

**Real-View-Thermography**  
**Eine neue Visualisierungs- und**  
**Mensch-Maschine-Interaktionsmethode in der**  
**aktiven Thermografie**

Dissertation

zur Erlangung des Grades des  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III  
Chemie, Pharmazie Bio- und Werkstoffwissenschaften  
der Universität des Saarlandes



von Mag.-Ing. Lukasz Adam Bienkowski,  
geb. am 24.11.1984 in Warschau

Saarbrücken  
2015



Tag des Kolloquiums: 27. August 2015

Dekan: Prof. Dr.-Ing. D. Bähre

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. C. Boller  
Prof. Dr. rer. nat. habil. M. Kreutzbruck

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

Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. F. Aubertin



## **Eidesstattliche Versicherung**

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

München, den 30. Januar 2015



# Abstract

The result of a manual active thermography inspection is strongly affected by the examiner. Thus the quality of the inspection depends significantly on the so-called human factor. The Real-View-Thermography method developed in this thesis minimizes the influence of the examiner on the inspection result.

The negative influences of the human factor in the common active thermography inspection procedure are investigated, emphasizing on the quality of the inspection and the usability of the inspection equipment. The intuitive design of the human-machine interaction has a positive influence on examiners' concentration and thus on the quality of the inspection.

The RVT method consists of several steps which eliminate these negative influences of the human factor. The most essential are the detection of local deficiencies in coatings to enhance the thermal emissivity, the context-sensitive visual feedback on a specimen during a measurement and the analysis of the measurement results directly on the specimen.

The RVT method is evaluated using the acoustic and induction thermography. Thus the rise of the inspection quality and the improvement of the usability are verified.





# Zusammenfassung

Das Ergebnis einer manuellen Inspektion mit aktiver Thermografie wird durch den Prüfer signifikant beeinflusst. Die Qualität der Inspektion hängt somit maßgeblich von diesem sog. menschlichen Faktor ab. Das in dieser Arbeit entwickelte Real-View-Thermography-Verfahren minimiert den Einfluss des Prüfers auf das Endergebnis.

Der konventionelle Arbeitsablauf bei der Inspektion mit aktiver Thermografie wird auf Defizite hinsichtlich des menschlichen Faktors untersucht. Hier stand sowohl die Qualität der Prüfung als auch die Bedienbarkeit des Prüfsystems im Vordergrund. Denn eine intuitive Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion wirkt sich positiv auf die Konzentration des Prüfers und somit auch die Qualität der Inspektion aus.

Das RVT-Verfahren umfasst eine Reihe von Maßnahmen, die den Defiziten des konventionellen Arbeitsablaufs entgegenwirken. Dazu zählen insbesondere die Erkennung einer fehlerhaften Beschichtung zur Erhöhung der thermischen Emissivität, eine hinsichtlich des Prüfablaufs optimierte Bedienbarkeit der Messung durch ein virtuelles Bedienfeld, situationsbezogene Rückmeldungen während einer Messung durch Projektion kontextrelevanter Informationen auf den Prüfling sowie die Auswertung der Ergebnisse direkt am Prüfling.

Das RVT-Verfahren wird bei der akustischen Thermografie und der Induktionsthermografie erprobt. So wird die Erhöhung der Qualität der Inspektion nachgewiesen und die Verbesserung der Bedienbarkeit gezeigt.



# Verzeichnis der verwendeten Symbole

Symbol	Name
$A(x, y)$	Amplitudenbild der Puls-Phasen-Analyse
$a_{90/95}$	Defektgröße, die in mindestens 95 % aller Untersuchungen mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 90 % gefunden wird
$\alpha$	Thermische Diffusivität [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$c$	Spezifische Wärmekapazität [ $\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\varepsilon$	Emissivität
$f$	Frequenz [Hz]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$\mu_s$	Magnetische Permeabilität [ $\text{V s A}^{-1} \text{m}^{-1}$ ]
$\mu$	Erwartungswert der Normalverteilung
$N$	Anzahl aller Bilder in der Aufnahme
$\Phi(x, y)$	Phasenbild der Puls-Phasen-Analyse
$s$	Skin-Tiefe [m]
$\rho_D$	Materialdichte [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
$\rho_W$	Spezifischer Widerstand [ $\Omega \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$ ]
$\rho$	Reflexion
$\sigma_s$	Elektrische Leitfähigkeit [ $\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ ]
$\sigma$	Standardabweichung der Normalverteilung
$T_{mn}(x, y)$	Vektor mit allen Pixeln des Bildes $n$ der Messung $m$
$T_n(x, y)$	Vektor mit allen Pixeln des Bildes $n$
$T$	Temperatur [K]
$\tau$	Transmission
$x, y$	Pixelkoordinaten



# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Symbole	i
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Zerstörungsfreie Prüfung – Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Aktive Thermografie – ein bildgebendes Prüfverfahren . . . . .	6
2.1.1 Ausgewählte Techniken der aktiven Thermografie . . . . .	6
2.1.1.1 Akustische Thermografie . . . . .	6
2.1.1.2 Induktionsthermografie . . . . .	7
2.1.1.3 Blitzthermografie . . . . .	9
2.1.2 Auswertung der thermografischen Daten . . . . .	9
2.1.3 Anwendungsgebiete der aktiven Thermografie . . . . .	10
<b>3 Arbeitsablauf bei aktiver Thermografie</b>	<b>15</b>
3.1 Defizite der aktiven Thermografie . . . . .	17
3.2 Methoden zur Beseitigung der Defizite der aktiven Thermografie . . .	20
3.2.1 Automatisierung in der aktiven Thermografie . . . . .	20
3.2.2 Hybrid-Kamera zur Verbesserung der Fehlerbewertung . . . . .	22
3.2.3 Unterstützung des Prüfers durch flexible Projektion von In- formationen . . . . .	23
<b>4 RVT-Verfahren in der zerstörungsfreien Prüfung mit aktiver Ther- mografie</b>	<b>25</b>
4.1 Einführung in das RVT-Verfahren . . . . .	25
4.1.1 RVT-Einheit – Aufbau und Komponenten . . . . .	25
4.1.2 RVT-Software – Funktion . . . . .	27
4.1.3 Kalibrierung und Projektionsgenauigkeit . . . . .	28
4.2 Charakterisierung der Prüflinge . . . . .	30

4.2.1	Gasturbinenschaufel . . . . .	30
4.2.2	Radaufhänger . . . . .	32
4.2.3	Verdichterschaufel . . . . .	33
4.2.3.1	Vorbereitung einer POD-Analyse . . . . .	35
4.3	Arbeitsablauf der Inspektion mit RVT-Verfahren . . . . .	41
4.3.1	Prozessabschnitt 1: Messvorbereitung . . . . .	44
4.3.2	Prozessabschnitt 2: RVT-gestützte Messung mit Feedback-Unterstützung für den Prüfer . . . . .	48
4.3.2.1	Projektion des thermografischen Vorgangs während der Anregung . . . . .	49
4.3.2.2	Bestimmung und Projektion des angeregten Bereichs . . . . .	51
4.3.3	Prozessabschnitt 3: Auswertung der Ergebnisse . . . . .	55
4.3.3.1	Zusammenfassung der Ergebnisbilder . . . . .	56
4.3.3.2	Auswertung der Ergebnisse direkt am Bauteil . . . . .	67
4.3.4	Prozessabschnitt 4: Evaluierung der Auswertungsergebnisse . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Ergebnisse der RVT-basierten Inspektion</b>	<b>77</b>
5.1	RVT-Inspektion mit akustischer Thermografie . . . . .	77
5.2	RVT-Inspektion mit Induktionsthermografie . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Diskussion, Bewertung des RVT-Verfahrens und Ausblick</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>118</b>
	<b>Publikationen</b>	<b>131</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>133</b>

# Kapitel 1

## Einleitung und Motivation

Die aktive Thermografie hat als ein zerstörungsfreies Prüfverfahren in den letzten Jahren sehr an Bedeutung gewonnen. Dazu trägt vor allem der technische Fortschritt auf dem Gebiet der Infrarotkameras bei. Diese haben heute wesentlich höhere Bildwiederholraten, höhere thermische Sensitivität und Detektorauflösungen. Damit kann die aktive Thermografie mittlerweile auch bei anspruchsvolleren Prüfaufgaben eingesetzt werden. Sie stellt eine immer stärker werdende Alternative zu den konventionellen und etablierten Prüfverfahren dar. Folglich hat sie einen Einzug in verschiedene Industriebereiche gehalten.

Eine Inspektion mit der aktiven Thermografie verläuft oft manuell, d. h. wird von einem Prüfer durchgeführt. Denn eine Automatisierung des Prüfprozesses ist in vielen Fällen wirtschaftlich nicht vertretbar, oft wegen einer zu geringer Anzahl der Prüflinge oder sehr komplexer Prüfaufgaben. Eine automatisierte Prüfung ist dann nur mit einem sehr hohen finanziellen Aufwand zu realisieren. Darüber hinaus ist eine automatisierte Auswertung der Inspektionsergebnisse aufgrund der Komplexität der Ergebnisbilder fehleranfällig.

Das Ergebnis einer manuellen Prüfung ist dagegen stark von dem Prüfer abhängig. Seine Erfahrung, Tagesform und momentane Konzentration beeinflussen das Ergebnis der Inspektion erheblich. Durch diesen sog. menschlichen Faktor ist die Reproduzierbarkeit der Inspektionsergebnisse nicht immer gewährleistet.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Real-View-Thermography-Verfahren reduziert diesen Einfluss des menschlichen Faktors auf das Inspektionsergebnis. Hierfür wird der Prüfer an allen Inspektionsschritten durch das RVT-Verfahren unterstützt. Das RVT-Verfahren umfasst eine Reihe von Maßnahmen, die die Qualität der Inspektion mit aktiver Thermografie erhöhen und die Mensch-Maschine-Interaktion intuitiver gestalten.





## Kapitel 2

# Zerstörungsfreie Prüfung – Stand der Technik

Die Anfänge der zerstörungsfreien Prüfung werden mit dem rasanten Aufstieg der Industrialisierung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in Verbindung gesetzt. Denn ein fehlerhaftes Verhalten der industriellen Anlagen und Maschinen hat zu teuren Ausfällen oder sogar tragischen Unfällen geführt. Der wirtschaftliche Faktor und der Bedarf nach einer höheren Sicherheit haben die Reize für die Entstehung der zerstörungsfreien Prüfverfahren gesetzt [39].

Die wohl erste und immer noch sehr verbreitete zerstörungsfreie Prüfmethode ist die visuelle Prüfung. Das zu untersuchende Bauteil wird von einem geübten Prüfer unter guten Lichtverhältnissen genau betrachtet und nach Defekten untersucht. Durch die Einfachheit und entfallende Maschinenkosten ist diese Methode weiterhin sehr beliebt. Die erste dokumentierte Einführung der visuellen Prüfung erfolgte in den USA im Bundesstaat Connecticut. Dort wurde im Jahre 1864 ein Gesetz verabschiedet, das eine visuelle Prüfung von Dampfkesseln vorsah. Diese Maßnahme wurde durch eine folgenschwere Explosion eines Dampfkessels in der Stadt Hartford zehn Jahre früher hervorgerufen [18].

Ende des 19. Jahrhunderts wurde die erste Eindringprüfmethode unter dem Namen „Öl und Weißen“ (engl. „oil and whiting“) eingeführt [39]. Die mit dieser Methode zu inspizierenden Teile wurden in ein schmutziges Motorenöl eingetaucht, sodass dieses in die in dem Teil vorhandenen Materialrisse eindringen konnte. Im nächsten Schritt wurden die Teile gereinigt und in eine Mischung aus Alkohol und Kalk getaucht. Wenn der Alkohol verdunstet war, hatte sich auf der Oberfläche des Teils eine weiße Kalkschicht gebildet. Die Teile wurden dann mit einem Hammer zu Vibra-

tionen angeregt, sodass das Motorenöl aus den Materialrissen heraus fließen konnte und diese damit erkennbar gemacht hat. Die Ergebnisse dieser Prüfmethode waren jedoch nicht gut reproduzierbar, da es keine Richtlinien bezüglich der Ölkonsistenz und der Eintauchzeit gab.

Heutzutage werden zwei Eindringprüfmethoden eingesetzt: die Farbeindringprüfung und die fluoreszierende Eindringprüfung. Bei der Farbeindringprüfung wird das Bauteil mit einem farbigen Eindringmittel beschichtet. Dieses Eindringmittel dringt durch sein hohes Kriechvermögen in die Risse hinein. Nach einer bestimmten Wartezeit wird das Bauteil gereinigt und ein sog. Entwickler aufgetragen. Dieser zieht das in den Rissen verbliebene Eindringmittel auf die Oberfläche heraus. Durch den hohen Kontrast zwischen dem Eindringmittel und dem Entwickler sind die Risse gut sichtbar.

Alternativ kann ein fluoreszierendes Eindringmittel eingesetzt werden. Dabei wird die abschließende Begutachtung des Bauteils unter UV-Licht durchgeführt. Dadurch wird eine noch höhere Empfindlichkeit erreicht, da das menschliche Auge auf Leuchtdichtekontraste empfindlicher als auf Farbkontraste reagiert.

In den 1920er Jahren wurde die Entdeckung gemacht, dass bei magnetisierten ferromagnetischen Bauteilen die Feldlinien des Magnetfeldes an den Rissen sichtbar gemacht werden können. Denn an den quer zu den Feldlinien liegenden Rissflanken entstehen Magnetpole, die zu einem sog. Streufeld führen. Wird Magnetpulver über das Bauteil gestreut, sammelt sich dieses an diesem Streufeld und ermöglicht somit die Detektion von Rissen. Diese Entdeckung ist die Grundlage der Magnetpulverprüfung. Hier kann die Detektierbarkeit durch den Einsatz eines fluoreszierenden Magnetpulvers weiter erhöht werden.

Im Jahre 1895 wurde von Wilhelm Conrad Röntgen die Röntgenstrahlung und 1900 von Paul Villard die Gammastrahlung entdeckt. Die beiden Strahlungen werden bei der Durchstrahlungsprüfung eingesetzt. Erst 1922 wurde ein industrielles Röntgenstrahlung-Prüfsystem für metallische Bauteile von Dr. H. Lester entwickelt [60]. Noch später im Jahre 1930 wurde der praktische Einsatz der Gammastrahlung für die Rissprüfung von Dr. R. Mehl vorgestellt [11]. Die beiden Verfahren werden für die zerstörungsfreie Prüfung gegenwärtig oft eingesetzt. Bedingt durch die Zunahme der Rechenleistung moderner Computer, werden heute auch vermehrt tomografische Aufnahmen gemacht, die ein 3D-Volumen des Prüfteils ergeben.

Die ersten Versuche, den Ultraschall an einen metallischen Werkstoff anzukoppeln, wurden 1929 von dem russischen Forscher S. Y. Sokolov unternommen [93]. Im Jahre 1935 hatte Sokolov den Aufbau seines piezoelektrischen Prüfkopfes so-

---

wie die Ankopplung dieses Prüfkopfes an einen metallischen Prüfling beschrieben [96, 94, 95]. Erste Entwicklungen, diese Technik für die zerstörungsfreie Prüfung zunutze zu machen, wurden ca. 1942 von D. O. Sproule in Großbritannien [100] und Dr. F. Firestone in den USA [27] gemacht. Diese beruhen auf dem Impuls-Echo-Verfahren. Dabei wird ein Schallimpuls in einen Prüfling gesendet, der an dem Boden des Prüflings und den Unregelmäßigkeiten der Materialstruktur reflektiert wird. Durch die Laufzeit des Schallimpulses lässt sich bestimmen, ob die Reflexion am Boden (Prüfling in Ordnung) oder einer Materialunregelmäßigkeit (Fehler erkannt) erfolgte.

Die Grundlagen für die Wirbelstromprüfung (engl. eddy current testing) haben 1820 H. C. Ørsted durch Entwicklung des Elektromagnetismus [87] und 1831 M. Faraday durch Untersuchung der elektromagnetischen Induktion [24] gelegt. Denn bei der Wirbelstromprüfung wird durch ein wechselndes Magnetfeld in einem Induktor ein Wirbelstrom in dem zu untersuchenden Prüfling induziert. An den Rissen erhöht sich die Wirbelstromdichte, da der Wirbelstrom um den Riss herum fließen muss. Als Resultat ändert sich auch in diesem Bereich das von dem Wirbelstrom erzeugte Magnetfeld. Diese Änderung wird detektiert und lässt auf die Materialdefekte schließen.

In 1800 hat Sir W. Herschel die Wärmestrahlung durch die Untersuchung des durch ein Prisma geleiteten Sonnenlichts entdeckt [43, 42]. Er untersuchte die Temperatur der unterschiedlichen Farbanteile des Sonnenlichts und stellte einen Temperaturanstieg außerhalb des roten Farbbereichs fest. Die von ihm als „schwarze Wärme“ bezeichnete Strahlung ist nun als die Infrarotstrahlung bekannt. Einen großen Schritt hat 1878 S. P. Langley gemacht, indem er das Bolometer erfunden und somit eine kontaktlose Temperaturmessung möglich gemacht hat. In den 1980er Jahren wurde die neue Technologie der kontaktlosen Temperaturmessung Focal Plane Array (FPA) für den nicht militärischen Zweck freigegeben. Somit war eine bildgebende und kontaktlose Temperaturerfassung möglich. Dieses Verfahren wird als die Thermografie bezeichnet und hat in den letzten 20 Jahren durch den rasanten Technologiesprung der Infrarotkameras sehr an Bedeutung gewonnen. In dem nächsten Abschnitt wird eine Art der Thermografie vorgestellt, die für die zerstörungsfreie Rissprüfung eingesetzt wird.

## 2.1 Aktive Thermografie – ein bildgebendes Prüfverfahren

Die aktive Thermografie bezeichnet eine Reihe von Prüfverfahren, bei denen das zu prüfende Bauteil im Gegensatz zu der passiven Thermografie gezielt angeregt wird. Dabei wird die Wärmeentwicklung in dem Bauteil meistens mit Hilfe einer IR-Kamera beobachtet. Abschließend werden die aufgenommenen Daten ausgewertet und Schlüsse hinsichtlich der in dem Bauteil vorhandenen Defekte gezogen.

### 2.1.1 Ausgewählte Techniken der aktiven Thermografie

Im Folgenden werden diese Prüfverfahren der aktiven Thermografie vorgestellt, auf denen das in dieser Arbeit entwickelte und später vorgestellte Real-View-Thermography-Verfahren aufbaut.

#### 2.1.1.1 Akustische Thermografie

Die akustische Thermografie ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das Ende der 70er Jahre an der Virginia Tech Universität entwickelt wurde [44, 40, 41]. Mit diesem Verfahren können Oberflächen- und verdeckte Risse sowie Ablösungen von Beschichtungen (Delaminationen) detektiert werden.

Während der Untersuchung wird der Prüfling mit einem kurzen Ultraschallpuls angeregt, dabei liegt die Anregungsfrequenz in der Regel im Bereich von 20-40 kHz. Die elektrische Leistung der Anregungseinheit beträgt zwischen einigen hundert Watt bis einigen kW. Die Anregungszeit liegt meistens im Bereich weniger Sekunden.

Während der Anregung breitet sich die Ultraschallwelle aus, was zu Vibrationen mit Auslenkungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich führt. An den Fehlstellen kommt es dabei zu Erwärmungen, die wiederum mit einer IR-Kamera detektiert werden können. Dabei können auch Fehlstellen nachgewiesen werden, die unter einer Beschichtung liegen. Dies ist auch ein entscheidender Vorteil der akustischen Thermografie gegenüber der immer noch häufig angewendeten Farbeindringprüfung.

Die Zerstörungsfreiheit der akustischen Thermografie ist nicht a priori gegeben. D. h. eine zu hohe Anregungsenergie kann zur Beschädigung des zu prüfenden Bauteils bzw. Wachsens der vorhandenen Risse führen [17].

Bei der Firma Siemens wurden auf Basis von Ultraschweißanlagen bzw. anderen Piezoerregern mehrere SIEMAT-Prüfsysteme (SIEMens Acoustic Thermography) zur Inspektion von Gasturbinenschaufeln entwickelt (Abbildung 2.1) [45, 46]. Das



**Abbildung 2.1:** Eine bei Siemens entwickelte Prüfanlage zur Inspektion mit der akustischen Thermografie (SIEMAT).

System in der Abbildung besteht aus einer Branson 2000 aef Anregungseinheit, einer IR-Kamera und einem Messrechner. Die elektrische Leistung der Anregungseinheit beträgt 3000 W und die Anregungsfrequenz 20 kHz. Die von der IR-Kamera aufgenommene IR-Bildsequenz wird auf dem Messrechner einer Puls-Phasen-Analyse unterzogen und als Ergebnisbild dargestellt. Die anschließende Auswertung des Ergebnisbildes erfolgt auf dem Computerbildschirm.

### 2.1.1.2 Induktionsthermografie

Die ersten Entwicklungen auf dem Gebiet der Induktionsthermografie wurden bereits Ende der 70er Jahre für die Inspektion der Stahlerzeugnisse der Firma Elkem betrieben [105, 58]. Hier fährt das Stahlerzeugnis durch eine Induktionsspule durch und wird dabei lokal erwärmt. Dabei werden Inhomogenitäten bzw. Risse stärker als der Rest des Materials aufgeheizt. Der Vorgang wird mit einer IR-Kamera aufgezeichnet, wodurch die Fehlstellen sichtbar gemacht werden können [9, 8, 36, 47].

Der in der Induktionsspule (Induktor) fließende Wechselstrom baut sowohl innerhalb als auch außerhalb des Induktors ein Magnetfeld auf. Dieses Magnetfeld erzeugt wiederum in dem in der Nähe liegenden Leiter (Prüfling) eine Spannung. Folglich fließt in dem Prüfling ein Strom, wodurch sich das Bauteil bedingt durch Ohmsche Verluste erwärmt.

Um Defekte muss der induzierte Strom herumfließen. Dadurch kommt es an den Defektspitzen zu einer lokalen Erhöhung der Stromdichte, was zu einer erhöhten Wärmemenge in diesem Bereich führt. Dies kann wiederum mit Hilfe einer IR-Kamera detektiert werden. Dabei muss aber beachtet werden, dass ein Defekt den

Stromfluss ausreichend stark stören muss, um so detektiert zu werden. D. h. Defekte, die längs der Stromflussrichtung liegen und eine geringere Breite aufweisen, können nicht detektiert werden.

Darüber hinaus müssen noch weitere Effekte berücksichtigt werden, die die Detektierbarkeit der Defekte bei der Induktionsthermografie beeinflussen.

### **Skin-Effekt**

Der induzierte Strom fließt nämlich hauptsächlich an der Oberfläche des Prüflings und die Stromdichte nimmt in der Tiefe des Bauteils exponentiell ab. Dieser Effekt nimmt auch mit der ansteigenden Anregungsfrequenz zu. Dies führt dazu, dass bei sehr hohen Anregungsfrequenzen ( $>100$  kHz) der Strom nur in einer sehr dünnen Schicht unterhalb der Bauteiloberfläche fließt. Weiter ist dieser Effekt auch materialabhängig.

Dabei bestimmt die sogenannte Skin-Tiefe  $s$  eine Bauteiltiefe, bei der die Stromdichte auf  $\frac{1}{e}$  abfällt [101, 28, 83]. D. h. innerhalb dieser Tiefe werden ca. 86 % der induzierten Energie in Wärme umgesetzt. Die Skin-Tiefe ist definiert als:

$$s = \frac{1}{\sqrt{\mu_s \sigma_s \pi f}},$$

wobei  $\mu_s$  die magnetische Permeabilität,  $\sigma_s$  die elektrische Leitfähigkeit und  $f$  die Anregungsfrequenz sind.

Die Detektierbarkeit der Defekte, die tiefer als die Skin-Tiefe liegen, ist somit stark eingeschränkt.

### **Proximity-Effekt**

Zusätzlich zu dem Skin-Effekt fließt der Strom im Induktor hauptsächlich an der dem Prüfling zugewandten Seite und weiter in dem Prüfling hauptsächlich in der Nähe des Induktors. Der sogenannte Proximity-Effekt entsteht durch die gegenseitige Beeinflussung der Magnetfelder des Induktors und des Prüflings [13, 14, 52, 71].

Dadurch kann nur ein begrenzter Bereich in der Nähe des Induktors induktionsthermografisch untersucht werden. Dieser Effekt hängt sowohl von der Form und Anzahl der Wicklungen des Induktors, als auch dem Abstand Induktor–Prüfling ab. Der Einfluss dieses Effektes auf die Detektierbarkeit der Defekte ist jedoch gravierend.

Der Proximity-Effekt bestimmt also den induktionsthermografisch ausreichend

angeregten Bereich eines Prüflings. Nur in diesem Bereich ist die maximal mögliche Detektierbarkeit gewährleistet.

### 2.1.1.3 Blitzthermografie

Bei der Blitzthermografie wird die Oberfläche des zu prüfenden Bauteils mit einer Blitzlampe erwärmt. Die so eingebrachte Wärme breitet sich im Material weiter aus. Durch Delaminationen kann die Wärme schwerer ins Innere des Bauteils abfließen, folglich kühlt sich die Oberfläche an diesen Stellen langsamer ab. Dies ist bedingt durch eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit der Luft im Vergleich zu dem Bauteilmaterial [44, 105, 23].

Folglich können Delaminationen mit Hilfe einer IR-Kamera sichtbar gemacht werden.

## 2.1.2 Auswertung der thermografischen Daten

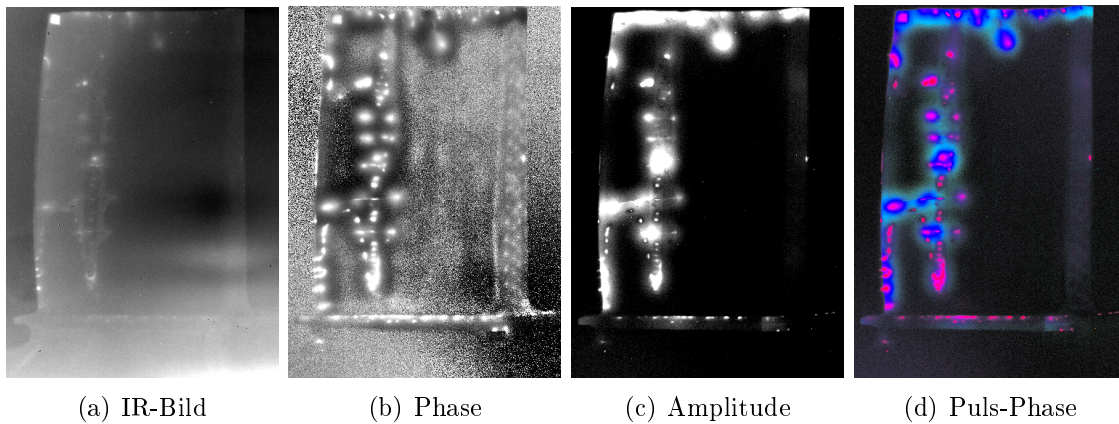
Während einer thermografischen Messung wird mit der IR-Kamera eine Bildsequenz aufgenommen. Eine Bildsequenz besteht in der Regel aus 50-200 Einzelbildern. Um die Auswertung solcher IR-Bildsequenzen zu erleichtern, wird meistens die etablierte Puls-Phasen-Analyse angewendet [44, 19, 64].

### Puls-Phasen-Analyse

Im Laufe der Puls-Phasen-Analyse wird die IR-Bildsequenz mit Sinus- und Kosinusfunktionen einer bestimmten Frequenz  $f_{pp}$  korreliert. Dabei wird die Frequenz  $f_{pp}$  oft so gewählt, dass genau eine Periode der Sinus- und Kosinusfunktion der Aufnahmezeit  $T_{IR}$  entspricht, also  $f_{pp} = \frac{1}{T_{IR}}$ . Weiter lassen sich für alle Pixel das Phasen-  $\Phi(x, y)$  (Bsp. Abbildung 2.2(b)) und Amplitudenbild  $A(x, y)$  (Abbildung 2.2(c)) berechnen, wobei  $x, y$  die Pixelkoordinaten sind. Im Hauptteil dieser Arbeit in den Abschnitten 4.3.2.2 und 4.3.3.2 wird die mathematische Herleitung der Puls-Phasen-Analyse behandelt.

Durch Anwendung der P-P-Analyse wird auch das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert. Darüber hinaus erhält man durch das Phasenbild eine Information über das Zeitverhalten der Wärmeentwicklung für jedes Pixel der IR-Bildsequenz.

Während der Auswertung werden das Phasen- und Amplitudenbild entweder separat betrachtet oder auf einem farbkodierten Puls-Phasen-Bild (Abbildung 2.2(d)), bei dem das Phasen- und Amplitudenbild im HSV-Farbraum (Helligkeit-Sättigung-



**Abbildung 2.2:** Darstellung eines Bildes einer IR-Bildsequenz (a); eines Phasenbildes (b), Amplitudenbildes (c) und farbkodierten Puls-Phasen-Bildes (d) nach einer Anwendung der Puls-Phasen-Analyse auf die IR-Bildsequenz.

Farbton) überlagert werden. Dabei entspricht der Farbton der Phase und die Helligkeit der Amplitude. Diese Art der Darstellung wird oft bei der akustischen Thermografie eingesetzt.

### 2.1.3 Anwendungsgebiete der aktiven Thermografie

Die aktive Thermografie wird in vielen Industriebereichen als Riss- und Qualitätsprüfung eingesetzt. In diesem Abschnitt werden einige der Anwendungen vorgestellt.

#### Automobilindustrie

In [92] wird der Einsatz der akustischen Thermografie zur Prüfung der Klebeverbindungen in der Karosserie vorgestellt. Durch die Zerstörungsfreiheit dieses Verfahrens können hier die Schrottkosten minimiert werden. Bei der Beurteilung der Klebeverbindungen wird auf Klebenahtunterbrechungen, unzureichend gefüllte Falze oder Poren geachtet. Wichtig ist hier aus korrosionstechnischer Sicht, dass keine Feuchtigkeit zwischen zwei verklebte Bleche eindringen kann. Die Anregung erfolgt durch eine Ultraschallsonotrode mit einem kurzen Impuls von 0,9 s. Eine IR-Aufnahme besteht aus 200 Bildern. Die Qualität der Klebeverbindung kann hinsichtlich der erwähnten Kriterien im Ergebnisbild nachgewiesen werden.

Eine interessante Anwendung wurde in [62] vorgestellt. Hier werden Schweißverbindungen in der Karosserie mittels Blitzthermografie geprüft. Mit einem Doppel-IR-Kamera-System lassen sich sowohl 2-Blech- als auch 3-Blech-Verbindungen prüfen. Die luftgekühlte Blitzanregungseinheit ist an der IR-Kamera fest montiert. Eine



Prüfung besteht aus einer fünf- bis zehnminütigen Reihe von Messungen. Dabei werden die IR-Kameras samt der Blitzanregungseinheiten robotergeführt. Im Ergebnisbild werden Unregelmäßigkeiten der Schweißverbindung erkannt sowie die Nahtlänge und -breite bewertet.

### **Eisenbahnindustrie**

Die Induktionsthermografie wird in [22] als Alternative zu der Magnetpulverprüfung bei der Prüfung der Eisenbahnneuräder vorgestellt. Mit der Induktionsthermografie können die durch fluoreszierende Prüfmittel verursachten Reinigungs- und Entsorgungskosten eingespart werden. Darüber hinaus kann so eine moderne Prüfung lückenlos dokumentiert und ggf. automatisiert werden. Hier werden die Teile nach Oberflächen- und oberflächennahen Fehlern geprüft. Eine Induktorspule wird entlang des Eisenbahnrad geführt. Die durch die induktive Anregung verursachte Wärme im Eisenbahnrad wird mit der IR-Kamera aufgenommen. Nach einer Datenverarbeitung sind die Risse im Ergebnisbild erkennbar. Zusätzlich ist auch eine Risstiefenabschätzung möglich. Dieses Verfahren ist im Vergleich zu der konventionellen Magnetpulverprüfung berührungslos und auch schneller.

### **Bauwesen**

Untersuchungen der Putzschäden an einer Kirchenfassade mit Hilfe der aktiven Thermografie wurde in [57] beschrieben. Als Anregungsquelle wurde hier die Sonneneinstrahlung genutzt. Die Untersuchung wurde im Hochsommer durchgeführt, um möglichst hohen Wärmeintrag zu bekommen. Zusätzlich wurden auch Heizlüfter und IR-Strahler verwendet. Die so erzielten thermischen Kontraste im Ergebnisbild betragen mehrere Kelvin. Putzabplatzungen und -risse waren dadurch gut zu identifizieren.

Eine weitere Anwendung der aktiven Thermografie ist im Bereich der Fernwärmetechnik zu finden [78]. Hier werden die Muffenverbindungen der Kunststoffmantelrohre überprüft. Das Kunststoffmantelrohr besteht aus einem Medienrohr aus Stahl, einer Isolierungsschicht aus Polyurethan und einem Kunststoffmantel aus Polyethylen. Die Muffenverbindung hat die Funktionen der Wärmeisolierung und der Abdichtung zweier zusammengefügter Kunststoffmantelrohre. Zum Einsatz kam hier die mit Halogenlampen optisch angeregte aktive Thermografie. Mit dem Verfahren lassen sich fehlerhafte Abdichtungen und Verklebungen gut detektieren.

### **Elektronikindustrie**

Die aktive Thermografie wird auch bei der Prüfung von optoelektronischen Bauelementen eingesetzt [56]. Die Prüfung findet im Rahmen des Produktionszyklus statt. Das Ziel ist, Risse während der Produktion möglichst früh zu erkennen und die fehlerhaften Bauteile auszusortieren. Als Anregungsquelle dient hier ein gepulster Laser mit einer Pulsdauer von 100 ms und einer Leistung von 100 mW. Das Ergebnisbild eines Bauteils wird mit einem Durchschnitts-Ergebnisbild über alle geprüften Bauteile verglichen. So werden die Risse zuverlässig erkannt.

Die laserangeregte Thermografie wird auch zur Prüfung von Lithium-Ionen-Batterien angewendet [102]. Hier werden die Batterieelektroden nach losen Partikeln untersucht. Diese können nämlich den Separator zwischen Anode und Kathode beschädigen und dadurch zu einem fehlerhaften Betrieb der gesamten Batterie führen. Die Batterieelektrode wird unter einem Linienlaser vorbeigeführt und der thermische Vorgang mit einer schnellen IR-Kamera aufgenommen. Mit dem Verfahren können Partikel ab einer Größe von 50  $\mu\text{m}$  nachgewiesen werden.

### **Luft- und Raumfahrtindustrie**

Die aktive Thermografie findet eine Anwendung bei der Untersuchung der Flugzeug-Wabenstrukturen [48, 35]. Dabei werden die Bauteile, beispielsweise Flugzeugflügel, nach Wassereinschlüssen untersucht. Die Anregung wird mit Hilfe eines Wärmestrahlers realisiert. Um möglichst große Flächen prüfen zu können, werden hochauflösende IR-Kameras eingesetzt (1280x1024 Pixel). So können Wassermengen ab 0,2 ml detektiert werden.

In [88] wird eine Prüfmethode der Schweißverbindungen der Flugzeugturbinenkomponenten beschrieben. Die Anregung erfolgt durch einen Laser und eine Blitzlampe. Die Risse in den Schweißverbindungen können hier ab einer Größe von 400  $\mu\text{m}$  detektiert werden.

### **Stahlindustrie**

Bei der Herstellung von Stahlknüppeln wird das Material großen thermischen Belastungen beim Gießen und dem anschließenden Abkühlen sowie mechanischen Beanspruchungen im Laufe des Walzprozesses ausgesetzt [54]. Dabei entstehen Materialdefekte wie Risse, Überwalzungen oder Kantenaufbrüche. Zur Prüfung solcher großen Erzeugnisse eignet sich die Inline-Induktionsthermografie sehr gut. Der Stahlknüppel durchläuft dabei eine Induktionsspule, die den Prüfling durch Induktion von

Wirbelströmen lokal erwärmt. Dieser Bereich wird von der IR-Kamera beobachtet. Die Risse sind dann in dem thermografischen Bild zu erkennen.

## **Energieindustrie**

In dem Abschnitt 2.1.1.1 wurde bereits das SIEMAT-Prüfsystem zur Inspektion der Gasturbinenschaufeln vorgestellt. Im Folgenden werden zwei weitere Anwendungen kurz erläutert.

Bei den Gasturbinenschaufeln kann die Stärke der Außenwand mit der Blitzthermografie geprüft werden [34]. Die durch Blitzlampen erzeugte Wärme dringt ins Innere der Außenwand. Durch die Messung der Zeit von der Anregung bis zu dem thermischen Gleichgewicht kann die Stärke der Außenwand bestimmt werden. Dabei dauert eine Messung einer 3 mm dicken Außenwand ca. 10-20 Sekunden. Alternativ erfolgt die Anregung durch die ins Innere der Schaufel gepresste Heißluft. Eine zeitliche Analyse der Wärmeentwicklung an der Schaufeloberfläche lässt auf die Stärke der Außenwand schließen.

Die Rotorblätter von Windrädern werden auch mit aktiver Thermografie geprüft [68]. Hier wird mit Wärmestrahlern gearbeitet. Aufgrund der Größe des Rotorblattes (bis 85 m) werden die IR-Kamera und die Anregungseinheit entlang des Prüflings gefahren. Auf diese Weise können die am häufigsten auftretenden Lufteinschlüsse in der Glasfasermatrix detektiert werden.

Der Einfluss des Prüfers auf das Ergebnis der Inspektion mit aktiver Thermografie ist bei vielen Anwendungen groß. Dies führt zu einigen Defiziten dieses Prüfverfahrens, die im weiteren Kapitel am Beispiel eines konventionellen Arbeitsablaufs während einer Inspektion analysiert werden.



# Kapitel 3

## Arbeitsablauf bei aktiver Thermografie

Eine Inspektion mit der aktiven Thermografie verläuft nach dem in den Prüfspezifikationen festgelegten Arbeitsablauf. Dieser wird nun im Folgenden behandelt und dessen bestehende Defizite werden erläutert.

Der Arbeitsablauf der aktiven Thermografie besteht aus vier Prozessabschnitten und ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt. Jeder Prozessabschnitt besteht aus mehreren Arbeitsschritten, die wiederum einer konkreten Aufgabe bzw. Ereignis während der Inspektion entsprechen.

Im Falle von Gasturbinenschaufeln, mit denen die meisten Tests in dieser Arbeit gemacht worden sind, müssen die Prüfteile zunächst aus der Maschine ausgebaut und zur Inspektionsstelle transportiert werden.

Mit dem Prozessabschnitt „Messvorbereitung“ beginnt dann der gesamte Inspektionsablauf. Hier wird der Prüfling im Rahmen des ersten Arbeitsschrittes anhand der auf dem Bauteil vorhandenen Bezeichnung identifiziert. Diese Bezeichnung wird in ein Prüfprotokoll eingetragen, damit die Ergebnisse der Inspektion später dem bestimmten Bauteil zugeordnet werden können.

Im nächsten Arbeitsschritt wird das Bauteil falls notwendig geschwärzt. Durch diese schwarze Beschichtung soll die thermische Emissivität des Prüflings erhöht und damit Reflexionen der Umgebung vermieden werden. Ob die Schwärzung durchgeführt wird, hängt von dem Material und dessen Beschaffenheit ab. Glatte und spiegelnde Oberflächen bedürfen meistens einer Beschichtung.

Anschließend wird der Prüfling in die Prüfhalterung bzw. Prüfposition platziert. Bei der akustischen Thermografie ist eine feste Verbindung mit dem Ultraschaller-

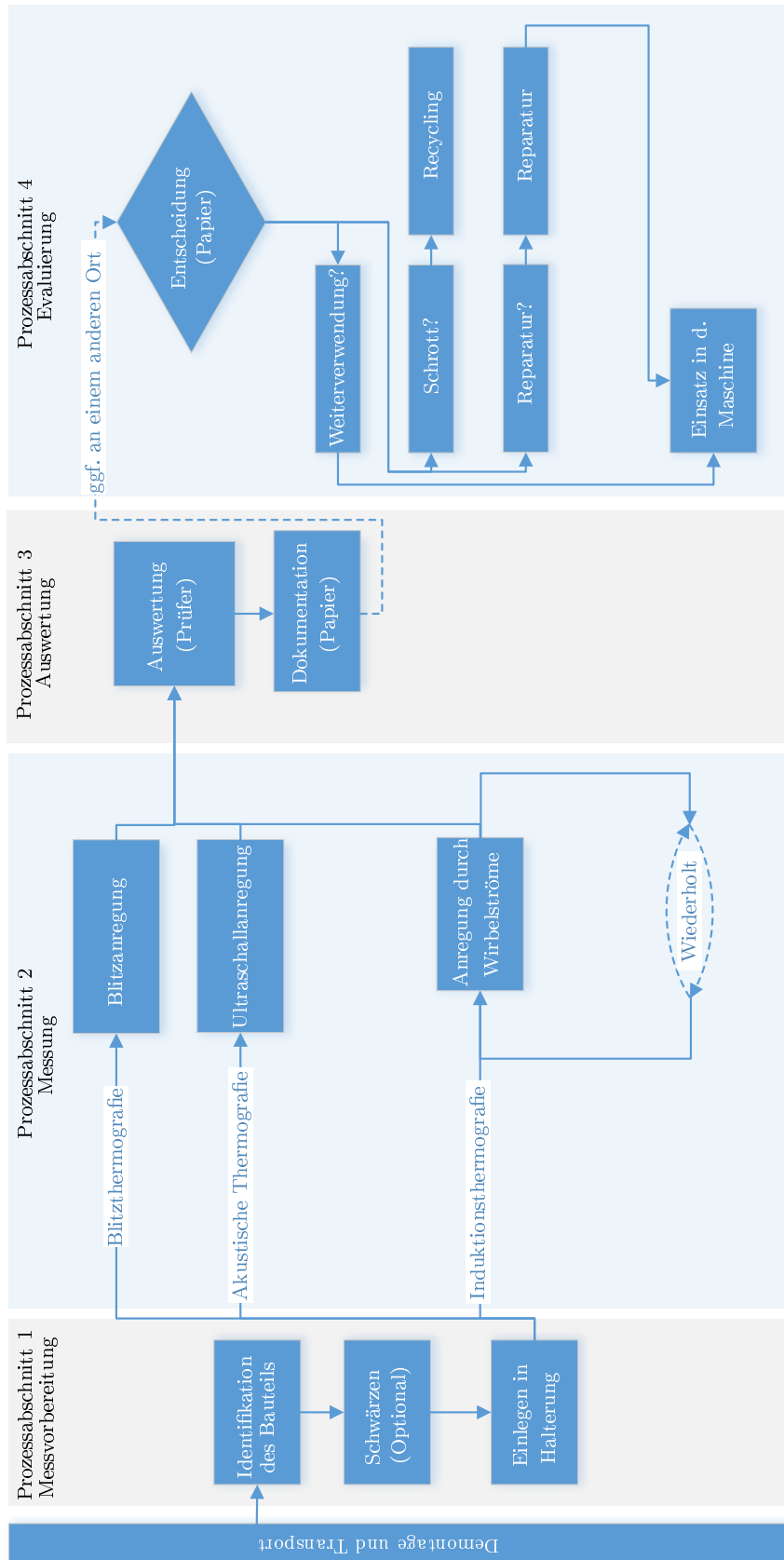


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufs bei der aktiven Thermografie.

reger notwendig. D. h. entweder muss der Erreger mit dem Prüfling verschraubt werden oder wie bei dem SIEMAT-Prüfsystem in eine Prüfvorrichtung eingespannt werden [44]. So kann der Erreger während der Messung mit einer definierten Kraft an den Prüfling angekoppelt werden. Bei der Induktions- und Blitzthermografie erfolgt die Anregung berührungslos, somit ist keine feste Einspannung nötig. Allerdings ist auch hier eine korrekte Positionierung bezüglich Anregeinheit und IR-Kamera nötig, um ein optimales Ergebnis zu erhalten.

Während des zweiten Prozessabschnittes (Messung) erfolgt eine für jedes Prüfverfahren spezifische Anregung und gleichzeitige Aufnahme des thermischen Vorgangs mit der IR-Kamera. Hierbei sind gegebenenfalls mehrere Messungen nötig, um den gesamten Prüfling abzudecken. Dies ist insbesondere bei der Induktions-thermografie der Fall.

Im nachfolgenden dritten Prozessabschnitt (Auswertung) werden die aufgenommenen thermografischen Daten durch die Software automatisch verarbeitet und die Ergebnisse auf dem Computerbildschirm dargestellt. Die Aufgabe des Prüfers besteht darin, diese Ergebnisse zu interpretieren und basierend darauf Defekte zu detektieren. Abschließend werden die gefundenen Defekte auf dem Prüfprotokoll dokumentiert. Oft wird hier auch der Prüfer die Entscheidung über das Endergebnis der Inspektion treffen. D. h. falls das Bauteil defekt ist, ob es repariert oder recycelt wird. Sollten keine Defekte detektiert worden sein bzw. liegen diese in festgelegten Toleranzen, wird das Bauteil entweder nach einer Wiederaufarbeitung oder ohne weitere Schritte wieder verwendet.

In schwierigeren Inspektionsfällen wird zusätzlich ein vierter Prozessabschnitt durchgeführt. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Messergebnisse nicht eindeutig von dem Prüfer interpretiert werden können. Im Rahmen der „Evaluierung“ werden dann die Ergebnisse durch einen zweiten Prüfer ausgewertet. In den meisten Fällen ist dies ein besser qualifizierter Experte, der die endgültige Entscheidung über das Bauteil trifft. Die Evaluierung findet dabei nicht notwendigerweise am selben Ort statt.

### **3.1 Defizite der aktiven Thermografie**

Der vorgestellte Arbeitsablauf der aktiven Thermografie weist jedoch einige Defizite auf, die die Ergebnisse der Inspektion negativ beeinflussen können.

