, 1999.
- [Eme] EMERSON INDUSTRIAL AUTOMATION: *Branson Ultrasonic Welding - Technology & Standard System*. <http://www.bransoneurope.eu/products/ultrasonic-welding> [2009-10-01].
- [Eur08] EUROPÄISCHES PATENTAMT: *European Patent Application EP 1 914 542 A1 - Method and device for checking joint connections on components for internal faults and/or surface faults by means of thermography*. Strohmeyer, R. and S. Plath, 2008.

- [Exa] EXAIR CORP: *Wirbelrohre und punktuelle Kühler (Produktinformation und -katalog)*. <http://eputec.exair.com/spotcooling/vtpage.php> [2007-12-01].
- [FA] FLIR SYSTEMS AB und AUTOMATION TECHNOLOGY: *Datenblatt Infrarotkamera ThermaCAMTM SC3000*. http://www.automationtechnology.de/cms/uploads/media/Prospekt_SC3000_de_AT.pdf [2009-02-10].
- [FH98] FAVRO, L.D. und X. HAN: *Thermal wave material characterization and thermal wave imaging*, Band 1. ASNT TONES, 1998.
- [Flia] FLIR SYSTEMS AB: *Datenblatt Infrarotkamera ThermaVisionTM SC6000 HS*. http://www.flir-press.com/scseries/pdf/scseries_brochure_de.pdf [2009-08-19].
- [Flib] FLIR SYSTEMS AB: *Datenblatt Infrarotkamera ThermaVisionTM SC8000 HS*. <http://www.flir.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=19962> [2007-11-09].
- [Flic] FLIR SYSTEMS AB: *Infrarotkameras (Produktkatalog)*. <http://www.flir.com/thermography/eurasia/de/products/?id=11474> [2008-06-15].
- [Fou26] FOURIER, J.: *Théorie du mouvement de la chaleur dans les corps solides - 1ère Partie*, Band 4, 5 der Reihe *Mémoires de l'Académie des Sciences*. 1824, 1826.
- [GB02] GOLDAMMER, M. und J. BAUMANN: *Analytical Modeling of Flash Thermography: Results for a Layered Sample*. Proceedings of SPIE, 4703(211): Seiten 211–218, 2002.
- [GE] GE CONSUMER & INDUSTRIAL LIGHTING: *PAR Lamps (Produktkatalog)*. <http://www.gelighting.com/EULCTLG/Dispatcher?REQUEST=GETALLPRODUCTS&Site=de&MarketCode=UF&CountryCode=EN&category=SS&text=Showbiz&subcat=SS050> [2008-08-12].
- [GH06] GOLDAMMER, M. und W. HEINRICH: *Active Thermography for Dimensional Measurements on Gas Turbine Components*. In: *Proceedings of European Conference of non-destructive Testing ECNDT*, Berlin, 2006.
- [HENa] HENSEL STUDIOTECHNIK GMBH & CO. KG: *Bedienungsanleitung TRIA S Generatoren*. http://www.henselusa.com/content/tria_manual.pdf [2009-05-25].
- [HENb] HENSEL STUDIOTECHNIK GMBH & CO. KG: *Generatoren, Lichtformer und Blitzköpfe (Produktkatalog)*. <http://www.hensel.eu/PRODUKTE/22-de.html> [2009-07-25].

- [Her] HERAEUS NOBLELIGHT GMBH: *Infrarot-Strahler für industrielle Prozesse (Produktkatalog)*. <http://www.heraeus-noblelight.com/de/infrarot-waerme/informationen-ueber-infrarot-waerme/produkte.html> [2009-03-07].
- [Hie05] HIERL, T. UND HEINRICH, W.: *Automatisierte Prüfanlage für Turbinenschaukeln*. In: *DGZfP-Berichtsband zum BMBF-Projekt Kombitherm - Aktive Thermografie: Fortschritte und neue Möglichkeiten - BB 92-CD*, Saarbrücken, 2005.
- [Hof08] HOFMANN, G.: *Ungekühlte Infrarotkameras zur berührungslosen Temperaturmessung*. DIAS Infrared GmbH Publikationen, 21, 2008.
- [Hom07] HOMMA, C.: *Untersuchungen zu Mechanismus und technischer Umsetzung der akustischen Thermographie*. Doktorarbeit, Universität des Saarlandes, 2007.
- [Hüt] HÜTTINGER ELEKTRONICS GMBH & CO. KG: *Produktinformation Induktionserwärmung*. <http://www.huettinger.com/produkte/induktionserwaermung.html> [2009-03-01].
- [HZS⁺03] HEINRICH, W., J. ZETTNER, O. SCHREER, B. SPELLENBERG, C. PEPPERMÜLLER, T. HIERL und M. GOLDAMMER: *Automatisiertes System zur thermografischen Prüfung von Gasturbinenschaukeln*. In: *DGZfP-Jahrestagungsband BB 83-CD*, Mainz, 2003.
- [IC05] IBARRA-CASTANEDO, C.: *Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography. depth retrieval with the phased*. Doktorarbeit, Université Laval, 2005.
- [IDW02] INCROPERA, D.P. und D.P. DE WITT: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John-Wiley & Sons, 5. Auflage, 2002.
- [IMA] IMA GMBH DRESDEN: *WIAM - Werkstoffinformation und Auswahl Metalle (Werkstoffinformations- & Managementsystem)*. www.wiam.de [2008-12-01].
- [INF] INFRATEC INFRAROT STRAHLER GMBH: *Infrarotstrahler elektrisch für den kurz,- mittel,- und langwelligen Bereich (Produktkatalog)*. <http://www.infratec.com> [2009-03-07].
- [Ish76] ISHIKAWA, KAORU: *Guide to quality control*. Asian Productivity Organization, Tokyo, 1976.
- [ITA02] ITAF INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE: VDA (VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE), QMC (QUALITÄTS MANAGEMENT CENTER): *ISO/TS 16949 Qualitätsmanagementsysteme - Besondere Anforder-*

rungen bei Anwendung von ISO 9001:2000 für die Serien- und Ersatzteil-Produktion in der Automobilindustrie, 2. Auflage, 2002.

- [KB03] KAMISKE, GERD F. und JÖRG-PETER BRAUER: *Qualitätsmanagement von A bis Z*. Carl Hanser Verlag, 2003.
- [Kle03] KLEIN, B.: *FEM Grundlagen und Anwendungen der Finite Elemente Methode*. Vieweg Verlag, 2003.
- [KNJ03] KARPEN, W., U. NETZELMANN und M. JÖCHEN: *Verbesserte Fehlercharakterisierung bei Pulsthermographie durch numerische Simulation*. In: *DGZfP-Thermografie-Kolloquium Berichtsband BB 86-CD*, Stuttgart, 2003.
- [Kob] KOBOLD LICHT BELEUCHTUNGSTECHNIK GMBH: *Halogen Netzleuchten (Produktprospekt)*. http://www.bronkobold.de/Upload/docs/prospekt_halogen.pdf [2008-08-12].
- [KW08] KNOTHE, K. und H. WESSELS: *Finite Elemente - Eine Einführung für Ingenieure*. Springer Verlag, 2008.
- [LNS04] LEWIS, R.W., P. NITHIARASU und K.N. SEETHARAMU: *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. John Wiley and Sons Ltd, 2004.
- [LWG02] LIU, H., L. WANG und G. GOCH: *Simulation photothermischer Signale von Schichtsystemen*. In: BECKER, W.-J. und W. HOLZAPFEL (Herausgeber): *Tagungsband XVI. Messtechnisches Symposium des AHMT e.V.*, Kassel, 2002.
- [Mal93] MALDAGUE, X.P.V.: *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*, Band 207. Springer Verlag, 1993.
- [Mal00] MALDAGUE, X.P.V.: *Applications of Infrared Thermography in Nondestructive Evaluation (Invited Chapter)*. In: RASTOGI, P. und D. INAUDI (Herausgeber): *Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection*, Seiten 591– 609. Elsevier Science, 2000.
- [Mal01] MALDAGUE, X.P.V.: *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. Wiley Series in Microwave and optical Engineering. John Wiley & Sons, Inc., Electrical and Computing Engineering Department Université Laval, 2001.
- [Mal02] MALDAGUE, X.P.V.: *Introduction to NDT by Active Infrared Thermography*. Materials Evaluation, 2002.
- [Mar06] MARINETTI, S.: *Archetypes and principal components of an IR image sequence*. Infrared Physics & Technology, 2006.

