

Dipl.-Phys. Joachim Schlichting

**Integrale Verfahren  
der aktiven Infrarotthermografie**

Die vorliegende Arbeit entstand an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Impressum

**Integrale Verfahren  
der aktiven Infrarotthermografie**

2012

Herausgeber:

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Unter den Eichen 87

12205 Berlin

Telefon: +49 30 8104-0

Telefax: +49 30 8112029

E-Mail: [info@bam.de](mailto:info@bam.de)

Internet: [www.bam.de](http://www.bam.de)

Copyright © 2012 by

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Layout: BAM-Referat Z.8

ISSN 1613-4249

ISBN 978-3-9815134-6-2

# Integrale Verfahren der aktiven Infrarotthermografie

von Diplom-Physiker  
Joachim Schlichting  
aus München

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der

Ingenieurwissenschaften  
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Gutachter: Dir. u. Prof. Dr. habil. Marc Kreutzbruck

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 11. Mai 2012

Berlin 2012  
D 83



*Für Marlene.*



## Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Beschäftigung an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abteilung „Zerstörungsfreie Prüfung“, im Rahmen des dortigen Doktorandenprogramms. Die wesentlichen Impulse zur Findung des Themas gingen von Herrn Dir. u. Prof. Kreuzbruck aus, dem mein herzlicher Dank zudem für seine vielen hilfreichen Ratschläge sowie seine stete Diskussionsbereitschaft auf wissenschaftlichem Gebiet und darüber hinaus gilt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Rethmeier für die Betreuung dieser Dissertation, insbesondere für die Unterstützung bei allen schweißtechnischen Thematiken.

Für die Hilfe bei alltäglichen und grundsätzlichen Problemen, die bei der Erstellung dieser Arbeit auftraten, möchte ich meinen Kollegen aus der Fachgruppe 8.4 „Akustische und elektromagnetische Verfahren“ danken, ohne die die vorliegende Arbeit nie dieser Form hätte entstehen können. Ausdrücklich möchte ich zudem Herrn Dr. Blome, Herrn Brauser, Frau Dey, Herrn Knöppchen, Herrn Dr. Krankenhagen, Frau Dr. Maierhofer, Frau Reimund, Herrn Pelkner, Herrn Pepke, Herrn Steinfurth, Herrn Dr. Thomas und besonders Herrn Dr. Ziegler für ihre besondere Unterstützung danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt zudem meiner Familie und meinen Freunden, die mit mir durch die Höhen und Tiefen bei der Anfertigung dieser Arbeit gingen und mir immer beistanden. Ohne Euch hätte diese Arbeit nie entstehen können!

Joachim Schlichting





## Kurzzusammenfassung

Die zerstörungsfreie Prüfung ist eine Aufgabe von großer Bedeutung, sowohl aus wirtschaftlicher Perspektive, als auch um die notwendige Sicherheit technischer Systeme gewährleisten zu können. Mit der Thermografie steht eine schnelle und berührungslose Prüftechnik zur Verfügung, die nicht zuletzt wegen der rapiden Entwicklung auf dem Gebiet der Infrarotkameras in letzter Zeit große Aufmerksamkeit erfährt. Typischerweise werden thermografisch oberflächennahe, parallel zur Oberfläche ausgedehnte Defekte nachgewiesen. In dieser Arbeit werden zwei untypische Prüfprobleme gelöst. An Punktschweißverbindungen wird mit der Linsengröße eine Struktur in der Mitte der Probe mittels Blitzlichtthermografie indirekt vermessen. Hier können typische Fehlerbilder wie Klebverbindungen und Spritzer sicher erkannt werden, was statistisch abgesichert durch eine Serienmessung und den Vergleich mit zerstörender Prüfung gezeigt wird. Ein Beispiel für orthogonal zur Oberfläche orientierte Fehlstellen stellen Risse dar, wie sie beispielsweise in Schweißnähten häufig auftreten. Neben der Entwicklung eines Verfahrens zur Detektion von Rissen, welches auf kommerziell erhältlichen Geräten aufbaut, wurde in Experimenten und Finite-Elemente-Simulationen untersucht, inwieweit sich auch die geometrischen Eigenschaften bestimmen lassen. Mit einem Verfahren, das ebenso wie die Methode zur Prüfung der Schweißpunkte auf der Analyse zeitlich und räumlich integraler Größen basiert, die vom thermischen Widerstand abhängen, ist die gleichzeitige Bestimmung von Winkel und Tiefe möglich.

## **Abstract**

Non-destructive evaluation is a task of utmost importance for both, the economic point of view and to guarantee the required safety and reliability of technical systems. Thermography is a fast and contactless technique which received continued attention not least through the significant price drop at the infrared camera market. It is typically used to detect near-surface defects which are expanded parallel to the surface. This thesis deals with two non-standard inspection tasks. With the weld lens diameter of spot welds, a feature in the sample's geometrical center is indirectly sized by flash thermography. The presented method is suitable to distinguish typical error classes like stick welds or expulsions. This fact is validated by statistical evaluations of thermographic and destructive test series. As an example for perpendicularly oriented imperfections, surface cracks are investigated, which can be a major problem at welding seams. A technique for detecting cracks entirely based on commercially available equipment is developed. In addition, the accessibility of geometric characteristics of cracks was examined by experiments and FEM-simulations. Similar to the method developed for assessing spot welds, an approach based on the analysis of spatial and temporal integral quantities which depend on the thermal resistance is used. In doing so, the simultaneous determination of crack angle and depth is possible.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	3
2.1.1	Wärmestrahlung . . . . .	3
2.1.2	Das Emissivitätsproblem . . . . .	6
2.1.3	Wärmeleitung . . . . .	7
2.1.4	Varianzanalyse . . . . .	8
2.2	Thermografie . . . . .	10
2.2.1	Normung auf dem Gebiet der Thermografie . . . . .	11
2.2.2	Einordnung der thermografischen Prüftechniken . . . . .	12
2.2.3	Messdatenauswertung für die aktive Thermografie . . . . .	17
2.2.4	Blitzlichtthermografie . . . . .	21
2.2.5	Thermografie zur Risserkennung und -charakterisierung . . . . .	22
2.2.6	Thermografie an Punktschweißverbindungen . . . . .	28
2.2.7	Digitale Bildverarbeitung . . . . .	29
2.3	Schweißverbindungen . . . . .	31
2.3.1	Widerstandspunktschweißen . . . . .	33
2.3.2	Qualitätssicherung von Punktschweißverbindungen . . . . .	37
2.3.3	Zerstörende Prüfung von Punktschweißverbindungen . . . . .	39
2.3.4	Prozessüberwachung beim Punktschweißen . . . . .	41
2.3.5	Zerstörungsfreie Prüfung von Punktschweißverbindungen . . . . .	42
2.3.6	Risse . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Versuchseinrichtungen</b>	<b>46</b>
3.1	Kameratechnik . . . . .	46
3.1.1	InSb-basierte Infrarot-Kamera . . . . .	46
3.1.2	Mikrobolometer Infrarot-Kamera . . . . .	48
3.2	Anregungsquellen . . . . .	50
3.2.1	Blitzlampen . . . . .	51
3.2.2	Lasersysteme . . . . .	52

<b>4</b>	<b>Horizontale Fehler: Schweißpunkte</b>	<b>56</b>
4.1	FEM Simulationen . . . . .	57
4.1.1	Modellbildung und Simulationsdetails . . . . .	57
4.1.2	Prinzipielles Verhalten . . . . .	60
4.1.3	Parametervariationen . . . . .	64
4.1.4	Schlussfolgerungen für die experimentelle Durchführbarkeit . . . . .	67
4.2	Probenpräparation . . . . .	69
4.2.1	Schweißparameter . . . . .	70
4.2.2	Oberflächenbeschichtung . . . . .	70
4.3	Untersuchung zur prinzipiellen Durchführbarkeit . . . . .	73
4.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	73
4.3.2	Ergebnisse . . . . .	74
4.4	Thermografische Serienmessung . . . . .	76
4.4.1	Versuchsaufbau . . . . .	76
4.4.2	Geometrische Auflösung der Versuchsanordnung . . . . .	77
4.4.3	Versuchsdurchführung . . . . .	78
4.5	Datenaufbereitung und Ergebnisse . . . . .	81
4.5.1	Geometrische und zeitliche Charakterisierung . . . . .	81
4.5.2	Räumliche Mittelwertbildung und Signalnormierung . . . . .	82
4.6	Zerstörende Prüfung . . . . .	85
4.7	Zusammenfassung und Diskussion der bisherigen Ergebnisse . . . . .	90
4.8	Statistische Analyse . . . . .	92
4.8.1	Deskriptive Statistik . . . . .	93
4.8.2	Varianzanalyse . . . . .	97
4.9	Vergleich mit zerstörender Prüfung . . . . .	106
4.10	Zusammenfassung . . . . .	108
4.11	Diskussion . . . . .	109
4.12	Ausblick . . . . .	111
<b>5</b>	<b>Vertikale Fehler: Risse</b>	<b>112</b>
5.1	Rissdetektion . . . . .	112
5.1.1	Oberflächeneigenschaften . . . . .	113
5.1.2	Laser . . . . .	114
5.2	Risscharakterisierung . . . . .	131
5.2.1	Probekörper . . . . .	132
5.2.2	Risstiefe . . . . .	135
5.2.3	Risswinkel . . . . .	139
5.3	FEM . . . . .	145
5.3.1	Simulationsdetails . . . . .	146
5.3.2	Vergleich mit experimentellen Daten . . . . .	148
5.3.3	Einfluss der Anregungsleistung . . . . .	150
5.3.4	Einfluss der Rissklaffung . . . . .	151
5.3.5	Parametervariation und Extrapolation . . . . .	155

5.4	Zusammenfassung . . . . .	157
5.5	Diskussion . . . . .	159
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Diskussion</b>	<b>165</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	165
6.2	Physikalische Herangehensweise . . . . .	166
6.3	Vergleich mit bestehenden Methoden . . . . .	167
6.4	Ausblick . . . . .	170
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>189</b>
	<b>Anhang</b>	<b>190</b>
A.1	Lebenslauf . . . . .	190
A.2	Eigene Veröffentlichungen . . . . .	191



# Kapitel 1

## Einleitung

Für die gesellschaftliche Akzeptanz von technischen Systemen ist es von großer Bedeutung, dass diese zuverlässig und sicher sind. Mit der Größe der technischen Systeme und insbesondere der eingesetzten Leistung wächst die potentiell von ihnen ausgehende Gefahr. Besonders deutlich wird dies bei der für den modernen Lebensstandard notwendigen technischen Infrastruktur, wo beispielsweise beim Entgleisen eines Zuges oder einem Rohrabriss in einem Chemiewerk, aber auch bei in der westlichen Welt alltäglichen Ereignissen, wie bei Unfällen im Straßenverkehr, stets Menschenleben bedroht sind [1].

Eine notwendige Voraussetzung für die Gewährleistung der Sicherheit und Zuverlässigkeit ist es, die tatsächliche Beschaffenheit der verwendeten Bauteile zu kennen. Besonders wichtig ist das Erkennen von Fehlstellen und Diskontinuitäten – im Kontext der Materialprüfung werden diese als Ungängen zusammengefasst – die mögliche Ausgangspunkte für ein potentiell Versagen darstellen. Mittels zerstörungsfreier Prüfung können sowohl Ungängen erkannt werden, die durch den Herstellungsprozess bedingt sind, als Beispiele seien hier Schweißnahtfehler oder Lunker in Gussteilen genannt, als auch solche, die erst durch den Betrieb auftreten, wie beispielsweise Ermüdungsrisse oder Korrosionsschäden.

Obwohl zerstörungsfreie Prüfverfahren wie die Sichtprüfung instinktiv bei der Beurteilung eines Werkstücks eingesetzt werden und auch Verfahren zur Detektion von verdeckten Fehlstellen schon lange bekannt sind, stellen sich auf diesem Gebiet ständig neue Herausforderungen, an denen die eingesetzten Techniken weiterentwickelt werden müssen.

Als wichtiges Beispiel sei hier der fortschreitende Einsatz von hoch- und höherfesten Stählen im Automobilbau genannt, den das Erreichen zweier widersprüchlicher Ziele nötig macht. Zum einen steigen die Anforderungen an die passive Sicherheit immer weiter an, zum anderen sind Gewichtsreduktionen zum Erreichen von Kraftstoff-Verbrauchszielen nötig. Typische Probleme, die hierbei gemeistert werden müssen, betreffen die eingeschränkte Schweißbarkeit von Werkstoffen und insbesondere die Rissbildung an Schweißnähten. Um die Qualität schnell und sicher beurteilen zu können werden neben der klassischen zerstörenden Werkstoffprüfung Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung benötigt.

Ein wichtiger Trend ist hierbei die Integration der Prüfung in automatisierte Fertigungs-

prozesse, um so eine lückenlose Qualitätssicherung zu erhalten. Hierzu eignen sich insbesondere berührungslose bildgebende Verfahren gut, da sie eine hohe Prüfgeschwindigkeit ohne mechanischen Verschleiß gewährleisten. Die aktive Thermografie vereint diese Vorteile.

Obwohl diese Technik schon seit den 1950er Jahren bekannt ist, erfährt sie in letzter Zeit besonders durch den rapiden Preisverfall im Bereich der Infrarotkamera-Technik große Aufmerksamkeit [2]. Die klassische und meistgenutzte Anwendung der aktiven Thermografie besteht in der Ortung von flächig parallel zur Oberfläche ausgedehnten oberflächennahen Fehlstellen wie beispielsweise Delaminationen. Für diesen Anwendungsfall stehen robuste und gut erprobte Auswertungsalgorithmen zur Verfügung [3, 4]. Trotzdem besteht auf dem Gebiet der aktiven Thermografie noch immer ein großer Entwicklungsbedarf, wie sich z.B. an der im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüftechniken nur rudimentär vorhandenen Normung zeigt. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn Prüfprobleme gelöst werden sollen, die nicht der klassischen Anwendung entsprechen. Hierzu zählen z.B. sämtliche nicht bildgebende Auswertungsmethoden sowie Verfahren zur Detektion von rechtwinklig zur Oberfläche orientierten Fehlstellen. Obwohl für viele Anwendungsfälle die prinzipielle Durchführbarkeit aufgrund physikalischer Überlegungen eindeutig gegeben ist, fehlen schlicht geeignete Algorithmen zur Auswertung der Messdaten, sodass die Thermografie in diesen Fällen meist nicht zum Einsatz kommt.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Entwicklung nichtklassischer thermografischer Prüfverfahren zur Beherrschung zweier typischer Prüfprobleme im Bereich der Füge-technik. Zum einen wird eine Methode zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Widerstandspunktschweißverbindungen erarbeitet, die auf einer Blitzlichtanregung in Transmissionsanordnung basiert. Deren Tauglichkeit kann durch den Vergleich mit zerstörender Prüfung statistisch abgesichert gezeigt werden. Zum anderen wird ein Verfahren zur Rissdetektion mittels laserangeregter Thermografie entwickelt. Hierüber hinausgehend wird auf der Grundlage von Experimenten und Finite-Elemente-Simulationen die geometrische Charakterisierung von Rissen untersucht und so die Grenzen des Verfahrens aufgezeigt. Die quantitativen Auswertungsalgorithmen für beide Themenkomplexe basieren auf der Analyse von räumlich und zeitlich integralen Messgrößen, die vom thermischen Widerstand abhängig sind.



## Kapitel 2

# Stand der Technik

In diesem Kapitel soll eine Übersicht über den Stand der Technik sowie die für diese Arbeit relevanten theoretischen Grundlagen gegeben werden. Nach einer kurzen Einführung in die für die aktive Thermografie grundlegende Theorie der Wärmestrahlung und -leitung sowie der Varianzanalyse im Abschnitt 2.1, folgt im Abschnitt 2.2 eine Darstellung üblicher Anwendungsformen und Auswertungsmethoden der aktiven Thermografie. Im Abschnitt 2.3, Fügeverbindungen, wird mit Blick auf den Fokus dieser Arbeit hauptsächlich auf das Widerstandspunktschweißen sowie auf die Rissproblematik eingegangen.

### 2.1 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Abschnitt wird eine kurze Zusammenfassung der zum Verständnis dieser Arbeit notwendigen theoretischen Grundlagen geliefert. Zuerst wird in den Unterabschnitten 2.1.1 und 2.1.2 die Wärmestrahlung als Basis jeder radiometrischen Temperaturmessung diskutiert. Danach werden im Unterabschnitt 2.1.3 die Grundlagen der Wärmeleitung genannt. Der Unterabschnitt 2.1.4 beschäftigt sich dann mit der für die statistische Bewertung von Reihenuntersuchungen wichtigen Varianzanalyse.

#### 2.1.1 Wärmestrahlung

Unter Wärmestrahlung oder thermischer Strahlung versteht man die von jedem Körper emittierte elektromagnetische Strahlung. Die mikroskopische physikalische Ursache liegt in der statistischen Bewegung – also der Temperatur – der ihn bildenden geladenen Elementarteilchen. Während Gase ein charakteristisches Linienspektrum zeigen, strahlen Festkörper und Flüssigkeiten mit einer kontinuierlichen Frequenzverteilung, die von der Temperatur abhängig ist.

Zuerst soll hier der Begriff des „schwarzen Körpers“ eingeführt werden. Unter einem schwarzen Körper versteht man einen idealisierten Körper, der jegliche auf ihn treffende

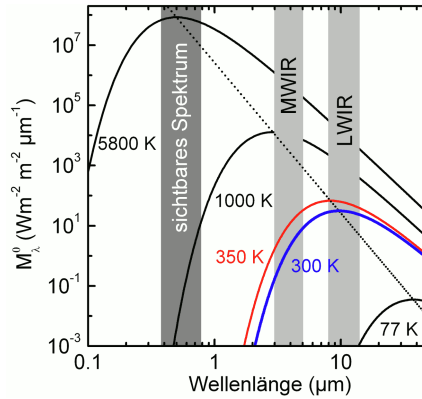


Abbildung 2.1: Spektrale Emission eines schwarzen Körpers. Dargestellt ist die spezifische Abstrahlung  $M_x^0(\nu, T)$ , wie sie in Gleichung 2.2 definiert ist. Die gestrichelte Linie zeigt das jeweilige Maximum an. Neben dem sichtbaren Spektralbereich sind zusätzlich die für die Thermografie wichtigen Bereiche des Mittelwellen-Infrarots (MWIR) und des Langwellen-Infrarots (LWIR) eingezeichnet. Für die Thermografie ist vorrangig nicht die Verschiebung des Maximums, sondern die Änderung der absoluten Ausstrahlung im betrachteten Spektralbereich von Bedeutung.

Strahlung absorbiert. Anders ausgedrückt liegt sein Absorptionsgrad bei  $\alpha = 1$ . Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz besagt nun, dass sich im thermischen Gleichgewicht Absorptionsgrad  $\alpha$  und Emissionsgrad  $\epsilon$  entsprechen. Dieses bereits 1859 auf rein thermodynamischer Grundlage anhand der Betrachtung eines Hohlraumstrahlers hergeleitete Gesetz bildete die Grundlage für die weitere Untersuchung der Wärmestrahlung und somit auch für Plancks Quantenhypothese [5].

Die gesamte von einem schwarzen Körper emittierte Leistung beschreibt das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Es wurde 1879 von Josef Stefan experimentell entdeckt und 1884 von Ludwig Boltzmann aus den Gesetzen der Thermodynamik abgeleitet [6]. Für die Strahlungsleistung  $P$  eines schwarzen Körpers mit der Fläche  $A$  ergibt sich in Abhängigkeit von der absoluten Temperatur  $T$

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4, \tag{2.1}$$

wobei  $\sigma$  als Stefan-Boltzmann-Konstante bezeichnet wird. Die spektrale Verteilung der Schwarzkörperstrahlung lässt sich über das Plancksche Strahlungsgesetz beschreiben. Es wurde 1900 durch Max Planck hergeleitet. Hierzu erwies sich die klassische Physik als unzureichend, sodass ein neues Postulat eingeführt werden musste, nach dem der elektromagnetische Energieaustausch nicht kontinuierlich, sondern in Form von Quanten – den sogenannten Photonen – erfolgt [7]. Es gilt daher als erste Arbeit der Quantenphysik.

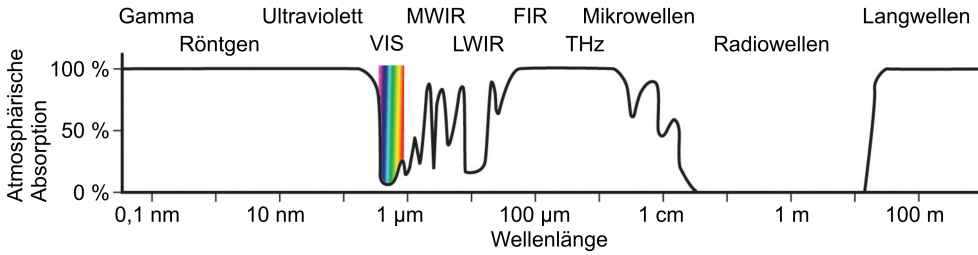


Abbildung 2.2: Spektrale atmosphärische Absorption. Lediglich für den sichtbaren Bereich, Teile des Infraroten sowie für Radiowellen mit einer Wellenlänge unter 10 m ist die Atmosphäre durchlässig (Quelle für den spektralen Verlauf: NASA).

Für die spezifische Abstrahlung  $M_\nu^\circ(\nu, T)$  eines schwarzen Körpers gilt in der Wellenlängendarstellung:

$$M_\lambda^\circ(\lambda, T) dA d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} dA d\lambda. \quad (2.2)$$

Hierbei ist  $M_\lambda^\circ(\lambda, T) dA d\lambda$  die Strahlungsleistung, die vom Flächenelement  $dA$  im Wellenlängenbereich zwischen  $\lambda$  und  $\lambda + d\lambda$  abgestrahlt wird,  $h$  bezeichnet das Plancksche Wirkungsquantum,  $k$  die Boltzmannkonstante und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit. Aus dieser Abhängigkeit lässt sich die Stefan-Boltzmann-Konstante zu  $\sigma = 2\pi^5 k_B^4 \cdot (15h^3 c^2)^{-1}$  bestimmen. In Abbildung 2.1 ist  $M_\lambda^\circ$  für unterschiedliche Temperaturen in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt. Zu beachten ist hierbei, dass es mit steigender Temperatur zu einer Verschiebung des Maximums hin zu kürzeren Wellenlängen kommt (gestrichelte Linie). Für eine radiometrische Temperaturmessung ist aber die  $T^4$ -Abhängigkeit der gesamten Strahlungsleistung von weit größerer Bedeutung. Denn über diese Abhängigkeit lässt sich auch aus einer spektral nicht aufgelösten Messung auf die Temperatur schließen.

Wichtig für die technische Anwendung ist auch die wellenlängenabhängige Absorption der elektromagnetischen Strahlung durch die Atmosphäre (siehe Abbildung 2.2). Die Wellenlängenbereiche, in denen die Atmosphäre nicht oder nur kaum absorbiert, werden als atmosphärische Fenster bezeichnet. Das prominenteste Beispiel hierfür ist der sichtbare Bereich (VIS) von 400 bis 700 nm. Für radiometrische Temperaturmessungen wichtig sind die optischen Fenster im MWIR<sup>1</sup>-Bereich von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  und im LWIR<sup>2</sup>-Bereich von 8 bis 14  $\mu\text{m}$  [8]. Bei Schuster und Kolobrodov finden sich folgende Angaben zur mittleren Schwächung bei einer Übertragungsstrecke von 1 km unter Normalbedingungen auf Normalnull [2]: Im LWIR-Bereich beträgt sie ca. 11% und im MWIR-Bereich ca. 17%, wobei jeweils im Bereich von 2,2 bis 2,6  $\mu\text{m}$ , von 3,0 bis 3,9  $\mu\text{m}$  und von 5,4 bis 9,0  $\mu\text{m}$  keine Schwächung

<sup>1</sup>Von engl. *mid-wavelength infrared*.

<sup>2</sup>Von engl. *long-wavelength infrared*.

festgestellt werden kann. Bei  $2,7 \mu\text{m}$  gehen hingegen 58% der Intensität verloren. Da die Auswirkungen auf Laborexperimente aufgrund der vergleichsweise geringen Schwächung nicht praxisrelevant sind, sei für eine genaue Betrachtung, insbesondere in Abhängigkeit der Haupteinflussgrößen Wasser- und  $\text{CO}_2$ -Gehalt sowie Druck und Temperatur, auf die Literatur verwiesen.

### 2.1.2 Das Emissivitätsproblem

Über das Plancksche Strahlungsgesetz (siehe Gleichung 2.2) lässt sich nun ein Strahlungsthermometer (Pyrometer) realisieren. Aus der von einem in einem gewissen Wellenlängenbereich empfindlichen Detektor registrierten Intensität lässt sich auf die vom untersuchten Körper abgestrahlte Leistung und damit auf seine Temperatur schließen. Jedoch sind reale Körper nie komplett schwarz, d.h. sie haben einen von 1 verschiedenen Absorptions- und damit auch Emissionsgrad. In voller Allgemeinheit ist der gerichtete spektrale Emissionsgrad  $\epsilon_\lambda(\lambda, T, \beta, \phi)$  von Temperatur ( $T$ ), Wellenlänge ( $\lambda$ ) und Winkel ( $\beta, \phi$ ) abhängig. Lässt man die Winkelabhängigkeit außer Acht, spricht man vom hemisphärischen spektralen Emissionsgrad  $\epsilon_\lambda(\lambda, T)$ . In der Praxis nimmt man in der Regel einen konstanten Emissionsgrad  $\epsilon$  an, der häufig auch als Emissivität bezeichnet wird [2]:

$$\epsilon = \text{const} \approx \epsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{M_\lambda(\lambda, T)}{M_\lambda^0(\lambda, T)}. \quad (2.3)$$

Jedoch gilt diese Näherung nur für einen eingeschränkten Temperaturbereich und muss in Abhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit des Detektors bestimmt werden. Man spricht dann von einem grauen Körper. Obwohl diese Annahme zwar nur in den seltensten Fällen der Realität entspricht, stellt sie insbesondere bei geringen Temperaturänderungen eine sehr gute Näherung dar, weil der gewichtete Mittelwert über den Empfindlichkeitsbereich des verwendeten Detektors dann nur vernachlässigbar variiert.

Typische Emissionsgrade für Nichtmetalle in dem für die Temperaturmessung relevanten Spektralbereich bei Zimmertemperatur liegen im Bereich  $\epsilon > 0,9$ . Bei Metallen sind sie stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig und reichen von  $\epsilon \ll 0,01$  bei poliertem Gold bis zu  $\epsilon > 0,7$ , z.B. bei oxidiertem Kupfer. Poliertes Eisen kann Emissionsgrade von  $\epsilon < 0,04$  erreichen, sandgestrahltes Eisen hingegen liegt bei  $\epsilon = 0,6$ .

Bei einem grauen Körper wird nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz nur ein Teil der einfallenden Strahlung  $\alpha = \epsilon$  absorbiert, der restliche Anteil wird reflektiert. Dieser Anteil wird mit dem Reflexionsgrad  $\rho$  bezeichnet. Für opake Körper gilt:

$$\rho = 1 - \alpha = 1 - \epsilon. \quad (2.4)$$

Also muss für eine Temperaturmessung an einem grauen Körper die Umgebungstemperatur bekannt sein. Dies ist insbesondere bei glatten metallischen Oberflächen problematisch, da es hier zu gerichteten Reflexionen kommt. Hat ein Körper eine bekannte, von der

Umgebungstemperatur verschiedene Temperatur, lässt sich über eine Messung der Strahlungsintensität mit einem kalibrierten Radiometer der Emissionsgrad bestimmen. In der Praxis wird die Winkelabhängigkeit in der Regel vernachlässigt.

### 2.1.3 Wärmeleitung

In diesem Abschnitt sollen die Grundlagen der Wärmeleitung in Anlehnung an die Lehrbücher von Chapman und Carslaw kurz dargestellt werden [9, 10].

#### Fouriersches Gesetz

Am anschaulichsten lässt sich die mathematische Darstellung der Wärmeleitung am Beispiel eines Festkörpers der Dicke  $d$  mit zwei parallelen Außenwänden der Fläche  $A$  mit den zeitlich konstanten Temperaturen  $T_{W,1}$  und  $T_{W,2}$  zeigen. Für diesen Fall lässt sich das Fouriersche Gesetz<sup>3</sup> für den sich ergebenden Wärmestrom  $\dot{Q}$  folgendermaßen formulieren [9]:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} A \cdot (T_{W,1} - T_{W,2}) = \frac{\lambda}{d} A \Delta T. \quad (2.5)$$

Hierbei bezeichnet  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit. Sie wird häufig auch mit  $k$  bezeichnet und hat die Einheit  $[\lambda] = 1\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Analog zum elektrischen Widerstand im Ohmschen Gesetz lassen sich ein spezifischer Wärmewiderstand

$$R_\lambda = \frac{1}{\lambda} = \frac{A \Delta T}{\dot{Q} d} \quad \text{mit der Einheit} \quad [R_\lambda] = 1 \frac{\text{K} \cdot \text{m}}{\text{W}} \quad (2.6)$$

und ein absoluter Wärmewiderstand

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad \text{mit der Einheit} \quad [R_{th}] = 1 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (2.7)$$

definieren.

Es besteht hierbei nicht nur eine Analogie zu elektrischem Strom und elektrischer Spannung, sondern zu vielfältigen physikalischen Größen von thermodynamischen Systemen außerhalb des Gleichgewichts. Allgemein sind solche Zusammenhänge als Onsagersche Beziehungen<sup>4</sup> bekannt. Diese linearen Gesetze lassen sich in der Form

$$\mathbf{J}_k = L_k \mathbf{X}_k \quad (2.8)$$

schreiben, wobei  $\mathbf{J}_k$  den Fluss einer beliebigen physikalischen Größe  $k$ ,  $L_k$  den zugehörigen Transportkoeffizienten und  $\mathbf{X}_k$  die korrespondierende, antreibende Kraft zu  $k$  bezeichnen, die stets als Gradient einer skalaren Größe angegeben werden kann.

So lässt sich das Fouriersche Gesetz in einer kontinuierlichen Form schreiben:

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T. \quad (2.9)$$

<sup>3</sup>1822, nach Jean Baptiste Joseph Fourier.

<sup>4</sup>Nach Lars Onsager, Nobelpreis für Chemie 1968.

Hierin bezeichnet  $\vec{q}$  den gerichteten Wärmefluss. Für den allgemeinen Fall anisotroper Medien kann  $\lambda$  tensorwertig sein.

### Allgemeine Wärmeleitungsgleichung

Für den zeitabhängigen Fall lautet die allgemeine Wärmeleitungsgleichung

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q. \quad (2.10)$$

Dabei bezeichnet  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität und  $\rho$  die Massendichte. Häufig wird diese Gleichung in der Form

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q}{\rho c_p} \quad (2.11)$$

geschrieben. Die Größe

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.12)$$

wird als „thermische Diffusivität“ oder „Temperaturleitwert“ bezeichnet. Sie ist ein Maß dafür, wie schnell sich Temperaturunterschiede im Körper ausgleichen.

#### 2.1.4 Varianzanalyse

Unter dem Begriff Varianzanalyse versteht man eine Gruppe von statistischen Verfahren, mit denen die Variabilität von Erwartungswerten untersucht wird. Ziel der Analyse ist es, die hinter den Daten vermuteten Gesetzmäßigkeiten bewerten zu können. Die Varianz der einzelnen Zielvariablen wird dabei durch den Einfluss von sog. Faktoren (Einflussvariablen) erklärt. Die grundlegenden Begrifflichkeiten sind wie folgt definiert:

- Einflussvariablen oder Faktoren sind Parameter, die den Wert der Zielvariablen bestimmen. Sie können endlich viele verschiedene Werte annehmen, die man als Stufen oder Faktorstufen bezeichnet.
- Zielvariablen oder abhängige Variablen sind metrische Zufallsvariablen, die im Experiment bestimmt werden.

Man unterscheidet anhand der Anzahl von Zielvariablen zwei Arten der Varianzanalyse:

- Univariate Varianzanalyse oder ANOVA<sup>5</sup>: hier liegt nur eine Zielvariable vor.
- Multivariate Varianzanalyse oder MANOVA<sup>6</sup>: wenn mehrere Zielvariablen vorliegen.

---

<sup>5</sup>Von engl. *analysis of variance*.

<sup>6</sup>Von engl. *multivariate analysis of variance*.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist, dass die Streuung der Zielvariablen normalverteilt ist. Jedoch lassen sich in gewissen Grenzen auch bei nicht normalverteilten Werten verwertbare Ergebnisse erzielen.

Für die weitere Betrachtung müssen die unterschiedlichen Einflüsse auf die Zielvariable benannt werden. Hier soll nur der einfachere Fall der univariaten Varianzanalyse behandelt werden. Als Modell ergibt sich in diesem Fall in der sogenannten Effektdarstellung folgender Ausdruck:

$$x_{ij} = \mu + \alpha_j + \epsilon_{ij} \quad \text{mit } j = 1 \dots k \text{ und } i = 1 \dots n_j . \quad (2.13)$$

Dabei bezeichnet  $x_{ij}$  den jeweiligen Wert der Zielvariable  $X$ , der sich aus dem Mittelwert aller Stichproben  $\mu$ , dem Einfluss eines  $k$ -stufigen Faktors  $\alpha_i$  und einem normalverteilten Störwert  $\epsilon_{ij}$  zusammensetzt.

Ein Maß für die Streuung von  $X$  ist die Varianz, die sich hier zu

$$\text{Var}(X) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \mu)^2 = \frac{1}{n} \text{QS}_{\text{ges}} \quad (2.14)$$

ergibt, wobei  $n$  die gesamte Anzahl der Stichproben bezeichnet und der Ausdruck QS für Quadratsumme steht. Definiert man nun folgende Mittelwerte:

$$\bar{x} = \mu = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij} \quad \text{und} \quad \bar{x}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}, \quad (2.15)$$

dann kann  $\text{QS}_{\text{ges}}$  nach folgender Vorschrift zerlegt werden:

$$\text{QS}_{\text{ges}} = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (2.16)$$

$$= \underbrace{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}_{=: \text{QS}_{\text{inn}}} + \underbrace{\sum_{j=1}^k n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2}_{=: \text{QS}_{\text{zw}}} . \quad (2.17)$$

Es lässt sich also die gesamte Varianz in einen Anteil der Varianz zwischen den einzelnen Faktorstufen bzw. Gruppen  $\text{QS}_{\text{zw}}$  und einen Anteil der Varianz innerhalb der Gruppen  $\text{QS}_{\text{inn}}$  zerlegen. Dies stellt das Grundprinzip der Varianzanalyse dar: Die Trennung der systematischen von den zufälligen Einflüssen auf die Stichprobe. Die hier gezeigte Zerlegung der Quadratsummen lässt sich bei der multivariaten Varianzanalyse analog für mehrere Einflussgrößen durchführen.

Das übliche Vorgehen besteht nun darin, die Nullhypothese  $H_0$  zu testen. Diese besagt, dass kein systematischer Einfluss des Faktors auf die Stichproben vorliegt, dass also  $\alpha_j = 0$  für alle  $j$  gilt. Unter dieser Voraussetzung ist der Quotient

$$F = \frac{QS_{zw}/(k-1)}{QS_{inn}/(n-1)} \quad (2.18)$$

$F_{k-1, n-k}$ -verteilt<sup>7</sup>, wobei  $k-1$  und  $n-k$  die Freiheitsgrade bezeichnen. Durch diesen Vergleich lässt sich die Wahrscheinlichkeit bestimmen, mit der die Nullhypothese gilt. Für eine detaillierte Herleitung und Beschreibung dieser statistischen Standardvorgehensweise sei auf einschlägige Lehrbücher, wie z.B. die von Box und Navidi [11, 12], verwiesen.

## 2.2 Thermografie

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der aktiven Thermografie beschrieben und zur besseren Einordnung eine kurze Übersicht über andere Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) gegeben.

Ziel der zerstörungsfreien Prüfung, oder genauer der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, ist es, die Eigenschaften des getesteten Werkstücks zu beurteilen, ohne dieses irreversibel zu verändern. Der eigentliche Zweck der Prüfung ist dabei meist die Erkennung von Ungängen. Unter Ungängen versteht man in diesem Kontext Diskontinuitäten oder Fehlstellen, wie beispielsweise Risse, Lunken, Poren, Dopplungen, Einschlüsse oder Bindefehler. Hierzu werden eine Vielzahl physikalischer Phänomene ausgenutzt, wobei man die unterschiedlichen Verfahren üblicherweise nach ihrem Anwendungsbereich in Volumen- und Oberflächenverfahren einteilt (z.B. nach DIN EN 473, die durch die internationale Norm DIN EN ISO 9712 abgelöst werden soll [13, 14]).

Eine wichtige Quelle für die Normung auf dem Gebiet der ZfP stellt der Normenausschuss Materialprüfung<sup>8</sup> im DIN dar. Durch die fortschreitende Globalisierung sind die wirtschaftlichen Akteure in vielen Fällen bestrebt, auf Basis multi- bzw. internationaler Normen und Standards zu arbeiten. Auf europäischer und internationaler Ebene übernimmt die Normung das CEN<sup>9</sup> bzw. das ISO<sup>10</sup>. Die internationalen Normen werden dabei in der Regel aus nationalen Normen entwickelt. In der Nomenklatur werden die Kürzel der verabschiedenden Gremien der Normennummer vorangestellt, beispielsweise stellt die DIN EN ISO 9000 (Qualitätsmanagement) sowohl eine deutsche (DIN), eine europäische (EN) als auch eine internationale (ISO) Norm dar. Zudem existieren zahlreiche sogenannte Industriestandards anderer Gremien. Große Bedeutung haben hier vor allem die Fachverbände VDI<sup>11</sup>

---

<sup>7</sup>Nach der F-Verteilung oder Fischer-Verteilung.

<sup>8</sup>NA 062, [www.nmp.din.de](http://www.nmp.din.de).

<sup>9</sup>Frz.: *Comité Européen de Normalisation*, dt. Europäisches Komitee für Normung.

<sup>10</sup>Internationale Organisation für Normung, ISO leitet sich von griechisch *isos* (*ισος*) für „gleich“ ab.

<sup>11</sup>Verein Deutscher Ingenieure.



und VDE<sup>12</sup>, deren Veröffentlichungen, z.B. in Form von Merkblättern oder Berichten, häufig normativen Charakter entfalten.

Unter Thermografie versteht man allgemein ein bildgebendes Verfahren, welches Infrarot-Strahlung (folgend als IR-Strahlung bezeichnet) sichtbar macht. Aus dieser lässt sich unter bestimmten Voraussetzungen auf die Temperatur schließen (siehe Abschnitt 2.1.1). Im Kontext der zerstörungsfreien Prüfung versteht man unter Thermografie immer die Prüfung von Bauteilen mittels ortsaufgelöster Messung der von ihnen ausgehenden IR-Strahlung. Nach DIN EN 473 zählt sie zu den Oberflächenverfahren, da in der Regel oberflächennahe – aber nicht nur oberflächliche – Defekte nachgewiesen werden [13]. Diese Zuordnung ist aber nicht streng zu verstehen. So kann „oberflächennah“ sowohl für Tiefen von einigen zehn Mikrometern bei der Bestimmung der Dicke von Lackschichten [15], als auch bis zu zehn Zentimetern bei Anwendungen im Bauwesen stehen [16]. Außerdem werden z.B. bei der thermografischen Prüfung von Punktschweißverbindungen thermische Eigenschaften in der geometrischen Mitte der Probe untersucht, sodass hier nicht mehr von Oberflächeneigenschaften gesprochen werden kann [17]. Übersichtliche und fundierte Darstellungen der regelmäßig angewendeten Techniken und ihrer Vorteile und Grenzen finden sich bei Mal-dague und Almond [3, 4, 18].