Das erste Defizit betrifft die Schwärzung der Bauteiloberfläche. Diese wird nämlich soweit dem Autor bekannt, ausschließlich per Hand durch den Prüfer auf den

Prüfling aufgetragen. Dabei kann es zu Inhomogenitäten in der Beschichtung kommen, d. h. stellenweise kann diese zu dick bzw. zu dünn aufgetragen sein. Falls diese Inhomogenitäten zu stark ausgeprägt sind, sind sie später deutlich im Ergebnisbild als dunkle Flecken oder Reflexionen der Umgebung zu sehen. Dies stört die Auswertung eines solchen Ergebnisbildes und kann zu Fehlbewertungen durch den Prüfer führen.

Die Qualität der Schwärzung wird bisher nur durch den Prüfer bewertet. Dieser betrachtet die Beschichtung und entscheidet, ob sie qualitativ ausreichend gut ist. Das bedarf einer großen Erfahrung des Prüfers und ist auch fehleranfällig. Denn wie stark die Inhomogenitäten das Ergebnisbild dann beeinflussen, lässt sich nicht immer mit dem Auge einschätzen. Oft stellt der Prüfer erst während der Auswertung fest, dass die Qualität der Beschichtung nicht gut ist und störende Bildartefakte verursacht. In einem solchen Fall muss die Beschichtung neu aufgebracht und die Prüfung wiederholt werden. Der Einfluss des Prüfers auf das Endergebnis der Inspektion ist bereits an dieser Stelle groß, die Qualifikation und nicht zuletzt die Tagesform des Prüfers sind für die richtige Bewertung der schwarzen Beschichtung entscheidend.

Die nachfolgende Messung wird über einen Messrechner gesteuert. Hier sind mehrere Varianten denkbar: bei stationären Prüfsystemen wird meist ein Starttaster verfügbar sein (bei der akustischen Thermografie kommen sogar oft zwei Taster zur Anwendung, damit sich der Prüfer nicht versehentlich die Finger quetschen kann). Bei mobilen Systemen oder fliegenden Aufbauten wird entweder ein per Kabel bedienbarer Taster verwendet oder die Messung muss vom Messrechner aus gestartet werden. Dieser muss sich dann entweder in unmittelbarer Nähe der Prüfstelle befinden oder der Prüfer muss die Prüfstelle jedes Mal verlassen, um die Messung zu bedienen. Auch eine potenzielle Notabschaltung der Messung muss über den Messrechner bzw. einen separaten Schalter erfolgen.

In allen Fällen wird der Prüfer durch die Bedienung der Messung von dem Prüfling abgelenkt. Dadurch wird seine Konzentration zusätzlich unnötig beansprucht.

Während der eigentlichen Messung erhält der Prüfer normalerweise keine Rückmeldung bezüglich deren Verlauf. D. h. der Prüfer kann schwer einschätzen ob die Anregung korrekt verläuft. Besonders bei Verfahren, bei denen die Aufnahmedauer deutlich länger als die Anregedauer ist, also insbesondere bei der akustischen Thermografie, der Blitz- sowie der LED-Thermografie (siehe Abschnitt 4.3.2.1), ist die Phase der Messung besonders kritisch, bei der die Anregung nicht mehr aktiv ist, aber die IR-Aufnahme noch ausgeführt wird, um für eine verbesserte Auswertung auch die Verteilung der Wärme nach dem Abschalten der Anregung auszuwerten. Da



der Prüfer den Endpunkt der Messung nur grob einschätzen kann, kann es bedingt durch versehentliche Bewegung des Prüfers im Bereich des Prüflings zu Reflexionen im Ergebnisbild kommen. Eine solche Messung muss dann wiederholt werden.

Eine ähnliche Situation kann bei sehr langen Lock-in-Messungen vorkommen, was oft bei den Untersuchungen der Faserverbundwerkstoffe mit der LED- Thermografie der Fall ist. Hier wird das Prüfteil mehrmals für einen Zeitdauer  $t_1$  angeregt und anschließend für die Dauer  $t_2$  gewartet, bis die Wärme sich ausgebreitet hat. Diese Phase, bei der die LED-Lampen abgeschaltet sind, kann viele Sekunden lang sein. Der Prüfer kann dies fälschlicherweise als abgeschlossene Messung interpretieren und dadurch wie oben beschrieben das Ergebnis verfälschen.

Besonders schwierig ist eine Messung mit der Induktionsthermografie. Denn aufgrund des Proximity-Effektes ist nur in unmittelbarer Nähe des Induktors eine ausreichende Anregung des Prüfteils gegeben. Dies führt dazu, dass mehrere Messungen durchgeführt werden müssen, um den Prüfling komplett zu untersuchen. Der Induktor wird dabei von dem Prüfer manuell nach jeder Messung verschoben. Er hat dabei keine Information darüber, welche Bereiche des Bauteils bereits geprüft wurden. Folglich kann der Prüfer nach einigen Messungen schnell den Überblick verlieren, was zu nicht geprüften Bereichen des Bauteils führen kann.

Diese Einzelmessungen, die jeweils nur in einem schmalen Bereich des Prüflings relevante Daten enthalten, müssen vom Prüfer nacheinander ausgewertet werden. Da der Rest des üblicherweise ausgewerteten Phasenbildes (Abschnitt 2.1.2) aufgrund der geringen Anregungsamplitude nur Rauschen enthält, ist die Auswertung einer Reihe solcher Ergebnisbilder für den Prüfer mühsam und erfordert eine hohe Konzentration, die mit der Zeit natürlich nachlässt.

Die Auswertung der Ergebnisbilder erfolgt heutzutage auf dem Computerbildschirm. Das bedeutet in der Praxis, dass jede Anzeige, die nicht sofort auf dem Monitor klassifiziert werden kann, auf dem Bauteil lokalisiert und dann bewertet wird. Der Prüfer entscheidet dabei, ob es sich um einen auf der Oberfläche sichtbaren tatsächlichen Defekt oder nur eine Scheinanzeige handelt. Sollte auf der Bauteiloberfläche kein erkennbares Merkmal zu sehen sein, kann es auf eine Beschädigung im Inneren des Bauteils hindeuten. Der Prüfer ist also gezwungen, das Ergebnisbild auf dem Computerbildschirm mit dem Prüfling mehrmals zu vergleichen. Das ist zeitintensiv und mühsam, wodurch die Konzentration des Prüfers ein weiteres Mal strapaziert wird.

Der letzte optionale Prozessabschnitt, die Evaluierung, erfolgt meistens zu einem späteren Zeitpunkt und oft einem anderen Ort. Das bedeutet, dass der durchfüh-

Nr.	Defizit
1	Sichtprüfung der optionalen manuellen Schwärzung
2	Bedienung der Messung lenkt vom Prüfling ab
3	Keine Rückmeldung während der Messung
4	Keine Information über Messabdeckung bei Induktionsthermografie
5	Auswertung ohne direkten Bezug zum Prüfling
6	Auswertung mehrerer Ergebnisbilder bei Induktionsthermografie
7	Evaluierung (optional) mit manuellem Vergleich Bauteil-Prüfprotokoll

**Tabelle 3.1:** Zusammenstellung der Defizite des konventionellen Arbeitsablaufs der aktiven Thermografie.

rende Experte die Auswertungsergebnisse des Prüfers mit dem Prüfling noch einmal vergleichen muss. Es werden also wieder alle relevanten bzw. von dem Prüfer als umstritten markierten Anzeigen auf dem Prüfprotokoll mit dem Prüfling verglichen. Und auch hier ist die Lokalisierung einer Anzeige auf dem Bauteil insbesondere bei vielen Anzeigen zeitintensiv und fehleranfällig.

In Tabelle 3.1 sind alle oben genannten Defizite aufgelistet.

## 3.2 Methoden zur Beseitigung der Defizite der aktiven Thermografie

Im Folgenden werden aus der Literatur bekannten Methoden vorgestellt, die manche der genannten Defizite der aktiven Thermografie beseitigen. Im letzten Abschnitt des Kapitels wird dagegen die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Beseitigung aller davor genannten Defizite geschildert – das Real-View-Thermography-Verfahren.

### 3.2.1 Automatisierung in der aktiven Thermografie

Dieser Ansatz dient der Entlastung des Prüfers durch eine teilautomatisierte Inspektion. So sollte sich der Prüfer nur auf das Nötigste konzentrieren. In den meisten Fällen bedeutet dies, dass der Prüfer dann nur die Auswertung durchführt.

In [81] wird von der robotergestützten Induktionsthermografie zur Inspektion von Flugzeugstrukturen berichtet. Hier wird ein Prüfkopf durch einen Roboter über einen Flugzeugrumpf geführt. In dem Prüfkopf ist eine IR-Kamera und ein Induktor integriert, sodass der Rumpf induktionsthermografisch auf Ermüdungsrisse untersucht

werden kann. Die Auswertung der vielen Ergebnisbilder soll hier mit Hilfe nicht näher spezifizierter Algorithmen teils automatisch verlaufen. Somit übernimmt dabei der Prüfer nur die Überwachung des ganzen Prozesses und greift nur in Fällen des Versagens der Automatik (Fehler im Ergebnisbild sichtbar, aber nicht automatisch erkannt) ein.

Eine ebenfalls interessante Lösung wird in [63] beschrieben. Hier werden Kurbelwellen eines PKW-Motors mit Hilfe der robotergestützten Laserspot-Thermografie nach Defekten untersucht. Der Roboter bewegt den Prüfling unter einem Laserspot so, dass das gesamte Bauteil punktweise erhitzt wird. Der Vorgang wird mit einer stationären IR-Kamera registriert. Dadurch lassen sich die Risse ähnlich wie bei der Induktionsthermografie durch Diskontinuitäten der Temperaturverläufe detektieren.

In [21] wird eine automatisierte Halogenlampenthermografie zur Untersuchung großflächiger Flugzeugteile aus CFK vorgestellt. Der eingesetzte Prüfkopf besteht hier aus der IR-Kamera und zwei Halogenlampen. Die ganze Einheit ist an einem Roboter angebracht und kann jeden Bereich des Bauteils erreichen. Ein 3D-Modell des Prüflings ist in der Messsoftware abgespeichert und basierend darauf kann eine grobe Positionierung des Prüfkopfs erfolgen. Eine genaue Positionierung erfolgt durch Projektion einer Positionierungshilfe durch einen an der Decke der Prüfhalle angebrachten Laser. Diese Positionierungshilfe wird von der IR-Kamera erfasst, sodass eine automatische und genaue Positionierung erfolgen kann. So können die in den Ergebnisbildern gefundenen Defekte sehr präzise auf dem Bauteil lokalisiert werden. Automatische Auswerte-Algorithmen sind bei diesem Messsystem auch implementiert worden.

Diese automatisierten Messsysteme der aktiven Thermografie beseitigen die im Abschnitt 3.1 genannten Defizite 2 bis 5 des konventionellen Arbeitsablaufs der thermografischen Untersuchung. Bei der automatischen Auswertung verlieren zusätzlich die Defizite 5 und 6 an Bedeutung, falls keine Kontrolle der automatisch durchgeführten Auswertung durch den Prüfer vorgesehen ist. Allerdings bleiben die Defizite 1 und 7 weiterhin bestehen. Der Einfluss des Prüfers auf das Endergebnis wird auf ein Minimum reduziert. Dadurch wird die Inspektion mit der aktiven Thermografie zuverlässiger, da der menschliche Aspekt eine wesentlich geringere Rolle spielt.

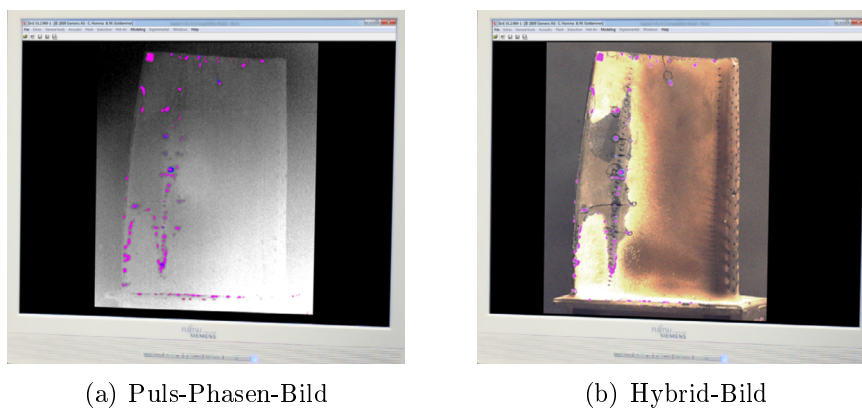
Die eingesetzte Technik ist jedoch kostenintensiv und komplex. Der Roboter muss für jede Bauteilart neu programmiert und erprobt werden. Oft muss die Robotereinheit sogar speziell für die konkrete Problemstellung entwickelt werden. Das führt dazu, dass sich eine Automatisierung eines Messsystems der aktiven Thermografie erst bei einer sehr hohen Zahl der zu prüfenden Teile lohnt oder eine manuelle

Prüfung bedingt durch große Masse und schlechte Zugänglichkeit des Prüflings ausgeschlossen ist. In solchen Fällen handelt es sich meistens um sehr teure Bauteile, die hohe Automatisierungskosten rechtfertigen.

### 3.2.2 Hybrid-Kamera zur Verbesserung der Fehlerbewertung

Die Hybrid-Kamera wurde bei der Firma Siemens entwickelt und bereits industriell eingesetzt [23]. Sie kombiniert den RGB- und IR-Spektralbereich zu einem gesamten Bild und zwar so, dass beide Informationen aus dem gleichen Blickwinkel aufgenommen werden. Dadurch können die Anzeigen des IR-Bildes ergänzt durch die RGB-Information besser interpretiert werden.

In der Abbildung 3.2 ist ein Vergleich zwischen einem konventionellen farbkodierten Puls-Phasen-Bild 3.2(a) und einem Hybrid-Bild mit der überlagerten RGB-Information zu sehen. Durch diesen zusätzlichen Spektralbereich können dem Hybrid-



**Abbildung 3.2:** Ein Vergleich zwischen einem konventionellen farbkodierten Puls-Phasen-Bild (a) und einem Hybrid-Bild mit der überlagerten RGB-Information (b), die für den Prüfer auf einem Computerbildschirm zur Verfügung stehen. Die Messung wurde mit akustischer Thermografie durchgeführt.

Bild neue Erkenntnisse entnommen werden. So ist beispielsweise die große Abplatzung der keramischen Wärmedämmschicht im linken Bereich des Bauteils nur im Hybrid-Bild zu sehen. Die meisten magentafarbenen kleinen Anzeigen befinden sich exakt am Rande der noch verbliebenen Beschichtung und können so sofort auf Delaminationen zurückgeführt werden. Außerdem können so auch Scheinanzeigen erkannt werden, die durch Verschmutzungen hervorgerufen wurden (linker Rand der Schaufel).

Die Hybrid-Kamera verbessert somit die Qualität der Auswertung (Defizit 5), da die Ursachen der jeweiligen Anzeigen im kombinierten Thermografiebild besser

erkennbar sind. Nicht immer kann dadurch jedoch auf einen Vergleich zwischen dem Ergebnisbild und dem Prüfling verzichtet werden.

Zudem werden durch den Einsatz der Hybrid-Kamera die restlichen angesprochenen Defizite der Inspektion mit aktiver Thermografie, also 1–4 und 6–7, nicht behoben. Der menschliche Aspekt ist auch hier noch sehr stark ausgeprägt.

### 3.2.3 Unterstützung des Prüfers durch flexible Projektion von Informationen

In dieser Arbeit wird vom flexibelsten und dadurch ungünstigsten Fall ausgegangen, nämlich der Inspektion von Kleinserien-Bauteilen. Eine Einführung der Automatisierung ist in diesem Fall nicht rentabel. Die geschilderten Defizite 1 bis 7 sollen aber dennoch beseitigt werden. Die Hybrid-Kamera verbessert zwar die Auswertung der Ergebnisse, hat aber keinen Einfluss auf die restlichen Defizite.

Es muss also eine Lösung gefunden werden, die zwar alle erkannten Defizite der aktiven Thermografie beseitigt, aber im Vergleich zur Automatisierung deutlich günstiger ist und einfacher in den aktuellen Arbeitsablauf integriert werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Verfahren vorgeschlagen, das eine Projektion der messrelevanten Informationen direkt auf den Prüfling ermöglicht. Welche Informationen projiziert werden, hängt von dem jeweiligen Arbeitsschritt ab. Dabei soll der Prüfer eine Unterstützung während des ganzen Arbeitsablaufs bekommen, damit er während der thermografischen Untersuchung weniger Aspekte berücksichtigen muss. So kann er seine Konzentration länger auf die eigentliche Beurteilung verwenden.

Darüber hinaus ist ein alternativer Modus zu dem konventionellen computerbasierten Interaktionsmodus vorgesehen. Demnach soll der Prüfer alle Eingaben direkt in einem projizierten virtuellen Menü betätigen können. So wird der Computerbildschirm überflüssig und die Konzentration des Prüfers auf den Prüfling gerichtet.

Das Ziel des so genannten „Real-View-Thermography“-Verfahrens ist es also, durch eine gezielte Unterstützung des Prüfers, die Reproduzierbarkeit der Inspektion zu erhöhen und die Qualität der Bewertung zu steigern. Die Prüfung soll dabei so weit wie möglich intuitiv erfolgen, um möglichst unabhängig von der Tagesform des Prüfers zu sein. Dies soll dadurch erfolgen, dass mit dem Einsatz des RVT-Verfahrens die Defizite der aktiven Thermografie soweit wie möglich beseitigt werden.

In der Literatur ist eine Projektion bei der passiven Thermografie auf Objekte bekannt [49]. Hier wird mit einer IR-Kamera ein thermisches Bild eines Objekts

erstellt und dieses dann in Form eines Falschfarbenbildes auf das Objekt projiziert. So wird die aktuelle Temperatur auf dessen Oberfläche sichtbar gemacht.

Das RVT-Verfahren geht einen entscheidenden Schritt weiter. Hier soll eine konsequente Verbindung zwischen Unterstützung des Prüfers, intuitiver Bedienung der Messung, verbesserter Auswertalgorithmen und vereinfachter Fehlerklassifizierung hergestellt werden.

Das RVT-Verfahren wird im nächsten Kapitel ausführlich beschrieben.

# Kapitel 4

## RVT-Verfahren in der zerstörungsfreien Prüfung mit aktiver Thermografie

### 4.1 Einführung in das RVT-Verfahren

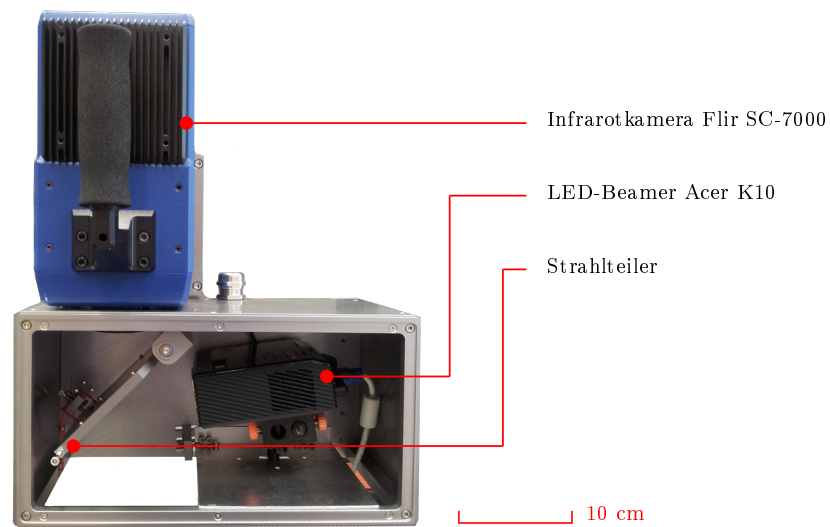
Das RVT-Verfahren besteht aus den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Hard- und Softwarekomponenten, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Die Hardwarekomponenten bilden zusammen die sogenannte RVT-Einheit (Abschnitt 4.1.1). Diese ermöglicht eine Aufnahme einer Bildsequenz im Infrarotspektrum sowie eine Projektion der Bilder im für Menschen sichtbaren Spektrum. Die RVT-Einheit ist an einen Messrechner angeschlossen, auf dem die RVT-Software betrieben wird (Abschnitt 4.1.2). Diese steuert die RVT-Einheit sowie die bei einer Inspektion eingesetzte Messapparatur, verarbeitet Messdaten und führt die Algorithmen des RVT-Verfahrens aus (dazu im Abschnitt 4.3).

#### 4.1.1 RVT-Einheit – Aufbau und Komponenten

Die RVT-Einheit besteht aus drei wesentlichen Komponenten: einer Infrarotkamera, einem Beamer und einem Strahlteiler (Abbildung 4.1). Diese sind in ein Gehäuse integriert und somit als eine Einheit einsetzbar.

In dieser Arbeit wurde eine Flir SC-7000 IR-Kamera eingesetzt. Derer aus Indiumantimonid (InSb) angefertigter Sensor löst  $640 \times 512$ -Pixel auf und wird im Spektralbereich von  $3 - 5 \mu\text{m}$  betrieben. Die maximale Aufnahmefrequenz im Voll-

**Abbildung 4.1:** Aufbau der RVT-Einheit, die aus drei Hauptkomponenten besteht: einer IR-Kamera, einem LED-Beamer und einem Strahlteiler.



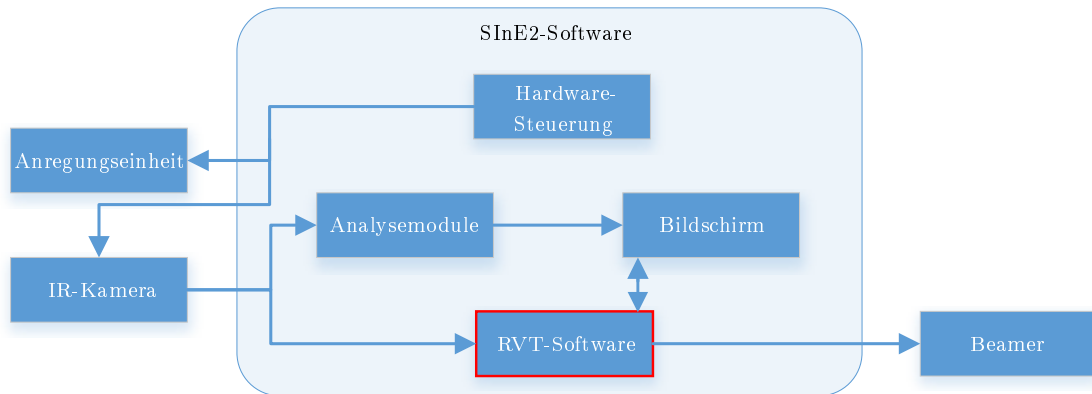
bildmodus beträgt 100 Hz. Die Anbindung an den Messrechner erfolgt über eine Ethernet-Schnittstelle [29].

Der eingesetzte Acer K10 LED-Beamer löst  $858 \times 600$ -Pixel auf. Der größte Vorteil dieses Beamers liegt in dessen Kompaktheit (Abmessungen  $127 \times 122 \times 49 \text{ mm}^3$  und Gewicht 550 g), wodurch er problemlos in dem gemeinsamen Gehäuse untergebracht werden kann. Darüber hinaus entfällt durch die eingesetzte LED-Beleuchtung ein Lampenwechsel, wodurch im Betrieb keine weiteren Materialkosten entstehen. Negativ fällt jedoch seine im Vergleich zu Lampenbeamern geringe Lichtstärke auf, was den Einsatz in hellen Umgebungen beeinträchtigt. Momentan sind aber bereits LED-Geräte auf dem Markt, die zwar eine deutlich höhere Lichtstärke aufweisen aber auch größere Abmessungen haben. Dadurch wäre auch künftig ein Einsatz in helleren Umgebungen möglich. Der Beamer ist über eine VGA-Schnittstelle mit dem Messrechner verbunden.

Der Strahlteiler sorgt wiederum dafür, dass beide Geräte auf eine gemeinsame optische Achse ausgerichtet werden können. Dadurch ist eine perfekte Überlagerung der Projektion mit dem Prüfling ohne eine geometrische Anpassung möglich. Hier wurde ein doppelseitig polierter Siliziumwafer eingesetzt. Dieser dient im sichtbaren Lichtspektrum als ein Spiegel, wogegen er im für die IR-Kamera relevanten Infrarotspektrum über 60 % der Strahlung transmittiert [23].

Der Beamer wird in einem ersten manuellen Ausrichtungsschritt über Stell-schrauben in dem Gehäuse so positioniert, dass sein Bildfeld vollständig das Bildfeld der IR-Kamera abdeckt. Die Feinkalibrierung der beiden Geräte erfolgt anschließend softwaretechnisch und wird im Abschnitt 4.1.3 beschrieben.





**Abbildung 4.2:** Struktur der in der Arbeit eingesetzten Software. Die RVT-Software (roter Rahmen) ist für die Umsetzung des RVT-Verfahrens verantwortlich. Benutzeraktivitäten auf dem Bildschirm (z. B. eine durch den Benutzer erfolgte Markierung einer Stelle) werden auch kontinuierlich an die RVT-Software weitergereicht.

Die RVT-Einheit wird vom Messrechner aus durch die RVT-Software gesteuert.

#### 4.1.2 RVT-Software – Funktion

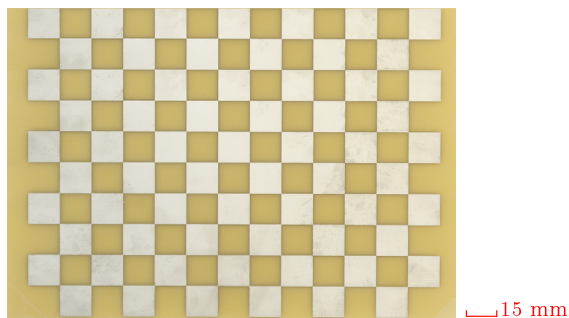
Die RVT-Software wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und in die von der Firma Siemens entwickelte Thermografie-Software SInE<sup>2</sup>-Software integriert (siehe Abbildung 4.2). Die SInE<sup>2</sup>-Software ermöglicht eine durch Softwaremodule realisierte Steuerung zweier Gerätetypen: einer IR-Kamera und einer Anregungseinheit. Allerdings kann gleichzeitig nur jeweils ein Gerät eines Typs angesprochen werden. Die Steuerung eines Beamers war vorher nicht vorgesehen und wird daher direkt von der RVT-Software übernommen.

Daher wurde auch eine Beamerschnittstelle in die RVT-Software implementiert. Dabei wurden vor allem Bildbearbeitungsfunktionen wie Translation, Rotation, Skalierung und Spiegelung eingebaut. Diese Funktionen werden bei einer Kalibrierung benötigt (siehe Abschnitt 4.1.3), um das Beamerbild genau an das IR-Kamerabild anzupassen. Hier wurde auch eine Trapezkorrektur implementiert, um die trapezförmige Verzerrung des schräg projizierenden Beamers auszugleichen.

Bei der SInE<sup>2</sup>-Software können alle Messparameter eingestellt und an die angebundene IR-Kamera und Anregungseinheit übertragen werden. Darüber hinaus können die beiden Geräte auch gleichzeitig getriggert werden, um eine mit der Anregung synchronisierte IR-Aufnahme durchführen zu können.

Die IR-Aufnahme wird in Form einer Bildsequenz an die SInE<sup>2</sup>-Software übertragen. Hier werden diese sowohl an SInE<sup>2</sup>-Analysemodule als auch an die RVT-

**Abbildung 4.3:** In der Arbeit verwendetes Kalibrierungsmuster, das für eine Kalibrierung des IR-Kamera- und Beamerbildes zueinander eingesetzt wurde. Das Schachbrettmuster wurde durch Auftragen einer Metallschicht auf ein Substrat hergestellt. Beide Materialien weisen sowohl unterschiedliche Wärmediffusivitäten als auch Emissivitäten auf, wodurch das Muster von der IR-Kamera abgebildet werden kann.



Software weitergereicht. Die RVT-Software führt die Algorithmen des RVT-Verfahrens aus, die auch später im Abschnitt 4.3 erläutert werden. Die Ergebnisse der im Zuge des RVT-Verfahrens durchgeführten Datenverarbeitung werden abschließend an den Beamer geschickt und auf einen Prüfling projiziert. Darüber hinaus besteht zwischen der RVT-Software und dem Bildschirmmodul ein bidirektionaler Datenaustausch. Dadurch können Benutzereingaben auf dem Bildschirm wie z. B. Markierung einer Stelle von der RVT-Software abgefangen werden. So können beispielsweise die markierten Stellen auf den Prüfling projiziert werden. Und auch die RVT-Software kann Bilder auf dem Bildschirm einblenden und zwar unabhängig von einer aktuellen Projektion.

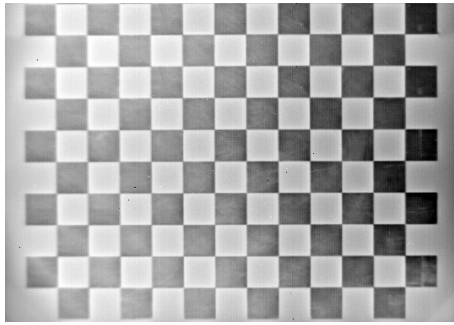
Alle Parameter, Einstellungen und Funktionen der RVT-Software sind von SInE<sup>2</sup>-Software aus zugänglich.

### 4.1.3 Kalibrierung und Projektionsgenauigkeit

Bevor die RVT-Einheit eingesetzt werden kann, muss eine Kalibrierung des IR-Kamera- und Beamerbildes zueinander durchgeführt werden. Infolge deren werden die beiden Bilder zur Deckung gebracht, sodass eine örtlich korrekte Projektion auf einen Prüfling gewährleistet werden kann.

Für die Kalibrierung wird ein spezielles Kalibrierungsmuster verwendet. Dieses wird durch das Auftragen einer Aluminiumschicht auf ein Substrat hergestellt, sodass ein Schachbrettmuster entsteht (Abbildung 4.3). Entscheidend ist hier, dass die Aluminiumschicht und das Substrat unterschiedliche thermische Eigenschaften aufweisen, damit sie im IR-Kamerabild gut trennbar sind, wenn in das Kalibrierungsmuster Wärme eingebracht wird (Abbildung 4.4).

Die Kalibrierung wird bei einem definierten Arbeitsabstand durchgeführt – dem



**Abbildung 4.4:** *Phasenbild des verwendeten Kalibrierungsmusters nach einer Anregung mit Blitzlampen.*

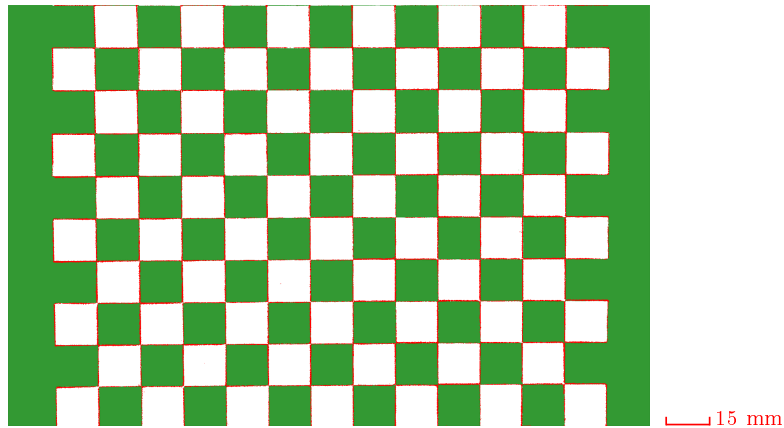
Abstand zwischen der RVT-Einheit und dem Prüfling. Dieser wurde auf 80 cm festgelegt, da diese Distanz  $\pm 20$  cm im Labor meistens verwendet wird.

Das Kalibrierungsmuster wird mit zwei starken Studioblitzlampen von links und rechts beleuchtet und dadurch erwärmt. Dieser Vorgang wird mit der IR-Kamera aufgenommen und die Aufnahmen anschließend einer Puls-Phasen-Analyse unterzogen. Im Phasenbild sind wiederum die Unterschiede der Wärmediffusivität zwischen der Aluminiumschicht und dem Substrat sehr gut sichtbar. Im nächsten Schritt wird dieses Phasenbild auf das Kalibrierungsmuster projiziert.

Hier erfolgt die eigentliche (manuelle) Kalibrierung. Dabei wird das Beamerbild durch die in der RVT-Software verfügbaren Bildtransformationsfunktionen (im letzten Abschnitt beschrieben) in Deckung mit dem Kalibrierungsmuster gebracht. Anschließend werden die Einstellungen gespeichert, sodass beim nächsten Einsatz keine erneute Kalibrierung nötig ist.

So kann im relevanten IR-Kamerabildfeld eine Genauigkeit von einem Beamerbild-Pixel erreicht werden. Bei einem Arbeitsabstand von 80 cm entspricht das einer Genauigkeit von ca. einem Millimeter. Das ist für das RVT-Verfahren ausreichend, da bei der angewendeten Messkonfiguration (Arbeitsabstand und Objektivbrennweite der IR-Kamera) Defekte, die weniger als zwei Millimeter auseinander liegen, im Ergebnisbild örtlich nicht mehr eindeutig trennbar sind.

Die mit dieser Kalibrierungsmethode erreichte Projektionsgenauigkeit ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Hierfür wurden das Kalibrierungsmuster und die Projektion des Schachbrettmusters nach der Kalibrierung mit einem Fotoapparat abgelichtet. Die beiden Bilder wurden nach einer Binarisierung übereinander gelegt. So kann die Ungenauigkeit der Projektion sichtbar gemacht werden. Mit grüner Farbe ist dabei das eigentliche Schachbrettmuster dargestellt. In Rot dagegen sind die Stellen gekennzeichnet, wo die Projektion mit dem Schachbrettmuster nicht übereinstimmt. Bezogen auf das Beamerbild ist die Ungenauigkeit an keiner Stelle höher als ein Beamerbild-Pixel, was eine für die RVT-Anwendung ausreichende Qualität der Ka-



**Abbildung 4.5:** Darstellung der Projektionsgenauigkeit des eingesetzten Beamers nach der Kalibrierung. Mit rot ist die Ungenauigkeit dargestellt. Diese ist bei der Projektion maximal ein Pixel groß, was bei einem Arbeitsabstand von 80 cm einer Positioniergenauigkeit von 1 mm entspricht. Dies ist für die RVT-Anwendung absolut ausreichend.

librierung bezeugt.

## 4.2 Charakterisierung der Prüflinge

Im Weiteren werden drei Bauteile vorgestellt, die bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimenten verwendet wurden.

Die ausgewählte Gasturbinenschaufel weist genügend reale Defekte auf, um eine geplante Analyse der Genauigkeit der Klassifikation der Defekte durchführen zu können (Abschnitt 5.1). Dabei spielt nur die Art der Defekte und nicht deren Abmessungen eine Rolle.

Bei den zwei weiteren Bauteilen, dem Radaufhänger und der Verdichterschaufel, wurden dagegen Defekte künstlich präpariert, um eine definierte Anzahl der Defekte bestimmter Größen zur Verfügung zu haben. Dies ist für eine Reihe der beabsichtigten Fehlerdetektionsanalysen notwendig (Abschnitt 5.2). Hier wären ansonsten sehr viele Prüflinge nötig, um ein vergleichbares Spektrum an realen Defekten zu erhalten.

Bei den Verdichterschaufeln wird zusätzlich eine Analyse der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit durchgeführt.

### 4.2.1 Gasturbinenschaufel

Die in dieser Arbeit verwendeten Gasturbinenschaufeln (Abbildung 4.6) werden in Gasturbinen der Firma Siemens eingesetzt und während des Betriebs einer hohen



**Abbildung 4.6:** *Abbildung einer in dieser Arbeit verwendeten Gasturbinschaufel. Diese weist viele im Betrieb entstandenen Defekte (Risse, Delaminationen und Verschmutzungen) auf und ist dadurch für eine Analyse der Klassifikationsgenauigkeit der Defekte gut geeignet (Abschnitt 5.1).*

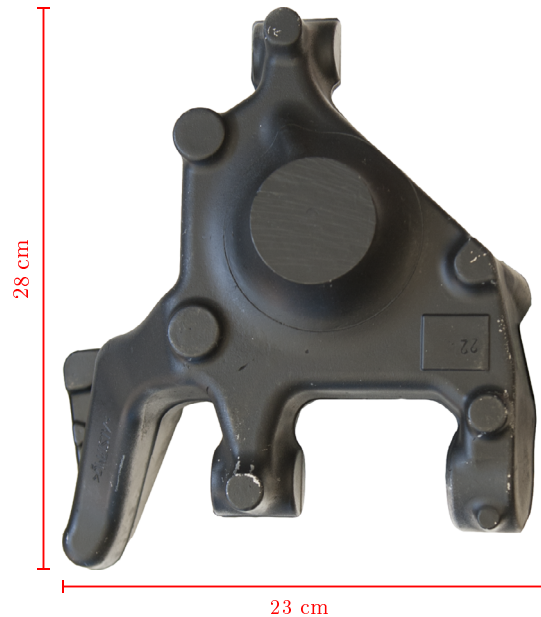
mechanischen und thermischen Belastung ( $> 1000\text{ °C}$ ) ausgesetzt. Um diesen schwierigen Bedingungen gerecht zu werden, werden im Herstellungsprozess hochfeste Legierungen wie z. B. Inconel (Nickel-Kobalt-Basis) angewendet [44]. Darüber hinaus verfügen die Schaufeln im Inneren über zahlreiche Kühlkanäle, um eine thermische Zerstörung im Betrieb zu vermeiden. Durch diese Maßnahmen werden die Kosten für solch ein Bauteil sehr hoch und erreichen den Wert eines kleinen PKWs.

Trotz des hohen Herstellungsaufwands kann es bei diesen Schaufeln nach vielen Betriebsstunden zu einer Defektbildung kommen. Angesichts der immensen Bauteilkosten ist es wirtschaftlich praktikabel, eine Gasturbine in vorgegebenen Serviceintervallen komplett zu zerlegen und jedes einzelne Bauteil zu inspizieren. Dabei wird jede Schaufel einer genauen Untersuchung unterzogen und in Abhängigkeit ihres Zustands weiter verwendet, repariert oder ersetzt.

Es gibt drei Anzeigearten, die während einer Inspektion unterschieden werden:

- Risse – eine Unterbrechung des Materials. Die gefährlichste Fehlerart, da diese zum Bruch des Bauteils und schließlich zu einer starken Beschädigung der Turbine führen können.
- Delaminationen – eine Beschädigung der thermischen Beschichtung der Schaufel (engl. TBC: Thermal barrier coating). Dabei handelt es sich um Stellen wo diese Beschichtung auf dem Bauteil nicht mehr richtig haftet. Die Delaminationen können zu einer Überhitzung und folglich Zerstörung des Bauteils führen. Diese Beschichtung kann erneuert werden.

**Abbildung 4.7:** *Abbildung eines Radaufhängers. In das Bauteil wurden 32 Bohrungen eingebracht, mit einer Spachtelmasse verschlossen und anschließend mit einer schwarzen Beschichtung versehen. Diese sind somit von der Oberfläche aus nicht sichtbar.*



- Scheinanzeigen – sind keine echten Defekte, werden jedoch fälschlicherweise als solche erkannt. Hier handelt es sich vor allem um Verschmutzungen, die beim Betrieb, der Demontage oder dem Transport entstehen können. Im Laufe der Inspektion ist es wichtig, Scheinanzeigen von echten Defekten eindeutig zu unterscheiden, um nach der Inspektion die für das Bauteil richtigen Maßnahmen einzuleiten.

Gasturbinenschaufeln werden bei Siemens schon lange als Testkörper für die thermografische Prüfungen, insbesondere für die akustische Thermografie eingesetzt [44, 45, 46]. Deshalb wird in dieser Arbeit untersucht, inwiefern das RVT-Verfahren hierbei einen zusätzlichen Nutzen bieten kann.

### 4.2.2 Radaufhänger

Der Radaufhänger ist ein Teil einer Radaufhängungsbaugruppe eines PKWs. Das Bauteil wurde aus Aluminium gefertigt und weist eine komplexe Geometrie auf (Abbildung 4.7). Bei diesem Bauteil wird die Induktionsthermografie als Prüftechnik eingesetzt. Die hohe Wärmediffusivität des Aluminiums führt jedoch zu später diskutierten Problemen.

Um das Bauteil, das keine natürlichen Defekte aufwies, für eine induktionsthermografische Inspektion vorzubereiten, wurden in dieses 32 Bohrungen mit einem Durchmesser von 1,8 mm eingebracht. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass Risse und Bohrungen ähnliche Anzeigen im thermografischen Ergebnisbild hinsichtlich der



**Abbildung 4.8:** Verteilung der präparierten Bohrungen mit einem Durchmesser von 1,8 mm und einer Tiefe von 2 mm. Die Bohrungen sind mit einer Spachtelmasse ausgefüllt und das Bauteil mit einer Graphitschicht versehen, um die thermische Emissivität zu erhöhen. Die Bohrungen sind somit nicht sichtbar.

Größe und des Kontrasts liefern. Voraussetzung dafür ist, dass die Länge eines Risses und der Durchmesser einer Bohrung ähnlich groß sind. Damit lassen sich die Risse mit einer guten Näherung durch Bohrungen ersetzen, ohne dabei die Erkennbarkeit einer solchen Fehlstelle zu beeinflussen.

Der Durchmesser der Bohrungen wurde basierend auf Testmessungen an einem Bauteil gleichen Typs festgelegt. Die induktionsthermografische Untersuchung an Testbohrungen mit Durchmessern zwischen 1 und 2,2 mm zeigte, dass ab einem Durchmesser von 1,8 mm die Erkennbarkeit gut genug war, wenn auch nicht an allen Stellen dieses Bauteils gleich (mehr dazu im Abschnitt 5.2). Die Tiefe aller Bohrungen betrug 2 mm.

Die 32 Bohrungen wurden über die in dem späteren Experiment zu untersuchende obere Seite des Bauteils verteilt (Abbildung 4.8). Damit sie mit bloßem Auge nicht sichtbar sind, wurden sie mit einer Spachtelmasse ausgefüllt. Anschließend wurde das gesamte Bauteil mit einer Graphitschicht versehen, um die thermische Emissivität zu erhöhen, was besonders bei Aluminium das Ergebnis deutlich verbessert.

In Rahmen dieser Arbeit soll bei diesem Prüfling die Detektierbarkeit der Defekte untersucht und ein Vergleich zwischen der konventionellen und RVT-gestützten Induktionsthermografie durchgeführt werden.

### 4.2.3 Verdichterschaufel

Die Verdichterschaufeln sind ebenso ein Teil einer Gasturbine und sorgen dafür, dass die angesaugte Luft im Kompressor verdichtet wird, bevor sie in die Brennkammer geleitet wird.

Die thermische und mechanische Belastung ist bei den Verdichterschaufeln wesentlich geringer als bei den Gasturbinenschaufeln. Deswegen können sie aus Stahl

gefertigt werden. In Abbildung 4.9 ist eine der zwei in dieser Arbeit verwendeten gleichen Verdichterschaufeln zu sehen.



**Abbildung 4.9:** *Abbildung einer Verdichterschaufel. Die eingebrachten Bohrungen wurden mit einer Spachtelmasse ausgefüllt und die Oberfläche des Prüflings geschwärzt. Die Präparation ist somit auf der Oberfläche nicht sichtbar.*

Ferromagnetischer Stahl weist eine im Vergleich zu Aluminium deutlich niedrigere thermische Diffusivität auf. Folglich breitet sich die Wärme auch langsamer aus, was zu einem hohen Kontrast im induktionsthermografischen Ergebnisbild führt.

Ein weiterer Aspekt ist, dass das Blatt dieser Schaufeln im Vergleich zu den vorgestellten Gasturbinenschaufeln wesentlich länger und somit die zu untersuchende Fläche größer ist.

In Rahmen dieser Arbeit soll bei diesem Prüfling die Detektierbarkeit der Defekte untersucht und ein Vergleich zwischen der konventionellen und RVT-gestützten Induktionsthermografie durchgeführt werden. Die Detektierbarkeit soll hier aber basierend auf einer Analyse der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (engl. Probability of Detection) bewertet werden. Dafür ist das Bauteil aufgrund seiner großen Fläche und



des für die Induktionsthermografie vorteilhaften Materials sehr gut geeignet. Denn hier sind im Vergleich zu dem Radaufhänger auch kleinere Defekte ( $< 1,6$  mm) gut sichtbar. Das ist wichtig für die Bestimmung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit, wo man unterschiedliche Defektgrößen benötigt, um die Detektierbarkeit in Abhängigkeit dieser Größe darzustellen. Bei dem Radaufhänger, bei dem Defekte unter 1,8 mm kaum sichtbar sind, würde es bedeuten, dass auch sehr große Bohrungen eingebracht werden müssten. Aufgrund der begrenzten Fläche müssten dann aber mehrere Prüflinge eingesetzt werden, damit die Bohrungen nicht zu nah aneinander gesetzt werden müssten. Das ist aber bei der Verdichterschaufel aufgrund der wesentlich größeren Fläche kein Problem.

Die Analyse der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit ist gerade deshalb besonders interessant, weil für die Induktionsthermografie laut dem Stand der Literatur noch keine Untersuchungen durchgeführt worden sind. Somit ist alleine das Ergebnis der POD-Analyse im Falle der konventionellen induktionsthermografischen Prüfung von großem Interesse.

#### 4.2.3.1 Vorbereitung einer POD-Analyse

Die Analyse der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit wird basierend auf dem in der Literatur anerkannten Hit-Miss-Verfahren durchgeführt [30, 5, 109, 59, 31, 32, 89, 50, 97, 20, 103]. Das Verfahren wurde im Buch „MIL-HDBK-1823A“ von Charles Annis [2] ausführlich beschrieben.

Das Verfahren setzt mindestens 60 Defekte unterschiedlicher Größen voraus. Dabei sollen sowohl kleine und schlecht erkennbare Defekte, als auch große und gut erkennbare Fehlstellen vorhanden sein. Die Erkennbarkeit bezieht sich hier auf das angewendete Prüfverfahren. Bei bildgebenden Prüfverfahren ist das die Erkennbarkeit der Defekte im Ergebnisbild. Die für die POD-Analyse richtigen Defektgrößen müssen also z. B. durch Testmessungen ermittelt werden. Hier müssen sämtliche Messparameter und der Typ des Prüflings bei den Testmessungen und späteren Messreihen unverändert bleiben.