- [MG97] MÜLLER, G. und C. GROTH: *FEM für Praktiker , Band 1 - Grundlagen*. Expert Verlag, 1997.
- [MGB⁺04] MARINETTI, S., E. GRINZATO, P.G. BISON, E. BOZZI, M. CHIMENTI, G. PIERI und O. SALVETTI: *Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA*. Infrared Physics & Technology, 46: Seiten 85–91, 2004.
- [MGS03] MARTIN, R.E., A.L. GYEKENYESI und S.M. SHEPARD: *Interpreting the Results of Pulsed Thermography Data*. Materials Evaluation, 61(5): Seiten 611–616, 2003.
- [MGZ02] MALDAGUE, X.P.V., F. GALMICHEA und A. ZIADIA: *Advances in Pulsed Phase Thermography*. Infrared Physics & Technology, 43: Seiten 175–181, 2002.
- [MM96] MALDAGUE, X.P.V. und S. MARINETTI: *Pulse Phase Infrared Thermography*. Journal of Applied Physics, 79/5: Seiten 2694–2698, 1996.
- [MN07] MAREK, R. und K. NITSCHKE: *Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen-Anwendungen- Übungsaufgaben*. Hanser Verlag, 2007.
- [MNVW98] MEYENDORF, N., U. NETZELMANN, T. VETTERLEIN und G. WALLE: *Zerstörungsfreie Schichtcharakterisierung mit thermographischen Verfahren*. Galvaotechnik, 89: Seiten 1500–1505, 1998.
- [MPWB99] MARINETTI, S., Y.A. PLOTNIKOV, W.P. WINFREE und A. BRAGGIOTTI: *Pulse Phase Thermography for Defect Detection and Visualization*. Proceedings of SPIE, 3586: Seiten 230–238, 1999.
- [MTD] MTD MEDIEN-TECHNIK DUWE: *Mechanik Technik Dienstleistungen: Service- und Instandsetzungsbetriebe für event-, theater- und filmtechnisches Equipment (Homepage)*. http://www.123mtd.de/index.php?option=com_content&task=view&id=28&Itemid=45 [2008-08-12].
- [NAW05] NETZELMANN, U., M. ABUHAMAD und G. WALLE: *Ultraschallinduzierte Thermographie: Einsatzmöglichkeiten, Zerstörungsfreiheit*. In: DGZfP-Berichtsband zum BMBF-Projekt Kombitherm - Aktive Thermografie: Fortschritte und neue Möglichkeiten - BB 92-CD, Saarbrücken, 2005.
- [Net05] NETZELMANN, U.: *Moderne Thermographieverfahren - Impuls- und Lock-In-Thermographie*. In: FRAUNHOFER-ALLIANZ VISION (Herausgeber): *Leitfaden zur Wärmefluss-Thermographie. Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*, Seiten 8–11. 2005.
- [NWK04] NETZELMANN, U., G. WALLE und W. KARPEN: *Algorithmik zur Auswertung von Thermographiebildern bei der Lock-In und Impuls-Thermographie*.

In: *Seminarband Wärmefluss-Thermographie als zerstörungsfreies Prüfverfahren für die Qualitätssicherung in der Produktion*, Braunschweig, 2004.

- [NWKM99] NETZELMANN, U., G. WALLE, W. KARPEN und N. MEYENDORF: *Impulsthermographie mit hoher Orts- und Zeitauflösung*. In: *Tagungsband DGZfP-Thermographie-Kolloquium*, 1999. Stuttgart.
- [OT08] OSWALD-TRANTA, B.: *Thermo-induktive Prüfung von metallischen Teilen*. In: *DGZfP DACH-Jahrestagungsband*, St. Gallen, 2008.
- [OTWO06] OSWALD-TRANTA, B., G. WALLY und J. OSWALD: *A semi-analytical model for the temperature distribution of thermo-inductive heating*. In: *Proceedings of 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography QIRT*, Padova, Italien, 2006.
- [PW97] PLOTNIKOV, Y.A. und W.P. WINFREE: *Thermographic Imaging of Defects in Anisotropic Composites*. In: *Proceedings of 24th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1997.
- [PW98] PLOTNIKOV, W. und W.P. WINFREE: *Advanced Image Processing for Defect Visualization in Infrared Thermography*. *Proceedings of SPIE*, 3361(331): Seiten 331–338, 1998.
- [RB04] RIEGERT, G. und G. BUSSE: *Induktions-Lockin-Thermografie - ILT - Ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung*. *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung*, 46: Seiten 33–35, 2004.
- [RG76] ROSENCAWIG, A. und A. GERSHO: *Theory of the photoacoustic effect with solids*. *Journal of Applied Physics*, 47: Seiten 64–69, 1976.
- [Rie06] RIEGERT, G. UND BUSSE, G.: *Induction-Lockin-Thermography and Induction-Burst-Phase Thermography for NDE*. In: *Proceedings of 8th Conference on Quantitative InfraRed Thermography QIRT*, Padova, Italien, 2006.
- [Rie07] RIEGERT, G.: *Induktions-Lockin-Thermografie - ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung*. Doktorarbeit, Institut für Kunststofftechnik an der Universität Stuttgart, 2007.
- [RZDB04] RIEGERT, G., T. ZWESCHPER, A. DILLENZ und G. BUSSE: *Wirbelstromangeregte Lockin-Thermografie - Prinzip und Anwendungen*. In: *DGZfP DACH-Jahrestagungsband*, Salzburg, 2004.
- [SA95] SAINTÉY, M.B. und D.P. ALMOND: *Defect sizing by transient thermography. II. A numerical treatment*. *Journal of Applied Physics*, 28: Seiten 2539–2546, 1995.

- [SA05] SIEMER, U. und C. ACHMUS: *Einsatz thermografischer Prüfungen in der Automobilindustrie*. In: GRELLMANN, W. (Herausgeber): *Herausforderungen neuer Werkstoffe an die Forschung und Werkstoffprüfung (Tagungsband Werkstoffprüfung 2005)*, DVM Bericht 641, Seiten 521–526, Berlin, 2005.
- [SBIC⁺06] SUSA, M., H. BENITEZ, C. IBARRA-CASTANEDO, H. LOAIZA, A. BENDADA und X.P.V. MALDAGUE: *Phase contrast using Differential Absolute Contrast Method*. In: *Proceedings of 8th Conference on Quantitative Infra-Red Thermography QIRT*, Padova, Italien, 2006.
- [SCPZ98] SHEPARD, S.M., B. CHAUDHRY, R. PREDMESKY und M. ZALUZEC: *Pulsed thermographic inspection of spot welds*. *Proceedings of SPIE*, 3361(320): Seiten 320–324, 1998.
- [She01] SHEPARD, S.M.: *Advances in Pulsed Thermography*. *Proceedings of SPIE*, 4360(511): Seiten 511–515, 2001.
- [SHL04] SHEPARD, S.M., Y. HOU und J.R. LHOTA: *Quantitative characterization of thermographic sequence data*. In: *Proceedings 16th World Conference on NDT*, Montreal, Canada, 2004.
- [SHLA05] SHEPARD, S., Y. HOU, J. LHOTA und TASDIQ. AHMED: *Quantitative Comparison of Thermographic Data Sequences*. *Materials Evaluation*, 63(7): Seiten 740–745, 2005.
- [Sie06a] SIEMER, U.: *Simulation and Evaluation of New Thermographic Techniques for the Deployment in the Automotive Industry*. In: *Proceedings of European Conference of non-destructive Testing ECNDT*, Berlin, 2006.
- [Sie06b] SIEMER, U.: *Simulation and Evaluation of Pulsed Phase Thermography for the Quality Control of Resistance Spot Welds*. In: *Proceedings of 8th Conference on Quantitative Infra-Red Thermography QIRT*, Padova, Italien, 2006.
- [SM00] SATONAKA, S. und K. MATSUYAMA: *Review on Inspection Techniques for Spot Welds*. *Welding in the World*, 44-3: Seiten 29–36, 2000.
- [STE] STEINEL VERTRIEB GMBH: *Thermo-Werkzeuge für Fachkunden (Produktkatalog)*. http://www.steinel.de/de/thermo_fuer_fachkunden/heissluftgeblaese [2007-12-01].
- [Taf08] TAFFE, A.: *Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel Laufzeitmessung*. Doktorarbeit, Fakultät Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen, 2008.
- [THR03] TÜRLER, D., D. HOPKINS und F. REVERDY: *Nondestructive Evaluation of Spot Welds Using Acoustic and Thermographic Imaging Techniques*. In: *Proceedings SAE World Congress*, Detroit, 2003.