### 2.2.1 Normung auf dem Gebiet der Thermografie

Regelungen zur zerstörungsfreien Prüfung mittels Thermografie finden sich u.a. in folgenden Normen und Standards:

- DIN 54162, Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal für die thermografische Prüfung – Allgemeine und spezielle Grundlagen für Stufe 1, 2 und 3 [19].
- DIN 54190-1, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen [20].
- DIN 54190-2, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 2: Geräte [21].
- DIN 54190-3, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 3: Begriffe [22].
- DIN 54191, Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung elektrischer Anlagen [23].
- E DIN 54192, Zerstörungsfreie Prüfung – Aktive Thermografie [24].
- DIN EN 13187, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen - Infrarot-Verfahren [25].

---

<sup>12</sup>Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik.

- ISO 6781, Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method [26].
- ISO 18434-1, Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography – Part 1: General procedures [27].
- ISO 18436-7, Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for qualification and assessment of personnel – Part 7: Thermography [28].

Wichtig für die Thermografie sind außerdem folgende VDI/VDE-Richtlinien:

- VDI 2878, Anwendung der Thermografie zur Diagnose in der Instandhaltung – Allgemeine Anforderungen sowie Hinweise für Entscheidungsträger und Verantwortliche, Blatt 1 [29].
- VDI/VDE 3511, Blatt 4, Technische Temperaturmessungen – Strahlungsthermometrie [30].

## 2.2.2 Einordnung der thermografischen Prüftechniken

Die verschiedenen Techniken der Thermografie lassen sich anhand unterschiedlicher Kriterien einordnen. Grundlegend ist zunächst die Unterscheidung zwischen

**passiver Thermografie** und

**aktiver Thermografie.**

Bei ersterer wird nur die bestehende Temperaturverteilung eines Objektes ortsaufgelöst gemessen. So kann z.B. die Wärmedämmung eines Hauses unter bestimmten Randbedingungen anhand der Wandtemperatur beurteilt werden [26, 31]. Bei der aktiven Thermografie – auch als „thermografische Werkstoffprüfung“ bezeichnet – wird das zu untersuchende Werkstück aktiv erwärmt oder abgekühlt, sodass es zu einem Wärmefluss in dem untersuchten Bauteil kommt, auf den sich durch Messung der Wärmestrahlung schließen lässt [24]. Auf diese Weise können die thermischen Eigenschaften bestimmt und dadurch auf Ungängen geschlossen werden. Als Beispiel sei hier der erhöhte thermische Widerstand senkrecht zu einer Delamination genannt. Die Einteilung in aktive und passive Thermografie ist nicht immer eindeutig möglich. Einen Grenzfall stellt z.B. die Beobachtung der Abkühlungsphase eines gleichmäßig erwärmten Werkstücks dar [32]. Als Wärmequelle kann auch die Prozesswärme selbst genutzt werden, sodass die Wärmeenergie nicht zum Zwecke der thermografischen Prüfung eingebracht wird. In dieser Arbeit wird im Folgenden mit Thermografie stets die aktive Thermografie bezeichnet. In Abbildung 2.3 ist eine typische Versuchsanordnung skizziert.

Nach DIN 54190-1 wird zudem zwischen

**qualitativer Thermografie** und

**quantitativer Thermografie**

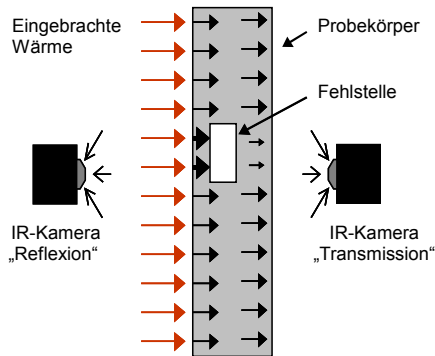


Abbildung 2.3: Prinzip der aktiven Thermografie: Die beobachtete Probe wird aktiv erwärmt oder gekühlt, die resultierende Oberflächentemperatur wird orts- und zeitaufgelöst gemessen. Aus dieser lässt sich auf den Wärmefluss innerhalb der Probe schließen und so Aussagen zu den thermischen Eigenschaften und eventuell vorhandenen Fehlstellen und Grenzflächen treffen. Im gezeigten Beispiel soll die Fehlstelle eine geringere Wärmeleitfähigkeit als das umgebende Material haben, z.B. Luft in Stahl. So ist die Temperatur auf der Seite der Anregung vor der Fehlstelle im Vergleich zur Umgebung durch die eingeschränkte Wärmeleitung erhöht, auf der Rückseite ist sie niedriger.

unterschieden [20]. Dabei beziehen sich diese Begrifflichkeiten ausschließlich darauf, ob eine Ermittlung der absoluten Oberflächentemperatur (quantitativ) vorgenommen wird oder gemessene IR-Strahlungsintensitäten miteinander verglichen werden. Dieser Nomenklatur folgend ist also die quantitative Bestimmung von Fehlergrößen oder -lagen prinzipiell auch mittels qualitativer Thermografie möglich. Z.B. lässt sich die Tiefe einer Fehlstelle durch eine zeitliche Auswertung der Änderung der Strahlungsintensität auch ohne Kenntnis der absoluten Temperatur bestimmen [33].

Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Durchführung einer aktiven thermografischen Prüfung können nun wiederum nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden. Häufig wird nach der Art der thermischen Anregungsquellen unterschieden. Üblich sind hier [24]:

**Optische Anregung:** Bei der optisch angeregten Thermografie wird elektromagnetische Strahlung im und um den sichtbaren Bereich zum Einbringen der nötigen Wärmeenergie genutzt. Als einfachste und kostengünstigste Möglichkeit bieten sich hier handelsübliche Halogenstrahler an [34]. Mit Blitzlampen lassen sich sehr kurze Pulse erzeugen, die sich gut semi-analytisch auswerten lassen [35]. Als sogenannte kalte Strahlungsquellen, von denen nahezu keine Wärmestrahlung ausgeht, kommen außerdem LEDs<sup>13</sup> und Laser in Frage [36]. Es ist auch möglich, die Sonne als natürliche Anregungsquelle zu nutzen. Ein spektakuläres Beispiel für diesen Anwendungsfall ist die Überprüfung der Hitzeschildkacheln des Space Shuttles im Orbit mit einer speziell an-

<sup>13</sup>Von engl. *light emitting diode*, Leuchtdiode.

gepassten IR-Kamera [37]. Dabei führte ein Astronaut im Rahmen eines Außenbord-einsatzes die Prüfung durch [38].

**Heißluftanregung:** Hier wird die Wärme konvektiv übertragen. Dieses Verfahren bietet sich z.B. bei bereits im Werkstück vorhandenen Kühlkanälen an [39]. Eine ähnliche Technik, bei der die Temperatur einer dünnen, meist metallischen Folie orts aufgelöst gemessen wird, die sich durch einen Gasstrom anderer Temperatur erwärmt oder abkühlt, nutzt man zum Vermessen von Strömungsverhältnissen [40, 41]. Dabei werden keine Materialparameter bestimmt, es handelt sich also nicht um eine ZfP-Anwendung im engeren Sinne.

**Elektrische Anregung:** Diese wird vor allem für elektronische Schaltungen und Bauteile eingesetzt, als Wärmequelle dient die ohnehin vorhandene Verlustleistung im Betrieb (Joulesche Wärme) [42]. Durch eine geeignete Regelung ist eine gezielte Modulation des Wärmeeintrages möglich [43]. Mit Erfolg wurde diese Methode z.B. zur Prüfung von Laserdioden eingesetzt [44].

**Induktionsanregung:** Auch diese Technik nutzt Joulesche Wärme aus. Hier wird mittels einer Spule ein Wirbelstrom in einem elektrisch leitenden Bauteil induziert. Die Stromdichte ist wegen des Skin效ekts an der Oberfläche am größten. Liegen nun Fehlstellen, wie z.B. Risse, in der Oberfläche vor, wird hierdurch der elektrische Widerstand lokal erhöht. Dies hat wiederum eine höhere Stromdichte in den direkt benachbarten ungestörten Bereichen zur Folge, wodurch in unmittelbarer Nähe eines Risses im Vergleich zum homogenen Stromfluss mehr Wärme erzeugt wird [45, 46]. Die Thermografie wird hierbei nur zur Bestimmung der Position der Wärmequelle genutzt. Das Verfahren lässt sich auch anwenden, wenn die zu untersuchende elektrisch leitende Oberfläche unter einer nichtleitenden Beschichtung liegt [47]. Als Anregungsquelle kommen hier meist kommerziell erhältliche Induktions-Erwärmungs-Anlagen zum Einsatz, wie sie z.B. für das Härten von Stahlbauteilen verwendet werden. Typischerweise werden Frequenzbereiche von ca. 30 bis 300 kHz bei Leistungen von mehreren Kilowatt abgedeckt. Die tatsächlich in das Bauteil eingebrachte Leistung ist meist sehr viel geringer und von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Probe, sowie der Geometrie von Probe und Induktor abhängig [48].

**Ultraschallanregung:** Bei dieser Anregungsart wird die Energie mittels Leistungsschall eingebracht. Typischerweise werden Frequenzen zwischen 15 und 25 kHz, seltener auch bis zu 60 kHz zur Anregung genutzt. Der Wärmeeintrag erfolgt über nichtlineare elastische Effekte [49]. Auch hier wird die Wärme hauptsächlich an vorhandenen Defekten, wie z.B. aneinander reibenden Rissflanken, eingebracht [50]. Die Position der Wärmequelle kann dann wiederum mit einer IR-Kamera ermittelt werden. Bei einer Schallgeschwindigkeit in Stahl von rund 5 km/s [51] ergeben sich Wellenlängen im 10-cm-Bereich, also im Bereich der typischen Abmessungen der untersuchten Maschinenteile. Daher bilden sich oft komplexe stehende Schwingungsmoden aus. Die

genaue Kenntnis der Anregungsmuster ist wichtig, da in den Schwingungsknoten keine Wärme eingebracht wird. Zur genauen Vorhersage der Schwingungsmoden sind FEM<sup>14</sup>-Simulationen notwendig, zur Abschätzung wurden gute Erfolge mit der Betrachtung von Plattenwellen auch für komplexe Geometrien wie z.B. Turbinenschaukeln erzielt [52]. Die eingesetzten Geräte stammen meist aus der Ultraschallschweißtechnik, ihre Leistung liegt im Kilowatt-Bereich. Von Vorteil sind Geräte, die sich über einen weiten Frequenzbereich resonant betreiben lassen. So können gezielt vorteilhafte Schwingungsmoden angeregt werden, sodass sehr viel geringe Leistungen zur Erwärmung des untersuchten Bauteils benötigt werden, da nur eine geringe Blindleistung abfällt [52].

Bei den ersten beiden Techniken wird die Wärme direkt an der Oberfläche eingebracht – auch bei der konvektiven Anregung über Kühlkanäle wird die Wärme an der inneren Oberfläche der Kühlkanäle übertragen. Eventuell vorhandene Fehlstellen können allein durch ihre Einflüsse auf die thermischen Eigenschaften erkannt werden. Sie lassen sich also auf alle im relevanten IR-Bereich opaken Materialien anwenden. Bei den letzten beiden werden hingegen andere physikalische Effekte ausgenutzt, die einen erhöhten Wärmeeintrag an der Fehlstelle bedingen, sodass nur noch die Position der Wärmequelle thermografisch bestimmt werden muss. Bei der defektselektiven Anregung erfolgt die für die Prüfung relevante Wärmeleitung über eine kürzere Strecke (Defekt-Oberfläche) als bei der Oberflächenanregung (Oberfläche-Defekt-Oberfläche, i.d.R. also doppelt so lang), was eine bessere Ortsauflösung zur Folge hat. Diese Unterscheidung lässt sich zu einer weiteren Einteilung erweitern, die hier gemeinsam mit den Vor- und Nachteilen der einzelnen Techniken genannt werden soll:

**Flächige Anregung**, z.B. mit Halogen- oder Blitzlampen: Die am häufigsten eingesetzte Form der Thermografie ist schnell und kostengünstig. Es können jedoch nur parallel zur Oberfläche ausgedehnte Änderungen der Materialparameter vermessen werden, da der Wärmefluss aus Symmetriegründen ausschließlich senkrecht zu dieser verläuft. Die Ausdehnung der Fehlstellen sollte dabei nach allgemein anerkannten Erfahrungswerten größer als deren Überdeckung sein, damit sie detektierbar sind [4]. Dies trifft z.B. auf Delaminationen parallel zur Oberfläche in Faserverbundwerkstoffen zu. Für dieses Prüfproblem kommt die aktive Thermografie z.B. in der Luftfahrtindustrie regelmäßig zum Einsatz [53, 54]. Da diese Methode nur auf thermischen Effekten beruht, können alle im Infraroten hinreichend opaken Festkörper untersucht werden.

**Lokale Anregung**, z.B. mittels Laser oder fokussierten Halogenstrahlern: Da die Wärme ausgehend vom Ort der Anregung in allen Richtungen in die untersuchte Probe geleitet wird, können Fehlstellen in jeglicher Orientierung erkannt werden. Jedoch ist die Messung dadurch auch immer räumlich eng begrenzt. Ein größerer Untersuchungsbereich muss also abgerastert werden, wodurch dieses Verfahren langsamer als die flächige Anregung ist. Auch diese Methode beruht rein auf thermischen Effekten.

<sup>14</sup>Finite-Elemente-Methode, numerisches Verfahren zur Lösung partieller Differentialgleichungen, das auf einer Zerlegung des Definitionsgebiets basiert.

**Defektselektive Anregung**, z.B. mittels Induktion oder Leistungsschall: Hier wird nicht der Effekt der veränderten Wärmeleitung zur Erkennung genutzt, sondern die direkt am Defekt bzw. in dessen direkter Umgebung eingetragene Wärme, z.B. durch Veränderungen des elektrischen Widerstandes oder Rissreibung. Diese Methoden unterliegen, abhängig von den untersuchten Materialien, jeweils großen Beschränkungen in der Anwendbarkeit und Nachweisfähigkeit. So ist z.B. bei der Schalleinregung die Vorhersagbarkeit der Signalhöhe meist nicht möglich und Gegenstand aktueller Forschung [55]. Sie lassen sich jedoch, wenn ihr Einsatz möglich ist, maßgeschneidert vor allem zum Nachweis von Rissen mit großem Erfolg nutzen.

Wenn die Anregung an der Oberfläche erfolgt, insbesondere bei flächiger Anregung, wird noch nach der Anordnung von Kamera und Anregungsquelle unterschieden (siehe auch Abbildung 2.3):

**Reflexion:** Anregungsquelle und Kamera befinden sich auf der selben Seite der Probe.

**Transmission:** Anregungsquelle und Kamera befinden sich auf entgegengesetzten Seiten der Probe.

Diese Begriffe haben ihren Ursprung in anderen optischen Verfahren, wie z.B. der Spektroskopie und werden hier verwendet, obwohl nicht die reflektierte oder transmittierte Strahlung der Quelle, sondern die thermische Antwort der untersuchten Probe beobachtet wird.

Weiterhin können die unterschiedlichen Techniken nach dem zeitlichen Verlauf der Anregung eingeteilt werden:

**Lock-in Thermografie:** Die Anregung erfolgt zeitlich moduliert, wobei meist eine sinus- oder rechteckförmige Modulation zum Einsatz kommt [56]. Die verwendete Frequenz muss nach den thermischen Eigenschaften und der erwarteten Defekttiefe gewählt werden [57]. Zur Auswertung kommt dann eine zeitliche Korrelation mit dem Anregungssignal zum Einsatz, bei sinusförmiger Anregung also eine Fourier-Transformation (siehe auch Unterabschnitt 2.2.3). Über die Phasenlage sind Aussagen über Defekttiefen möglich und auch deren Größe kann bestimmt werden [58]. Ein weiteres Vorteil der Auswertung über die Phasenverschiebung ist die weitgehende Unabhängigkeit von inhomogener Anregung und Emissivitätsunterschieden [59]. Zu beachten ist hierbei, dass die Lock-in-Thermografie im Gegensatz zu anderen Lock-in-Techniken in der Regel nicht im eingeschwungenen Zustand durchgeführt wird. Neben der periodischen Temperaturänderung kommt es dadurch zusätzlich zu einer kontinuierlichen Erwärmung.

**Puls bzw. Impuls Thermografie:** Die Anregung erfolgt einmalig. Üblich sind bei der Blitzanregung ein kurzer Puls mit exponentiellem Verlauf oder ein meist längerer Rechteck-Puls bei den anderen Techniken, wie z.B. der Halogenanregung. Die Pulsdauer muss in Abhängigkeit der thermischen Eigenschaften und der erwarteten Defekttiefe gewählt werden [60]. Zur Auswertung kann die Bewertung eines Einzelthermogramms

zum Zeitpunkt des höchsten Kontrasts ausreichen. Aber oft führt auch hier eine Fouriertransformation in der Zeit zu besseren Ergebnissen. Diese Technik wird dann als Puls-Phasen-Thermografie bezeichnet [16, 61].

**Chirps:** Es wurde auch die Verwendung von Anregungsmodulationen mit zeitlich variabler Frequenz, sogenannter Chirps<sup>15</sup>, untersucht. Bei diesen ändert sich die Frequenz mit der Zeit. Das Ziel hierbei ist es, im Vergleich zur Lock-in Thermografie bei geringerem Zeitaufwand eine höhere Tiefenaufösung zu gewährleisten [62, 63].

### 2.2.3 Messdatenauswertung für die aktive Thermografie

Bei der Prüfung mittels aktiver Thermografie fallen als Messdaten Thermogrammsequenzen an. Genauer gesagt sind dies dreidimensionale Datensätze der zeitaufgelösten räumlichen Temperatur- bzw. IR-Intensitätsverteilung auf einem Teilbereich der Oberfläche der untersuchten Probe. Zudem ist die Anfangstemperatur gegeben, wenn sich die Probe zu Beginn der Prüfung im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung befunden hat. Weiterhin sind die Anregung, also die zeitliche und räumliche Verteilung der eingebrachten Energie, und die äußere Geometrie der Probe bekannt. Das Problem, das sich zur Auswertung der Messdaten nun stellt, lässt sich mathematisch als Invertierung der Wärmeleitungsgleichung formulieren. Das Ziel ist es, aus den zugänglichen Daten Aussagen über den Wärmefluss in der gesamten Probe treffen zu können und so nicht direkt zugängliche Materialparameter, wie z.B. die Wärmeleitfähigkeitsverteilung im Inneren der Probe, oder die Geometrie, wie z.B. die einer nicht zugänglichen Rückwand, treffen zu können. Liegt eine analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung vor, lässt sich diese nach den gesuchten Parametern umstellen. Da eine analytische Lösung aber nur für den eindimensionalen Fall oder sehr einfache Geometrien, wie z.B. einen unendlichen langen zylindrischen Stab, bekannt ist, gibt es unterschiedliche Ansätze, dieses Problem zu behandeln.

Unter den physikalisch motivierten Möglichkeiten sei zunächst die iterative Lösung des inversen Problems genannt [4, 64]. Hierzu benötigt man ein Verfahren zur numerischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung, den sogenannten Vorwärtslöser, wie z.B. eine FEM-Software. Die Ergebnisse daraus passt man dann, analog zu einer Ausgleichsrechnung für einen zweidimensionalen Datensatz (ein sog. *fit*), unter Variation der unbekanntenen Größen an die Messdaten an. Eine gute Übersicht über die standardmäßig eingesetzten Methoden zur Inversion, wie der deterministischen (Quasi)-Gauss-Newton-Methoden und der (meta)-heuristischen Methoden, wie z.B. dem *simulated annealing*<sup>16</sup> oder Monte-Carlo-Methoden<sup>17</sup>, gibt das Lehrbuch von Howell *et al.* [65]. In diesem findet sich ein Vergleich unterschiedlicher Methoden am Beispiel einer radiativen Wärmeübertragung, wobei mit dem *simulated annealing* die besten Ergebnisse erzielt werden konnten. In Referenz [66] wird der erfolgreiche Einsatz eines Inversionsverfahrens zur Rekonstruktion der Rückwandgeometrie korrodierter

<sup>15</sup>Von engl. *chirp*: Zwitschern.

<sup>16</sup>Dt.: Simulierte Abkühlung. Es wird ein „thermisches Zittern“ der Parameter simuliert.

<sup>17</sup>Schätzung der Zustandsdichte über stochastische Startwerte.

Rohre beschrieben, welches auf einer FEM-Rechnung als Vorwärtslöser und einer Quasi-Gauss-Newton-Methode zur Optimierung basiert. Mit einem ähnlichen Verfahren konnten auch erste Erfolge bei der Rekonstruktion der Rückwand von PVC-Probekörpern erzielt werden [67]. Allerdings wurden in den genannten, für die ZfP relevanten Publikationen keine Vorteile gegenüber den etablierten, hier im Folgenden beschriebenen Methoden, zur Rückwandrekonstruktion gezeigt.

Die Herangehensweise, mittels einer Inversion der Wärmeleitungsgleichung auf die gesuchten Parameter zu schließen, ist physikalisch motiviert und unterliegt keinen Einschränkungen in Bezug auf die prinzipiell zugänglichen Informationen, da keine Vereinfachungen getroffen werden. Allerdings benötigen diese Ansätze durch ihren iterativen Charakter sehr viel Rechenzeit und sind zudem auf eine sehr gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation, d.h. der Beherrschung sämtlicher Störeinflüsse, angewiesen. Zudem ist das sich für die aktive Thermografie stellende inverse Problem in der Regel unterbestimmt, es ist also keine eindeutige Lösung möglich, was zu Konvergenzproblemen führen kann. Deshalb haben sie bislang keine Bedeutung für die praktische Anwendung in der ZfP. In der Praxis erfolgt die Kontrastbildung meist auf Grundlage einer der im Folgenden beschriebenen Methoden.

### **Thermischer Kontrast**

Es ist möglich, den thermischen Kontrast direkt zur Beurteilung heranzuziehen. Die Grundannahme besteht darin, dass das untersuchte Material homogen bis auf die eventuell enthaltenen Ungängen ist. Zur Auswertung wird das Einzelbild aus der Thermogrammsequenz herangezogen, das die größten räumlichen Temperaturunterschiede aufweist. Sämtliche Inhomogenitäten werden nun als Fehler gewertet. Die Methode wird regelmäßig zum ersten Sichten der Ergebnisse einer thermografischen Prüfung eingesetzt, da hierfür keine weitere Datenverarbeitung nötig ist. Der Zeitpunkt, zu dem der maximale Kontrast, also der maximale Temperatur- bzw. Intensitätsunterschied, auftritt, ist unter anderem von der Tiefenlage der Ungänge abhängig. So können zumindest qualitative Aussagen getroffen werden (z.B. A liegt tiefer als B). Nachteilig ist jedoch, dass Effekte, die durch Immisivitätsunterschiede oder eine inhomogene Anregung hervorgerufen werden, nicht von solchen, die aus den thermischen Eigenschaften der untersuchten Probe resultieren, unterschieden werden können. Trotzdem ist dies die wohl am weitesten verbreitete Methode. Vor allem bei der ZfP im Bauwesen kommt oft keine weitere Datenverarbeitung zum Einsatz, da hier wegen der sehr langsamen Prozesse – die Messzeiten können im Stunden-Bereich liegen [16] – auch auf diese Weise Ungängen oft sicher nachgewiesen werden können.

Der erste Schritt zur Datenauswertung ist das Abziehen eines Nullbildes, also eines Thermogramms, das entweder vor oder direkt nach der Anregung aufgenommen wurde. Oft wird diese Methode dazu genutzt, unterschiedliche Anfangsbedingungen in nullter Näherung zu unterdrücken. Allerdings lässt sich die Kontrastdifferenz auch quantitativ zur Tiefenbestimmung auswerten [3, 4, 18]. Hierauf basiert auch die später beschriebene TSR.



### Fouriertransformationen

Die zeitliche Fouriertransformation<sup>18</sup> der Messdaten kommt häufig sowohl zur Auswertung bei der Lock-In-Thermografie [56], als auch bei pulsformiger Anregung, dann als Puls-Phasen-Thermografie (PPT) bezeichnet [33], zum Einsatz. Die Fouriertransformierte  $\mathcal{F}(T)(x,y,f)$  der Messdaten  $T(x,y,t)$  wird folgendermaßen gebildet:

$$\mathcal{F}(T)(x,y,f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} T(x,y,t') e^{-i2\pi f t'} dt', \quad (2.19)$$

wobei  $f$  die Frequenz bezeichnet. Im Allgemeinen ist  $\mathcal{F}(T)(x,y,f)$  komplexwertig. Aus dieser Größe werden nun die reellwertigen Phasenbilder  $P(x,y,f)$  und Amplitudenbilder  $A(x,y,f)$  berechnet:

$$A(x,y,f) = |\mathcal{F}(T)(x,y,f)| = \sqrt{\Im(\mathcal{F}(T)(x,y,f))^2 + \Re(\mathcal{F}(T)(x,y,f))^2} \quad \text{und} \quad (2.20)$$

$$P(x,y,f) = \arg(\mathcal{F}(T)(x,y,f)) = \arccos\left(\frac{\Re(\mathcal{F}(T)(x,y,f))}{|\mathcal{F}(T)(x,y,f)|}\right). \quad (2.21)$$

Bei der Lock-In-Thermografie werden  $A$  und  $P$  nur zur Anregungsfrequenz gebildet. Bei der PPT werden diese hingegen zu allen Frequenzen gebildet, die aufgrund von Messdauer und Abtastfrequenz möglich sind. Bei der Lock-In-Thermografie sind über die Phasenlage Aussagen über die Tiefe möglich. Modellhaft wird die zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur über eine Reflexion der durch die periodische Anregung erzeugten thermischen Welle an einer Inhomogenität erklärt. Die resultierende Phasenverschiebung der reflektierten Welle hängt nun von den Materialeigenschaften und der Tiefe ab. Allerdings müssen hierzu Messungen mit zwei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen durchgeführt werden, da sonst wegen der Periodizität der Phase keine eindeutige Zuordnung möglich ist. Bei der PPT kann eine Tiefenaussage über die Frequenz des Phasen bzw. Amplitudenbildes mit dem höchsten Kontrast getroffen werden. Neben der Fouriertransformation, also der Korrelation mit harmonischen Funktionen, können auch Korrelationen mit anderen Anregungsverläufen, wie z.B. Rechteckfunktionen oder variablen Frequenzverläufen (sog. *chirps*), zum Einsatz kommen. Eine tiefgehendere Beschreibung dieser Auswertungsmethode findet sich in den einschlägigen Lehrbüchern [3, 4, 18].

### Ausgleichsrechnungen (TSR, TWSR)

Grundlage dieser Verfahren ist die analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung für ein einfaches, in der Regel eindimensionales, Modell. Die Lösungen werden dann an die tatsächlichen Messdaten angepasst. Hierdurch können zum einem quantitative Aussagen getroffen werden, zum anderen wird das in den Messdaten enthaltene Rauschen sehr effektiv unterdrückt.

<sup>18</sup>Nach Jean Baptiste Joseph Fourier, der diese Methode insbesondere zur Lösung der Fourierschen Wärmeleitungsgleichung nutzte [68].

Methoden dieses Typs sind die TSR<sup>19</sup> für pulsformige Anregung, die von Shepard entwickelt und patentiert wurde [69, 70], und die auf dieser Basis in der Gruppe von Almond entwickelte TWSR<sup>20</sup> zur Anwendung in der Lock-In-Thermografie [71]. An der weit verbreiteten TSR soll hier kurz das Vorgehen erklärt werden: Löst man die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung für den halbunendlichen Körper, so ergibt sich für die Änderung der Oberflächentemperatur  $\Delta T$  nach einer pulsformigen Anregung zum Zeitpunkt  $t = 0$  mit der Energie  $Q$ :

$$\Delta T(t) = \frac{Q}{e\sqrt{\pi t}}, \quad (2.22)$$

wobei  $e = \sqrt{\lambda \rho c}$  die thermische Effusivität, berechnet aus der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der Dichte  $\rho$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c$ , bezeichnet [10]. Logarithmiert man diese Gleichung, so erhält man eine Geradengleichung:

$$\ln(\Delta T(t)) = \ln\left(\frac{Q}{e}\right) - \frac{1}{2} \ln(\pi t). \quad (2.23)$$

Für mehrschichtige Systeme nimmt man nun an, dass zu verschiedenen Zeitpunkten verschiedene Übergänge zu halbunendlichen Körpern das thermische Verhalten bestimmen. Daher setzt man für das zeitliche Verhalten eine Reihe

$$\ln T = \sum_{n=0}^N a_n (\ln t)^n \quad (2.24)$$

an, die pixelweise an den Messdatensatz angepasst wird. Von dieser Reihe werden dann die erste und die zweite Ableitung analytisch gebildet. Aus den Zeitpunkten, an denen die zweite Ableitung lokale Extrema zeigt,  $T(t)$  also abknickt, lassen sich Aussagen über die Tiefenlage von Ungängen bzw. Schichtgrenzen treffen. Der große Vorteil dieser Methode im Vergleich zur direkten Bildung der zweiten Ableitung liegt in der guten Rauschunterdrückung. Zudem kann so der Bedarf an Speicherplatz stark gesenkt werden, da es meist ausreichend ist, zur Beschreibung des thermischen Verhaltens nur einige zehn Koeffizienten  $a_n$  anstatt hunderter Einzelthermogramme zu berücksichtigen.

## Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse (PCA<sup>21</sup>) ist eine orthogonale lineare Transformation, bei der der zugrundeliegende Datensatz in ein neues Koordinatensystem transformiert wird.

<sup>19</sup>Von engl. *thermographic signal reconstruction*, dt. thermische Signalrekonstruktion.

<sup>20</sup>Von engl. *thermal wave signal reconstruction*, dt. Signalrekonstruktion für thermischer Wellen.

<sup>21</sup>Von engl. *principal component analysis*, im Zusammenhang mit der Bildverarbeitung auch als Karhunen-Loève-Transformation bezeichnet.

Der verwendete Algorithmus gliedert sich in die folgenden Schritte: Zuerst werden die dreidimensionalen Messdaten  $T(x,y,t)$  in einen zweidimensionalen Datensatz  $A'(n,m)$  umgewandelt, bei dem  $n$  die räumliche und  $m$  die zeitliche Information enthält. Hieraus wird der Datensatz  $A$  gebildet, indem der Mittelwert entlang der zeitlichen Dimension von  $A'$  abgezogen wird. Anschließend wird diese Matrix in Eigenvektoren und Eigenwerte zerlegt:

$$A = UTV^\top. \quad (2.25)$$

Dabei sind  $U$  und  $V$  orthogonale Matrizen, deren Spalten die Eigenvektoren von  $AA^\top$  bzw.  $A^\top A$  repräsentieren. Die diagonale Matrix  $\Gamma$  enthält nun die singulären Werte von  $AA^\top$ . Die maßgeblichen zeitlichen Änderungen liegen in den ersten Eigenvektoren, da thermische Phänomene in der Regel langsam und stetig sind. Um ein Ergebnisbild, das sog. Hauptkomponentenbild, zu erhalten, wird die Projektion der Messdaten in Richtung eines dieser Eigenvektoren gebildet, in dem das Vektorprodukt berechnet wird.

Obwohl diese Technik rein statistisch motiviert ist und keine echte physikalische Grundlage hat, wurde sie häufig mit großem Erfolg angewendet [72, 73]. Jedoch lassen sich aus den Hauptkomponentenbildern keine physikalischen Informationen, wie z.B. Tiefe oder Art einer Ungänge direkt ableiten. Es handelt sich um ein Verfahren, das in erster Linie zur Defekterkennung geeignet ist.

#### 2.2.4 Blitzlichtthermografie

Durch den Einsatz von Blitzlampen kann eine flächige pulsformige Erwärmung realisiert werden. Das näherungsweise als Dirac-Puls behandelbare zeitliche Verhalten der Strahlungsintensität ermöglicht in guter Näherung eine analytische Beschreibung der thermischen Reaktion der erwärmten Probe [17] (vergleiche auch Unterabschnitt 2.2.3). Insbesondere bei der Untersuchung von dünnen Schichten ist eine kurze Anregungszeit zwingend notwendig [74]. Werden zwei Blitzpulse in geeignetem kurzem zeitlichen Abstand verwendet, kann die Nachweisfähigkeit zusätzlich um einige Prozent erhöht werden [75]. Durch den flächigen Wärmeeintrag kommt es aus Symmetriegründen nur zu einer Wärmeleitung senkrecht zur Oberfläche. Daher können nur parallel zur Oberfläche ausgedehnte Fehlstellen detektiert werden.

Zur Anregung kommen Xenon-Blitzlampen, oft auch als Elektronenblitzgeräte bezeichnet, zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um Gasentladungsröhren, die über einen Speicherkondensator schlagartig mit Strom beaufschlagt werden. Die spektrale Verteilung der abgestrahlten Energie hat dabei üblicherweise ihr Maximum im sichtbaren Bereich, entsprechend 5500 bis 6500 K (vergleiche auch Abbildung 2.1). Dies hat im Kontext der Thermografie den Vorteil, dass sich mittels geeigneter Filter der gesamte Infrarotbereich ohne merklichen Energieverlust ausblenden lässt. In einer Reflexionsanordnung können so die sonst das Messresultat stark störenden direkten Reflexionen der Anregungsquelle gänzlich vermieden werden. Bei den kommerziell verfügbaren leistungsstarken Geräten sind die Speicherkondensatoren in der Regel in einem separaten Gehäuse (oft als „Generator“ bezeichnet) untergebracht. Blitzlampen aus dem Fotobereich sind mit einer Pulsenergie von bis zu

6 kJ verfügbar, wobei sich die Angaben auf die elektrische Verlustleistung der Blitzröhre und nicht auf die tatsächlich abgegebene Strahlungsenergie beziehen<sup>22</sup>. Bei einer typischen Abbrennzeit von 2,6 ms entspricht dies einer mittleren Leistung von 2,3 MW (siehe auch Unterabschnitt 3.2.1).

Blitzlampen für den industriellen Einsatz sind auch mit noch deutlich höheren Leistungen erhältlich. Dabei steigt in der Regel die Dauer des Blitzes mit der Leistung. Durch den Einsatz eines zusätzlichen elektrischen Unterbrechungsgliedes zwischen Blitzgenerator und -lampe (oft als *quencher* bezeichnet), kann die Abbrenndauer aber auch bei hohen Leistungen noch erheblich reduziert werden [76, 77, 78].

### 2.2.5 Thermografie zur Risserkennung und -charakterisierung

In konventionellen Aufbauten wird die Wärme über Blitz- oder Halogenlampen räumlich möglichst homogen eingebracht. Durch eine solche Anregung wird aber aus Symmetriegründen nur ein Wärmefluss senkrecht zur Oberfläche angeregt, sodass lediglich parallel zur Oberfläche genügend ausgedehnte Fehlstellen erkannt werden können. Idealisierte Risse – perfekt rechtwinklig ausgerichtet mit vernachlässigbar kleiner Klaffung – lassen sich daher mit dieser Anregungstechnik prinzipiell nicht über ihren Wärmewiderstand erkennen.

Aber auch bei einem solchen Aufbau können klaffende Oberflächenrisse in einigen Fällen aufgrund ihrer optischen Eigenschaften erkannt werden. Denn ein Riss verhält sich näherungsweise wie ein Hohlraumresonator, hat also einen hohen Emissions- und Absorptionsgrad. Wenn die untersuchte Probe selbst einen geringen Emissionsgrad aufweist, also z.B. aus Metall besteht, lässt sich dieser Effekt zur Rissdetektion ausnutzen. Diese Vorgehensweise ist jedoch durch das geometrische Auflösungsvermögen der Kamera beschränkt. Außerdem ist es nicht möglich, sicher zwischen rein oberflächlichen Eigenschaften und Rissen zu unterscheiden. Ein Verfahren diesen Typs, bei dem eine kurzzeitige Anregung mittels Blitzlampe erfolgt, wurde für Risse in Beton publiziert [79]. Hier konnten Risse mit einer Klaffung ab 0,5 mm detektiert werden. Obwohl in der genannten Veröffentlichung keine Angaben zur geometrischen Auflösung der Kamera gemacht wurden, ist anzunehmen, dass dies in etwa der Auflösungsgrenze entspricht.

Zum direkten Nachweis von Rissen mittels aktiver Thermografie muss daher zu anderen Anregungsquellen gegriffen werden. Geeignet sind hier die lokale sowie die defektselektive Anregung. Im Folgenden werden diese beiden Ansätze näher erläutert, wobei im Hinblick auf den Fokus dieser Arbeit die lokale Anregung ausführlicher behandelt werden soll.

#### Lokal angeregte Thermografie

Am häufigsten wird die aktive Thermografie mit großflächiger, möglichst homogener Anregung verwendet. Aus dennoch vorhandenen Inhomogenitäten der Anregung resultierende Effekte versucht man durch Auswertungsmethoden wie Fouriertransformationen zu unterdrücken [4].

---

<sup>22</sup>Z.B. Hensel TRIA 6000, [www.hensel.de](http://www.hensel.de).

Ein gänzlich anderer Ansatz wird bei der lokal angeregten Thermografie (LT) verfolgt. Hier wird räumlich möglichst begrenzt angeregt. Der auf diese Weise induzierte Wärmefluss hat auch Anteile parallel zur Oberfläche. Wird nun an verschiedenen Stellen der untersuchten Probe punktförmig Wärme eingebracht, können im Gegensatz zur klassischen flächigen Anregung Änderungen der thermischen Eigenschaften in jeglicher Orientierung detektiert werden. Prinzipiell ist die Erkennung beliebig orientierter Fehlstellen möglich, sobald die Anregung räumlich begrenzt ist. In der Literatur finden sich im Wesentlichen zwei Realisierungsformen der LT:

- Punktförmige Anregung, die einen dreidimensionalen Wärmefluss induziert.
- Linienförmige Anregung für einen zweidimensionalen Wärmefluss.

Um die ersten Anwendungen der LT besser einordnen zu können, sei an diese Stelle kurz auf die Entwicklung der Infrarot-Kamera-Technik verwiesen. PbS-Quantendetektoren wurden als Einzelelemente schon im Zweiten Weltkrieg genutzt, bildgebende Kameras auf Basis optischer Scanner wurden für die zivile Nutzung Anfang der 1950er Jahre vorgestellt. Erst seit Mitte der 1970er Jahre werden „Pyrikons“ eingesetzt. Dabei handelt es sich um Vidikons<sup>23</sup>, deren Empfindlichkeit durch Beschichtungen mit pyroelektrischen Materialien auf den MIR- und LWIR-Bereich verlagert wurde. Kameras nach heutigen Maßstäben sind hingegen erst seit den 1980er Jahren auf HgCdTe-Basis erhältlich [2]. Noch Ende der 1980er Jahre wurden scannende Systeme entwickelt, da sie deutlich kostengünstiger waren [80].

Die LT wurde bereits in den späten 1960ern in Form der sogenannten *Flying Spot Camera* beschrieben [81]. In der genannten Veröffentlichung erfolgt die Anregung über eine fokussierte Xenon-Gasentladungslampe. Es wird eine gekoppelte Ablenkoptik für Anregung und die radiometrische Temperaturmessung verwendet. Abbildung 2.4 zeigt die Skizze des Systems aus der Originalveröffentlichung, bei dem die optische Ablenkung nur in einer Richtung erfolgt, während das gesamte System mechanisch rechtwinklig dazu verfahren wird. Die *Flying Spot Camera* wird nun so justiert, dass die Anregung in einem definierten Abstand zum Messbereich erfolgt. Liegt zwischen Mess- und Anregungsbereich eine Fehlstelle, die den lateralen thermischen Widerstand erhöht, so wird eine im Vergleich zum ungestörten Bereich geringere Temperaturerhöhung gemessen [82]. Anhand dieses Effektes können z.B. Oberflächenrisse detektiert werden.