Eine Messreihe bedeutet hier eine Messung und anschließende Analyse der Ergebnisse durch einen Prüfer. Nach dem Abschluss jeder Messreihe werden alle durch den Prüfer gefundenen Defekte als „Hit“ und alle nicht gefundenen als „Miss“ markiert.

Ein so vorbereiteter Datensatz kann durch die frei verfügbare *mh1823* POD-Software ausgewertet werden. Diese Software wurde ebenfalls von Charles Annis

entwickelt und kostenfrei als Ergänzung zu „MIL-HDBK-1823A“ zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der POD-Analyse wird hier basierend auf dem Hit-Miss-Datensatz eine statistische Wahrscheinlichkeitsfunktion  $\text{POD}(a)$  ermittelt, wobei  $a$  die Defektgröße ist. Diese Wahrscheinlichkeitsfunktion beruht auf einem Wahrscheinlichkeitsmodell, dessen Parameter  $\sigma$  und  $\mu$  in Abhängigkeit von dem angegebenen binären Hit-Miss-Datensatz mit dem Maximum-Likelihood-Verfahren bestimmt werden. Für das Wahrscheinlichkeitsmodell gilt:

$$\text{POD}(a) = \Phi \left[ \frac{\ln(a) - \mu}{\sigma} \right]$$

wobei  $\Phi(z)$  eine Verteilungsfunktion der Normalverteilungen mit Parametern  $\sigma, \mu$  ist.

Als Ergebnis wird eine POD-Kurve erstellt, wobei auf der x-Achse die Defektgröße und auf der y-Achse die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit dargestellt sind.

Zur Präparation der Defekte müssen die optimale Zahl und die Größenverteilung bestimmt werden. Beides lässt sich mit geeigneten POD-Simulationen bestimmen [1]. Die erste Einschätzung über die Defektgrößenverteilung erfolgt dabei unter Zuhilfenahme von Testmessungen mit verschiedenen Defektgrößen. Hier wurden auch wie bei dem Radaufhänger Bohrungen als Fehlstellen eingesetzt.

Durch nachfolgende Simulationen sollte gezeigt werden, wie sich das POD-Modell in Abhängigkeit von der gewählten Anzahl und den Größen der Defekte verhält, um letztendlich zu einer optimalen Verteilung zu kommen.

Die durchgeführten Simulationen basieren auf dem Monte-Carlo-Verfahren [4] und bestehen aus fünf Schritten:

1. basierend auf den Testmessungen wird eine Wahrscheinlichkeitsfunktion  $\text{POD}(a)$  postuliert. Hier geht es also um eine möglichst realitätsnahe Einschätzung der POD-Kurve, obwohl diese erst im Zuge der hier vorbereiteten POD-Analyse tatsächlich ermittelt wird.

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion  $\text{POD}(a)$  wird durch die zwei Parameter  $\sigma$  und  $\mu$  definiert,  $\mu$  entspricht der Defektgröße  $a_{50}$ , bei der  $\text{POD}(a_{50}) = 0,5$  ist. In der Praxis ist das eine Defektgröße, die im Ergebnisbild zwar sichtbar aber klein genug ist, um leicht übersehen werden zu können. Der Parameter  $\sigma$  beeinflusst die Steilheit der POD-Kurve. Hier kann indirekt die Defektgröße  $a_{90}$ , bei der  $\text{POD}(a_{90}) = 0,9$  ist, angegeben werden. Das ist die Defektgröße, die bereits so gut im Ergebnisbild erkennbar ist, dass ein Übersehen nahezu ausgeschlossen

werden kann.

In der Literatur wird die Wahrscheinlichkeitsfunktion oft mit zwei Parametern  $\beta_0$  und  $\beta_1$  angegeben. Dabei ist  $\beta_0 = -\frac{\mu}{\sigma}$  und  $\beta_1 = \frac{1}{\sigma}$ .

2. Die Anzahl und die Größen der Defekte werden nun definiert. Hier ist auch die Verteilung der Defektgrößen wichtig. Denn die Defekte können hinsichtlich der Größe kontinuierlich oder diskret verteilt sein. Diskret heißt hier, dass für eine bestimmte Defektgröße mehrere Defekte vorhanden sind.
3. Ausgehend von der postulierten Wahrscheinlichkeitsfunktion im Punkt 1 und den gewählten Defekten im Punkt 2 wird eine Reihe von vielen Hit-Miss-Datensätzen mit einem Zufallsgenerator generiert. Es sollen hier mindestens 100 Datensätze generiert werden.
4. Für jeden Datensatz wird mit Hilfe des Maximum-Likelihood-Verfahrens die am besten zu dem Datensatz passende POD-Kurve bestimmt.
5. Die postulierte Wahrscheinlichkeitskurve und die POD-Kurven für jeden Datensatz werden in einem gemeinsamen Diagramm gezeichnet. Durch eine Analyse der Kurven wird schließlich eine Aussage hinsichtlich der optimalen Wahl von Defektgrößenintervall, Defektgrößenverteilung und Defektanzahl gewonnen.

Für eine POD-Analyse ist der  $a_{90/95}$ -Wert von größter Bedeutung. Dieser gibt die Defektgröße an, die in mindestens 95 % aller Untersuchungen mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 90 % gefunden werden. Es ist also eine statistisch starke Aussage über die Detektierbarkeit der Defekte eines Prüfverfahrens.

Im Weiteren werden die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen vorgestellt und daraus folgende Erkenntnisse erläutert.

### **Optimierung der Defektgrößenverteilung**

Die Größen der Bohrungen wurden auf eine Spanne von 0,2 bis 0,9 mm festgelegt. Denn die induktionsthermografischen Testmessungen haben ergeben, dass die Bohrungen mit 0,2 mm eine sehr schwache und mit 0,9 mm sehr stark ausgeprägte Anzeigen im Ergebnisbild hervorrufen. Nun wird das Verhalten des POD-Modells mit den gewählten Defektgrößen anhand der Simulationen untersucht.

Bei der ersten Simulationsreihe wird die Verteilung der Bohrungen untersucht. Hier wird zwischen zwei Verteilungen unterschieden:

- einer kontinuierlichen Verteilung – die Bohrungen sind hier zwischen 0,2 bis 0,9 mm homogen verteilt ( $[0,2; 0,21; 0,22; \dots; 0,9]$ ). D. h. jede Bohrungsgröße gibt es nur einmal,
- einer diskreten Verteilung – die Bohrungen sind hier mit einem Abstand von 0,1 mm in Gruppen verteilt ( $[0,2; 0,3; 0,4; \dots; 0,9]$ ). Jede Gruppe beinhaltet also mehrere Bohrungen der selben Größe.

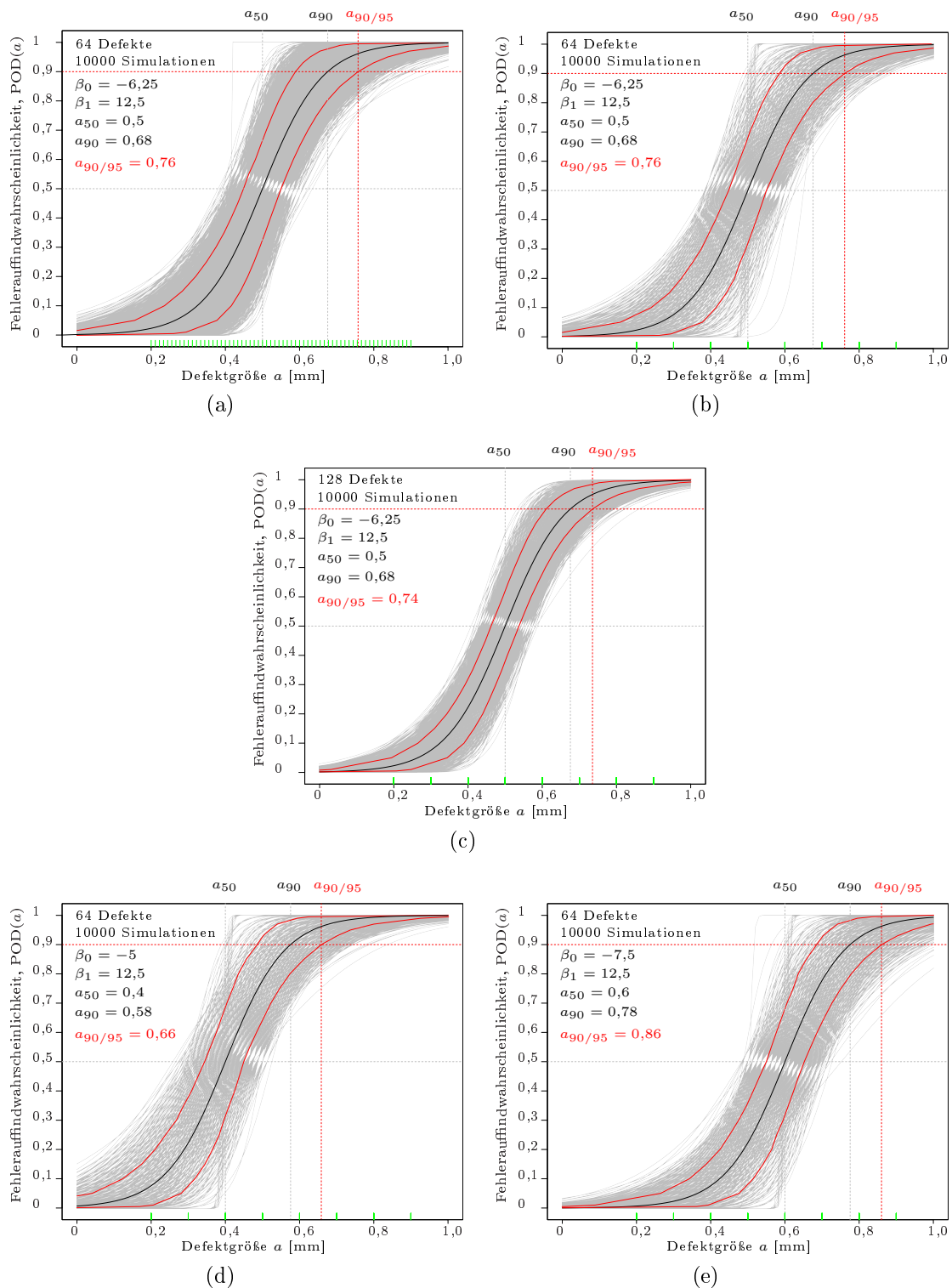
Im ersten Schritt wurde die Wahrscheinlichkeitsfunktion  $POD(a)$  postuliert. Dabei wurde der  $a_{50}$ -Wert über den Parameter  $\mu$  anhand der Testmessungen auf 0,5 mm angenommen. Die Steilheit der Wahrscheinlichkeitsfunktion wurde mit dem Parameter  $\sigma = 0,08$  angenommen, sodass der  $a_{90}$ -Wert bei 0,68 mm liegt. Die Anzahl der Bohrungen wurde wiederum auf 64 festgelegt, sodass im Falle der diskreten Verteilung jede Gruppe vier gleichgroße Bohrungen beinhaltet. Für die beiden Verteilungen wurden jeweils 10 000 Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse in einem Diagramm gezeichnet. Die Ergebnisse der Simulationen sind für die beiden Verteilungen in Abbildung 4.10(a) und 4.10(b) auf Seite 39 zu sehen.

Die sog. Konfidenzgrenzen bestimmen einen Bereich, innerhalb dessen 95 % aller 10 000 simulierten  $POD$ -Kurven liegt. Der Schnittpunkt der oberen Konfidenzgrenze mit der  $POD(a)=0,9$ -Linie ergibt dann den  $a_{90/95}$ -Wert.

In beiden Fällen beträgt der  $a_{90/95}$ -Wert 0,76 mm. Daraus folgt, dass die beiden Verteilungen keinen Unterschied hinsichtlich des Verhaltens des  $POD$ -Modells aufweisen. Folglich wird die diskrete Verteilung für die Präparation gewählt, da diese einfacher umgesetzt werden kann.

### Optimierung der Defektanzahl

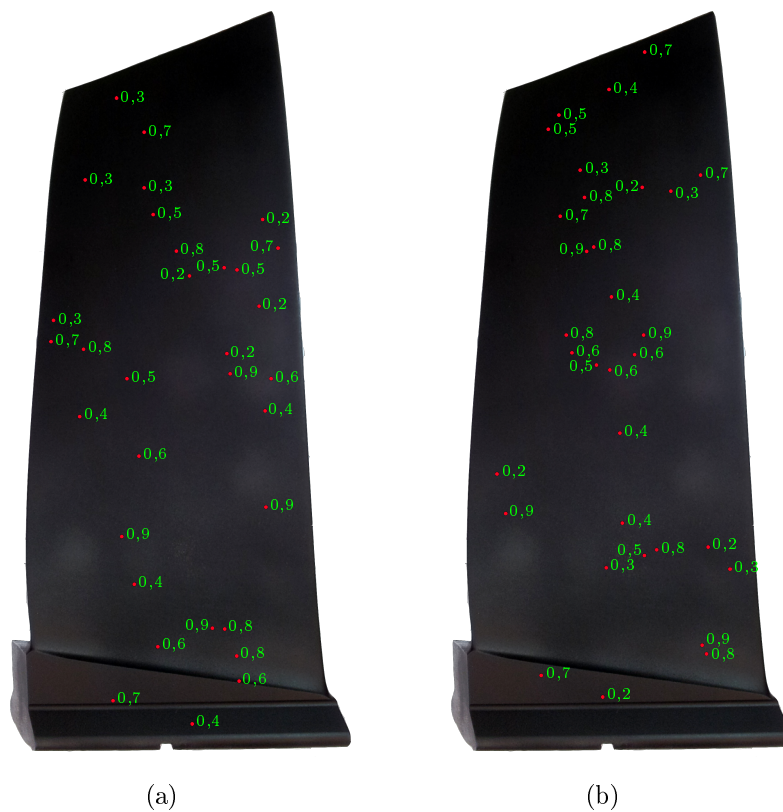
Weiter werden die Simulationen mit 128 Defekten und der diskreten Verteilung durchgeführt. Die bei der ersten Simulationsreihe postulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion bleibt bestehen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.10(c) dargestellt. Hier beträgt der  $a_{90/95}$ -Wert 0,74 mm. Verglichen mit den 64 Defekten ist das um 0,02 mm oder 2,6 % besser. Die Präparation der 128 Defekte würde aber einen erheblich höheren Aufwand bedeuten. Eine Verbesserung von 2,6 % rechtfertigt diesen jedoch nicht.



**Abbildung 4.10:** Darstellung der durchgeführten POD-Simulationen nach dem Hit-Miss-Verfahren. Hier wurden Parameter wie die Defektverteilung (grüne Markierungen auf der  $x$ -Achse) in (a) und (b), die Anzahl der Defekte in (c) und die Lage des  $a_{50}$ -Wertes bei der postulierten Wahrscheinlichkeitskurve in (d) und (e) variiert und untereinander verglichen. Die Größe der Defekte umfasste das Intervall von  $0,2$  bis  $0,9$  mm.

### Optimierung des Defektgrößenintervalls

Im ersten Schritt war die Festsetzung  $a_{50}$ -Wert = 0,5 nur eine Abschätzung, da der genaue Wert noch nicht bekannt ist. Die Defektgrößenverteilung wurde aber symmetrisch um 0,5 gelegt. Wenn nun der reale  $a_{50}$ -Wert höher oder niedriger als 0,5 liegt, kann es sein, dass das Defektgrößenintervall einseitig zu klein gewählt wurde. Bei der letzten Simulationsreihe wird deshalb die postulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion variiert. D. h. der  $a_{50}$ -Wert wurde auf 0,4 und dann auf 0,6 mm festgelegt. Eine größere Abweichung ist bei dem verwendeten Prüfteil und den gegebenen Parametern Messabstand, Anregedauer, -frequenz etc. basierend auf den Vormessungen sehr unwahrscheinlich. Die Steilheit der Wahrscheinlichkeitskurve wurde nicht verändert. Das ergibt jeweils den  $a_{90}$ -Wert von 0,58 und 0,78 mm.



**Abbildung 4.11:** Darstellung der Verteilung der 64 Bohrungen mit Durchmesser von 0,2 bis 0,9 mm über zwei Verdichterschaufeln. Die Bohrungen wurden mit einer Spachtelmasse ausgefüllt und die Oberfläche der Prüflinge schwarz beschichtet. Die Präparation ist somit von der Oberfläche aus nicht sichtbar.

Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Abbildung 4.10(d) und 4.10(e) zu

sehen. In beiden Fällen können plausible Konfidenzgrenzen bestimmt werden, das Defektgrößenintervall ist damit in keinem Fall zu klein.

Die durchgeführten Simulationen bestätigen, dass

- die gewählten Bohrungen von 0,2 bis 0,9 mm für eine POD-Analyse nach dem Hit-Miss-Verfahren geeignet sind,
- eine diskrete Verteilung mit Schrittweite 0,1 mm verwendet werden kann,
- eine Gesamtdefektanzahl von 64 ausreichend ist.

Die gewählten Bohrungen wurden über zwei Verdichterschaukeln verteilt (Abbildung 4.11). Die Verteilung erfolgte mit einem für diesen Zweck geschriebenen Tool, das die Bohrungen über die vordere Seite der Verdichterschaukeln mit einem Zufallsgenerator platziert.

Nach der Präparation wurden die Bohrungen mit einer Spachtelmasse ausgefüllt und die Oberfläche der Verdichterschaukeln schwarz beschichtet. Dadurch wird die thermische Emissivität erhöht und die Bohrungen auf der Oberfläche unsichtbar gemacht.

### 4.3 Arbeitsablauf der Inspektion mit RVT-Verfahren

In diesem Abschnitt wird der auf dem RVT-Verfahren basierende Arbeitsablauf (RVT-Arbeitsablauf) ausführlich behandelt.

Der bisher eingesetzte Arbeitsablauf der thermografischen Bauteilinspektion mit der aktiven Thermografie besteht aus vier Prozessabschnitten, die bereits im Kapitel 3 diskutiert wurden. Dieses Vorgehen wird auch bei dem RVT-Arbeitsablauf beibehalten. Jeder dieser Prozessabschnitte, deren Einordnung identisch mit dem im Kapitel 3 geschilderten Arbeitsablauf ist, besteht aus mehreren Arbeitsschritten, die im Laufe der Untersuchung nacheinander erfolgen. Durch das RVT-Verfahren werden einige Arbeitsschritte modifiziert oder ersetzt.

Die modulare Struktur, die dem konventionellen sowie dem RVT-Arbeitsablauf zugrunde liegt, weist einen entscheidenden Vorteil auf: Einzelne Arbeitsschritte können innerhalb der entsprechenden Prozessabschnitte bei schon installierten Inspektionssystemen und -anlagen ausgetauscht werden, ohne in den gesamten Inspektionsprozess eingreifen zu müssen. Dies hat zur Folge, dass ausgewählte Prozessabschnitte oder sogar einzelne Arbeitsschritte des RVT-Arbeitsablaufes in das bestehende System integriert werden können, was eine sehr hohe Flexibilität sowohl bei der

Modernisierung existierender als auch der Planung neuer Inspektionssysteme verschafft. Dabei ist die bevorstehende Messaufgabe maßgebend und diese bestimmt die Auswahl der geeigneten Komponenten des RVT-basierten Arbeitsablaufes.

Im Folgenden wird der gesamte RVT-Arbeitsablauf geschildert und dann in nachfolgenden Abschnitten (4.3.1 bis 4.3.4) detailliert anhand der konkreten Messaufgaben und daraus resultierenden Problemstellungen erläutert. Die Vorzüge des RVT-Verfahrens werden dagegen im Kapitel 5 separat behandelt.

In der Abbildung 4.12 ist der RVT-Arbeitsablauf in vollem Umfang schematisch in vier Prozessabschnitte geteilt dargestellt. Bei den mit rotem Rahmen versehenen Arbeitsschritten wird das Real-View-Thermography-Verfahren eingesetzt. Die Arbeitsschritte ohne den roten Rahmen gehören entweder zu dem Stand der Technik oder unterliegen einer nicht im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Weiterentwicklung.

Im ersten Schritt, ähnlich wie bei dem bisher eingesetzten und im Abschnitt 3 diskutierten Arbeitsablauf, werden die zu inspizierenden Bauteile im Rahmen der vorgeschriebenen Wartung (siehe Kapitel 2.1) aus einer Maschine, wie z. B. einer Gasturbine, ausgebaut und zur Prüfstelle transportiert. Anschließend beginnt die eigentliche Untersuchung mit der eindeutigen Identifikation des Prüflings.

Im nächsten Schritt erfolgt die im Abschnitt 4.3.1 behandelte Messvorbereitung, die aus zwei durch das RVT-Verfahren gestützten Arbeitsschritten besteht: der Projektion der Qualität der Schwärzung, die oft für thermografische Untersuchungen notwendig ist und der Auswahl der Messparameter auf dem direkt auf das Bauteil projizierten virtuellen Bedienfeld.

Unmittelbar danach erfolgt die Messung (Abschnitt 4.3.2), bei der der Prüfer eine Unterstützung (abhängig von der Anregungsart) durch das RVT-Verfahren bekommt. Der Einsatz des RVT-Verfahrens betrifft insbesondere die Induktionsthermografie, da bei dieser die Problematik der fehlenden Messabdeckung auftritt, die stark das Endergebnis beeinflusst (siehe Abschnitt 3.1).

Im Laufe des nächsten Prozessabschnittes (3) erfolgt die Auswertung. Bei der akustischen und der Blitzthermografie kann das Ergebnisbild direkt projiziert werden, da meist das gesamte Bauteil angeregt und damit mit der Messung erfasst wird. Im Gegensatz dazu findet die Anregung bei der Induktionsthermografie nur in einem begrenzten Bereich um den Prüfkopf statt. Das führt dazu, dass mehrere Messungen nötig sind, um den ganzen Prüfling zu untersuchen. Folglich werden dabei mehrere Ergebnisbilder erzeugt. Um dem Prüfer die Aufgabe zu erleichtern, werden daher die einzelnen Ergebnisbilder der induktionsthermografischen Untersuchung zu einem Gesamtbild zusammengefasst. So muss auch hier nur noch ein einziges Ergebnisbild



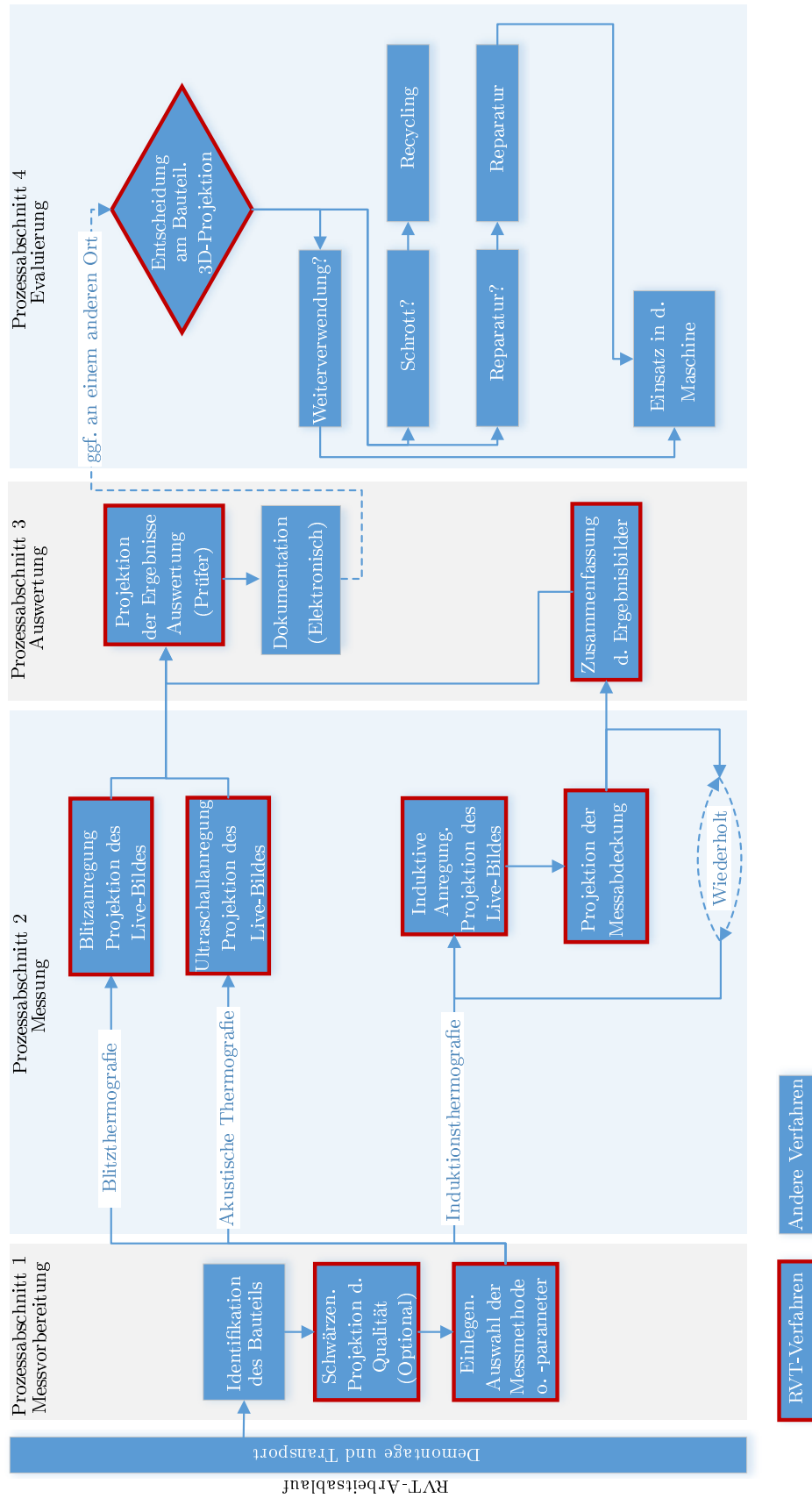


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufs mit dem RVT-Verfahren.

ausgewertet werden (Abschnitt 4.3.3.1). Die Resultate der Untersuchung werden dann auf den Prüfling projiziert und durch den Prüfer ausgewertet, was im Abschnitt 4.3.3.2 besprochen wird. Anschließend werden sämtliche Ergebnisse in einer elektronischen Datenbank abgelegt und können bei der nachstehenden Evaluierung abgerufen werden.

Die Evaluierung (Abschnitt 4.3.4) kann so wie auch bisher an einem anderen Ort durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Auswertung werden hier aus der elektronischen Datenbank abgerufen und anschließend auf das Bauteil projiziert. Im Zuge der Evaluierung wird anhand der projizierten Daten, die von einer oder mehreren thermografischen Untersuchungen stammen können, über das weitere Vorgehen mit dem Bauteil entschieden. Solange die gefundenen Defekte innerhalb der in der Prüfpezifikation angegebenen Toleranzen liegen, kann das Bauteil, ggf. nach einer Aufbereitung, z. B. der Erneuerung der Wärmedämmschicht, erneut eingesetzt werden. Sollte das nicht der Fall sein, muss die Entscheidung darüber getroffen werden, ob das Bauteil repariert oder das Material recycelt wird.

Bei der Evaluierung muss sich das Bauteil nicht zwingend an der ursprünglichen Prüfposition befinden, ggf. kann diese an einem anderen Ort stattfinden. Dies bedeutet also, dass die ursprüngliche örtliche Relation zwischen der RVT-Einheit und dem Bauteil nicht mehr gegeben ist. Folglich kann so keine genaue Projektion der Daten auf den Prüfling mehr erfolgen. Hier muss nun das RVT-Verfahren um einen Mechanismus der 3D-Erfassung erweitert werden. So kann die Positionierung des Prüflings dynamisch erkannt und die Projektion darauf angepasst werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Ansätze ausgearbeitet, die eben diese dynamische Projektion (kurz 3D-Projektion) ermöglichen. Sie stellen eine solide Ausgangsbasis für weitere Forschungstätigkeiten dar.

Mit einem erneuten Einsatz in der Maschine oder einem Recycling des Bauteils endet die gesamte Prozesskette.

Im weiteren Verlauf werden nun die einzelnen Prozessschritte im Detail behandelt.

### **4.3.1 Prozessabschnitt 1: Messvorbereitung**

Dieser Prozessabschnitt umfasst zwei Arbeitsschritte, die abhängig von der bevorstehenden Messaufgabe beide oder nur einzeln eingesetzt werden können.

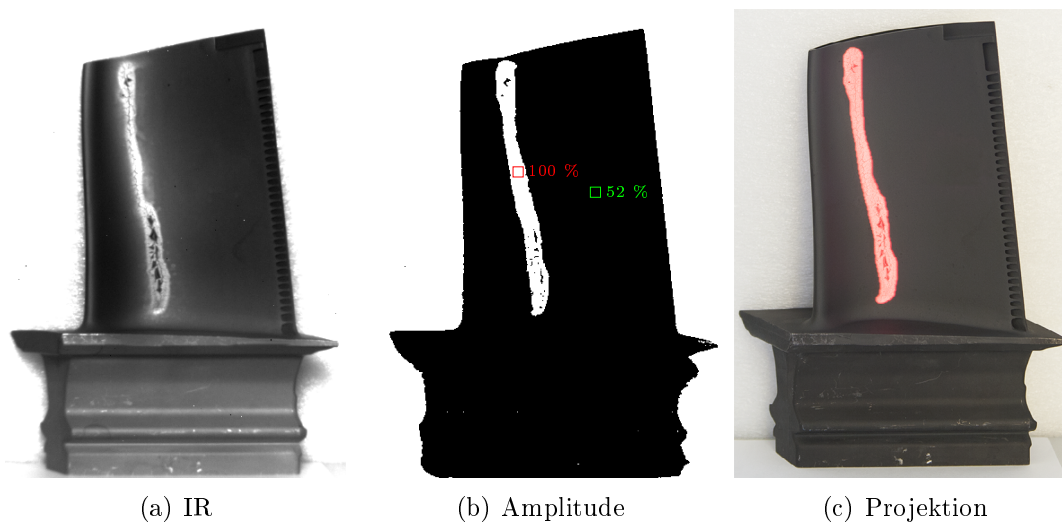
### Projektion der Qualität der Schwärzung

Ein Materialparameter, der thermografische Untersuchungen entscheidend beeinflusst, ist die thermische Emissivität  $\varepsilon$ , die die Stärke des thermischen Signals, das von einer IR-Kamera während einer Messung erfasst wird, bestimmt. Weist ein Bauteil keine für eine zuverlässige Prüfung notwendige Emissivität auf, muss diese durch eine geeignete Beschichtung (typischerweise Graphit oder schwarzer Lack) erhöht werden. Von der räumlichen Homogenität dieser Schwärzung hängt auch die Qualität des Ergebnisbildes und folglich der gesamten Untersuchung ab. Denn eine mangelhaft aufgebrauchte Beschichtung führt zu störenden Bildartefakten, die die Auswertung der Ergebnisbilder beeinträchtigen und zu einer Fehldetektion führen können.

Das RVT-Verfahren ermöglicht eine Begutachtung der Beschichtungsqualität durch den Prüfer, indem diese messtechnisch erfasst und anschließend in einer für den Prüfer leicht interpretierbaren Form auf den Prüfling projiziert wird. Hierfür wird zunächst Wärme in das Bauteil mit zwei leistungsstarken Blitzlampen eingebracht und die entstehende zeitliche Wärmeverteilung mit der IR-Kamera aufgenommen. Die schwarze Beschichtung absorbiert das eingestrahelte Licht dabei in den meisten Fällen besser als das Bauteil. Dadurch können Inhomogenitäten in der Beschichtung oder Reflexionen an nicht beschichteten Teilen des Bauteils sichtbar gemacht werden.

In der Abbildung 4.13(a) ist eine IR-Aufnahme einer Gasturbinenschaufel nach ca. einer Sekunde Anregung mit zwei Blitzlampen dargestellt. Die Beschichtung des Prüflings ist fehlerhaft, da sich in der Wölbung des Schaufelblattes ein Lackläufer gebildet hatte. Folglich ist die Beschichtung in diesem Bereich dicker als auf dem Rest des Bauteils. Die Wärme dringt also auch langsamer durch die dickere Schicht in das Innere des Bauteils ein, die Wärme bleibt daher länger als bei der dünneren Beschichtung gespeichert.

Dies ist noch deutlicher nach der Puls-Phasen-Analyse in dem Amplitudenbild zu sehen (Abbildung 4.13(b)). Der Lackläufer weist hier eine deutlich höhere und bereits gesättigte Amplitude auf im Gegensatz zum Rest des Prüflings. Der Kontrast wurde so eingestellt, dass die Bereiche der gesättigten Amplitude weiß und die restlichen schwarz im Bild erscheinen. Damit sind die Unterschiede der Amplitude, also die durch die fehlerhafte Beschichtung verursachte Inhomogenität der Temperaturverteilung auf der Bauteiloberfläche, eindeutig erkennbar. In dieser Form mit einer roten Einfärbung wird das Bild nun auf das Bauteil projiziert (Abbildung 4.13(c)).

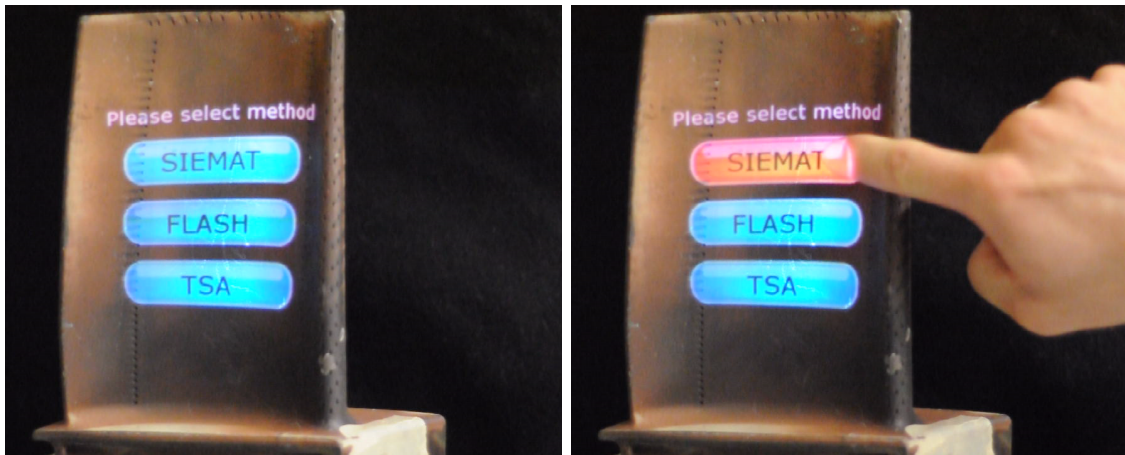


**Abbildung 4.13:** Darstellung der Qualität der Schwärzung. Ein Lackläufer wird im IR-Bild (a) durch zwei Blitzlampen sichtbar gemacht. Dieser ist auch gut im Amplitudenbild (b) erkennbar, da hier die Amplitude (100 % des Maximalwertes) deutlich höher ist als der Rest des Prüflings (52 % des Maximalwertes). Diese Information wird auf den Prüfling projiziert (c).

So kann der Prüfer sofort und direkt auf dem Bauteil erkennen, dass der Bereich des Lackläufers das Ergebnis der danach erfolgenden thermografischen Messung negativ beeinflussen und somit verfälschen würde. Das Bauteil darf also nicht zu weiterer Inspektion zugelassen werden. Die Beschichtung muss ab- und neu aufgetragen werden.

### Virtuelles Bedienfeld

Der zweite Arbeitsschritt dieses Prozessabschnittes ermöglicht eine Bedienung der Messung, wie Auswahl einer der verfügbaren Messmethoden oder Einstellung eines der Messparameter, ohne Einsatz eines Eingabegerätes wie beispielsweise einer Tastatur. Auf das Bauteil wird ein Menü projiziert, aus dem der Prüfer die gewünschte Option auswählen kann. Voraussetzung dafür ist die korrekte Position des Bauteils, weil es dabei als Projektionsfläche dient. Dabei ähnelt die Funktionalität dem verbreiteten Touchscreen-Prinzip. Diese Art der Kommunikation zwischen dem Prüfer und der Inspektionsanlage ist insbesondere dann von Vorteil, wenn einerseits dem Prüfer eine Mehrzahl an Optionen zur Auswahl stehen muss und andererseits der Einsatz eines konventionellen Eingabegerätes (wie eines Computerbildschirms und einer Tastatur oder einer Maus bzw. eines Tablets) ungünstig ist, zum Beispiel aufgrund beengter Räumlichkeiten, unsauberer Umgebung oder weil der Prüfer beide



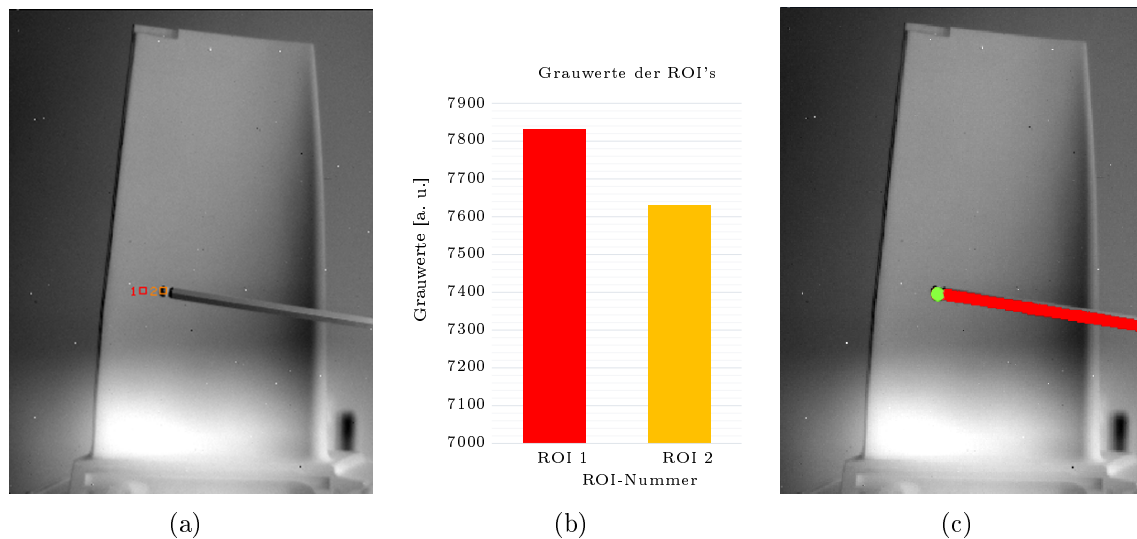
(a) Projektion eines Menüs auf ein Bauteil. (b) Auswahl einer Menüoption mit einem Finger.

**Abbildung 4.14:** Ein Beispiel der Funktionsweise des virtuellen Bedienfeldes.

Hände frei haben muss.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieses Konzept basierend auf der RVT-Einheit (siehe Abschnitt 4.1.1) umgesetzt. Abbildung 4.14(a) zeigt ein Auswahlmenü, das mit Hilfe des in der RVT-Einheit untergebrachten Beamers auf ein Prüfteil projiziert wird. Die Auswahl erfolgt hier mit einem Zeiger, entweder ein geeigneter Gegenstand (Stift) oder auch ein Finger des Prüfers. Sobald der Zeiger an einer der Auswahloptionen für eine definierte und einstellbare Zeit (in der Regel eine Sekunde) stehen bleibt, wird diese Option ausgewählt (Abbildung 4.14(b)). Hierfür wird die Position des Zeigers in Relation zu dem Bauteil von der IR-Kamera kontinuierlich ermittelt. Dabei wird ausgenutzt, dass der Zeiger und der Prüfling unterschiedliche Temperaturen (Finger)  $T_{\text{Finger}} \neq T_{\text{Prüfling}}$  bzw. Emissivitäten (Stift)  $\varepsilon_{\text{Stift}} \neq \varepsilon_{\text{Prüfling}}$  aufweisen. Durch das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz  $\varepsilon + \rho + \tau = 1$  und die vernachlässigbare Transmission  $\tau$  ergibt sich die Reflexion  $\rho = 1 - \varepsilon$ . Durch die unterschiedlichen Reflexionen  $\rho_{\text{Stift}} \neq \rho_{\text{Prüfling}}$  der wärmeren bzw. kälteren Umgebung produzieren der Stift und das Bauteil im IR-Kamerabild auch unterschiedliche Grauwerte (siehe Abbildung 4.15(a) und 4.15(b)). Im Falle eines Fingers ist das selbstverständlich, da die beiden Objekte unterschiedliche Temperaturen haben. Folglich kann der Zeiger mit Hilfe eines Segmentierungsalgorithmus, wie z. B. eines histogrammbasierten Schwellwertverfahrens [91], aus dem IR-Kamerabild extrahiert werden (Abbildung 4.15(c)).

Im Zuge der weiteren Bildverarbeitung wird auch die Spitze des extrahierten Zeigers bestimmt und in Bildkoordinaten des IR-Kamerabildes  $(x, y)_{\text{Zeiger (IR)}}$  zur



**Abbildung 4.15:** Ein IR-Bild einer Gasturbinenschaufel und eines Zeigers (a) mit zwei gesetzten ROI's (engl. Region of interest) im Bereich der Schaufel (ROI 1) und des Zeigers (ROI 2). Die ROI's haben eine Größe von jeweils  $4 \times 4$  Pixel, deren durchschnittliche Grauwerte in (b) dargestellt sind. Es ist zu erkennen, dass der Zeiger (ROI 2) kleinere Grauwerte als die Schaufel (ROI 1) aufweist, da sich darin kalte Umgebung aus der Fensterrichtung spiegelt. Aufgrund der unterschiedlichen Grauwerte lässt sich der Zeiger von der Schaufel und dem Hintergrund gut unterscheiden. In (c) ist der im Zuge der Bildverarbeitung erkannte Zeiger (rot) und dessen Spitze (grün) zu sehen.

Verfügung gestellt. Da die IR-Kamera und der Beamer dieselbe optische Achse besitzen und kalibriert sind (Abschnitt 4.1.3), können die ermittelten Koordinaten der Zeigerspitze in die Bildkoordinaten des Beamerbildes einfach transformiert werden:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{\text{Zeiger (Beamer)}} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_{\text{Zeiger (IR)}} + \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \text{ wobei } a_x, a_y \text{ die im Laufe der Kalibrierung}$$

gewonnenen Translationssparameter darstellen. Somit kann die Übereinstimmung der Position der Zeigerspitze mit einer der Auswahloptionen detektiert werden.

Die Einträge in dem projizierten Menü sind variabel und lassen sich flexibel abhängig von der Messaufgabe in der RVT-Software definieren.

### 4.3.2 Prozessabschnitt 2: RVT-gestützte Messung mit Feedback-Unterstützung für den Prüfer

In diesem Abschnitt wird die Unterstützung des Prüfers durch das RVT-Verfahren während einer thermografischen Messung diskutiert. Im Abschnitt 4.3.2.1 wird die Projektion des thermischen Signals auf den Prüfling während dessen Anregung behandelt. Dieser Arbeitsschritt wird bei der akustischen und Blitzthermografie einge-

setzt. Darüber hinaus wird im Abschnitt 4.3.2.2 ein RVT-Ansatz für die Bestimmung sowie die Projektion der Reichweite des Induktionseffektes unmittelbar nach einer induktiven Anregung vorgestellt.

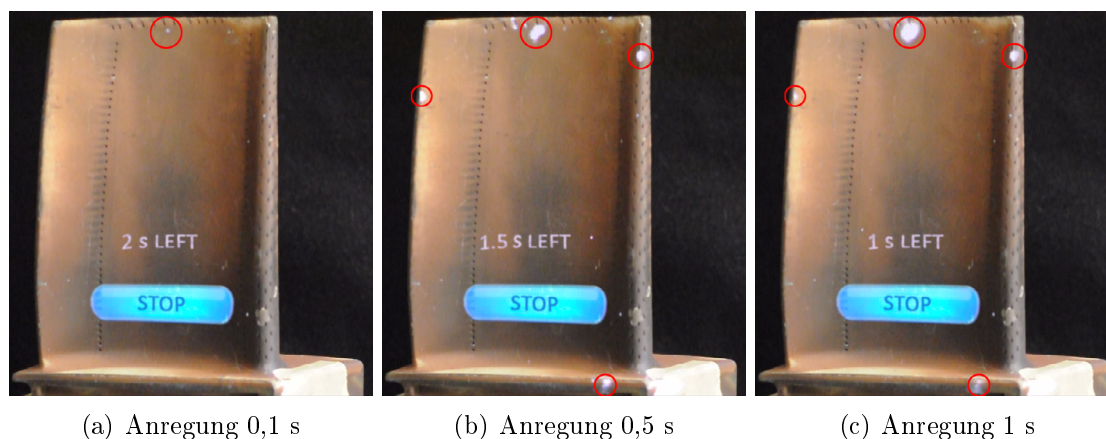
#### **4.3.2.1 Projektion des thermografischen Vorgangs während der Anregung**

Im Laufe dieses Arbeitsschrittes wird der Prüfer eine Rückmeldung über den Verlauf der Messung erhalten und zwar bevor diese abgeschlossen wurde. Dies ermöglicht dem Prüfer sich einen ersten Eindruck über die Messung zu verschaffen und dementsprechend richtige Maßnahmen nach Abschluss der Messung zu ergreifen. Hierfür wird das thermische Signal, genauer gesagt die von der IR-Kamera produzierte Bildsequenz, an die RVT-Software weitergeleitet. Diese vergleicht kontinuierlich die antreffenden Bilder mit dem Zustand vor der Anregung und berechnet die Unterschiede (Differenzbild). Unmittelbar danach erfolgt die Projektion dieser Information. Da die Verzögerung zwischen der Aufnahme eines IR-Bildes und der Projektion der aus diesem Bild gewonnenen Information im Millisekundenbereich liegt, werden die Folgen der Anregung nahezu in Echtzeit visuell und für den Prüfer erkenntlich auf dem Prüfling dargestellt.