- [Vav98] VAVILOV, V.: *ThermoCalc-3D PRO - User Manual - The software for computing 3D dynamic temperature distributions in anisotropic layered solids with subsurface defects*, 1998.
- [Ver03] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E. V.: *VDA Band 5: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Prüfprozesseignung*, 2003.
- [Ver06] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E. V.: *VDA Band 6: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - QM-Systemaudit - Teil 1 Materielle Produkte*, 2006.
- [VG05] VRANA, J. und M. GOLDAMMER: *Induktionsthermographie*. In: *DGZfP-Berichtsband zum BMBF-Projekt Kombitherm - Aktive Thermografie: Fortschritte und neue Möglichkeiten - BB 92-CD*, Saarbrücken, 2005.
- [Vol04] VOLKSWAGEN AG: *PV6702: Punktschweißverbindungen, Festigkeitsprüfung Stahlwerkstoffe (Konzernnorm der Volkswagen AG)*, 2004.
- [Vol07] VOLKSWAGEN AG: *VW 01105-1 : Widerstandspunktschweißen, Konstruktion, Berechnung - Unbeschichtete und beschichtete Stahlbleche (Konzernnorm der Volkswagen AG)*, 2007.
- [Vra08] VRANA, J.: *Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung - Induktions- und Konduktionsthermographie*. Doktorarbeit, Universität des Saarlandes, 2008.
- [Vre03] VRETBLAD, A.: *Fourier Analysis and Its Applications*, Band 223 der Reihe *Graduate Texts in Mathematics*. Springer Verlag, 2003.
- [VV95] VERBAND DER INGENIEURE E.V. und VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V.: *VDI/VDE 3511 Technische Temperaturmessungen - Blatt 4: Strahlungsthermometrie*, 1995.
- [VV96] VERBAND DER INGENIEURE E.V. und VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V.: *VDI/VDE 3511 Technische Temperaturmessungen - Blatt 1: Grundlagen und Übersicht über besondere Temperaturmeßverfahren*, 1996.
- [VV01] VERBAND DER INGENIEURE E.V. und VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V.: *VDI/VDE 3511 Technische Temperaturmessungen - Blatt 4.1: Spezifikation von Strahlungsthermometern*, 2001.
- [VV05a] VERBAND DER INGENIEURE E.V. und VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V.: *VDI/VDE 3511 Technische Temperaturmessungen - Blatt 4.3: Strahlungsthermometrie - Kalibrierung von Strahlungsthermometern*, 2005.

- [VV05b] VERBAND DER INGENIEURE E.V. und VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V.: *VDI/VDE 3511 Technische Temperaturmessungen - Blatt 4.3: Strahlungsthermometrie - Standard-Test-Methoden für Strahlungsthermometer mit einem Wellenlängenbereich*, 2005.
- [Wa194] WALLE, G.: *Impuls-Video-Thermographie*. Materialprüfung, 36: Seiten 86–88, 1994.
- [WDMN93] WALLE, G., G. DOBMANN, N. MEYENDORF und U. NETZELMANN: *Impuls-Video-Thermografie - ein leistungsfähiges Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung neuer Werkstoffe*. In: *60 Jahre DGZfP - Erfahrungen und Nutzen für Europa (Seminarband DGZfP-Jubiläumstagung zerstörungsfreie Materialprüfung)*, Garmisch-Partenkirchen, 1993.
- [Wes99] WESSEL, H.: *.....IERUNGEN - Begriffe der Qualitätssicherung (Teil 3)*. DGZfP Dach-Zeitung, 65, 1999.
- [Wou07a] WOUTERS, R.: *Heißer Tipp für weniger Schrott*. Produktion (Technik - Trends und Reports), 29, 2007.
- [Wou07b] WOUTERS, R.: *Neue Anwendungen für weiterentwickelte Verfahren*. Produktion (Technik - Lösungen für die Produktion), 49, 2007.
- [WS08a] WANDELT, M. und P. SMORSCEK: *Blick unter die Oberfläche*. Bildverarbeitung & Identtechnik, Seiten 130–132, 2008.
- [WS08b] WANDELT, M. und P. SMORSCEK: *Infrarotkameras in der Automobilindustrie*. 3. Wiley-VCH Verlag, 2008.
- [Wu96] WU, M. SC. DATONG: *Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*. Doktorarbeit, Technische Universität Stuttgart, 1996.
- [WZSB98] WU, D., T. ZWESCHPER, A. SALERNO und G. BUSSE: *Lock-in Thermography for Nondestructive Evaluation of Aerospace Structures*. In: *Proceedings of European Conference of non-destructive Testing ECNDT*, Copenhagen, 1998.
- [ZBD04] ZENZINGER, G., J. BAMBERG und M. DUMM: *EddyTherm - ein Rissprüfverfahren vor der Serienreife*. ZfP-Zeitung, 91: Seiten 39–42, 2004.
- [Zie71] ZIENKIEWICZ, O.C.: *The Finite Element Method in Engineering Science*. McGRAW-HILL Publishing Company Limited, 1971.
- [ZSH⁺03] ZETTNER, J., B. SPELLENBERG, T. HIERL, M. HALLER und T. LENZI: *Wärmefluss-Prüfung zur Qualitätssicherung von Schweißverbindungen in der Automobilindustrie*. In: *DGZfP-Berichtsband Thermografie-Kolloquium BB 86-CD*, Seiten 63–74, 2003.

- [Zwe00] ZWESCHPER, T.: *Zerstörungsfreie und berührungslose Charakterisierung von Fügeverbindungen mittels Lockin Thermografie*. ZfP-Zeitung, 71: Seiten 43–46, 2000.

A Normative Anforderungen an Prüfverfahren im Qualitätsmanagement

Ein QM-System ist eine Organisationsstruktur, mit Hilfe derer die Qualitätsfähigkeit von Unternehmen beschrieben werden kann. Die Ausrichtung nach gewissen Grundsätzen zielt darauf ab, die Abläufe eines Unternehmens zukunftssicher zu gestalten. gleichermaßen stellt die ständige Leistungsverbesserung ein permanentes Ziel derartiger Organisationsstrukturen dar.

Kunden verlangen Produkte mit Merkmalen, die ihre Erfordernisse und Erwartungen erfüllen. Ein etabliertes QM-System gibt der Organisation und ihren Kunden das Vertrauen, dass diese fähig ist, ständig den Anforderungen entsprechende Produkte bereitzustellen. Qualitätsmanagementsysteme können Organisationen beim Erhöhen der Kundenzufriedenheit unterstützen.

Die EN ISO 9000- Normreihe (EN ISO 9000:2000 ff.) schafft eine Basis, Maßnahmen zum Qualitätsmanagement zu dokumentieren. Außerdem dient sie dazu, Abläufe transparenter zu machen und das gegenseitige Verständnis (auf nationaler und internationaler Ebene) zu erleichtern. Abbildung A.1 zeigt das übergeordnete QM-Prozessmodell nach DIN EN ISO 9001, welches ein prozessorientiertes Zusammenwirken der einzelnen Hauptaugenmerke in den Normen zeigt.