Diese Art der thermografischen Risserkennung ist seit ihrer Entwicklung Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Eine umfassende Darstellung findet sich bei Gruss *et al.* [83, 84]. Für Punktquellen ist unter gewissen Einschränkungen auch eine analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung mittels Fourier-Entwicklungen möglich [85]. Eine wichtige Fragestellung bei dieser Technik ist die Unterscheidung von thermischen und optischen Effekten [86]. Hierzu reicht es oft schon aus, dass die Temperaturmessung und die Anregung nicht zeitgleich am selben Ort erfolgen [87]. Zur sicheren Unterscheidung wurde unter anderem die Hauptkomponentenanalyse (siehe Unterabschnitt 2.2.3) erfolgreich eingesetzt [88].

---

<sup>23</sup>Als Vidikons bezeichnet man Bildaufnahmeröhren, die einen langsamen Elektronenstrahl nutzen.

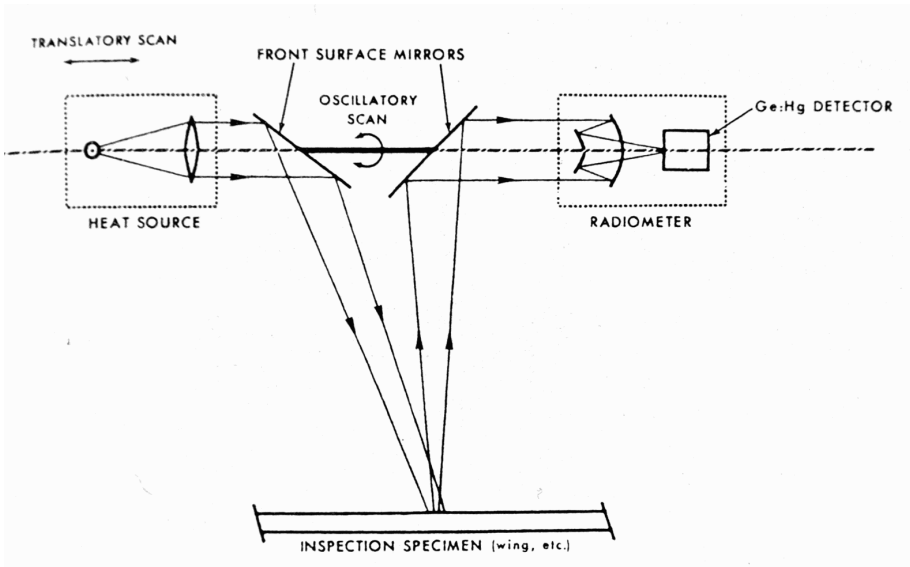


Abbildung 2.4: Prinzip der *Flying Spot Camera* nach Kubiak *et al.* aus den späten 1960ern. Mit der Wärmequelle („HEAT SOURCE“) und dem Temperatursensor („RADIOMETER“) wird die Probe („INSPECTION SPECIMEN“) über eine gekoppelte Ablenkoptik (in der Mitte des Bildes) abgerastert (Quelle: [81]).

Im Bereich der Kerntechnik wurde eine anspruchsvoll ausgebaute *Flying Spot Camera* mit großem Erfolg zur Risserkennung genutzt [89]. Eine umfassende Darstellung der hier verfolgten Herangehensweise findet sich in der französischsprachigen Literatur [90]. Bei Geometrien wie z.B. Rohren, bei denen eine homogene Anregung aus geometrischen Gründen sehr aufwändig wäre, konnte eine *Flying Spot Camera* erfolgreich zur Erkennung von Delaminationen genutzt werden [91]. Eine einfachere, nicht bildgebende Abwandlung dieser Technik wurde zur Detektion von Haarrissen in Grünlingen von pulvermetallurgisch produzierten Zahnrädern eingesetzt [92]. Zudem wurden auch allgemeinere Ansätze zur geometrischen Charakterisierung von beliebigen überdeckten Hohlräumen theoretisch und experimentell verfolgt [93, 94], die sich auch auf zweidimensionale thermische Barrieren, also z.B. Risse, anwenden lassen [95].

Da in letzter Zeit IR-Kameras durch den steten Preisverfall eine große Verbreitung gefunden haben [2], gibt es auch Ansätze, eine lokale Anregung mit einer orts aufgelösten Temperaturmessung zu kombinieren [97]. In den Arbeiten von Li *et al.* wird dabei ein gepulstes Verfahren vorgeschlagen, bei dem sich Kamera und Laser ähnlich wie bei der *Flying Spot Camera* in festen geometrischen Bezug zueinander befinden [98, 96, 99, 100, 101]. Untersucht wurde ein Testkörper aus Stahl mit einem 8 mm langen Schwingungsriß, dessen

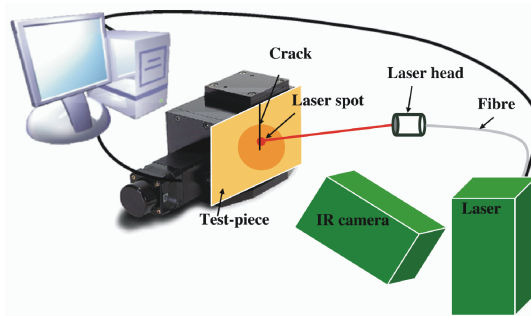


Abbildung 2.5: Versuchsaufbau zur thermografischen Rissprüfung nach Li *et al.* Kamera und Laser sind fest installiert. Die Probe wird in Bezug hierzu mittels einer automatisierten Verfahrenseinheit bewegt (Quelle: [96]).

Klaffung von den Autoren mit kleiner als  $1\ \mu\text{m}$  angegeben wird. Die Anregung erfolgt mittels Laserpulsen mit einer Dauer von 50 ms. Dabei befindet sich die untersuchte Probe auf einer automatisierten Verfahrenseinheit, sodass sie sukzessive abgerastert werden kann (siehe Abbildung 2.5). Zur Datenauswertung wurde zunächst das Bilden der zweiten räumlichen Ableitung (Laplace-Filter, siehe Abschnitt 2.2.7) vorgeschlagen. In weiteren Veröffentlichungen wurde dann auf die zeitliche Summation zweier orthogonaler erster räumlicher Ableitungen (Prewitt-Filter mit Bildung der Summe, siehe Abschnitt 2.2.7) zurückgegriffen [98, 96]. Dazu werden Ableitungen der Thermogramme von 0,05 s bis 0,3 s nach der Anregung aufaddiert. Bei den gezeigten Experimenten führte eine Schrittweite von 0,43 mm und 0,5 mm in x- bzw. y-Richtung zu sehr guten, mit der Farbeindringprüfung vergleichbaren Ergebnissen (siehe Abbildung 2.6). Bei einer Vergrößerung der Schrittweite in x-Richtung auf 2,58 mm und 3,44 mm konnten zwar Teile des Risses noch erkannt werden, aber eine Aussage über die Länge nicht mehr sicher getroffen werden. Zur erreichbaren Prüfgeschwindigkeit finden sich jedoch keine expliziten Angaben. Aus der genannten Aufnahmedauer und Schrittweite lässt sich jedoch eine obere Grenze abschätzen. Die reine Messdauer beträgt 0,3 s pro Puls, zusätzlich muss noch die für die Datenübermittlung und das Verfahren der Probe benötigte Zeit berücksichtigt werden. Dabei wird, wenn eine hohe Auflösung gefordert ist, ein Bereich von  $0,43 \times 0,5\ \text{mm}^2$  abgedeckt. Die Prüfgeschwindigkeit liegt somit unter  $0,7\ \text{mm}^2/\text{s}$ , was die Prüfung von größeren Proben extrem zeitaufwendig gestalten würde. Außerdem müsste für die Prüfung von gekrümmten Oberflächen auf eine aufwändigere Verfahrenmimik zurückgegriffen werden. Die Grundlagen dieser Technik wurden bereits in den Arbeiten von Burrows *et al.* aus der gleichen Gruppe gelegt. Hierbei wurde die thermografische Prüfung zusätzlich mit Laserultraschall kombiniert, jedoch ohne zu signifikant besseren Ergebnissen zu führen [102, 103].

Eine lokale Anregung lässt sich auch über einen linienförmigen Wärmeeintrag realisieren. Bei dieser Technik müssen zwei Fälle unterschieden werden, je nachdem, ob die Inhomo-

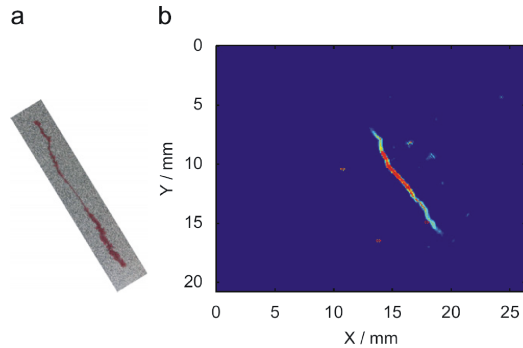


Abbildung 2.6: Vergleich des Ergebnisses der thermografischen Rissprüfung (b) mit der Farbeindringprüfung (a) aus einer Arbeit von Li *et al.* Untersucht wurde ein stählerner Testkörper. Die Rissklaffung wurde mit  $< 1 \mu\text{m}$  bei einer Länge von 8 mm angegeben. Eine Skizze des verwendeten experimentellen Aufbaus findet sich in Abbildung 2.5 (Quelle: [96]).

genität der Anregung gezielt zur Detektion beliebig orientierter Fehlstellen genutzt wird. Ist dies nicht der Fall, wird die Auswertung analog zur flächigen Anregung behandelt. Als Anregungsquelle kommen hier oft Quellen wie Quarzheizstrahler zum Einsatz, deren Ausdehnung deutlich größer als die erwartete Defekttiefe ist. Auf diese Weise überwiegt der Wärmefluss rechtwinklig zur Oberfläche und die Bedingungen entsprechen einer flächigen Anregung. Der Vorteil des scannenden Systems liegt darin, dass große Flächen effektiv kontinuierlich abgefahren werden können, wie es z.B. für den Hitzeschild des Space Shuttles nötig ist [104]. Außerdem können solche Systeme direkt in Fertigungsstraßen, z.B. bei der Prüfung von Holz, integriert werden [105]. Prüfeinrichtungen dieser Art sind kommerziell erhältlich<sup>24</sup>.

Im Kontext dieser Arbeit sind die Anwendungen von größerem Interesse, bei denen die linienförmige Anregung zur Prüfung auf nicht parallel zur Oberfläche orientierter Fehlstellen, wie z.B. Rissen, genutzt wird. Der Vorteil gegenüber der *Flying Spot Camera* liegt hierbei hauptsächlich in der höheren Prüfgeschwindigkeit. Da ein zweidimensionaler Wärmefluss induziert wird, muss die Probe zweimal mit unterschiedlicher (optimalerweise rechtwinkliger) Linienausrichtung untersucht werden, um Fehlstellen in allen Orientierungen detektieren zu können. In der Literatur findet sich die Beschreibung eines solchen Verfahrens mit festem geometrischen Bezug zwischen Anregung und Kamera, bei dem die Anregung pulsweise erfolgt, als Weiterentwicklung der punktwisen Anregung bei Li *et al.* [101].

Zwar enthalten auch die bereits genannten Arbeiten zur *Flying Spot Camera* Ansätze zur Charakterisierung von Rissen - es kann zwischen optischen und thermischen Effekten unterschieden werden - es werden aber keine geometrischen Aussagen getroffen, da das Ziel immer nur die Prüfung auf Risse analog zur Farbeindringprüfung ist. Bei Li *et al.* wurde

<sup>24</sup>Z.B. Fa. Mistras „LST“, [http://www.pacndt.com/online\\_ads/lst/lstindex.htm](http://www.pacndt.com/online_ads/lst/lstindex.htm).



zunächst versucht, aus den auftretenden Temperaturgradienten Rückschlüsse auf die Klaffung der detektierten Risse zu ziehen [98]. Es wurde zwar der Einfluss der geometrischen Parameter der Risse systematisch mittels FEM-Simulationen untersucht [96], die experimentellen Daten wurden aber nur noch mit dem Ziel der Rissdetektion ausgewertet.

### Defektselektive Anregung

Mit Leistungsschall- und Induktionsanregung [50, 45] wird ein Wärmeeintrag am Ort der Fehlstelle generiert.

Bei der ultraschallangeregten oder Vibro-Thermografie wird die Energie in Form einer mechanischen Schwingung in das untersuchte Bauteil eingebracht. Dazu kommen meist Geräte aus der Ultraschall-Schweißtechnik mit Frequenzen im Bereich von 15 bis 25 kHz zum Einsatz [49, 106]. Wegen der komplizierten nichtlinearen Effekte bei der Energieeinkopplung ist es selbst bei bekannten Fehlergeometrien schwierig, Vorhersagen über die thermischen Signaturen zu treffen [55, 107]. Es ist eine Abhängigkeit der eingekoppelten Leistung von der Rissklaffung bekannt. So wurde bei einer Untersuchung an einem Riss in einem stählernen Probekörper, dessen Klaffung durch Verbiegen variiert werden konnte, eine maximale Erwärmung bei einer Klaffung von 4  $\mu\text{m}$  an der Oberfläche beobachtet [108]. Doch auch die Beschaffenheit der Rissflanken hat einen sehr großen Einfluss auf die eingekoppelte Leistung [109, 110]. Durch den diffusiven Charakter der Wärmeleitung kommt es zu einer geometrischen Aufweitung der Fehleranzeigen im Vergleich zu den tatsächlichen Abmessungen der Fehlstelle. Ist nur eine Rissdetektion beabsichtigt, lassen sich die entstandenen Signaturen aber auf die genauen Position der Risse zurückführen, was eine bessere Detektierbarkeit ermöglicht [111]. Außerdem kann die ultraschallangeregte Thermografie auch zur Untersuchung der Eigenspannungen um den Riss herum eingesetzt werden [112]. Allerdings besteht bei dieser Technik stets die Gefahr, dass das untersuchte Bauteil irreversibel verändert wird. Insbesondere kann es bei Ermüdungsrissen durch die hohen entstehenden mechanischen Spannungen zu weiterem Risswachstum kommen.

Bei der Induktionsthermografie wird die Energie mit Hilfe von niederfrequenten magnetischen Wechselfeldern eingekoppelt. Üblicherweise werden Frequenzen von 50 bis 500 kHz eingesetzt [113]. Für die Induktionsanregung wurden von Walle und Netzelmann quantitative Zusammenhänge aufgezeigt. An einem Probekörper mit Sägeschnitten konnte die Tiefe mit einer Auflösung von 0,2 mm bestimmt werden, sofern sie unter 0,8 mm lag [114, 115, 116]. Trotzdem werden diese Methoden in der Regel nur für qualitative Untersuchungen eingesetzt [46]. Über die Form der entstehenden thermischen Signatur lassen sich Aussagen zur Geometrie des untersuchten Risses treffen, was in einer Arbeit von Abidin *et al.* gezeigt wurde [117]. Dabei wurden Experimente an einem Aluminiumprobekörper mit 5 mm tiefen Sägeschnitten in Winkeln von 22,5°, 45° und 67,5° durchgeführt. Auf Grundlage von mit diesen Ergebnissen in gutem Einklang stehenden FEM-Simulationen ist eine erreichbare Winkelauflösung im Bereich von 1° bei bekannter Risstiefe wahrscheinlich.

## 2.2.6 Thermografie an Punktschweißverbindungen

Als schnelle, bildgebende, berührungslose und gut automatisierbare Technik erfüllt die Thermografie die Anforderungen für die Integration eines Prüfverfahrens in die industrielle Massenproduktion. Durch die rapiden Entwicklungen auf dem Bereich der IR-Kamera- und Computertechnik wird ihr Einsatz zudem zunehmend wirtschaftlicher [118, 119]. Da es vielfältige Möglichkeiten zur Realisierung einer thermografischen Prüfung von Punktschweißverbindungen gibt, soll hier eine grobe Klassifikation nach Anordnung der Anregungsquelle und Art der Auswertung vorgenommen werden. Da sich die Anregungsquelle z.B. als Blitzröhre sehr klein ausführen lässt, sind prinzipiell sowohl

- Reflexionsanordnung als auch
- Transmissionsanordnung

möglich (siehe Abbildung 2.3). Die Transmissionsanordnung hat den Vorteil, dass IR-Kamera und Anregungsquelle aus geometrischen Gründen näher an dem untersuchten Bereich, also der Punktschweißverbindung, positioniert werden können. So wird eine bessere örtliche Auflösung und eine höhere Effizienz der Anregung ermöglicht. Bei einer Reflexionsanordnung ist hingegen keine rückseitige Zugänglichkeit erforderlich, was die Integration vereinfacht und insbesondere den mechanischen Aufwand zur automatischen Positionierung der Prüfeinrichtung verringert. Die Interpretation der aufgenommenen Daten kann nun anhand

- der räumlichen Wärmeverteilung oder
- der übertragenden Wärmeenergie erfolgen.

Erstere Ansatz entspricht dabei dem typischen Vorgehen beim defektoskopischen Einsatz der Thermografie, wo eine Inhomogenität in der resultierenden Temperaturverteilung als Ungänze gewertet wird. Zur Beurteilung der Ungänze wird nun angenommen, dass deren Größe mit den Ausmaßen der Inhomogenität in der Oberflächentemperatur übereinstimmt [4]. Der zweite Ansatz erfordert eine quantitative Auswertung der Temperatur selbst bzw. der von dieser abhängigen Messgrößen.

Bereits Ende der 1970er Jahre wurde eine typische Transmissionsanordnung zur Prüfung von Punktschweißverbindungen in den USA patentiert [120], wobei die räumliche Temperaturverteilung zur Bestimmung der Schweißlinsengröße genutzt werden sollte. Ende der 1980er Jahre wurden dann zwei umfangreiche Patente zur Nutzung einer Reflexionsanordnung zur Prüfung von Nieten [121] und darauf basierend auch zur Prüfung von Punktschweißverbindungen [122] erteilt. Shepard *et al.* veröffentlichten 1998 eine Untersuchung, in der 12 geschwärzte Proben in einer Transmissionsanordnung mit pulsformiger Anregung untersucht wurden [17]. Zur Interpretation der Daten wurde die Oberflächentemperatur orts aufgelöst ausgewertet. Dabei wurde die wegen der Wärmeleitung durch die Schweißlinse hindurch entstehende Temperaturverteilung mit einem Maximum direkt über der Schweißlinse betrachtet. Mittels eines Schwellwertverfahrens konnte bei den untersuchten Proben auf den Durchmesser der Schweißlinse geschlossen werden. 1999 schlugen Türler *et al.* einen

Ansatz vor, bei dem eine während des Messzeitraums konstante Erwärmung mittels Infrarotstrahler eingesetzt wird [123, 124]. Die Auswertung hebt hierbei auf das Maximum des räumlichen Temperaturgradienten ab. Hervorzuheben ist, dass in dieser Arbeit die Ergebnisse einer Serienuntersuchung an 30 Proben mit der maximalen Belastbarkeit aus Zugversuchen verglichen wurden (siehe Abbildung 2.7). Es wurden auch hier geschwärtzte Proben verwendet. Die Ergebnisse scheinen eine Klassifizierung zu ermöglichen, es wurde jedoch keine detaillierte statistische Bewertung der Ergebnisse durchgeführt. Der in den genannten Arbeiten vorgestellte Ansatz mit einer konstanten Erwärmung wurde in der Literatur nicht weiter verfolgt. Zu der Zeit wurde in Deutschland ein inhaltlich allgemein gehaltenes Patent erteilt (Anmeldung 2001, Offenlegung 2003), welches sowohl Transmissions- als auch Reflexionsanordnung mit unterschiedlichen Anregungsquellen umfasst, aber keine detaillierten Informationen zur Auswertung erhält [125]. Im Jahr 2007 wurde dann ein ausführlich beschriebenes Verfahren patentiert [126], welches auf der Auswertung normierter zeitlicher Temperaturverläufe basiert. Den in der Offenlegungsschrift gezeigten Darstellungen von Messkurven zufolge wurde dieses Verfahren zumindest in Laborversuchen tatsächlich umgesetzt. Ein weiteres Verfahren mit einer innovativen Anregungsquelle wurde 2007 geschützt [127]. Hier soll die Anregung als Abkühlung in Transmissionsanordnung erfolgen. Diese wird durch die schlagartige Expansion von Luft realisiert und ist somit nicht von den optischen Eigenschaften der Oberfläche abhängig. Als weitere Möglichkeit wurde die theoretische Durchführbarkeit einer direkten Bestimmung der Schweißlinsengröße aus dem Phasenbild einer Lock-in-Messung an Daten aus FEM-Simulationen gezeigt [128], jedoch wurde dieser Ansatz von derselben Autorin später als nicht wirtschaftlich durchführbar verworfen [129]. Soweit sich in den genannten Arbeiten genaue Informationen zur Präparation der Proben finden, wurden die Proben für sämtliche Experimente vor der Messung mit einer Beschichtung hoher Emissivität versehen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Thermografie ein viel diskutierter Kandidat für die Prüfung von Punktschweißverbindungen ist. Die zahlreichen Patente zeigen, dass diesem Verfahren eine wirtschaftliche Bedeutung beigemessen wird. So wird seit 2009 ein vollautomatisches thermografisches Prüfsystem für die Untersuchung von Punktschweißverbindungen – laut Herstellerangaben das weltweit erste – von der Fa. Infratec angeboten<sup>25</sup>. Trotzdem beschränken sich die Arbeiten zu diesem Thema größtenteils auf das bloße Darlegen der Machbarkeit. Eine statistische Analyse der Zuverlässigkeit – insbesondere auch für die Prüfung von nicht vorbehandelten Proben – findet sich zu keinem der genannten Verfahren in der Literatur.

### 2.2.7 Digitale Bildverarbeitung

Heutzutage kommen zur Auswertung der Daten nahezu aller bildgebenden Messverfahren Techniken der digitalen Bildverarbeitung zum Einsatz. Auf dem Gebiet der Thermografie ergeben sich zwei Hauptanwendungsgebiete. Einerseits soll der subjektive Bildeindruck verbessert werden, um die Erkennbarkeit von Fehleranzeigen zu erhöhen, wozu beispielsweise ei-

---

<sup>25</sup>Webseite der Fa. Infratec: <http://www.infratec.de/de/infratec-ihre-spezialisten-fuer-thermografie-und-sensorik/submenu/unternehmen/geschichte.html>.

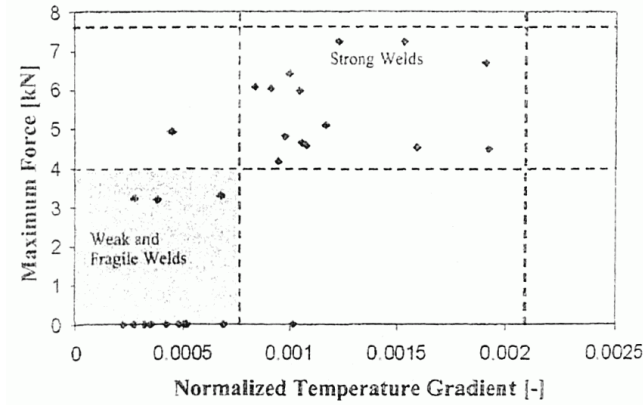


Abbildung 2.7: Dargestellt ist die maximale Tragfähigkeit von Punktschweißverbindungen gegen die Ergebnisse einer thermografischen Prüfung an geschwärzten Proben nach Türler *et al.* Die Größe *Normalized Temperature Gradient* ist dimensionslos und wird aus dem Maximum des räumlichen Temperaturgradienten berechnet (Quelle: Ref. [123])

ne Rauschunterdrückung geeignet sein kann. Diese Klasse an Techniken stammt größtenteils aus der Verarbeitung von optischen Bildern. Andererseits kann Ziel der Bildverarbeitung sein, den Informationsgehalt eines gesamten Messfilms in einem einzelnen Bild darzustellen. Hierbei handelt es sich meist um speziell für die Thermografie angepasste Techniken. In diesem Unterabschnitt soll eine kurze Einführung in die für diese Arbeit verwendeten Verarbeitungsmethoden gegeben werden.

### Faltung

Viele Bildfilterungs-Operationen lassen sich mathematisch als Faltung darstellen. Für den für die Bildverarbeitung relevanten Fall der Faltung einer diskreten zweidimensionalen Funktion  $I(x,y)$ , dem Ursprungsbild, mit dem Faltungskern<sup>26</sup>  $k(i,j)$  lässt sich folgende Berechnungsvorschrift angeben:

$$I^*(x,y) = (I * k)(x,y) = \sum_{i=0}^{n_x-1} \sum_{j=0}^{n_y-1} I(x+i-a_x+1, y+j-a_y+1) k(i,j) . \quad (2.26)$$

Dabei bezeichnet  $I^*(x,y)$  das Ergebnisbild,  $(n_x, n_y)$  die Größe und  $(a_x, a_y)$  den Mittelpunkt des Faltungskerns. Es wird also jedem Pixel ein aus der linearen Transformation

<sup>26</sup>Oft auch als Filterkern, -operator, -maske oder *convolution kernel* bezeichnet.

seiner  $n_x \times n_y$  großen Umgebung berechneter Wert zugeordnet. Da die Pixel am Rand des Bildes keine vollständige Umgebung haben, muss das Ergebnisbild entweder um  $n_{x,y}$  kleiner als das Ausgangsbild sein, oder es wird eine Vorschrift verwendet, um Pixeln, die außerhalb des Ausgangsbildes liegen, Werte zuzuweisen. Üblich sind hier drei Möglichkeiten:

- Periodische Randbedingungen.
- Die Randpixel werden wiederholt.
- Pixel außerhalb des Bildes werden auf einen festen Wert gesetzt.

Im Folgenden werden beispielhaft einige häufig in der Bildverarbeitung verwendete Filter gezeigt:

Prewitt-Filter (erste Abl.):  $k_{Pr;x} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$   $k_{Pr;y} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} = k'_{Pr,x}$

Sobel-Filter (erste Abl.):  $I_{Sobel}^* = \sqrt{(I * k_{Pr;x})^2 + (I * k_{Pr;y})^2}$

Laplace-Filter (zweite Abl.):  $k_{LP} = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & -20 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix}$

Gauss-Filter (Tiefpass):  $k_{Gs,\sigma} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{i^2+j^2}{2\sigma^2}}$ , z.B.

$$k_{Gs;0,5} = \begin{pmatrix} 0,01 & 0,08 & 0,01 \\ 0,08 & 0,62 & 0,08 \\ 0,01 & 0,08 & 0,01 \end{pmatrix} \quad \text{mit } \sigma = 0,5$$

Die genannten Ableitungen lassen sich zur Kantendetektion einsetzen. Für diesen Zweck existiert aber auch eine Fülle weiterer Verfahren. Ein bekanntes Beispiel stellt das Canny-Filter dar [130]. Einen guten Überblick über die digitale Bildbearbeitung zur Merkmalsextraktion liefert das Lehrbuch von Nixon und Aguado [131].

## 2.3 Schweißverbindungen

In diesem Abschnitt wird entsprechend der inhaltlichen Ausrichtung dieser Arbeit hauptsächlich auf das Widerstandspunktschweißen eingegangen, wobei die Qualitätssicherung im Vordergrund steht. Außerdem wird im letzten Unterabschnitt die Rissproblematik beim Schweißen kurz angesprochen.

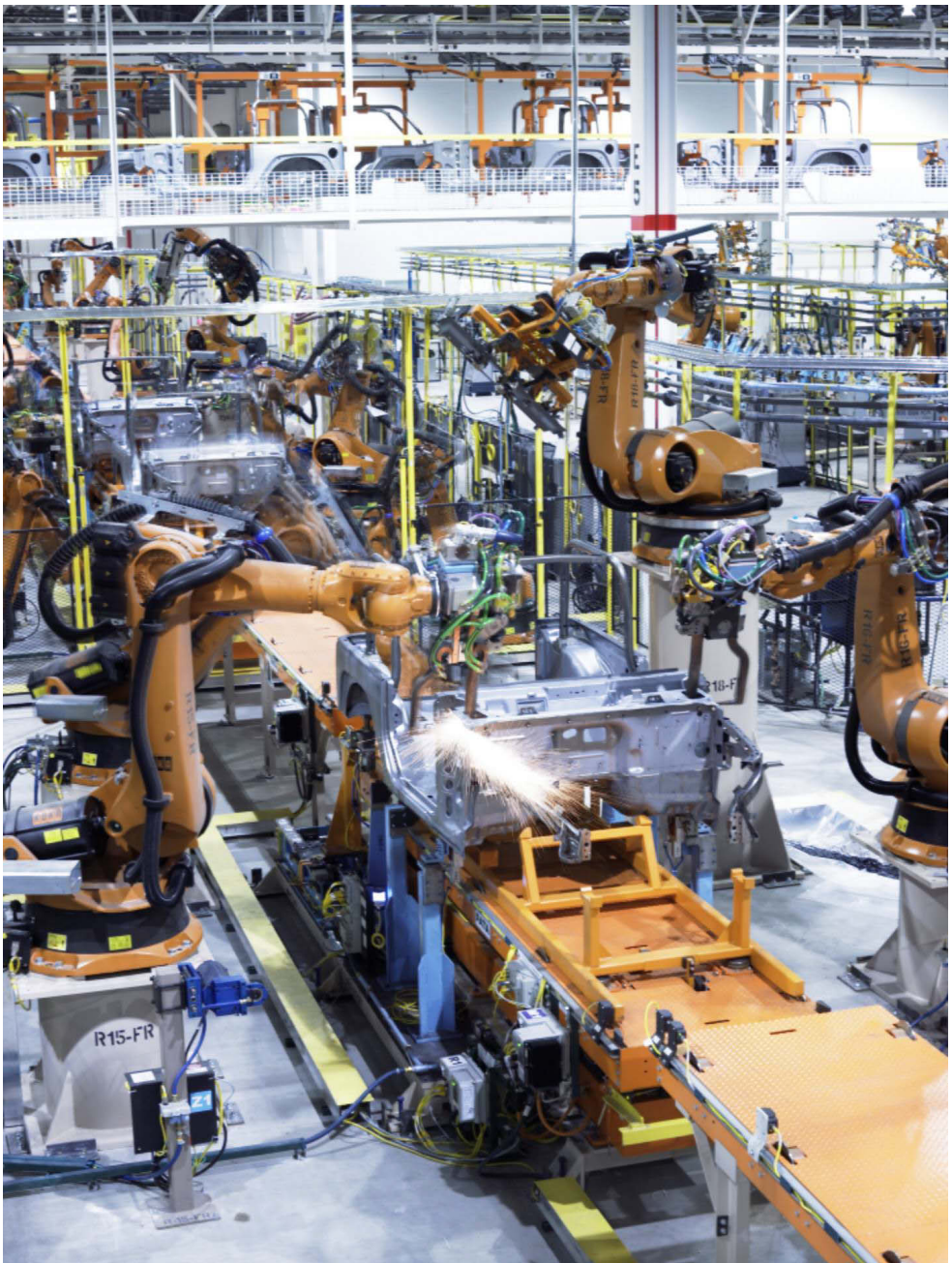


Abbildung 2.8: Typischer vollautomatisierter Aufbau für den industriellen Einsatz des Punktschweißens im Automobilbau. An den beiden Roboterarmen im Vordergrund sind die Schweißzangen deutlich zu erkennen. Bei der vom linken Roboterarm ausgeführten Schweißung kommt es im Moment der Aufnahme zur Spritzerbildung. (Mit freundlicher Genehmigung der KUKA Systems GmbH.)

### 2.3.1 Widerstandspunktschweißen

Das Widerstandspunktschweißen eignet sich zum Fügen elektrisch leitfähiger Werkstücke. Die Einordnung nach DIN 8593 erfolgt in die Untergruppe „Pressschweißen durch elektrischen Strom“. Der Schweißprozess basiert auf der Entwicklung Joulescher Wärme, ausgelöst von einem durch die Verbindungsstelle fließenden elektrischen Strom.

#### Technische Umsetzung des Punktschweißens

Technisch wird der Punktschweißprozess folgendermaßen realisiert. Zwei oder mehr Bleche werden im Überlappstoß durch Elektroden zusammengedrückt. Durch diese wird dann ein elektrischer Strom in die Bleche eingeleitet. Die größte Verlustleistung tritt nun an den Kontaktflächen auf. Wegen des thermischen Kontakts der oft wassergekühlten Elektroden werden die höchsten Temperaturen zwischen den zu fügenden Blechen erreicht (vergleiche auch Temperaturverlauf in Abbildung 2.10). Hier steigt die Temperatur soweit an, dass der Werkstoff aufschmilzt und die Werkstücke linsenförmig verschweißt werden. Der Bereich, in dem der Werkstoff aufgeschmolzen wurde, bezeichnet man als Schweißlinse. Danach werden die Bleche noch für einige Zeit zusammengedrückt (siehe Abbildung 2.9), bis das Schweißbad wieder erstarrt ist. Je nach Art der Elektrodenanordnung wird zwischen zweiseitigem (die Elektroden liegen sich gegenüber) und einseitigem (die Elektroden greifen von nur einer Seite an) Punktschweißen unterschieden. Beim einseitigen Punktschweißen entstehen dabei

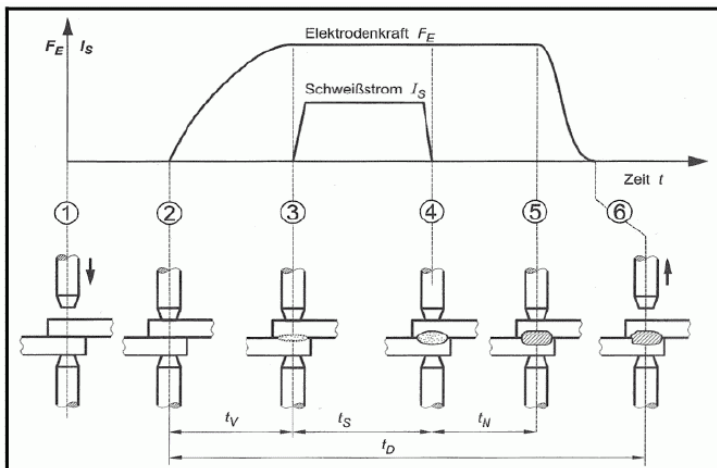


Abbildung 2.9: Zeitlicher Verlauf von elektrischem Strom und mechanischer Elektrodenkraft bei einer Punktschweißung aus [132]. Hierbei bezeichnet  $t_v$  die Vorlaufzeit,  $t_s$  die Schweißzeit,  $t_n$  die Nachhaltezeit und  $t_D$  die Druckzeit.

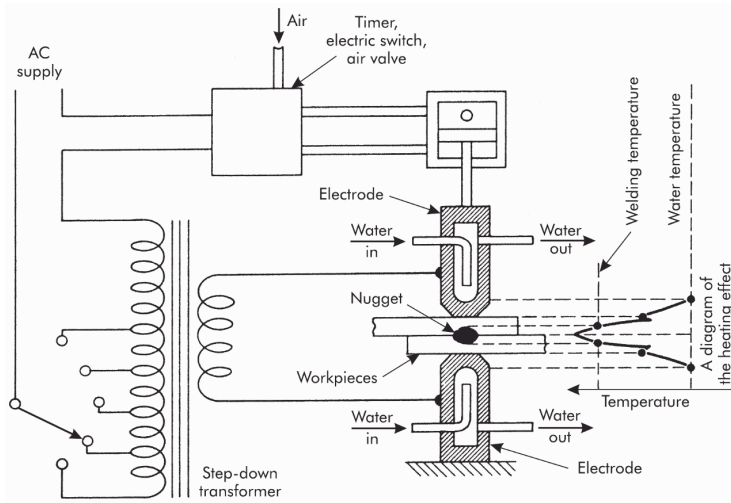


Abbildung 2.10: Schematischer Aufbau eines Punktschweißgeräts aus Ref. [140].

immer zwei Schweißpunkte. Häufiger wird die beidseitige Variante angewendet, wobei die Elektroden in eine sogenannte Schweißzange integriert werden können (siehe Abbildung 2.8) [133]. Eine schematische Skizze eines solchen Aufbaus findet sich in Abbildung 2.10.

Diese Fügetechnik wird hauptsächlich für Stahlbleche mit einer Dicke von bis zu 3 mm eingesetzt. Für diesen Anwendungsfall finden sich vielfältige Informationen in den DVS-Merkblättern der Reihe 2902 [134, 135, 136, 137]. Typischerweise kommen Stromstärken von 8 kA bis 22 kA bei Elektrodenkräften von 1 kN bis 11 kN zum Einsatz [138]. In [139] werden folgende Faustformeln zum Werkstattgebrauch für die optimalen Schweißparameter genannt, wobei  $t$  hier den Zahlenwert der kleinsten Blechdicke in Millimetern bezeichnet:

Stromstärke	$I_s = 9,5 \cdot \sqrt{t}$	[kA]
Schweißzeit	$t_s = 8 \cdot t$	[Per]
Elektrodenkraft	$F_E = 2000 \cdot t$	[N]

Die Einheit [Per] steht hierbei für Perioden des netzseitigen Wechselstroms, für die deutschsprachige Literatur gilt also  $1 \text{ Per} = 1/50 \text{ s}$ . Die sich ergebende Linsengröße  $d$  soll für die genannten Werte bei  $d = 5 \cdot \sqrt{t}$  [mm] liegen.

In Abbildung 2.11 sind die Haupteinflussgrößen für den Widerstandspunktschweißprozess dargestellt. Neben den durch die zu schweißenden Bleche vorgegebenen Größen (z.B. Blechdicke und -material) gibt es zwei weitere wichtige Gruppen von Einflussgrößen. Zuerst sei die Gruppe der nicht oder nur mit unverhältnismäßigem Aufwand kontrollierbaren Parametern, wie z.B. Umgebungstemperatur und genaue Oberflächenbeschaffenheit der Bleche, genannt. Wichtig sind außerdem die Parameter des Schweißgeräts. Neben den variablen



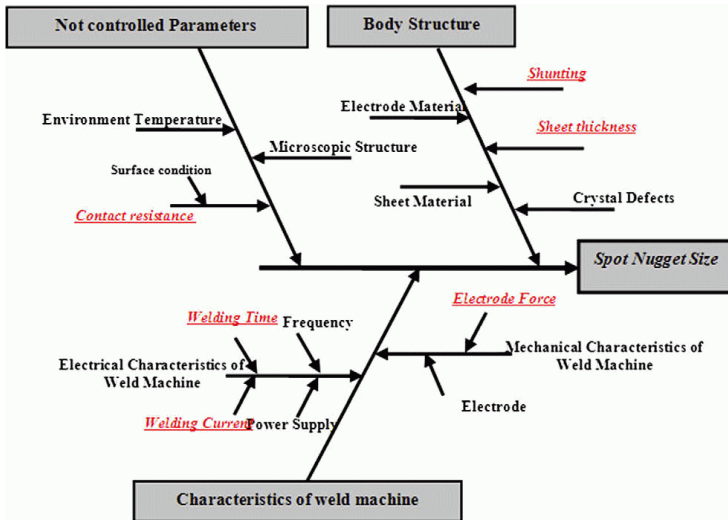


Abbildung 2.11: Fischgrät-Diagramm der verschiedenen Einflussgrößen auf den Widerstandspunktschweißprozess aus Ref. [142]. Die sich ergebene Schweißnahtgröße ist hauptsächlich von folgenden Gruppen von Parametern abhängig: Den strukturellen Einflüssen (Blechdicke und -material usw.), den Charakteristika des Schweißgeräts (Schweißzeit und -strom, Elektrodenkraft usw.) und einer Gruppe nicht kontrollierbarer Einflüsse (z.B. Umwelteinflüsse).