Sollten während einer Messung Anzeigen auf dem Bauteil zu erkennen sein, können daraus zwei Schlüsse gezogen werden: einerseits wurde das Bauteil ausreichend angeregt, da die Folgen der Anregung, also die Wärmeentwicklung in dem Bauteil, zu sehen sind. Andererseits können die Anzeigen darauf hindeuten, dass der Prüfling Defekte aufweist und der Prüfer diesen Anzeigen nachgehen muss.

Dieser Arbeitsschritt wird bei der akustischen Thermografie und Blitzthermografie eingesetzt. Eine Messung mit der akustischen Thermografie zeichnet sich dadurch aus, dass nur die Defektstellen eine Wärmeentwicklung verursachen [44]. Diese lassen sich somit bei der Projektion eindeutig darstellen und sind leicht zu interpretieren. Ein Beispiel ist in der Abbildung 4.16 zu sehen. In diesem Fall kann der Prüfer schon während der Anregung davon ausgehen, dass das Bauteil mehrere Defekte enthält.

Darüber hinaus wird auch die verbleibende Messzeit auf das Bauteil projiziert. Diese eindeutige Information versichert den Prüfer, dass die aktuelle Messung noch ausgeführt wird. Das ist insbesondere in der zweiten Phase der Messung vorteilhaft, wo die Anregung bereits abgeschaltet wurde aber die IR-Aufnahme noch aktiv ist (siehe Abschnitt 2.1.2). Zu der Zeit können keine akustischen (akustische Thermografie) bzw. visuellen (Blitzthermografie) Anzeichen über die laufende Messung



**Abbildung 4.16:** Projektion des thermischen Vorganges mit Hilfe des RVT-Verfahrens auf eine Gasturbinenschaufel während einer Messung mit akustischer Thermografie. Die Risse produzieren durch Reibung der Rissflanken während der Anregung Wärme, die durch die Projektion direkt auf dem Prüfling sichtbar gemacht wird (rote Kreise, nicht Teil der Projektion). Zusätzlich wird die verbleibende Zeit projiziert, um das korrekte Verhalten des Prüfers während der ganzen Messung zu gewährleisten. Mit der virtuellen „Stop“-Taste kann die Messung jederzeit abgebrochen werden (siehe „Virtuelles Bedienfeld“ im Abschnitt 4.3.1).

mehr wahrgenommen werden. Aus diesem Grund kann der Prüfer fälschlicherweise von einer abgeschlossenen Messung ausgehen, obwohl dies gar nicht der Fall ist. Das kann zur Folge haben, dass der Prüfer beispielsweise zu früh im Kamerafeld zu hantieren beginnt bzw. alleine durch seine Bewegung eine thermische Reflexion am Bauteil verursacht. In beiden Fällen ist eine solche Messung unbrauchbar und muss unbedingt wiederholt werden.

Die Zeitangabe (auf 0,5 s genau) ist insbesondere dann sehr nützlich, wenn eine Messung besonders lange dauert (z. B. 30 s oder mehr). Der Prüfer kann dann die Zeitorientierung schnell verlieren und unaufmerksam werden. Dies ist sehr oft bei der LED-Thermografie [84] (einer Variante der Blitzthermografie) der Fall, die beispielsweise bei Untersuchungen von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen eingesetzt wird. Dabei werden LED-Lampen genutzt, um Energie über längere Zeit in den Prüfling einzubringen. So eine Messung erfolgt meistens nach dem Lockin-Prinzip [12], bei der die LED-Lampen über längere Zeit (beispielsweise 30 s) angeschaltet bleiben, um danach über einen gleich langen Zeitraum ausgeschaltet zu bleiben. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt, wobei die IR-Aufnahme ununterbrochen durchgeführt wird bis alle Wiederholungen abgeschlossen sind. Auch hier kann die Phase, bei der die LED-Lampen inaktiv sind, eine abgeschlossene Messung



suggestieren. Die Projektion der verbleibenden Zeit informiert den Prüfer über den Fortschritt der Messung, so wird ein Risiko einer versehentlichen Störung der Messung durch den Menschen reduziert. Dies ist insbesondere bei dem RVT-Verfahren wichtig, da sich der Prüfer ja in der Nähe des Objekts befindet.

Während des ganzen Messvorgangs wird auf den Prüfling auch eine virtuelle „Stop“-Taste projiziert. Mit Betätigung dieser (so wie im Abschnitt 4.3.1 erläutert) kann der Prüfer eine laufende Messung jederzeit abbrechen. Das ermöglicht einen schnellen Abbruch, auch wenn der Prüfer sich im Bereich des Prüflings aufhält und der steuernde Rechner nicht in unmittelbarer Nähe platziert ist.

#### 4.3.2.2 Bestimmung und Projektion des angeregten Bereichs

Bei allen aktiven Thermografiertechniken ist es entscheidend zu wissen, welcher Bereich des Prüfteils angeregt wurde. Bei der akustischen Thermografie ist dies bei metallischen Teilen bedingt durch die geringe Dämpfung der Ultraschallwelle meist das gesamte Bauteil [44]. Hier benutzt man deshalb gerne Indikatoren, die sich z. B. aufgrund von viskoelastischer Dämpfung erwärmen (z. B. Tesa Powerstrips®) und somit im IR-Bild ein thermisches Signal liefern. Auf diese Weise wird bei der akustischen Thermografie festgestellt, ob eine ausreichende Anregung zustande gekommen ist.

Bei der Induktionsthermografie hat die Anregung dagegen nur einen lokalen Charakter. Die laterale Reichweite der induktiven Anregung ist auf einen Bereich in der Nähe des Induktors begrenzt [105, 106, 69]. Dieser sog. Proximity-Effekt (ausführlich im Abschnitt 3.1 diskutiert) hat zur Folge, dass der induzierte Strom nur in einem begrenzten Bereich um den Induktor herum fließt. Somit kann die induktionsthermografische Prüfung nur in diesem Bereich stattfinden. Dadurch muss der Induktor mehrmals verschoben und die Messung wiederholt werden, um einen größeren Bereich des Prüflings untersuchen zu können.

Darüber hinaus hängt die laterale Reichweite sowohl von dem Bauteilmaterial als auch der -geometrie ab. Bei komplexen Geometrien variiert die Reichweite abhängig von der Position des Induktors gegenüber dem Prüfling. Das erschwert erheblich eine verlässliche Einschätzung der Reichweite und somit des Bereichs, in dem eine zuverlässige Detektion der Fehlstellen möglich ist.

Für die thermografische Untersuchung ist die Wärmeentwicklung entscheidend, die aus den ohmschen Verlusten des induzierten Stromes resultiert und auf der Oberfläche mit einer IR-Kamera beobachtet wird. Der Zusammenhang zwischen Erwär-

mung  $\Delta T$  und dem fließenden Strom  $j$  in der Zeitspanne  $t$  ergibt

$$\Delta T(t) = \frac{j^2 \rho_W t}{c \rho_D}$$

[105], wobei  $\rho_W$  der spezifische Widerstand,  $c$  die spezifische Wärmekapazität und  $\rho_D$  die Materialdichte ist.

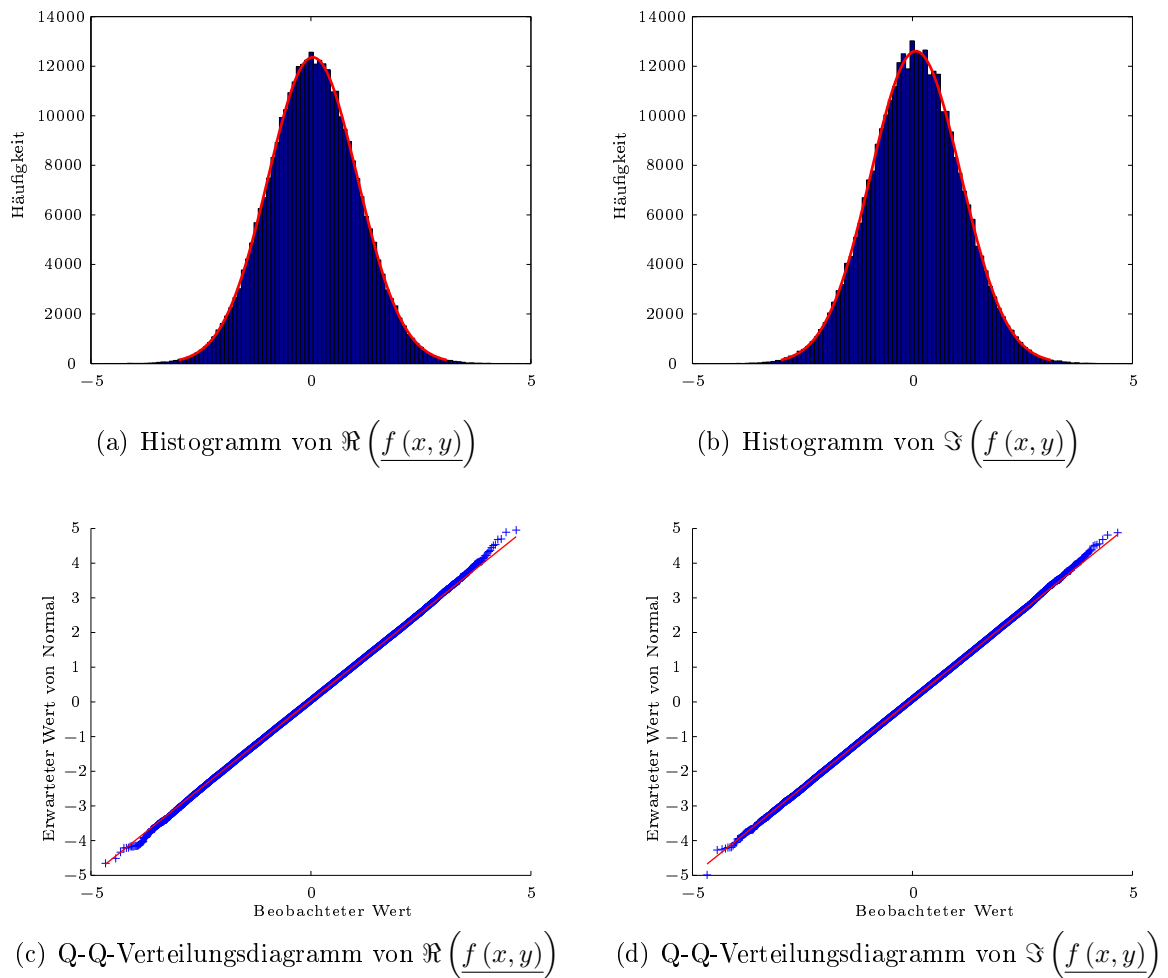
Diese Tatsache ermöglicht eine Bestimmung der Reichweite des Induktionseffektes durch die auftretende Erwärmung. Damit kann diese alleine durch eine geeignete Analyse der thermischen Bildsequenz, die ohnehin schon zur Verfügung steht, bestimmt werden. Hierfür wird die im Abschnitt 2.1.2 vorgestellte Puls-Phasen-Analyse [65, 66] herangezogen.

Im ersten Schritt wird eine Aufnahme ohne Anregung durchgeführt, die dann der angesprochenen Puls-Phasen-Analyse unterzogen wird. Das Ergebnis dieser Analyse ist ein komplexer Vektor  $\underline{f}(x, y)$  wie folgt:

$$\underline{f}(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} T_n(x, y) e^{i\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} = \sum_{n=0}^{N-1} T_n(x, y) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + i \sum_{n=0}^{N-1} T_n(x, y) \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right),$$

wobei  $x, y$  die Pixelkoordinaten,  $T_n(x, y)$  der Vektor mit allen Pixeln des Bildes  $n$  und  $N$  die Anzahl aller Bilder in der Aufnahme ist. Im realen Fall tritt ein Systemrauschen auf, was durch das Rauschen des Detektors und dessen Ausleseelektronik verursacht ist. Das Rauschen ist annähernd normalverteilt, was in Abbildung 4.17 für die reellen und imaginären Werte von  $\underline{f}(x, y)$  deutlich zu sehen ist. An beide Histogramme (Abbildung 4.17 (a) und (b)) wurde eine Gaußsche Verteilungskurve gefittet (rot), die in sehr guter Näherung passt. Noch besser zu sehen ist das an den beiden Q-Q-Verteilungsdiagrammen (Quantile-Quantile) [55] (Abbildung 4.17 (c) und (d)), wo die Werte auf der roten Linie (erwartete Werte aus der Normalverteilung) liegen und somit der Normalverteilung folgen. Folglich werden diese Werte als normalverteilt betrachtet.

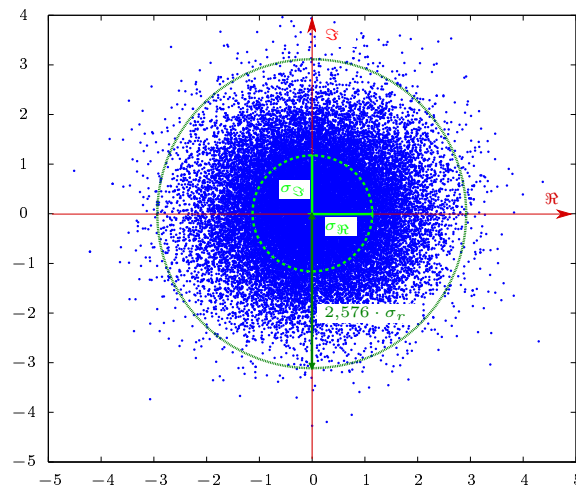
Somit können für die reellen sowie imaginären Werte die Parameter wie Erwartungswerte  $\mu_{\Re}, \mu_{\Im}$  und Standardabweichungen  $\sigma_{\Re}, \sigma_{\Im}$  berechnet werden, die letztendlich das Systemrauschen charakterisieren. Die Werte des komplexen Vektors  $\underline{f}(x, y)$  können nun auch in der Gaußschen Zahlenebene dargestellt werden (Abbildung 4.18), die dort erwartungsgemäß einen Kreis bilden. Der Ursprung dieses Kreises liegt in  $(\mu_{\Re}, \mu_{\Im}) \approx (0, 0)$ . Der Radius  $r$  dieses Kreises wird wiederum durch die Standardabweichungen  $\sigma_{\Re} \approx \sigma_{\Im}$  beschrieben, und zwar  $r = s_{\sigma} \cdot \sigma_r = s_{\sigma} \cdot \sqrt{\sigma_{\Re}^2 + \sigma_{\Im}^2}$ .



**Abbildung 4.17:** Prüfung des reellen und imaginären Teiles des komplexen Vektors  $f(x, y)$  (beinhaltet nur Systemrauschen) auf Normalverteilung. In (a) und (b) sind die Werte in Form von Histogrammen dargestellt. Die rote Linie ist eine gefittete Normalverteilung. In (c) und (d) sind dieselben Werte in Form von Q-Q-Verteilungsdiagrammen dargestellt, die auf der roten Linie (entspricht der Normalverteilung) liegen. Die Werte folgen somit der Normalverteilung, die für deren Analyse herangezogen wird.

Aus der Charakteristik der Normalverteilung geht hervor [55], dass 99 % aller Werte im Bereich  $\pm 2,576\sigma_r$  liegen. Somit kann der Kreis für  $s_\sigma = 2,576$  durch  $2,576 \cdot \sigma_r = \sqrt{x^2 + y^2}$  definiert werden. Diese Rauschanalyse erfolgt nur einmal und die dadurch gewonnenen Parameter werden bei den nachfolgenden regulären Messungen (mit Anregung) für die Bestimmung der induktiven Reichweite angewendet.

In den Bereichen, wo die Anregung ausreichend stark ist, um eine messbare Erwärmung hervorzurufen, liegen die dazu gehörenden Werte von  $f(x, y)$  außerhalb dieses zuvor bestimmten Kreises. Sie liegen somit oberhalb des Systemrauschens.



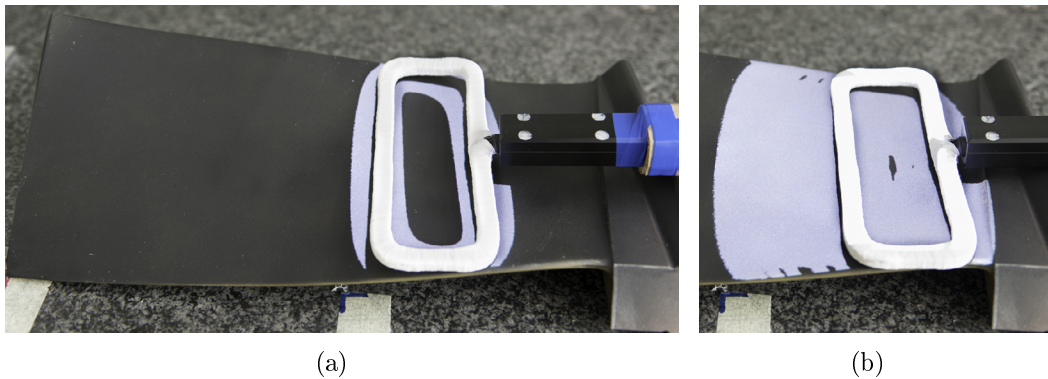
**Abbildung 4.18:** Darstellung der reellen und imaginären Werte des komplexen Vektors  $f(x, y)$  in der Gaußschen Zahlenebene. Der innere grüne Kreis hat einen Radius, der Standardabweichungen  $\sigma_{\Re} \approx \sigma_{\Im} \approx \sigma_r$  entspricht und dessen Ursprung in  $(\mu_{\Re}, \mu_{\Im}) \approx (0, 0)$  liegt. Der äußere grüne Kreis beinhaltet 99 % aller Werte (Radius  $2,576 \cdot \sigma_r$ ) im Bezug auf die Normalverteilung und wird für die Bewertung der ausreichenden Wärmeentwicklung (also auch Detektierbarkeit von Defekten) bei den Folgemessungen herangezogen, d. h. alle Werte die innerhalb dieses Kreises vorzufinden sind, werden als Rauschen interpretiert.

Folglich kann für jede Messung  $m$  und jedes Pixel  $i_m(x, y)$  eine binäre Maske  $P(x, y)$  erstellt werden:

$$P(x, y) = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow |f(x, y)| > 2,576 \cdot \sigma_r \\ 0 & \Leftrightarrow |f(x, y)| \leq 2,576 \cdot \sigma_r \end{cases} .$$

Daraus kann ein binäres Bild erzeugt werden, bei dem „1“ als weiß und „0“ als schwarz dargestellt werden und man erhält eine Darstellung, bei der nur die Bereiche signifikanter (d. h. oberhalb des Rauschens) liegender Wärmeentwicklung erscheinen. Voraussetzung dafür ist, dass die Messung  $m$  dieselbe Länge  $N$  wie die erste Messung ohne Anregung haben muss. Zusätzlich dürfen die Parameter der IR-Kamera wie z. B. die Integrationszeit nicht verändert werden, da dadurch der Charakter des Systemrauschens der Kamera geändert wird.

Ein so erzeugtes Bild wird durch die RVT-Einheit auf das Bauteil projiziert und zwar sobald die Messung abgeschlossen wurde (Abbildung 4.19(a)). Dadurch bekommt der Prüfer eine Rückmeldung in welchem Bereich es zu einer ausreichenden Wärmeentwicklung gekommen ist, also in welchem Bereich potenzielle Defekte detektiert werden können. Darüber hinaus sieht der Prüfer, wo der Induktor für die nächste Messung zu platzieren ist.



**Abbildung 4.19:** Projektion des Bereiches in dem eine ausreichende Wärmeentwicklung während der Messung stattgefunden hat, um eine ausreichende Detektierbarkeit zu gewährleisten (Messabdeckung). In (a) ist die Situation nach einer Messung und in (b) nach mehreren Messungen zu sehen.

Bei den nächsten Messungen wird die binäre Maske aktualisiert, so dass im Regelfall der Bereich der guten Detektierbarkeit also die Messabdeckung größer wird (Abbildung 4.19(b)). So wird sichergestellt, dass ein größerer Bereich messtechnisch ohne Lücken abgedeckt wurde. Wichtig ist, dass der Prüfling während der ganzen Messreihe nicht bewegt wird. Anderenfalls wird die Information über die Messabdeckung örtlich ungültig. Sollte die Kameraansicht verändert werden, um einen anderen Bereich des Bauteils zu untersuchen, wird eine neue Messreihe gestartet und die Information über die Messabdeckung neu initialisiert.

Nach einer abgeschlossenen Messreihe wird die Messabdeckung samt aller Aufnahmen für die Dokumentation mit gespeichert. Dadurch kann bei der Auswertung noch einmal überprüft werden, ob der zur Untersuchung vorgesehene Teil des Prüflings vollständig untersucht worden ist. Demnach wird das Risiko des Übersehens eines Defekts durch fehlende Messabdeckung minimiert. Denn nur mit einer vollständigen Messabdeckung kann eine optimale Fehlerauffindwahrscheinlichkeit erhalten werden.

### 4.3.3 Prozessabschnitt 3: Auswertung der Ergebnisse

Im Anschluss an die Messung werden die Messergebnisse ausgewertet. Dabei werden die thermografischen Ergebnisbilder (meist Puls-Phasen-Bilder) nach Anzeigen untersucht, die potenzielle Defekte darstellen könnten. Im zweiten Schritt werden diese Anzeigen bewertet, indem sie als Risse, Delaminationen, Ungenzen, Oberflächenschäden usw. oder sog. Scheinanzeigen klassifiziert werden, also Anzeigen im

Ergebnisbild, die aber keinen Defekten entsprechen, sondern zum Beispiel durch Verunreinigungen hervorgerufen worden sind. Diese erste Bewertung ist für das Endergebnis der Untersuchung von sehr großer Bedeutung. Eine falsche Klassifizierung kann nämlich schwerwiegende Folgen haben, wenn eine Fehlstelle, die in Wirklichkeit ein Riss ist, als eine Scheinanzeige klassifiziert wird. Sollte so ein Bauteil am Ende der Inspektion aufgrund dieser falschen Klassifizierung als „in Ordnung“ bewertet und erneut in einer Maschine eingesetzt werden, kann dies zu einem Ausfall der ganzen Maschine führen. Ebenso verhält es sich mit Anzeigen, die beispielsweise aufgrund ihrer geringen Größe im Ergebnisbild durch den Prüfer übersehen werden.

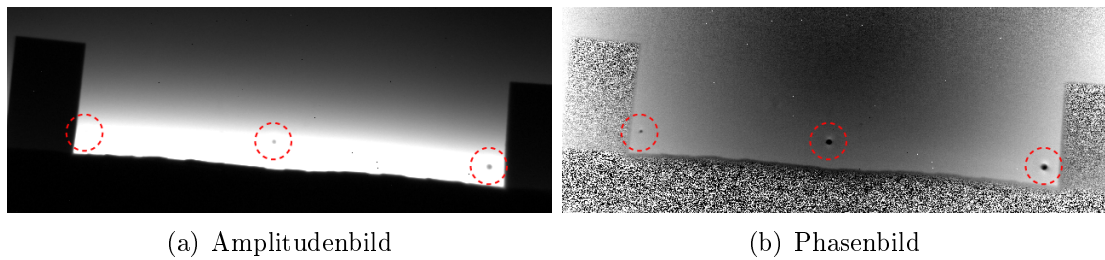
Diese Fehler im Zuge der Auswertung sind vor allem auf das menschliche Versagen zurückzuführen. Von der Fähigkeit und der Konzentration des Prüfers in diesem Prozessabschnitt hängt die Richtigkeit des Endergebnisses sehr stark ab. Dieser Prozessabschnitt beinhaltet zwei auf der RVT-Technik basierende Arbeitsschritte, die dem Prüfer eine Unterstützung leisten. Jeder dieser zwei Arbeitsschritte ist für bestimmte Thermografieverfahren ausgelegt, somit werden diese in den folgenden Abschnitten anhand von konkreten Beispielen vorgestellt.

#### **4.3.3.1 Zusammenfassung der Ergebnisbilder**

Abhängig von der Bauteilgröße und -komplexität sind eine oder mehrere Kameraansichten notwendig. Soll ein komplexes bzw. großes Bauteil vollständig untersucht werden, muss dieses häufig in Bereiche unterteilt werden, die dann nacheinander inspiziert werden [81]. Dabei muss der Prüfling, nachdem die Untersuchung eines Bereiches abgeschlossen wurde, gegenüber der IR-Kamera neu ausgerichtet werden bzw. muss die Kamera neu positioniert werden.

Für jede Kameraansicht sind außerdem je nach Reichweite des Induktionseffekts meist mehrere Messungen notwendig, um das gesamte Bildfeld abzudecken. Denn je kleiner diese Reichweite ist, desto kleiner muss der Abstand sein, um den der Induktor (Prüfkopf) nach jeder Messung verschoben wird. Wichtig ist dabei, dass es zu keinen Lücken kommt, wo keine ausreichende induktive Anregung stattgefunden hat (mehr dazu im Abschnitt 4.3.2.2).

Wichtig ist hier auch die angestrebte Genauigkeit, also die minimale Defektgröße, die noch im Ergebnisbild erkennbar sein soll. Denn je näher man mit der IR-Kamera an das Bauteil herangeht, desto kleinere Defekte sind potenziell erkennbar. Dies ergibt sich unmittelbar aus dem Auflösungsvermögen der Kamera. D. h. aber, mit steigender Genauigkeit erhöht sich auch die Anzahl der erforderlichen Kameraan-



**Abbildung 4.20:** Das Ergebnis der Puls-Phasen-Analyse nach einer induktionsthermografischen Messung an einem Bereich der Verdichterschaufel (Abschnitt 4.2). In (a) ist das Amplituden- und in (b) das Phasenbild zu erkennen. Die drei Defekte (rot markiert) sind im Phasenbild (b) deutlich besser zu sehen, da hier der Einfluss der Inhomogenität der Stromdichteverteilung geringer ist. Die Anregungsfrequenz betrug 12,5 kHz und die -zeit 100 ms.

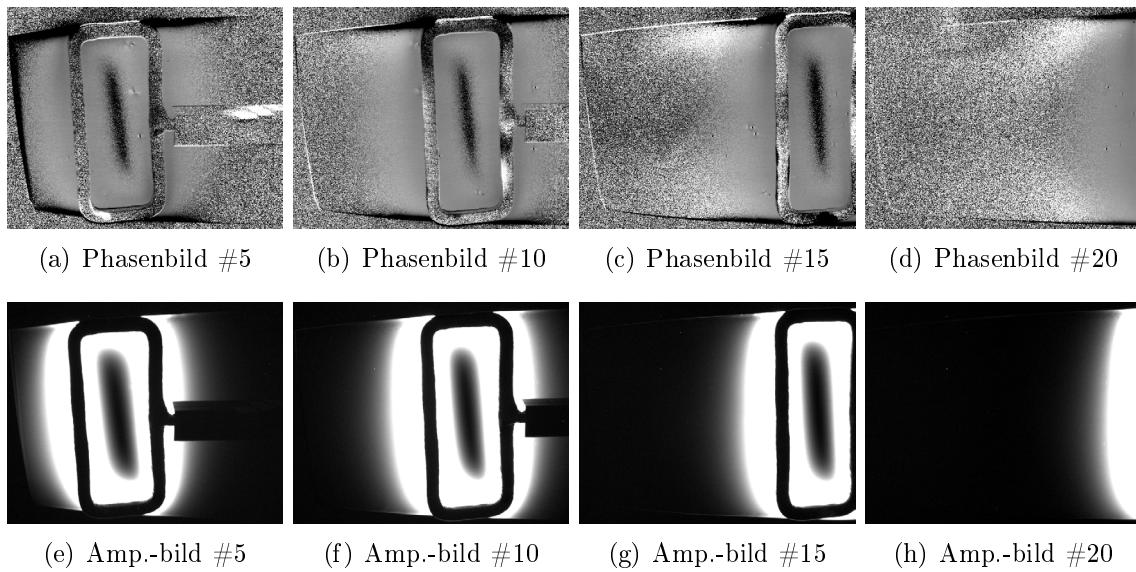
sichten.

Im Laufe einer induktionsthermografischen Untersuchung entstehen pro Bauteil so in der Regel 20–80 Ergebnisbilder, die entweder den ganzen Prüfling oder einen bestimmten Bereich davon messtechnisch abdecken, und die vom Prüfer einzeln ausgewertet werden müssen.

Deshalb wurde ein Algorithmus entwickelt, der eine Zusammenfassung aller innerhalb einer Kameraansicht verfügbaren Ergebnisbilder ermöglicht. Durch dessen Einsatz entsteht pro Kameraansicht nur ein einziges Ergebnisbild, das vom Prüfer ausgewertet werden muss, das aber alle Informationen der Einzelbilder enthält.

Bei der Auswertung der induktionsthermografischen Daten sind die Phasenbilder (siehe Puls-Phasen-Analyse im Abschnitt 2.1.2) von besonderer Bedeutung [105]. Dies liegt insbesondere daran, dass der Einfluss der Inhomogenität der Stromdichteverteilung auf die Phaseninformation bedeutend geringer ist, als das bei der Amplitudeninformation der Fall ist. Diese Tatsache hat zur Folge, dass die Defekte im Phasenbild in der Regel klarer als im Amplitudenbild zu sehen sind (siehe Abbildung 4.20). Dadurch werden im Rahmen einer Auswertung überwiegend die Phasenbilder in Betracht gezogen. Aus diesem Grund behandelt der hier vorgestellte Algorithmus vor allem die Zusammenfassung der Phasenbilder. Die Amplitudenbilder lassen sich zwar genauso zu einem gesamten Amplitudenbild kombinieren, was aber nicht zwingend zu einer besseren Detektierbarkeit führt (siehe weiter unten).

Der Algorithmus der Zusammenfassung der Ergebnisbilder wird anhand von einer Serie von 20 Messungen erläutert. In Abbildung 4.21 sind die Amplituden und Phasenbilder ausgewählter Messungen dargestellt. Diesem Algorithmus liegt die Puls-Phasen-Analyse zugrunde. Ähnlich wie im Abschnitt 4.3.2.2 wird für jede



**Abbildung 4.21:** Eine induktionsthermografische Untersuchung an einer Verdichterschaufel. Darstellung der Phasen- und Amplitudenbilder (nach Pulse-Phasen-Analyse) der fünften, zehnten, fünfzehnten und zwanzigsten Messung. Der Induktor wird nach jeder Messung nach rechts verschoben, so dass nach insgesamt 20 Messungen der komplette obere Bereich der Schaufel abgedeckt ist. Die Anregungsfrequenz betrug 12,5 kHz und die -zeit 100 ms.

Messung  $m$  ein komplexer Vektor  $\underline{f}_m(x, y)$  berechnet:

$$\underline{f}_m(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} T_{mn}(x, y) e^{i\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}, \quad (4.1)$$

wobei  $x, y$  die Pixelkoordinaten,  $T_{mn}(x, y)$  der Vektor mit allen Pixeln des Frames  $n$  der Messung  $m$  und  $N$  die Anzahl aller Bilder in der Aufnahme ist. Im nächsten Schritt wird eine komplexe Summe  $\underline{F}(x, y)$  über alle Messungen  $M$  gebildet:

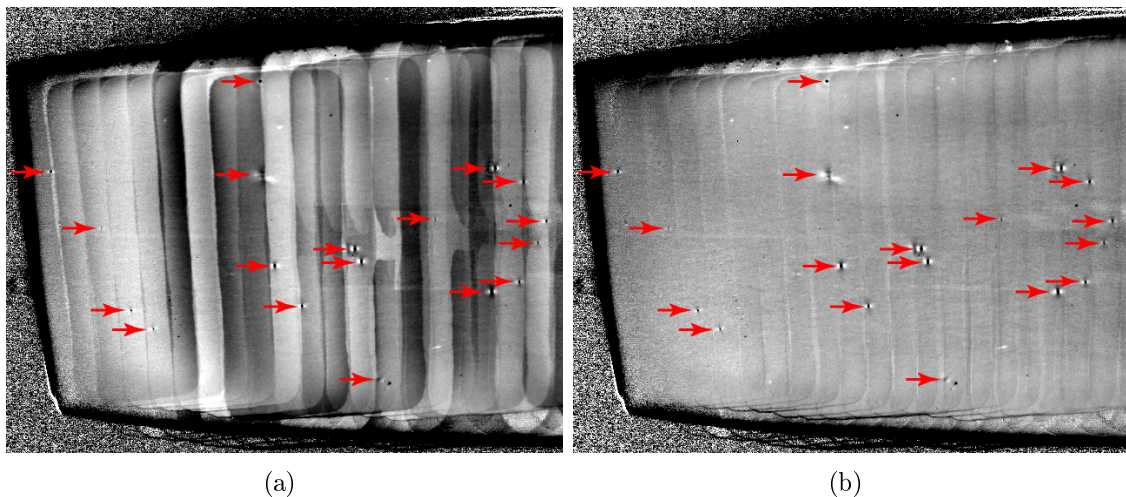
$$\underline{F}(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \underline{f}_m(x, y). \quad (4.2)$$

Abschließend kann das gesamte Phasenbild berechnet werden:

$$\Phi(x, y) = \arg\left(\underline{F}(x, y)\right) = \arctan\left(\frac{\Im\left(\underline{F}(x, y)\right)}{\Re\left(\underline{F}(x, y)\right)}\right). \quad (4.3)$$

Bei Messungen an verschiedenen Prüfpositionen liegen unterschiedliche Wärme-flussverteilungen und damit unterschiedliche Kontrastverhältnisse vor, so dass nach



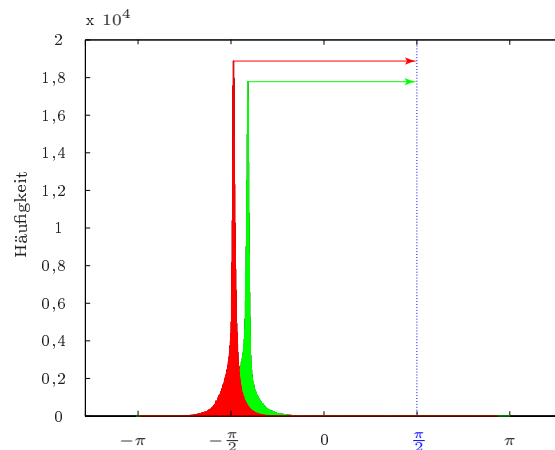


**Abbildung 4.22:** Untersuchung einer Verdichterschaufel mit Induktionsthermografie. Zusammenfassung zwanzig induktionsthermografischer Phasenbilder zu einem gesamten Ergebnisbild. In (a) ist die Zusammenfassung ohne und in (b) mit der Phasennormierung gezeigt. Mit roten Pfeilen sind Defekte markiert, die auf beiden Bildern zu erkennen sind. Doch erst durch den Einsatz der Phasennormierung erhält man ein deutlich homogeneres und artefaktfreies Bild.

Anwendung der Puls-Phasen-Analyse die einzelnen Ergebnisbilder relativ zueinander einen Phasenversatz aufweisen. Dies ist insbesondere bei kurz hintereinander durchgeführten Messungen der Fall, wenn im Bauteil noch eine inhomogene Wärmeverteilung von der vorangegangenen Messung das Ergebnis der darauf folgenden verfälscht. Dies betrifft überwiegend Materialien, die die Wärme schlecht leiten (z. B. Stahl), denn in diesen breitet sich die Wärme langsamer aus. Folglich führt diese Tatsache beim Überlagern der einzelnen Ergebnisbilder zu Artefakten. Die in jeder Messung vorhandenen Strukturen – insbesondere der Induktor – treten im Überlagerungsbild deutlich hervor und führen zu einem inhomogenen, oft streifigen, Bild (Abbildung 4.22(a)).

In Abbildung 4.23 sind die Phasenwerte zweier Messungen (der fünften und zehnten aus der Serie) in Form von Histogrammen dargestellt. Hier ist der absolute Phasenversatz zwischen beiden Messungen (die Verschiebung der beiden höchsten Peaks) deutlich zu erkennen. Das gleiche Verhalten ist auch bei allen anderen Messungen aus der Messserie zu beobachten. Diese Problematik kommt bei der Induktionsthermografie immer dann vor, wenn mehrere Messungen an schlecht wärmeleitenden Materialien nacheinander erfolgen. Bei konventioneller Auswertung, wenn die Ergebnisbilder einzeln ausgewertet werden, kommt diese absolute Phasenverschiebung zwischen den Messungen nicht zum Tragen, da der Kontrast basierend auf dem Hi-

**Abbildung 4.23:** Illustration der Phasenwerte der fünften (rot) und der zehnten (grün) Messung dargestellt in Form von Histogrammen. Im Rahmen der Phasennormierung werden alle Phasenwerte um den Abstand zwischen dem jeweils häufigsten Wert (höchster Peak im Histogramm) und einem festen Wert, hier  $\frac{\pi}{2}$  (blau), absolut verschoben. Der Vorgang wird für jede Messung durchgeführt. Dadurch werden Bildartefakte beseitigt, die bei schlecht wärmeleitenden Materialien aufgrund einer inhomogenen Wärmeverteilung entstehen (Abbildung 4.22).



stogramm immer separat optimal eingestellt wird. Hierfür werden die Kontrastgrenzen um den höchsten Peak im Histogramm gesetzt. Eine vergleichbare Einstellung des Kontrastes ist im Falle eines zusammengefassten Ergebnisbildes nicht möglich, da das Histogramm dann mehrere hohe Peaks aufweist.

Würden die einzelnen Messungen zeitlich so weit auseinander liegen, dass sich die Wärme immer in dem Bauteil homogen ausbreiten würde, würde diese Phasenverschiebung nicht auftreten. Dies ist aber in der Praxis nicht möglich, da es gegebenenfalls zu sehr lange Pausen zwischen den Messungen führen würde. Um diese Bildartefakte zu kompensieren, wurde daher in dieser Arbeit eine sog. Phasenkompensation entwickelt. Diese basiert darauf, dass die absolute Phase für die Fehlerdetektion keine Rolle spielt. Viel wichtiger sind die Phasenunterschiede, die innerhalb eines Phasenbildes auftreten und auf dem Bildschirm in Form von Grauwerten dargestellt werden. D. h. alle Phasenwerte eines Phasenbildes können um einen beliebigen und konstanten Wert verschoben werden, ohne das Phasenbild zu verfälschen.

Im Zuge der Phasennormierung werden alle Phasenwerte jedes Phasenbildes so weit verschoben, dass der höchste Peak im Histogramm nach der Verschiebung an einem bestimmten Phasenwert auftritt. Hierfür wird im ersten Schritt für jedes Phasenbild im Histogramm nach dem häufigsten Phasenwert (höchstem Peak im Histogramm)  $P_m$  gesucht. Dabei wird auf die Phasenwerte ein Savitzky-Golay-Glättungsfilter [90, 79, 80] angewendet, um das Rauschen zu unterdrücken und dessen Einfluss auf die Bestimmung des Maximums im Histogramm zu minimieren. Der Vorteil dieses Glättungsfilters besteht darin, dass die Eigenschaften der gefilterten Daten (wie eben z. B. Maxima) durch das Filter nicht verfälscht wird. Die Bestim-

mung des Maximums erfolgt dann durch Sortieren der Werte nach der Häufigkeit. Natürlich sind auch andere Verfahren, z. B. Schwerpunktsbestimmung, möglich.

Im zweiten Schritt werden alle Phasenwerte um den Wert  $\Delta\phi_m$  verschoben, also den Abstand zwischen dem häufigsten Phasenwert  $P_m$  und einem festen Wert, z. B.  $\frac{\pi}{2}$ . In Abbildung 4.23 ist der Vorgang für zwei Messungen aus der Messserie (Messung fünf und zehn) als Beispiel schematisch dargestellt. Hierfür wird der komplexe Vektor  $\underline{f_m(x, y)}$ , der durch die Gleichung 4.1 definiert ist, herangezogen. Auf diesen wird die Phasenverschiebung  $\Delta\phi_m$  angewendet wie folgt:

$$\begin{aligned} \underline{f_{m\Delta\phi_m}}(x, y) &= \underline{f_m(x, y)}e^{i\Delta\phi_m} = \\ &= \Re\left(\underline{f_m(x, y)}\right) \cos(\Delta\phi_m) - \Im\left(\underline{f_m(x, y)}\right) \sin(\Delta\phi_m) + \\ &+ i\left(\Im\left(\underline{f_m(x, y)}\right) \cos(\Delta\phi_m) - \Re\left(\underline{f_m(x, y)}\right) \sin(\Delta\phi_m)\right). \end{aligned} \quad (4.4)$$

Folglich wird die komplexe Summe  $\underline{F(x, y)}$  aus der Gleichung 4.2 nun so bestimmt:

$$\underline{F(x, y)} = \sum_{m=0}^{M-1} \underline{f_{m\Delta\phi_m}}(x, y). \quad (4.5)$$

Abschließend wird das gesamte Phasenbild  $\Phi(x, y)$  wie in der Gleichung 4.3 berechnet.

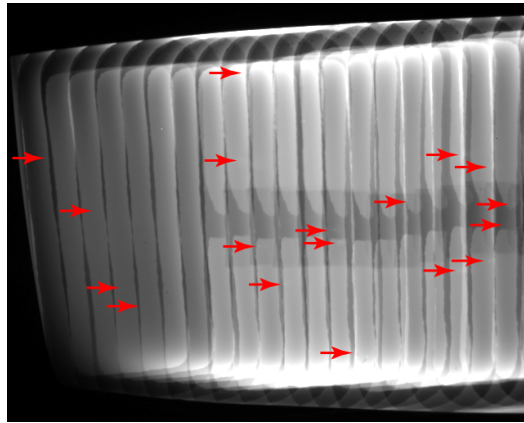
Das Ergebnis der Zusammenfassung aller 20 Messungen zu einem Phasenbild mit dem Einsatz der Phasennormierung ist in Abbildung 4.22 (b) zu sehen. Das Phasenbild ist nun weitgehend frei von den störenden Artefakten, da die absoluten Phasenverschiebungen zwischen den Messungen kompensiert wurden. Es ist auch deutlich zu sehen, dass die Phasennormierung zu einer besseren Interpretierbarkeit des gesamten Phasenbildes beiträgt. Die Defekte sind deutlich besser vom Hintergrund abgehoben.

Wie bereits davor betont, können auch die Amplitudenbilder zusammengefasst werden. Das gesamte Amplitudenbild wird wie folgt berechnet:

$$A(x, y) = \left| \underline{F(x, y)} \right| = \sqrt{\Re\left(\underline{F(x, y)}\right)^2 + \Im\left(\underline{F(x, y)}\right)^2}.$$

Da die Problematik des Phasenversatzes zwischen den Messungen keinen Einfluss auf die Berechnung der Amplitude hat, kann die komplexe Summe  $\underline{F(x, y)}$  sowohl ohne Phasenkompensation wie in Gleichung 4.2, als auch mit (Gleichung 4.5) berechnet werden. In beiden Fällen erhält man das gleiche Ergebnis. In Abbildung 4.24 ist ein

**Abbildung 4.24:** Untersuchung einer Verdichterschaufel mit Induktionsthermografie. Zusammenfassung zwanzig induktionsthermografischer Amplitudenbilder zu einem gesamten Amplitudenbild. Rote Pfeile zeigen auf die Stellen, wo sich die Defekte befinden (wie in Abbildung 4.22), die jedoch im zusammengefassten Amplitudenbild nicht zu sehen sind. Die Amplitudenbilder sind somit nicht gut für die Fehlersuche bei der Induktionsthermografie geeignet.

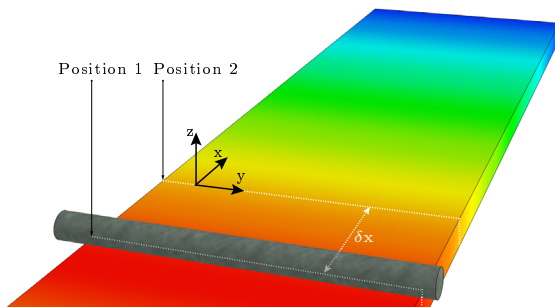


zusammengefasstes Amplitudenbild (20 Messungen) zu sehen. Hier sind die Defekte jedoch kaum erkennbar. Darüber hinaus ist die Inhomogenität der Wärmeverteilung (hängt mit der Stromdichteverteilung zusammen) besonders stark ausgeprägt. Aus diesem Grund eignet sich ein zusammengefasstes Amplitudenbild nicht für die Fehlerdetektion, was auch bei einzelnen Amplitudenbildern der Fall ist (Abbildung 4.20). Auf diesem Amplitudenbild ist jedoch die Stärke der Wärmeentwicklung in dem Bauteil über die ganze Messserie (20 Messungen) gut erkennbar. Sollte es Stellen geben, die nicht hinreichend angeregt wurden, könnte man das anhand dieses Bildes feststellen. Genau dieses Prinzip wird für die Bestimmung der Messabdeckung (Abschnitt 4.3.2.2) verwendet.

### Analyse der Wärmeausbreitung

Die infolge der induktiven Anregung entstandene Wärme breitet sich im Bauteil aus. Von der thermischen Diffusivität  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho_D c}$  des Materials hängt es ab, wie lange es dauert, bis im Bauteil wieder eine homogene Wärmeverteilung herrscht. Dabei ist  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit,  $\rho_D$  die Materialdichte und  $c$  die spezifische Wärmekapazität des Materials. Nach jeder Messung wird der Induktor um einen bestimmten Abstand  $\delta x$  verschoben, ehe eine weitere Messung durchgeführt wird. Eine langsame Wärmeausbreitung verursacht den davor diskutierten absoluten Phasenversatz bei den nachfolgenden Messungen.

Um diese Hypothese zu untermauern, wird im Weiteren die Wärmeausbreitung anhand eines analytischen Modells am Beispiel eines flachen und länglichen Körpers analysiert (Abbildung 4.25), der als Modell zum Beispiel eines Turbinenschaufelblatts dienen soll. Hier sei der Einfachheit halber nur der Fall einer eindimensionalen Wärmeleitung betrachtet, der in guter Näherung dann gilt, wenn die Skintiefe (siehe



**Abbildung 4.25:** Modell für die Bestimmung der zeitlichen Wärmeänderung an der Position 2. Die Anregung findet zuerst an der Position 1 und dann Position 2 statt. Die Wärme entsteht unter dem Induktor und breitet sich entlang des Körpers ( $x$ -Richtung) aus. Die thermische Diffusivität des Materials  $\alpha$  bestimmt die zeitliche Ausbreitung der Wärme. Der Abstand zwischen beiden Positionen beträgt  $\delta x$ .