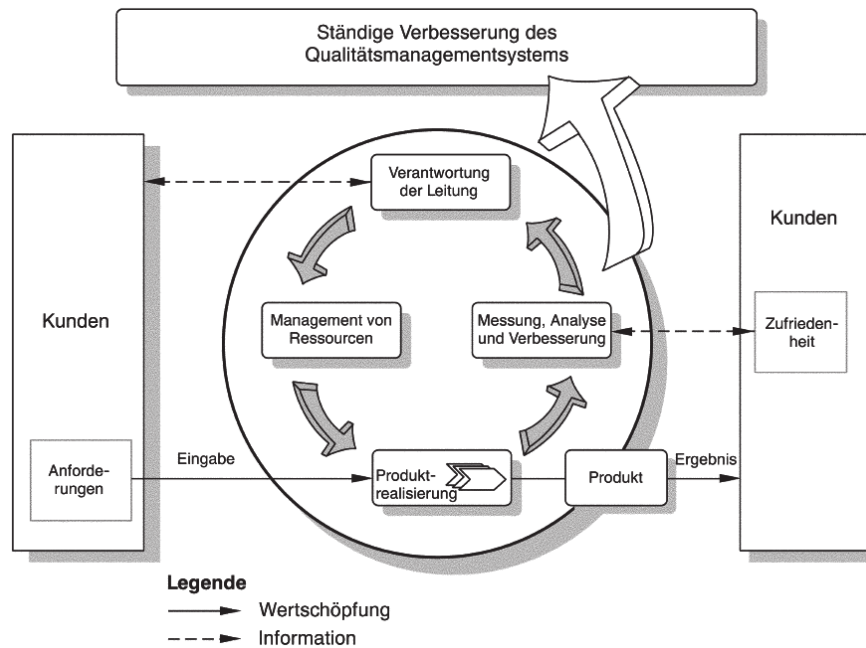


Abbildung A.1: QM Prozessmodell nach DIN EN ISO 9001 [Deu08]

Anforderungen an Prüfverfahren lassen sich darin zunächst jedoch nur abstrakt erkennen. Sie sind in den beschriebenen Elementen sehr allgemein gehalten.

DIN EN ISO 9000

„Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe“

... beschreibt Grundlagen für Qualitätsmanagementsysteme und legt die Terminologie für Qualitätsmanagementsysteme fest.¹

Forderungen an eingesetzte Prüfsysteme verbergen sich hinter einzelnen Teilaspekten, die für die Entwicklung eines QM-Systems nach DIN EN ISO 9000:2005 [Deu05c] gefordert werden. Vor allem sind in der Norm wichtige Definitionen enthalten, die im Kontext des Einsatzes von Mess- und Prüfmitteln stehen:

QUALITÄTSBEZOGENE BEGRIFFE

Qualität Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt

Fähigkeit Eignung einer Organisation, eines Systems oder Prozesses zum Realisieren eines Produkts, das die Anforderungen an dieses erfüllen wird

¹aus Einleitung DIN EN ISO 9000

MERKMALSBEZOGENE BEGRIFFE

Merkmal kennzeichnende Eigenschaft

Qualitätsmerkmal inhärentes Merkmal eines Produkts, Prozesses oder Systems, das sich auf eine Anforderung bezieht

KONFORMITÄTSBEZOGENE BEGRIFFE

Konformität Erfüllung einer Anforderung

Fehler Nichterfüllung einer Anforderung

Mangel Nichterfüllung einer Anforderung in Bezug auf einen beabsichtigten oder festgelegten Gebrauch

DOKUMENTATIONSBEZOGENE BEGRIFFE

Spezifikation Dokument, das Anforderungen festlegt

UNTERSUCHUNGSBEZOGENE BEGRIFFE

Prüfung; Inspektion Konformitätsbewertung durch Beobachten und Beurteilen, begleitet - soweit zutreffend - durch Messen, Testen oder Vergleichen

Verifizierung Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind

Validierung Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind

Qualifizierungsprozess Prozess zur Darlegung der Eignung, festgelegte Anforderungen zu erfüllen

Bewertung Tätigkeit zur Ermittlung der Eignung, Angemessenheit und Wirksamkeit der Betrachtungseinheit, festgelegte Ziele zu erreichen

AUF QUALITÄTSMANAGEMENT BEI MESSPROZESSEN BEZOGENE BEGRIFFE

Messprozess Satz von Tätigkeiten zur Ermittlung eines Größenwertes

Metrologische Bestätigung Satz von notwendigen Tätigkeiten, um sicherzustellen, dass ein Messmittel die Anforderungen an seinen beabsichtigten Gebrauch erfüllt

DIN EN ISO 9001

„Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen“

... legt die Anforderungen an ein Qualitätsmanagementsystem für den Fall fest, dass eine Organisation ihre Fähigkeit darlegen muss, Produkte bereitzustellen, die die Anforderungen der Kunden [...] erfüllen, und anstrebt, die Kundenzufriedenheit zu erhöhen.²

Die DIN EN ISO 9001:2000 [Deu08] beschreibt modellhaft die Basis für ein umfassendes Qualitätsmanagementsystem. Sie hilft Unternehmen, ihre Abläufe effizient zu gestalten, indem diese prozess- und kundenorientiert ausgerichtet werden. Es werden die im Folgenden genannten Prozesse (Vorgänge) betrachtet und dabei jeweils Eingabe mit Ausgabe verglichen:

Kapitel 5 - Verantwortung der Leitung

Kapitel 6 - Management von Ressourcen

Kapitel 7 - Produktrealisierung

Kapitel 8 - Messung, Analyse und Verbesserung

Konkret für Prüfprozesse ist in „Kapitel 7 - Produktrealisierung“ gefordert, dass Überwachungs- und Messmittel, die für den Nachweis der Konformität des Produkts mit festgelegten Anforderungen eingesetzt sind, in einer Weise benutzt werden, die mit den Anforderungen an die Überwachung und Messung vereinbar ist. Soweit erforderlich muß die Messmittelkalibrierung geregelt werden. Die Rückführung der Messmittel auf Messnormale ist Grundlage für die Kalibrierung oder Verifizierung. Zur weiteren Anleitung erfolgt ein undatierter Verweis auf die ISO 10012 (-1/-2).

ISO/TS 16949

„Forderungen an Qualitätsmanagementsysteme“

... ist eine spezielle Anpassung des DIN-EN-ISO-9001-Systems an die Forderungen der Automobilindustrie.

Das Ziel der ISO/TS 16949 [ITA02] ist, grundlegende Qualitätsmanagementsysteme so zu entwickeln, dass eine kontinuierliche Verbesserung sichergestellt wird, Fehlervermeidung gefördert und Prozeßfähigkeit in der Wertschöpfungskette verstärkt wird. Die ISO/TS 16949 ist umfassender und strenger als die DIN EN ISO 9001. Überwachungen erfolgen halbjährlich und an jedem Standort. Drei Schwerpunkte sind besonders hervor gehoben:

²aus Einleitung DIN EN ISO 9000

-
1. ständige Verbesserung;
 2. gläserner Lieferant;
 3. Produktionsteilabnahmeverfahren.

Anforderungen an eingesetzte Prüfmittel sind der Elementbeschreibung Prüfmittelüberwachung zu entnehmen. Bezüglich der Untersuchung von Meßsystemen ist gefordert, angemessene statistische Untersuchungen zur Beurteilung von Meßsystemen und Prüfeinrichtungen durchzuführen. Die dabei angewendeten analytischen Methoden und Annahmekriterien sollten mit denen in dem Leitfaden „Measurement System Analysis (MSA)/ Fähigkeitsnachweis von Meßsystemen“ übereinstimmen. Andere analytische Methoden und Annahmekriterien können ebenfalls angewandt werden, sofern der Kunde damit einverstanden ist.

Im Leitfaden „**Measurement System Analysis (MSA)**“ [DFG02], sowie dem Äquivalent der Autoindustrie „**Fähigkeitsnachweis von Meßsystemen**“ [ABB⁺99], der in einem Arbeitskreis einiger Automobilhersteller auf Basis der Anforderungen an Messsysteme aus den Normen DIN EN ISO 10012, DIN EN ISO 9001, ISO/TS 16949 bzw. QS-9000 [Dai00], VDA Band 6.1, GUM (Guide to the Uncertainty in Measurement) und DIN EN ISO 14253-1 erarbeitet wurde, werden Definitionen und Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit und Vorgaben zum Umgang mit diesen gegeben.

Wichtig hierfür sind folgende Begriffsdefinitionen sowie Kenngrößen, auf deren Ermittlung die Verfahren basieren;

Messabweichung wird unterschieden in zufällige Messabweichung (= Messergebnis minus dem Mittelwert, der sich aus einer unbegrenzten Anzahl von Messungen derselben Messgröße ergeben würde, die unter Wiederholbedingungen ausgeführt wurden) und systematische Messabweichung (= Abweichung zwischen dem Mittelwert der Anzeige des Messsystems bei wiederholtem Messen des gleichen Merkmals und dem Referenzwert des Merkmals).