Parametern wie Schweißzeit und -strom, Elektrodenkraft usw. hängt das erreichte Ergebnis auch von intrinsischen Kenngrößen des jeweiligen Aufbaus wie z.B. der Steifigkeit der Schweißzange ab. Außerdem sollte den Elektroden an dieser Stelle besondere Beachtung geschenkt werden. Sie sind wegen der mechanischen und thermischen Belastung einem großen Verschleiß ausgesetzt. Es gibt Ausführungen mit separater Elektrodenkappe, um einen Austausch der kompletten Elektrode zu vermeiden. Die Elektroden bestehen meist aus Kupferlegierungen, da diese eine sehr gute elektrische und thermische Leitfähigkeit aufweisen. Da die Form der Elektrodenspitze die Kontaktfläche zwischen zu schweißendem Blech und Elektrode bestimmt, hat sie einen Einfluss auf das Schweißergebnis und beeinflusst die im Rahmen der Prozessüberwachung aufgenommenen Parameter stark [141].

### Schweißpunkte

In Abbildung 2.12 ist der Querschnitt durch eine Punktschweißverbindung skizziert. Ein integraler Bestandteil des Punktschweißprozesses besteht darin, dass die Elektroden die Bleche mit der Kraft  $F_E$  zusammendrücken, um einen elektrischen Kontakt zwischen ihnen zu gewährleisten (siehe Abbildung 2.9, 2). In Abhängigkeit von  $F_E$  kommt es zu einer Verformung der Bleche. So kommt es zum Elektrodeneindruck und, da die Elektroden einen

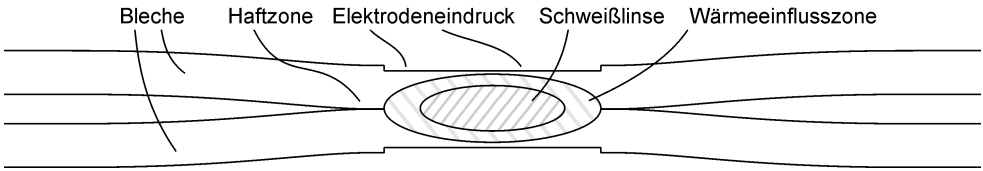


Abbildung 2.12: Skizze einer Punktschweißverbindung im Querschnitt. Durch die Anpresskraft der Elektroden kommt es zu Eindrücken und einer gewissen Verformung der Bleche. Das führt zu der sogenannten Haftzone, hier sind die Bleche zwar formschlüssig, aber nicht kraftschlüssig verbunden. Die eigentliche Verschweißung liegt nur im Bereich der Schweißlinse vor, hier wurde das Material aufgeschmolzen. Um diese herum bildet sich die Wärmeinflusszone (WEZ) aus.

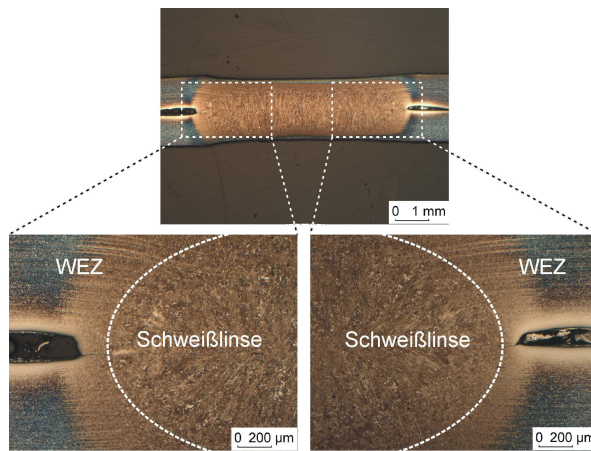


Abbildung 2.13: Metallografischer Schliff einer Punktschweißverbindung. (Material: HCT690T+Z140,  $t = 1 \text{ mm}$ ). Die Schweißlinse lässt sich anhand der Gefügeänderung sicher identifizieren. Direkt neben der Schweißlinse sind die Bleche durch den Anpressdruck noch nahezu formschlüssig verbunden, bei dem Spalt handelt es sich nicht um ein Fehlerbild (Quelle: BAM 5.5)

größeren Durchmesser als die resultierende Schweißlinse haben, zur sogenannten Haftzone, in der eine formschlüssige, aber nicht stoff- also auch keine kraftschlüssige Verbindung besteht. Nur im Bereich der Schweißlinse wurde das Material aufgeschmolzen, sodass sich hier die eigentliche Verschweißung formieren konnte. Im Bereich darum liegt die Wärmeinflusszone (WEZ), der Bereich, in dem es zu temperaturinduzierten Gefügeänderungen kommt. In dem in Abbildung 2.13 beispielhaft gezeigten Schliffbild lässt sich vor allem die Schweißlinse sicher an ihrer Gefügestruktur erkennen. Durch den Erstarrungsprozess kommt es hier zur Ausbildung einer stengelkristallinen Kornstruktur.

Vergleicht man die Haltbarkeit mehrerer Punktschweißverbindungen an den gleichen Materialien, so ist diese in erster Näherung von der Linsengröße abhängig. Eine Variation der Linsengröße lässt sich zum Beispiel durch eine Regelung des Schweißstroms bei sonst gleichen Prozessparametern realisieren. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht für die Grenzfälle besonders kleiner und großer Linsen gültig [143]. Die Qualität von Punktschweißverbindungen lässt sich grob in drei Klassen einteilen:

**Kleberverbindungen:** Durch einen zu geringen Schweißstrom bzw. eine zu geringe Schweißzeit konnte sich die Schweißlinse nicht vollständig ausbilden. In Abbildung 2.14 A ist ein Schliffbild einer solchen Verbindung dargestellt. Es lässt sich deutlich die sehr kleine Schweißlinse mit einem Linsendurchmesser von  $d = 1,9$  mm bei einer Blechdicke von  $t = 1$  mm erkennen. Der Bereich neben der Linse wurde durch den Anpressdruck der Elektroden nahezu formschlüssig zusammengepresst. Diese Verbindungen haben eine stark verminderte Belastbarkeit, oft trägt die Verbindung wenig mehr als das Eigengewicht der Bleche. Sie stellen das gravierendste Fehlerbild dar.

**Optimale Parameter:** Bei optimalen Schweißparametern lässt sich eine Linsengröße von  $d = 5 \text{ mm} \cdot \sqrt{t/1 \text{ mm}}$  erreichen, für den gezeigten Fall mit einer Blechdicke von  $t = 1$  mm also  $d = 5$  mm. Die Schweißlinse ist voll ausgebildet und hat eine hohe Tragfähigkeit (siehe Abbildung 2.14 B). Die Schweißparameter liegen weit genug von der Spritzergrenze (s.u.) entfernt.

**Spritzerbildung:** Bei zu hohen Schweißströmen bzw. zu langer Schweißzeit kommt es zu sogenannten Spritzern (siehe Abbildung 2.14 C). Das Aufschmelzen des Materials im Bereich der Schweißlinse ist immer auch mit einer Ausdehnung verbunden. Die Elektroden müssen den nötigen Gegendruck aufbauen, um das Schweißbad am Ort zu halten. Wird eine zu große Menge an Material aufgeschmolzen, ist dies nicht mehr möglich. Dann spritzt ein Teil des Schweißbads zwischen die Bleche. Da es hierbei zu einem Materialverlust kommt, nimmt die Tragfähigkeit der Punktschweißverbindung trotz größeren Linsendurchmessers wieder ab. Der Materialverlust lässt sich auch an dem größeren Elektrodeneindruck, also der Verminderung der Materialdicke an der Punktschweißverbindung selbst, erkennen.

Kleberverbindungen haben eine deutlich geringere Tragfähigkeit als solche mit Spritzern. Ein Punktschweißprozess sollte so gesteuert werden, dass einerseits genügend Energie eingebracht wird, um Kleberverbindungen sicher zu vermeiden, es andererseits aber auch nicht zu Spritzern kommt, wobei diese eher zu akzeptieren sind.

### 2.3.2 Qualitätssicherung von Punktschweißverbindungen

Die Qualitätssicherung von Punktschweißverbindungen ist ein Thema von außerordentlich großer wirtschaftlicher Relevanz. Dies soll kurz am Beispiel des Automobilbaus verdeutlicht

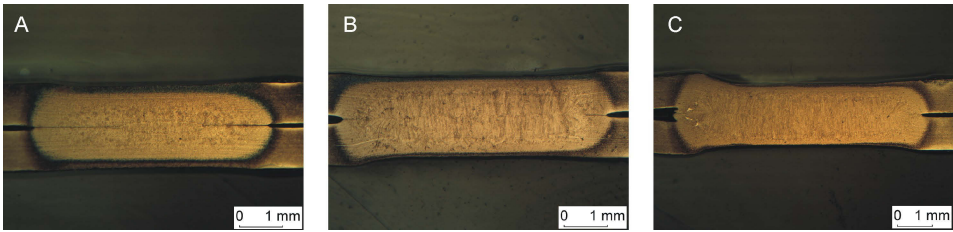


Abbildung 2.14: Metallografische Schlitze an Proben, die mit unterschiedlichen Schweißparametern hergestellt wurden, um typische Fehlerbilder zu erhalten. A: Klebverbindung, Linsendurchmesser  $d = 1,9$  mm. B: Mit optimalen Parametern geschweißt,  $d = 5,0$  mm. C: Spritzergrenze,  $d = 6,2$  mm (Quelle: BAM 5.5).

werden: Informellen Informationen zufolge<sup>27</sup> liegen die Fehlerraten des Punktschweißprozesses bei über 10%. Es kann also davon ausgegangen werden, dass ein größerer Anteil der typischerweise mehr als 3000 Punktschweißverbindungen pro PKW-Karosserie [144] nicht notwendig sind, um die spezifizierte Tragfähigkeit zu erreichen. Ein gewisser Teil der zusätzlichen Punktschweißverbindungen ist aus Komfortgesichtspunkten wünschenswert, da sich so die Steifigkeit erhöht. Genaue Fakten zu Fehlerraten, Produktionszeiten und Kosten, sowie zum Einsatz unterschiedlicher Prüftechnik in der Industrie sind nicht öffentlich verfügbar, da sie in der Regel unter die Betriebsgeheimnisse fallen.

Nun ist die Fehlerrate von einer großen Anzahl von Einflüssen abhängig und zeitlich nicht konstant (siehe hierzu 2.3.1), sodass das Erreichen eines perfekt beherrschten Prozesses vor allem in Hinblick auf die kontinuierliche Weiterentwicklung im Bereich der eingesetzten Werkstoffe äußerst unwahrscheinlich erscheint.

Es wäre in jedem Fall wünschenswert, die Fehlerrate zu reduzieren. Wenn dies nicht möglich ist, wäre es von großem Vorteil, die Tragfähigkeiten der einzelnen Verbindungen zu kennen. Die Überprüfung des Schweißergebnisses kann entweder während (*in-situ*) oder nach dem Schweißen stattfinden (*ex-situ*) [145]. Hierbei muss zwischen zerstörender und zerstörungsfreier Materialprüfung sowie der Überwachung der Prozessparameter unterschieden werden. Die zerstörende Prüfung eignet sich immer nur als Referenzverfahren, da die geprüften Werkstücke keine Verwendung mehr finden können. Die Überwachung der Prozessparameter lässt sich als Spezialfall der ZfP verstehen. Da die ZfP prinzipiell an jedem ausgeführten Schweißpunkt durchführbar ist, lässt sich diese Methode mit zwei Zielen einsetzen:

- Verringerung der Anzahl benötigter Punktschweißverbindungen: Wenn alle fehlerhaften Punktschweißverbindungen bekannt sind, lässt sich die Tragfähigkeit der gesamten betrachteten Struktur sehr viel genauer bestimmen. Ließe sich beispielsweise jeder Schweißpunkt sukzessive nach dem Schweißen prüfen, könnte nach dem Erreichen der geforderten Tragfähigkeit das Einbringen weiterer Schweißpunkte gestoppt werden.

<sup>27</sup>Aus rechtlichen Gründen können für einen Teil der hier genannten Zahlen keine Quellen genannt werden.

- Optimierung des Schweißprozesses: Es lässt sich die Fehlerrate verringern, indem anhand der registrierten Fehler die Prozessparameter angepasst werden, sodass wieder das gewünschte Ergebnis erzielt wird.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich durch den Einsatz einer geeigneten Prüftechnik in einem typischen Einsatzszenario im Automobilbau die Anzahl der für die geforderte Festigkeit notwendigen Punktschweißverbindungen größenordnungsmäßig um 20% verringern ließe, was zu erheblichen Einspareffekten führen würde. Die wichtigsten Anforderungen an eine Prüftechnik, die eine 100%-Prüfung ermöglicht, ergeben sich aus dem vollautomatisierten Umfeld, in dem sie eingesetzt werden soll:

- Die typische Taktrate für Punktschweißverbindungen liegt in der Produktion um 1 Hz. Die Prüfgeschwindigkeit sollte in dieser Größenordnung liegen.
- Die Zugänglichkeit ist zwar, wenn Zangen zum Schweißen eingesetzt werden, von beiden Seiten gewährleistet, kann aber eingeschränkt sein. Dies sollte kein Problem für das Prüfverfahren darstellen.
- Wegen der schnellen Produktionszyklen sollten zur Prüfung keine weiteren Prozessschritte, wie z.B. das Aufbringen von Koppelmittel, notwendig sein.
- Die Prüfgeräte sollten wegen des industriellen Umfelds robust gegen Umwelteinflüsse, wie z.B. starke Beschleunigungen und Erschütterungen, sein.
- Um die Wartungskosten gering zu halten, sollten die Prüfgeräte optimalerweise keine Verschleißteile beinhalten.

Im Weiteren werden die kommerziell verfügbaren bzw. aus der Literatur bekannten Prüftechniken für Punktschweißverbindungen kurz erläutert, wobei besonders ausführlich auf die Entwicklungen auf dem Gebiet der thermografischen Prüfung eingegangen wird.

### 2.3.3 Zerstörende Prüfung von Punktschweißverbindungen

Es gibt unterschiedliche Ansätze der zerstörenden Prüfung an Punktschweißverbindungen. Zuerst sei hier die Präparation von Schliffen als Standardmethode der Metallografie genannt [146]. Hierzu wird die Probe durch die Schweißlinse hindurch zerteilt. Die Schnittfläche wird dann geschliffen und zur Kontraststeigerung chemisch angeätzt. So lassen sich unter einem Lichtmikroskop die Korngrenzen und die unterschiedlichen vorhandenen Phasen erkennen. Dies macht eine Bestimmung der Größe der Schweißlinse sowie der Wärmeeinflusszone möglich. Üblicherweise werden die Schliffe senkrecht zur Oberfläche ausgeführt [147]. Hierbei kommt es zu einer gewissen Unsicherheit in der Größenbestimmung der Schweißlinse, da es nicht erkennbar ist, ob der Schliff wirklich genau durch den Mittelpunkt der Schweißlinse führt. Zudem kann es auch zur Ausbildung von nicht rotations-symmetrischen Schweißlinsen kommen. Es ist auch möglich, Schliffe parallel zur Oberfläche zu präparieren. Sie erlauben dann eine Bestimmung der Linsenform in einer Ebene parallel zu den geschweißten Blechen, sind aber mit größerem präparativen Aufwand verbunden.

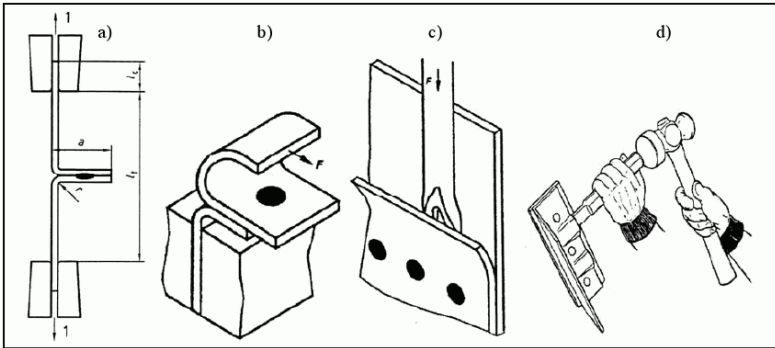


Abbildung 2.15: Übersicht über die zerstörenden Werkstattprüfverfahren aus Merkblatt DVS 2916-1:2009-01. a: Schälversuch, b: Abrollversuch, c: Meißelprobe, d: Keilprobe. (Quelle: DVS 2916-1:2009-01.)

Im industriellen Einsatz kommen regelmäßig die sogenannten Werkstattprüfverfahren zum Einsatz (siehe Abbildung 2.15). Zu nennen sind hier Schäl- und Abrollversuch sowie Meißel- und Keilprobe [148]. All diese Verfahren basieren auf der gewaltsamen mechanischen Trennung der Punktschweißverbindung mit anschließender Beurteilung des Bruchbildes (siehe Abbildung 2.16). Je nachdem, ob es zu einem Scherbruch oder einem Ausknöpfbruch kommt, lassen sich erste Aussagen über die Festigkeit treffen – beim Ausknöpfbruch kann von einer höheren Festigkeit des Schweißpunkts selbst ausgegangen werden. Aus der zerstörten Probe kann dann mittels Messschieber (mit bestimmter Schneidengeometrie nach ISO 10447) oder Messlupe der Punktdurchmesser ermittelt werden. Als Punktdurchmesser wird hierbei der Durchmesser der Bruchfläche bzw. des Butzens, also des aus dem Blech aufgeknöpften Metallstückes, bezeichnet [149]. Das Verhältnis von Punkt- zu Linsendurchmesser beträgt etwa 1,15, der genaue Wert ist jedoch von Schweißbedingungen, Blechdicke, Werkstoff, Elektrodenspitze und auch der Art der Prüfung abhängig [136].

Die tatsächliche Tragfähigkeit der Punktschweißverbindungen lässt sich mittels sogenannter Laborprüfverfahren ermitteln. Hierbei werden speziell für diesen Zweck präparierte Proben mit definierten Abmessungen unter reproduzierbaren Bedingungen bei gleichzeitiger Messung der relevanten Parameter (z.B. Drehwinkel und Drehmoment beim Torsionsversuch) zerstört. Große Bedeutung haben hierbei

- die Scherzugprüfung (DIN EN ISO 14273),
- die Schälzugprüfung (DIN EN ISO 14270),
- die Kopfzugprüfung (DIN EN ISO 14272) sowie
- die Torsionsprüfung (DIN EN ISO 17653).

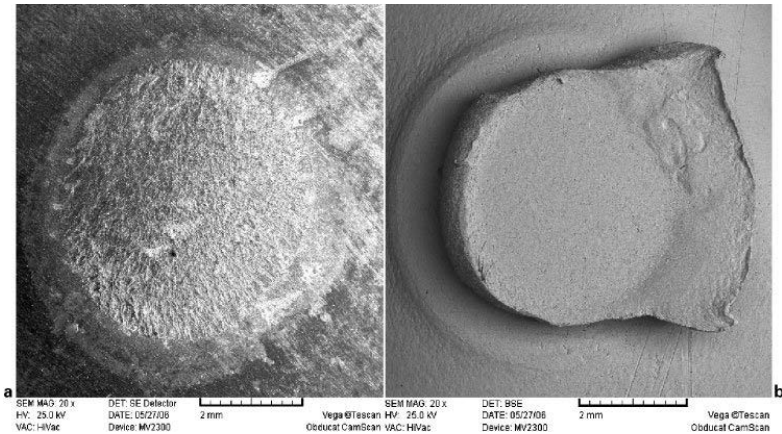


Abbildung 2.16: Typische Bruchbilder von Punktschweißverbindungen aus [143]. Links ein Scherbruch, bei dem die Trennung an der Fügestelle erfolgt ist. Anhand des Gefügebilds lässt sich der Punktdurchmesser ausmessen. Rechts ein Ausknöpfbuch, bei dem die Fügestelle noch intakt ist. Der hervorstehende Teil wird als Butzen bezeichnet. Hier kann der Punktdurchmesser mittels Messschieber bestimmt werden.

Beispielhaft sei hier kurz die Torsionsprüfung erläutert, da sie in dieser Arbeit als Referenzverfahren genutzt wird. Es werden zwei Bleche mit einer Kantenlänge größer dem vierfachen Punktdurchmesser mit einem Schweißpunkt mittig verbunden. Mit einer geeigneten Vorrichtung wird nun ein Blech gegen das andere verdreht, wobei Drehmoment und Drehwinkel aufgezeichnet werden, die sich analog zu einem Kraft-Dehnungs-Diagramm interpretieren lassen. Zusätzlich erfolgt eine Bewertung des Bruchbildes. So kann eine Aussage über die Verformungsfähigkeit der Verbindung getroffen werden.

### 2.3.4 Prozessüberwachung beim Punktschweißen

Punktschweißanlagen in modernen vollautomatisierten Produktionsprozessen werden üblicherweise digital gesteuert und ermöglichen die Überwachung und das Abspeichern von vielfältigen Parametern. Die werkstückbedingte Haupteinflussgröße ist hierbei der elektrische Widerstand. Meist wird in den Anlagen der Strom während des Schweißprozesses auf einen konstanten Wert geregelt, sodass nur die Spannung aufgenommen werden muss. Aus den aufgenommenen Daten können dann Rückschlüsse auf die Qualität der Schweißverbindungen gezogen werden. Kommt z.B. durch einen unzulässig hohen elektrischen Widerstand kein Stromfluss zustande, so kann sich auch keine Schweißlinse ausbilden. Dieses Vorgehen wurde schon früh in der Literatur vorgeschlagen [150], es können aber auch beliebige andere Einflussgrößen überwacht werden [151]. Zur Auswertung der gesammelten Daten kommt eine hochentwickelte Algorithmik zum Einsatz, z.B. wurden **Fuzzy-Logic-** [152] und Klassifikationsbaum-Methoden [141, 153] vorgeschlagen.

Die Prozessüberwachung ist heute Stand der Technik, da sie erfolgreich zur Qualitätssicherung beiträgt. Im Vergleich zu den ZfP-Methoden kann diese Technik mit geringerem Aufwand installiert werden. Außerdem wird hierbei prinzipbedingt kein zusätzlicher Schritt im Produktionsprozess notwendig. Das Problem bei dieser Methode ist jedoch immer, dass die Parameter in hohem Maße von den jeweilig eingesetzten Schweißanlagen abhängig sind, aber eine Identifikation und Überwachung aller möglichen Einflussgrößen schlicht nicht realisierbar ist. Außerdem hängt insbesondere der sich ergebende elektrische Widerstand stark von der Form der Elektrodenspitzen ab und unterliegt so Änderungen mit zunehmender Abnutzung der Elektroden [141].

### 2.3.5 Zerstörungsfreie Prüfung von Punktschweißverbindungen

Als Referenzmethoden sind hier zunächst die radiologischen Verfahren zu nennen. Neben den klassischen ZfP-Anwendungen, die also die Erkennung von Ungängen zum Ziel haben [154], werden hier auch Beugungsmethoden zur Bestimmung der Art der metallischen Phasen sowie der inneren mechanischen Spannungen verwendet [155]. Trotz der vielfältigen erfolgreichen Anwendung in Laborumgebungen ist die Adaption von radiologischen Prüfverfahren zur industriellen 100%-Prüfung vor allem wegen des notwendigen Strahlenschutzes mit großem Aufwand verbunden.

Ein größeres Potential für den industriellen Einsatz hat die Ultraschallprüfung. Hier werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt:

- Der Prüfkopf wird zur *in-situ*-Prüfung in die Schweißelektrode integriert.
- Die Prüfung erfolgt getrennt vom Schweißprozess.

Für die *in-situ*-Prüfung mit Ultraschall lässt sich ausnutzen, dass Flüssigkeiten aus physikalischen Gründen keine Transversalwellen<sup>28</sup> übertragen können. So lässt sich die Formation der Schweißlinse, die mit einem Aufschmelzen verbunden ist, leicht und sicher beurteilen. Obwohl ein Gerät für ein solches Verfahren bereits 1987 patentiert wurde [156], sind in Schweißzangen integrierte Ultraschallsensoren noch immer Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion [157, 158]. Die Entwicklung geht nun zu Typen mit Sensor-Arrays, die eine bessere Beurteilung der räumlichen Ausdehnung des Schweißbades ermöglichen sollen [159]. Ein großes Problem stellt bei all diesen Designs die Hitzeempfindlichkeit der verwendeten Piezo-basierten Ultraschallsensoren und -emitter dar. Es gibt auch Ansätze, über eine hinreichend schnelle Messung der Temperatur der Schweißelektrode Rückschlüsse auf die erreichte Qualität zu ziehen [160].

Die *in-situ*-Prüfung hat den großen Vorteil, dass nur ein Arbeitsschritt notwendig ist. So werden Zeit und Kosten gespart. Außerdem lässt sich eine direkte Rückkopplung mit dem Schweißprozess realisieren, um so die Ausbeute an fehlerfreien Verbindungen erhöhen zu können. Der Hauptnachteil liegt in der zwingend notwendigen Veränderung der Schweißzange. Von dieser ist nun aber die Prozessstabilität stark abhängig (siehe 2.3.1). Daher stellt

---

<sup>28</sup>Auch als Scherwelle bezeichnet. Welle, bei der die Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erfolgt.



die Einführung einer solchen baulichen Veränderung in einen etablierten Produktionsprozess stets ein erhebliches Risiko dar.

Für die nachträgliche Ultraschallprüfung gibt es sehr vielfältige Ansätze. So werden Systeme mit einem einzelnen kontaktierenden Prüfkopf kommerziell vertrieben [161, 162, 163, 164]. Nachteilig an diesen Systemen ist jedoch, dass sie bisher ausschließlich manuell bedient eingesetzt werden können. Mit luftgekoppelten Ultraschall-Array-Systemen wurden erste vielversprechende Resultate erzielt [165]. Ein auf EMAT<sup>29</sup> basiertes Verfahren wurde 2001 patentiert [166]. Eine Übersicht der thermografischen Verfahren zur Prüfung von Punktschweißverbindungen findet sich im Unterabschnitt 2.2.6. Außerdem wurden auch weitere Ansätze, wie z.B. Wirbelstrommethoden, verfolgt [167]. Doch konnte sich bis zum jetzigen Zeitpunkt noch kein Verfahren als Standard in der Industrie durchsetzen, weshalb auf diesem Gebiet noch ein großer Forschungsbedarf besteht.

### 2.3.6 Risse

Offene Oberflächenrisse sind ein wichtiger Hinweis auf ein eventuell bevorstehendes strukturelles Versagen von Bauteilen. Es ist daher von großer Bedeutung, solche Schäden rechtzeitig zu detektieren und zu charakterisieren. Durch die zunehmende Verwendung hoch- und höherfester Stähle mit niedriger Duktilität in den letzten Jahren ist die Lösung dieser Prüfaufgabe noch wichtiger geworden.

Oft enthalten Bauteile bereits Herstellungsfehler. Besonders bei Schweißnähten sind Oberflächenrisse ein häufiges Fehlerbild. Typisch sind hier Heiß- und Kaltrisse [133]. Außerdem sind die Fügestellen konstruktionsbedingt oft besonders hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt, was z.B. in der Bildung von Ermüdungsrissen gipfeln kann. Nicht zuletzt wegen der rasanten Entwicklungen im Bereich der im Automobilbau verwendeten Werkstoffe ist zudem auch die Rissbildung beim Widerstandspunktschweißen wieder ein Gegenstand aktueller Forschung [168].

Viele der klassischen ZfP-Methoden sind zur Risserkennung geeignet. Die Farbeindring- und Magnetpulverprüfung werden beispielsweise seit Jahrzehnten mit großem Erfolg regelmäßig und auch automatisiert eingesetzt [169]. Bei beiden Verfahren werden Verbrauchsmaterialien auf die Oberfläche aufgetragen. Die Risstiefe ist prinzipiell nicht zugänglich. Auf die Magnetpulverprüfung wird im folgenden Unterabschnitt gesondert eingegangen, da sie im Abschnitt 5.1 als Referenzverfahren zum Einsatz kommt. Zur Bestimmung der geometrischen Parameter von Oberflächendefekten ist die Röntgen Computer Tomografie (CT) teilweise sehr gut geeignet. Auch mit der Ultraschall- (UT) und Wirbelstromprüfung (ET) lassen sich in vielen Anwendungsfällen gute Aussagen über die Größe und Orientierung von Fehlstellen treffen.

Mit der CT lassen sich echte Volumenprüfungen von höchster Genauigkeit durchführen und somit auch Risse detektieren [170]. Ein entscheidender Nachteil ist hierbei aber, dass Zeitaufwand und Kosten besonders für hochauflösende Tomogramme sehr hoch sind. So können mit einer Anlage der BAM 8.3 z.B. Risse ab einer Rissklaffung von 1 nm mit einer

---

<sup>29</sup>Von engl. *Electromagnetic Acoustic Transducer*.

Ortsauflösung von 200 nm vermessen werden. Allerdings ist diese Technik wegen der hohen Ansprüche an die Röntgenquelle auf ein Synchrotron als Strahlungsquelle angewiesen<sup>30</sup>.

Auch die beiden anderen klassischen ZfP-Methoden, UT [171] und ET [172], haben nicht ohne Grund weite Verbreitung auch bei der Risserkennung erfahren. Mit diesen Methoden lassen sich eine Vielzahl von Prüfproblemen flexibel und kostengünstig abdecken. Doch es wird immer ein direkter Zugang zur Oberfläche benötigt. Außerdem kann ET nur bei elektrisch leitfähigen Materialien eingesetzt werden. Wenn bezüglich ihrer elastischen Eigenschaften anisotrope Materialien untersucht werden – als klassisches Prüfproblem seien hier austenitische Schweißnähte genannt – gestaltet sich die Beurteilung der Anzeigen der UT als sehr schwierig und ist nach wie vor Gegenstand aktueller Forschung [173]. Genau wie die CT ist auch UT den Volumenverfahren zuzuordnen. Hier können in gut durchschallbaren Materialien Reflektoren von einem Millimeter Durchmesser in einem Meter Tiefe sicher detektiert werden [174]. Die Thermografie als Oberflächenverfahren ist hingegen im wesentlichen auf Defekte beschränkt, deren Tiefe im Material nicht größer als ihre Ausdehnung ist [3].

### Magnetpulverprüfung

Als Magnetpulverprüfung bezeichnet man ein Verfahren zum Nachweis von Oberflächenrisse in ferromagnetischen Bauteilen. Für die Prüfung wird das Werkstück aufmagnetisiert, d.h. die vorhandenen permanenten magnetischen Momente werden gleichmäßig ausgerichtet. Hierzu wird häufig eine sog. Magnetprüfbank verwendet. Diese kann das Werkstück in zwei Modi aufmagnetisieren: Bei der Magnetdurchflutung wird ein magnetischer Kreis durch das Werkstück geschlossen und dieses somit entlang der Durchflutungsrichtung magnetisiert. Bei der Stromdurchflutung wird ein hoher elektrischer Strom durch das Werkstück geleitet. Dies führt nach dem Ampèreschen Gesetz zur Ausbildung von einem Magnetfeld orthogonal zur Stromflussrichtung um den Stromfluss herum. Die Richtung der resultierenden Oberflächenmagnetisierung ist genau normal zu der bei der Magnetdurchflutung erzielten Richtung. So können bei einmaligem Einspannen des Werkstückes Risse in jeglicher Orientierung nachgewiesen werden.

Wenn Oberflächenrisse bzw. oberflächennahe Risse oder nicht ferromagnetische Einschlüsse senkrecht zu den Feldlinien ausgedehnt sind, bildet sich an der Oberfläche ein Streufeld aus. Der physikalische Grund hierfür ist, dass die magnetische Permeabilität  $\mu_r$  von Ferromagneten um mehrere Größenordnungen höher ( $\mu_r \ll 1$ , Weicheisen  $\mu_r = 5000 \cdot \cdot 20000$ ) als die von Para- bzw. Diamagneten ist (Luft:  $\mu_r \approx 1$ ) [51]. Dadurch wird der magnetische Kreis gestört. Der größte Teil des Feldes läuft zwar weiterhin im Bauteil und sogar durch den klaffenden Riss hindurch. In diesem Verhalten unterscheiden sich magnetische von elektrischen Kreisen, da Luft genau wie Vakuum leitfähig für magnetischen Fluss ist. Ein kleiner Teil der Feldlinien tritt aber als Streufeld aus der Oberfläche des untersuchten Werkstückes aus.

---

<sup>30</sup>BAM-Homepage, [http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen\\_medien/unikale\\_pruef/upe\\_807\\_de\\_8-5.pdf](http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen_medien/unikale_pruef/upe_807_de_8-5.pdf).

Für den Grenzfall eines Risses mit verschwindender Klaffung entspricht der magnetische Fluss an der Oberfläche direkt über dem Riss wegen der Quellenfreiheit des Magnetfeldes genau dem Fluss im Material. So können lokal sehr hohe Feldstärken erreicht werden. Die gleiche Geometrie wird für die Joche in Magnetköpfen zum Beschreiben von Magnetbändern genutzt.

Das Streufeld lässt sich nun durch das Aufbringen eines geeigneten Prüfmittels optisch sichtbar machen. Die hierin enthaltenen magnetischen Partikel schließen den magnetischen Kreis an der Stelle der Fehlstellen. Mit anderen Worten verringern sie wegen ihrer im Vergleich zur Luft deutlich höheren magnetischen Permeabilität die Ausdehnung des Streufeldes. Dadurch wird dessen Energie herabgesetzt und die resultierende Kraft hält die Partikel am Ort der Fehlstellen fest. Die magnetischen Partikel sind dauerhaft mit fluoreszierenden Farbpigmenten verbunden, die eine deutliche Erkennbarkeit der Anzeigen unter UV-Licht ermöglichen.

Die Magnetpulverprüfung wird in großen Umfang standardmäßig in der industriellen Produktion und Wartung durchgeführt. Ihr Einsatz ist daher in zahlreichen Normen geregelt. Neben dem allgemeinen Verfahren [175, 176, 177, 178, 179] ist auch die Anwendung in zahlreichen Gebieten [180, 181, 182, 183], insbesondere auch bei der Prüfung von Schweißverbindungen [184], geregelt.

In der Serienfertigung kommt die Magnetpulverprüfung häufig automatisiert zum Einsatz. Im ersten Schritt wird dabei nur das Aufmagnetisieren und das Aufbringen des Prüfmittels maschinell durchgeführt. Es existieren aber auch vollautomatische Anlagen, bei denen das Ergebnisbild mittels Kamera aufgenommen und über eine Bildverarbeitungsroutine beurteilt wird. Solche Anlagen kommen z.B. in der Automobilindustrie [185, 186] oder im Eisenbahnsektor [187] zum Einsatz.

Einen Schritt weiter gehen Methoden, die das Streufeld direkt mittels eines Magnetsensors nachweisen, sodass kein Prüfmittel mehr eingesetzt werden muss. Hier scheinen besonders auf dem GMR<sup>31</sup>-Effekt basierende Sensoren sehr vielversprechend zu sein [188, 189, 190]. Ein großer Vorteil dieser Herangehensweise liegt darin, dass das Magnetfeld im Gegensatz zum rein qualitativen Nachweis bei der Magnetpulverprüfung quantitativ vermessen werden kann. Dies macht eine geometrische Charakterisierung der gefundenen Defekte möglich [191]. Allerdings sind alle Streufeldmethoden, genau wie die Magnetpulverprüfung, auf den Einsatz an ferromagnetischen Werkstoffen beschränkt.

---

<sup>31</sup>Von engl. *giant magnetoresistance*, dt. Riesenmagnetowiderstand.

## Kapitel 3

# Versuchseinrichtungen

In diesem Kapitel werden die für die in dieser Arbeit gezeigten aktiven thermografischen Prüfungen verwendeten Versuchseinrichtungen vorgestellt. Sie bestehen aus Infrarot-Kameras zur orts aufgelösten Temperaturmessung und Anregungsquellen zum Einbringen der Wärme.

### 3.1ameratechnik

Für die in dieser Arbeit präsentierten Messungen wurden drei unterschiedliche Infrarot-(IR)-Kameras genutzt. Die beiden universell einsetzbaren Kameras werden im Folgenden vorgestellt. Die zusätzlich genutzte Kamera ist fest in den Versuchsaufbau der sog. Thermoschockanlage integriert und wird daher zusammen mit dieser beschrieben (siehe Unterabschnitt 3.2.2).

#### 3.1.1 InSb-basierte Infrarot-Kamera

Als stationäres Thermografiesystem kommt in der BAM eine Anlage der Firma Thermosensorik zum Einsatz (siehe Abbildung 3.1). Zentrales Element des Systems ist die Thermografiekamera „InSb 640 SM“. Hierbei handelt es sich um einen Kamerakopf ohne Bedienelemente, der nur zusammen mit einem Steuerrechner eingesetzt werden kann. Er verfügt über die folgenden grundlegenden Eigenschaften:

- Detektortyp: Auf 77 K gekühltes Indiumantimonid-(InSb)-FPA<sup>1</sup>.
- Detektorformat: 640 × 512 Pixel mit der Möglichkeit Ausschnitte (*subarrays*) ab einer Größe von 16 × 4 Pixeln zur Erhöhung der Bildwiederholrate zu wählen.
- Pixelgröße 15 × 15 μm<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Von engl. *focal plane array*, dt. etwa „Anordnung in der Brennebene“, allgemein für zweidimensionale Sensoranordnungen, gebräuchlich für bildgebende Infrarotdetektoren.



Abbildung 3.1: Foto der InSb-basierten Thermografekamera der BAM 8.4, Kurzname INA.

- Spektralbereich: 1,0  $\mu\text{m}$  bis 4,8  $\mu\text{m}$ .
- Integrationszeit  $T_I$  von 1  $\mu\text{s}$  bis 10 ms.
- Integrationsmodus: *snapshot*<sup>2</sup>-Modus mit den Betriebsarten ITR<sup>3</sup> und IWR<sup>4</sup>.
- Bildwiederholfrequenz: 100 Hz im Vollbildmodus, bis 1000 Hz im *subarray*-Modus.
- Rauschäquivalente Temperaturdifferenz (NETD<sup>5</sup>) bei 20°C kleiner als 0,02 K.
- Digitale Auflösung der A/D Wandlung: 14 Bit.
- Gewicht: ca. 5 kg.

In der Kamera ist ein motorisiertes Filtrerrad zur Aufnahme von 6 Filtern installiert. Für die in dieser Arbeit gezeigten Messungen kommt standardmäßig ein Tiefpass- bzw. Langpassfilter mit einem Transmissionsbereich von 3788 nm bis 6998 nm zum Einsatz. Da die Temperaturen der untersuchten Proben hier in der Regel deutlich unter 100°C liegen und somit kaum im Bereich unterhalb von etwa 4  $\mu\text{m}$  abstrahlen (vergleiche Abbildung 2.1 auf Seite 4), lassen sich auf diese Weise störende Einflüsse unterdrücken, wie sie z.B. durch direkte Reflexion der Strahlung aus Halogenlampen entstehen können, ohne die Sensitivität im betrachteten Temperaturbereich negativ zu beeinflussen. Die Kamera verfügt über ein

<sup>2</sup>Alle Pixel werden zu einem Zeitpunkt ausgelesen.

<sup>3</sup>Von engl. *integrate then read*. Das Auslesen der Werte der einzelnen Pixel erfolgt nach der Aufnahme der Intensitätswerte.

<sup>4</sup>Von engl. *integrate while read*. Das Auslesen der Werte der einzelnen Pixel erfolgt während der Aufnahme der Intensitätswerte, hierfür sind zwei Speicherkondensatoren pro Pixel notwendig.

<sup>5</sup>Von engl. *noise equivalent differential temperature*.

Bajonett-System zum Wechsel der Objektive. Folgende Objektive wurden in dieser Arbeit eingesetzt:

- Brennweite  $f = 50$  mm, Öffnungsverhältnis  $F/1,5$ .
- Brennweite  $f = 100$  mm, Öffnungsverhältnis  $F/2,0$ .