Abschnitt 2.1.1.2) groß im Vergleich zur Körperdicke ist. In dieser Näherung wird angenommen, dass während der induktiven Anregung Wärme entsteht, die über die ganze Dicke des Körpers homogen verteilt ist. Diese breitet sich dann entlang des Körpers aus, d. h. die Wärmeausbreitung kann auf ein eindimensionales Problem zurückgeführt werden. Eine induktionsthermografische Messung dauert in der Regel weniger als eine Sekunde, so dass der Wärmeaustausch mit der Umgebung vernachlässigt werden kann. Folglich wird weiterhin angenommen, dass der Prozess unter adiabatischen Bedingungen stattfindet.

Die Wärmeausbreitung wird allgemein durch eine Wärmeleitungsdifferentialgleichung [16] beschrieben:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta T. \quad (4.6)$$

Hier ist  $\alpha$  die thermische Diffusivität und  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  der Laplace-Operator. Für eine eindimensionale Wärmeausbreitung ergibt sich für  $T$ :

$$T(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi\alpha t}} e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}}, \quad (4.7)$$

wobei  $Q$  die freigesetzte Wärmemenge ist.

Weiter wird von einer bei der Induktionsthermografie häufig eingesetzten Pulsanregung (engl. „Burst“) ausgegangen. Hierfür muss die Gleichung 4.7 wie folgt modifiziert,

$$T(t, t_0) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi\alpha(t-t_0)}} e^{-\frac{x^2}{4\alpha(t-t_0)}}, \quad (4.8)$$

und nach der Zeit integriert werden. Dabei muss zwischen den beiden folgenden

Fällen unterschieden werden:

$$\begin{aligned} T_{\text{Burst}}(t) &= \frac{1}{\Delta t} \int_0^t T(t, t_0) dt_0 & \text{für } t < \Delta t, \\ T_{\text{Burst}}(t) &= \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} T(t, t_0) dt_0 & \text{für } t > \Delta t, \end{aligned} \quad (4.9)$$

wobei  $\Delta t$  die Anregungszeit ist.

Es wird die folgende Substitution angewendet,

$$u = \frac{4\alpha(t - t_0)}{x^2},$$

sodass nun dieses Integral gelöst werden muss:

$$Q \int \frac{e^{-\frac{1}{u}}}{\sqrt{u}} du.$$

Nach der Integration ergeben sich für die beiden Fälle:

für  $t < \Delta t$ :

$$T_{\text{Burst}}(x, t) = \frac{Q}{2\Delta t\alpha\sqrt{\pi}} \left( \sqrt{\pi}x - e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}} \sqrt{4\alpha t} - \sqrt{\pi}x \operatorname{Erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \right)$$

für  $t > \Delta t$ :

$$\begin{aligned} T_{\text{Burst}}(x, t) &= \frac{Q}{2\Delta t\alpha\sqrt{\pi}} \left( e^{-\frac{x^2}{4\alpha(t-\Delta t)}} \sqrt{4\alpha(t-\Delta t)} + \sqrt{\pi}x \operatorname{Erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha(t-\Delta t)}} \right) - \right. \\ &\quad \left. e^{-\frac{x^2}{4\alpha t}} \sqrt{4\alpha t} - \sqrt{\pi}x \operatorname{Erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4\alpha t}} \right) \right), \end{aligned} \quad (4.10)$$

wobei  $\operatorname{Erf}(x)$  die Gaußsche Fehlerfunktion ist, die so definiert ist:

$$\operatorname{Erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

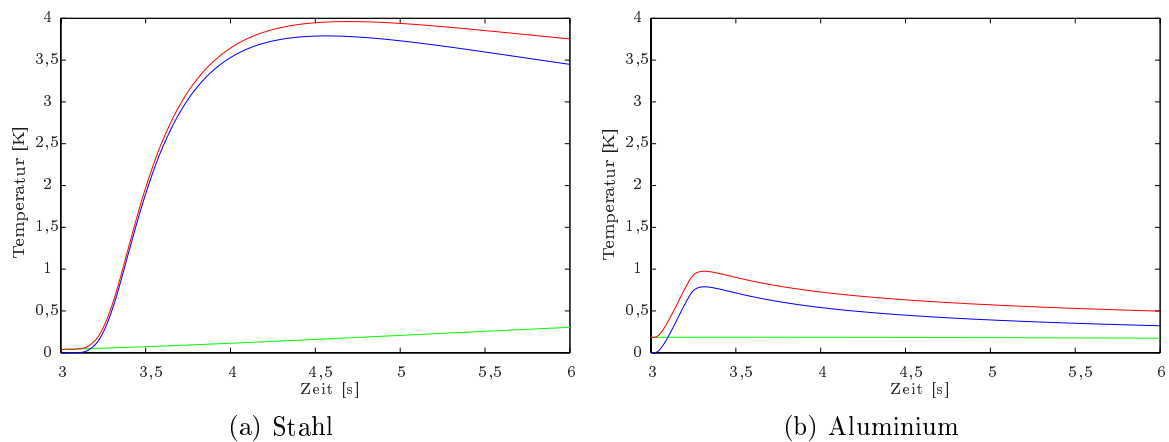
Nun kann die zeitliche Entwicklung der Wärme entlang des Körpers basierend auf der Gleichung 4.10 analysiert werden. Dabei werden zwei Anregungen, sprich zwei Messungen mit leicht versetztem Induktor um  $\delta x = 2$  cm und mit drei Sekunden Zeitversatz, betrachtet. Die erste Anregung erfolgt an Position 1 ( $x = -2$  cm) zum Zeitpunkt  $t = 0$  s, die zweite an Position 2 ( $x = 0$  cm) zum Zeitpunkt  $t = 3$  s (Abbildung 4.25). Die Anregungszeit beträgt in beiden Fällen  $t_{\text{Anregung}} = 200$  ms.

	Stahl	Aluminium
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right]$	45	237
Materialdichte $\rho_D \left[ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \right]$	7,85	2,7
Spezifische Wärmekapazität $c \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right]$	$0,465 \cdot 10^{-3}$	$0,888 \cdot 10^{-3}$
Wärmemenge pro Anregung $Q \left[ \text{J} \right]$	$9,4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$

**Tabelle 4.1:** Die für die Analyse der Wärmeausbreitung verwendeten Materialparameter für Stahl und Aluminium.

Dieses Szenario wurde für zwei Materialien analysiert (ferromagnetischer Stahl und Aluminium). Die hierfür angenommenen Materialparameter sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. In der Praxis unterscheiden sich die Wirkungsgrade der induzierten Leistung bei Stahl und Aluminium deutlich voneinander [105]. Folglich führt dies dazu, dass bei denselben Messparametern im Aluminium weniger Wärme als im Stahl entsteht. Um dem Rechnung zu tragen, wurden bei der Berücksichtigung der Wirkungsgrade für ferromagnetischen Stahl  $\eta_{\text{Stahl}} = 94 \%$  und Aluminium  $\eta_{\text{Aluminium}} = 20 \%$  unterschiedliche Wärmemengen  $Q$  angenommen. Daher ergibt sich für Stahl eine pro Anregung freigesetzte Wärmemenge von  $Q_{\text{Stahl}} = 9,4 \cdot 10^{-2} \text{ J}$  und für Aluminium  $Q_{\text{Aluminium}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ . Diese Werte basieren auf der Annahme, dass die maximal mögliche Wärmemenge pro Anregung  $Q_{\text{Max}} = 10 \cdot 10^{-2} \text{ J}$  beträgt. Hier muss aber betont werden, dass der Parameter  $Q$  nur die Skalierung der in Abbildung 4.26 dargestellten Kurven beeinflusst. Der Charakter der Wärmeausbreitung bleibt unverändert, worauf es bei dieser Analyse ankommt. In Abbildung 4.26 ist das Ergebnis dieser Analyse dargestellt. Hier sind die Temperaturverläufe an der Beobachtungsstelle  $x = 0 \text{ cm}$  (Position 1 in Abb. 4.25) beginnend von der dritten Sekunde (Beginn der zweiten Anregung) bis zur sechsten Sekunde aufgetragen. Die grünen Verläufe stellen die Ausbreitung der Wärme dar, die bei der ersten Anregung entstanden ist. Diese Wärmemenge addiert sich zu der bei der zweiten Anregung (blaue Kurven) freigesetzten Wärme. Somit ergibt sich an der Beobachtungsstelle  $x = 0 \text{ cm}$  eine gesamte Wärme, deren zeitlicher Verlauf an den roten Kurven zu sehen ist.

Hier ist der Unterschied zwischen den beiden Materialien deutlich zu erkennen. Während im Stahl der Einfluss der ersten Anregung (grün) im Laufe der zweiten Anregung noch kontinuierlich ansteigt, hat sich dieser im Aluminium bereits stabilisiert (horizontale grüne Linie). Dies hat zur Folge, dass im Stahl die erste Anregung den Phasenwert aus der Puls-Phasen-Analyse der zweiten Anregung beeinflusst. Hier nimmt der Abstand zwischen der blauen und roten Kurve mit der



**Abbildung 4.26:** Darstellung des theoretischen Temperaturverlaufs nach zwei induktiven Anregungen an der Position 1 ( $x = -2$  cm) und Position 2 ( $x = 0$  cm) für zwei Materialien (Stahl und Aluminium) unter adiabatischen Verhältnissen (Abb. 4.25). Nach der ersten Anregung an der Position 1 erfolgt nach 3 s eine zweite an der Position 2. Grün ist der thermische Einfluss der ersten Anregung auf den Wärmeverlauf an der Position 2 ( $x = 0$  cm) dargestellt. Im Fall von Stahl breitet sich die Wärme langsamer aus und steigt nach 3 s immer noch an. Im Aluminium herrscht nach 3 s dagegen ein thermisches Gleichgewicht (kein Anstieg erkennbar). Rot sind die thermischen Verläufe dargestellt, die sich aus den zwei Anregungen an der Position 2 ergeben. Gäbe es die erste Anregung nicht, würde sich der blaue Temperaturverlauf an Position 2 ergeben. Der Einfluss der ersten Anregung auf den gesamten Temperaturverlauf steigt bei Stahl mit der Zeit an (Abstand zwischen der blauen und roten Kurve nimmt zu), was zu einer Phasenverschiebung im Phasenbild führt. Bei Aluminium bleibt die Phase dagegen nahezu unverändert, da die erste Anregung zu einer annähernd konstanten Anhebung des Temperaturverlaufs führt (vergleiche Tabelle 4.2).

Zeit zu. Dagegen wird im Aluminium der gesamte Temperaturverlauf der zweiten Anregung um einen nahezu konstanten additiven Wert (grüne Kurve) angehoben. Somit ist hier der Einfluss der ersten Anregung auf die Amplitude und die Phase der Puls-Phasen-Auswertung marginal (Vergleich in Tabelle 4.2). Die relative Pha-

	Stahl	Aluminium
Phasenverschiebung $\Delta\phi$ [%]	1,5	0,09
Amplitudänderung $\Delta A$ [%]	3,8	0

**Tabelle 4.2:** Relative Änderungen der Phase und der Amplitude bei Stahl und Aluminium durch den Einfluss der ersten Anregung auf den gesamten Temperaturverlauf an der Position 2.

senverschiebung ist bei Stahl damit fast siebzehn Mal so hoch wie bei Aluminium. Das zeigt, dass insbesondere bei Materialien mit schlechter thermischen Diffusivität



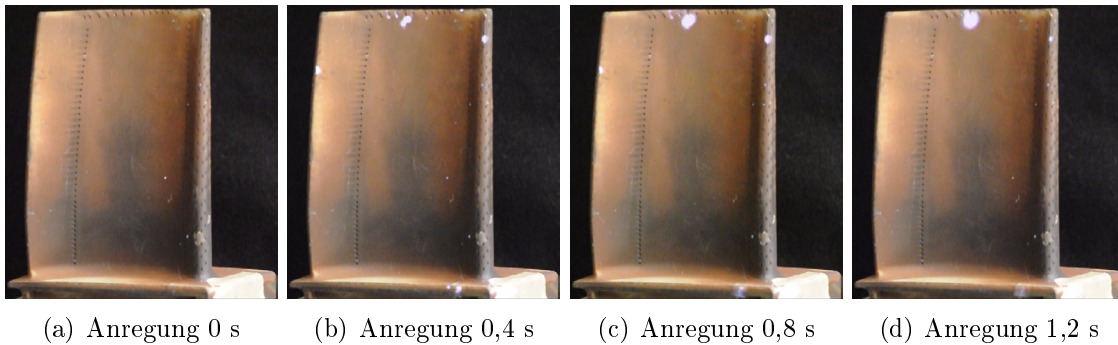
das Phasenkompensationsverfahren angewendet werden sollte.

#### 4.3.3.2 Auswertung der Ergebnisse direkt am Bauteil

Im Abschnitt 3.2.2 wurde die Hybrid-Kamera vorgestellt, die eine IR-Kamera und eine visuelle Kamera in einem Gehäuse kombiniert. Dank dieser Kombination stehen dem Prüfer neben der Information über eine Wärmeentwicklung in einem Prüfling während einer Messung auch farbige visuelle (im für den Menschen sichtbaren Lichtspektrum) Aufnahmen bereit. Beide Aufnahmen (IR und VIS) liegen genau übereinander und können durch eine Einstellung der Überblendung abwechselnd betrachtet werden. Dies hilft bei der Fehlerbewertung an den Stellen, an denen keine eindeutige Aussage bezüglich des Vorhandenseins eines Defekts getroffen werden kann. Die Anzeigen im IR-Bild, die auf eine Oberflächenverschmutzung (wie z. B. Klebstoffreste [44]) zurückzuführen sind, können durch Auswertung der beiden Informationen einfacher identifiziert werden. Alleine durch Betrachtung des IR-Bildes sind solche Anzeigen nämlich oft schwer von tatsächlichen Defekten zu unterscheiden. Hier ist das visuelle (RGB) Bild eine große Hilfe, da eine Verschmutzung auf einem solchen RGB-Bild meist leicht zu erkennen ist.

Die Qualität eines solchen RGB-Bildes hängt jedoch zum einen von der Auflösung und den optischen Eigenschaften der eingesetzten RGB-Kamera, zum anderen von den während der Aufnahme herrschenden Lichtverhältnissen ab. Darüber hinaus ist für so eine Auswertung ein Computerbildschirm zwingend notwendig, der aus Platzgründen gelegentlich außerhalb der Messvorrichtung platziert werden muss. In so einem Fall muss der Prüfer die Umgebung der Prüfvorrichtung verlassen, um eine Auswertung durchführen zu können.

Der hier vorgestellte Ansatz setzt die Projektionseigenschaft des RVT-Verfahrens ein, um das IR-Bild direkt auf das Bauteil zu projizieren und auf diese Weise die während der Messung entstehende Wärmeentwicklung auf dem Prüfling zu visualisieren. Die Auswertung der im Laufe der Messung gewonnenen Informationen wird direkt auf dem Bauteil durchgeführt, indem das Bauteil mit den projizierten thermischen Informationen betrachtet wird. Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass die Ergebnisse der Messung mit dem echten Bauteil verglichen werden können. Somit kann jede Stelle, die im IR-Bild eine Anzeige produziert hatte, direkt mit Eigenschaften des Bauteils verglichen werden. Verunreinigungen oder oberflächliche Beschädigungen, z. B. Kratzer, sind damit wesentlich einfacher zu erkennen als auf dem vorhin erwähnten RGB-Bild. Dasselbe gilt für echte Defekte wie Risse. Diese können so

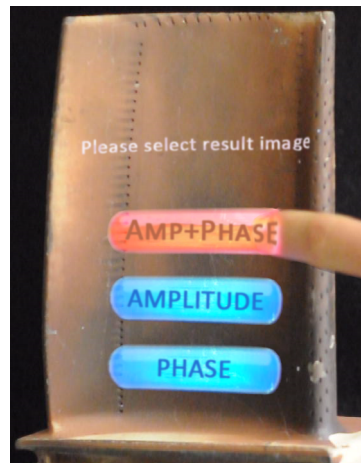


**Abbildung 4.27:** Projektion des aufgenommenen mit der IR-Kamera thermischen Vorgangs auf eine Gasturbinenschaufel. Die Aufnahme wurde im Zuge einer Untersuchung mit akustischer Thermografie durchgeführt. Die Stellen, wo es zu einer Wärmeentwicklung kommt, sind direkt auf dem Bauteil deutlich zu sehen.

klein sein, dass sie auf dem RGB-Bild nicht erkennbar sind. Wird die Position der potentiellen Defekte aber auf die Schaufel projiziert, ist es wesentlich leichter möglich, ggf. auch unter Zuhilfenahme einer Lupe, eine Entscheidung zu treffen.

Unmittelbar nach dem Abschluss der Messung wird die aufgenommene Bildsequenz auf den Prüfling projiziert. Die Wiedergabe dieser thermografischen Bildsequenz erfolgt mit einer wählbaren Geschwindigkeit, um dem Prüfer einen Überblick über die Wärmeentwicklung in dem Bauteil zu verschaffen. Bei induktiven Anregungen, die typischerweise im Bereich weniger Zehntel Sekunden liegen, hilft eine Verlangsamung der Darstellung dabei, die Wärmeentwicklung besser wahrnehmen zu können. Eine beschleunigte Wiedergabe ist hingegen insbesondere bei langen Messungen von Vorteil, wo die Wärmeentwicklung langsam erfolgt, z. B. bei Faserverbundwerkstoffen, die mit Halogenstrahlern oder LED-Lampen angeregt werden. Eine ständige Überwachung einer solchen Messung durch den Prüfer ist sehr mühsam und ermüdend. Somit verschafft das beschleunigte Abspielen der IR-Sequenz dem Prüfer eine schnelle Übersicht und einen besseren Eindruck über den Verlauf der Messung, z. B. auch, wenn er aufgrund deren langen Ablaufs gar nicht anwesend war. Diese Eigenschaft ist optional und kann in der Software jederzeit ein- und ausgeschaltet werden. Ein Beispiel einer solchen Projektion während einer Untersuchung mit akustischer Thermografie an einer Gasturbinenschaufel ist in Abbildung 4.27 zu sehen.

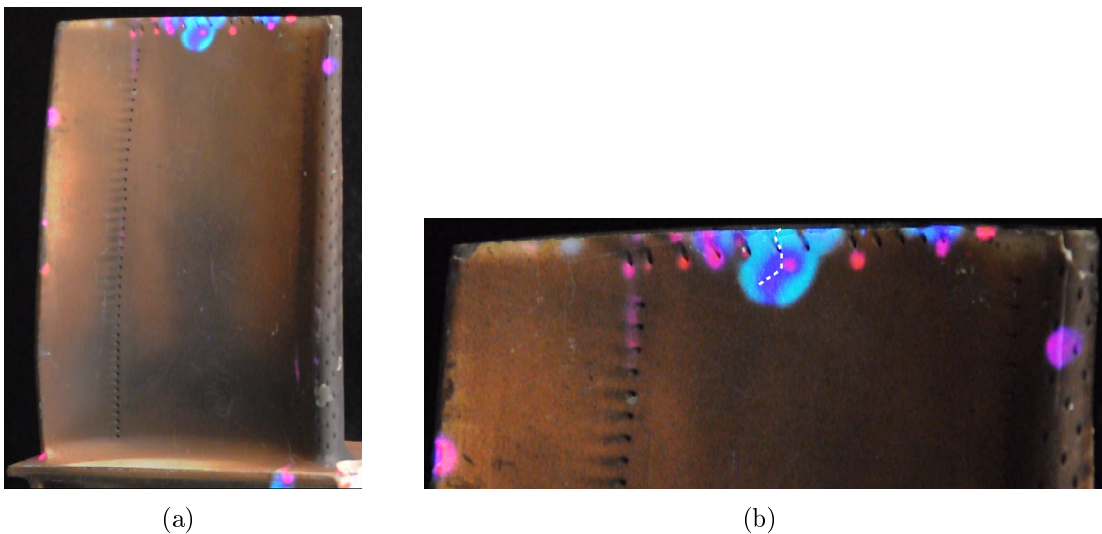
Im nächsten Schritt wird auf den Prüfling ein Auswahlmenü projiziert, bei dem der Prüfer die Art des Ergebnisbildes auswählen kann (Abbildung 4.28), das dann auf dem Bauteil zu sehen ist. Die Auswahl erfolgt auch hier mit einem Zeiger bzw.



**Abbildung 4.28:** Projektion des Auswahlmenüs auf das zu prüfende Bauteil unmittelbar nach dem Abschluss der Messung und der optionalen Projektion der aufgenommenen thermografischen Bildsequenz. Hier kann der Prüfer entscheiden welche Ergebnisse auf den Prüfling projiziert werden sollen (wie z. B. ein farbkodiertes Amplitude+Phase-Bild).

einem Finger wie bereits ausführlich im Abschnitt „*Virtuelles Bedienfeld*“ (Seite 46) beschrieben wurde.

In Abbildung 4.29 ist die Projektion eines farbkodierten Amplitude+Phase-Bildes dargestellt, das sowohl die Amplituden- als auch die Phaseninformation beinhaltet. Diese Darstellungsform beider Informationen wird in der akustischen Ther-



**Abbildung 4.29:** Projektion des farbkodierten Amplitude+Phase-Bildes (siehe Abschnitt 2.1.2) auf eine Gasturbinenschaufel nach einer Messung mit akustischer Thermografie. Es sind mehrere Anzeigen zu sehen, die im Laufe der Messung durch Defekte hervorgerufen wurden. In (b) ist der obere Teil der Schaufel vergrößert dargestellt. Mit der weißen gestrichelten Linie (nicht Teil der Projektion) wurde der Verlauf eines Oberflächenrisses markiert, der die größte Anzeige verursachte.

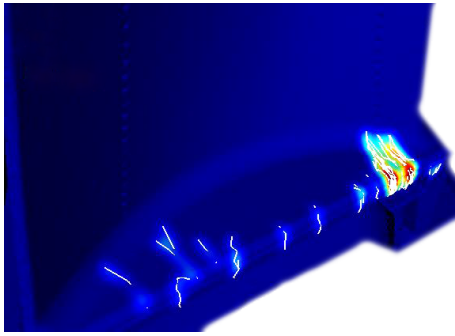
mografie am häufigsten eingesetzt. In diesem Beispiel sind mehrere Anzeigen zu sehen, die durch die direkte Darstellung am Bauteil deutlich leichter zu interpretie-

ren sind. Die größte Anzeige ist hier auf einen Riss zurückzuführen, der dank der Projektion auf dem Prüfling schnell gefunden werden kann. Der Riss ist in Abbildung 4.29(b) mit einer weißen gestrichelten Linie betont. Dessen exakte Ausdehnung ist sowohl auf einem IR- als auch RGB-Bild schwer zu bestimmen. Somit kann eine eindeutige Aussage erst durch Betrachtung des Bauteils getroffen werden.

Diese Technik wird bei den Messaufgaben eingesetzt, bei denen die Detektion der Oberflächendefekte im Vordergrund steht. In solchen Fällen ist ein Vergleich zwischen den Messergebnissen und dem inspizierten Bauteil der beste Weg eine vertrauenswürdige Auswertung durchzuführen. Konventionell muss jede Stelle, an der im IR-Bild eine Anzeige zu sehen ist, auf dem Bauteil identifiziert werden. In der Praxis bedeutet das für den Prüfer einen mehrmaligen und mühsamen Blickwechsel zwischen dem IR-Bild und dem Prüfling. Zusätzlich müssen die gefundenen Defekte bemaßt werden, was die Aufgabe weiterhin erschwert. Darüber hinaus muss in den Fällen, wo sich der Computerbildschirm nicht in der Nähe der Prüfvorrichtung befindet, das Bauteil aus der Prüfvorrichtung gelöst und zu dem Bildschirm getragen werden. Dies entfällt mit dem Einsatz dieses RVT-basierten Verfahrens.

Im Zuge der Auswertung werden die Anzeigen direkt auf dem Prüfling analysiert und entsprechend der Prüfvorgaben bewertet. Dabei wird für jede der Anzeigen eine Aussage getroffen, ob es sich um eine Fehlstelle (ggf. welche Art der Fehlstellen) oder eine Scheinanzeige handelt. Die Ergebnisse der Auswertung werden dann auch dokumentiert. Konventionell erfolgt die Dokumentation auf einer dafür vorgesehenen Papiervorlage. Auf dieser ist die Form des Prüflings abgebildet und alle ausgewerteten Stellen werden darauf markiert und beschriftet. Alternativ wird die Dokumentation an einem Rechner durchgeführt. Hier werden die ausgewerteten Stellen auf einem Bildschirm angeklickt und das Ergebnis der Auswertung für die entsprechende Stelle eingetragen.

Bei der Firma Siemens wurde ein Prüfsystem *GIS* (engl. „Global Inspection System“) entwickelt, das eine automatisierte Prüfung von Gasturbinenschaufeln ermöglicht. Da jeder Prüfling vor der Messung identifiziert wird, können die Daten dem Bauteil eindeutig zugeordnet werden. Folglich kann eine elektronische Datenbank erzeugt werden, die Auswertungsergebnisse aller geprüften Bauteile beinhaltet. Hiermit kann eine Prüfhistorie über den gesamten Lebenszyklus jedes Bauteils gepflegt werden. So lässt sich leicht nachprüfen ob etwaige Defektstellen, die bei der letzten Untersuchung innerhalb der Toleranz lagen und somit das Bauteil als „in Ordnung“ klassifiziert wurde, in der Zwischenzeit gewachsen sind. Zusätzlich können die Daten statistisch analysiert werden. Die auf diesem Wege gewonnenen Daten liefern



**Abbildung 4.30:** *Visualisierung der Ergebnisse einer Inspektionsreihe an 29 Gasturbinenschaufeln [72]. Im Bereich des Schaufelfußes ist eine Anhäufung von Defekten zu sehen, die auf eine Schwachstelle hindeutet.*

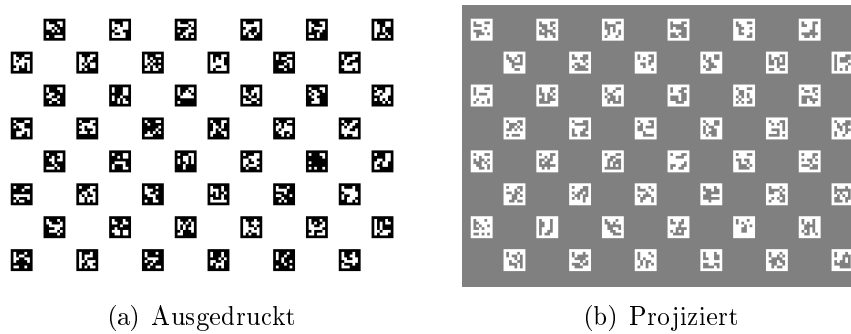
statistische Informationen über Schwachstellen bestimmter Bauteilmodelle und lassen auch ggf. auf Konstruktionsfehler schließen (Abbildung 4.30) [72]. Diese können wiederum bei wiederholter Herstellung zuverlässig beseitigt bzw. diese Bauteile, die überdurchschnittlich viele kritische Fehler aufweisen, mit sofortiger Wirkung aus dem Verkehr gezogen werden. Durch diese Maßnahmen wird die Sicherheit bei der Betreibung der Maschinen weiter erhöht und das Ausfallrisiko gemindert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch Ansätze ausgearbeitet, die die Eintragung der Auswertungsergebnisse in die elektronische Datenbank ohne Computerbildschirm ermöglichen. Da die technische Umsetzung bisher jedoch unvollständig blieb, sollte dies als Ausblick betrachtet werden.

Hierfür wird das virtuelle Bedienfeld eingesetzt. Die gewünschte Stelle auf dem Bauteil sollte durch den Prüfer mit einem Zeiger (wie davor schon beschrieben) ausgewählt werden. Danach erscheint ein Menü, wo der Prüfer die Art des Defekts auswählen und ggf. Notizen eintragen kann. Die Daten werden automatisch in der Datenbank abgelegt.

#### **4.3.4 Prozessabschnitt 4: Evaluierung der Auswertungsergebnisse**

Im Laufe des letzten Prozessabschnitts dieses Arbeitsablaufs werden die Ergebnisse der Auswertung begutachtet. Dieser Prozessabschnitt wird jedoch nicht bei jeder Prüfaufgabe separat geführt, sondern in die Auswertung der Ergebnisse eingebunden. Denn bei vielen Messaufgaben sind die Ergebnisse so eindeutig, dass die Entscheidung über weitere Schritte (Weiterverwendung, Reparatur oder Recycling) sofort von dem die Untersuchung durchführenden Prüfer getroffen werden kann. Sollte jedoch die Prüfaufgabe sehr anspruchsvoll oder die Ergebnisse nicht eindeutig sein, muss eine zusätzliche Evaluierung erfolgen. In den meisten Fällen wird diese durch eine besser als der die Prüfung durchführende Prüfer qualifizierte Fachkraft



**Abbildung 4.31:** In der Arbeit verwendete Kalibrierungsmuster [7]. Das Muster (a) wird ausgedruckt und vor die RVT-Einheit platziert. Das Muster (b) wird auf das ausgedruckte Muster wiederum projiziert. Die RGB-Kamera erfasst beide Muster und der angewendete Algorithmus bestimmt die räumliche Korrespondenz beider Geräte.

ausgeführt. Nicht selten erfolgt eine solche Evaluierung auch an einem anderen Ort.

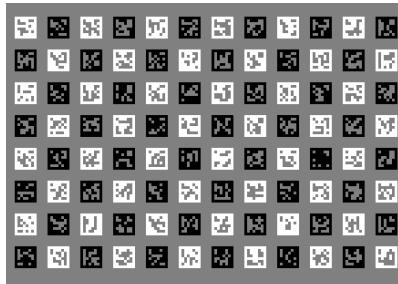
Im Rahmen dieser Arbeit wurde basierend auf dem RVT-Verfahren ein Ansatz ausgearbeitet, der die Messergebnisse bei einer an einem anderen Ort erfolgenden Evaluierung auf dem Prüfling durch eine dynamische Projektion bereitstellt.

Der Prüfling wird also bei der Evaluierung in das Bildfeld der RVT-Einheit platziert. Dessen Orientierung gegenüber der RVT-Einheit ist jedoch unbekannt und muss erstmal bestimmt werden.

Die RVT-Einheit wird durch eine RGB-Kamera (eine Webcam) erweitert. Diese ist auch fest montiert und ändert ihre Position gegenüber dem in der RVT-Einheit eingebauten Beamer nicht. Die beiden Geräte werden dann aufeinander kalibriert, so dass ein Zusammenhang der beiden Koordinatensysteme hergestellt wird. D. h. ein von der RGB-Kamera erfasstes Objekt kann dann in das Koordinatensystem des Beamers transformiert werden. Hierfür wurde ein in der Literatur bekannter Kalibrierungsalgorithmus eingesetzt [7, 25, 26]. Diese Methode ermöglicht eine besonders schnelle (ca. 30 Sekunden) und dabei auch genaue (Subpixel) Kalibrierung.

Für die Kalibrierung werden zwei Kalibrierungsmuster mit binär-kodierten Markern verwendet (Abbildung 4.31). Jeder Marker bestehen aus 36 Bits, die wiederum einem eindeutigen 12-Bit-Wort entsprechen. Die überschüssigen Bits werden für eine Fehlerkorrektur verwendet.

Das eine Muster wird ausgedruckt und vor die RVT-Einheit platziert. Das andere Muster wird wiederum auf das ausgedruckte Muster projiziert. Hier wird eine Deckung der beiden Muster wie in Abbildung 4.32 dargestellt angestrebt. Die RGB-Kamera erfasst die beiden Muster in Form von Bildern, die wiederum kontinuierlich von dem Kalibrierungsmechanismus bearbeitet werden. Das ausgedruckte Muster



**Abbildung 4.32:** Die beiden Muster von Abb. 4.31 sollen in Deckung wie hier dargestellt gebracht werden.

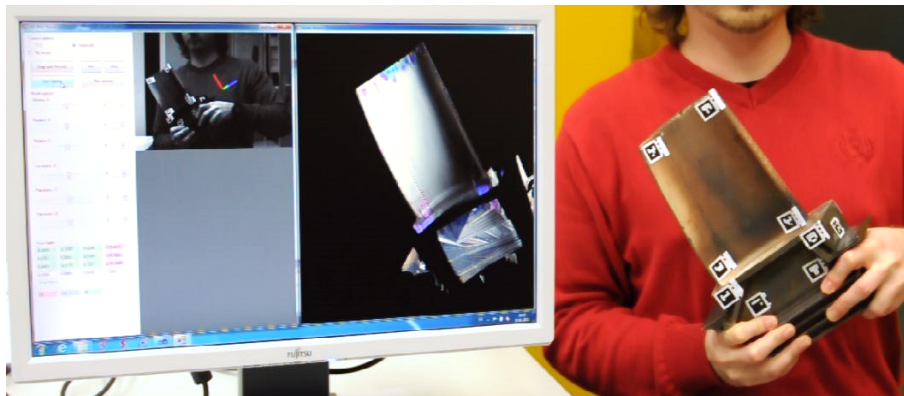


**Abbildung 4.33:** Abbildung einer Gasturbinenschaufel mit den aufgebracht binär-kodierten Markern für das Tracking-Verfahren.

wird mehrmals bewegt und rotiert. Dabei wird das projizierte Bild von dem Algorithmus so lange geometrisch transformiert, bis die ideale Deckung mit einem hinreichend kleinen Fehler erreicht wird. Erst dann wird das Bild für die später erfolgende Kalibrierung gespeichert. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis genug Kalibrierungsbilder vorliegen.

Im Zuge der Kalibrierung werden die ausgedruckten und projizierten Marker eindeutig identifiziert. Weiter werden die Ecken der Marker detektiert und die Kalibrierung mit der etablierten Zhang-Methode [110] durchgeführt. Als Ergebnis werden eine Translations- und Rotationsmatrix bestimmt, die den Zusammenhang zwischen den beiden Koordinatensysteme, des Beamers und der RGB-Kamera, herstellen.

Nun muss die Position des Prüflings im Kamerafeld bestimmt werden. Hier wurde ein im Hause Siemens entwickelter Tracking-Algorithmus verwendet. Dieser basiert ebenfalls auf binär-kodierten Markern, die auf das zu verfolgende Bauteil aufgebracht werden (Beispiel in Abbildung 4.33). Zusätzlich muss ein 3D-Modell des Bauteils zur Verfügung stehen. Die Position und Orientierung der Marker auf dem 3D-Modell ist ebenfalls bekannt. So kann der Algorithmus die Position des eigentlichen Prüflings anhand der im RGB-Bild sichtbaren Marker ähnlich wie im Falle der Kalibrierung bestimmen.



**Abbildung 4.34:** Eine Fotografie des Tracking-Vorgangs. Eine Gasturbinenschaufel mit binär-kodierten Markern wird in den Händen des Prüfers bewegt (rechts im Bild). Die RVT-Einheit erfasst die Szene und der Tracking-Algorithmus erkennt kontinuierlich die Position des Bauteils. Entsprechend der gefundenen Position wird das 3D-Modell des Bauteils mit einem drauf gemappten thermografischen Ergebnisbild in dem virtuellen Raum auf dem Computerbildschirm bewegt (links im Bild).

Darüber hinaus muss das zu projizierende Ergebnisbild für die Projektion vorbereitet werden. Bei der RVT-Einheit besteht der große Vorteil darin, dass eine gemeinsame optische Achse verwendet wird und dadurch das IR-Kamerabild ohne weitere Anpassung (bis auf Translation/Skalierung) passgenau auf den Prüfling projiziert werden kann. Bei der nachträglichen Auswertung steht diese Möglichkeit nicht mehr zur Verfügung. Daher muss das Bild vor der Projektion entsprechend der aktuellen Lage des Prüflings dreidimensional verzerrt werden, um dann bei Projektion auf denselben an jeder Stelle die richtige Information zu zeigen. Hier wird nun das Ergebnisbild auf das 3D-Modell durch einen Registrierungsalgorithmus virtuell aufgebracht [111]. Dabei werden aus den im Ergebnisbild sichtbaren Markern sog. Kontrollpunkte extrahiert, die sich an den Ecken eines jeden Markers befinden. Diese werden wiederum mit den entsprechenden Punkten auf dem 3D-Modell korreliert. Dabei wird das Ergebnisbild geometrisch an das 3D-Modell angepasst.

In Abbildung 4.34 ist der Tracking-Vorgang abgebildet. Ein Prüfer bewegt eine mit Markern versehene Gasturbinenschaufel, deren Position von dem Tracking-Algorithmus kontinuierlich bestimmt wird. Entsprechend der bestimmten Position wird das 3D-Modell des Bauteils mit einem darauf registrierten thermografischen Ergebnisbild bewegt. Das 3D-Modell bewegt sich also entsprechend der tatsächlichen Position der Gasturbinenschaufel, was auf einem Computerbildschirm beobachtet werden kann. Dabei ist das 3D-Modell bereits in das Koordinatensystem des Beamers transformiert. D. h. das 3D-Modell mit dem thermografischen Ergebnisbild kann so



korrekt auf das Bauteil projiziert werden.

Die Thematik der dynamischen Projektion ist sehr umfangreich und kann deswegen im Rahmen dieser Arbeit nur eingeschränkt behandelt werden. Der hier dargestellte Ansatz stellt jedoch einen guten Ausgangspunkt für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet dar.



# Kapitel 5

## Ergebnisse der RVT-basierten Inspektion

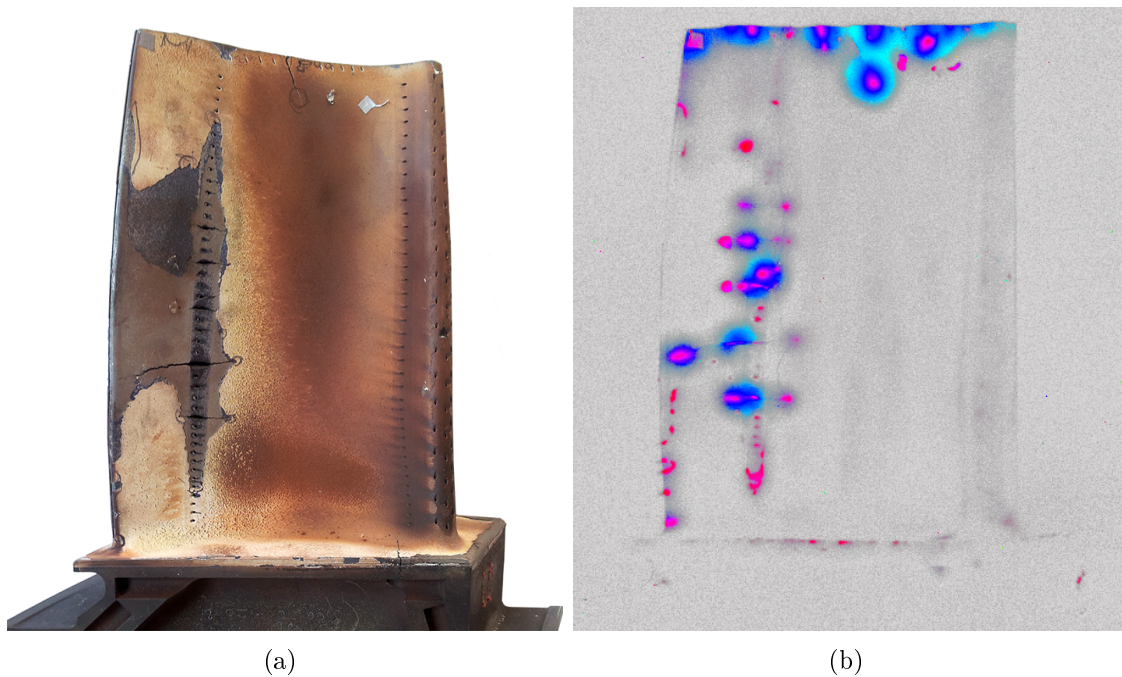
In diesem Kapitel wird der Einsatz des RVT-Verfahrens bei einer Inspektion mit akustischer Thermografie und Induktionsthermografie behandelt.

### 5.1 RVT-Inspektion mit akustischer Thermografie

Bei der akustischen Thermografie stellt die Auswertung der Messergebnisse die größte Herausforderung für den Prüfer dar. Hier wird das Ergebnisbild (meistens farbkodiertes Puls-Phasen-Bild) analysiert und mit dem Prüfling verglichen. Dabei werden die Anzeigen (also die Stellen, an denen es zu einer Wärmeentwicklung kommt) auf dem zu prüfenden Teil lokalisiert und genauer untersucht. Abschließend wird jede Anzeige klassifiziert, d. h. es wird zunächst entschieden, ob es sich überhaupt um einen Defekt handelt oder eine Scheinanzeige und ggf. welche Art des Defektes vorliegt. Die Auswertung erfordert eine hohe Konzentration des Prüfers und ist auch sehr zeitintensiv.

Das RVT-Verfahren bietet auch hier eine Unterstützung des Prüfers, dessen technische Umsetzung im Abschnitt 4.3.3.2 („*Auswertung der Ergebnisse direkt am Bauteil*“) bereits behandelt wurde. Hier wird das Ergebnisbild auf den Prüfling projiziert und die Auswertung ohne Einsatz eines separaten Bildschirms durchgeführt. Dadurch ist jede Anzeige des Ergebnisbildes schnell und präzise lokalisierbar und der Prüfer kann sich vollständig auf die Bewertung und Klassifizierung der Anzeigen konzentrieren.

Dieser Arbeitsschritt des RVT-Verfahrens wurde im Rahmen dieser Arbeit ge-

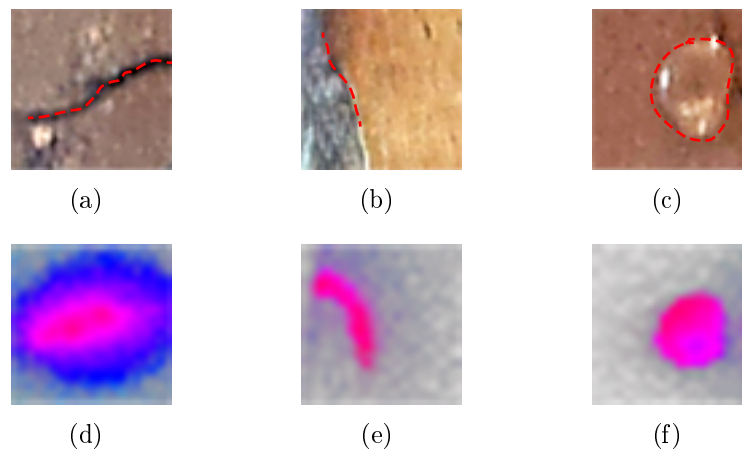


**Abbildung 5.1:** Die im Versuch verwendete Gasturbinenschaufel (a) weist viele Defekte auf, die im farbkodierten Puls-Phasen-Bild (b) als Ergebnis der Untersuchung mit akustischer Thermografie deutlich zu sehen sind.

nauer untersucht. Im Folgenden wird der Einfluss der direkten Auswertung am Bauteil auf das Endergebnis behandelt. Dabei wird die konventionelle Auswertung (also mit einem Computerbildschirm) mit der Auswertung direkt am Bauteil (RVT-Verfahren) verglichen.

### Im Experiment verwendeter Prüfling

Für das Experiment wird eine Gasturbinenschaufel des gleichen Typs wie im Abschnitt 4.2 beschrieben verwendet. Es wurde bewusst ein stark beanspruchtes Bauteil mit vielen Defekten ausgewählt (Abbildung 5.1(a)), um von einem möglichst schwierigen Auswertefall auszugehen. Dieses Bauteil beinhaltet viele Risse sowie Delaminationen (mehr dazu im Abschnitt 4.2), die nebeneinander liegen und dadurch die Auswerteaufgabe erschweren. Zusätzlich wurden an vier Stellen kleine Stücke einer Reflexionsfolie sowie eines Heißklebers auf die Bauteiloberfläche aufgetragen, um gezielt Scheinanzeigen hervorzurufen. Diese erwärmen sich nämlich während einer Untersuchung mit akustischer Thermografie aufgrund viskoelastischer Dämpfung und liefern im Ergebnisbild ähnliche Anzeigen wie Risse bzw. Delaminationen (Abbildung 5.2) [44, 38]. Sie können also nur durch Betrachtung des Prüflings von den



**Abbildung 5.2:** Darstellung der drei Fehlarten: eines Risses (a), einer Delamination (b) sowie einer Scheinanzeige (c). Diese rufen im Puls-Phasen-Bild der akustischen Thermografie Anzeigen (d), (e), (f) hervor, die ohne einen Vergleich mit dem Prüfling nicht eindeutig klassifiziert werden können. Die rote gestrichelte Linie dient einer besseren Sichtbarkeit und betont den Verlauf der Defekte (a) und (b) bzw. umfasst eine Scheinanzeige (c) (hier ein Heißkleber).