Linearität ist der konstant bleibende Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Eingangs- (Mess-)größe eines Messmittels bei deren Änderung.

Normal / Einstellmeister ist das Referenzteil zur Einstellung des Messmittels auf einen Bezugswert.

Messkette ist die Folge von Elementen eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung, die den Weg des Messsignals von der Eingabe zur Ausgabe bildet.

Messprozess / -system ist die Gesamtheit aller Einflusskomponenten zur Ermittlung eines Messwerts für ein Merkmal.

Wiederholpräzision (eines Messgerätes) ist die Fähigkeit eines Messgerätes, bei wiederholtem Anlegen derselben Messgröße unter denselben Messbedingungen nahe beieinander liegende Anzeigen zu liefern.

Vergleichpräzision (von Messergebnissen) ist ein Ausmaß der gegenseitigen Annäherung zwischen Messergebnissen derselben Messgröße, gewonnen unter veränderten Messbedingungen.

Messbeständigkeit / Stabilität ist die Fähigkeit eines Messsystems, seine metrologischen Merkmale zeitlich unverändert beizubehalten.

Die beschriebenen Begriffe bzw. Kenngrößen fließen in unterschiedliche Verfahren für den Fähigkeitsnachweis von Prüfprozessen ein. Je nach Verfahren können die verschiedenen Unsicherheitskomponenten ermittelt werden.

Auflösung des Messgerätes ist vor der Anwendung der Verfahren zu prüfen, ob diese ausreichend ist.

Verfahren 1 geht anhand einer Untersuchung eines Normals unter Betriebsbedingungen auf die Wiederholpräzision und systematische Messabweichung des Messsystem selbst ein.

Verfahren 2, 3 sind quasi identische Verfahren, mit denen die Wiederhol- und Vergleichspräzision anhand mehrerer Prüfteile untersucht wird; sie unterscheiden sich lediglich in der Berücksichtigung des Bedienerinflusses (2: manuelle Tests mit Bedienerinfluss, 3: vollautomatisierte Messsysteme ohne Bedienerinfluss).

Verfahren 4 wird dort angewendet, wo die Linearität über den Messbereich hinaus analysiert und sichergestellt werden muss.

Mit Hilfe der verschiedenen Tests auf Linearität, Messbeständigkeit/Stabilität der Messeinrichtungen werden Messmittelfähigkeitsindize (sogenannte c_g und c_{gk}) bestimmt, welche die ermittelten Messunsicherheiten auf die geforderten Toleranzbereiche beziehen. Mit Hilfe dieser werden Vorgaben zur Erfüllung der Anforderungen gemacht.

VDA Band 6.1

„Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - QM-Systemaudit - Teil 1 Materielle Produkte“

... ist Grundlage für QM-Systemaudits auf Basis der ISO 9001 (Grundlagen für Qualitätsaudits - Auditierung und Zertifizierung).

Auch im VDA Band 6.1:2006 [Ver06] ist das beschriebene Element Prüfmittelüberwachung, äquivalent zur ISO/TS 16949, relevant für den Einsatz von Prüfverfahren. Voraussetzung zum Einsatz von Prüfmitteln ist die Sicherstellung, dass dieses für den vorgese-

henen Zweck geeignet ist. Sie sind so auszuwählen, dass die zu prüfenden Merkmale mit einer bekannten und vertretbaren Unsicherheit gemessen werden können. Die höchstzulässige Messunsicherheit ergibt sich aus der Prozess-, Produktspezifikation und Prüfanweisung. Die Fähigkeit von Prüfmitteln wird von der Messunsicherheit des Prüfmittels im Verhältnis zur Toleranz des Prüfmerkmals bestimmt. Neben dem Verweis auf die DIN EN ISO 10012 bezüglich der Anbindung (Rückführbarkeit) der Prüfmittel an nationale und internationale Normale, werden für den Nachweis der Prüfmittelfähigkeit zahlreiche Hinweise gegeben.

Die Beurteilung von Maschinen, Fertigungseinrichtungen und einer laufenden Fertigung basiert auf der statistischen Auswertung von Merkmalswerten. Die Merkmalswerte stammen von Messsystemen, mit deren Hilfe vordefinierte Merkmale gemessen werden. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, müssen die erfassten Messwerte den tatsächlichen Sachverhalt ausreichend sicher widerspiegeln. Insbesondere beim Aufbau und bei der Zertifizierung eines Qualitätsmanagementsystems nach DIN EN ISO 9000ff, ISO/TS 16949 oder VDA 6.1 wird ein Unternehmen mit dieser Fragestellung konfrontiert.

Eine Verknüpfung von Einsatz von Prüfverfahren und den allgemeinen Normen des Qualitätsmanagements ist in den vorangegangenen Beschreibungen zwar gegeben, konkrete Anforderungen an den Einsatz von Prüfverfahren sowie Hinweise für das Vorgehen beim Fähigkeitsnachweis von Messsystemen sind bislang aber nur mit dem Verweis auf die ISO 10012 und auf den Leitfaden „Measurement System Analysis (MSA)“ gegeben. Ein Überblick über QM-relevante und auf Prüf-/Mess-mittel/-verfahren bezugnehmende Normen ist in Tabelle A.1³ gezeigt, deren Zielstellungen darin aufgeführt und anschliessend erläutert.

Zielstellung	Internationale/nationale Normen und Dokumente	Industriestandards
Aufbau von QM-Systemen	DIN EN ISO 9000ff. DIN ISO 10012 ISO 17025	ISO/TS 16949 VDA 6, Teil 1
Ermittlung der Messunsicherheit	DIN 1319 DIN V EN 13005 (GUM)	Fachverbandsnormen DKD-3
Ermittlung der Messgerätefähigkeit		ISO/TS 16949 /MSA Werknormen
Berücksichtigung der Messunsicherheit	DIN EN ISO 14253-1	

Tabelle A.1: Zielstellungen ausgewählter Fachnormen

³Zielstellungen angelehnt an Gegenüberstellung in VDA Band 5

DIN EN ISO 10012

„Messmanagementsysteme - Anforderungen an Messprozesse und Messmittel“

... enthält sowohl Anforderungen als auch Anleitungen für die Verwirklichung von Messmanagementsystemen und kann der Verbesserung von Messabläufen und der Produktqualität dienen.

Die DIN EN ISO 10012:2004-3 [Deu04b] bezieht sich auf alle physikalischen Messvorgänge und richtet sich damit auch direkt an die zerstörungsfreien Prüfverfahren. Es ist der Fähigkeitsnachweis für Messprozesse zur Absicherung hoher Produktrisiken gefordert. Ein weiterer Aspekt ist die Sicherstellung, dass die mit dem Messmanagementsystem befassten Personen die Fähigkeit besitzen müssen, die ihnen zugewiesenen Aufgaben auszuführen.

Für alle Einzelaspekte werden umfangreiche Anleitungen gegeben. So erfordert der Fähigkeitsnachweis von Messprozessen die metrologische Bestätigung, welche die Kalibrierung und Verifizierung von Messmitteln umfasst. Metrologische Merkmale von Messmitteln sind kennzeichnende Eigenschaften, die die Messergebnisse beeinflussen können. Dies können Messbereich, systematische Abweichung, Wiederholbarkeit, Stabilität, Hysterese, Drift, Auswirkungen von Einflussgrößen, Auflösung, Ansprechschwelle, Abweichung, Totzone, usw. sein. Metrologische Merkmale sind Faktoren, die zur Messunsicherheit beitragen. Sie müssen daher bekannt und für deren bestimmungsgemäßen Einsatz angemessen sein.

DIN EN ISO 17025

„Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien“

... legt Anforderungen zum Nachweis der Kompetenz für die Art von Prüfungen bzw. Kalibrierungen fest, die das Laboratorium durchführt.

Zur Validierung von Prüf- und Kalibrierverfahren ist in der DIN EN ISO 17025:2000 (ISO/IEC 17025:2005) [Deu05d] der Nachweis gefordert, dass die besonderen Anforderungen für einen speziellen beabsichtigten Gebrauch erfüllt werden. Es dürfen auch nicht in normativen Dokumenten festgelegte bzw. eigenentwickelte Verfahren verwendet werden, sofern diese geeignet und für die vorgesehene Anwendung angemessen validiert wurden.