Die Kamera wurde nach VDI/VDE 3511 temperaturkalibriert [30]. In die Berechnung der Temperaturwerte aus den vom Detektor aufgenommenen Intensitätswerten fließen dabei die Messwerte von Temperatursensoren im Kameragehäuse, in den jeweiligen Objektiven, sowie an den einzelnen Filtern ein. Die Umwandlung in Temperaturdaten muss jeweils nach der Messung erfolgen und ist nur bei Aufnahmen im ITR-Modus möglich, was die Bildwiederholrate im Vollbildmodus auf 93 Hz herabsetzt.

Der Detektor wird mittels eines Stirling-Kühlers gekühlt. Dadurch werden Vibrationen auf das Kameragehäuse, das Objektiv und insbesondere auch die Aufhängung des Detektors übertragen, was auch bei fester Einspannung der Kamera zu einem Verwackeln des Bildes um ca. 2 Pixel führt und dadurch die erreichbare Auflösung begrenzt.

Die maximale Aufnahmedauer ist nur durch den Speicherplatz auf dem verwendeten RAID<sup>6</sup>-System limitiert. Es wird ein einfaches Binärdaten-Format verwendet, was eine quantitative Auswertung der Daten mit eigener Software möglich macht. Herstellerseitig wurde eine Möglichkeit zur Ansteuerung von Anregungsquellen über digitale Signale auf TTL-Pegel und analoge Signale von 0 V bis 5 V integriert. Hier ist jedoch nur eine zeitliche Genauigkeit gegeben, die der Aufnahmedauer einiger Einzelbilder entspricht. Der Steuerrechner ist zusammen mit dem Netzteil für die Kamera, dem Steuergerät für die Ansteuerung externer Quellen und einem 220 V-Dimmer zur Ansteuerung von ohmschen Lasten bis 16 A wie z.B. Halogenstrahlern in einem 19"-Rack eingebaut.

### 3.1.2 Mikrobolometer Infrarot-Kamera

Als mobiles Thermografiesystem wird in der BAM eine Thermografiekamera der Fa. Infracam, Modell „VarioCAM hd“, eingesetzt. Diese Kamera ähnelt von der Bauform her einer Videokamera für Privatanwender (siehe Abbildung 3.2). Sie ist mit einem Sucher, einer schwenkbaren Anzeige und vielfältigen Bedienelementen ausgestattet. Im Akkubetrieb lässt sie sich autark verwenden, hierbei können Einzelbilder auf einer Speicherkarte abgelegt werden. Für die Aufnahme von Sequenzen ist ein Steuerrechner erforderlich. Da die Kamera über eine Standard-Firewire-Schnittstelle verfügt, eignet sich hierzu ein handelsübliches Notebook. Die Kamera verfügt über folgende Eigenschaften:

- Detektortyp: Ungekühltes Mikrobolometer FPA.
- Detektorformat:  $640 \times 480$  Pixel.
- Pixelgröße  $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ .

---

<sup>6</sup>Von engl. *redundant array of independent disks*, dt. „Redundante Anordnung unabhängiger Festplatten“.



Abbildung 3.2: Foto der Mikrobolometer-basierten Thermografiekamera der BAM 8.4, Kurzname INA.

- Spektralbereich: 7,5  $\mu\text{m}$  bis 14  $\mu\text{m}$ .
- Bildwiederholfrequenz: 50 oder 60 Hz.
- Kalibrierter Temperaturmessbereich:  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $1200^{\circ}\text{C}$ .
- NETD bei  $30^{\circ}\text{C}$ : kleiner als 0,05 K.
- Digitale Auflösung der A/D Wandlung: 16 Bit.
- Gewicht: 1,5 kg.

Auch diese Kamera ist mit einem Bajonettsystem für den Anschluss von Objektiven ausgestattet. Es stehen Wechselobjektive mit Brennweiten von  $f = 12,5\text{ mm}$ ,  $f = 25\text{ mm}$  und  $f = 50\text{ mm}$  zur Verfügung.

Da der verwendete Mikrobolometer-Sensor einem starken Temperaturdrift unterliegt, verfügt die Kamera über eine Vorrichtung, die eine Referenzfläche bekannter Temperatur automatisch in den Strahlengang einfahren kann. Hierüber wird automatisch eine pixelweise Korrektur des Temperaturdrifts vorgenommen. Standardmäßig wird diese Kalibrierung einmal pro Minute ausgeführt. Während der Kalibrierung können für ca. 2 s keine Messdaten aufgenommen werden. Der Sensor wird im sog. *rolling-frame*-Verfahren ausgelesen. Hierbei werden sukzessive die einzelnen Zeilen ausgelesen. Es kann also nie ein gesamtes Bild zu einem einzelnen Zeitpunkt aufgenommen werden. Dies entspricht dem Auslesemodus bei röhrenbasierten Kameras.

Durch diese Eigenschaften lässt sich diese Kamera nur in sehr begrenztem Umfang für die Beobachtung von zeitkritischen Prozessen einsetzen. Bei längeren Aufnahmen sollten die typischen Zeitkonstanten über 2 s liegen, sodass durch die periodische Rekalibrierung keine Daten verloren gehen. Bei kurzen Aufnahmen, bei denen auf eine Rekalibrierung verzichtet werden kann, sollten die Zeitkonstanten groß genug sein, damit es keine Auswirkungen hat,

dass die Aufnahmezeitpunkte der Einzelpixel eines Bildes um bis zu 50 ms auseinander liegen.

### 3.2 Anregungsquellen

In diesem Abschnitt sollen die wichtigsten Charakteristika der verwendeten Anregungsquellen aufgeführt werden.

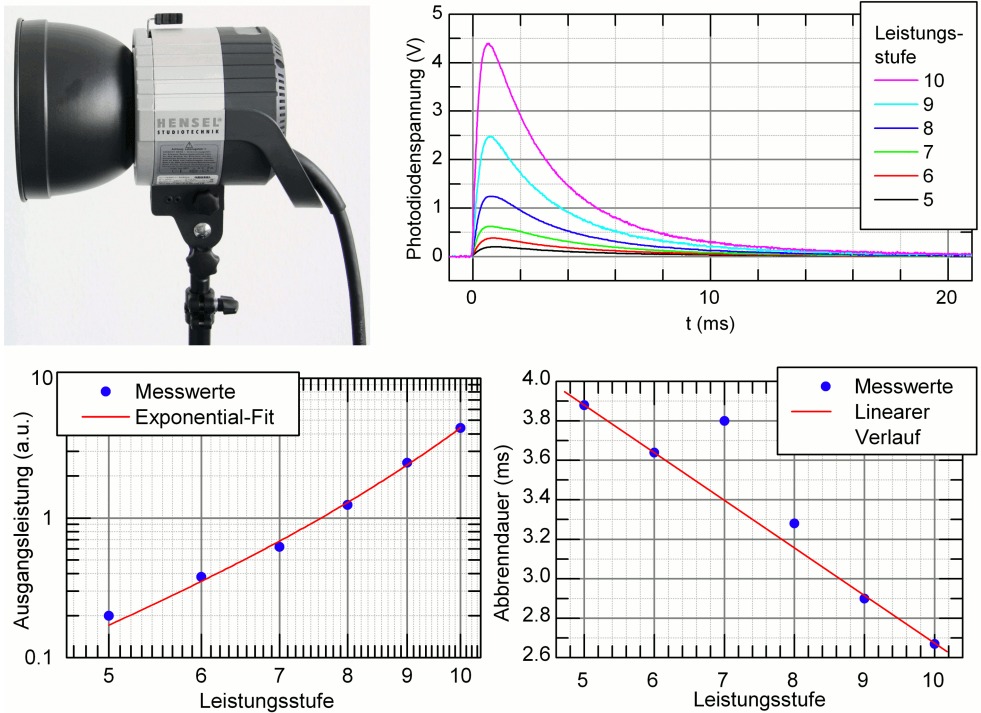


Abbildung 3.3: Links oben: Die verwendete Blitzlampe. Rechts oben: Zeitliches Verhalten der Blitzlampe für unterschiedliche Leistungsstufen. Dargestellt ist die Spannung einer Si-Photodiode, die sich proportional zur abgestrahlten Intensität im Wellenlängenbereich von 600 nm bis 1000 nm verhält. Daraus abgeleitet ist unten links die Ausgangsleistung und rechts die Abbreindauer gegen die gewählten Leistungsstufe aufgetragen.



### 3.2.1 Blitzlampen

Zur pulsformigen Anregung kommen kommerzielle Blitzlampen aus dem Fotobereich des Typs „EH Pro 6000“ der Fa. HENSEL Studioteknik zur Anwendung (siehe Abbildung 3.3). Das Spektrum einer Blitzlampe und die Intensität des Blitzes hängt ursächlich mit der Stärke des eingebrachten elektrischen Stroms zusammen. Je höher der Strom ist, desto höher ist die Intensität und desto kurzwelliger sind die spektralen Anteile. Die Blitzlampe emittiert ein dem Tageslicht ähnliches Spektrum. Die Farbtemperatur<sup>7</sup> wird mit 5000 K, die Energie pro Puls wird vom Hersteller mit 6 kJ angegeben. Dabei handelt es sich um die vom Blitzgenerator ausgangsseitig bereitgestellte elektrische Energie. Sie lässt sich in 51 Schritten von Leistungsstufe 5 bis 10 regeln.

Zur Charakterisierung wurde die Blitzlampe mit einer im Bereich von 600 bis 1000 nm empfindlichen Si-Photodiode<sup>8</sup> vermessen (siehe Abbildung 3.3). Die Photodiode ist mit einer typischen Ansprechzeit von 14 ns mehr als ausreichend schnell für diesen Zweck. Es sind jedoch nur relative Messungen möglich, da die Photodiode nicht leistungskalibriert ist.

Die abgegebene Energie lässt sich von 6000 J bei Leistungsstufe 10 bis auf 187 J bei Leistungsstufe 5 absenken, wobei sich ein exponentieller Zusammenhang zwischen gewählter Stufe und abgegebener Energie ergibt. In Abbildung 3.3 ist das zeitliche Verhalten für unterschiedliche Leistungsstufen dargestellt. Die Abbrenndauer – der Abfall auf  $1/e$  nach dem Erreichen der maximalen Intensität – variiert von 2,7 ms bei Leistungsstufe 10 bis 3,9 ms bei Leistungsstufe 5 bei etwa linearem Zusammenhang.

Es muss jedoch beachtet werden, dass zusätzlich zur Strahlung im sichtbaren Bereich noch langwelligere thermische Strahlung ausgesendet wird. Die Ursache hierfür liegt hauptsächlich in der Erwärmung der Blitzlampe, sodass durch das gesamte Gehäuse Strahlung emittiert wird. Dieser als „thermisches Nachleuchten“ bekannte Effekt lässt sich jedoch gut mittels einer PMMA<sup>9</sup>-Scheibe als Filter unterdrücken, da diese im IR opak ist. Da jedoch der Absorptionskoeffizient gleich dem Emissionskoeffizienten ist, muss beachtet werden, dass die PMMA-Scheibe selbst im IR emittiert, sobald sie sich erwärmt hat.

---

<sup>7</sup>Nach DIN 5033 hat mittleres Sonnenlicht eine Farbtemperatur von 5500 K, die Sonne hat eine Oberflächentemperatur von ca. 5800 K.

<sup>8</sup>Fa. Thorlabs, Modell „DET36A/M“.

<sup>9</sup>Polymethylmethacrylat, umgangssprachlich als Acrylglas oder Plexiglas bezeichnet.

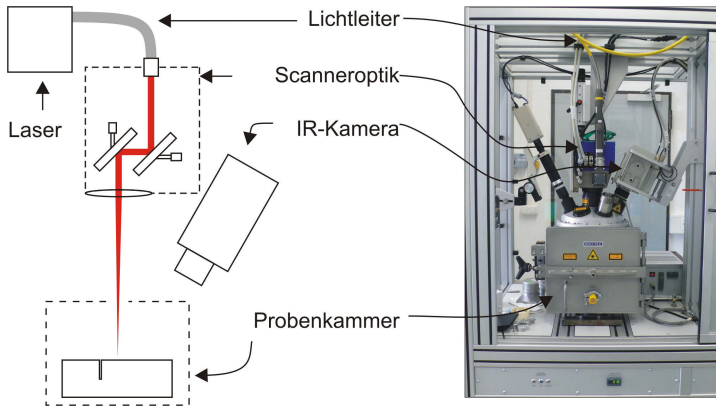


Abbildung 3.4: Skizze und Foto der Thermoschockanlage (TSA) der BAM.

### 3.2.2 Lasersysteme

Für die in dieser Arbeit gezeigten Experimente wurden zwei unterschiedliche Lasersysteme genutzt. Für Vorversuche wurde die bestehende sogenannte „Thermoschockanlage“ der BAM genutzt. Nachdem diese vielversprechend verlaufen waren, wurde ein speziell auf die Bedürfnisse der Anwendung in der aktiven Thermografie abgestimmtes neues System beschafft.

#### Thermoschockanlage (TSA)

Die Thermoschockanlage ist eine speziell für die reihenweise Durchführung von Thermoschockversuchen entwickelte Anlage. Bei diesen Versuchen werden keramische Proben mit einem Durchmesser von üblicherweise 20 mm bei einer Dicke von  $< 1$  mm mittels eines Lasers schnell erwärmt. Die dabei entstehenden hohen Temperaturgradienten zerstören die Proben. Aus den maximalen Temperaturgradienten lassen sich wichtige Kennwerte für die thermische Belastbarkeit der untersuchten Werkstoffe gewinnen. Weiterführende Angaben zu diesem Versuchstyp und auch zur Anlage liefern Pulz *et al.* in [192]. Die Anlage ist mit einem Nd:YAG<sup>10</sup>-Laser der Fa. Haas Laser, Modell „1006D“ samt Scanner-Kopf mit folgenden Kennwerten ausgestattet:

- Wellenlänge:  $\lambda = 1064$  nm.
- Maximale Leistung im Dauerstrichbetrieb:  $P = 1000$  W. Über den Steuerrechner in minimalen Schritten von ca. 1 W regelbar.

<sup>10</sup>Neodym-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat.

- Fokusbereich ca. 1,5 mm.
- Pilotlaser zur Justage im sichtbaren Spektrum.
- Arbeitsbereich  $26 \times 26 \text{ mm}^2$ .

Es ist eine IR-Kamera der Fa. Raytheon, Modell „Radiance HS“, fest installiert. Diese weist folgende Charakteristika auf:

- Detektortyp: Bei 77 K gekühltes InSb-FPA.
- Detektorformat:  $256 \times 256$  Pixel mit der Möglichkeit, zur Erhöhung von Bildwiederholrate und Empfindlichkeit jeweils 4 oder 16 Pixel zusammenzufassen (oft als *binning*-Modus bezeichnet).
- Spektralbereich: 3,0  $\mu\text{m}$  bis 5,0  $\mu\text{m}$ .
- Integrationszeit  $T_I$ : 2  $\mu\text{s}$  bis 14 ms.
- Bildwiederholrate: 250 Hz im  $2 \times 2$ -binnig-Modus.
- Digitale Auflösung der A/D Wandlung: 12 Bit.

Als Probenkammer dient eine Vakuum-Kammer der Fa. Maytech, die das Anlegen eines Feinvakuums von minimal  $7 \cdot 10^{-3}$  mbar ermöglicht. Außerdem wird durch diese ein Austreten von Laserstrahlung sicher verhindert. Dies ist von großer Bedeutung, da die Wellenlänge des Lasers nicht mehr im sichtbaren Bereich liegt, die Strahlung also unsichtbar ist, der Glaskörper des menschlichen Auges in diesem Bereich aber noch durchlässig ist. Gesteuert wird die gesamte Anlage über eine spezifische Software zur Durchführung von Thermoschockversuchen. Obwohl sich die TSA aufgrund der instrumentellen Ausstattung prinzipiell gut zur Verwendung im Gebiet der aktiven Thermografie eignet, ist die Versuchsdurchführung so teils großen Einschränkungen unterworfen. Diese konnten auch durch Erweiterungen der vorhandenen Software nicht komplett überwunden werden, weshalb als flexibles Lasersystem für die aktive Thermografie das im nächsten Teil beschriebene LAT beschafft wurde.

### Lasersystem für die aktive Thermografie (LAT)

Als Anregungsquelle für die aktive Thermografie steht ein kommerzieller fasergekoppelter Diodenlaser der Fa. Laserline, Typ „LDM 100-20“, zur Verfügung (siehe Abbildung 3.5). Zusammen mit der integrierten Stromversorgung ergeben sich folgende Kennwerte:

- Wellenlänge:  $\lambda = (910 \pm 20) \text{ nm}$ .
- Maximale Leistung am Faserende im Dauerstrichbetrieb:  $P = 100 \text{ W}$ . Über den Steuerrechner in Schritten von  $< 0,1 \text{ W}$  regelbar.

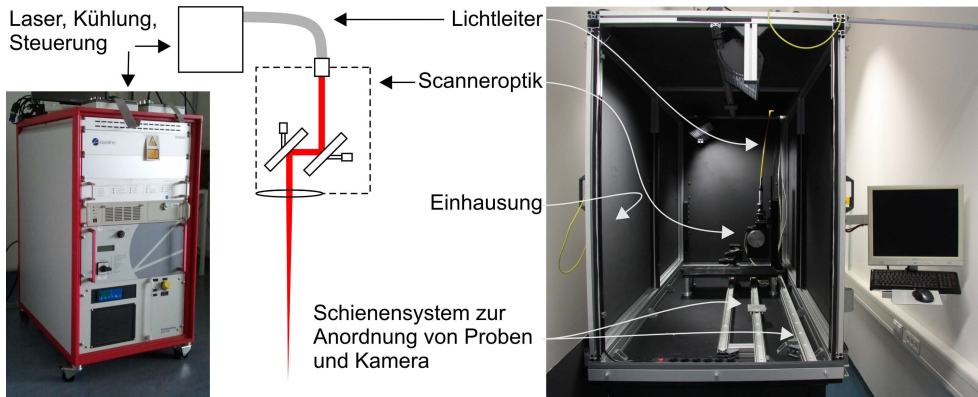


Abbildung 3.5: Skizze und Fotos des Lasersystems für aktive Thermografie (LAT) der BAM. Der Diodenlaser selbst samt Kühlung und Steuerung (links) befinden sich in einem vom Versuchsaufbau (rechts) getrennten Raum.

- Strahlparameterprodukt<sup>11</sup> (SPP):  $22 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ .
- Pilotlaser zur Justage, Wellenlänge  $\lambda = (650 \pm 50) \text{ nm}$ .
- Sicherheitsshutter mit einer Schaltzeit  $< 100 \text{ ms}$ .
- Reaktionszeit auf Trigger-Signal:  $< 0,1 \text{ ms}$ .
- Reaktionszeit bei analoger Ansteuerung für Leistungsänderung von 10% auf 90%:  $< 50 \mu\text{s}$ .

Der Laser ist über ein Lichtleitkabel an einen Scankopf zur Strahlableitung angeschlossen. Für diesen stehen zwei F-Theta Optiken<sup>12</sup> mit unterschiedlichen Brennweiten  $f$  zur Verfügung:

$f = 217 \text{ mm}$ : Arbeitsbereich:  $130 \times 130 \text{ mm}^2$ , Fokusbereich 0,6 mm, maximale Verfahrensgeschwindigkeit des Fokuspunkts: ca.  $10 \text{ m/s}$ .

$f = 434 \text{ mm}$ : Arbeitsbereich:  $260 \times 260 \text{ mm}^2$ , Fokusbereich 1,3 mm, maximale Verfahrensgeschwindigkeit des Fokuspunkts: ca.  $20 \text{ m/s}$ .

<sup>11</sup>Produkt aus halben Öffnungswinkel im Fernfeld und kleinstem Strahldurchmesser. Dieser Parameter kann beim Durchgang durch Linsen oder andere optische Elemente nicht verringert werden.

<sup>12</sup>Als F-Theta Optiken bezeichnet man Fokussieroptiken, bei denen der Fokus unabhängig vom Winkel in einer Ebene liegt, die Brennweite also winkelabhängig ist. Die Brennweitenangabe bezieht sich stets auf den rechtwinkligen Fall.

Die rechnergestützte Steuerung erfolgt über die Software „SAMLIGHT“ der Fa. SCAPS, mit der Ort und Leistung des Lasers vektorbasiert vorgegeben werden können. Es besteht die Möglichkeit, über digitale Eingänge gespeicherte Muster abzurufen. Zudem lässt sich die Leistung des Lasers direkt über einen analogen Eingang regeln und das Einschalten über einen digitalen Eingang triggern. Auf diese Weise lässt sich der Laser über das Thermografie-System INA steuern.

Der Laser selbst ist samt Kühler und Steuerrechner in einem mobilen 19"-Rack eingebaut (siehe Abbildung 3.5, links). Der Scannerkopf befindet sich in einem abgetrennten Raum (siehe Abbildung 3.5, rechts). Durch die getrennte Aufstellung wird der Wärmeeintrag am Experiment verringert und Störungen durch die Wärmestrahlung anwesender Experimentatoren vermieden. Außerdem ist die Tür dieses Raumes mit Schutzkontakten zum Abschalten des Lasers ausgerüstet. Dies ist notwendig, da von diesem Laser die gleichen Gefahren wie von dem Laser der TSA ausgehen. Der Scannerkopf ist in ein Rahmensystem integriert. Dieses dient einerseits als Basis für eine zusätzliche Einhausung aus mit einem Magnetsystem befestigten geschwärtzten Aluminiumblechen, sodass eventuell auftretende Reflexionen wirksam vermieden werden. Andererseits erlaubt es eine variable Positionierung von Kamera und Proben.

Die Leistungsregelung zeigt bei kleinen Leistungen von  $P_{L,e} < 10$  W systematische Abweichungen. Daher wurde die tatsächliche Leistung mittels eines Leistungsmessgeräts der Fa. Ophir, Typ „30(150)A-LP1-18“, bestimmt. Die Fokusgröße kann mit einer handelsüblichen Digitalkamera und einem weißen Blatt Papier als Schirm überprüft werden, da die CCD-Chips solcher Kameras im nahen Infrarot eine gewisse Restempfindlichkeit aufweisen. Wird der Laser defokussiert, so zeigt er ein komplexes Beugungsmuster. Eine einfache Defokussierung ist also zur Strahlaufweitung nur bedingt geeignet.

## Kapitel 4

# Horizontale Fehler: Schweißpunkte

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung einer Methode zur thermografischen Prüfung von Punktschweißverbindungen vorgestellt und bewertet. Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 ausgeführt, besteht ein Bedarf an Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Punktschweißverbindungen im Produktionsprozess. Das Hauptgütekriterium ist hierbei die Festigkeit, die wiederum von der Schweißlinsengröße abhängt. Damit sich ein Verfahren für die Anwendung im Produktionsprozess eignet, sollten einige Hauptkriterien erfüllt werden: Das Verfahren muss möglichst unempfindlich gegenüber äußeren Einflüssen sein. Die Prüfeinrichtung sollte einem möglichst geringen Verschleiß unterliegen, idealerweise also berührungslos arbeiten. Vorteilhaft wäre zudem eine Prüfrate im Bereich der typischen Taktrate in der Produktion, die z.B. im Karosseriebau bei etwa einem Hertz liegt, um eine *in-line*-Prüfung möglich zu machen.

Für ein thermografisches Verfahren zur Prüfung von Punktschweißverbindungen bieten sich zwei unterschiedliche Herangehensweisen zur Ermittlung der Schweißlinsengröße an. Zum einen kommt eine direkte Messung der Größe anhand der räumlichen Temperaturverteilung nach der Anregung in Frage, wie es dem klassischen bildgebenden Ansatz der aktiven Thermografie entspräche. Zum anderen bietet sich eine Messung des thermischen Widerstandes der Punktschweißverbindung an. Dieser ist, wenn nur die Wärmeleitung durch die Linse selbst betrachtet wird, umgekehrt proportional zur Querschnittsfläche der Linse, also zum Quadrat des Durchmessers. Allerdings wird er auch von der Dicke der Probe, also dem Elektrodeneindruck, und den Bedingungen in der Haftzone beeinflusst.

Da sich in der neueren Literatur Anzeichen für große Probleme beim Einsatz der Thermografie an Punktschweißverbindungen finden [129], werden zunächst im Abschnitt 4.1 die für eine thermografische Prüfung maßgeblichen Eigenschaften einer Punktschweißverbindung identifiziert und anhand von FEM-Simulationen untersucht. In Abschnitt 4.2 wird die Probenpräparation beschrieben. Mithilfe der aus den FEM-Simulationen erlangten Ergebnisse wird im Abschnitt 4.3 die prinzipielle Durchführbarkeit experimentell untersucht. Auf dieser Grundlage wird dann eine Serienmessung durchgeführt und ein Algorithmus zur Messdatenauswertung entwickelt (siehe Abschnitt 4.4 und 4.5). Als Referenz werden in Ab-

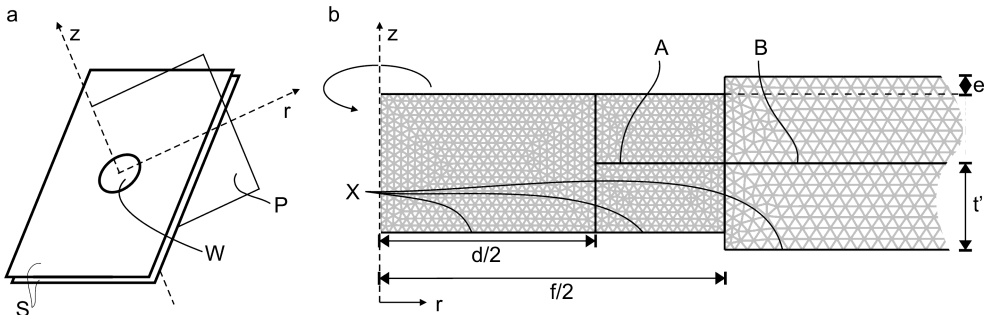


Abbildung 4.1: Modell einer Punktschweißverbindung für FEM-Simulationen. a: Wie aus der Skizze einer Probe ersichtlich, kann diese – wenn die Einzelbleche groß im Vergleich zur Schweißlinse bzw. zum Bereich des Elektrodeneindrucks sind – wegen der Rotationssymmetrie um  $z$  zweidimensional modelliert werden. Hierin bezeichnen  $S$  die Einzelbleche,  $W$  den Elektrodeneindruck und  $P$  eine der möglichen Symmetrieebenen. b: Das dargestellte Gitter besteht insgesamt aus ca. 11000 Elementen. An den mit  $X$  gekennzeichneten Flächen wurde der Wärmeeintrag modelliert. Die Wärmeübertragung zwischen den Grenzflächen  $A$  (Haftzone) und  $B$  (zwischen den Blechen außerhalb der Schweißung) wird über thermische Widerstände modelliert. Die Geometrie ist wie folgt parametrisiert:  $t'$ : Blechdicke,  $d$ : Durchmesser des Elektrodeneindrucks,  $e$  Elektrodeneindruck pro Seite.

schnitt 4.6 die Ergebnisse einer zerstörenden Prüfung der verwendeten Proben gezeigt. Die so gewonnenen Ergebnisse werden im Abschnitt 4.7 zusammengefasst und eingeordnet, um als Basis für weitere Untersuchungen zu dienen. Im Rahmen einer detaillierten statistischen Analyse werden die gewonnenen Resultate dann in Abschnitt 4.8 bewertet und so ein optimiertes Auswertungskriterium bestimmt. Zur Validierung werden wieder die Ergebnisse auf der zerstörenden Prüfung herangezogen (Abschnitt 4.9).

## 4.1 FEM Simulationen

In diesem Abschnitt werden numerische Simulationen der thermografischen Prüfung von Punktschweißverbindungen gezeigt. Für die Simulationen kommt die Finite-Elemente-Methode (FEM) zum Einsatz. Eine detaillierte Einführung in die zugrunde liegende Mathematik und weitere Literaturempfehlungen finden sich z.B. im Lehrbuch von Merkel und Öchsner [193]. Die hier gezeigten Simulationen wurden mit dem kommerziellen Softwarepaket Comsol Multiphysics 3.5a durchgeführt [194]. Um Parametervariationen zu realisieren, wird Comsol mittels der Software Matlab angesteuert. Auf dieser basiert auch die Datenaufbereitung (*post processing*) der Simulationsergebnisse.

### 4.1.1 Modellbildung und Simulationsdetails

Im ersten Kapitel dieser Arbeit wurde der prinzipielle Aufbau einer Punktschweißverbindung im Unterabschnitt 2.3.1 (Seite 35 ff.) diskutiert. An dieser Stelle sei insbesondere auf

die in den Abbildungen 2.12 und 2.13 gezeigten metallografischen Schliffe verwiesen. Das Modell für die numerischen Rechnungen soll nun diesem tatsächlichen Aufbau so weit wie nötig entsprechen, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, dabei aber eine möglichst geringe Komplexität aufweisen, da ein einfach gehaltenes Modell mehrere große Vorteile hat. Je weniger Parameter nötig sind, um es zu definieren, um so einfacher lassen sich die Einflüsse der einzelnen Parameter bestimmen. Außerdem nimmt so die Wahrscheinlichkeit komplizierter Kreuzabhängigkeiten ab. Zudem lässt sich ein einfaches Modell leichter überblicken, was Fehler zu vermeiden hilft. Kann ein Modell niedriger Dimensionalität verwendet werden, sinkt außerdem die nötige Rechenzeit rapide, da sie mit der Anzahl der Gitterelemente skaliert [193].

In Abbildung 4.1 a findet sich die Skizze einer Punktschweißverbindung zwischen zwei Blechen. Um ein Modell für die FEM-Simulationen zu bilden, kann zunächst die Rotationsymmetrie der Schweißung um  $z$  ausgenutzt werden. Da die Abmaße der Bleche (in der Skizze mit  $S$  bezeichnet) in der Realität meist groß im Vergleich zur Schweißung selbst sind, ist diese Vereinfachung nur mit geringen Fehlern verbunden. Zudem kann die Biegung der Bleche im Bereich neben der Schweißung (siehe Abbildung 2.12) vernachlässigt werden, da die Wärme nahezu ausschließlich innerhalb der Bleche geleitet wird, weil deren Wärmeleitfähigkeit weit größer als die der umgebenden Luft ist und im Vergleich zur Blechdicke<sup>1</sup>  $t'$  nur große Biegeradien auftreten. Auch wäre die genaue Geometrie nur schwer zugänglich und von vielfältigen, nur schwer bestimmbareren Einflüssen abhängig. Als weitere Vereinfachung wird das gesamte Material als thermisch homogen angenommen.

In Abbildung 4.1 ist das genutzte Modell dargestellt. Die Simulation erfolgt zweidimensional mit zylindrischer Symmetrie. Der Kontakt zwischen den Blechen im Bereich der Haftzone (A) und im weiter außen liegenden Bereich (B) wird über die Definition eines thermischen Widerstandes an der Kontaktfläche modelliert. Parametrisiert werden außerdem der Durchmesser der Schweißlinse  $d$ , Durchmesser  $f$  und Tiefe  $e$  des Elektrodeneindrucks. Der gesamte Radius der simulierten Probe beträgt stets 50 mm und es wird eine Blechdicke von  $t' = 1$  mm verwendet. Die Ausdehnung der Haftzone entspricht der Differenz von  $f$  und  $d$ .

Da in diesem Abschnitt generelle Aussagen über die Prüfung von Punktschweißverbindungen getroffen werden sollen, nicht aber die Nachbildung konkreter Experimente im Vordergrund steht, werden als Materialparameter typische Werte eines niedriglegierten Stahls bei Raumtemperatur angenommen:

- Dichte:  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ .
- Spezifische Wärmekapazität:  $c_p = 475 \text{ J/(kg K)}$ .
- Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 44,5 \text{ W/(m K)}$ .

Die thermischen Widerstände, die als Anschlussbedingungen für die Grenzflächen A und B definiert werden, sollen im Folgenden als Dicke einer Luftschicht  $a_A$  bzw.  $a_B$  angegeben werden, um die Werte mit der tatsächlich vorliegenden Geometrie vergleichen zu können.

---

<sup>1</sup>Die Blechdicke wird in diesem Abschnitt mit  $t'$  bezeichnet, um Verwechslungen mit der Zeit  $t$  zu vermeiden.



Zur Umrechnung wird die Wärmeleitfähigkeit der Luft mit  $\lambda = 0,0261 \text{ W}/(\text{mK})$  angesetzt. Die Anregung wird als Stufenfunktion modelliert. Es wird eine spezifische Leistung von  $5 \text{ MW}/\text{m}^2$  für eine Dauer von 2,5 ms auf den mit X gekennzeichneten Flächen, also der kompletten Unterseite, eingebracht. Dabei handelt es sich um plausible Werte für die Anregung mit einer Blitzlampe aus dem Fotobereich in geringem Abstand, wie sie in der dieser Arbeit verwendet wird (vergleiche Unterabschnitt 3.2.1). Wenn nicht anders angegeben, wird eine Umgebungstemperatur von 293,15 K entsprechend  $20^\circ\text{C}$  und ein Wärmeübergangskoeffizient zur Luft von  $h = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$  angesetzt<sup>2</sup>.

Um die Aussagekraft von FEM-Simulationen beurteilen zu können, ist es stets ratsam, auf grundlegenden physikalischen Überlegungen basierende Plausibilitätstests durchzuführen. Hier wurde die Stabilität der Lösungen anhand der durchgeführten Parametervariationen überprüft. Veränderungen in  $d$ ,  $e$ ,  $a_A$ , und  $a_B$  müssen sich aufgrund der Wärmeleitungsgleichung in stetigen Änderungen der resultierenden Temperaturverteilungen auswirken. Zur Beurteilung des Verhaltens wurden die Abbildungen 4.6, 4.7, 4.8 und 4.9 aus dem Unterabschnitt 4.1.3 herangezogen. Besonders die Variation des Elektrodeneindrucks  $e$  erwies sich als kritisch. Hier führte erst ein optimiertes Gitter mit ca. 150.000 Elementen zu stabilen Ergebnissen. Damit benötigte die Simulation zu einem Parametersatz auf dem verwendeten Rechner<sup>3</sup> etwa acht Minuten Rechenzeit. Auch ein Modell, bei dem der Übergang zwischen den beiden Materialdicken nicht als steile Kante, sondern als geradliniger Verlauf über einen Millimeter hinweg modelliert wurde, brachte keine Verbesserungen. Besonders die Dichte der Gitterelemente im Übergangsbereich ist kritisch. Werden hier zu grobe Gitter definiert, kommt es zu scheinbar zufällig verteilten Sprüngen in den resultierenden Temperaturprofilen von einem Wert des variierten Parameters zum nächsten. Schon mit einem Gitter von ca. 11.000 Elementen, wie es in Abbildung 4.1 dargestellt ist, wurden hingegen stabile Lösungen in den Parametern  $d$ ,  $a_A$  und  $a_B$  erzielt. Pro Parametersatz lag die Berechnungszeit bei unter einer Minute. Die Temperatursprünge mit der Veränderung  $d$  erreichten bei diesem Gitter typische Werte von ca. 0,2 K. Ein Wert in dieser Größenordnung sollte als numerische Genauigkeit angenommen werden.

Eine Möglichkeit, diese Schwierigkeit zu umgehen und die Rechenzeit durch ein größeres Gitter bei trotzdem stetigen Ergebnissen zu verringern, bestünde darin, das bei einem größeren Elektrodeneindruck fehlende Material blockweise zu definieren. Diese Herangehensweise wurde im Unterabschnitt 5.3.4 im nächsten Kapitel genutzt und wird häufig für Geometrieoptimierungen bei der Lösung inverser Probleme eingesetzt [66]. Jedoch lassen sich Modelle dieser Art unter der verwendeten Software nur sehr unflexibel handhaben, weshalb an dieser Stelle nicht auf eine solche Technik zurückgegriffen wird.

<sup>2</sup>Dieser Wert entspricht dem Erfahrungswert für kleine Proben in Laborumgebungen. Vergleiche auch Unterabschnitt 5.2.1.

<sup>3</sup>Zwei Intel Xeon 5410 Prozessoren, insgesamt acht Kerne mit jeweils 4700 *bogomips*, 32 GB Arbeitsspeicher, 64 bit Linux-Betriebssystem.

### 4.1.2 Prinzipielles Verhalten

In Abbildung 4.2 findet sich eine Darstellung der Simulationsergebnisse für vier typische Fälle von Punktschweißverbindungen. Sämtliche Einzeldiagramme zeigen farbkodierte Temperaturen. Auf der Abzisse ist jeweils die Position auf der  $r$ -Achse (Bezeichnung entsprechend Abbildung 4.1) und auf der Ordinate die Zeit aufgetragen. So lässt sich der experimentell zugängliche, und damit für die weitere Beurteilung maßgebliche, zeitliche und räumliche Temperaturverlauf an der Oberfläche auf einen Blick erfassen. Die unter A dargestellten Diagramme zeigen den gesamten simulierten Bereich ( $t = 0 \dots 60$  s,  $r = 0 \dots 50$  mm), die unter B dargestellten den Bereich der größten Dynamik ( $t = 0 \dots 2,5$  s,  $r = 0 \dots 6,5$  mm). Dabei zeigen a bis d jeweils die Temperatur an der oberen, der Anregung abgewandten Oberfläche, e bis h die auf der unteren, angeregten Seite. Zwischen den Zeilen wurden jeweils der Durchmesser der Schweißlinse  $d$  und der einseitige Elektrodeneindruck  $e$  variiert. a und e entsprechen mit  $d = 1,5$  mm und  $e = 0,05$  mm einer Klebschweißung (kurz KL), b und f mit  $d = 2,5$  mm und  $e = 0,05$  mm einer optimalen Verbindung (5W, nach der  $5\sqrt{t}$ -Regel), c und g mit  $d = 3,5$  mm und  $e = 0,05$  mm einer Schweißung an der Spritzergrenze (SP) und d und h mit  $d = 2,5$  mm und  $e = 0,1$  mm einer Schweißung, bei der es zur Spritzerbildung gekommen ist und sich durch den damit verbundenen Materialverlust die Dicke verringert hat (SP\*). Der Abstand zwischen den Blechen wurde auf  $a_B = 0,5$  mm eingestellt, der im Bereich der Haftzone auf  $a_A = 0,05$  mm. Der Durchmesser der Haftzone wurde auf  $f = 8$  mm gesetzt und die Blechdicke auf  $t' = 1$  mm.

Die angeregte Seite (e bis h, im Folgenden „untere Seite“) kühlt sich nach der Anregung kontinuierlich ab. Die gegenüberliegende Seite (a bis d, im Folgenden „obere Seite“) erwärmt sich zunächst, bis, in Abhängigkeit von der Entfernung zum Mittelpunkt, zwischen  $t = 20$  s und  $t = 30$  s auch hier die Abkühlung überwiegt. Die größte Dynamik tritt im Bereich der Schweißlinse auf. Der Durchmesser des Bereichs, in dem die größte Erwärmung erzielt wird, korreliert mit dem der Schweißlinse. Die Erhöhung des Elektrodeneindrucks hat zwei Effekte. Zum einen erhöht sich die maximale Temperatur auf der oberen Seite im Bereich der Schweißlinse für  $t < 0,5$  s um ca. 0,5 K. Der Grund hierfür ist der geringere thermische Widerstand der dünneren Schweißung. Zum anderen wird die Abkühlung auf der unteren Seite verlangsamt. Ursächlich hierfür ist der durch den größeren Eindruck verschlechterte thermische Kontakt zwischen umliegendem Blech und dem Bereich des Elektrodeneindrucks. Festzuhalten ist, dass die gesamte Dynamik auf der oberen Seite kleiner als 1,5 K ist. Dies liegt im Bereich typischer Schwankungen der Umgebungstemperatur unter Laborbedingungen.