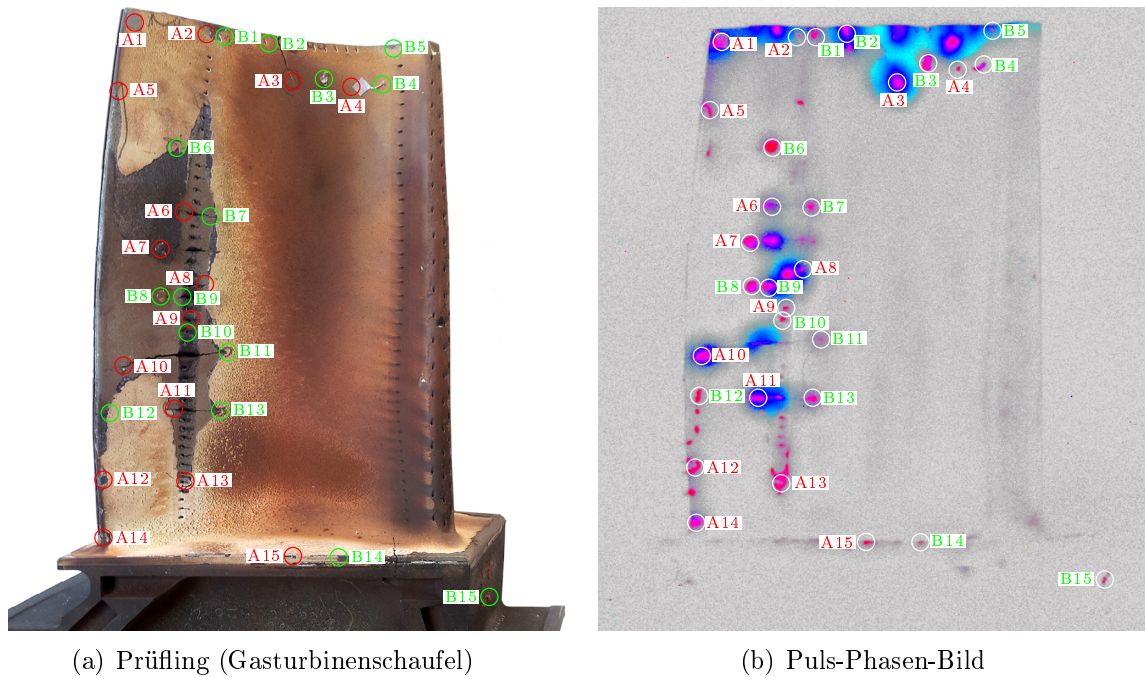
tatsächlichen Fehlern eindeutig unterschieden werden.

### Aufbau des Experiments

Um lediglich die Auswertung und deren Einfluss auf das Endergebnis systematisch zu analysieren, müssen die Einflüsse der anderen Arbeitsschritte (Präparation, Messparameter, Messung) ausgeschlossen werden.

Dazu wurde von einem erfahrenen Prüfer eine Messung an der Gasturbinenschaufel mit akustischer Thermografie (SIEMAT-Prüfanlage) durchgeführt, wodurch ein Ergebnisbild (ein farbkodiertes Puls-Phasen-Bild) entstanden ist (Abbildung 5.1(b)). Dieses Ergebnisbild wurde als Grundlage für die Auswertung während des ganzen Versuchs herangezogen, um dieselbe Ausgangssituation bei jedem Prüfer zu gewährleisten. Durch die einmalige Messung kann sichergestellt werden, dass andere Parameter, wie z. B. Positionierung des Prüflings, Ausrichtung der IR-Kamera oder wechselnde Reflexionen am Bauteil, keinen Einfluss haben.

Auf dem untersuchten Prüfling wurden 30 Prüfpunkte definiert, die im Ergebnisbild eine Anzeige liefern und mit der nötigen Erfahrung auf dem Bauteil eindeutig als ein Riss, eine Delamination oder eine Scheinanzeige klassifiziert werden können. Diese Punkte sind über die ganze Gasturbinenschaufel verteilt (siehe dazu Abbildung 5.3). Daraus wurden zwei Prüfsätze gebildet, die jeweils 15 Prüfpunkte und alle



**Abbildung 5.3:** Verteilung der zwei in dieser Messreihe verwendeten Prüfsätze auf dem Prufing. Das Ergebnisbild (farbkodiertes Puls-Phasen-Bild) der Untersuchung dieses Prufings mit akustischer Thermografie ist in (b) zu sehen.

drei Fehlarten (Riss, Delamination, Scheinanzeige) beinhalten (siehe Tabelle 5.1).

### In das Experiment involvierte Prüfer und deren Aufgabe

Bei dem Versuch waren insgesamt 12 Prüfer involviert. Diese hatten einen unterschiedlichen Erfahrungsgrad mit akustischer Thermografie. Dadurch sollte ein möglichst breites Spektrum an Qualifikationen der Prüfer abgedeckt sein. Darüber hinaus hat jeder Prüfer die gleiche Einleitung sowohl in schriftlicher als auch mündlicher Form bekommen, die ihn mit der Aufgabe vertraut machen sollte. Dabei wurden auch die drei Fehlarten erläutert und am Beispiel einer anderen Gasturbinenschaufel des gleichen Typs vorgestellt.

Die Aufgabe für die Prüfer bestand darin, die Prüfpunkte zu klassifizieren, also jedem der vordefinierten Prüfpunkte eine der drei Fehlarten zuzuordnen. Dabei wurde von jedem Prüfer ein Prüfsatz konventionell mit Hilfe eines Computerbildschirms und der andere mit der Projektion des Ergebnisbildes auf den Prufing ausgewertet. Die Reihenfolge der Prüfsätze wurde jedoch bei jedem Prüfer abgewechselt, so dass Prüfsätze A und B am Ende des Experimentes die gleiche Anzahl an Auswertungen mit und ohne RVT-Verfahren aufwiesen. Durch Einführung der zwei Prüfsätze

	Prüfsatz A	Prüfsatz B
1	Scheinanzeige	Delamination
2	Delamination	Riss
3	Riss	Scheinanzeige
4	Scheinanzeige	Scheinanzeige
5	Delamination	Delamination
6	Riss	Delamination
7	Scheinanzeige	Riss
8	Riss	Scheinanzeige
9	Riss	Riss
10	Riss	Riss
11	Riss	Riss
12	Delamination	Delamination
13	Riss	Riss
14	Delamination	Delamination
15	Delamination	Scheinanzeige

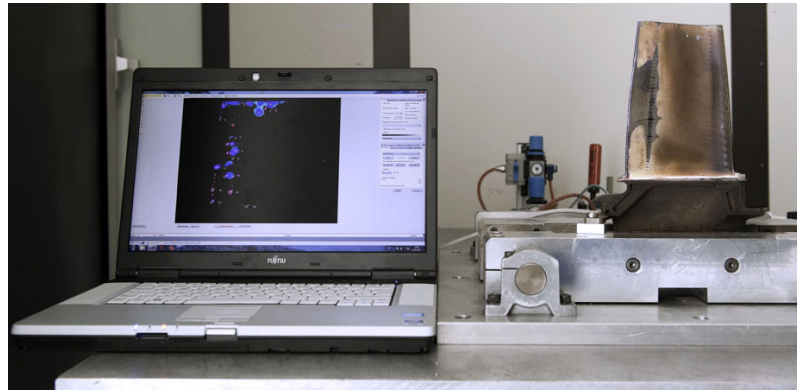
**Tabelle 5.1:** Übersicht über die zwei in diesem Versuch verwendeten Prüfsätze. Jeder Prüfsatz besteht aus 15 Prüfpunkten, deren Verteilung auf dem Prüfling in Abbildung 5.3 dargestellt ist.

wurde auch gewährleistet, dass sich die Prüfer bei der ersten Auswertung die Stelle und Fehlerart der Anzeigen nicht merken konnten und dadurch bei der zweiten Auswertung schneller bzw. genauer wären.

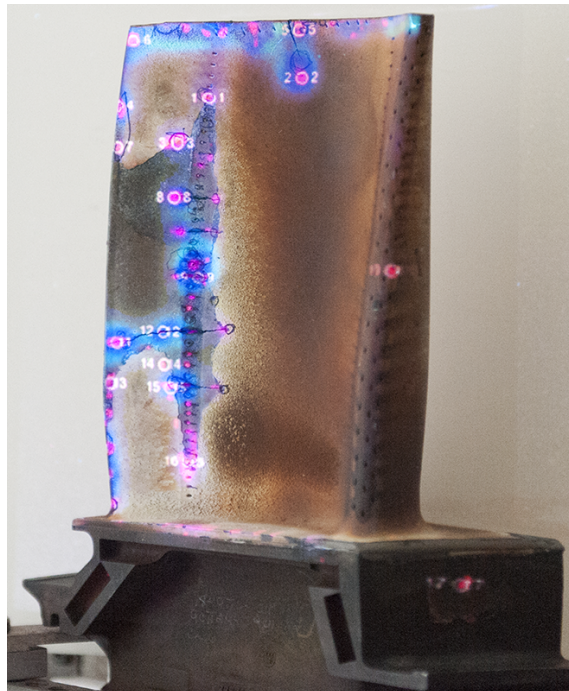
Es wurde auch angenommen, dass ein Prüfer bei der zweiten Auswertung entspannter bzw. sicherer vorgeht, da er schon eine gewisse Prüferfahrung aus der ersten Auswertung hat. Dies kann natürlich das Endergebnis positiv beeinflussen und den Vergleich zwischen der konventionellen und RVT-Auswertung verfälschen. Deshalb haben die Prüfer abwechselnd mit der konventionellen oder RVT-gestützten Auswertung begonnen. Dadurch waren beide Auswerteverfahren gleich oft an erster und an zweiter Stelle, so dass sich die unterstellte Zunahme an Prüfungssicherheit bei der zweiten Untersuchung herausmittelt.

Bei der konventionellen Prüfung stand den Prüfern ein Computerbildschirm zur Verfügung, der in unmittelbarer Nähe des Prüflings positioniert war (Abbildung 5.4). Auf diesem Bildschirm war das Ergebnisbild mit den markierten und durchnummerierten Prüfpunkten eines Prüfsatzes zu sehen (ähnlich wie in der Abbildung 5.3(b) zu sehen). Der Prüfer musste jeden Prüfpunkt auf der Gasturbinenschaufel lokalisieren und dann klassifizieren. Im Falle der RVT-gestützten Auswertung wurde das Ergebnisbild samt der markierten und durchnummerierten Prüfpunkte auf die-

**Abbildung 5.4:** *Der Versuchsaufbau für die Auswertungsreihe. Bei konventioneller Auswertung sind auf dem Computerbildschirm markierte Prüfpunkte dargestellt, die die Prüfer auf dem Prüfling lokalisieren und dann klassifizieren müssen. Siehe auch Abb. 5.5*



**Abbildung 5.5:** *Ein Beispiel einer Projektion des Ergebnisbildes (farbkodiertes Puls-Phasen-Bild) einer Messung mit aktiver Thermografie samt der markierten Prüfpunkte. Bei der RVT-gestützten Auswertung sind alle Informationen direkt auf dem Prüfling zu sehen. Hier ist kein Computerbildschirm notwendig.*

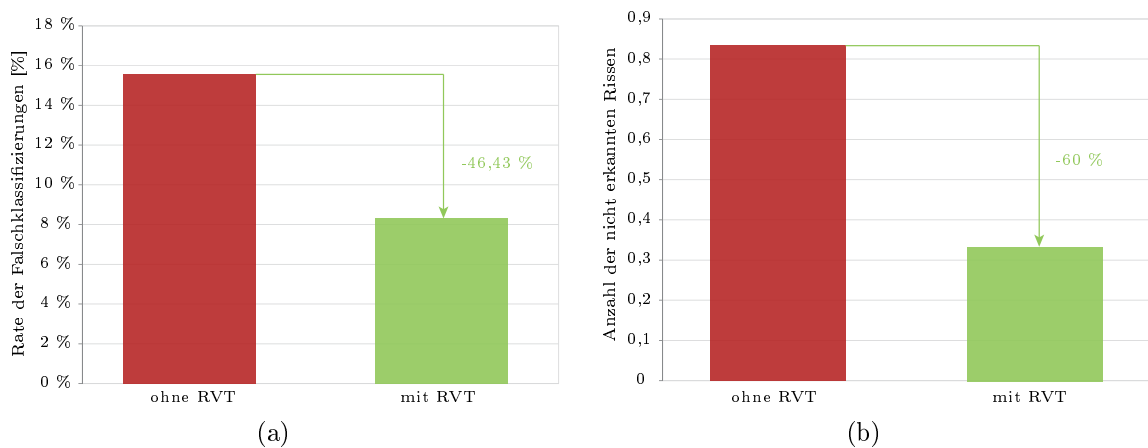


se Gasturbinenschaufel projiziert (Abbildung 5.5). Der Computerbildschirm wurde dabei nicht verwendet.

Die Protokollierung wurde dabei von einem Experten durchgeführt, um genauer die Zeiten stoppen zu können, die vom Prüfer für die Klassifizierung notwendig war. Dadurch sind Fehler beim Aufschreiben sowie die Variation der vom jeweiligen Prüfer dafür benötigten Zeit ausgeschlossen. Die Prüfer teilten Nummer und Ergebnis der Klassifizierung bei jedem Prüfpunkt dem Experten mit, was dieser umgehend auf einem dafür vorgesehenen Formular notierte. Die Reihenfolge der Auswertung hinsichtlich der Prüfpunkte wurde den Prüfern überlassen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Versuchs für alle 12 Prüfer vorgestellt,





**Abbildung 5.6:** Ein Vergleich der konventionellen ohne RVT (rot) und der RVT-gestützten Auswertung (grün) hinsichtlich der Rate der Falschklassifizierungen (a) und der relativen Anzahl der nicht erkannten Risse pro Prüfsatz (b). Die Daten beinhalten alle 12 Prüfer.

dabei wird die konventionelle Auswertung mit der RVT-gestützten hinsichtlich definierter Kriterien verglichen.

### Bewertung der Falschklassifizierungen

Das erste Kriterium betrifft die Falschklassifizierungen, z.B. ein fehlerhaft als Delamination klassifizierter Riss. Eine Übersicht über Falschklassifizierungen für alle Prüfer und die beiden Auswertefälle ist in Abbildung 5.6(a) zu sehen. Hier erkennt man, dass die Rate der Falschklassifizierungen bei der konventionellen Auswertung ca. 16 % beträgt (rot), dagegen im Falle der RVT-gestützten Auswertung nur ca. 8 % (grün). Das ergibt eine Reduktion der Falschklassifizierungen um etwa 50 %.

Eine Falschklassifizierung kann durch zwei Faktoren verursacht werden: Zum einen ist das eine falsche Lokalisierung der Anzeige, was zur Folge hat, dass eine falsche Stelle ausgewertet wird. Hier schafft das RVT-Verfahren eine signifikante Hilfe, indem jede Anzeige an der korrekten Position auf dem Prüfling zu sehen ist. Eine falsche Lokalisierung war bei diesem Versuch für ca. 50 % der Falschklassifizierungen verantwortlich. Der zweite Faktor ist, dass es trotz korrekter Lokalisierung vorkommen kann, dass der Prüfer die Fehlerart falsch erkennt. Darauf hat das RVT-Verfahren keinen Einfluss, was die andere Hälfte der Falschklassifizierungen zur Folge hatte. Dies wurde wiederum durch eine nachträgliche Verifizierung der falsch klassifizierten Prüfpunkte bestätigt. Dabei wurde jeder Prüfer darum gebeten, jeden mit dem RVT-Verfahren falsch klassifizierten Prüfpunkt genau zu analysieren und

**Abbildung 5.7:** Eine Scheinanzeige befindet sich in unmittelbarer Nähe eines Risses, was bei der Auswertung Schwierigkeiten bereitet. Mit roter Linie sind der Verlauf der Scheinanzeige und des Risses betont.



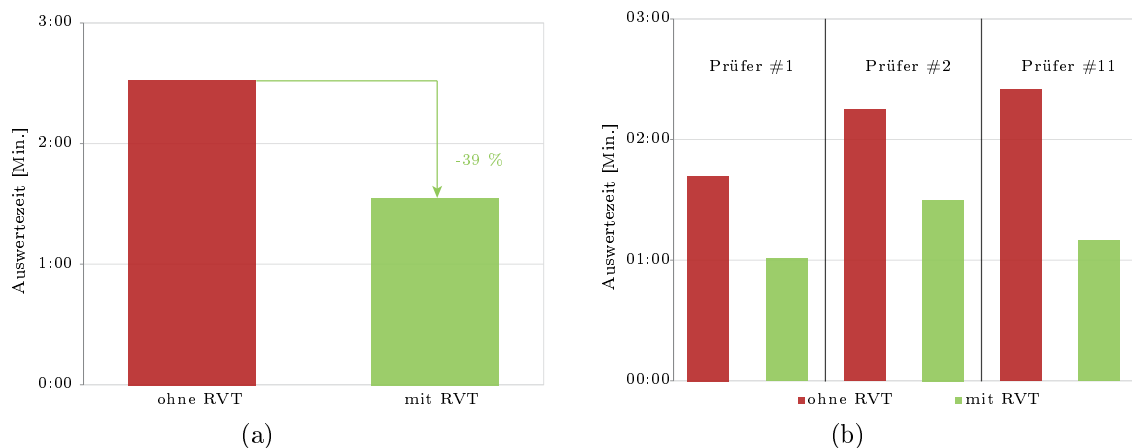
diesen erneut zu klassifizieren. Hier hat sich herausgestellt, dass sich die Prüfer in 95 % der Fälle nicht eindeutig festlegen konnten und dadurch zufällig falsch entschieden hatten. In dem Fall sind also die verbliebenen Falschklassifizierungen (8 % im Experiment) eindeutig auf die Fähigkeiten der Prüfer zurückzuführen.

### **Bewertung der Genauigkeit der Rissdetektierbarkeit**

Die Fehlerarten sind unterschiedlich zu gewichten. Ein Riss kann zum Beispiel deutlich schwerwiegendere Folgen haben als eine Delamination und unter Umständen zum Bruch der Schaufel führen. Ein sehr wichtiges Kriterium stellt daher die Genauigkeit der Rissdetektierbarkeit dar. In Abbildung 5.6(b) ist die durchschnittliche Anzahl der nicht erkannten Risse für beide Auswertefälle zu sehen. Bei der konventionellen Auswertung beträgt diese 0,83 und bei der RVT-Auswertung lediglich 0,33. Sie sinkt also um 60 %. Dazu trägt auch in diesem Fall die präzise Lokalisierung bei. Hier ist es besonders kritisch, wenn sich in unmittelbarer Nähe (1–2 mm) des Risses eine größere Verschmutzung befindet. Eine örtliche Trennung der beiden Anzeigen ist bei der konventionellen Auswertung sehr schwierig und der Riss kann fälschlicherweise als ein Teil der Scheinanzeige klassifiziert werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 5.7 zu sehen. Die Scheinanzeige (Heißkleber; Prüfpunkt A7) liegt neben einem Riss. Bei der konventionellen Auswertung wurde die Scheinanzeige vier Mal falsch klassifiziert. Dagegen ist das bei der RVT-gestützten Auswertung nur einmal vorgekommen.

### **Bewertung der Auswertezeit**

Das dritte Kriterium betrifft die Auswertezeit. Die Prüfer waren während der Auswertung zeitlich nicht eingeschränkt, d. h. sie wurden darauf hingewiesen, nach eigenem Empfinden möglichst genau vorzugehen. Wie erwartet wirkt sich das RVT-Verfahren auch auf die Auswertezeit positiv aus (Abbildung 5.8(a)). Die durchschnittliche Auswertezeit (über 12 Prüfer) ohne das RVT-Verfahren betrug 2 Min 32 Sek. und mit dem RVT-Verfahren 1 Min. 33 Sek., was einer Reduktion um ca.



**Abbildung 5.8:** Ein Vergleich der konventionellen ohne RVT (rot) und der RVT-gestützten Auswertung (grün) hinsichtlich der Auswertezeit (a) (alle 12 Prüfer sind hier berücksichtigt). Drei Prüfer haben bei den beiden Auswertungen (mit und ohne RVT) alle Prüfstellen vollständig korrekt klassifiziert. Bei allen drei erfolgte die Auswertung mit dem RVT-Verfahren jedoch signifikant schneller (b).

39 % entspricht. Die Auswertezeit kann durch das RVT-Verfahren also erheblich reduziert werden.

Darüber hinaus haben drei Prüfer bei den beiden Auswertefällen ein Ergebnis von 100 % richtigen Klassifizierungen erreicht. Sie haben somit ohne und mit dem RVT-Verfahren keine Falschklassifizierung gemacht. Darunter waren ein erfahrener Prüfer und zwei Prüfer mit wenig Prüferfahrung. In allen drei Fällen war aber die Auswertezeit bedeutend kürzer im Falle der RVT-gestützten Auswertung (durchschnittlich um ca. 42 %), was in Abbildung 5.8(b) gut zu sehen ist.

Wie bereits erwähnt, wurde die Reihenfolge der Auswertungen (mit oder ohne RVT-Verfahren) variiert. Dies bedeutet, dass sechs Prüfer mit der RVT-gestützten Auswertung und die anderen sechs mit der konventionellen Auswertung begonnen haben. Die Auswertezeiten wurden auch selektiv für beide Gruppen analysiert. Bei den sechs Prüfern, die mit der RVT-Auswertung begonnen haben und folglich noch keine Erfahrungen mit dieser Aufgabe hatten, betrug die durchschnittliche Auswertezeit mit dem RVT-Verfahren in dem Fall 1 Min. 47 Sek. Dagegen bei den restlichen Prüfern, die zuerst konventionelle und dann RVT-Auswertung durchgeführt hatten, betrug diese Auswertezeit 1 Min. 19 Sek. (Abbildung 5.9). Sie waren also um ca. 26 % schneller. Dies bestätigt also die ursprüngliche Annahme, dass die Prüfer durch die erste Auswertung eine Erfahrung sammeln und folglich schneller die Aufgabe durchführen.

**Abbildung 5.9:** Auswertezeiten wenn RVT-Verfahren bei der ersten (rot) und der zweiten Auswertung (grün) eingesetzt wurde. Die Prüfer wurden, durch die Erfahrungen aus der ersten Auswertung, bei der zweiten Auswertung schneller.



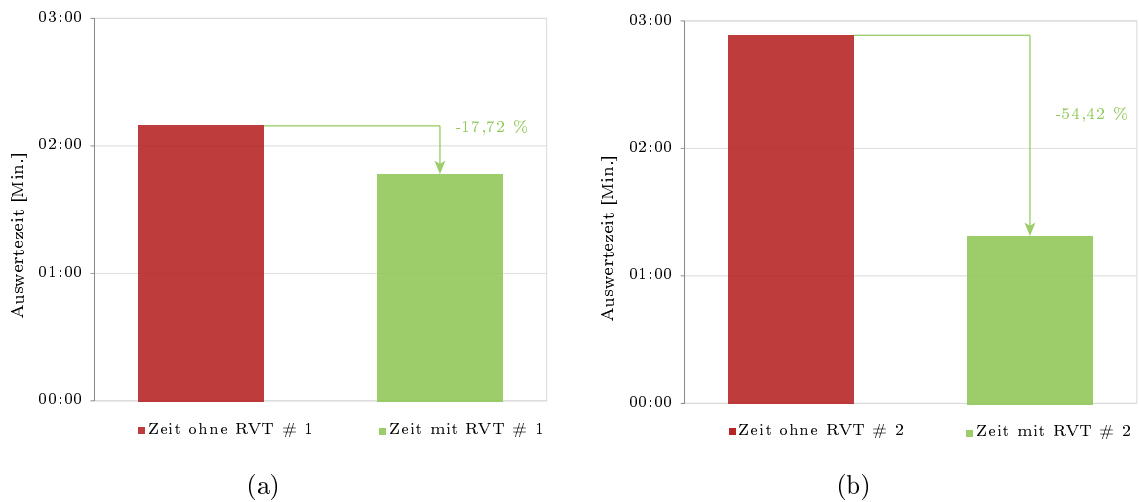
Darüber hinaus wurden auch die Auswertezeiten für die folgenden Fälle untereinander verglichen:

1. bei der ersten Auswertung ohne (rot) bzw. mit (grün) dem Einsatz des RVT-Verfahrens (Abb. 5.10(a)). Hier betragen die Auswertezeiten ohne RVT 2 Min. 10 Sek. und mit RVT 1 Min. 47 Sek. Die Prüfer waren also um ca. 17 % schneller.
2. Bei der zweiten Auswertung ohne (rot) bzw. mit (grün) dem Einsatz des RVT-Verfahrens (Abb. 5.10(b)). Die Auswertezeiten waren ohne RVT 2 Min. 53 Sek. und mit RVT 1 Min. 19 Sek. Das bedeutet eine Verkürzung der Auswertezeit um ca. 54 %.

Das bedeutet also, dass das RVT-Verfahren für erfahrene Prüfer zu einer deutlichen Verkürzung der Auswertezeit führt (ca. 54 %). Es ist aber auch ersichtlich, dass die Prüfer, die mit RVT-Auswertung begonnen haben (Abb. 5.10: Zeit mit RVT # 1 1 Min. 47 Sek.), bei der zweiten in dem Fall konventionellen Auswertung misstrauisch und bedeutend langsamer vorgehen (Abb. 5.10: Zeit ohne RVT # 2 2 Min. 53 Sek.). Das RVT-Verfahren erhöht also das Vertrauen der Prüfer, was kürzere Auswertezeiten zur Folge hat.

Die Ergebnisse dieses Versuches können zusammengefasst wie folgt ausgedrückt werden:

- bei der RVT-gestützten Auswertung fiel die Rate der Falschklassifizierungen im Durchschnitt um ca. 50 % kleiner aus,
- die durchschnittliche Anzahl der nicht erkannten Risse sank bei der RVT-Auswertung um 60 % (von 0,83 auf 0,33),
- die RVT-gestützte Auswertung war im Schnitt um ca. 39 % schneller, bei erfahreneren Prüfern sogar um ca. 50%.



**Abbildung 5.10:** Vergleich der Auswertzeiten wenn: (a) - bei der ersten Auswertung kein RVT-Verfahren (rot) bzw. das RVT-Verfahren (grün) eingesetzt; (b) - bei der zweiten Auswertung kein RVT-Verfahren (rot) bzw. das RVT-Verfahren (grün) eingesetzt werden.

## 5.2 RVT-Inspektion mit Induktionsthermografie

### Projektion der Messabdeckung

Im Abschnitt 4.3.2.2 wurde die technische Umsetzung der Bestimmung und der Projektion der Messabdeckung ausführlich erläutert. Dabei wird die Reichweite des Induktionseffektes unmittelbar nach einer Messung mit induktiver Anregung bestimmt und direkt auf dem Prüfling visualisiert. So wird auch die gesamte Messabdeckung dargestellt, die sich dann aus mehreren Einzelmessungen zusammensetzt. Dadurch steht dem Prüfer eine nach jeder Messung aktualisierte Information zur Verfügung, welche Bereiche des Prüflings bereits inspiziert wurden. Darüber hinaus ist die Messabdeckung durch den Prüfer schnell interpretierbar, da diese in eindeutiger Form direkt auf dem Prüfling zu sehen ist.

Dieser RVT-Arbeitsschritt wurde an zwei unterschiedlichen Prüflingen erprobt: einer Verdichterschaufel (ferromagnetischer Stahl) und einem Radaufhänger (Aluminium). Die beiden Prüflinge unterscheiden sich sowohl in Material als auch in geometrischer Komplexität und wurden im Abschnitt 4.2 genau charakterisiert. Im Folgenden wird der Einsatz des RVT-Verfahrens separat für die beiden Bauteile behandelt.

**Abbildung 5.11:** Draufsicht einer Verdichterschaufel. In das Bauteil wurden Defekte eingebracht (Bohrungen mit variablem Durchmesser), mit einer Spachtelmasse ausgefüllt und die gesamte Oberfläche schwarz beschichtet. Dadurch sind die Defekte auf der Oberfläche nicht sichtbar. Der Prüfling kann mit der Induktionsthermografie leicht inspiziert werden, da dieser eine einfache Geometrie aufweist.

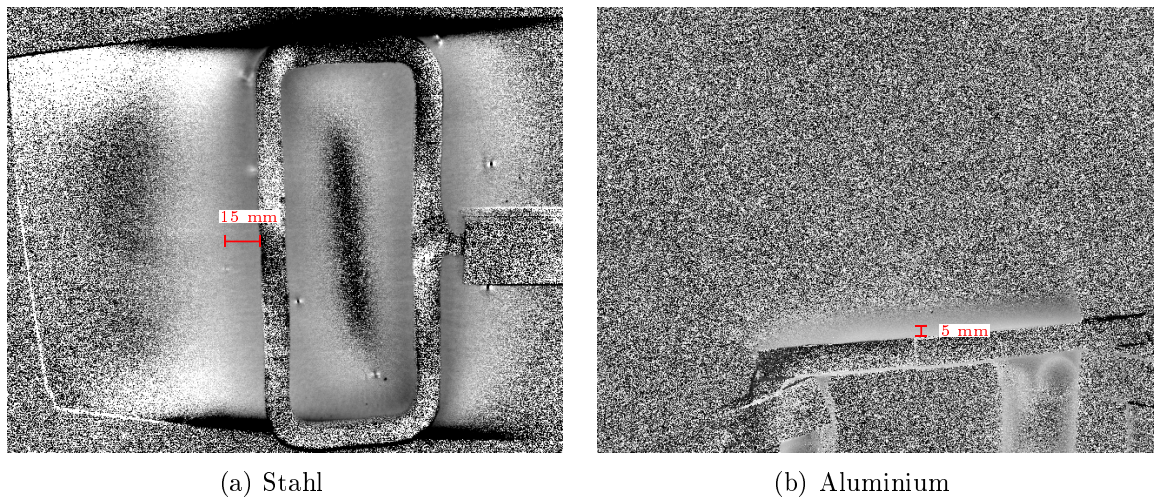


### Verdichterschaufel

Die Verdichterschaufel weist eine aus Sicht der induktiven Prüfung einfache Geometrie mit einer mäßig gekrümmten Fläche (Verdichterschaufelblatt) auf (Abbildung 5.11). Somit gestaltet sich die Untersuchung des Schaufelblattes unkompliziert, da der Induktor entlang dieser Fläche so geführt werden kann, dass er vollständig innerhalb dieser Fläche liegt. Außerdem liegt er punktuell auf der zu untersuchenden Fläche auf und muss von dem Prüfer nicht gestützt werden.

Ein Vergleich zwischen einer konventionellen induktionsthermografischen und einer RVT-gestützten (mit Projektion der Messabdeckung) Untersuchung wurde durchgeführt. Dabei wurde zunächst nur die Messabdeckung bewertet (die Detektion der Defekte wird im letzten Punkt dieses Abschnittes behandelt „*Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) bei RVT-Induktionsthermografie*“). In beiden Fällen (mit und ohne RVT-Verfahren) haben die Prüfer eine schriftliche Prüfanweisung bekommen, in der die bevorstehende Aufgabe genau erläutert wurde. Bei der konventionellen Untersuchung wurden die Prüfer angewiesen, die Prüfung an der oberen Kante der Verdichterschaufel zu beginnen und den Induktor nach jeder Messung entlang des Prüflings um ca. 1 cm zu verschieben. Der Vorgang sollte so lange wiederholt werden, bis die untere Prüflingskante erreicht wurde. Bei der RVT-gestützten Untersuchung dagegen sollten sich die Prüfer beim Verschieben des Induktors an der projizierten Messabdeckung orientieren. Hier sollte beachtet werden, dass es zu keinen Lücken in der Messabdeckung kommt. D. h. nach dem Abschluss der Prüfung soll die projizierte Messabdeckung eine homogene weiße Fläche darstellen, was ein Garant für eine vollständige Messabdeckung ist.

An dem Versuch haben drei mit der Induktionsthermografie vertraute Prüfer teil-



**Abbildung 5.12:** Darstellung der Reichweite des Induktionseffektes am Beispiel der Phasenbilder (Ergebnis der Puls-Phasen-Analyse) für Stahl (a) und Aluminium (b) nach einer induktionsthermografischen Messung an einer Verdichterschaufel (a) und einem Radaufhänger (b).

genommen. Jeder Prüfer musste zwei Verdichterschaufeln des gleichen Typs, eine mit und eine ohne das RVT-Verfahren, prüfen. Das Ergebnis des Versuches war hier sehr eindeutig: alle drei Prüfer haben in beiden Fällen eine vollständige Messabdeckung erreicht. Zusätzlich gab es keine nennenswerten Unterschiede in der Auswertzeit sowie der Anzahl der Messungen pro Prüfling. Dabei bestimmen zwei Faktoren dieses eindeutige Ergebnis: Zum einen ist das die bereits angesprochene Geometrie des Prüflings, die eine einfache und exakte Führung des Induktors entlang des Prüflings (nur in eine Richtung) ermöglicht. Dadurch kann die in der Prüfanweisung definierte Position des Induktors präzise durch den Prüfer umgesetzt werden. Darüber hinaus ist die Reichweite des Induktionseffektes (siehe Abschnitt 2.1.1.2) bei diesem Prüfling aufgrund des Materials (ferromagnetischer Stahl) sehr hoch (ca. 1,5 cm; Abbildung 5.12(a); Bestimmung der Reichweite in Abschnitt 4.3.2.2). Somit haben kleine Abweichungen (in diesem Fall ca.  $\pm 5$  mm) keinen Einfluss auf die Messabdeckung.

Aus diesen zwei genannten Gründen haben die Prüfer auch bei der konventionellen Untersuchung eine vollständige Messabdeckung erreicht. Hier gibt es daher kein Verbesserungspotenzial durch das RVT-Verfahren.

Trotzdem ist der Einsatz dieser Technik auch bei solchen einfachen Bauteilen sinnvoll. Der größte Vorteil des RVT-Verfahrens ist hier nämlich die Sicherheit, die der Prüfer durch die ständige Kontrolle der Messabdeckung hat. Er muss auch den in

**Abbildung 5.13:** Draufsicht des Radaufhängers, der durch seine komplexe Geometrie mit der Induktionsthermografie schwer zu prüfen ist. In das Bauteil wurden Defekte eingebracht, mit einer Spachtelmasse ausgefüllt und die ganze Oberfläche schwarz beschichtet. Dadurch sind die Defekte auf der Oberfläche nicht sichtbar.



der Prüfanweisung definierten Abstand des Induktors zwischen einzelnen Messungen nicht exakt ausmessen, da ihm die aktuelle Messabdeckung jederzeit zur Verfügung steht. Sollte es zu einer Lücke in der Messabdeckung kommen, kann der Prüfer diese durch eine korrekte Positionierung des Induktors und eine erneute Messung sofort beseitigen. Hier kann das RVT-Verfahren potenzielle Fehler eines Prüfers, die z. B. durch dessen Müdigkeit erfolgen können, zuverlässig unterbinden.

Des Weiteren wird die Messabdeckung bei der Dokumentation der durchgeführten Inspektion automatisch gespeichert. So kann auch diese im Zuge der Evaluierung geprüft und deren Vollständigkeit bestätigt bzw. bemängelt werden.

### Radaufhänger

Dieses Bauteil weist im Vergleich zu dem vorhergehenden eine sehr komplexe Geometrie auf (siehe Abbildung 5.13). Hier muss der Induktor in allen Richtungen ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) bewegt und zusätzlich rotiert werden ( $\phi_x$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_z$ ), um eine hinreichende Messabdeckung zu erzielen. Obendrein wird an jeder Messposition nur ein Teil des Induktors das Bauteil erfassen und somit den Bereich der ausreichenden Anregung weiter einschränken. Der Induktor muss auch stets von dem Prüfer gestützt werden, da er an keiner Prüfposition vollständig auf dem Prüfling aufliegt und dadurch sofort wegrutscht. Des Weiteren ist die Reichweite des Induktionseffektes aufgrund des Materials (Aluminium) sehr gering (ca. 5 mm; Abbildung 5.12(b); Bestimmung der Reichweite im Abschnitt 4.3.2.2).

Eine genaue Spezifikation der Prüfposition in der Prüfanweisung ist deshalb aufgrund der vielen Parameter praktisch nicht umsetzbar und wäre nur im Zusammenhang mit einer Automatisierung möglich. Somit hängt das Ergebnis der Prüfung, das maßgeblich durch die Messabdeckung bestimmt wird, von den Fähigkeiten, der Er-



	Ohne RVT [Pixel]	Mit RVT [Pixel]	Mit RVT [%]
Prüfer 1	131865	147267	+12
Prüfer 2	105842	139535	+32
Prüfer 3	108236	145117	+34
Durchschnitt	115323	143973	<b>+25</b>

**Tabelle 5.2:** Angaben zur Messabdeckung ohne und mit dem RVT-Verfahren in Pixeln und Prozent für alle drei Prüfer.

	Ohne RVT [%]	Mit RVT [%]
Prüfer 1	14	4
Prüfer 2	31	9
Prüfer 3	29	5
Durchschnitt	<b>24</b>	<b>6 (-75 %)</b>

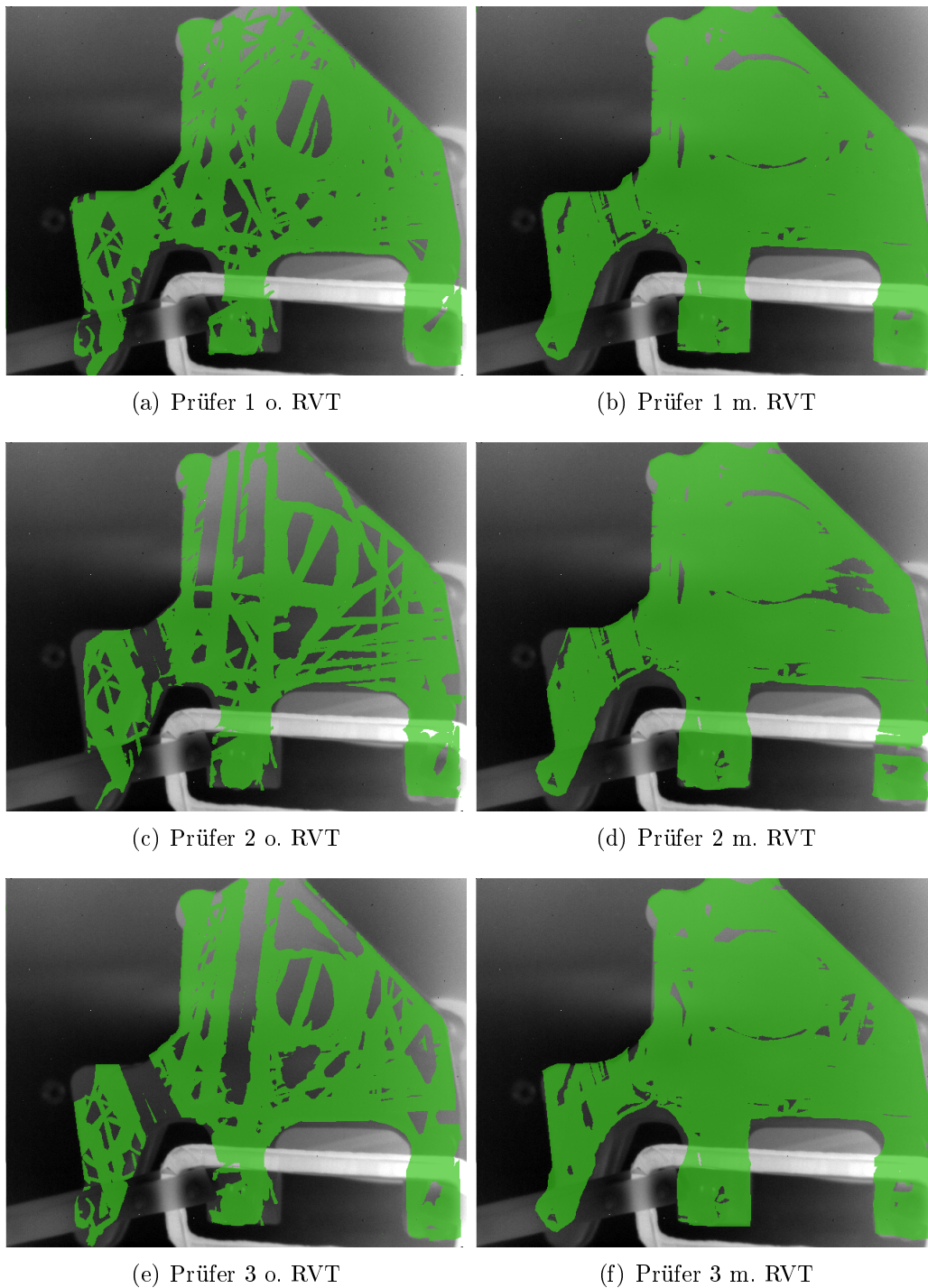
**Tabelle 5.3:** Angaben zur fehlenden Messabdeckung ohne und mit dem RVT-Verfahren in Prozent für alle drei Prüfer.

fahrung und der Tagesform des Prüfers ab. In diesem Fall kann das RVT-Verfahren eine große Hilfe leisten. Durch die Bestimmung und Projektion der Messabdeckung kann der Prüfer die hier zahlreich entstehenden Lücken in der Messabdeckung sofort erkennen und beseitigen.

In dieses Experiment waren ebenso drei Prüfer involviert. Deren Aufgabe bestand darin, die obere Seite des Radaufhängers (Abbildung 5.13) zu inspizieren. Dabei sollten sie nach eigenem Ermessen darauf achten, dass der ganze zu untersuchende Bereich so gut wie möglich abgedeckt ist.

Die Untersuchung erfolgte jeweils konventionell und mit der Projektion der Messabdeckung durch das RVT-Verfahren. Die von den drei Prüfern erreichten Messabdeckungen sind in Abbildung 5.14 zu sehen.

Deutlich ist zu erkennen, dass die erreichte Messabdeckung mit dem Einsatz des RVT-Verfahrens um 25 % größer ist (Anzahl der Pixel in beiden Fällen verglichen; Tabelle 5.2). Darüber hinaus stellt die fehlende Messabdeckung eine wichtige Angabe dar. Hier haben die Prüfer ohne RVT-Verfahren 24 % des zu untersuchenden Bereichs nicht abgedeckt (siehe Tabelle 5.3). Mit dem RVT-Verfahren wurden nur 6 % nicht abgedeckt, was einer Reduktion der fehlenden Messabdeckung um 75 % entspricht. Die noch verbliebenen Lücken sind auf die Tatsache zurückzuführen, dass es an manchen Stellen für den Prüfer wegen der Geometrie des Prüflings sehr schwierig ist,



**Abbildung 5.14:** Darstellung der erreichten Messabdeckung (grün) durch die drei Prüfer ohne (links) und mit dem RVT-Verfahren (rechts) bei der Untersuchung eines Radaufhängers. Aufgrund des Materials (Aluminium) ist hier die Reichweite des Induktionseffektes gering und folglich das Erreichen einer vollständigen Messabdeckung schwierig. Mit der Projektion der Messabdeckung (RVT-Verfahren) erhält der Prüfer aber stets ein Feedback und kann somit leichter ein besseres Ergebnis erzielen.

		Nicht Gefunden	Gefunden
Prüfer 1	ohne RVT	16	16
	mit RVT	4	28
Prüfer 2	ohne RVT	20	12
	mit RVT	10	22
Prüfer 3	ohne RVT	18	14
	mit RVT	6	26
Durchschnitt	ohne RVT	18	<b>14</b>
	mit RVT	6,7	<b>25,3</b>

**Tabelle 5.4:** Auflistung der gefundenen Defekte (ohne und mit dem RVT-Verfahren) durch die drei involvierten Prüfer bei der Untersuchung eines Radaufhängers.

den Induktor optimal zu platzieren, nämlich dass eine ausreichende Induktion in das Bauteil an der betreffenden Stelle stattfindet und sowohl der Induktor als auch die Hände des Prüfers (manuelle Führung des Induktors) nicht die Sicht im Kamerabild an dieser Stelle beeinträchtigen. Es ist auch zu beachten, dass während des gesamten Versuches das Bauteil nicht bewegt bzw. verdreht hätte werden dürfen. Dies ist eine Voraussetzung für eine zuverlässige Ermittlung und Projektion der Messabdeckung.

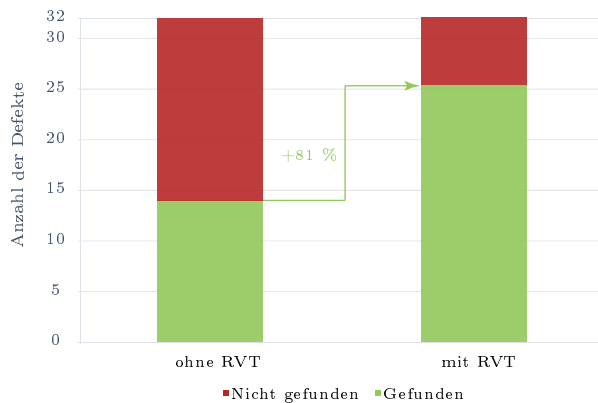
Die von den drei Prüfern gefundenen Defekte sind in Abbildung 5.15 für die beiden Fälle ohne und mit RVT-Unterstützung zu sehen. Das Endergebnis hängt maßgeblich mit der Messabdeckung zusammen. Die Zusammenstellung aller durch die drei Prüfer gefundenen Defekte (vgl. Abschnitt 4.2) sind in Tabelle 5.4 zu sehen.

Durch Einsatz des RVT-Verfahrens wurde somit in diesem Fall eine um ca. 81 % verbesserte Defekterkennung erzielt (siehe auch Abbildung 5.16). Gleichzeitig wurde die Rate der nicht gefundenen Defekte um 63 % reduziert.

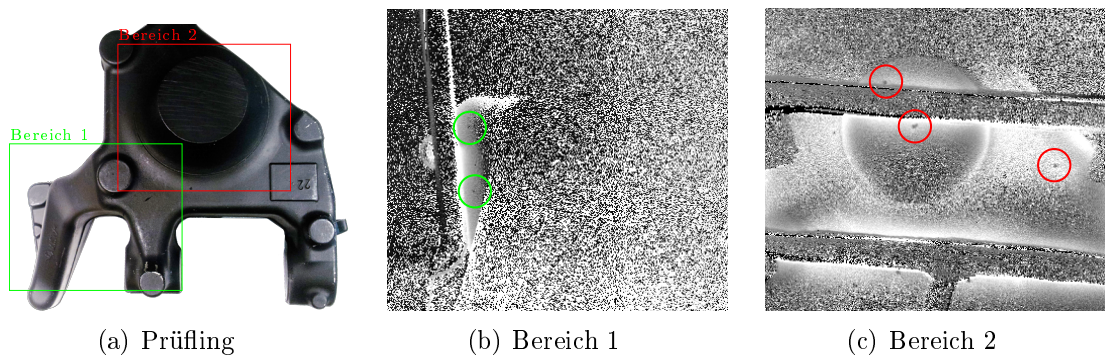
Alle in dem Bauteil verfügbaren Defekte (insgesamt 32) haben dieselbe Tiefe und den selben Durchmesser (detailliert im Abschnitt 4.2 zu lesen). Die Erkennbarkeit der Defekte im Ergebnisbild ist jedoch nicht konstant. D. h. der Kontrast zwischen der durch einen Defekt verursachten Anzeige und der Umgebung variiert. Ein beispielhafter Vergleich der Defekterkennbarkeit an zwei Stellen des Prüflings ist in Abbildung 5.17 zu sehen. Hier sind die zwei markierten Defekte (grün) im Bereich 1 bedeutend schlechter als diese im Bereich 2 (rot) zu erkennen. Dies liegt vor allem daran, dass der Prüfling im Bereich 1 wesentlich dünner (wenige mm) als im Bereich 2 ist. Der auf der Oberseite des Prüflings induzierte Strom muss näm-



**Abbildung 5.15:** Darstellung der durch die drei Prüfer gefundenen Defekte (grün markiert) ohne (links) und mit dem RVT-Verfahren (rechts) bei der Untersuchung eines Rad-aufhängers.