DIN V EN 13005 (GUM)

„Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“

In der DIN V EN 13005 (GUM - Guide to the Uncertainty in Measurement) [Deu99c] sind die notwendigen Schritte zur Ermittlung und Angabe der Unsicherheit ausführlich wiedergegeben.

DIN EN ISO 14253-1

„Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen“

In der DIN EN ISO 14253-1:1998 (ISO 14253:1998) [Deu99b] werden Regeln vorgegeben, wie bei der Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung eines Werkstückes oder Meßgerätes mit einer vorgegebenen Toleranz (für ein Werkstück) oder Grenzabweichungen (für ein Meßgerät) unter Berücksichtigung der jeweiligen Messunsicherheit vorzugehen ist. Wichtige Zusammenhänge und Entscheidungen zeigt die Abbildung A.2. Desweiteren wird eine Verfahrensweise für den Fall festgelegt, dass Messergebnisse in den Unsicherheitsbereich rechts oder links von der Toleranzgrenze fallen und damit keine klare Entscheidung über Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung getroffen werden kann.

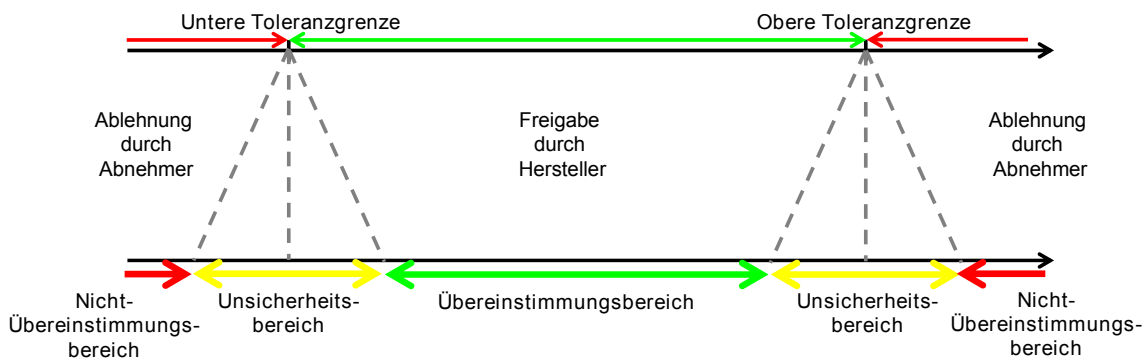


Abbildung A.2: Entscheidungsregeln für den Spezifikationsnachweis

DIN 1319-1...4

„Grundlagen der Meßtechnik“

In der DIN 1319 werden die im Rahmen einer Messung und deren Qualifizierung wichtigen Begriffe, Kenngrößen, etc. definiert und erläutert. Ebenfalls werden sehr genaue Vorgaben für die Ermittlung der Messunsicherheiten gegeben. Berechnungsgrundlagen hierfür sind enthalten. Inhalte der einzelnen Teile sind:

Teil 1 - Verantwortung der Leitung Grundbegriffe [Deu95]

Teil 2 - Begriffe für die Anwendung von Meßgeräten [Deu05a]

Teil 3 - Auswertung von Messungen einzelner Meßgrößen, Meßunsicherheit [Deu96]

Teil 4 - Auswertung von Messungen, Meßunsicherheit [Deu99a]

DKD-3

„Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen“

Dieses Dokument dient der Harmonisierung der Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit in der „European co-operation for Accreditation“⁴. Es soll die spezifischen Forderungen festlegen, die an die Angabe der Messunsicherheit in den von akkreditierten Laboratorien gefertigten Kalibrierscheinen zu stellen sind.

VDA Band 5

„Prüfprozesseignung“

... zeigt auf, wie die vielfältigen Forderungen aus den Normen und Richtlinien zur Bestimmung und Berücksichtigung der Messunsicherheit für den Industriezweig der Automobil- und Zuliefererindustrie zu erfüllen sind.

Zum Thema Prüfprozesseignung fließen in den VDA Band 5:2003 [Ver03] quasi alle relevanten Forderungen und Verfahren zur Ermittlung und Berücksichtigung der Messunsicherheit ein (s. Abb. A.3).

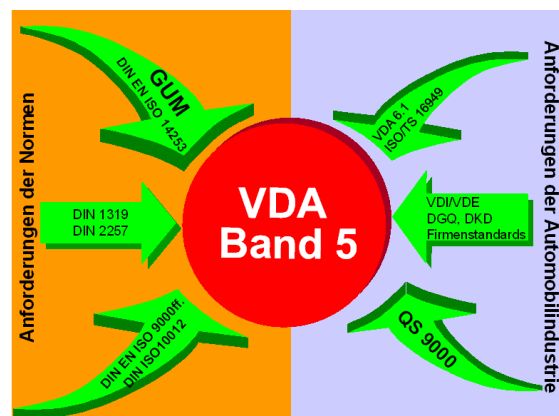


Abbildung A.3: Einflüsse in den VDA Band 5 (Quelle: VDA Band 5)

Im VDA Band 5 wird auf die Verwendbarkeit von Prüfmitteln eingegangen, jedoch werden dabei nur geometrische Prüfprozesse angesprochen. Die Eignung von Prüfprozessen steht im Vordergrund der Betrachtungen: Bei Prüfungen zur Serienüberwachung und bei Konformitätsprüfungen ist sicherzustellen, dass Merkmale in Bezug auf die Toleranz als i.O. bzw. n.i.O. sicher erkannt werden. Abweichungen der Messwerte aufgrund von Fertigungsprozessstreuungen sind ebenso wie Abweichungen, die durch den Prüfprozess verursacht wurden, zu berücksichtigen. Die Analyse beinhaltet die Identifikation der auf die Messunsicherheit wirkenden Einflusskomponenten.

⁴Europäischer Zusammenschluss, siehe www.european-accreditation.org (07.12.2008)

B Kontrollliste zur Einführung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens

Kontrollliste für die Einführung von ZfP-Verfahren in Anlehnung an VDA Bd. 5:2003 / CEN/TR 14748:2004		Umsetzungsstand / Reifegrad				
		Prüfaufgaben- definition	Stichversuch	Laborversuch	Reihenversuch	Pilotanwendung
Ziel		Klärung der technischen Hintergründe und der Randbedingungen für das Prüfproblem	Ermittlung der grundsätzlichen Eignung eines Messprinzips zur Fehlererkennung	Ermittlung der qualitativen und ersten quantitativen Aussagesicherheit in Bezug auf die Bewertung der Prüfkriterien (Unregelmäßigkeiten) bzw. Produktmerkmale (Fehler)	Ermittlung von quantitativen Aussagen zur Erkennungssicherheit	Ermittlung von umfangreichen quantitativen Aussagen zur Erkennungssicherheit und Verfügbarkeit unter Serienbedingungen, Aussagen zur Integritätsfähigkeit des System in das vorhandene steuerungs-technische Umfeld (Kommunikation, Reaktionszeiten, u.a.)
Prüfproblem						
Arbeitstitel festlegen		Benennen				
Prüfgegenstand, Bauteil						
	Bearbeitungszustand	Benennen				
	Teilenummer	Benennen				
	Material	Benennen				
	Geometrie	Benennen				
	Fertigungsverfahren	Benennen				
	Abmessungen	Benennen				
zu prüfende Merkmale						
	Zeichnungsvorgaben / Toleranzen	Benennen				
	interne Richtlinien	Benennen				
zu prüfende Bereiche						
	Zeichnung / -svorgabe	Benennen				
	Region of interest (ROI)	Benennen				
Fehlerbeschreibung						
	Art	Beschreiben				
	Lage	Beschreiben				
	Abmessungen	Beschreiben				
	Registrierschwelle	Benennen				
	Zulässigkeitsgrenze (Fertigungsqualität / Beanspruchungsqualität)	Benennen				
	kritische Fehlergröße	Benennen				
	Fehlerfolge (zeitlich)	Beschreiben				
Prüfumfang						
	Stichprobe	Benennen				
	100% Prüfung	Benennen				
Referenzteile						
	für jedes Merkmal	Benennen	Bereitstellen			
	Grenzfehler	Benennen		Bereitstellen		
Referenzverfahren						
	je Prüfmerkmal	Benennen		Vergleichen		
	Aussagefähigkeit	Benennen		Bestätigen		
Prüfzeitpunkt						
	Prozesskette	Benennen				
	Prozessschritt	Benennen				
Prüfanforderungen						
	Pseudofehlerrate	Benennen				
	Fehlererkennbarkeit	Benennen				
	Taktzeit	Benennen		Abschätzen	Bestätigen	
	Zugänglichkeit	Benennen				
	Umwelteinflüsse	Benennen				
	Serienintegriert	Benennen				
	Prozesskette	Benennen				
	Labor	Benennen				
optimal						
Kostenpotential						
	Prüfkosten	Benennen				
	Fehlerkosten	Benennen				