In Abbildung 4.3 a und b sind Transienten der Daten aus Abbildung 4.2 b bzw. f, also für den Datensatz, der einer optimal geschweißten Probe entspricht, für verschiedene Abstände zum Mittelpunkt einfachlogarithmisch dargestellt. Abbildung 4.4 zeigt Transienten bei  $r = 2,5$  mm (entsprechend Kurve 3 in Abbildung 4.3) für die zuvor genannten Geometriefälle. Zunächst ist zu den Transienten festzuhalten, dass sich die Temperatur nach etwa 30 s sowohl an der Ober- als auch an der Unterseite dem gleichen Wert angenähert hat, wie auch in Abbildung 4.2 zu erkennen ist. Die weitere Abkühlung wird nun durch den Wärmeübergangskoeffizienten zur Luft  $h$  bestimmt, daher ist die Steigung aller Transienten

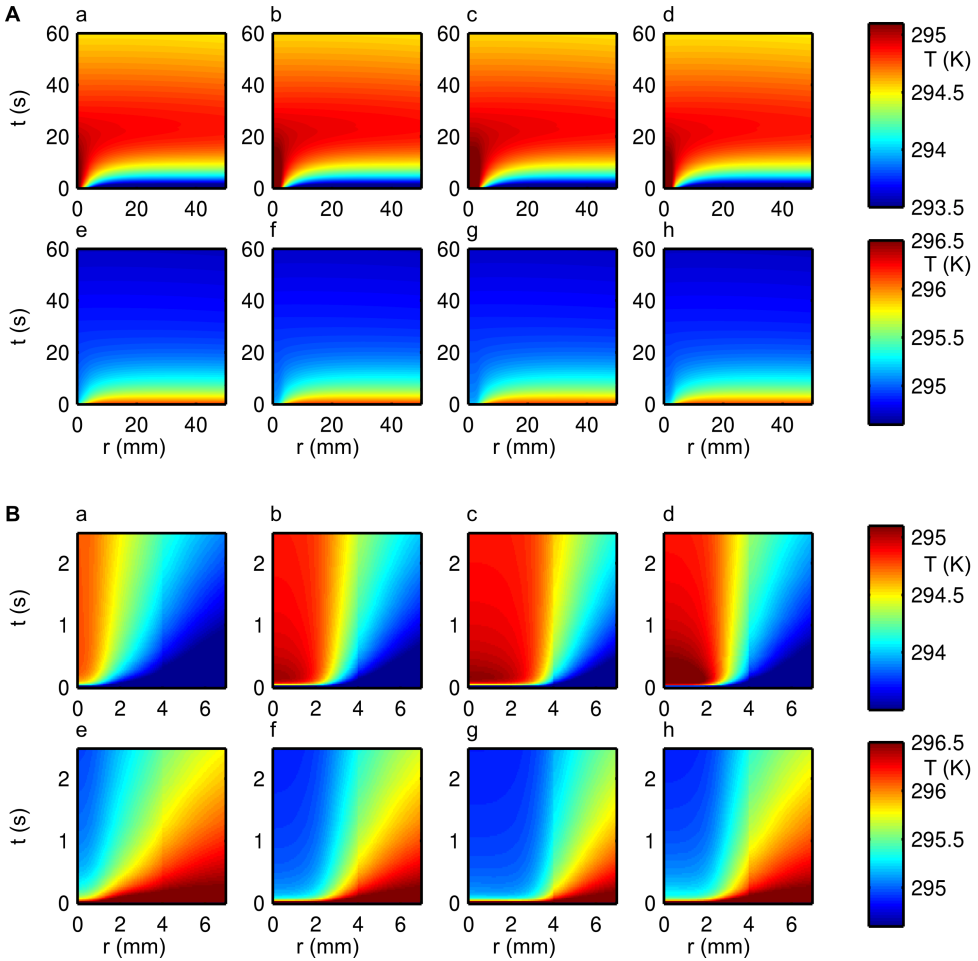


Abbildung 4.2: Simulationsergebnisse: Farbkodierte Temperaturen, aufgetragen gegen den Abstand vom Mittelpunkt  $r$  und die Zeit  $t$ . A und B zeigen Einzeldiagramme zu den gleichen Parametern (mit a bis h bezeichnet). B zeigt dabei einen Ausschnitt in Zeit und Ort, in dem die Dynamik im Bereich der Schweißlinse besonders deutlich zu erkennen ist. Hier tritt auch der Geometrieübergang bei  $r = 4$  mm hervor. Es wurden der Durchmesser der Schweißlinse  $d$  sowie der einseitige Elektrodeneindruck  $e$  variiert. a, e:  $d = 2$  mm,  $e = 0,15$  mm; b, f:  $d = 5$  mm,  $e = 0,15$  mm; c, g:  $d = 7$  mm,  $e = 0,15$  mm; d, h:  $d = 5$  mm,  $e = 0,3$  mm; a-d: Obere Seite (nicht angeregt), e-h: Untere Seite (angeregt). (Weitere Parameter: Blechdick $e$ ' = 1 mm, Durchmesser der Haftzone  $f = 8$  mm, Abstand zwischen den Blechen in der Haftzone  $a_A = 0,05$  mm, außerhalb davon  $a_B = 0,5$  mm.)

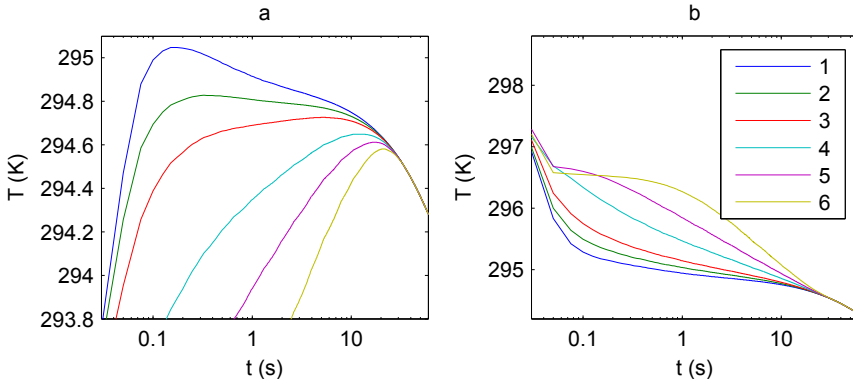


Abbildung 4.3: Einfachlogarithmische Auftragung von Transienten aus den in Abbildung 4.2 b und f gezeigten Daten für einen Linsendurchmesser von 2,5 mm und einen Elektrodeneindruck von 0,15 mm für folgende Abstände zum Mittelpunkt: Graph 1:  $r = 0$  mm; 2:  $r = 2$  mm; 3:  $r = 2,5$  mm; 4:  $r = 3,5$  mm; 5:  $r = 5$  mm; 6:  $r = 10$  mm. a: Obere Seite, b: Untere, angeregte Seite.

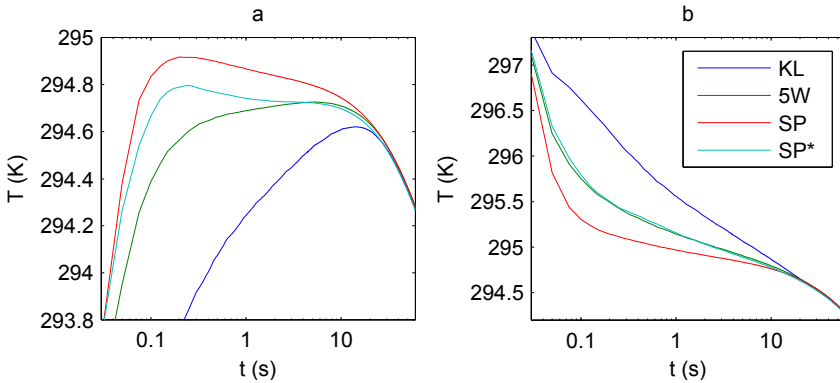


Abbildung 4.4: Einfachlogarithmische Darstellung von Transienten für die in Abbildung 4.2 gezeigten Fälle für  $r = 2,5$  mm. Bezeichnungen: KL:  $d = 1,5$  mm,  $e = 0,15$  mm; 5W:  $d = 2,5$  mm,  $e = 0,15$  mm; SP, g:  $d = 3,5$  mm,  $e = 0,15$  mm; SP\*, h:  $d = 2,5$  mm,  $e = 0,3$  mm. a: Obere Seite, b: Untere, angeregte Seite.

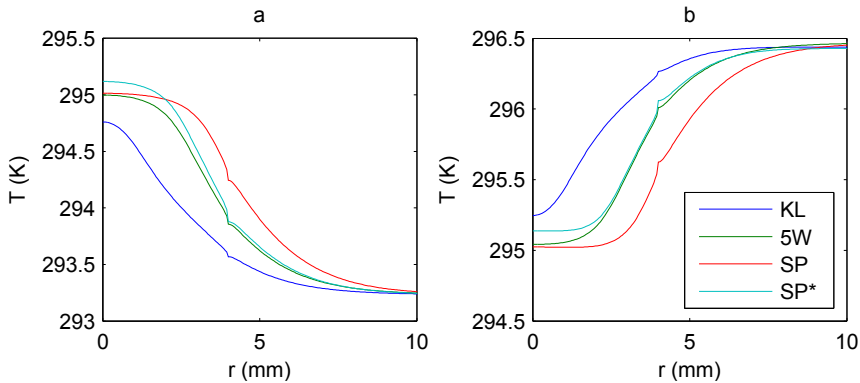


Abbildung 4.5: Linienprofile aus den in Abbildung 4.2 gezeigten Daten für  $r = 2,5$  mm bei  $t = 0,4$  s. Bezeichnungen: KL:  $d = 1,5$  mm,  $e = 0,15$  mm; 5W:  $d = 2,5$  mm,  $e = 0,15$  mm; SP, g:  $d = 3,5$  mm,  $e = 0,15$  mm; SP\*, h:  $d = 2,5$  mm,  $e = 0,3$  mm. a: Obere Seite, b: Untere, angeregte Seite. Die bei  $r = 4$  mm deutlich erkennbare Schulter entspricht dem Geometrieübergang zwischen Elektrodeneindruck und umliegenden Bereich (vergleiche Abbildung 4.2).

in diesem Bereich gleich. Es dominiert ab diesem Zeitpunkt der Effekt mit der größeren Zeitkonstante, die Abkühlung über die umgebende Luft. Je kleiner  $r$  ist, je näher also der Punkt am Mittelpunkt liegt, desto höhere Temperaturen werden erreicht. Dieses Verhalten ist abhängig von der Größe der Schweißlinse. So liegt die Kurve für KL aus Abbildung 4.4 a ( $r = 2,5$  mm,  $d = 2,5$  mm) zwischen den Kurven 4 und 5 aus Abbildung 4.3 a ( $r = 3,5$  mm bzw. 5 mm,  $d = 5$  mm). Die Werte der Kurve für SP aus Abbildung 4.4 a ( $r = 3$  mm,  $d = 2,5$  mm) liegen im Bereich der Werte von Kurve 2 aus Abbildung 4.3 a ( $r = 0$  mm,  $d = 5$  mm). Interessant ist das Verhalten von 5W und SP\* in Abbildung 4.4. Diese lassen sich an der angeregten Seite (b) nicht unterscheiden, zeigen aber auf der gegenüberliegenden Seite (a) für Zeiten  $t < 3$  s ein deutlich unterschiedliches Verhalten.

Abbildung 4.5 zeigt Linienprofile der Oberflächentemperaturen zum Zeitpunkt  $t = 0,4$  s für die Geometriefälle aus Abbildung 4.4. Hier ist zunächst deutlich die Schulter bei  $r = 4$  mm zu erkennen. Der Grund hierfür ist, dass nur die Temperatur auf den Oberflächen normal zur Symmetrieachse ausgewertet wird. Durch den Geometrieübergang bei  $r = f/2 = 4$  mm (vergleiche Abbildung 4.1, für die Punkte auf der oberen Oberfläche gilt  $z(r > f/2) = z(r < f/2) + e$ ) kommt es zu dem unstetigen Verhalten. Der Verlauf der Kurven hängt hauptsächlich vom Linsendurchmesser ab. Dieser ließe sich z.B. nach vorheriger Kalibrierung aus der Temperatur bei  $r = 3,5$  mm bestimmen.

Nach der gezeigten Datenlage ist eine Unterscheidung der vier untersuchten typischen Fälle von Punktschweißverbindungen sowohl nach räumlichen als auch nach zeitlichen Kriterien sicher möglich. Für die angenommene Anregungsleistungslichte von  $5\text{MW/m}^2$  für

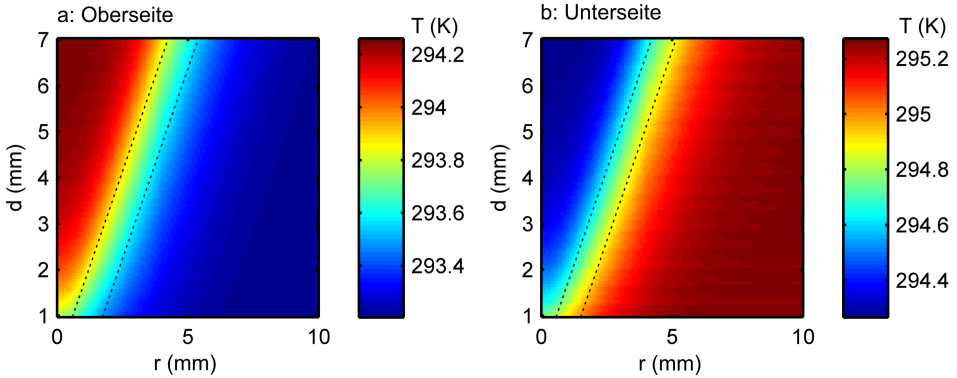


Abbildung 4.6: Variation des Linsendurchmessers  $d$ . Dargestellt ist die farbkodierte Temperatur gegen den Abstand vom Mittelpunkt  $r$  und den Linsendurchmesser  $d$ . b: angeregte Seite, a: der Anregung abgewandte Seite. Die gestrichelten Linien haben eine Steigung von  $1,6 \text{ mm/mm}$ . Mit einem Schwellwertverfahren könnte so der Schweißlinsendurchmesser bestimmt werden. Weitere Parameter: Zeitpunkt  $t = 0,4 \text{ s}$ , Elektrodeneindruck  $e = 0,15 \text{ mm}$ , Abstand zwischen den Blechen außerhalb der Haftzone  $a_B = 0,5 \text{ mm}$ , in der Haftzone  $a_A = 0,01 \text{ mm}$ .

$2,5 \text{ ms}$ , die einer typischen Blitzlampe in kleinem Abstand entspricht<sup>4</sup>, liegen die relevanten Temperaturunterschiede allerdings deutlich unter einem Kelvin. Im nächsten Unterabschnitt werden die Einflüsse der einzelnen Geometrie- bzw. Anschlussparameter systematisch untersucht.

### 4.1.3 Parametervariationen

Es wurden Parametervariationen des Linsendurchmessers  $d$ , des Elektrodeneindrucks  $e$  sowie der Anschlussbedingungen in den Bereichen A und B, definiert als Abstände  $a_A$  und  $a_B$ , durchgeführt. Um diese zu visualisieren, wird zu einer Darstellungsform ähnlich der in Abbildung 4.2 gegriffen. Die Temperaturwerte sind farbkodiert dargestellt. Auf der Abzisse ist wieder die Position auf der  $r$ -Achse aufgetragen, auf der Ordinate der jeweils betrachtete Parameter. Als Zeitpunkt wurde  $t = 0,4 \text{ s}$  gewählt, weil hier eine große Sensitivität für alle Parameter vorliegt. Der teilweise hervortretende Sprung bei  $r = 4 \text{ mm}$  wird durch den Geometrieübergang an dieser Stelle verursacht. Es wurde für diese Darstellungen jeweils nur ein Parameter geändert.

Die Änderung des Linsendurchmessers wirkt sich direkt in dem Radius  $r_{sw}$  des Bereichs aus, der zu einem gegebenen Zeitpunkt auf der Oberseite über (siehe Abbildung 4.6 a) bzw. auf der angeregten Unterseite (b) unter einem geeignet gewählten Schwellwert liegt.

<sup>4</sup> Bei einer einseitigen Energie von  $6 \text{ kJ}$  und einem angenommenen Wirkungsgrad von etwa  $10\%$  (unter Berücksichtigung der Schwächung durch Glaskoblen und PMMA-Scheibe) ergibt sich dieser Wert für die Abstrahlung in den Halbraum in einem Abstand von  $10 \text{ cm}$ .

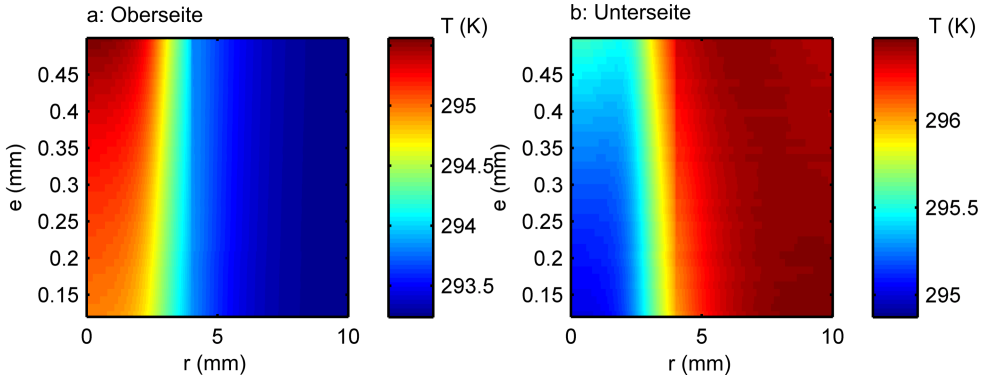


Abbildung 4.7: Variation des Elektrodeneindrucks  $e$ . Dargestellt ist die farbkodierte Temperatur gegen den Abstand vom Mittelpunkt  $r$  und den Elektrodeneindruck  $e$ . b: angeregte Seite, a: der Anregung abgewandte Seite. Weitere Parameter: Zeitpunkt  $t = 0,4$  s, Linsendurchmesser  $d = 5$  mm, Abstand zwischen den Blechen außerhalb der Haftzone  $a_B = 0,5$  mm, in der Haftzone  $a_A = 0,01$  mm.

Dabei kann für Linsendurchmesser von  $d > 2$  mm bei sonst konstanten Parametern ein linearer Zusammenhang mit einer Steigung von 1,6 festgestellt werden (gestrichelte Linien). Die physikalische Ursache hierfür liegt darin, dass der größte Teil der Wärme durch die Schweißlinse geleitet wird. Somit findet jeweils in diesem Bereich der schnellste Temperaturengleich statt, wodurch sich die Topologie der Schweißlinse in der Temperaturverteilung widerspiegelt. Für das einfachste Modell, dass die Schweißlinse direkt „durchscheint“, würde sich aber ein Zusammenhang von  $d/r_{sw} = 2$  ergeben. Dass hier nur ein Verhältnis von 1,6 anstelle von 2 erreicht wird, liegt in der zusätzlich auftretenden lateralen Wärmeleitung begründet.

Mit steigendem Elektrodeneindruck  $e$  nimmt die Temperatur auf Ober- und Unterseite im Bereich der Schweißlinse zum betrachteten Zeitpunkt zu, wie in Abbildung 4.7 sichtbar ist. Bei  $r = 0$  beträgt dieser Effekt an der Oberseite zwischen  $e = 0,15$  mm und  $e = 0,5$  mm ca.  $\Delta T = 1$  K. Zum Vergleich: Dies übersteigt den Effekt der Temperaturänderung an dieser Stelle, den eine Änderung des Schweißlinsendurchmessers von  $d = 1$  mm auf  $d = 7$  mm verursacht. Dieser liegt nämlich nur bei ca.  $\Delta T = 0,6$  K (siehe Abbildung 4.6). Physikalisch lässt sich dieses Verhalten mit zwei Einflussgrößen erklären. Mit steigendem Elektrodeneindruck, also abnehmender Materialdicke, sinkt der thermische Widerstand in der Mitte der Probe. Dies führt zu einer schnelleren Erwärmung an der Oberseite. Zusätzlich nimmt in gleichem Maße die absolute Wärmekapazität ab, da sie proportional zur Masse ist. Dadurch wird die Abkühlung an der Unterseite verlangsamt, da weniger Wärmeenergie von der Probe aufgenommen werden kann.

In den Abbildungen 4.8 und 4.9 finden sich Darstellungen für die Variationen des thermischen Widerstands in der Haftzone  $R_{th,A}$  und des thermischen Widerstands zwischen den

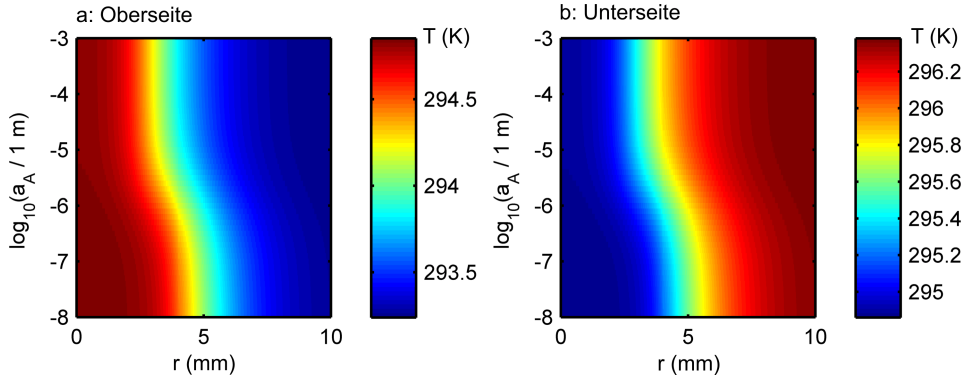


Abbildung 4.8: Variation des thermischen Widerstandes  $R_{th,A}$  der Haftzone. Dargestellt ist die farbko-dierte Temperatur gegen den Abstand vom Mittelpunkt  $r$  und den dekadischen Logarithmus der  $R_{th,A}$  entsprechenden Schichtdicke Luft  $a_A$ . b: angeregte Seite, a: der Anregung abgewandte Seite. Weitere Pa-rameter: Zeitpunkt  $t = 0,4 \text{ s}$ , Linsendurchmesser  $d = 5 \text{ mm}$ , Elektrodeneindruck  $e = 0,15 \text{ mm}$ , Abstand zwischen den Blechen außerhalb der Haftzone  $a_B = 0,5 \text{ mm}$ .

Blechen im Bereich außerhalb von dieser  $R_{th,B}$ . Diese beiden Größen werden als Dicken der dazwischenliegenden Luftschichten  $a_A$  und  $a_B$  parametrisiert. Auf der Ordinate ist jeweils der dekadische Logarithmus dieser Schichtdicken in Metern,  $\log_{10}(a_{A,B} / 1 \text{ m})$ , aufgetragen.

Für  $a_A$  liegt die kritische Dicke bei  $0,5 \mu\text{m}$ . Unterhalb dieser entspricht das Verhalten – unabhängig vom tatsächlichen Schweißlinsendurchmesser  $d$  – einer Probe mit  $d = 8 \text{ mm}$ , was genau der Größe der Haftzone entspricht. Für  $a_A > 10 \mu\text{m}$  sind keine Einflüsse mehr feststellbar. Bei der Dicke zwischen den Blechen wird schon für größere Abstände ein starker Einfluss deutlich. Ab  $a_B = 50 \mu\text{m}$  nimmt die räumliche Änderung der Oberflächentemperatur stark ab um bei  $a_B = 0,5 \mu\text{m}$  auf Werte  $\Delta T < 0,1 \text{ K}$  zu sinken. Dies entspricht nahezu dem Verhalten einer komplett homogenen Probe.

Physikalisch lässt sich dieses Verhalten einfach erklären: Erst ab einem gewissen Verhältnis zwischen dem thermischen Widerstand im Bereich der Schweißlinse und dem im umliegenden Bereich wird die Verteilung der Oberflächentemperatur von der Schweißlinse maßgeblich beeinflusst.

Dieses Verhalten lässt sich auch mit einem sehr viel einfacheren *lumped-capacitance*-Modell abschätzen, bei dem ein instantaner Temperatenausgleich innerhalb der Probe angenommen wird [195]. In diesem Fall ist also nur noch der thermische Widerstand der jeweiligen Zone maßgeblich. Die thermischen Widerstände lassen sich nach

$$R_{th} = \frac{z}{\lambda \cdot A} \propto \lambda^{-1} \quad (4.1)$$

überschlagen, wobei  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit,  $z$  die Schichtdicke und  $A$  die betrachtete Fläche bezeichnet. Es sollen die für die Simulation verwendeten Materialparameter genutzt



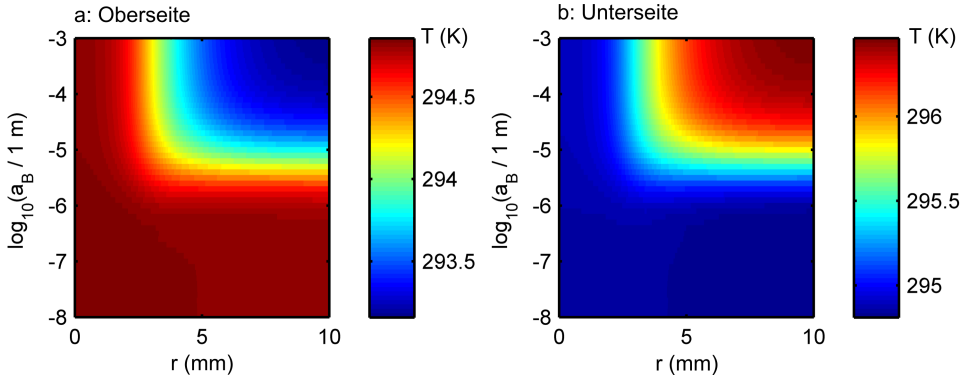


Abbildung 4.9: Variation des thermischen Widerstandes  $R_{th,B}$  zwischen den Einzelblechen außerhalb der Haftzone. Darstellung analog Abbildung 4.8: Dargestellt ist die farbkodierte Temperatur gegen den Abstand vom Mittelpunkt  $r$  und den dekadischen Logarithmus der  $R_{th,B}$  entsprechenden Schichtdicke Luft  $a_B$  in Metern zum Zeitpunkt  $t = 0,4$  s. b: angeregte Seite, a: der Anregung abgewandte Seite. Weitere Parameter: Zeitpunkt  $t = 0,4$  s, Linsendurchmesser  $d = 5$  mm, Elektrodeneindruck  $e = 0,15$  mm, Abstand zwischen den Blechen in der Haftzone  $a_A = 0,01$  mm.

werden. Das Verhältnis zwischen den Wärmeleitfähigkeiten beträgt

$$\frac{\lambda_{\text{Stahl}}}{\lambda_{\text{Luft}}} = \frac{44,5 \text{ W/(m K)}}{0,0261 \text{ W/(m K)}} = 1705. \quad (4.2)$$

Das bedeutet, dass eine Luftschicht nur 1/1700 der Dicke einer Stahlschicht ausweisen muss, um den gleichen thermischen Widerstand zu haben. Eine Stahlschicht der Dicke  $z_{\text{Stahl}} = 1,7$  mm, entsprechend der Mitte der Probe bei einem Elektrodeneindruck von  $e = 0,15$  mm, entspricht also vom thermischen Widerstand her einer Luftschicht von einem Mikrometer Dicke. Liegt nun der thermische Widerstand der Luftschicht deutlich unter dem des restlichen Materials, hat diese keinen großen Einfluss mehr. Mit anderen Worten: Die Wärmeleitung durch die Luftschicht ist fast so effektiv wie die durch das ungestörte Material, weshalb sich der Bereich der Schweißlinse kaum mehr auswirkt. Die hier abgeschätzte Größenordnung von einem Mikrometer, ab der dieser Effekt eintritt, deckt sich voll mit den Ergebnissen aus den FEM-Simulationen.

#### 4.1.4 Schlussfolgerungen für die experimentelle Durchführbarkeit

Bei den präsentierten Daten sind Einflüsse sowohl vom Schweißlinsendurchmesser als auch vom Elektrodeneindruck deutlich zu erkennen. Am stärksten sind die Einflüsse für Zeiten  $t < 3$  s. Die Auswirkungen auf der der Anregung abgewandten Seite sind dabei größer. Ein steigender Schweißlinsendurchmesser wirkt sich darin aus, dass zu jedem Zeitpunkt  $t < 3$  s ein größerer Bereich in der Mitte einen geeignet gewählten Temperatur-Schwellwert übersteigt. Ein größerer Elektrodeneindruck führt zu höheren erreichten Maximaltemperaturen.

Wichtig ist außerdem der Einfluss der Haftzone. Sollte in diesem Bereich der Abstand zwischen den Blechen zu gering sein, wird die Zuordnung unterschiedlicher Schweißlinsengrößen unmöglich. Die kritische Dicke konnte zu einem Mikrometer abgeschätzt werden. In dieser Größenordnung liegt gerade die Materialtrennung in der Haftzone. Der Abstand zwischen den Blechen außerhalb der Haftzone ist weniger kritisch. Zwar schränken hier nach der Datenlage aus den FEM-Simulationen bereits Abstände von weniger als 50  $\mu\text{m}$  die Nachweisbarkeit der Schweißlinsengröße stark ein, in der Praxis sind hier aber Abstände von  $> 0,1 \text{ mm}$  zu erwarten<sup>5</sup>.

Für die experimentelle Umsetzung lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Zuerst sollte überprüft werden, ob der thermische Widerstand der Haftzone ausreichend groß ist, damit die Schweißlinsengröße den Haupteinfluss auf die Leitfähigkeit der gesamten Probe darstellt.
- Eine Messung auf der nicht angeregten Seite scheint erfolgversprechender, da hier der Einfluss des Elektrodeneindrucks größer ist (siehe Abbildung 4.4). Außerdem ist eine solche Anordnung experimentell wegen der besseren Zugänglichkeit leichter zu realisieren.
- Eine Messdauer von ca. 3 s und ein Messbereich mit einem Radius von 5 mm bis 10 mm sind ausreichend, da in diesem Bereich die maßgeblichen Temperaturänderungen auftreten.
- Zwar ist die Bestimmung der Größe der Schweißlinse aus thermografischen Experimenten prinzipiell möglich, jedoch sind die erwarteten Temperaturänderung recht klein. Um dies zu veranschaulichen, ist in Abbildung 4.10 die räumliche Ableitung von Linienprofilen für verschiedene typische Geometrien gezeigt. Die maximalen Steigungen liegen hier unter Vernachlässigung des modellbedingten Ausschlags bei  $r = 4 \text{ mm}$  im Bereich von 0,5 K/mm. Das heißt, dass ein realistisch angenommener Temperaturmessfehler von  $\Delta T = 0,2 \text{ K}$  bereits zur einem Fehler in der Ortsbestimmung von  $\Delta r = 0,4 \text{ mm}$  führen würde, was sich bei der Ermittlung der Schweißlinsengröße zu einem Fehler von  $\Delta d \geq 0,6 \text{ mm}$  (siehe Abbildung 4.6, die Steigung beträgt 1,6) auswirken würde. Dies gilt allerdings nur unter der Annahme von sonst optimalen Bedingungen. Daher scheint eine Ermittlung der Schweißlinsengröße über ein direktes Schwellwertverfahren nur schwer realisierbar, obwohl dieses Vorgehen anhand der FEM-Daten naheliegt.

---

<sup>5</sup> Vergleiche für die Abstände  $a_A$  und  $a_B$  Abbildungen 2.13 und 2.14, die jeweils Proben zeigen, welche aus dem gleichen Blech bestehen und mit den gleichen Parametern geschweißt wurden, wie die Proben, die für die folgenden Experimente verwendet wurden.

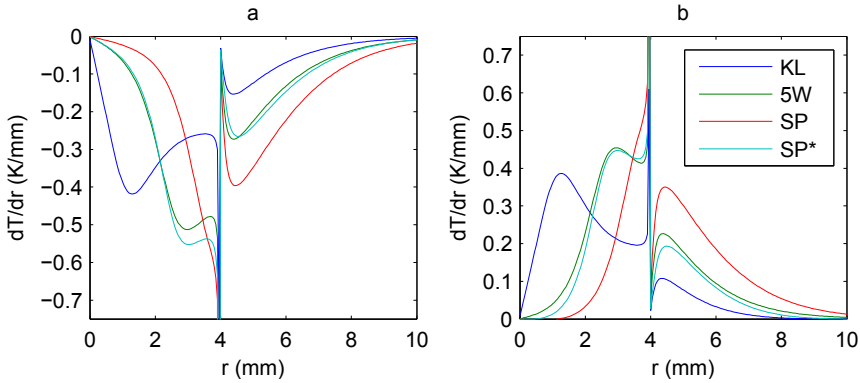


Abbildung 4.10: Räumliche Ableitung der in Abbildung 4.5 gezeigten Daten zur Abschätzung der Sensitivität. Der Ausschlag bei  $r = 4$  mm ist auf den Geometrieübergang an dieser Stelle zurückzuführen, da jeweils nur die Temperaturen an den normal zur Symmetrieachse liegenden Oberflächen zugrunde gelegt werden.

Zur Einordnung der gezeigten numerischen Voruntersuchungen sei nochmals darauf hingewiesen, dass hier ein vereinfachtes Modell herangezogen wurde und die Ergebnisse nur Trends darstellen, die auch im Experiment vermutet werden. Im Folgenden wird auf dieser Grundlage nach prinzipiellen Voruntersuchungen ein experimentelles Verfahren präsentiert, mit dem sich Punktschweißverbindungen, die in typische Fehlerklassen fallen, von optimal geschweißten Verbindungen unterscheiden lassen.

## 4.2 Probenpräparation

Die Proben für sämtliche in dieser Arbeit gezeigten Messungen an Punktschweißverbindungen wurden in der BAM Fachgruppe 5.5 hergestellt. Sie bestehen aus verzinktem kaltgewalztem CMnAl-TRIP3<sup>6</sup>-Stahl (Werkstoffnummer 1.0947). Bei diesem auch als HCT690T+Z140 bezeichneten Stahl handelt es sich um einen niedriglegierten Stahl mit hoher Festigkeit bei gleichzeitig guten Verformbarkeitskennwerten. Die Kombination dieser i.A. gegenläufigen Eigenschaften wird durch die verformungsinduzierte Phasenumwandlung von metastabilen Austenit in Martensit ( $\gamma \rightarrow \alpha_M$ ) hervorgerufen und macht diesen Werkstoff für den Karoseriebau unter Gesichtspunkten des Leichtbaus interessant [196]. Wegen des hohen Kohlenstoffanteils verfügt er nur über eine bedingte Schweißneigung. Die mittels Funkenspektalanalyse ermittelte chemische Zusammensetzung des verwendeten Bleches ist in Tabelle 4.1 angegeben. Die Bezeichnung +Z140 bedeutet, dass das Blech mit einer beidseitigen Mindestauflage von 140 g/m<sup>2</sup> verzinkt wurde, was einer typischen Schichtdicke im Bereich von 5

<sup>6</sup>Von engl. *TRansformation Induced Plasticity*, dt. umwandlungsbewirkte Plastizität.

bis 12 µm entspricht<sup>7</sup>. Die verwendete Blechdicke beträgt  $t' = 1$  mm.

C	Mn	Cr	Al	Si	Ni	Cr	P	Mo	Cu	CEV
0,22	1,7	0,02	1,40	0,09	0,022	0,022	0,0115	< 0,01	0,023	0,51

Tabelle 4.1: Mittels Funkenspektralanalyse ermittelte Hauptbestandteile des TRIP-Stahls HCT690 in Gewichtsprozent. Der fehlende Gewichtsanteil entfällt auf Eisen (Quelle BAM 5.5).

### 4.2.1 Schweißparameter

Zum Schweißen der Proben wurde eine X-Zange der Firma Dalex verwendet (siehe Abbildung 4.11 a), die mit einem pneumatischen Krafterzeugungssystem ausgestattet ist. Sie wird im Wechselstrombetrieb mit einer Frequenz von 50 Hz versorgt. Der maximal erreichbare Effektivwert des Schweißstroms beträgt 15 kA, die maximale Elektrodenkraft 6 kN und die maximale Schweißzeit 99 Perioden, also rund 2 s.

Die hier gezeigten Experimente basieren auf drei Gruppen von Proben. Für die Präparation wurde jeweils eine Vor-, Nachhalte- sowie Schweißzeit von 300 ms bei einer Elektrodenkraft von 4,5 kN gewählt. Es kamen Elektrodenkappen vom Typ F1-16-20-flach-8-5,5 nach DIN EN ISO 5821 zum Einsatz. Der Schweißstrom wurde zur Präparation der unterschiedlichen Gruppen folgendermaßen variiert:

- Klebverbindungen:  $I = 7,5$  kA (Probenbezeichnung KL: Klebverbindungen).
- Optimal Parameter:  $I = 8,7$  kA (Probenbezeichnung 5W:  $5\sqrt{t}$ -Kriterium).
- Spritzergrenze:  $I = 10,7$  kA (Probenbezeichnung SP: Spritzer).

Voruntersuchungen wurden an jeweils einer Probe aus den Gruppen KL und 5W durchgeführt. Für die folgende Reihenuntersuchung wurde die „Probenreihe 1“ verwendet, die sich aus je 25 Proben zusammensetzt, die als Klebverbindungen (im Folgenden KL01 bis KL25), mit optimalen Parametern (5W26 bis 5W50), und an der Spritzergrenze (SP51 bis SP75) geschweißt wurden (siehe Abbildung 4.11 b).

### 4.2.2 Oberflächenbeschichtung

Da das verwendete verzinkte Blech sowohl im Infraroten als auch im Sichtbaren einen niedrigen Emissions- bzw. Absorptionskoeffizienten von etwa  $\epsilon_{\text{IR}} = \alpha_{\text{vis}} \approx 0,2$  aufweist, wurden die Proben im Bereich der Schweißlinse mit Graphit beschichtet. So erhöht sich der Emissions- bzw. Absorptionskoeffizient auf  $\epsilon = \alpha \gg 0,9$ , was bei sonst gleichen Bedingungen zu einem größeren Energieeintrag in die Probe und einer größeren Wärmestrahlung als bei unbeschichteten Proben führt. Außerdem werden durch den Schweißprozess selbst ausgelöste Emissivitätsschwankungen besonders im Bereich des Schweißpunkts hierdurch stark

---

<sup>7</sup>Schichtdickenintervall nach Produktinformationen der Fa. ThyssenKrupp Steel AG.

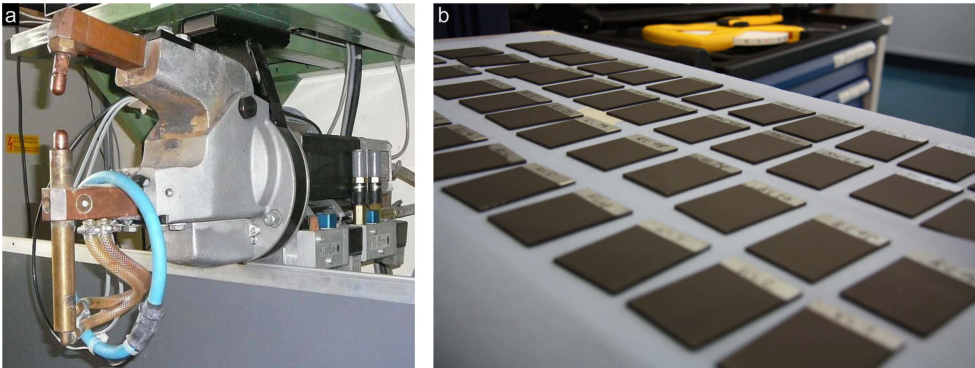


Abbildung 4.11: a: Foto der Widerstandspunktschweißzange der Firma Dalex der BAM Fachgruppe 5.5, die zur Präparation der in diesem Kapitel verwendeten Proben genutzt wurde (Quelle BAM 5.5). b: Foto des Probensatzes 1 für Serienuntersuchungen an Punktschweißverbindungen.

reduziert. Die Graphitbeschichtung lässt sich mithilfe von Aceton<sup>8</sup> rückstandsfrei entfernen. Bei der Beschichtung handelt es sich folglich um einen reversiblen Prozess. Doch stellt die thermografische Prüfung mit diesem zusätzlichen Prozessschritt kein berührungsloses Verfahren mehr dar.