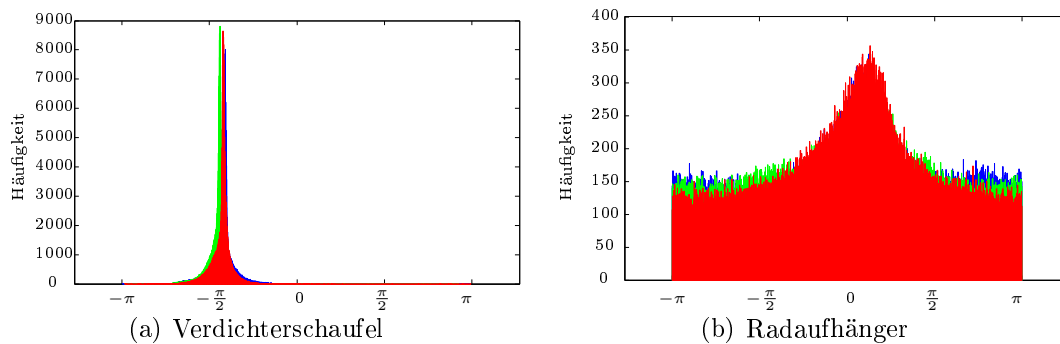
**Abbildung 5.16:** Vergleich der gefundenen Defekte ohne (14) und mit dem RVT-Verfahren (25,3) im Durchschnitt über alle drei Prüfer. Mit dem RVT-Verfahren haben die Prüfer ein um 81 % besseres Ergebnis erzielt. Insgesamt waren 32 Defekte in das Bauteil eingebracht worden.



**Abbildung 5.17:** Sichtbarkeit der Defekte variiert bei dem Prüfling, obwohl diese dieselbe Größe aufweisen. Zu besserer Erkennbarkeit wurden zwei Bereiche auf dem Prüfling definiert (a), in denen jeweils eine induktionsthermografische Messung durchgeführt wurde. Die Defekte in (b) (vergrößerte Darstellung des Bereich 1) sind im Vergleich zu diesen im Bereich 2 (c) schlechter zu erkennen. Die Geometrie des Prüflings an der jeweiligen Stelle beeinflusst den Stromfluss und in Konsequenz die Sichtbarkeit der Defekte.

lich (um einen geschlossenen Stromkreis herzustellen) auf der Rückseite des Bauteils wieder zurückfließen ([105]). Durch diesen Rückfluss wird im Bereich 1 der effektive Strom auf der Bauteilvorderseite, der zur Erwärmung an den Defektstellen führt, stärker reduziert. Darüber hinaus kann im Bereich 1 nur ein kleiner frontaler Teil des Induktors an der zu untersuchenden Stelle angesetzt werden, wodurch die induzierte Leistung zusätzlich kleiner als im Bereich 2 ausfällt. Folglich erwärmt sich das Bauteil im Bereich 1 weniger stark als im Bereich 2, was wiederum die Sichtbarkeit der Defekte verringert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei diesem Bauteil komplexer Geometrie aus einem Material mit geringer Induktionsreichweite die RVT-gestützte Projektion der Messabdeckung eine bedeutende Hilfe darstellt, da der Prüfer während der ganzen Untersuchung die Kontrolle über die Messabdeckung behält. So lassen sich die Lücken in der Messabdeckung reduzieren und damit die Zahl der gefundenen



**Abbildung 5.18:** Histogramme jeweils dreier Phasenbilder, die das Ergebnis der nacheinander erfolgten Messungen (Induktor nach jeder Messung verschoben) an der Verdichterschaufel (Stahl) (a) und dem Radaufhänger (Aluminium) (b) darstellen. Bei der Verdichterschaufel sind die Peaks gegeneinander verschoben, was bei der Zusammenfassung der Bilder zu Artefakten führt. Bei dem Radaufhänger ist diese Verschiebung dagegen nicht vorhanden (vgl. Abschnitt 4.3.3.1).

Defekte erhöhen.

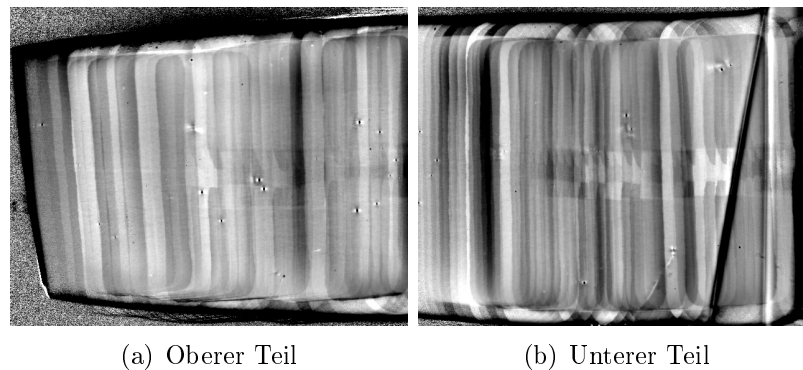
## Zusammenfassung der Ergebnisbilder

Die im Abschnitt 4.3.3.1 diskutierte Zusammenfassung der Ergebnisbilder wird hier weitergeführt. Die beiden Prüflinge weisen dabei grundlegend unterschiedliche Eigenschaften auf, auf die im Weiteren eingegangen wird.

### Verdichterschaufel

Es wurde bereits mehrfach betont, dass es bei den in dieser Arbeit verwendeten Verdichterschaufeln während einer induktiven Anregung zu einer starken Wärmeentwicklung bedingt durch die Ohmschen Verluste im ferromagnetischen Stahl kommt. Folglich ist die Reichweite des angeregten Bereichs groß (ca. 15 mm; Abbildung 5.12(a)). Darüber hinaus breitet sich die Wärme in dem Bauteil langsam aus und führt bei nacheinander durchgeführten Messungen zu einer Phasenverschiebung (ausführlich im Abschnitt 4.3.3.1 behandelt). In Abbildung 5.18(a) ist diese Phasenverschiebung in einem Histogramm dreier Phasenbilder (rot, grün und blau) dargestellt. Diese Phasenbilder sind im Laufe einer Puls-Phasen-Analyse dreier nacheinander erfolgter Messungen entstanden. Der Induktor wurde hier nach jeder Messung um ca. 1 cm verschoben. Die Phasenverschiebung ist in dem Histogramm deutlich erkennbar (die Peaks der einzelnen Messungen sind gegeneinander verschoben).

Bei der induktionsthermografischen Untersuchung der Verdichterschaufeln und



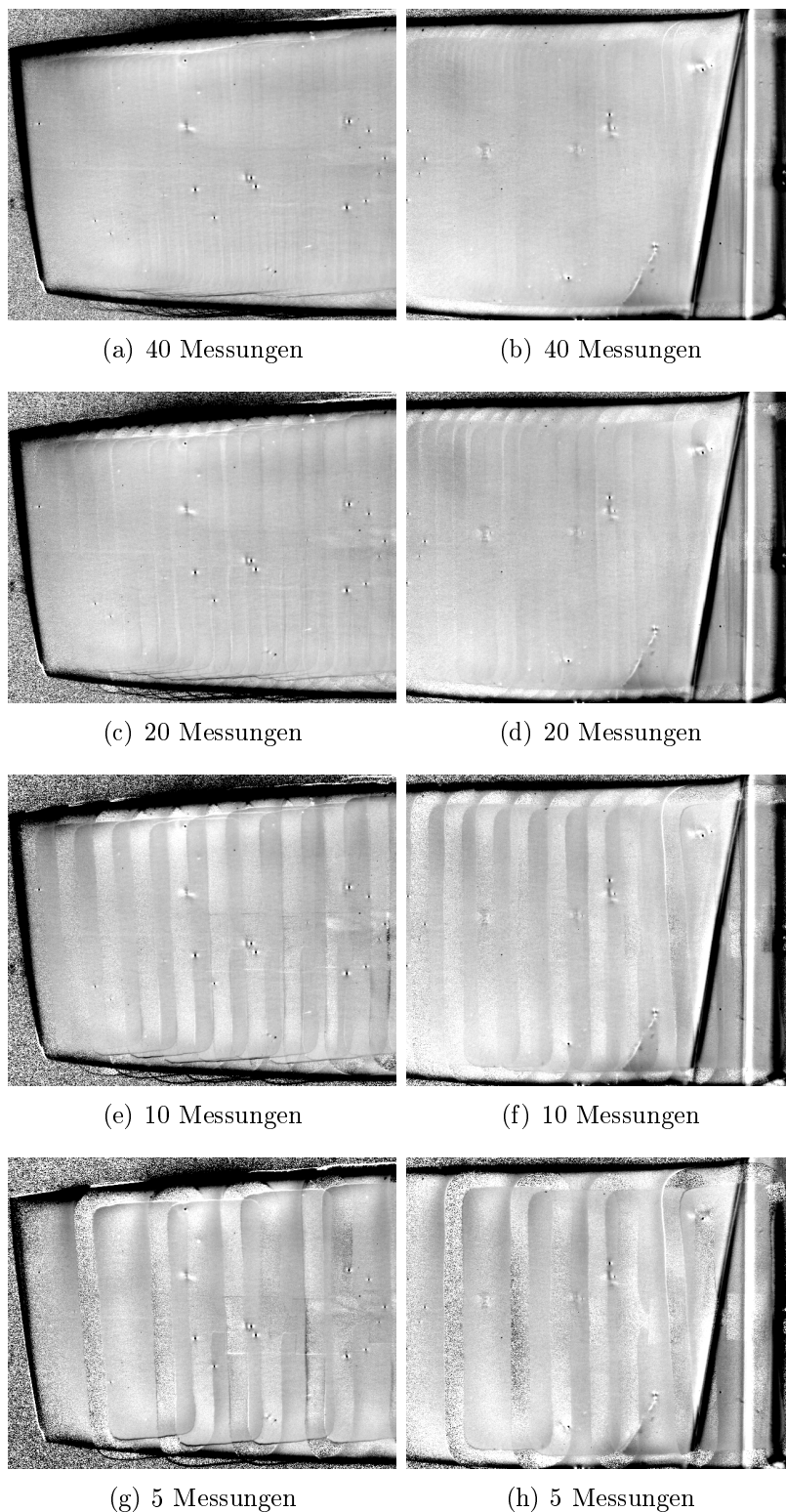
**Abbildung 5.19:** Zusammenfassung der jeweils 40 Ergebnisbilder des oberen (a) und unteren (b) Teiles der Verdichterschaukel ohne Einsatz der Phasennormierung. Die Qualität des zusammengefassten Bildes leidet deutlich unter dem Einfluss der Phasenverschiebung zwischen einzelnen Ergebnisbildern. Die Auswertung eines solchen Bildes ist somit schwierig.

der anschließenden Zusammenfassung der entstandenen Ergebnisbilder beeinträchtigt die Phasenverschiebung die Qualität des Endergebnisbildes erheblich (Abbildung 5.19). Das Bauteil wurde hierzu in zwei Bereiche unterteilt, die dann separat inspiziert wurden. Dabei sind jeweils 40 Messungen pro Bereich durchgeführt worden. Deutlich zu erkennen sind streifige Artefakte. Diese entstehen durch Kontrastunterschiede der einzelnen Phasenbilder, hervorgerufen durch Phasenverschiebungen aufgrund der langsamen Wärmediffusion. In dieser Form ist eine Auswertung des zusammengefassten Ergebnisbildes sehr mühsam, da die Artefakte das Ergebnisbild sichtbar überlagern.

Zur Verbesserung wurde der Algorithmus der Phasennormierung eingesetzt (siehe Abschnitt 4.3.3.1). Hierfür wurden dieselben Messdaten verwendet. Die daraus resultierenden Ergebnisbilder mit Phasennormierung sind in Abbildung 5.20(a) und (b) dargestellt. Hier ist die Bildqualität maßgeblich verbessert worden, die in Abbildung 5.19 präsenten Artefakte sind praktisch komplett beseitigt worden. Diese streifenfreien Bilder können deutlich leichter ausgewertet werden, da die Defekte sich wesentlich besser vom Hintergrund abheben.

Es bleibt allerdings noch die Frage nach der optimalen Anzahl der Einzelmessungen. Dazu wurde die Qualität des zusammengefassten Ergebnisbildes für 20, 10 und 5 Einzelmessungen untersucht. Die zusammengefassten Ergebnisbilder für diese Fälle sind in Abbildung 5.20(c) bis (h) zu sehen.

Bei 20 Messungen sind schwach ausgeprägte Artefakte (vertikale helle Linien) zwischen einzelnen Messungen bereits erkennbar, eine vollständige Erkennbarkeit



**Abbildung 5.20:** Zusammenfassung von jeweils 40, 20, 10 und 5 Ergebnisbildern des oberen (links) und unteren (rechts) Teiles der Verdichterschaufel. Die Phasennormierung wurde eingesetzt. Mit sinkender Zahl der Messungen verschlechtert sich die Qualität der zusammengefassten Bilder. Bei 10 Messungen sind deutliche Bildartefakte (Streifen) zu sehen, bei 5 Messungen fehlen Informationen im Bild.



der Defekte bleibt jedoch erhalten. Bei 10 Messungen sind die Bereiche zwischen einzelnen Messungen breiter und deutlicher zu erkennen. Das Ergebnisbild hat bereits ein sichtbares Streifenmuster, die Information über die Defekte (auch in den streifigen Bereichen) ist hier zwar noch vorhanden, jedoch abgeschwächt (schlechterer Kontrast). Deutliche Informationsverluste sind bei 5 Messungen zu verzeichnen. Hier sind schon die Konturen des Induktors zweifellos erkennbar. In diesen Bereichen fehlt auch die Information und das Rauschen ist präsent. Folglich sind die an diesen Stellen auftretenden Defekte nicht mehr erkennbar.

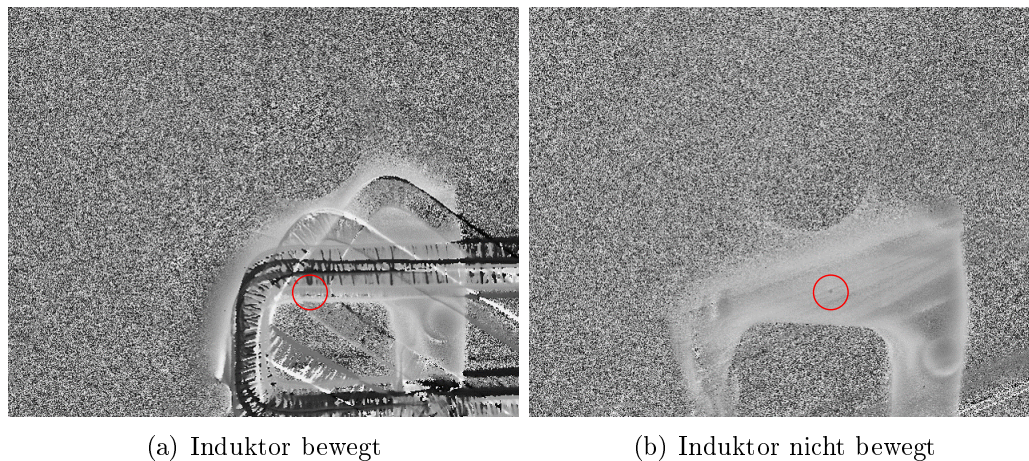
Ein Optimum hinsichtlich der Zahl der Messungen und Erkennbarkeit der Defekte ist in diesem Fall also bei 20 Messungen gefunden, wobei die Verschiebung des Induktors zwischen den einzelnen Aufnahmen ca. 1 cm beträgt. Hier sind noch alle Informationen im zusammengefassten Ergebnisbild vorhanden und die Qualität ist ausreichend gut.

Unter Berücksichtigung der Reichweite des thermisch angeregten Bereichs bei diesem Prüfling (ca. 1,5 cm) ist bei dieser Induktorverschiebung (ca. 1 cm bei 20 Messungen) eine vollständige Überlappung der Informationen der Einzelmessungen gewährleistet. Dies trifft bei der Verschiebung des Induktors um 2 cm (10 Messungen) oder 4 cm (5 Messungen) nicht mehr zu. Hier entstehen im Ergebnisbild die bereits erwähnten Streifenmuster, wo die Informationen entweder fehlen oder schwächer ausgeprägt sind (Kontrast; Abbildung 5.20(e) bis (h)).

### **Radaufhänger**

Bei dem Radaufhänger (Aluminium) tritt die Phasenverschiebung nicht auf (siehe Abbildung 5.18(b); detailliert im Abschnitt 4.3.3.1). Hier breitet sich die durch die Induktion hervorgerufene Wärme schnell aus, so dass nacheinander erfolgende Messungen nicht beeinflusst werden. Die Erwärmung ist hier (Aluminium) im Vergleich zu den Verdichterschaufeln (Stahl) jedoch um ca. einen Faktor 10 schwächer ausgeprägt (Bewertung der Amplitudeninformation der beiden Bauteile). Dementsprechend ist die Reichweite des thermisch angeregten Bereichs (ca. 5 mm) und folglich der Kontrast der Defekte (im Ergebnisbild) kleiner (Abbildung 5.17).

Hier besteht jedoch die Problematik in der Bewegung des Induktors während einer induktiven Anregung. Denn der Induktor wird während dieser Anregung von dem Radaufhänger abgestoßen. Diese Bewegung ist im Aluminium (bedingt durch die höhere Lorentzkraft) deutlich stärker als im Stahl ausgeprägt. Demzufolge bewegt sich der frei liegende Induktor während einer Anregung um mehrere Millimeter.



**Abbildung 5.21:** Darstellung der Zusammenfassung von jeweils fünf Phasenbildern, die während einer Messreihe an dem Radaufhänger entstanden sind. In (a) hat sich der Induktor während der Anregung durch eine im Aluminium stark wirkende Lorentzkraft bewegt, was in den Phasenbildern zu sehen ist. Infolgedessen entstehen bei der Zusammenfassung dieser Bilder Artefakte. In (b) wurde der Induktor festgehalten, wodurch keine Artefakte im zusammengefassten Ergebnisbild entstehen. Rot wurde ein Defekt markiert, der in (b) gut zu sehen ist, in 5.21(a) aber durch Artefakte verdeckt ist.

Diese Bewegung wird dann in den einzelnen Ergebnisbildern deutlich sichtbar, was deren Qualität mindert.

Darüber hinaus sind diese Bewegungen natürlich auch im zusammengefassten Ergebnisbild sehr präsent. In Abbildung 5.21 ist diese Problematik deutlich zu sehen: Hier wurden jeweils fünf Messungen zu einem Ergebnisbild zusammengefasst. Die Bildartefakte (durch Bewegung des Induktors entstanden) verdecken einen Defekt (rot markiert; Abbildung 5.21(a)). Bei dem zweiten Versuch wurde der Induktor festgehalten, so dass keine Bewegung im Ergebnisbild zu sehen war (Abbildung 5.21(b)). Hier ist der Defekt gut erkennbar (ebenfalls rot markiert).

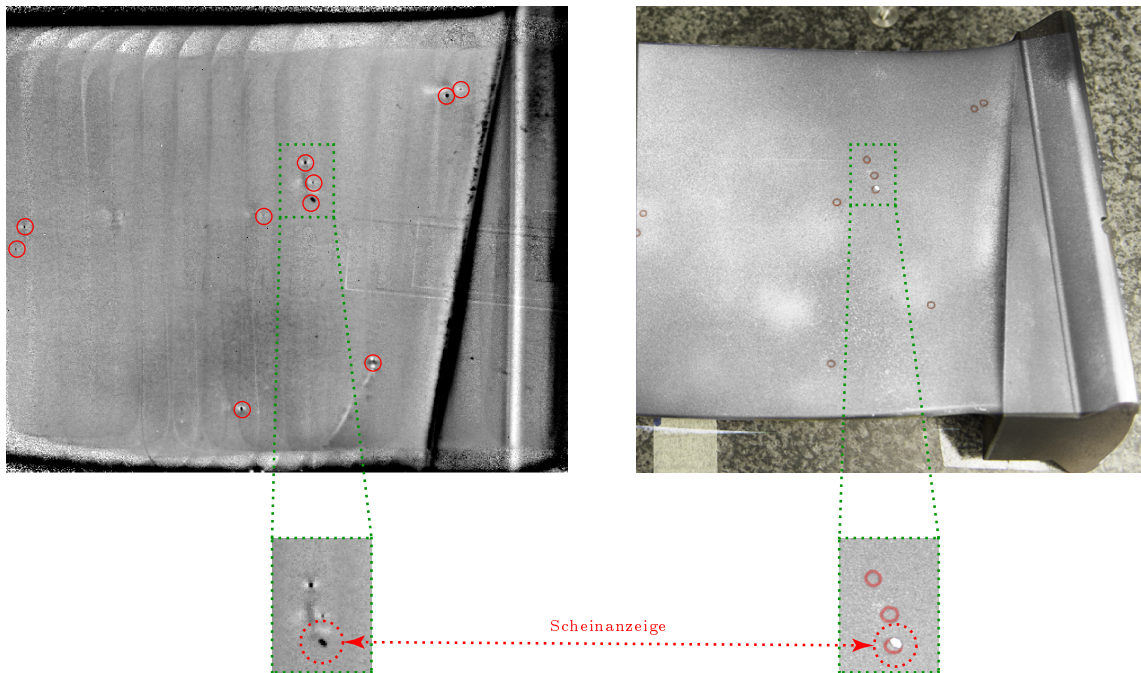
Es ist also absolut notwendig, dass der Induktor während der Anregungsphase fixiert wird. Nur so kann eine gute Bildqualität gewährleistet werden.

### Erkennung der Scheinanzeigen durch Projektion der Ergebnisse

Bei der Induktionsthermografie verursachen Verschmutzungen und Beschädigungen der schwarzen Beschichtung im Ergebnisbild Anzeigen, die oft ähnlich wie Defekte aussehen und schwer zu identifizieren sind. Hier soll nun auch das RVT-Verfahren eingesetzt werden, um solche Scheinanzeigen schnell und eindeutig zu erkennen.

In Abbildung 5.22 links ist ein zusammengefasstes Ergebnisbild des unteren Tei-

les einer Verdichterschaufel zu sehen. Eine Projektion des Ergebnisbildes auf das



**Abbildung 5.22:** Beispiel einer Identifizierung einer Scheinanzeigee mit Hilfe des RVT-Verfahrens. Relevante Anzeigen werden nach dem Abschluss einer Messreihe auf einem zusammengefassten Ergebnisbild markiert (links). Gleichzeitig werden diese Markierungen auf den Prüfling projiziert (rechts). Eine Anzeigee (links unten vergrößert dargestellt) kann auf dem Bauteil zweifellos als eine Scheinanzeigee (Verschmutzung) identifiziert werden (rechts unten).

Bauteil wurde hier nicht eingesetzt. Das in Graufarben abgestufte Phasenbild hat nach der Projektion auf das Bauteil einen zu schwachen Kontrast, um eine zuverlässige Auswertung direkt am Bauteil gewährleisten zu können. Darüber hinaus liegen die Defekte unterhalb der Oberfläche und sind somit auf der Bauteiloberfläche nicht sichtbar. Im ersten Schritt fand die Auswertung daher auf einem Computerbildschirm statt.

Von einem Prüfer wurden alle für ihn als Defekt erscheinenden Anzeigen markiert, im zweiten Schritt wurden dann lediglich diese Markierungen mit Hilfe des RVT-Verfahrens an den entsprechenden Stellen auf den Prüfling projiziert. Abschließend wurde eine Scheinanzeigenanalyse direkt am Bauteil durchgeführt. Dabei konnte der Prüfer feststellen, dass sich innerhalb einer der Markierungen eine Verschmutzung befand (Abbildung 5.22 rechts). Die entsprechende Anzeigee wurde also durch diese Verschmutzung hervorgerufen, was im Ergebnisbild alleine nicht ersichtlich war.

Mit dem Einsatz des RVT-Verfahrens kann also exakt die Position jeder Anzeige direkt am Prüfling gezeigt werden, womit eine mühsame und fehleranfällige Suche der betroffenen Stelle entfällt. Auf diese Weise kann einerseits eine effiziente Kontrolle von Scheinanzeigen durchgeführt und andererseits gegebenenfalls eine Nachmessung nach Entfernung der Verschmutzung durchgeführt werden. Auf diese Weise kann eine Existenz eines Defekts unterhalb der Verschmutzung sicher ausgeschlossen werden.

## **Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) bei RVT-Induktionsthermografie**

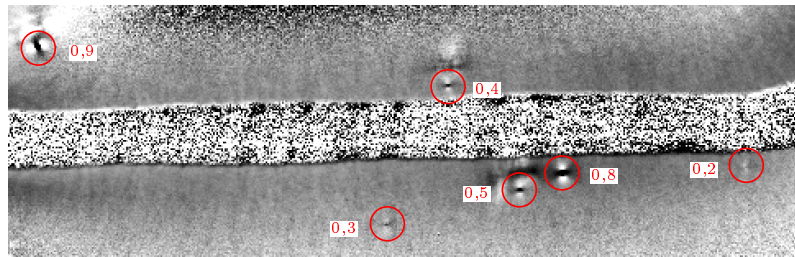
Im Abschnitt 4.2.3.1 wurde die Fehlerauffindwahrscheinlichkeitanalyse nach dem Hit-Miss-Verfahren [2] ausführlich diskutiert. Die Präparation der Defekte bei den Verdichterschaufeln wurde ebenfalls umfangreich behandelt: es wurden jeweils 32 Defekte (Bohrungen) eingebracht. Die Durchmesser der Bohrungen betragen 0,2 mm bis 0,9 mm (in 0,1 mm-Schritten). Jede Verdichterschaufel enthält vier Defekte einer Größe ( $8 \text{ Defektgrößen} \times 4 = 32 \text{ Defekte pro Schaufel}$ ).

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Fehlerauffindwahrscheinlichkeitsanalyse an den zwei Verdichterschaufeln ohne und mit dem RVT-Verfahren vorgestellt.

An diesem Experiment waren drei Prüfer beteiligt, die die zwei Verdichterschaufeln induktionsthermografisch untersuchten. Die Inspektion erfolgte jeweils konventionell und mit dem Einsatz des RVT-Verfahrens. Im Fall ohne das RVT-Verfahren wurde der Versatz des Induktors zwischen den Einzelmessungen auf 1 cm festgelegt. Wird dieser Versatz von den Prüfern eingehalten, ist eine vollständige Messabdeckung gewährleistet. Bei der RVT-gestützten Untersuchung sollte der Induktor jeweils basierend auf der projizierten Messabdeckung verschoben werden.

Die Prüfer haben vor dem Experiment eine schriftliche Prüfanweisung bekommen, in der das Vorgehen für die beiden Fälle genau beschreiben war. Darüber hinaus wurden in der Prüfanweisung Anzeigen im Phasenbild für verschiedene Defektgrößen beispielhaft dargestellt. In Abbildung 5.23 sind die Anzeigen im Phasenbild für sechs unterschiedliche Defektgrößen zu sehen. Defekte kleiner als 0,4 mm sind sehr schwer detektierbar. Das liegt sowohl an der geringeren Größe (wenige Pixel) als auch an dem sehr schwachen Kontrast dieser Anzeigen (siehe Defekte 0,2 und 0,3 mm).

Die drei Prüfer führten die Untersuchung in vier Schritten aus (siehe Tabelle 5.5). Dabei ist die Reihenfolge der Schaufeln variiert und abwechselnd mit bzw. ohne RVT-Verfahren gearbeitet worden. In keinem der Fälle wird die selbe Schaufel von



**Abbildung 5.23:** Darstellung der Sichtbarkeit der präparierten Defekte unterschiedlicher Größe im Phasenbild nach einer induktionsthermografischen Messung an einer Verdichterschaufel. Alle Angaben in Millimetern.

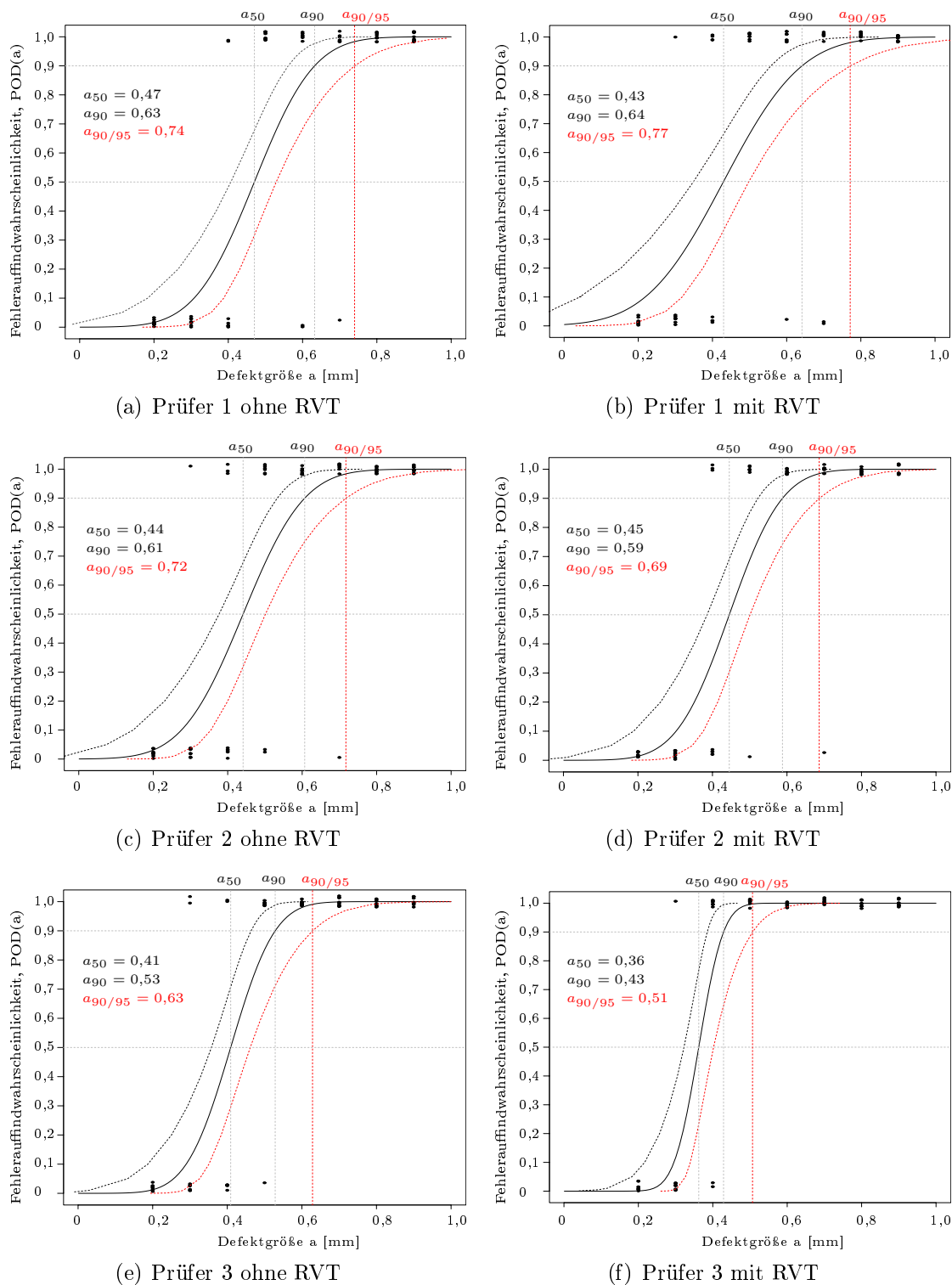
	Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4
Prüfer 1	Schaufel 1 o.	Schaufel 2 m.	Schaufel 1 m.	Schaufel 2 o.
Prüfer 2	Schaufel 2 m.	Schaufel 1 o.	Schaufel 2 o.	Schaufel 1 m.
Prüfer 3	Schaufel 1 m.	Schaufel 2 m.	Schaufel 1 o.	Schaufel 2 o.

**Tabelle 5.5:** Reihenfolge der Untersuchungen für drei involvierte Prüfer ohne (o.) und mit (m.) dem RVT-Verfahren.

einem Prüfer nacheinander (z. B. einmal ohne und einmal mit dem RVT-Verfahren) untersucht. Damit lässt sich gewährleisten, dass die erste Untersuchung die zweite möglichst wenig beeinflusst. Es wird auch angenommen, dass die Prüfer im Laufe des Experiments ihre Herangehensweise unterbewusst ändern können. Dies kann auf Grund der mit jedem Schritt steigenden Erfahrung und Selbstbewusstsein gegenüber der Aufgabe oder einer sinkenden Konzentration erfolgen. Deswegen wurde auch das RVT-Verfahren abwechselnd eingesetzt, um den Einfluss dieser Faktoren auf den Vergleich der konventionellen und RVT-gestützten Inspektion hinsichtlich der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit zu minimieren.

Die Ergebnisse des Experimentes sind in Tabelle 5.6 zu sehen. Diese wurden nach dem Hit-Miss-Verfahren ausgewertet, wodurch auch die Berechnung des  $a_{90/95}$ -Wertes erfolgte. Dieser statistische Wert gibt die Defektgröße an, die in mindestens 95 % aller Untersuchungen mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 90 % gefunden werden. Je kleiner dieser Wert ist, desto sensitiver und dadurch besser ist das Inspektionsverfahren.

In Abbildung 5.24 wurden die Ergebnisse anhand der POD-Kurven graphisch dargestellt. Hier ist der Wert  $a_{90/95}$  direkt abzulesen, nämlich als der Schnittpunkt zwischen der unteren Konfidenzgrenze (rot im Diagramm) und der Linie mit  $POD = 0,9$ . Die POD-Kurven (schwarze Kurve) und die Konfidenzgrenzen (rote Kurven) werden bei dem Hit-Miss-Verfahren nach der Likelihood-Methode statistisch berechnet



**Abbildung 5.24:** Darstellung der nach dem Hit/Miss-Verfahren bestimmten POD-Kurven für drei Prüfer ohne und mit dem RVT-Verfahren. Mit schwarzen Punkten sind jeweils unten im Diagramm die nicht gefundenen und oben die gefundenen Defekte gekennzeichnet. Der Schnittpunkt der roten Kurve (Konfidenzgrenze) mit dem Wert  $POD(a) = 0,9$  ergibt den charakteristischen Wert  $a_{90/95}$  (siehe im Text).

Defektgröße	Prüfer 1		Prüfer 2		Prüfer 3	
	o. RVT	m. RVT	o. RVT	m. RVT	o. RVT	m. RVT
0,2	0	0	0	0	0	0
0,3	0	1	1	0	2	1
0,4	2	4	3	3	2	6
0,5	8	8	6	7	7	8
0,6	6	7	8	8	8	8
0,7	7	6	7	7	8	8
0,8	8	8	8	8	8	8
0,9	8	8	8	8	8	8
Gesamt	39	42	41	41	43	47
Scheinanzeigen (In Prozent)	4 (6,2)	3 (4,7)	9 (14)	6 (9,4)	8 (12,5)	16 (25)
$a_{90/95}$ [mm]	0,74	0,77	0,72	0,69	0,63	0,51

**Tabelle 5.6:** Ergebnisse der Untersuchung an zwei Verdichterschaufeln durch drei Prüfer ohne und mit dem RVT-Verfahren. Insgesamt wurden 64 Defekte in die beiden Bauteile eingebracht. Der Wert  $a_{90/95}$  wurde nachträglich im Zuge der POD-Analyse bestimmt (siehe Text).

[67, 37, 4]. Dabei stellen die POD-Kurven die nach der Likelihood-Methode am besten passende Approximation zu den Messdaten (engl. *most likely*) dar. Andere Approximationen sind aber auch möglich. Die Konfidenzgrenzen werden ausgehend von der Normalverteilung statistisch bestimmt.

Darüber hinaus ist für die Analyse der Experimentergebnisse die Rate der Scheinanzeigen von großer Bedeutung. Das Hit-Miss-Verfahren setzt voraus, dass diese 5 % der gesamten Anzahl der Defekte nicht überschreitet [6]. Eine höhere Scheinanzeigenrate kann die statistische Aussage verfälschen.

In dem Experiment haben der Prüfer 1 und Prüfer 2 eine signifikant höhere Scheinanzeigenrate als 5 % erzielt. Dies liegt daran, dass die beiden Prüfer im Zuge der Auswertung der Messergebnisse verstärkt nach kleineren Defekten gesucht haben. Diese sind jedoch im Ergebnisbild schlecht erkennbar. So können kleine Scheinanzeigen wie Pixelfehler der IR-Kamera oder kleine Staubpartikel als Defekte klassifiziert werden. Hier schafft eine RVT-Scheinanzeigenanalyse mit Projektion der markierten Defekte kaum Abhilfe. Denn die Pixelfehler sind auf dem Prüfteil selbstverständlich nicht sichtbar und können somit nicht als Scheinanzeigen erkannt werden. Die kleinen Staubpartikel werden durch Versetzen des Induktors ebenfalls

bewegt. Eine Zuordnung einer konkreten Anzeige im Ergebnisbild und eines Staubpartikels ist somit nachträglich auch nicht mehr möglich.

Wenn ein Prüfer den Fokus darauf legt, besonders viele kleine Defekte zu finden, wird er dabei automatisch eine höhere Scheinanzeigenrate erreichen, weil er im Zweifelsfall mehr Anzeigen markiert. Dies wirkt sich dann zwar positiv auf  $a_{90/95}$  aus, der Wert ist aber aufgrund der hohen Falschbewertungen nicht mehr vertrauenswürdig. So hat der Prüfer 3 im Falle des RVT-Verfahrens einen  $a_{90/95}$  Wert von 0,51 mm erreicht, also wesentlich kleiner als die anderen Prüfer. Gleichzeitig aber stieg die Scheinanzeigenrate auf den inakzeptablen Wert von 25 %. Aufgrund der zu hohen Scheinanzeigenrate bei den Prüfern 2 und 3 muss also die Aussage über den Wert  $a_{90/95}$  in den beiden Fällen als nicht tragbar angesehen werden. Demzufolge können nur die Ergebnisse der POD-Analyse des Prüfers 1 als statistisch glaubwürdig betrachtet werden. Hier liegt die Scheinanzeigerate unter (mit RVT-Verfahren) bzw. geringfügig über (ohne RVT-Verfahren) der 5 %-Grenze.

Der Wert  $a_{90/95}$  bei dem Prüfer 1 unterscheidet sich im Fall der Untersuchung ohne das RVT-Verfahren (0,74 mm) und mit dem RVT-Verfahren (0,77 mm) nur geringfügig. Dies ist auch absolut nachvollziehbar, da in beiden Fällen eine vollständige Messabdeckung erreicht wurde. Damit kann das RVT-Verfahren keinen Einfluss auf die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit haben.

Die POD-Analyse setzt aber auch voraus, dass jede nächste Untersuchung unter gleichen Bedingungen erfolgt. Da die Messabdeckung auch ein Messparameter ist, muss diese bei jeder Messung vollständig sein. Hier bietet das RVT-Verfahren eine zuverlässige Methode, um die Messabdeckung nachweisbar konstant und vollständig zu halten. Folglich liegt der große Vorteil des RVT-Verfahrens bei diesem Beispiel darin, dass die Aussage über die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit bei jeder Messung nachweisbar gültig bleibt.



# Kapitel 6

## Diskussion, Bewertung des RVT-Verfahrens und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Qualität der Inspektion bei der aktiven Thermografie zu steigern und zugleich die Mensch-Maschine-Interaktion intuitiver zu gestalten. Hierfür sollen die Defizite der aktiven Thermografie beseitigt werden, die die Qualität der Prüfung beeinträchtigen und die Mensch-Maschine-Interaktion erschweren. Dabei wird der bisher in der aktiven Thermografie eingesetzte Arbeitsablauf um das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Real-View-Thermography-Verfahren erweitert. Der RVT-Arbeitsablauf umfasst eine Reihe von Maßnahmen, die die Inspektion mit der aktiven Thermografie hinsichtlich der zwei im Ziel dieser Arbeit definierten Aspekte zu verbessern.

Die Basis des RVT-Verfahrens stellen die RVT-Einheit und RVT-Software dar. Die RVT-Einheit besteht aus einer in der aktiven Thermografie üblichen IR-Kamera und einem Beamer. Dadurch können Informationen auf das zu untersuchende Bauteil projiziert werden. Diese Informationen werden von der RVT-Software durch im Rahmen der Arbeit entwickelte Algorithmen bereitgestellt. Die Art dieser Information hängt vom jeweiligen Arbeitsschritt des Prüfprozesses ab.

In Kapiteln 4 und 5 wurden die technische Umsetzung aller Arbeitsschritte und die Ergebnisse der RVT-basierten Inspektion ausführlich behandelt. Im Weiteren soll das RVT-Verfahren hinsichtlich der in dieser Arbeit gestellten Ziele bewertet werden.

### **Erkennung einer fehlerhaften Schwärzung**

Das Auftragen einer die thermische Emissivität erhöhenden schwarzen Beschichtung auf den Prüfling ist der erste Schritt des Arbeitsablaufs, der einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der thermografischen Inspektion hat. Dieser muss nur durchgeführt werden, wenn das zu prüfende Teil eine gering emittierende oder spiegelnde Oberfläche hat. Die Inhomogenität dieser Beschichtung ist in der Regel in dem auszuwertenden Ergebnisbild sichtbar, wodurch folglich die Auswertung der Ergebnisse verfälscht werden kann. Die Inhomogenitäten treten immer wieder auf, da die Beschichtung meistens durch den Prüfer per Hand erfolgt. So entstehen im Ergebnisbild stellenweise bei zu dicker Beschichtung dunklere Flecken oder durch zu dünne Auftragung bedingte Reflexe der Umgebung.

Bisher wird die Schwärzung von dem Prüfer visuell begutachtet, was fehleranfällig ist und auch keinerlei Dokumentation bietet. Dagegen leistet das RVT-Verfahren eine Unterstützung des Prüfers (Abschnitt 4.3.1). Durch die kurze Vormessung (ca. 1 Sek) mit einer Blitzanregung und die geeignete Analyse der aufgenommenen IR-Bildsequenz werden die Inhomogenitäten der Beschichtung sichtbar gemacht und diese Information wiederum auf den Prüfling projiziert. Zusätzlich wird diese Information zu Dokumentationszwecken gespeichert. So erhält der Prüfer eine Darstellung eventueller Problemzonen direkt auf dem Prüfling. Bereiche unzureichender Schwärzung können so schnell erkannt und erneut beschichtet werden.

Der im Rahmen des RVT-Verfahrens entwickelte Algorithmus wurde für die Erkennung der am häufigsten auftretenden Lackläufer konzipiert. Lackläufer weisen lokal eine deutlich höhere Schichtdicke als auf dem Rest des Bauteils auf. Dadurch haben diese während der Blitzanregung ein anderes thermisches Verhalten und können somit sichtbar gemacht werden. Ähnlich können auch sehr dünn beschichtete Stellen erkannt werden.

Die Erkennung der Lackläufer durch das RVT-Verfahren hängt nun im Gegensatz zu der visuellen Kontrolle nicht von der Leistung des Prüfers ab. Denn der Algorithmus erkennt die Inhomogenitäten mit der gleichen Zuverlässigkeit, sodass gute Reproduzierbarkeit erzielt wird.

Dieser Arbeitsschritt setzt voraus, dass eine Wärmequelle wie z. B. eine Blitzlampe für die kurze Vormessung an der Prüfposition vorhanden ist. Dies ist bei der akustischen Thermografie und Induktionsthermografie nicht üblich. Somit muss das verwendete Anregungsequipment gegebenenfalls um eine solche Wärmequelle erweitert werden.

---

Durch Einsatz dieses Arbeitsschrittes wird gewährleistet, dass die Bauteile mit einer fehlerhaften Beschichtung zu den weiteren Inspektionsschritten nicht zugelassen werden. Somit werden potenzielle Fehlentscheidungen des Prüfers ausgeschlossen. Folglich wird auch die Qualität der gesamten Inspektion erhöht.

### **Verbesserung der Bedienbarkeit**

Im Rahmen des RVT-Verfahrens wurde auch ein neues Bedienkonzept der thermografischen Inspektion ausgearbeitet und umgesetzt. Das virtuelle Bedienfeld ermöglicht das Bedienen der Messapparatur durch eine Befehlseingabe direkt auf dem Prüfling. Dabei werden alle verfügbaren Optionen auf den Prüfling projiziert und von dem Prüfer wie auf einem Touchscreen ausgewählt. Dadurch muss der Prüfer die Prüfstelle nicht verlassen, um den Messrechner zu bedienen. Das ist insbesondere dann sehr vorteilhaft, wenn sich der Messrechner nicht in der unmittelbaren Nähe der Prüfstelle befindet.

So kann eine Messung gestartet und nötigenfalls auch schnell abgebrochen werden. Die Messparameter können ebenso auf dem virtuellen Bedienfeld eingegeben werden. Nach der abgeschlossenen Messung wird außerdem die Art des zu projizierenden Ergebnisbildes ausgewählt.

Dem Prüfer werden kontextsensitiv nur relevante Optionen zur Auswahl gestellt, wodurch er durch die vielen in der Software verfügbare Optionen nicht abgelenkt wird. Diese können selbstverständlich jederzeit über einen entsprechenden Expertenmodus eingeblendet oder direkt am Computer erreicht werden. So wird die Konzentration des Prüfers auf das Wesentliche gerichtet, sodass der Prüfer dem Prüfling jederzeit die höchste Aufmerksamkeit verleiht.