Abbildung B.1: Kontrollliste zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren - Teil 1

B Kontrollliste zur Einführung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens

Kontrollliste für die Einführung von ZfP-Verfahren in Anlehnung an VDA Bd. 5:2003 / CEN/TR 14748:2004		Umsetzungsstand / Reifegrad				
		Prüfaufgaben- definition	Stichversuch	Laborversuch	Reihenversuch	Pilotanwendung
Messverfahren						
Messprinzip						
	Messgröße	Vorschlagen	Benennen			
	physikalischer Zusammenhang	Beschreiben	Bestätigen	Untersuchen		
	Einflussgrößen			Benennen	Untersuchen	
Prinziptauglichkeit						
	Prüfmerkmale		Bestätigen			
	Fehlererkennbarkeit		Bestätigen			
	Fehlerklassifizierung (Art, Ort, Verteilung, Größe)		Abschätzen	Bestätigen		
Eigenschaften Messgeräte						
	Verfügbarkeit			Benennen / Erproben	Bestätigen	Optimieren / Bestätigen
	Parametrierung			Benennen / Erproben	Bestätigen	Optimieren / Bestätigen
	Auflösung			Benennen / Erproben	Bestätigen	Optimieren / Bestätigen
	Genauigkeit			Benennen / Erproben	Bestätigen	Optimieren / Bestätigen
Geräte-Messunsicherheit						
	Kalibrierunsicherheit			Abschätzen	Bestätigen	Bestätigen
	Wiederholungsunsicherheit			Abschätzen	Bestätigen	Bestätigen
	Linearitätsunsicherheit			Abschätzen	Bestätigen	Bestätigen
	Gerätestabilität				Abschätzen / Fordern	Bestätigen
	Ishikawa-Diagramm (Einflussgrößenanalyse)			Erstellen	Bestätigen	
	weitere Beiträge aus Fehlereinflussanalyse					
	Prüfmittelfähigkeit			Abschätzen	Bestätigen	Bestätigen
Verfügbarkeit						
	Standzeiten / Ausfallraten	Fordern			Abschätzen / Fordern	Bestätigen
	Service-Verfügbarkeit	Fordern			Abschätzen / Fordern	Bestätigen
Lastenheft						
					Erstellen	
Prüfprozess						
Einflussgrößenanalyse						
	Ishikawa-Diagramm			Entwerfen	Erweitern / Bestätigen	
Fehlererkennbarkeit						
	Erkennbarkeitsgrenzen des Merkmals an Referenzteilen mit Grenzfehlern			Bestätigen		
				Bestätigen		
Meßunsicherheit (metrische Merkmale)						
	Stichprobenumfang			Abschätzen	Festlegen	
	Vergleichsunsicherheit			Abschätzen	Bestimmen	
	weitere Beiträge aus Fehlereinflussanalyse			Abschätzen	Bestimmen	Untersuchen
	Gesamtunsicherheit			Abschätzen	Bestimmen	Bestätigen
	Prüfprozesseignung			Abschätzen	Bestätigen	
Fehlererkennbarkeit (attributive Merkmale)						
	Stichprobenumfang			Abschätzen	Bestätigen	
	Fehlererkennungsrate			Abschätzen	Bestätigen	Bestätigen
	Pseudofehlerrate			Abschätzen	Bestätigen	Bestätigen
Bedienkonzept						
	manuell / teilautomatisiert / vollautomatisch (Mechanik, Auswertung)	Fordern		Abschätzen		Umsetzen / Bestätigen
Prüfmittelüberwachung						
	Absicherung / Überwachung - Stabilität (mit Kontrollprobensatz - nicht alternnd)				Planen	Bestätigen
	Kalibrierung (Rückführung auf nationale Normale)				Planen	Bestätigen
Qualifizierung						
	Qualifizierungsinhalte				Festlegen	Bestätigen
	Qualifizierungssystem (verbindliche Regelung zur Qualifikation, Eignungsvoraussetzungen, Schulungszeiträume, Dokumentation der Qualifikation)				Festlegen	Anwenden
	Qualifizierungsmaßnahmen				Planen	Durchführen
Prüfanweisung						
	Verantwortlichkeiten			Entwurf		Endfassung
	Qualifikation			Entwurf		Endfassung
	Prüfausrüstung / Prüfgerätespezifikation			Entwurf		Endfassung
	Justier- / Prüfdurchführung / Arbeitsablauf			Entwurf		Endfassung
	Prüfparameter inkl. Spannweiten			Entwurf		Endfassung
	Festlegung Eingriffgrenzen			Entwurf		Endfassung
	Anforderungen an das Prüfpersonal			Entwurf		Endfassung
	Ergebnisdokumentation (Berichtsinhalte, Berichtsform, Berichtsverteiler, Archivierung (Dauer, Ort, Zugang))			Entwurf		Endfassung
	Eskalationsplan bei n.i.O.-Stichprobe			Entwurf		Endfassung
	Prüfmittelüberwachung			Entwurf		Endfassung
	Sicherheitsvorkehrungen			Entwurf		Endfassung
	Störungsplan (Benachrichtigungsliste, Service-Hotline)			Entwurf		Endfassung

	keine Aktion / keine Ergebnisse vorhanden
Text	Aufgabe mit vorläufigem Ergebnis vorläufiges Ergebnis vorhanden
Text	Aufgabe mit verbindlichem Ergebnis verbindliches Ergebnis vorhanden

Abbildung B.2: Kontrollliste zur Einführung zerstörungsfreier Prüfverfahren - Teil 2