Um die Übertragbarkeit der an beschichteten Proben gewonnenen Ergebnisse auf ein Verfahren, das ohne emissivitätssteigernde Beschichtungen auskommt, abzuschätzen, muss der Einfluss der Beschichtung

- auf die radiometrische Temperatur- bzw. IR-Intensitätsmessung,
- auf die Anregung sowie
- auf die Wärmeleitung innerhalb des Systems Probe-Beschichtung

betrachtet werden. Der letztgenannte Punkt bereitet keine Probleme. Durch die zusätzliche Materialschicht wird die Ortsauflösung herabgesetzt. Aus diesem Gesichtspunkt sind Experimente an unbeschichteten Proben sogar vorteilhaft.

Es werden nur optische Anregungsmethoden beeinflusst. Wird eine solche, wie für die in dieser Arbeit gezeigten Experimenten, verwendet, können die Auswirkungen auf Anregung und Messung gemeinsam betrachtet werden. Hier sind zunächst zwei Fälle zu unterscheiden, je nachdem ob eine homogene Oberfläche, Absorptions- und Emissionsgrad also niedrig, aber örtlich konstant sind, oder ob eine inhomogene Oberfläche vorliegt, bei der diese Eigenschaften starken örtlichen Schwankungen unterliegen. Für homogene Oberflächen geht der Absorptionsgrad  $\alpha$  bei gleicher Anregungsleistung linear in die in die Probe eingebrachte Energie ein. Bei  $\alpha = 0,1$  müsste die Leistung lediglich um einen Faktor zehn erhöht werden,

<sup>8</sup>Systematischer Name: Dimethylketon.

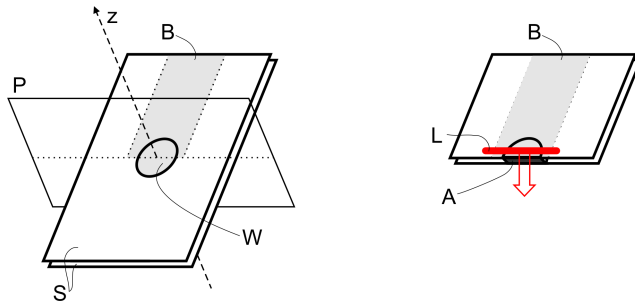


Abbildung 4.12: Skizze einer Probe. Die beiden Bleche S sind durch einen Schweißpunkt W miteinander verbunden. Eine solche Probe hat eine Symmetrieebene P und, betrachtet man einen ausreichenden kleinen Teil, eine Symmetrieachse z. Links ist die vollständige Probe skizziert, rechts die für Vorversuche verwendete halbe Probe. Hier erfolgte die Anregung mittels Laser entlang der Linie L. Betrachtet wurde die Temperatur an der Schnittfläche A. B bezeichnet den geschwärzten Bereich.

um anregungsseitig zu den gleichen Ergebnissen wie bei einer beschichteten Probe zu kommen, was sich in der Regel technisch realisieren lässt. Da die Emissivität entsprechend auch linear in die Intensität der abgestrahlten IR-Strahlung eingeht, muss hier die Empfindlichkeit der verwendeten IR-Kamera hoch genug sein, was teilweise ein schwer lösbares Problem darstellen kann. Zudem ist es in diesem Fall eine notwendige Voraussetzung, dass die einfallende Hintergrundstrahlung konstant ist. Denn der Anteil, der nicht emittiert wird, wird nach dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz (siehe Gleichung 2.4) reflektiert, was bei den zu erwartenden geringen Temperaturänderungen andernfalls eine Messung unmöglich machen würde. Allerdings lässt sich ein solcher Schutz insbesondere bei einer Transmissionsanordnung leicht durch eine kleinformatige Einhausung realisieren.

Für den Fall einer stark inhomogenen Oberfläche müssen weitere Probleme gelöst werden. Eine optische Anregung würde zu einer entsprechend starken örtlichen Variation der eingebrachten Leistung führen, weshalb auf andere Anregungsquellen (z.B. Heißluft oder kontaktieren Wärmeübertragung) zurückgegriffen werden muss. Die inhomogene Emissivität lässt sich hingegen messtechnisch handhaben. Dazu muss nacheinander die Reflexion zweier Referenzflächen bekannter Temperatur und Emissivität auf der Probe mittels der eingesetzten IR-Kamera aufgenommen werden. Daraus lässt sich dann eine Emissivitätsverteilung für die Probenoberfläche berechnen. Ob ein solches Vorgehen allerdings notwendig ist, hängt immer von dem Ausmaß der Inhomogenität der untersuchten Probe ab und muss für den konkreten Anwendungsfall bestimmt werden, da die Oberflächeneigenschaften insbesondere im Fall von Metall stark von den vorangegangenen Verarbeitungsschritten abhängen.

Weiterhin wurden zur Bestimmung des geometrischen Auflösungsvermögens des Versuchsaufbaus eine Reihe von Proben ohne Schweißung aus Baustahl (S235JR) mit Dicken von  $d = 0,5 \text{ mm}$ ;  $1,0 \text{ mm}$ ;  $1,5 \text{ mm}$ ;  $2,0 \text{ mm}$ ;  $3,0 \text{ mm}$ , sowie eine Probe aus dem verwendeten TRIP-Stahl mit einer Dicke von  $d = 1 \text{ mm}$  verwendet. Diese wurden auf einer Seite kom-

plett mit Graphit beschichtet. Auf der anderen Seite wurden sie teilweise beschichtet, sodass sich hier ein scharfer Unterschied im Absorptionskoeffizienten ergibt.

### 4.3 Untersuchung zur prinzipiellen Durchführbarkeit

Voraussetzung für die prinzipielle Möglichkeit einer Charakterisierung von Punktschweißungen mittels Thermografie sind Unterschiede in der thermischen Leitfähigkeit  $\lambda$  zwischen verschiedenen präparierten Proben. Insbesondere darf die Leitfähigkeit in der Haftzone nicht zu groß sein (vergleiche Abschnitt 4.1). Im Falle eines konstanten Temperaturunterschiedes an den Grenzflächen ist die thermische Leitfähigkeit nach dem Fourierschen Gesetz (siehe auch Gleichung 2.5) umgekehrt proportional zum Temperaturgradienten  $1/\lambda \propto \nabla T$  (analog zur elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$  und der Spannung  $U$ ). Mit einer dreidimensional räumlich aufgelösten Temperaturmessung könnten solche Unterschiede nachgewiesen werden. Dies ist aber auf Grund der Unzugänglichkeit im Volumen nicht direkt durchführbar.

Eine solche Messung lässt sich aber unter Ausnutzung von Symmetrieeffekten durchführen. Betrachtet man nur die Schweißlinse, so ist diese rotationssymmetrisch um eine Symmetrieachse durch ihren Mittelpunkt (in Abbildung 4.12 mit  $r$  bezeichnet). Entlang sämtlicher Ebenen, die  $r$  enthalten, kann also bei homogener Anregung kein Wärmefluss stattfinden, da wegen der Symmetrie kein treibender Gradient vorliegen kann. Berücksichtigt man die gesamte Probe, so ergeben sich wegen des rechteckigen Querschnitts zwei Symmetrieebenen. Zerteilt man die Probe entlang einer von diesen (mit  $P$  bezeichnet), sollte sie sich genau so wie eine komplette Probe verhalten. Denn für kurze Anregungszeiten lässt sich die Abkühlung durch Konvektion und Strahlung an der Schnittfläche gegenüber der Wärmeleitung im Metall vernachlässigen. Somit wird eine qualitative Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bzw. des thermischen Widerstands im Bereich der Schweißlinse durch die Messung der Temperatur an der Schnittfläche möglich.

#### 4.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Es wurde eine mit optimalen Parametern geschweißte Probe und eine Klebschweißung verwendet. Beide Proben wurden entlang der Symmetrieebene  $P$  zerteilt. Zur Erhöhung der Emissivität  $\epsilon$  wurden die Proben teilweise mit Graphit beschichtet (in Abbildung 4.12 mit  $B$  bezeichnet). Der gezielte Wärmeeintrag auf nur einer Seite – ohne die Schnittfläche selbst direkt zu erwärmen – gestaltete sich als experimentell anspruchsvoll. Bei der Verwendung von Blitzlampen kommt es durch die recht große räumliche Ausdehnung der Strahlungsquelle leicht zu unerwünschten Reflexionen, die sowohl Schnittfläche als auch direkt die Kamera treffen können. Dies lässt sich auch durch Blenden nur schwer komplett ausschließen. Deshalb wurde zur Anregung auf das Lasersystem LAT (siehe Unterabschnitt 3.2.2) zurückgegriffen, das durch seinen definierten Strahlengang ein solches Experiment ermöglicht (siehe Abbildung 4.13).

Die Anregung wurde für 50 ms mit einer Leistung von  $P = 50$  W durchgeführt. Hierzu wurde eine Linie der Länge 20 mm am Rand der Probe über der Position der Schweißlinse

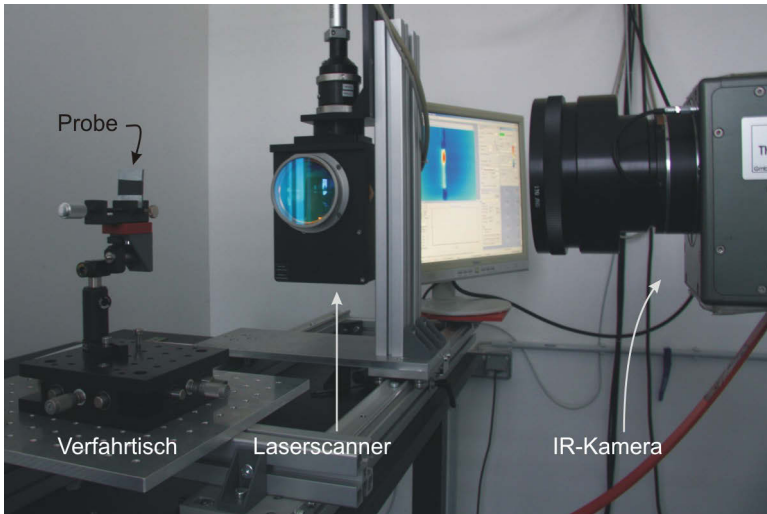


Abbildung 4.13: Foto der Versuchsanordnung zur Messung der Temperaturverteilung durch einen Schweißpunkt hindurch an einer zerteilten Probe.

parallel zur Schnittfläche (in Abbildung 4.12 mit  $L$  bezeichnet) mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s bei einem Spotdurchmesser von  $d = 1,1$  mm 25 mal abgefahren. In Abbildung 4.14 sind Thermogramme aus solchen Messungen an zwei Proben, einer Klebschweißung und einer Schweißung mit optimalen Parametern, dargestellt. Gezeigt wird der größte Temperaturgradient an der Blechgrenze, der sich zu einem Zeitpunkt von 100 ms nach Ende der Erwärmung ergab.

### 4.3.2 Ergebnisse

Die beiden verschieden präparierten Proben zeigen signifikant unterschiedliche Ergebnisse. Im Falle der Klebschweißverbindung tritt über die gesamte Probenbreite ( $y$ -Richtung) hinweg ein Temperatursprung im Bereich des Übergangs zwischen beiden Blechen auf (siehe Abbildung 4.14 a und c 1). An dem Übergang ergibt sich also ein hoher Temperaturgradient  $\vec{\nabla}T$  bzw. thermischer Widerstand  $R_{th}$  in  $x$ -Richtung. Nach dem Fourierschen Gesetz folgt daraus eine geringe Wärmeleitung  $\dot{Q}$  über die Blechgrenze hinweg (siehe Gleichung 2.5). Bei der mit optimalen Parametern präparierten Probe (siehe Abbildung 4.14 b und c 3) liegt hingegen im Bereich der Schweißlinse (um ca.  $y = 15$  mm herum) ein deutlich geringerer Temperaturgradient vor. Die Wärmeleitung ist hier somit im Vergleich zum umliegenden Bereich und zur gesamten Klebschweißverbindung deutlich erhöht. Das Resultat der Messung an der Klebverbindung lässt sich schwieriger interpretieren. Dass hier keine höhere



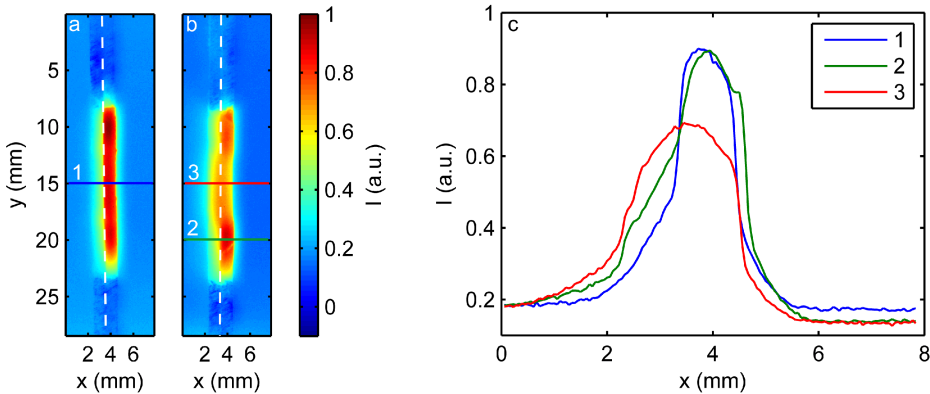


Abbildung 4.14: Thermogramme aus der seitlichen Messung des Wärmeflusses durch die Schweißlinse hindurch 100 ms nach der Anregung. a: Klebschweißung, b: optimale Parameter. Die gestrichelten Linien zeigen die Grenze zwischen den einzelnen Blechen an. c: Horizontale Intensitätsprofile, in a und b farblich gekennzeichnet (1: a bei  $y = 15$  mm, 2: b bei  $y = 20$  mm, 3: c bei  $y = 15$  mm). Die Klebschweißung (a, c 1) zeigt einen deutlichen Temperatursprung im Bereich des Übergangs zwischen beiden Blechen. Bei der mit optimalen Parametern geschweißten Probe (b) ist hingegen im Bereich der Schweißlinse ( $y = 15$  mm, c 3) ein deutlich flacherer Temperaturanstieg zu beobachten. Neben der Schweißlinse ( $y = 20$  mm, c 2) ist der Temperaturanstieg ähnlich steil wie bei der Klebschweißverbindung.

Wärmeleitfähigkeit im mittleren Bereich, in dem die Schweißlinse vermutet wird, erkennbar ist, lässt sich auf zwei Arten erklären. Entweder findet durch die im Vergleich zur anderen Probe kleinere und schwächer ausgeprägte Schweißlinse kein maßgeblicher Wärmeaustausch statt, oder die Verbindung war von so geringer Festigkeit, dass sie schon bei der Präparation im Bereich der Schnittfläche getrennt wurde. Eine vollständige Trennung kann ausgeschlossen werden, da ein mechanischer Verbund bestand. Weil die Proben mit bis auf die unterschiedlichen Ströme gleichen Parametern geschweißt wurden, sollten beide eine etwa gleich große formschlüssige Haftzone aufweisen. Da beide Proben eine verschiedene Leitfähigkeit im mittleren Bereich der Probe zeigen, lässt sich folgern, dass der Wärmewiderstand der Schweißlinse deutlich geringer als der der sie umgebenden Haftzone ist. Nach den Ergebnissen der in Abschnitt 4.1 diskutierten FEM Simulationen liegt der kritische Abstand zwischen den Blechen in der Haftzone im Mikrometer-Bereich, was gerade den tatsächlichen Gegebenheiten für den verwendeten Probentyp entspricht (vergleiche auch Abbildungen 2.13 und 2.14). Aus den vorliegenden Ergebnissen kann gefolgert werden, dass hier ein ausreichender Abstand und somit thermischer Widerstand vorliegt. Es ist also prinzipiell möglich, mithilfe thermografischer Untersuchungen Rückschlüsse auf die Schweißlinsengröße zu ziehen und insbesondere zumindest diese beiden Typen von Punktschweißungen zu unterscheiden.

## 4.4 Thermografische Serienmessung

In diesem Abschnitt wird eine Serienmessung an den Proben der zuvor beschriebenen Probenreihe 1 gezeigt. Nachdem der verwendete Versuchsaufbau vorgestellt (siehe Unterabschnitt 4.4.1) wurde, wird vor der eigentlichen Serienmessung das geometrische Auflösungsvermögen dieses Aufbaus bestimmt (siehe Unterabschnitt 4.4.2). Anhand der Ergebnisse kann dann die Entscheidung getroffen werden, ob eine direkte Messung der Größe der Schweißlinse oder eine Bestimmung des gesamten Wärmeübertrags über die Schweißverbindung – wie bereits in Abschnitt 4.1 angesprochen – für eine weitere Auswertung zielführend ist. Die Details zur Durchführung der Serienmessung folgen dann im Unterabschnitt 4.4.3.

### 4.4.1 Versuchsaufbau

Zur rationellen und reproduzierbaren Durchführung von Serienuntersuchungen im Labormaßstab wurde ein spezieller Probenhalter konstruiert. Der Probenhalter ist als stabiles Tischgerät mit integrierter Halterung für eine Blitzlampe ausgeführt. Die Proben werden hier in Transmission gemessen (siehe Abbildung 4.15). So werden einerseits aufgrund der Ergebnisse aus den zuvor vorgestellten FEM-Simulationen aussagekräftigere Messdaten erwartet, andererseits kann die IR-Kamera näher und zudem genau normal zur Probe positioniert werden, ohne die Anregung zu behindern. Angeregt wird mit der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Xenon-Blitzlampe. Die eingangsseitige Energie pro Puls beträgt laut Herstellerangaben 6 kJ. Um eine Pulsverbreiterung durch das thermische Nachleuchten zu verhindern, kommt eine PMMA-Scheibe als Filter zum Einsatz. Diese erwärmt sich zwar selbst, sodass sie wiederum im Infraroten abstrahlt. Da der Temperaturanstieg jedoch nur einige wenige Kelvin beträgt, kann dieser Einfluss vernachlässigt werden, denn die abgestrahlte Leistung hängt von  $T^4$  ab. In dem Probenhalter finden jeweils 6 Proben Platz, die sukzessive vermessen werden können (siehe Abbildung 4.16).

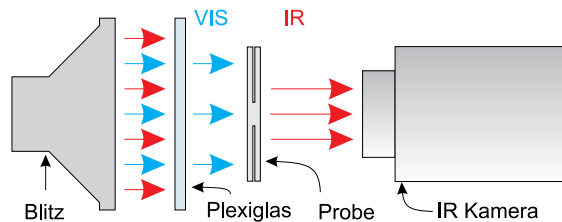


Abbildung 4.15: Skizze der Versuchsanordnung für Messungen in Transmissionsanordnung an Punktschweißverbindungen. Durch die PMMA-Scheibe wird das durch Erwärmung verursachte Nachleuchten der Blitzlampe im Infraroten (IR) zurückgehalten, sodass nur Strahlung im sichtbaren Bereich des Spektrums (VIS) die Probe erwärmt. Durch die Erwärmung strahlt die Probe im Infraroten, was eine Messung der Temperatur  $T$  (bzw. der von  $T$  abhängigen IR-Strahlungs-Intensität  $I$ ) mittels IR-Kamera ermöglicht.

Die IR-Kamera (siehe Abschnitt 3.1.1) wird in einem Abstand von 23 cm zum Proben-

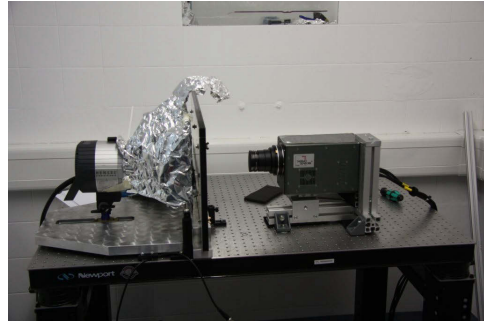
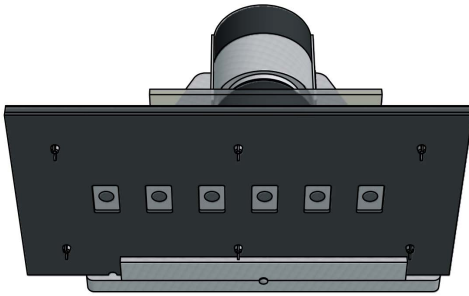


Abbildung 4.16: Skizze der Probenhalterung für Serienuntersuchungen an Punktschweißverbindungen (links): Es können jeweils 6 Proben gleichzeitig in dem Rahmen eingespannt werden und dann sukzessive in Transmission vermessen werden. Foto des kompletten Versuchsaufbaus (rechts): Die IR-Kamera wurde steif auf einem optischen Tisch fixiert, um durch den internen Stirling-Kühler verursachte störende Vibrationen zu reduzieren.

halter aufgestellt. So ergibt sich eine Vergrößerung von  $43 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ . Da die Vibrationen des in der Kamera integrierten Stirlingkühlers bei diesen Parametern bei einer einfachen Halterung der Kamera mittels konventionellem Stativ zu Verschiebungen des Bildes um ca. 5 Pixel führten, musste der Aufbau mechanisch stabilisiert werden. Hierzu wurde der Versuchsaufbau auf einem passiv gedämpften optischen Tisch mit Lochrasterplatte aufgestellt. Durch eine steife Verbindung der IR-Kamera mit zusätzlichen Abstützungen an mehreren Stellen des Gehäuses konnten die in der Aufnahme sichtbaren Vibrationen auf ca. 2 Pixel reduziert werden.

#### 4.4.2 Geometrische Auflösung der Versuchsanordnung

Um die Frage zu klären, ob eine direkte Vermessung der Größe der Schweißlinse einer untersuchten Probe experimentell möglich ist, muss das geometrische Auflösungsvermögen des Versuchsaufbaus bekannt sein. Der Wert des Auflösungsvermögens bezeichnet hier, mit welcher räumlichen Auflösung im Kamerabild ein scharfer Übergang zwischen optimaler Wärmeleitfähigkeit und einer Wärmeleitfähigkeit von Null innerhalb einer Probe erscheinen würde (siehe Abbildung 4.17 a). Da sich ein solcher scharfer Übergang der thermischen Eigenschaften innerhalb einer Probe präparativ schwer abbilden lässt, wird hier zu einer anderen Herangehensweise gegriffen. Es werden homogene Proben verwendet, deren Oberfläche nur zur Hälfte angeregt wird (siehe Abbildung 4.17, b). Dies entspricht dann dem Fall, dass nur die kameraseitige Probenhälfte einer vollständigen Probe betrachtet wird, die ihrerseits nur teilweise mit der blitzseitigen Probenhälfte in thermischem Kontakt steht.

Es wurde hierzu eine Probe aus dem für die Punktschweißungen verwendeten Tripstahl mit der Dicke  $d = 1 \text{ mm}$  und Proben aus Baustahl (S235JR) in den Dicken  $d = 0,5 \text{ mm}$  bis  $d = 3 \text{ mm}$  hergestellt. Das verwendete Material hat dabei keine Auswirkung auf das

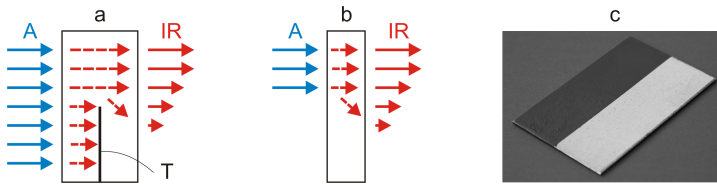


Abbildung 4.17: Prinzip der Bestimmung der geometrischen Auflösung. a: Wird eine sonst homogene Probe mit einer thermischen Barriere T flächig angeregt (blaue Pfeile, A), wird die scharfe Begrenzung von T durch den diffusiven Charakter der Wärmeleitung in der Probe (gestrichelte Pfeile) aufgeweitet, was sich über die Oberflächentemperatur, bzw. die Wärmestrahlung (rote Pfeile, IR) nachweisen lässt. b: Das gleiche Verhalten lässt sich durch eine örtlich begrenzte Anregung an einer homogenen Probe darstellen. c: Die begrenzte Anregung lässt sich experimentell über Oberflächenpräparationen mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten bei homogener Anregung realisieren.

Auflösungsvermögen, sondern nur auf den Zeitpunkt, zu dem die beste Auflösung erreicht werden kann. Zur Realisierung der orts aufgelösten thermischen Anregung wurden diese Proben auf der dem Blitz zugewandten Seite nur teilweise beschichtet, sodass sich eine scharfe Kante ergab (siehe Abbildung 4.17 c). Da der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  für die Beschichtung nahezu 1, für das unbeschichtete Metall aber deutlich geringer ist ( $\alpha \approx 0,2$ ), lässt sich so auf einfache Weise ein stark inhomogener Energieeintrag realisieren. Weil es sich bei der Wärmeleitung um einen diffusiven Prozess handelt, wird die scharfe Kante in Abhängigkeit von der Materialdicke verbreitert. Auf der der Kamera zugewandten Seite entsteht so ein weicher Intensitätsverlauf. In Abbildung 4.18 ist links ein solcher örtlicher Intensitätsverlauf zum Zeitpunkt des maximalen Kontrasts dargestellt.

Als Auflösungskriterium wird ein Intensitätsanstieg von 20% auf 80% des maximalen Intensitätshubs herangezogen (grüne Linien in Abbildung 4.18). So ergibt sich ein geometrisches Auflösungsvermögen, welches in etwa der Probendicke entspricht (siehe Abbildung 4.18, rechts). Dieses Ergebnis entpricht der Faustregel für die bildgebend-defektoskopische Thermografie, nach der eine Fehlstelle detektierbar ist, wenn die Überdeckung ihre laterale Ausdehnung nicht übersteigt [4]. Für die Prüfung von Punktschweißverbindungen bedeutet dieses Ergebnis, dass eine direkte Ermittlung der Linsengröße nur mit großen Einschränkungen möglich ist. Denn bei einer Blechdicke von 1 mm und einem typischen Linsendurchmesser von 5 mm wäre so eine sichere Bestimmung der Linsengröße nur mit einer Auflösung von unter 20% möglich. Dieses Ergebnis deckt sich mit den auf Grundlage der im ersten Abschnitt dieses Kapitels diskutierten FEM-Simulationen angestellten Überlegungen. Daher wird im Folgenden nach einer Möglichkeit zur indirekten Bestimmung der Linsengröße über den integralen thermischen Widerstand gesucht.

#### 4.4.3 Versuchsdurchführung

Die Serienuntersuchung an der Probenreihe 1 wurde mit folgenden Versuchsparametern durchgeführt:

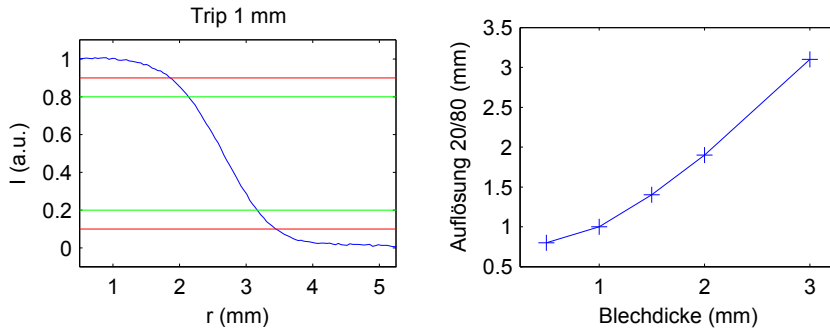


Abbildung 4.18: Zur Abschätzung der geometrischen Auflösung wurden auf der dem Blitz zugewandten Seite teilweise beschichtete Proben verwendet (siehe Abbildung 4.17). Links ist die normierte Intensitätsverteilung gegen den Ort, in orthogonaler Richtung zur Grenze der Beschichtung, für eine 1 mm dicke Probe dargestellt. Als Grundlage diente das Einzelthermogramm mit dem schärfsten Kontrast, hier bei  $t = 0,42$  s. Es wurde keine weitere Mittelung vorgenommen. In rot und grün sind die Grenzen für das 90/10- bzw. 80/20-Kriterium eingezeichnet. Im rechten Diagramm ist das sich nach dem 20/80-Kriterium ergebene Auflösungsvermögen gegen die Blechdicke aufgetragen.

- Kameraeinstellungen:
  - 30 mm SMWIR Objektiv.
  - Integrationszeit:  $0,625 \mu\text{s}$ .
  - Auflösung:  $320 \times 248$  Pixel (Subarray).
  - Bildwiederholfrequenz: 329 Hz.
  - Abstand Kameragehäuse-Probe: 231 mm.
  - Vergrößerung:  $43 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ .
  - Aufgenommenes Gebiet:  $13,2 \text{ mm} \times 10,3 \text{ mm}$ .
  - Aufnahmedauer pro Experiment: 1000 Einzelbilder entsprechend 3,0 s.
- Umgebungsparameter:
  - Umgebungstemperatur: ca.  $22^\circ\text{C}$ .
  - Relative Luftfeuchtigkeit: ca. 55%.
- Anregungsquelle.
  - Xenonblitzlampe in Transmission.
  - Anschlussseitige Energie pro Blitz: 6 kJ (Herstellerangaben).

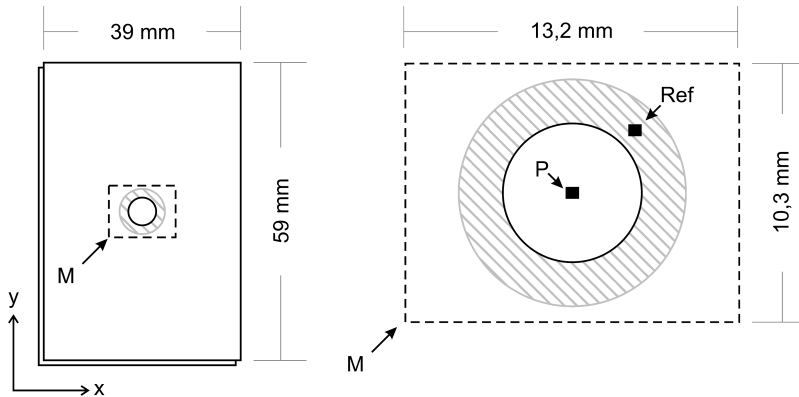


Abbildung 4.19: Maßstabsgetreue Skizze der Messbereiche: Der Bildausschnitt  $M$  umfasst  $320 \times 248$  Pixel, das entspricht rund  $40 \mu\text{m}$  pro Pixel. Die Bereiche  $P$  und  $\text{Ref}$  sind jeweils  $11 \times 11$  Pixel groß.  $\text{Ref}$  ist  $3,1 \text{ mm}$  von  $P$  entfernt. Der schraffierte Bereich zeigt den Elektrodenabdruck an, der innere Kreis hat einen Durchmesser von  $5 \text{ mm}$  entsprechend dem optimalen Schweißblinsendurchmesser.

Die Lage des aufgenommenen Gebiets relativ zur gesamten Probe ist in Abbildung 4.19 als  $M$  eingezeichnet. Jede Probe wurde einmal in den Rahmen eingespannt. Um sukzessive alle Proben zu vermessen, wurde folgende Messprozedur verwendet:

1. Der Rahmen wird mit je 2 Proben aus jeder der drei Gruppen der Probenreihe 1 (KL, 5W, SP) bestückt.
2. In der Reihenfolge [1, 4, 2, 5, 3, 6] wird jede Probe einmal vermessen. So konnte, im Gegensatz zur Anregung aufeinander folgender direkt benachbarter Proben, keine systematische Beeinflussung der Messung durch die vorhergehende Probe mehr festgestellt werden.
3. Diese Abfolge wird drei mal wiederholt. Dabei lagen ca. zwei Minuten zwischen zwei Messungen an einer Probe. Nach dieser Zeit konnte keine Erwärmung mehr durch direkte Messung mit der IR-Kamera festgestellt werden (dieser Punkt wird im Abschnitt 4.8 ausführlich diskutiert).
4. Der Rahmen wird mit je zwei neuen Proben aus jeder der drei Gruppen bestückt, weiter bei Punkt 2, bis alle Proben vermessen wurden.

Die Rohdaten wurden zunächst auf dem raid-Array des Messrechners gespeichert. Der resultierende Datensatz umfasst insgesamt 225 Thermografie-Sequenzen, was eine Datenmenge von insgesamt ca.  $36 \text{ GB}$  ergibt.

## 4.5 Datenaufbereitung und Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden Methoden zur Aufbereitung der nach der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Messprozedur gewonnenen Daten präsentiert und erste direkte Ergebnisse gezeigt. Um die große Datenmenge zu analysieren, ist einzig eine automatisierte Datenauswertung zweckmäßig.

Für einen Vergleich der einzelnen Messungen werden gleichartige Daten von jedem Experiment benötigt. Um dies sicherzustellen müssen zunächst zwei wichtige Parameter zu jeder Einzelmessung ermittelt werden:

- Der genaue Zeitpunkt des Blitzes, der wegen instrumenteller Unzulänglichkeiten nicht bekannt ist (siehe Abschnitt 3.1.1).
- Die genaue räumliche Position des Schweißpunkts, die nicht fest steht, da die geometrische Genauigkeit sowohl der Probenpositionierung als auch der Probenpräparation deutlich geringer als das Auflösungsvermögen der Kamera ist.

### 4.5.1 Geometrische und zeitliche Charakterisierung

Wird der zeitliche Verlauf nur eines einzelnen Pixels betrachtet, zeigen sich durch das Rauschen und die mechanischen Schwingungen der Kamera starke Streuungen (Abbildung 4.20 a). Bildet man hingegen den Mittelwert in einem  $5 \times 5$  Pixel großen Bereich, so reicht dies aus, um zu einem nahezu rauschfreien Signal zu kommen. Eine Mittelwertbildung über den gesamten Messbereich führt zu keiner deutlichen Verbesserung mehr. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Intensitäten in Abbildung 4.20 jeweils auf 0 und 1 für  $t = 0$  s bzw.  $t = 3$  s normiert.

Daher wird nun, um den ersten Punkt zu lösen, der zeitliche Verlauf der örtlich über das  $5 \times 5$  Pixel große Gebiet P in der Mitte der Probe (siehe Abbildung 4.19) gemittelten Intensität  $I_n(t)$  der von der IR-Kamera aufgenommenen Strahlung betrachtet. Durch die Anordnung der Blitzlampe wird ein gewisser Teil von deren Strahlung direkt in die IR-Kamera reflektiert. Hierdurch kommt es zu einem pulsformigen Signal des Blitzes selbst. In Abbildung 4.20 b sind  $I_n(t)$  und die zeitliche Ableitung  $dI_n/dt$  gemeinsam dargestellt. Der Blitz ist für das lokale Maximum bei  $t_f = 0$  s verantwortlich. Da die Halbwertsdauer des Blitzes mit ca. 2,7 ms im Bereich der zeitlichen Abtastrate von 329 Hz, entsprechend ca. 3,0 ms pro Einzelbild, liegt, die Integrationszeit mit 0,625 ms aber deutlich kürzer ist, tritt das beschriebene Reflexionsmaximum nur in einem Thermogramm mit voller Intensität auf. Das führt trotz der geringen absoluten Intensität des Signals zu einem großen Ausschlag in der ersten zeitlichen Ableitung  $dI_n/dt$ . Das erste relative Maximum dieser Ableitung wird nun als zeitliche Referenz  $t_f$  gewählt. Der absolute Fehler kann hierfür mit einem Zeitschritt, entsprechend  $\Delta t_f = 3$  ms, angenommen werden.

Um den zweiten Punkt zu behandeln, wird die örtliche Intensitätsverteilung zu Beginn der Wärmeübertragung durch den Schweißpunkt hindurch betrachtet. Als vorteilhaft hat sich hier ein Zeitpunkt  $t_{\text{ref}} = 0,4$  s erwiesen. Das Verfahren ist aber robust gegenüber kleinen Änderungen des Referenzzeitpunkts. Zur Bestimmung der Lage der Schweißlinse

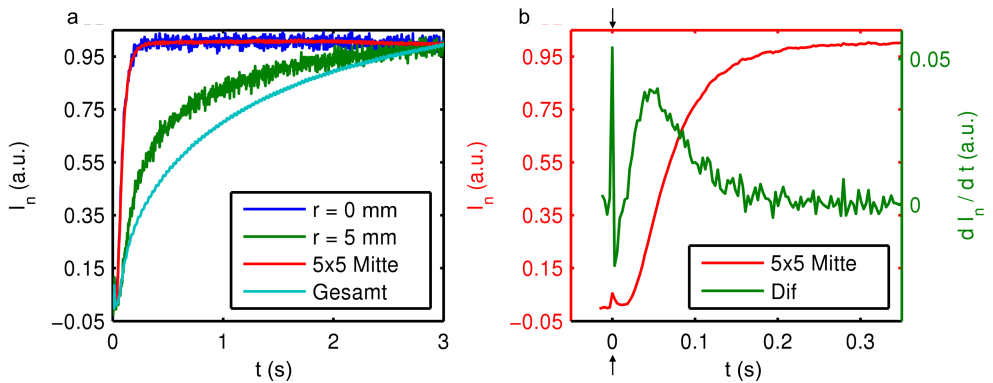


Abbildung 4.20: a: Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Intensitäten  $I_n$  für Einzelpixel am Mittelpunkt ( $r = 0$  mm) und im Referenzgebiet ( $r = 5$  mm), sowie zum Vergleich für einen  $5 \times 5$  Pixel großen Bereich im Mittelpunkt (5x5 Mitte) und den Mittelwert des gesamten Messbereichs (Gesamt). Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Intensitäten jeweils auf 0 und 1 für  $t = 0$  s bzw.  $t = 3$  s normiert. b: Zeitlicher Verlauf des  $5 \times 5$  Pixel großen Bereichs im Mittelpunkt (5x5 Mitte) sowie von dessen zeitlicher Ableitung  $dI_n/dt$  (Dif). Um alle Messungen im Bezug auf den Zeitpunkt des Blitzes vergleichbar zu machen, wird der erste Peak dieser Ableitung als Referenz gewählt (in der Darstellung bei  $t_f = 0$  s, durch schwarzen Pfeile angezeigt).

wird nun der zeitliche Mittelwert der fünf Thermogramme zu den Zeitpunkten  $t_{n-2} \dots t_{n+2}$  betrachtet, wobei  $t_n = t_{\text{ref}}$  sei und  $n$  die Einzelthermogramme fortlaufend nummeriere. Hiervon werden nur die 10% der Pixel mit den höchsten Intensitätswerten herangezogen, um Randeffekte und Intensitätsschwankungen außerhalb des Bereichs der Schweißlinse zu unterdrücken (siehe Abbildung 4.21 b). Von dieser als  $I(x,y)$  bezeichneten Verteilung wird nun der Schwerpunkt  $s = (s_x, s_y)$  (das reduzierte erste Moment) gemäß

$$s_x = \sum_{x,y} (x \cdot I(x,y)) / \sum_{x,y} I(x,y) \quad \text{und} \quad s_y = \sum_{x,y} (y \cdot I(x,y)) / \sum_{x,y} I(x,y) \quad (4.3)$$

ermittelt (gestrichelte Linien), wobei jeweils über alle räumlichen Messpunkte  $(x,y)$  summiert wird. Dieser entspricht der relativen Position des Mittelpunkts der Schweißlinse und wird als räumliche Referenz für die weitere Auswertung herangezogen. Hierauf beziehen sich dann unter anderem die Lagen von P und Ref aus Abbildung 4.19.