Das virtuelle Bedienfeld ist auch für den Einsatz in schmutzigen Umgebungen vorgesehen. Eine virtuelle Eingabe ist dabei sehr vorteilhaft, da dort die konventionellen Eingabegeräte (wie Computertastatur) nicht zusätzlich gegen Schmutz oder Feuchtigkeit geschützt werden müssen.

Dieser Arbeitsschritt wurde in der Arbeit basierend auf der RVT-Einheit umgesetzt. D. h. es ist kein zusätzlicher Sensor für die Verfolgung eines Fingers bzw. Zeigers notwendig, da dies basierend auf der IR-Kamera erfolgt. Diese Lösung hat den technischen Nachteil, dass durch die fehlende Tiefeninformation kein genauer Berührungspunkt zwischen dem Zeiger und dem Prüfling ermittelt werden kann. Eine Option wird somit dann ausgewählt, wenn der Zeiger auf einer der Optionen für eine festgelegte Zeit stehen bleibt, z. B. für eine halbe Sekunde. Die im Rahmen

der Arbeit durchgeführten Tests haben ergeben, dass diese Methode bei den zehn involvierten Prüfern als hilfreich und intuitiv bewertet wurde. Hier könnten allerdings noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, etwa ob diese Realisierung des virtuellen Bedienfeldes Nachteile gegenüber einer möglichen Lösung mit der Tiefeninformation darstellt. Dabei könnten auch psychologische Aspekte herangezogen und der Stressfaktor unter realen Bedingungen an einer größeren Gruppe Probanden genauer untersucht werden [10]. Alle Untersuchungen in der Arbeit wurden bisher unter Laborbedingungen durchgeführt.

### **Verbesserung durch Rückmeldungen während einer Messung**

Bei dem bisher eingesetzten thermografischen Arbeitsablauf gibt es keinerlei Rückmeldung an den Prüfer während einer laufenden Messung. Dabei ist eine Reihe von Informationen für die Qualität der durchgeführten Untersuchung entscheidend. Hier wurden im Rahmen des RVT-Verfahrens für drei thermografische Prüfmethoden folgende Rückmeldungsinformationen eingeführt:

- LED-Thermografie – bei der Untersuchung von Bauteilen aus Faserverbundstoffen betragen die Messzeiten oft einige Minuten. Außerdem bleiben die LED-Lampen bedingt durch die Lockin-Technik mehrere Sekunden ein und dann ausgeschaltet. Im ausgeschalteten Zustand gibt es keine Information darüber, ob die Messung bereits abgeschlossen oder die Aufnahme noch im Gange ist. Dadurch kann der Prüfer die laufende Messung versehentlich stören. Durch den Einsatz des RVT-Verfahrens wird auf den Prüfling die Information „Messung läuft“ mit der Angabe der verbleibenden Zeit projiziert. Somit ist der Prüfer genau informiert, wie lange die Messung noch läuft. Dadurch können z. B. Reflexionen bedingt durch eine versehentliche Bewegung des Prüfers während der Messung oder Bildartefakte wie eine Hand im Kamerasichtfeld ausgeschlossen werden. Da die Information lediglich im sichtbaren Wellenlängenbereich projiziert wird, stört sie die Infrarotmessung nicht.
- Akustische Thermografie – hier ist eine korrekte Positionierung des Bauteils in der Prüfhalterung für die richtige Ankopplung und somit Übertragung der Anregungsenergie auf den Prüfling entscheidend [44, 38]. Der Prüfer bekommt zwar eine akustische Rückmeldung während der Anregungsphase aber nicht während der genauso langen Abklingphase. Da ist die Anregung bereits abgeschaltet aber die IR-Aufnahme noch aktiv. Und hier kommt es oft zu ungewollten Reflexionen, die das Ergebnisbild unbrauchbar machen. Mit dem

---

RVT-Verfahren wird während der ganzen Messung die verbleibende Messzeit auf den Prüfling projiziert. Somit ist der zeitliche Zustand der Messung durch den Prüfer stets nachvollziehbar.

Darüber hinaus kann basierend auf der akustischen Rückmeldung keine Aussage darüber getroffen werden, wie gut die Ankopplung ist. Das RVT-Verfahren ist auch hier sehr hilfreich. Während der Messung wird die aufgenommene IR-Bildsequenz gleich auf den Prüfling projiziert. Somit kann der Prüfer einschätzen, ob die Anregung richtig funktioniert, ehe das Ergebnisbild nach der abgeschlossenen Messung erzeugt wird.

- Induktionsthermografie – hier sind in der Regel mehrere Messungen notwendig, um einen Prüfling vollständig zu untersuchen. Dabei hat der Prüfer bei der konventionellen Prüfung keinerlei Information wie groß der thermisch angeregte Bereich ist und welche Bereiche des Prüflings bereits untersucht wurden. Es kommt oft zu Lücken, wo die induktionstechnische Anregung zu schwach war, um eine ausreichende Detektierbarkeit zu gewährleisten. So eine unvollständige Messabdeckung beeinflusst negativ die Qualität der Untersuchung. Diese kann auch aufgrund der fehlenden Information über die Messabdeckung sowohl im Laufe als auch nach dem Abschluss der Messung leicht übersehen werden.

Im Rahmen des RVT-Verfahrens wurde ein Algorithmus entwickelt, der aus der während der Messungen aufgenommenen IR-Bildsequenzen den ausreichend angeregten Bereich ermittelt. So wird die Messabdeckung bestimmt und anschließend auf den Prüfling projiziert. Dadurch hat der Prüfer eine vollständige Übersicht über die Messabdeckung direkt auf dem Prüfling eingeblendet. Weiter können so die Lücken in der Messabdeckung ausgeschlossen werden.

Dieser Arbeitsschritt ist insbesondere bei den geometrisch komplexen Bauteilen von großem Nutzen. Hier kann der Prüfer ohne die Information über die Messabdeckung sehr schwer die Übersicht behalten und deshalb Bereiche ungeprüft belassen. Des Weiteren sind Materialien mit hoher thermischer Diffusivität problematisch. Dabei verbreitet sich die in der Nähe des Induktors entstandene Wärme schnell, sodass der thermisch ausreichend angeregte Bereich sehr schmal ist. D. h. es müssen viele Messungen durchgeführt werden, um das ganze Bauteil messtechnisch abzudecken.

Die in der Arbeit durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die Unter-

suchung bei geometrisch komplexen und aus für die Induktionsthermografie ungünstigen Materialien hergestellten Bauteile mit dem RVT-Verfahren deutlich bessere Ergebnisse liefert. Die fehlende Messabdeckung wurde so um 75 % reduziert und die Rate der gefundenen Defekte um 81 % erhöht. In solchen Fällen erhöht also das RVT-Verfahren die Qualität der Inspektion erheblich.

Darüber hinaus hat der Prüfer bei den leicht zu prüfenden Bauteilen mit dem RVT-Verfahren eine absolute Sicherheit, dass die vollständige Messabdeckung erreicht wurde. In dem experimentellen Teil der Arbeit wurde zwar gezeigt, dass in solchen Fällen eine vollständige Messabdeckung ohne das RVT-Verfahren auch zu erreichen ist, aber der Prüfer darüber keine Bestätigung bekommt. Somit ist durchaus wahrscheinlich, dass aufgrund der im Laufe der Messungen nachlassenden Konzentration des Prüfers es doch zu Lücken in der Messabdeckung kommt. Zudem kann nun die Abdeckung elektronisch dokumentiert werden.

Weiter ist die Vollständigkeit der Messabdeckung für die Richtigkeit der statistisch ermittelten Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) entscheidend.

### **Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) am Beispiel der Verdichterschaufeln**

In dieser Arbeit wurde eine POD-Analyse bei der Induktionsthermografie an Verdichterschaufeln vorbereitet und durchgeführt. Es sind bisher keine vergleichbaren Veröffentlichungen in der Literatur bekannt. So wurde eine Reihe von Messungen an zwei präparierten Verdichterschaufeln konventionell und mit der RVT-gestützten Induktionsthermografie durchgeführt. Die anschließende POD-Analyse erfolgte mit Hilfe der in der Literatur bekannten Verfahren.

Die verwendeten Verdichterschaufeln gehören zu den induktionsthermografisch leicht zu prüfenden Bauteilen. Dies wurde auch durch die Experimente bestätigt, da in allen Fällen die involvierten Prüfer eine vollständige Messabdeckung erreicht haben. Weiter ist die ermittelte Fehlerauffindwahrscheinlichkeit ohne und mit dem RVT-Verfahren nahezu gleich. Das ist auch gut nachvollziehbar. Denn würden sich die Ergebnisse der POD-Analyse bei jeweils vollständiger Messabdeckung unterscheiden, würde dies eine schlechte Reproduzierbarkeit der Prüfmethode bedeuten. D. h. die statistische Aussage über die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit wäre nicht möglich.

Darüber hinaus ist diese statistische Aussage nur dann gültig, wenn eine vollstän-

---

dige Messabdeckung gewährleistet ist. Diese Vollständigkeit der Messabdeckung ist wie erwähnt nur mit dem RVT-Verfahren nachweisbar dokumentiert. Somit ist die statistische Richtigkeit der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit nur dann mit Sicherheit gegeben, wenn die Messabdeckung nachweisbar vollständig ist.

Dies bedeutet also, dass das RVT-Verfahren hinsichtlich der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit auch bei induktionsthermografisch leicht zu prüfenden Bauteilen einen entscheidenden Vorteil hat. Darüber hinaus bei induktionsthermografisch schwer prüfbar Bauteilen wird die vollständige Messabdeckung mit dem RVT-Verfahren wesentlich leichter erreicht. Des weiteren kann die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit nur bei einer vollständigen Messabdeckung berücksichtigt werden. Denn in den nicht abgedeckten Bereichen ist die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit nicht bekannt.

In den Experimenten wurden Faktoren wie Stress der Prüfer und nachlassende Konzentration nicht berücksichtigt. Die Prüfer standen nicht unter Zeitdruck und zwischen den einzelnen Untersuchungen wurde eine lange Pause eingelegt. In künftigen Forschungsarbeiten könnten auch diese Faktoren einbezogen werden. Hier wird auch erwartet, dass das RVT-Verfahren durch die projizierte Information über die Messabdeckung einer Ermüdung des Prüfers entgegenwirkt und damit Lücken in der Messabdeckung bedingt durch eine nachlassende Konzentration der Prüfer nachweislich verhindert.

### **Verbesserung der Auswertung**

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt bei der RVT-gestützten Inspektion auf dem Prüfling. Das Ergebnisbild wird auf das Bauteil projiziert, ein Computerbildschirm wird also nicht eingesetzt. Dies ist bei der Untersuchung der Oberflächendefekte sehr hilfreich. Denn ein z. B. bei der akustischen Thermografie üblicher Vergleich zwischen dem tatsächlichen Bauteil und dem Ergebnisbild auf dem Computerbildschirm entfällt. So lassen sich die Defekte deutlich schneller und präziser auf dem Bauteil lokalisieren.

In den Experimenten wurden Auswertungen der Ergebnisse ohne und mit dem RVT-Verfahren miteinander verglichen. Dabei sollten konkrete Anzeigen auf dem Ergebnisbild auf dem Bauteil lokalisiert und klassifiziert werden. Die Rate der Falschklassifizierungen, die auf eine falsche Lokalisierung der Anzeigen zurückzuführen ist, ist mit dem RVT-Verfahren um 100 % gesunken. Dabei ist die Auswertezeit auch um 39 % niedriger ausgefallen. Die Qualität der Auswertung wurde hier also bedeutend verbessert.

Die Auswertung der Ergebnisse auf dem Bauteil ist neben der Sichtbarkeit der Defekte auf der Bauteiloberfläche dann sinnvoll, wenn das Ergebnisbild einen hohen Kontrast aufweist. Das ist bei der akustischen Thermografie mit farbkodierten Puls-Phasen-Ergebnisbildern der Fall. Bei der Induktionsthermografie werden oft nur Phasenbilder ausgewertet. Diese weisen meistens einen schwächeren Kontrast auf und sind somit für eine Auswertung des projizierten Ergebnisbildes nur bedingt geeignet.

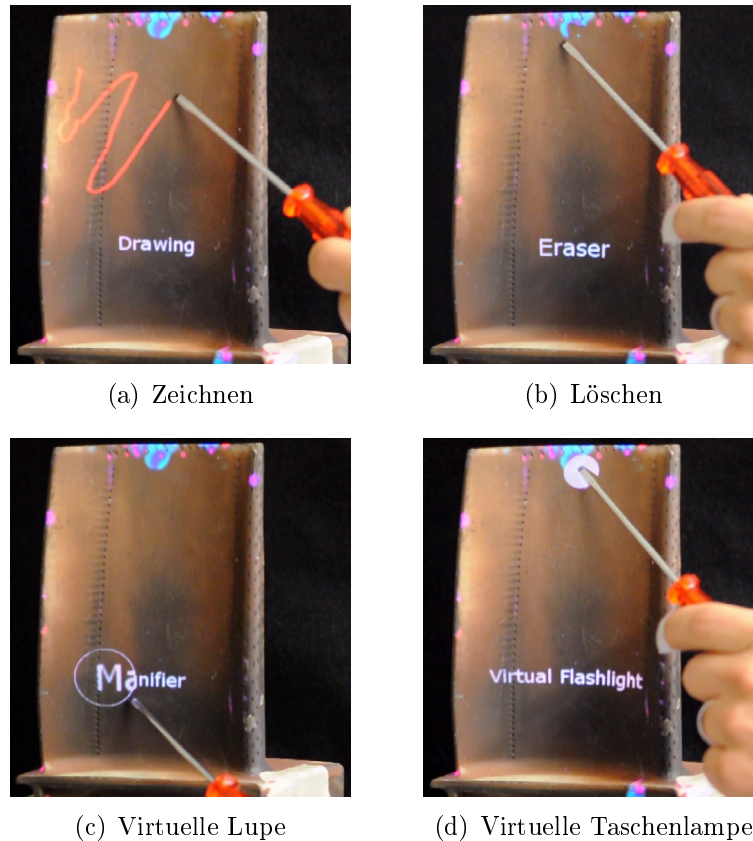
Das RVT-Verfahren verbessert aber die Auswertung der induktionsthermografischen Ergebnisse erheblich. Denn hier werden konventionell bedingt durch die begrenzte Reichweite des thermisch ausreichend angeregten Bereichs mehrere Ergebnisbilder pro Bauteil erzeugt. Die Auswertung einer hohen Anzahl an Ergebnisbildern ist aber mühsam und dadurch fehleranfällig. Im Rahmen des RVT-Verfahrens wurde ein Algorithmus entwickelt, der alle Ergebnisbilder innerhalb eines Kamerabildfeldes zu einem Ergebnisbild zusammenfasst. Dadurch entsteht ein gesamtes Ergebnisbild, das Informationen aller einzelnen Ergebnisbilder beinhaltet. Der Prüfer muss nur dieses eine Ergebnisbild auswerten.

Die Zusammenfassung der Ergebnisbilder bei den Bauteilen mit Materialien niedriger Diffusivität erfordert eine besondere Behandlung. Denn durch die schwache thermische Leitfähigkeit breitet sich die Wärme in solchen Prüflingen langsam aus. D. h. in der Praxis wird ein thermischer Einfluss einer vorherigen Messungen auf die nächsten Messungen beobachtet. Die Wartezeit zwischen den Messungen müsste nämlich lange genug sein, sodass sich in dem Bauteil ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Dies wird aber aus den wirtschaftlichen Gründen nicht praktiziert. Somit wirkt sich dieser thermische Einfluss stark auf die Phaseninformation aus. Folglich kommt es bei dem zusammengefassten Bild zu Bildartefakten, die auf die Kontrastunterschiede der einzelnen Phaseneinzelbilder zurückzuführen sind. Hier wurde ein Algorithmus entwickelt, der eine Phasenkompensation zwischen den Einzelbildern durchführt. Dadurch werden diese Bildartefakte in dem zusammengefassten Ergebnisbild beseitigt.

### **Zukunft des RVT-Verfahrens**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Ansätze ausgearbeitet, deren Umsetzung aufgrund der niedrigeren Dringlichkeit im Vergleich zu vorher vorgestellten Aspekten nicht vollständig abgeschlossen sind. Aus dem Grund werden diese Ansätze im Weiteren als Ausblick behandelt.





**Abbildung 6.1:** Darstellung der zusätzlichen Interaktionsfunktionen des virtuellen Bedienfeldes.

Im Abschnitt 4.3.3.2 wurde ein Konzept der Eintragung der Auswertungsergebnisse auf dem Bauteil mit anschließender Eintragung in eine Datenbank vorgestellt. Hierfür wurde das virtuelle Bedienfeld um einige Interaktionsmöglichkeiten erweitert:

- Zeichnen – ermöglicht das Zeichnen und Erstellen von kurzen Notizen direkt auf dem Bauteil mit dem Zeiger (Abbildung 6.1(a)). Diese Informationen werden anschließend automatisch gespeichert.
- Löschen – hier können Teile des Ergebnisbildes oder eine zuvor erstellte Notiz gelöscht werden. Beispielsweise können die im Laufe der Auswertung erkannten Scheinanzeigen gelöscht und somit nicht archiviert werden.
- Virtuelle Lupe – mit dem Werkzeug können besonders kleine Anzeigen im Ergebnisbild vergrößert werden, um eine genauere Betrachtung zu ermöglichen.
- Virtuelle Taschenlampe – damit kann ein kleiner Bereich des Bauteils durch

den Beamer beleuchtet werden. Die Position der virtuellen Taschenlampe kann mit dem Zeiger verändert werden. So können die Teile der Projektion des Ergebnisbildes ausgeblendet werden, um eine bessere Betrachtung des Bauteils zu ermöglichen. Dadurch ist kein abwechselndes Ein- und Ausschalten des Ergebnisbildes notwendig.

Im Abschnitt 4.3.4 wurde ein Konzept der Projektion der Ergebnisse bei einem bewegenden Prüfling vorgestellt (sogenannte 3D-Projektion). Hierfür wird kontinuierlich die Pose des Prüflings mit Hilfe einer RGB-Kamera ermittelt und die Projektion der Ergebnisse an diese Pose angepasst. In der Arbeit wurde der bei Siemens entwickelte Trackingalgorithmus mit binär-kodierten Markern verwendet [51, 108]. Da aber die Marker auf den Prüfling jedes Mal aufgetragen werden müssen, ist diese Lösung in der Praxis umständlich. Hier sollte in der Zukunft ein texturbasiertes Tracking-Verfahren eingesetzt werden. Dabei würde jedoch das projizierte Bild die Erkennung der Oberflächenstruktur des Bauteils stören. Somit muss, um eine korrekte Funktionsweise des Tracking-Verfahrens zu gewährleisten, die Projektion synchronisiert mit der RGB-Kamera ein- und ausgeschaltet werden. So wird die Pose des Prüflings in dem Zeitfenster mit der ausgeschalteten Projektion erfolgen.

In dieser Arbeit wird von einer manuellen und nicht automatisierten Inspektion ausgegangen. Demnach spielt die Position des untersuchten Bauteils eine entscheidende Rolle. Denn eine falsche Positionierung kann dazu führen, dass das Bauteil oder dessen für die Untersuchung vorgesehener Teil von der IR-Kamera nicht vollständig erfasst wird. Um eine korrekte Position bei jeder Messung zu gewährleisten, könnte künftig mit Hilfe des RVT-Verfahrens die Position des Prüflings überwacht werden, sobald sich ein Teil davon im Blickfeld der IR-Kamera befindet. Gleichzeitig können auf das Bauteil Positionierungshinweise projiziert werden, mit deren Hilfe der Prüfer eine exakte Feinpositionierung durchführen kann (siehe Beispiel in Abbildung 6.2). Dies ist insbesondere wie bereits erwähnt für die akustische Thermografie ausschlaggebend, da die eingebrachte Energie empfindlich von der richtigen Einkoppelstelle abhängt. Dies hätte auch den positiven Nebeneffekt, dass alle untersuchten Bauteile gleichen Typs im Ergebnisbild dieselbe Position aufweisen und dadurch einfacher untereinander verglichen werden können.



**Abbildung 6.2:** *Ausblick: Darstellung der angedachten Positionierungshilfe beim Einlegen mit dem RVT-Verfahren des Bauteils.*

### **Zusammenfassung**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Real-View-Thermography-Verfahren entwickelt und an einer Reihe von Experimenten erprobt. Durch Einführung des RVT-Verfahrens wird die Qualität der Inspektion bei der aktiven Thermografie nachweislich erhöht. Insbesondere profitieren die akustische und Induktionsthermografie von dem RVT-Arbeitsablauf.

Darüber hinaus wurde ein neues Bedienkonzept mit dem virtuellen Bedienfeld entwickelt und umgesetzt, das die Mensch-Maschine-Kommunikation in der aktiven Thermografie intuitiver gestaltet.

Die weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollen das RVT-Verfahren auf eine industrielle Einführung vorbereiten.



# Literaturverzeichnis

- [1] *Diskussionen mit Hrn. Charles Annis.* 2012
- [2] ANNIS, C.: *MIL-HDBK-1823 Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment.* US Department of Defense, 2009
- [3] ANNIS, C. ; ANNIS, D.: Alternative to Single Pixel C-Scan Analysis for Measuring POD. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2005
- [4] ANNIS, C. ; GANDOSI, L.: Influence of Sample Size and Other Factors on Hit/Miss Probability of Detection Curves / European Commission Joint Research Centre Institute for Energy. 2012. – Forschungsbericht
- [5] ANNIS, C. ; KNOPP, J.: Comparing the Effectiveness of  $a_{90/95}$  Calculations. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007
- [6] ANNIS, C. A. ; VUKELICH, S. ; ARISE, B. ; PETRIN, C. (Hrsg.): *A Recommended Methodology for Quantifying NDE/NDI Based on Aircraft Engine Experience.* North Atlantic Treaty Organization, 1993
- [7] AUDET, S. ; OKUTOMI, M.: A User-Friendly Method to Geometrically Calibrate Projector-Camera Systems. In: *The 6th IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems*, 2009
- [8] BERGE, A.: *Detection of Flaws in Metal Members, US Patent 32166.* 1979
- [9] BERGE, A.: *Detection of Flaws in Metal Members, US Patent 4247306.* 1979
- [10] BERTOVIC, M. ; FAHLBRUCH, B. ; PITKÄNEN, J. ; RONNETEG, U. ; GAAL, M. ; KANZLER, D. ; EWERT, U.: Human Factors Approach to the Acquisition and Evaluation of NDT Data. In: *18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa*, 2012

- [11] BRIGGS, C.W.: Developments in gamma ray radiography 1928 to 1941. In: *Materials Evaluation* 34 (1976), Nr. 3, S. 14A– 20A
- [12] BUSSE, G. ; WU, D. ; KARPEN, W.: Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography. In: *Journal of Applied Physics* 71 (1992), Apr, Nr. 8, S. 3962–3965. <http://dx.doi.org/10.1063/1.351366>. – DOI 10.1063/1.351366. – ISSN 0021–8979
- [13] BUTTERWORTH, S.: Eddy-Current Losses in Cylindrical Conductors with Special Applications to the Alternating Current Resistances of Short Coils. In: *Philosophical Transactions* 222 (1921)
- [14] BUTTERWORTH, S.: Effective Resistance of Inductance Coils at Radio Frequency. In: *Experimental Wireless & The Wireless Engineer* (1926)
- [15] CARBONI, M. ; CANTINI, S.: A New Approach for The Definition Of „Probability Of Detection“ Curves. In: *10th European Conference on Non-Destructive Testing*, 2010
- [16] CARSLAW, H.S. ; JAEGER, J.C.: *Conduction of heat in solids*. Clarendon Press, 1959 (Oxford science publications)
- [17] CHEN, J. C. ; KEPHART, J. ; RIDDELL, W. T.: A parametric study of crack propagation during sonic IR inspection. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2006
- [18] DEMAR, E. ; NORMEN, E. J.: What A Disaster. In: *Connecticut Explored* 9 (2011), Nr. 4
- [19] DILLENZ, A. ; ZWESCHPER, T. ; BUSSE, G.: Burst phase angle thermography with elastic waves. In: *Proceedings Thermosense XXIV*, 2002
- [20] DUAN, Y. ; SERVAIS, P. ; GENEST, M. ; CASTANEDO, C. I. ; MALDAGUE, X.: ThermoPoD: A reliability study on active infrared thermography for the inspection of composite materials. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (2012)
- [21] DUTTA, S. ; SCHMIDT, T. ; ULLMANN, T.: Entwicklung eines roboter-gestützten Thermografie-Endeffektors mit hoher Positioniergenauigkeit. In: *Thermographie-Kolloquium (DGZFP), Stuttgart, Deutschland*, 2013

- 
- [22] EHLEN, A. ; FINCKBOHNER, M. ; KAPPES, W. ; KÖHLER, G. ; WALLE, G.: Automatisierte Oberflächenrissprüfung an Neurädern mit induktiv angeregter Thermografie. In: *Fachtagung ZfP im Eisenbahnwesen*, 2014
- [23] EISLER, K.: *Ausnutzung von spektralen Banden im Sichtbaren und Infraroten zur thermografischen Prüfteilqualifizierung*, Universität des Saarlandes, Diss., 2012
- [24] FARADAY, M.: Experimental Researches in Electricity. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 122 (1832), Januar, 125–162. <http://www.jstor.org/stable/107956>. – ISSN 02610523
- [25] FIALA, M. ; SHU, C.: Fully Automatic Camera Calibration Using Self-Identifying Calibration Targets / Computational Video Group Institute for Information Technology National Research Council Canada. 2005. – Forschungsbericht
- [26] FIALA, M. ; SHU, C.: Self-identifying patterns for planebased camera calibration. In: *Machine Vision and Applications* (2008)
- [27] FIRESTONE, F. A.: *Flaw detecting device and measuring instrument*. 1942
- [28] FLEMING, J. A.: On Some Effects of Alternating-Current Flow in Circuits Having Capacity and Self-Inductance. In: *Journal Institution of Electrical Engineers* 20 (1891)
- [29] FLIR: *Flir SC-7000 Datasheet*, <http://www.flir.com/thermography/americas/us/view/?id=50093&collectionid=529&col=50094>
- [30] FORSYTH, D. S. ; FAHR, A.: An Evaluation of Probability of Detection Statistics. In: *RTO-AVT Workshop on Airframe Inspection Reliability under Field/Depot Conditions* (1998)
- [31] FORSYTH, D. S. ; FAHR, A.: On The Independence Of Multiple Inspections And The Resulting Probability Of Detection. In: *AIP Conference Proceedings Vol. 509* (2010)
- [32] GEORGIU, G. A.: Probability of Detection (PoD) curves. Derivation, applications and limitations. / Research Report 454, Health and Safety Executive. 2006. – Forschungsbericht

- [33] GILL, J. ; LAUGHTON, C. D. (Hrsg.): *Generalized Linear Models. A Unified Approach*. Sage Publications, 2001
- [34] GOLDAMMER, M ; HEINRICH, W.: Active Thermography for Dimensional Measurements on Gas Turbine Components. In: *ECNDT*, 2006
- [35] GUO, X. ; ZHANG, F.: Study on pulsed thermography to detect water ingress in composite honeycomb panels. In: *Quantitativ InfraRed Thermography, Naples, Italy*, 2012
- [36] HALSOR, S. R. ; STORSET, M. K.: *Methods of Flaw Detection in Billets, US Patent 4480928*. 1982
- [37] HARDING, C. A. ; HUGO, G. R.: Statistical analysis of probability of detection hit/miss data for small data sets. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (2003)*
- [38] HASSAN, W. ; HOMMA, C. ; WEN, Z. ; VENSEL, F. ; HOGAN, B.: Detection of Tight Fatigue Cracks at the Root of Dampers in Fan Blades Using Sonic IR Inspection: A Feasibility Demonstration. In: THOMPSON, D. O. (Hrsg.) ; CHIMENTI, D. E. (Hrsg.): *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* Bd. 894, 2007 (American Institute of Physics Conference Series), S. 455–462
- [39] HELLIER, C. J.: *Handbook of Nondestructive Evaluation*. The McGraw-Hill Companies, 2003
- [40] HENNEKE, E. G. ; REIFSNIDER, K. L. ; STINCHCOMB, W. W.: Thermography – an NDI method for damage detection. In: *Journal of Metals* (1979)
- [41] HENNEKE, E. G. ; REIFSNIDER, K. L. ; STINCHCOMB, W. W. ; RUSSELL, S. S.: Vibrothermography: Investigation and development of a new nondestructive evaluation technique. In: *Report Nr. ARO-16202-9-MS, U. S. Army Research* (1982)
- [42] HERSCHEL, W.: Additional Observations tending to investigate the Symptoms of the variable Emission of Light and Heat of the Sun. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 91 (1801), S. 354–362
- [43] HERSCHEL, W.: Observations tending to investigate the Nature of the Sun, in order to find the Causes or Symptoms of its variable Emission of Light and



- Heat. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 91 (1801), S. 265–318
- [44] HOMMA, C.: *Untersuchungen zu Mechanismus und technischer Umsetzung der akustischen Thermographie*, Universität des Saarlandes, Diss., 2007
- [45] HOMMA, C. ; ROTHENFUSSER, M.: Acoustic Thermography: Vibrational Modes of Cracks and the Mechanisms of Heat Generation. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2005
- [46] HOMMA, C. ; ROTHENFUSSER, M. ; BAUMANN, J. ; SHANNON, R. E.: Study of Heat Generation Mechanisms in Acoustic Thermography. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2006
- [47] HOVLAND, H. ; NILSEN, J.: *Methode zur Rissprüfung in Knüppeln, EP Patent 0378006*. 1989
- [48] IBARRA-CASTANEDO, C. ; MARCOTTE, F. ; GENEST, M. ; BRAULT, L. ; FARLEY, V. ; MALDAGUE, X. P. V.: Detection and characterization of water ingress in honeycomb structures by passive and active infrared thermography using a high resolution camera. In: *Quantitativ InfraRed Thermography, Naples, Italy*, 2012
- [49] IWAI, D. ; SATO, K.: Optical Superimposition of Infrared Thermography through Video Projection. In: *Infrared Physics & Technology, Vol. 53* (2010)
- [50] JENSON, F. ; MAHAUT, S. ; CALMON, P. ; POIDEVIN, C.: Simulation Based POD Evaluation Of NDI Techniques. In: *CEA, LIST, F-91191 Gif-sur-Yvette* (2010)
- [51] KATO, H. ; BILLINGHURST, M.: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System. In: *IEEE International Workshop on Augmented Reality*, 1999
- [52] KENELLY, A. E. ; LAWS, F. A. ; PIERCE, P. H.: Experimental Researches on Skin Effect in Conductors. In: *Transactions AIEE 35* (1915)
- [53] KNOPP, J. S. ; ALDRIN, J. C. ; LINDGREN, E. ; ANNIS, C.: Investigation Of A Model-Assisted Approach To Probability Of Detection Evaluation. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007

- [54] KOCH, S. ; TRAXLER, G.: Inline-Prüfung von warmgewalzten Stahlknüppeln mittels Wärmefluss-thermographie. In: *Thermographie-Kolloquium*, 2013
- [55] KOHN, W.: *Statistik : Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Springer, 2005
- [56] KOLLORZ, E. ; BÖHNEL, M. ; MOHR, S. ; HOLUB, W. ; HASSLER, U.: Evaluation of laser-based active thermography for the inspection of optoelectronic devices. In: *Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials*, 2013
- [57] KRANKENHAGEN, R. ; GROLL, E. T. ; KALISCH, U. ; MAIERHOFER, C. ; MECKE, R. ; MEINHARDT, J. ; MYRACH, P. ; SCHILLER, M. ; SEIDL, T.: Untersuchung der Putzritzungen am Magdeburger Dom mit aktiver Thermografie und optischen 3D-Messverfahren. In: *Thermographie-Kolloquium*, 2013
- [58] KREMER, K. J. ; KAISER, W. ; MÖLLER, P.: Das Therm-O-Matic-Verfahren – ein neuartiges Verfahren für die Inlone-Prüfung von Stahlerzeugnissen auf Oberflächenfehler. In: *Stahl u. Eisen 105* (1985)
- [59] KURZ, J. H. ; JÜNGERT, A. ; DUGAN, S. ; DOBMANN, G. ; ROOS, E.: Experimentelle POD Bestimmung mittels Ultraschall Phased Array zur Einbeziehung zerstörungsfreier Prüfungen in probabilistischen Versagensanalysen. In: *DGZfP Seminar des Fachausschusses Ultraschallprüfung*, 2011
- [60] LESTER, H.H.: *The X-ray Testing of Metals at Watertown Arsenal*. Defense Technical Information Center, 1927 <http://books.google.de/books?id=2jTsNwAACAAJ>
- [61] LI, M. ; HOLLAND, S. D. ; MEEKER, W. Q.: Quantitative Multi-Inspection-Site Comparison Of Probability Of Detection For Vibrothermography Nondestructive Evaluation Data. In: *Journal of Nondestructive Evaluation Vol. 30* (2011)
- [62] MAHLER, G.: Thermografische Lasernahtprüfung von Mehrblech-Verbindungen im Automobil-Karosseriebau. In: *DGZfP-Jahrestagung*, 2013
- [63] MAHLER, G. ; EITZINGER, C.: Konzeption und Aufbau einer roboter-gestützten Plattform für optisch angeregte Wärmefluss-Thermografie. In: *Thermographie-Kolloquium (DGZFP), Stuttgart, Deutschland*, 2013

- 
- [64] MALDAGUE, X.: *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. John Wiley & Sons, 2001
- [65] MALDAGUE, X ; GALMICHE, F ; ZIADI, A: Advances in pulsed phase thermography. In: *Infrared Physics & Technology* 43 (2002), Nr. 3–5, S. 175 – 181. – ISSN 1350–4495
- [66] MALDAGUE, X. ; MARINETTI, S.: Pulse phase infrared thermography. In: *Journal of Applied Physics* 79 (1996), Nr. 5, S. 2694–2698
- [67] MEEKER, W. Q. ; ESCOBAR, L. A.: *Statistical Methods for Reliability Data*. A Wiley Interscience Publication, 1998
- [68] MEINLSCHMIDT, P. ; ADERHOLD, J.: Thermographic Inspection of Rotor Blades. In: *ECNDT*, 2006
- [69] MOOSHOFFER, H. ; GOLDAMMER, M. ; HEINE, W. ; ROTHENFUSSER, M. ; BASS, J. ; LOMBARDO, E. ; VRANA, J.: Induktionsthermographie zur automatischen Prüfung von Generatorkomponenten. In: *DGZfP-Jahrestagung, Münster, Deutschland, 2009*
- [70] NETZELMANN, U. ; STRAUSS, H. ; WALLE, G.: Zerstörungsfreie thermographische Methoden zur Detektion von Fehlern an Massivumform-Teilen. In: *Schmiede-Journal* (2007)
- [71] NICHOLSON, J. W.: Inductance and Resistance and other Circuits. In: *Philosophical Magazine* 18 (1909)
- [72] O'DONNELL, D.: Global Inspection System / Siemens Power Generation USA. 2007. – Forschungsbericht
- [73] PAVLOVIC, M. ; BOEHM, R. ; MÜLLER, C.: Multi-Parameter POD for Industrial Applications The Influence of the Material Attenuation as an Example. In: *DGZfP Seminar des Fachausschusses Ultraschallprüfung*, 2010
- [74] PAVLOVIC, M. ; MÜLLER, C. ; BOLLER, C.: The Volume POD as an Optimisation Tool of Multiple NDT Inspections of Complex Geometries. In: *2nd International Symposium on NDT in Aerospace*, 2010
- [75] PAVLOVIC, M. ; RONNETEG, U. ; MÜLLER, C. ; EWERT, U. ; BOLLER, C.: Safe Product Design - The Role of the NDE Reliability Analysis. In: *18th World Conference on Nondestructive Testing*, 2012

- [76] PAVLOVIC, M. ; TAKAHASHI, K. ; MÜLLER, C. ; BOEHM, R.: NDT Reliability – Final Report. Reliability in non-destructive testing (NDT) of the canister components. / Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2008. – Forschungsbericht
- [77] PAVLOVIC, M. ; TAKAHASHI, K. ; RONNETEG, U. ; MÜLLER, C.: Multi-Parameter Influence on the Response of the Flaw to the Phased Array Ultrasonic NDT System. The Volume POD. In: *DGZfP 4th European-American Workshop on Reliability of NDE*, 2009
- [78] PFEIFFER, M. ; FINNBERG, J. ; RIDZEWSKI, J.: Thermographieuntersuchung an Muffenverbindungssystemen von Kunststoffmantelrohren. In: *DGZfP-Jahrestagung*, 2013
- [79] PRIYAKANTH, R. ; MALLADI, S.: Savitzky-Golay Filtered Transformation for Dark Image Enhancement through Intensity Channel Division and Region Channels. In: *Third National Conference on Modern Trends in Electronic Communication & Signal Processing*, 2013
- [80] PRIYAKANTH, R ; MALLADI, S. ; ABBURI, R.: Dark Image Enhancement through Intensity Channel Division and Region Channels using Savitzky-Golay Filter. In: *International Journal of Scientific and Research Publications* Volume 3, Issue 8 (2013)
- [81] ŠRAJBR, C. ; MEHLER, S.: Induktionsthermografie zur automatisierten Rissprüfung von Flugzeugstrukturen aus Aluminium. In: *Thermographie-Kolloquium (DGZFP)*, Stuttgart, Deutschland, 2013
- [82] RAUHAUT, M. ; SPIES, M. ; TAEUBNER, K.: Detektion und Auffindwahrscheinlichkeit (POD) von Oberflächenfehlern in Metallen mittels optischer Inspektionsverfahren. In: *DACH-Jahrestagung*, 2010
- [83] RAYLEIGH, Lord: The Reaction upon the Driving-Point of a System Executing Forced Harmonic Oscillations of Various Periods, with Applications to Electricity. In: *Philosophical Magazine and Journal of Science* 21 (1886)
- [84] RÖLLIG, M. ; STEINFURTH, H. ; ZIEGLER, M.: Untersuchung von Hochleistungs-LEDs für den Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung mittels Thermografie. In: *Thermographie-Kolloquium*, Stuttgart, Deutschland, 2013

- 
- [85] ROSELL, A.: *Finite Element Modelling of Eddy Current Non-Destructive Evaluation in Probability of Detection Studies*, Chalmers University of Technology, Diplomarbeit, 2012
- [86] ROSELL, A. ; PERSSON, G.: Comparison of Experimental and Model Based POD in a Simplified Eddy Current Procedure. In: *18th World Conference on Nondestructive Testing*, 2012
- [87] ØRSTED, H. C.: Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needles. In: *Annals of Philosophy* 16 (1820), S. 273
- [88] RUNNEMALM, A. ; BROBERG, P. ; FERNANDEZ, E. ; YEDRA, A. Garcia De L. ; HENRIKSON, P. ; THORPE, N.: Automatic thermography inspection of welded components with limited access. In: *6th International Symposium on NDT in Aerospace*, 2014
- [89] SAFIZADEH, M. S. ; FORSYTH, D. S. ; FA, A.: Recent Studies on the POD Analysis of „ $\hat{a}$  vs.  $a$ “ NDI Data. In: *Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation* (2003)
- [90] SAVITZKY, A. ; GOLAY, M. J. E.: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. In: *Analytical Chemistry* 36 (1964), Nr. 8, S. 1627–1639
- [91] SEZGIN, M. ; SANKUR, B.: Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. In: *Journal of Electronic Imaging* 13 (2004), Nr. 1, S. 146–168. ISBN 1017–9909
- [92] SIEMER, U.: Einsatzmöglichkeiten thermografischer Anregungstechniken im Automobilbau und deren Weiterentwicklung mittels spektraler Betrachtungen. In: *Thermographie-Kolloquium*, 2011
- [93] SOKOLOV, S. Y.: On the problem of the propagation of ultrasonic oscillations in various bodies. In: *Elek. Nachr. Tech* 6 (1929), S. 454–460
- [94] SOKOLOV, S. Y.: The practical utilization of the diffraction of light by ultrasonic waves. In: *Z. Phys.* 36 (1935), S. 142–144
- [95] SOKOLOV, S. Y.: Ultrasonic methods of detecting internal flaws in metal articles. In: *Zavodskaya Laoratoriya* 4 (1935), S. 1468–1473

- [96] SOKOLOV, S. Y.: Ultrasonic oscillations and their applications. In: *Tech. Phys.* 2 (1935), S. 1–23
- [97] SPIES, M. ; RIEDER, H.: Synthetic aperture focusing of ultrasonic inspection data to enhance the probability of detection of defects in strongly attenuating materials. In: *NDT&E International* 43 (2010)
- [98] SPIES, M. ; RIEDER, H. ; DILLHÖFER, A.: Verbesserung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) mittels SAFT bei der Ultraschallprüfung von schwer prüfba- ren Werkstoffen. In: *DGZfP-Jahrestagung, 2010*
- [99] SPIES, M. ; RIEDER, H. ; DILLHÖFER, A. ; HUBEL, S. ; ECKERT, T.: Ver- besserung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) durch den Einsatz von Modellierungs- und Bildgebungsalgorithmen am Beispiel von schwer prüfba- ren Schiffspropellerwerkstoffen. In: *DGZfP Seminar des Fachausschusses Ul- traschallprüfung, 2011*
- [100] SPROULE, D. O.: *Method of echo sounding and means therefor.* 1939
- [101] SWINBURNE, J.: Alternate Current-Condensers. In: *Proceedings of the Physical Society London* 11, 1890
- [102] THERMOGRAFIE, Partikeldetektion auf Elektroden für Lithium-Ionen- Batterien mit l.: Advances in Signal Processing for Non Destructive Evaluation of Materials. In: *Thermographie-Kolloquium, 2013*
- [103] THOMPSON, R. B.: A Unified Approach to the Model-Assisted Determination of Probability of Detection. In: *Review of Progress in Quantitative Nonde- structive Evaluation, 2008*
- [104] VISSER, W.: POD/POS curves for non-destructive examination / Offshore Technology Report, Health and Safety Executive. 2002. – Forschungsbericht
- [105] VRANA, J.: *Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung*, Universität des Saarlandes, Diss., 2008
- [106] VRANA, J. ; GOLDAMMER, M. ; BAUMANN, J. ; ROTHENFUSSER, M. ; AR- NOLD, W.: Mechanisms And Models For Crack Detection With Induction Thermography. In: *AIP Conference Proceedings* 975 (2008), Nr. 1, S. 475–482

- [107] WEEKES, B. ; ALMOND, D. P. ; CAWLEY, P. ; BARDEN, T.: Eddy-current induced thermography – probability of detection study of small fatigue cracks in steel, titanium and nickel-based superalloy. In: *NDT&E International* 49 (2012)
- [108] XU, Q.: Visual Code Marker Detection / Stanford University, Department of Electrical Engineering. 2005. – Forschungsbericht
- [109] YAN, G.: *The New Methods on NDE Systems POD Capability Assessment and Robustness Improvement*, Wayne State University, Diss., 2009
- [110] ZHANG, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2000)
- [111] ZITOVA, B. ; FLUSSER, J.: Mapping textures on 3D geometric model using. In: *Image and Vision Computing* 21 (2003)





# Publikationen

## Konferenzbeiträge

Die Thematik dieser Dissertation wurde bei folgenden Konferenzen vorgestellt:

Real-View-Induktionsthermografie

L. BIENKOWSKI, M. GOLDAMMER, C. HOMMA, R. ROTHENFUSSER  
*DGZFP-Thermografie Kolloquium*, 2013, Stuttgart, Deutschland

Real View Thermography

L. BIENKOWSKI, C. HOMMA  
*Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE)*, 2012,  
Denver, USA

Hybrid Camera and Real-View Thermography for Nondestructive Evaluation

L. BIENKOWSKI, C. HOMMA, K. EISLER, C. BOLLER  
*DGZFP-Thermografie Kolloquium*, 2012, Neapel, Italien

Real View Thermography

L. BIENKOWSKI, C. HOMMA, R. ROTHENFUSSER  
*DGZFP-Thermografie Kolloquium*, 2012, Graz, Österreich

## Erfindungsmeldungen

Im Rahmen dieser Dissertation wurden folgende Erfindungsmeldungen bei der Firma Siemens eingereicht:

„Verfahren zur Zusammenfassung von Messergebnissen der Induktionsthermografie“

„Visualisierung von Volumendaten auf einem Objekt“

„Sicherstellung der Prüfdeckung bei manueller Inspektion“

„Visualisierung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD) bei der Induktionsthermografie“

„Gesten-Erkennung für die Real View Thermography“

„Dynamische Ergebnisprojektion bei bewegtem Prüfteil“

„Bauteilbearbeitung mit dynamischer Ergebnisprojektion“

„Online Real View Inspektion“

# Danksagung

Als Erstes danke ich meinen Betreuern Herrn Dr. Christian Homma und Herrn Dr. Max Rothenfusser für die langjährige Unterstützung sowie die zahlreichen Diskussionen. Besonders danke ich auch Herrn Dr. Matthias Goldammer für ein stets offenes Ohr und seine Bereitschaft, alle meinen Fragen ausführlich zu beantworten.

Ich bedanke mich ebenfalls bei Herrn Dr. Claudio Laloni für die Möglichkeit, diese Thematik in der von ihm geleiteten Gruppe verfolgen zu dürfen. Mein Dank gilt allen Kollegen, Doktoranden, Diplomanden und Werkstudenten für die ausgezeichnete Arbeitsatmosphäre und deren Hilfsbereitschaft.

Des weiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Christian Boller, der trotz zahlreicher Verpflichtungen meine Betreuung übernommen hat.

Im Besonderen danke ich meiner Freundin Sofia für ihre ununterbrochene Unterstützung, dass sie mir immer mit einem guten Rat zur Seite gestanden hat.

Specjalne podziękowania kieruję do moich rodziców i brata. Bez ich wsparcia i nieustającej wiary we mnie przez całe moje życie ta praca nie mogłaby powstać.