C Bewertungsmatrizen Expertensystem

Material+Kriterium?			Minimaler Fehler?			Objekttemperatur ?			Sicht?			
Metall	Ablösung / Delamination	MLW	0.9	2 mm	MLW	1.0	Raumtemperatur	MLW	1.0	frei einsehbar	MLW	1.0
		KW	1.0		KW	1.0		KW	0.5		KW	1.0
		Bolo	0.7		Bolo	0.5		Bolo	1.0		Bolo	1.0
		miniBolo	0.7		miniBolo	0.2		miniBolo	1.0		miniBolo	1.0
	Pore / Lunker	MLW	0.9	3-5 mm	MLW	1.0	> 200 °C	MLW	1.0	hinter Glas	MLW	0.0
		KW	1.0		KW	1.0		KW	1.0		KW	1.0
		Bolo	0.7		Bolo	0.9		Bolo	1.0		Bolo	0.0
		miniBolo	0.7		miniBolo	0.5		miniBolo	1.0		miniBolo	0.0
	Riss	MLW	0.9	≥10 mm	MLW	1.0						
		KW	1.0		KW	1.0						
		Bolo	0.7		Bolo	1.0						
		miniBolo	0.7		miniBolo	1.0						
	hohe Temperatur	MLW	0.7									
		KW	1.0									
		Bolo	0.3									
	miniBolo	0.3										
niedrige Temperatur	MLW	0.9										
	KW	1.0										
	Bolo	0.7										
	miniBolo	0.7										
Schichtdicke	MLW	0.9	0,5 m	MLW	1.0	ja	MLW	1.0	120x120	MLW	1.0	
	KW	1.0		KW	1.0		KW	1.0		KW	1.0	
	Bolo	0.7		Bolo	1.0		Bolo	1.0		Bolo	1.0	
	miniBolo	0.7		miniBolo	0.9		miniBolo	1.0		miniBolo	1.0	
Vorhandensein, Lage, Dimension	MLW	0.9	3-5 m	MLW	1.0	nein	MLW	0.0	≥ 320x240	MLW	1.0	
	KW	1.0		KW	1.0		KW	0.0		KW	1.0	
	Bolo	0.7		Bolo	1.0		Bolo	1.0		Bolo	1.0	
	miniBolo	0.7		miniBolo	0.7		miniBolo	1.0		miniBolo	0.0	
CFK	Ablösung / Delamination	MLW	1.0	≥10 m	MLW	1.0	nein	MLW	0.0		MLW	0.0
		KW	1.0		KW	1.0		KW	0.0		KW	0.0
		Bolo	1.0		Bolo	1.0		Bolo	0.0		Bolo	0.0
		miniBolo	1.0		miniBolo	0.3		miniBolo	1.0		miniBolo	1.0
	Pore / Lunker	MLW	1.0									
		KW	1.0									
		Bolo	1.0									
		miniBolo	1.0									
	Riss	MLW	1.0									
		KW	1.0									
		Bolo	1.0									
		miniBolo	1.0									
	niedrige Temperatur	MLW	1.0	≤ 25/30	MLW	1.0	20	MLW	1.0	≤10000 EUR	MLW	0.0
		KW	1.0		KW	1.0		KW	1.0		KW	0.0
		Bolo	1.0		Bolo	1.0		Bolo	0.0		Bolo	0.0
	miniBolo	1.0		miniBolo	1.0		miniBolo	0.0		miniBolo	1.0	
Schichtdicke	MLW	0.7	50	MLW	1.0	80	MLW	1.0	15000 EUR	MLW	0.0	
	KW	0.9		KW	1.0		KW	1.0		KW	0.0	
	Bolo	0.5		Bolo	1.0		Bolo	1.0		Bolo	0.5	
	miniBolo	0.5		miniBolo	0.0		miniBolo	0.0		miniBolo	1.0	
Vorhandensein, Lage, Dimension	MLW	1.0	≥ 150	MLW	1.0	≥ 100	MLW	1.0	40000 EUR	MLW	0.2	
	KW	1.0		KW	1.0		KW	1.0		KW	0.2	
	Bolo	1.0		Bolo	0.0		Bolo	1.0		Bolo	0.7	
	miniBolo	1.0		miniBolo	0.0		miniBolo	1.0		miniBolo	1.0	
Kunststoff	Pore / Lunker	MLW	1.0						100000 EUR	MLW	1.0	
		KW	1.0					KW		1.0		
		Bolo	1.0					Bolo		1.0		
		miniBolo	1.0					miniBolo	1.0		miniBolo	1.0
	Riss	MLW	1.0									
		KW	1.0									
		Bolo	1.0									
		miniBolo	1.0									
	niedrige Temperatur	MLW	1.0									
		KW	1.0									
		Bolo	1.0									
		miniBolo	1.0									
	Schichtdicke	MLW	1.0									
		KW	1.0									
		Bolo	1.0									
	miniBolo	1.0										
Vorhandensein, Lage, Dimension	MLW	1.0										
	KW	1.0										
	Bolo	1.0										
	miniBolo	1.0										

Abbildung C.1: Bewertungsmatrix Kamertechnik

C Bewertungsmatrizen Expertensystem

Material & Kriterium ?	Fehlerlage ?		Minimaler Fehler ?		Emissionsgradverteilung ?		Beschichtung ?			
Metall	Ablösung / Delamination	Tiefe < Ausdehnung	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0	2 mm	BlitzPuls 1.0 TempMod 0.7	homogen, = 0 bis 0.5	BlitzPuls 0.5 TempMod 0.7	thermisch dünn beschichtet	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0	
		KonvPulsMod 0.2 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0	KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0	KonvPulsMod 0.2 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0	KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0	BlitzPuls 0.1 TempMod 0.1	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0	KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0	
		Passiv 0.1	Passiv 1.0	Passiv 0.1	Passiv 1.0	BlitzPuls 0.9 TempMod 0.8	homogen, = 0.5 bis 1.0	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0	thermisch undurchdringbar	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0
		BlitzPuls 0.7 TempMod 0.3 KonvPulsMod 0.2 UltraPulsMod 0.1 IndPulsMod 0.5 Passiv 0.1	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 0.0	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.3 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.2	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.9 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	BlitzPuls 0.2 TempMod 0.3 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.2	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	
	Pore / Lunker	Tiefe > Ausdehnung	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 0.0	3-5 mm	BlitzPuls 0.9 TempMod 0.8	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0	
	Riss		BlitzPuls 0.1 TempMod 0.1 KonvPulsMod 0.1 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	≥10 mm	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.9 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	inhomogen unregelmäßig Unterschied > 0.5	BlitzPuls 0.2 TempMod 0.3 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.2	unbeschichtet	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	
	hohe Temperatur		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	
	niedrige Temperatur		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	
	Schichtdicke		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	
	Vorhandensein, Lage, Dimension		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	
	CFK	Ablösung / Delamination	Schwärzung möglich	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	massiv, thermisch dick	BlitzPuls 0.8 TempMod 0.9 KonvPulsMod 0.9 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	2-seitiger Zugang	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	nahe Raumtemperatur	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.9 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.9
			keine Schwärzung möglich	BlitzPuls 0.7 TempMod 0.8 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.8	flach, thermisch dünn	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.9 KonvPulsMod 0.9 UltraPulsMod 0.9 IndPulsMod 1.0 Passiv 0.0	1-seitiger Zugang	BlitzPuls 0.5 TempMod 0.8 KonvPulsMod 0.9 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	> 200 °C	BlitzPuls 0.8 TempMod 0.8 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 0.8 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0
Oberflächenanforderung ?			BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	ohne Risiko	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	auch ohne Anregung	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	< 1 min (100% Online / Serienprüfung)	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.4 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	
Kratzer unkritisch			BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	Risiko	BlitzPuls 0.5 TempMod 0.5 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	nur mit Anregung	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	< 2 min (Stichproben-Serienprüfung Öffnung)	BlitzPuls 1.0 TempMod 0.7 KonvPulsMod 0.8 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	
Pore / Lunker			BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.7 UltraPulsMod 0.1 IndPulsMod 0.2 Passiv 0.3	thermische Schädigung	BlitzPuls 0.9 TempMod 0.9 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0		frei (Laborprüfung)	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0		
Riss			BlitzPuls 0.3 TempMod 0.3 KonvPulsMod 0.1 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 0.9 Passiv 0.1	Risiko mechanisch	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 0.5 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		
niedrige Temperatur			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0	mechanische Schädigung	BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		
Schichtdicke			BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.2 UltraPulsMod 0.2 IndPulsMod 0.3 Passiv 0.0	Risiko thermisch und mechanisch	BlitzPuls 0.5 TempMod 0.5 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 0.5 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		
Vorhandensein, Lage, Dimension			BlitzPuls 0.8 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.8 UltraPulsMod 0.7 IndPulsMod 0.4 Passiv 0.0	Schädigung thermisch u. mechanisch	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		
Kunststoff		Pore / Lunker		BlitzPuls 0.5 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.7 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 0.5		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0				
			Riss	BlitzPuls 0.3 TempMod 0.1 KonvPulsMod 0.1 UltraPulsMod 0.5 IndPulsMod 0.0 Passiv 0.1		BlitzPuls 0.4 TempMod 0.4 KonvPulsMod 1.0 UltraPulsMod 1.0 IndPulsMod 1.0 Passiv 1.0	keine Störreflexe oder abschirmbar	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.2 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0	Störreflexe und nicht abschirmbar	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.5 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0
			niedrige Temperatur	BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.2 TempMod 0.4 KonvPulsMod 0.8 UltraPulsMod 0.8 IndPulsMod 0.8 Passiv 0.8		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0
	Schichtdicke		BlitzPuls 1.0 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.7 UltraPulsMod 0.1 IndPulsMod 0.1 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0	
	Vorhandensein, Lage, Dimension	BlitzPuls 0.8 TempMod 1.0 KonvPulsMod 0.8 UltraPulsMod 0.8 IndPulsMod 0.8 Passiv 0.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		
			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0	
			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0	
			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0	
			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0	
			BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0		BlitzPuls 0.0 TempMod 0.0 KonvPulsMod 0.0 UltraPulsMod 0.0 IndPulsMod 0.0 Passiv 1.0	

Abbildung C.2: Bewertungsmatrix Anregung/Auswertung