#### 4.5.2 Räumliche Mittelwertbildung und Signalnormierung

Die gesamten Messergebnisse lassen sich als vierdimensionaler Datenblock aus 225 dreidimensionalen Thermografie-Sequenzen verstehen. Da sich ein solcher Datensatz nicht sinnvoll komplett gleichzeitig darstellen lässt, muss eine geeignete Form der Darstellung für einen Vergleich der Ergebnisse aus den einzelnen Messungen gefunden werden. Es bietet sich an, räumliche Mittelwerte zu betrachten, da sich so die zeitlichen Verläufe als Intensitätskurven



$I_m(t)$  darstellen lassen. Der naheliegendste Weg ist nun eine räumliche Mittelung über den gesamten Messbereich  $M$ .

Im erstem Schritt sollen die zeitlichen Signalverläufe aus den einzelnen Messungen vergleichbar gemacht werden. In Abbildung 4.22 a sind diese Kurven für eine örtliche Mittelung über den gesamten Messbereich ( $M$  in Abbildung 4.19) für alle Messungen dargestellt. Die Anfangswerte der Signale streuen um etwa den 4-fachen Betrag des Signalhubs eines einzelnen Signals. Für dieses Verhalten kommen unterschiedliche Ursachen in Frage, wie z.B. eine zeitliche Drift des thermischen Ansprechverhaltens des Detektors der verwendeten IR-Kamera oder Schwankungen in der Umgebungstemperatur bzw. der Ausgangstemperatur der Proben. In einer solchen Darstellung lässt sich kein einheitliches Verhalten für die einzelnen Gruppen ablesen.

Um die Daten vergleichbar zu machen, wird im ersten Schritt eine *offset*-Korrektur durchgeführt. Hierzu wird der Mittelwert der ersten drei Messwerte vom Signal abgezogen (siehe Abbildung 4.22 b). Diese liegen vor dem Signal des Blitzes (siehe auch Abbildung 4.20), sodass sichergestellt ist, dass diese Werte nicht durch die Anregung beeinträchtigt wurden. Physikalisch lässt sich dieses Vorgehen dadurch motivieren, dass auf diese Weise unterschiedliche Anfangsbedingungen kompensiert werden. Bei den betrachteten Temperaturänderungen auf der Zeitskala einer Messung haben Strahlungs- und Konvektionseffekte nur einen sehr geringen Einfluss. Da die Wärmeleitungsgleichung ohne Quellterme linear in der Temperatur ist (siehe Gleichung 2.10), bedeutet dies, dass sich Änderungen in der Anfangstemperatur  $T_0$  nur schwach auf das relative Verhalten der Proben auswirken. Für Zeiten zwischen  $t = 0$  s und  $t = 0,5$  s ist nun ein tendenziell unterschiedliches Verhalten für die einzelnen Gruppen erkennbar. Ein wesentlich besseres Ergebnis erhält man, wenn zusätzlich das Ende der Messung auf 1 normiert wird (siehe Abbildung 4.22 c). Hierzu wird wieder der Mittelwert aus drei Einzelmessungen, nun um  $t = 3$  s, herangezogen. Beide Schritte werden pixelweise auf die ortsaufgelösten Thermografie-Sequenzen angewendet, danach erst wird eine räumliche Mittelung zur Darstellung durchgeführt. Seien die Intensitätswerte mit  $I(x,y,t_i)$  bezeichnet, wobei  $i = 1..N$  die einzelnen zeitlichen Messpunkte

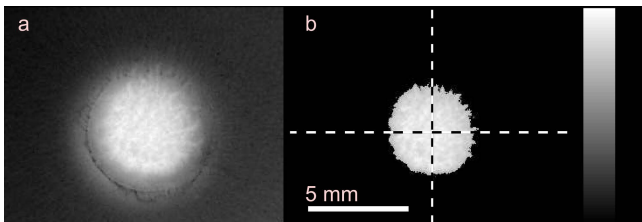


Abbildung 4.21: Thermogramm (a) bei  $t = 0,4$  s und die 10% der Pixel mit den höchsten Intensitätswerten (b). Der Schwerpunkt dieser Pixel (gestrichelte Linien) wird zur Bestimmung der Lage der Schweißlinie herangezogen.

bezeichnen, dann lässt sich diese Prozedur folgendermaßen ausdrücken:

$$I_{\text{off}}(x, y, t_i) = I(x, y, t_i) - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 I(x, y, t_i) \quad (4.4)$$

$$I_{\text{norm}}(x, y, t_i) = I_{\text{off}}(x, y, t_i) \cdot \left( \frac{1}{3} \sum_{i=(N-2)}^N I_{\text{off}}(x, y, t_i) \right)^{-1}. \quad (4.5)$$

Wendet man diese Normierung an, lassen sich die einzelnen Gruppen insbesondere im Bereich zwischen  $t = 0,1$  s und  $t = 0,4$  s augenscheinlich gut separieren (siehe Abbildung 4.22 d).

Die Mittelwertbildung über den gesamten Messbereich ist nicht die einzige Möglichkeit, einen zweidimensionalen Datensatz aus einer Thermografie-Sequenz zu generieren. In der Abbildung 4.23 ist die Differenz  $I_{\text{Dif}} = I_{\text{P,norm}} - I_{\text{Ref,norm}}$  aus den Intensitäten in einem  $5 \times 5$  Pixel, entsprechend  $0,22 \times 0,22 \text{ mm}^2$ , großen Bereich direkt über der Schweißlinse P und denen im ebenfalls  $5 \times 5$  Pixel großem Referenzgebiet Ref gezeigt. Die geometrische Lage der Gebiete ist auch in Abbildung 4.19 maßstabsgetreu dargestellt, ihr Abstand beträgt 3,6 mm.

Die Temperaturdifferenz  $I_{\text{Dif}}$  lässt sich als lineare Näherung des radialen Temperaturgradienten verstehen. Bei dieser Darstellung ergibt sich ein deutliches Maximum, d.h. ein maximaler örtlicher Intensitäts- bzw. Temperaturgradient an der Oberfläche. Erkennbar ist eine deutliche Verschiebung des Maximums bei Proben aus der Gruppe SP im Vergleich zu Proben aus den anderen beiden Gruppen hin zu kleineren Zeiten um ca. 50 ms (Diagramm b). Die größte Auftrennung ergibt sich aber bei Zeiten zwischen 0,5 s und 1,5 s. Insgesamt scheint sich auf diese Weise eine etwas bessere Unterscheidbarkeit zwischen den einzelnen Gruppen als bei Darstellung des räumlichen Mittelwerts über den gesamten Messbereich zu ergeben. Eine detaillierte Diskussion der Trennschärfe folgt im Abschnitt 4.8.

An dieser Stelle soll nochmals auf die Ergebnisse der FEM-Simulationen aus dem ersten Unterabschnitt dieses Kapitels zurückgegriffen werden. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Daten aus den FEM-Simulationen analog zu den experimentellen Daten  $I_{\text{norm}}$  und  $I_{\text{Dif}}$  normiert und gemittelt. Da es sich bei den Ergebnissen der Simulationen um Temperaturen handelt, werden diese hier mit  $T_{\text{norm}}$  und  $T_{\text{Dif}}$  bezeichnet. In Abbildung 4.24 sind diese Größen gegen die Zeit aufgetragen. Um qualitative Ergebnisse abzuleiten ist keine Umrechnung in Intensitätswerte erforderlich (vergleiche Unterabschnitt 2.1.1). Obwohl für die Simulationen keine genauen Materialparameter angesetzt wurden, ist die qualitative Übereinstimmung voll gegeben. Allerdings zeigen die Maxima von  $I_{\text{Dif}}$  bei den Simulationsergebnissen im Gegensatz zu den experimentellen Daten durchweg höhere und dabei zwischen den Gruppen unterschiedliche Werte. Eine räumliche Auswertung der Messdaten mit einem Schwellwertverfahren unter Ausnutzung des in Abbildung 4.6 verdeutlichten Zusammenhangs zwischen räumlicher Temperaturverteilung und Schweißlingsgröße zu einem festen Zeitpunkt führte, wie bereits in den theoretischen Ausführungen vermutet (siehe Unterabschnitt 4.1.4), nicht zum Erfolg. Hierzu reicht die Qualität der Messdaten nicht aus,

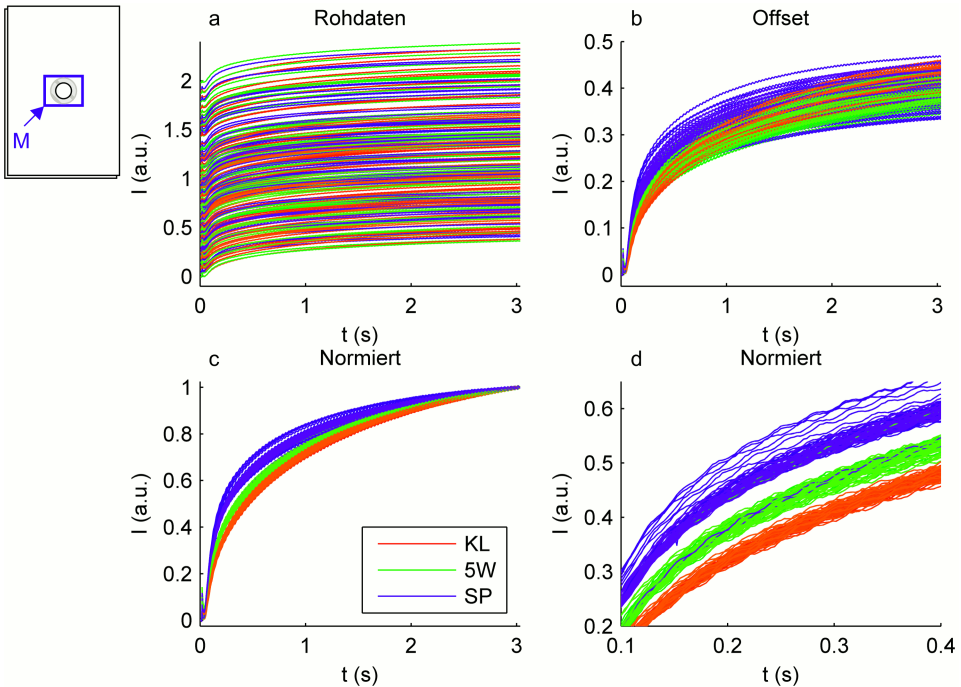


Abbildung 4.22: Dargestellt ist die räumlich im kompletten Messbereich ( $13,2 \times 10,2 \text{ mm}^2$ , siehe Abbildung 4.19) gemittelte Intensität  $I_{m,g,n}(t)$  für die gesamten 225 Einzelmessungen ( $g = 1..3, n = 1..75$ ). Die Gruppe ( $g = \text{KL}$ : Klebverbindungen,  $5\text{W}$ : Optimale Parameter,  $\text{SP}$ : Spritzergrenze) sind farblich gekennzeichnet. (a): Rohdaten nach NUC. In (b) wurde der Mittelwert der ersten drei Werte abgezogen (*offset*-Korrektur). Für (c) wurden die Daten auf 0 und 1 unter Verwendungen der jeweils ersten und letzten drei Messwerte normiert. In (d) sind die normierten Daten bei kleinen Zeiten dargestellt. Hier lassen sich die einzelnen Gruppen gut unterscheiden.

insbesondere ist die Streuung der Anfangswerte zu groß und die Emissivität trotz der Graphitbeschichtung zu inhomogen. Auch auf Grundlage der normierten Messsequenzen konnte auf diese Weise keine sichere Vorhersage der Schweißlinsengröße realisiert werden.

## 4.6 Zerstörende Prüfung

Um Referenzwerte zur Absicherung der Ergebnisse aus der thermografischen Prüfung zu erhalten, wurden die Proben des Probensatzes 1 nach den thermografischen Messungen zerstörend geprüft. Hierzu wurden instrumentierte Torsionsversuche nach DIN EN ISO 17653 durchgeführt, da so quantitative Parameter ermittelt werden können, die Rückschlüsse

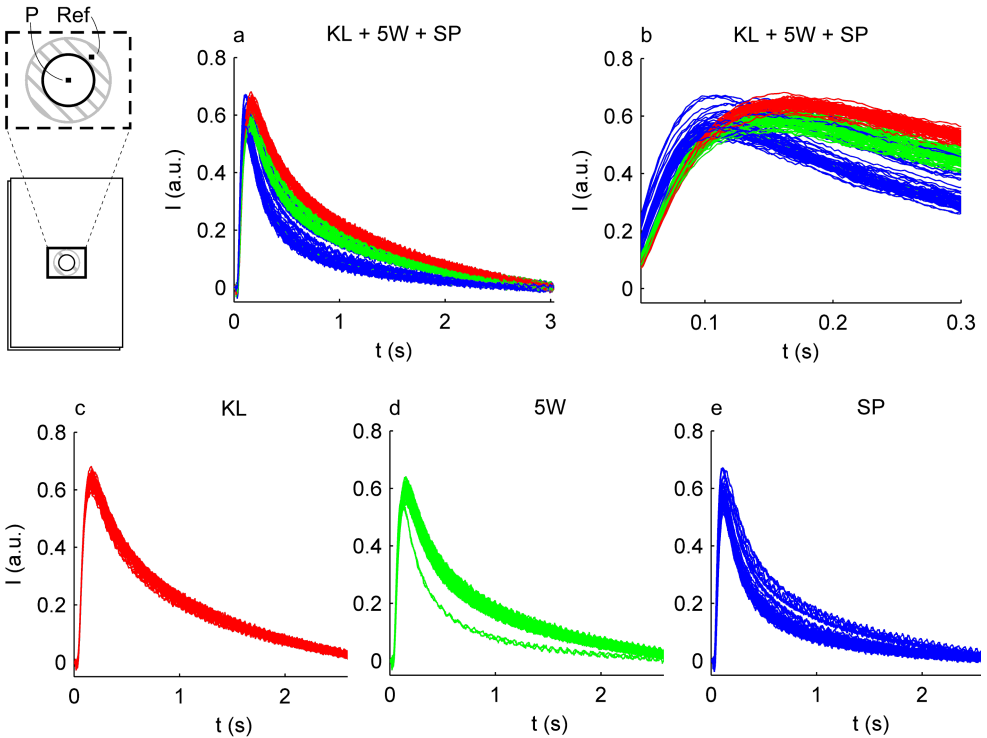


Abbildung 4.23: Zeitlicher Verlauf der Differenz der Intensität im Bereich des Punktes und des Referenzgebiets  $I_{\text{Dif}} = I_{\text{P,norm}} - I_{\text{Ref,norm}}$ . Jede einzelne Kurve entspricht einer der 225 Messungen. In a sind alle Gruppen zusammen dargestellt. Zu kleinen Zeiten (b) lassen sich die einzelnen Gruppen besonders deutlich trennen. Erkennbar sind die unterschiedlichen Werte der Maxima sowie eine deutliche Verschiebung hin zu kleineren Zeiten bei Proben aus der Gruppe SP im Vergleich zu Proben aus den anderen beiden Gruppen. In c bis e sind die Messungen nach Gruppen getrennt in der gleichen Skalierung wie in a dargestellt. Hieran lässt sich ablesen, dass Streuung in der Gruppe SP am größten ist.

auf die tatsächliche Festigkeit der Proben erlauben [197]. Die verwendete Torsionsmaschine ist in Abbildung 4.25 a dargestellt. In dieser werden die beiden Bleche, aus denen eine Probe besteht, getrennt voneinander eingespannt (siehe Abbildung 4.25 b) und bis zum strukturellen Versagen des Schweißpunkts gegeneinander verdreht (c). Dabei wird das maximale Drehmoment  $M_{\text{max}}$  und der Torsionswinkel  $\alpha$ , der Winkel, bei dem  $M_{\text{max}}$  erreicht wird, ermittelt. Außerdem wird das entstandene Bruchbild danach beurteilt, ob es zum Ausknöpfen oder zur Trennung kam, es werden die Punktdurchmesser in horizontaler und vertikaler Richtung,  $d_1$  bzw.  $d_2$ , nach ISO 14329 ermittelt und eventuelle Spritzerbildung vermerkt. Abbildung 4.26 zeigt typische Bruchbilder. In a1,2 sind die Bruchflächen einer ty-

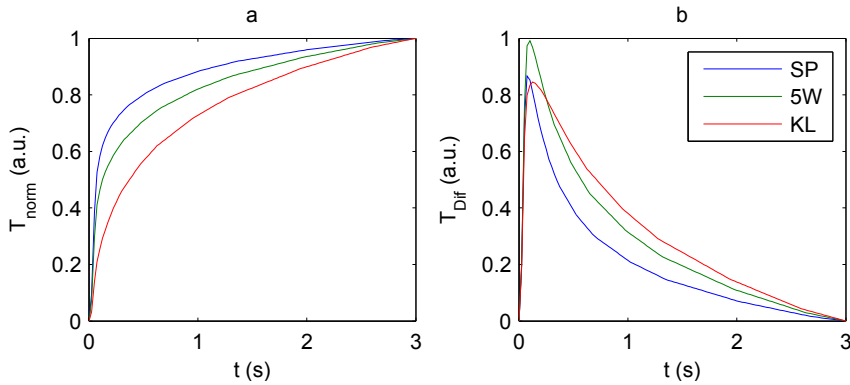


Abbildung 4.24: Dargestellt sind Ergebnisse aus den in Abschnitt 4.1 diskutierten FEM-Simulationen (siehe insbesondere Abbildungen 4.4 und 4.5). Die vorliegenden Temperaturwerte wurden analog zu den Messdaten gemittelt und normiert. Das Diagramm a entspricht Abbildung 4.22 c, b entspricht 4.23 a. Trotz der abweichenden Materialparameter ist eine gute qualitative Übereinstimmung gegeben.

pischen Klebschweißung abgebildet. Hier konnte sich die Schweißlinse kaum ausbilden. Die Aufnahmen b1,2 und c1,2 zeigen die Bruchbilder von mit optimalen Parametern geschweißten Proben. Bei b kam es zum Ausknöpfruch, bei c zum Trennungsbruch. Im Unterschied zu a1,2 liegt hier eine komplett ausgebildete Schweißlinse vor. d zeigt eine Probe, bei der es zur Spritzerbildung kam. Das erstarrte Material, das ausgeworfen wurde, ist auf beiden Blechen deutlich zu erkennen.

In Abbildung 4.27 sind die Ergebnisse der Torsionsprüfung dargestellt. Zuerst soll festgehalten werden, dass sich für alle Parameter ein deutlich nach den einzelnen Probengruppen getrenntes Verhalten ergibt. Insbesondere das maximale Drehmoment, welches die tatsächliche Festigkeit von den aufgenommenen Werten am besten widerspiegelt, zeigt eine sehr geringe Streubreite der Werte innerhalb jeweils einer Gruppe (siehe Diagramm a). Deutliche Abweichungen ergeben sich hier lediglich bei den mit S gekennzeichneten Werten. Diese wurden an Proben ermittelt, bei denen es zu Spritzern kam, die sich sowohl beim Schweißen selbst als auch im Bruchbild deutlich identifizieren ließen. Der in Diagramm b dargestellte Torsionswinkel zeigt ein ähnliches Verhalten mit einer größeren Streubreite bei den Proben aus der Gruppe SP. Dies lässt sich darüber erklären, dass hier die größten Winkel erreicht wurden, es also zur stärksten plastischen Verformung des den Schweißpunkt umgebenden Materials kam. Dies bedingt ein schlecht reproduzierbares Bruchverhalten. Die Werte für die Punktdurchmesser  $d_1$  bzw.  $d_2$  streuen am stärksten für die Proben aus der Gruppe KL. Bei diesen kam es durchgehend zu einem Trennungsbruch. Der Grund für die Streuung ist in der Schwierigkeit der optischen Bestimmung der Grenzen der Schweißlinse, da diese bei den Proben dieser Gruppe kaum ausgebildet ist.

Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen der instrumentierten Torsionsversuche ablesen,

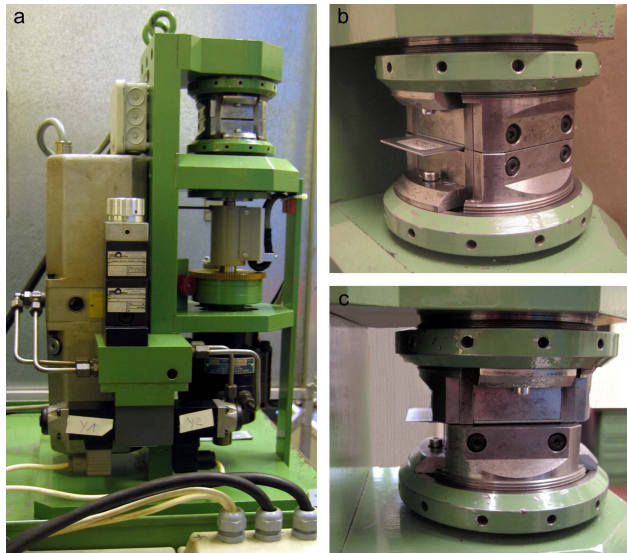


Abbildung 4.25: Fotos der für die zerstörende Prüfung genutzten Torsionsmaschine. a: Überblick, b: Mit eingelegerter Probe in Ausgangsposition, c: Mit tordierter Probe.

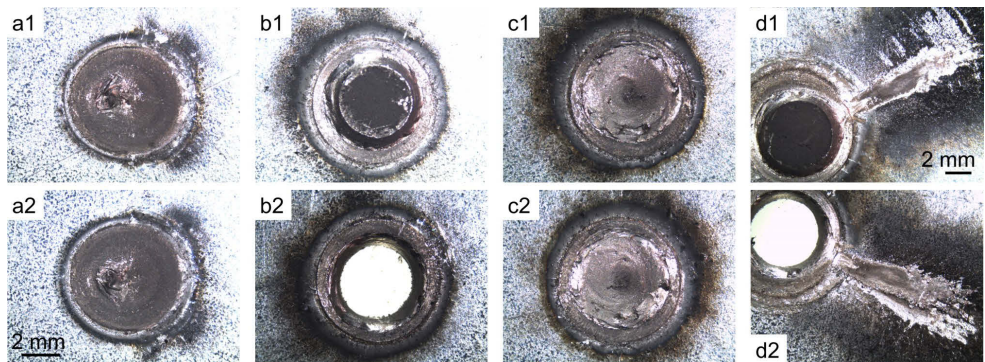


Abbildung 4.26: Aufnahmen der tordierten Proben. Die übereinanderliegenden Bilder zeigen jeweils beide Innenflächen einer Probe. a bis c sind gleich skaliert. a: Probe KL12, sehr schwach ausgebildete Schweißlinse. b Probe 5W38, Ausknöpfbuch. c Probe 5W39 Trennungsbruch. d: Deutlich erkennbare Spritzerbildung.

dass die Probenpräparation zu sehr einheitlichen Ergebnissen bei gleichen Schweißparametern führt. Die Streuung der einzelnen Parameter innerhalb einer Gruppe ist - abgesehen von den Proben, bei denen es zu Spritzern kam - so gering, dass keine gesicherte Aussage getroffen werden kann, ob die Abweichung durch Messungenauigkeiten oder die Probenpräparation zustande kommen. Daher können die Proben einer jeden Gruppe als gleich angenommen werden, was eine Diskussion auf dieser Grundlage im weiteren Verlauf der Arbeit möglich macht.

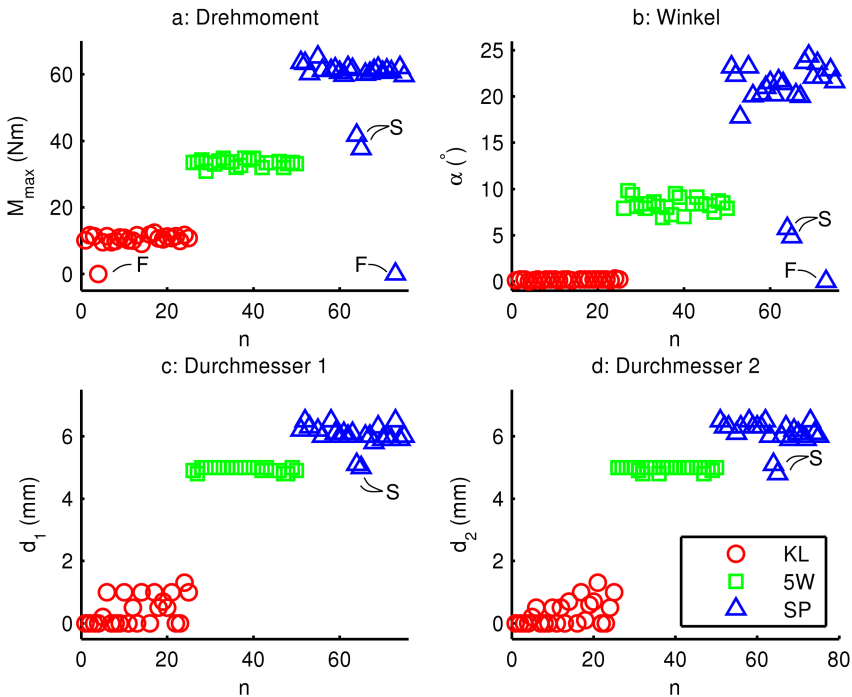


Abbildung 4.27: Ergebnisse der instrumentierten Torsionsprüfung am Probensatz 1. Die Parameter sind jeweils gegen die Probennummer  $n$  aufgetragen. Diagramm a zeigt das Maximale Drehmoment, b den maximalen Torsionswinkel, c und d den optisch bzw. mittels Messschieber vermessenen Punktdurchmesser in horizontaler bzw. vertikaler Richtung. Bei den mit F gekennzeichneten Werten wurde die Messung fehlerhaft durchgeführt. Mit S sind Proben gekennzeichnet, bei denen es zu deutlichen Spritzern kam.

## 4.7 Zusammenfassung und Diskussion der bisherigen Ergebnisse

Obwohl die thermografische Prüfung von Punktschweißverbindungen bereits in den späten 1970ern patentiert wurde [120], gibt es neuere Arbeiten, die einen erfolgreichen Einsatz als wenig wahrscheinlich erachten [129]. Daher sollte die Durchführbarkeit dieser Methodik hier systematisch untersucht werden.

Anhand von Schlibbildern (siehe Abbildung 2.14) lässt sich gut die sog. Haftzone neben der Schweißlinse erkennen. Hierbei handelt es sich um einen nahezu formschlüssigen Bereich, sodass hier ein sehr niedriger Wärmewiderstand angenommen werden kann. FEM-Simulationen ergaben, dass eine Klaffung von unter einem halben Mikrometer eine thermografische Prüfung von Punktschweißverbindungen unmöglich macht (siehe Abschnitt 4.1). Daher musste zuerst die Frage geklärt werden, inwieweit der Wärmewiderstand von der Linse- bzw. Punktgröße, also den Schweißparametern, abhängt (siehe Abschnitt 4.3). Hierzu wurden eine Klebverbindung und eine mit optimalen Parametern geschweißte Probe parallel zu den Blechen durch die Schweißlinse hindurch zerteilt (siehe Abbildung 4.12, entlang P). So konnte nach einer einseitigen Anregung mittels Laser der Wärmetransport zwischen den beiden Blechen direkt beobachtet werden (siehe Abbildung 4.14).

Es ergab sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Proben. Die Klebschweißverbindung zeigt an der Grenze zwischen beiden Blechen einen über den untersuchten Bereich hinweg nahezu konstanten Temperaturgradienten orthogonal zur Grenze (siehe Abbildung 4.14 a). Bei der mit optimalen Parametern präparierten Probe liegt hingegen im Bereich der Schweißlinse ein deutlich geringerer Temperaturgradient als an den Rändern des untersuchten Bereichs vor (siehe Abbildung 4.14 c, 2 und 3). Nach dem Fourierschen Gesetz ist hier folglich der thermische Widerstand geringer und der Wärmestrom höher. Da bei der Probenherstellung allein der Schweißstrom variiert wurde, alle anderen Parameter, insbesondere auch die Elektrodenform und -kraft, aber konstant gehalten wurden, sollten beide Proben eine etwa gleich große äußere Begrenzung der formschlüssigen Haftzone aufweisen. Aufgrund des verschiedenen Wärmeleitverhaltens lässt sich folgern, dass der Wärmewiderstand der Schweißlinse deutlich geringer als der der sie umgebenden formschlüssigen Haftzone ist. Prinzipiell können zumindest diese beiden Typen von Schweißungen mittels Thermografie unterschieden werden. Folglich ist eine thermografische Prüfung von Punktschweißverbindungen möglich.

Für die weitere Entwicklung einer Prüfmethodik wurde eine Blitzlichtanregung in Transmissionsanordnung gewählt. Durch die pulsformige Anregung lassen sich kurze Messzeiten realisieren, die eine Voraussetzung für eine mögliche Integration in industrielle Fertigungsprozesse sind. Die Transmissionsanordnung hat für das hier behandelte Prüfproblem zwei wesentliche Vorteile im Vergleich zur Reflexionsanordnung:

- IR-Kamera und Anregungsquelle lassen sich näher und ohne weitere Anpassungen (wie z.B. Einsatz eines Strahlteilers oder die Verwendung eines Ringblitzes) parallel zur geprüften Probe positionieren. Die sich so ergebene punktsymmetrische Anregung entspricht der Geometrie der Proben. Außerdem wird durch diese Anordnung eine verzerrungsfreie Abbildung ermöglicht.



- Es kann keine direkte Störung der Messung durch Reflexionen des thermischen Nachleuchtens der Anregungsquelle erfolgen, was insbesondere bei stark reflektierenden Blechen ein großer Vorteil ist.

Zudem ergaben die im Vorfeld durchgeführten FEM-Simulationen, dass die Temperaturverteilung auf der der Anregung abgewandten Seite eher dazu geeignet ist, Proben, bei denen es zur Spritzerbildung kam, zu identifizieren (siehe Abbildung 4.4).

Für dieses Messprinzip wurde ein Probenhalter für Serienuntersuchungen im Laborbetrieb entwickelt (siehe Abbildung 4.16). Vor weiteren Untersuchungen wurde zunächst das geometrische Auflösungsvermögen der Versuchsanordnung bestimmt. Legt man ein 20/80-Kriterium zugrunde, entspricht es etwa der einfachen Blechdicke. Dieses Resultat stimmt mit der verbreiteten Daumenregel für die aktive Thermografie überein, dass ein Defekt, um detektierbar zu sein, in seiner lateralen Ausdehnung mindestens seiner Überdeckung entsprechen muss [4]. Für eine Blechdicke von  $t' = 1$  mm ergeben sich optimale Linsendurchmesser von  $d = 5$  mm (siehe 2.3.1). Eine direkte Bestimmung der Linsengröße über den geometrischen Intensitätsgradienten, wie es dem typischen bildgebend-defektoskopischen Ansatz der aktiven Thermografie entspräche, wäre also nur mit Fehlern von rund 40% möglich. Zudem deckt sich dieses Ergebnis mit der auf Grundlage der FEM-Simulationen durchgeführten Abschätzung. Auf einem bildgebenden Ansatz basierende Verfahren finden sich zwar in der Literatur [17, 129], wurden aber nicht weiterentwickelt bzw. verworfen.

Trotzdem ist eine höhere Auflösung möglich, wenn die Auswertung nicht auf der Temperatur- bzw. Intensitätsverteilung, sondern auf der insgesamt übertragenen Wärmemenge basiert. Diese ist nach Fourier umgekehrt proportional zum absoluten Wärmewiderstand  $R_{\text{th}}$  (siehe Gleichung 2.7). Vernachlässigt man nun näherungsweise den Wärmefluss durch die umliegende Haftzone, so ist der integrale Wärmefluss in erster Näherung zur Fläche der durch die Schweißlinse hergestellten Verbindung proportional. Die übertragende Wärmemenge  $Q$  ist dann quadratisch vom Durchmesser der Schweißlinse abhängig ( $Q \propto R_{\text{th}}^{-1} \propto d^2$ ). Diese Herangehensweise erscheint vielversprechend und wurde daher näher untersucht.

Für eine Serienmessung wurden 75 Proben mit drei Gruppen von Schweißparametern (für Klebverbindungen, optimale Verbindungen und die Spritzergrenze) präpariert. An jeder Probe wurden drei Einzelmessungen mit einer Messdauer von 3 s bei einer Aufnahme Frequenz von 329 Hz durchgeführt. Zur Aufbereitung der Daten wird zunächst die Lage der Schweißlinse und der Zeitpunkt der Blitzauslösung bestimmt (siehe 4.5). Außerdem müssen die Thermografie-Sequenzen pixelweise auf 0 und 1 (siehe Gleichung 4.4) für Messbeginn bzw. -ende normiert werden, um sie vergleichbar zu machen. Ein ähnlicher Normierungsprozess wird in einer Patentschrift beschrieben [126], die jedoch naturgemäß keine Bewertung der erzielten Ergebnisse enthält. Durch dieses Vorgehen geht zwar die Information über die absolute Temperaturänderung komplett verloren, das zeitliche Verhalten lässt sich aber noch bestimmen. So reicht es aus, den räumlichen Mittelwert über den gesamten Messbereich zu bilden, um augenscheinlich gut nach den einzelnen Gruppen unterscheidbare zeitliche Intensitätsverläufe zu erhalten (siehe Abbildung 4.22). Das dabei beobachtete Verhalten entspricht der physikalischen Vorstellung: Der thermische Widerstand nimmt mit zunehmender Schweißlinsengröße ab, daher kommt es zu einer schnelleren Erwärmung auf der der

Anregung gegenüberliegenden Seite.

Eine bessere Unterscheidbarkeit ergab sich, wenn die Differenz der normierten und räumlich gemittelten Intensität in einem  $5 \times 5$  Pixel großem Bereich direkt über dem Schweißpunkt  $I_{P,norm}$  und einem ebenfalls  $5 \times 5$  Pixel großem Referenzbereich  $I_{Ref,norm}$  betrachtet wurde. Die sich ergebene Intensitätsdifferenz  $I_{Dif} = I_{P,norm} - I_{Ref,norm}$  zeigte für die verschiedenen Kurven zu unterschiedlichen Zeitpunkten ein Maximum (siehe Abbildung 4.23). Der Wert von  $I_{Dif}$  lässt sich als lineare Näherung des radialen geometrischen Temperaturgradienten verstehen. Diese Darstellungsart enthält also sowohl räumliche als auch zeitliche Information. Das Maximum von  $I_{Dif}$  entspricht dem höchsten räumlichen Temperaturgradienten. Auf diese Weise lassen sich die Kurven der einzelnen Gruppen noch besser trennen. Ein ähnliches Vorgehen findet sich bei Türlér *et al.*, wobei hier die Anregung kontinuierlich erfolgte und zur Auswertung allein auf den Wert des örtlichen Gradienten zu einem Zeitpunkt abgehoben wird [123, 124]. Bei beiden Verfahren stimmen die experimentellen Ergebnisse qualitativ mit den Ergebnissen aus den im ersten Unterabschnitt dieses Kapitel präsentierten FEM-Simulationen überein.

Der Verlauf der einzelnen Kurven aus jeweils derselben Proben­gruppe unterliegt einer gewissen Streuung, wobei diese für die Proben, die mit Parametern an der Spritzergrenze präpariert wurden, am größten ist. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich in sehr unterschiedlichem Maße wirklich Spritzer ausbilden. Während die Formation der Schweißlinse als kontinuierlich interpretiert werden kann, handelt es sich hierbei um ein abruptes Auswerfen von Teilen des Schweißbads. Dies führt zu einer größeren Streuung bei gleichen Parametern, da insbesondere auch die mit dem Materialverlust bei der Spritzerbildung verbundene Dickenänderung eine große Rolle für das thermische Verhalten spielt.

Die erfolgte Interpretation der Ergebnisse lässt sich als deskriptive Statistik auffassen (siehe Abschnitt 2.1.4). Aus den bisherigen Ergebnissen lassen sich einige wichtige Punkte festhalten:

- Die aktive Thermografie ist prinzipiell zur Prüfung von Punktschweißverbindungen geeignet.
- Das vorgestellte Verfahren ermöglicht die Erkennung von Klebverbindungen und Schweißungen an der Spritzergrenze, ist also zur Klassifikation der Schweißlinsengröße geeignet.
- Eine räumlich aufgelöste Aufnahme ist hierzu nicht zwingend notwendig.

Für quantitative Aussagen darüber, wie gut sich die einzelnen Proben­gruppen trennen lassen, ist eine weitere Analyse im Rahmen der mathematischen Statistik nötig. Diese Betrachtung wird im nächsten Abschnitt präsentiert.

## 4.8 Statistische Analyse

Das in diesem Kapitel vorgestellte Prüfverfahren erlaubt eine Unterscheidung der einzelnen Proben­gruppen. Es ist auf den Durchmesser der Schweißlinse sensitiv. In diesem Abschnitt

werden nun die Möglichkeiten des Verfahrens statistisch analysiert. Dabei sollen insbesondere drei Fragestellungen bearbeitet werden.

- Lässt sich ein Gütekriterium definieren, das eine systematische Einordnung der Messergebnisse erlaubt?
- Welche Informationen aus der Messung sind für eine Klassifizierung der Proben notwendig?
- Wie gut stimmen die Werte mit dem Referenzverfahren, der Torsionsprüfung, überein?

Hierzu werden zuerst skalare Vergleichskriterien definiert, die im Rahmen einer Varianzanalyse bewertet und optimiert werden. Auf dieser Grundlage erfolgt dann der Vergleich mit den Ergebnissen der zerstörenden Prüfung, wobei ein besonderes Augenmerk auf die Identifizierung der Proben, bei denen es zu Spritzern kam, gelegt werden soll.

### 4.8.1 Deskriptive Statistik

Ziel der Prüfung ist es, eine Aussage über die Tragfähigkeit einer Punktschweißverbindung treffen zu können. Dies ist mittels Thermografie prinzipiell nur indirekt über die thermischen Eigenschaften möglich. Insbesondere soll geklärt werden, ob eine gegebene Verbindung bestimmten Qualitätskriterien genügt.

Die mathematische Voraussetzung für den Vergleich von Messergebnissen ist eine Ordnungsrelation, über die sich die Ergebnisse paarweise vergleichen lassen. Um eine solche zu definieren, wird ein skalares Kriterium benötigt, das jeder Messung zugeordnet werden kann. Hierzu gibt es unendlich viele Möglichkeiten, nämlich jede denkbare mathematische Verknüpfung der Messdaten, deren Ergebnis eine einzelne Zahl ist. In dieser Arbeit werden zwei Ansätze vorgestellt, ein direkter, eher mathematisch motivierter und ein etwas komplizierterer, physikalisch motivierter.

Da sich im vorherigen Abschnitt gezeigt hat, dass erst die Aufbereitung der Messdaten durch Normierung und Setzen eines festen Bezugs auf eine örtliche und zeitliche Referenz zu vergleichbaren Ergebnissen führt, werden stets diese aufbereiteten Messdaten für die Betrachtungen in diesem Abschnitt herangezogen. Die Daten zu jeder Messung lassen sich als  $N = N_x \times N_y \times N_t$  Einzelmessungen auffassen, wobei  $N_x$  und  $N_y$  die Anzahl der räumlichen Messpunkte, also der Pixel in x- und y-Richtung, und  $N_t$  die Anzahl der zeitlichen Schritte, also der Einzelbilder, bezeichnet. Die einfachste Methode, um hieraus einen Skalar zu erhalten, ist die Bildung des Mittelwerts. Es werden also die in Abbildung 4.22 dargestellten räumlich gemittelten normierten Daten zusätzlich zeitlich gemittelt:

$$\bar{I}_{\text{norm},g,n} = \frac{1}{N_x + N_y + N_t} \sum_{x_i, y_i, t_i} I_{\text{norm},g,n}(x_i, y_i, t_i), \quad (4.6)$$

wobei  $g$  die Gruppe und  $n$  die fortlaufende Nummer der Messung innerhalb der Gruppe bezeichnet. Die so erhaltenen Werte sind in Abbildung 4.28 gegen  $n$  aufgetragen. Allerdings

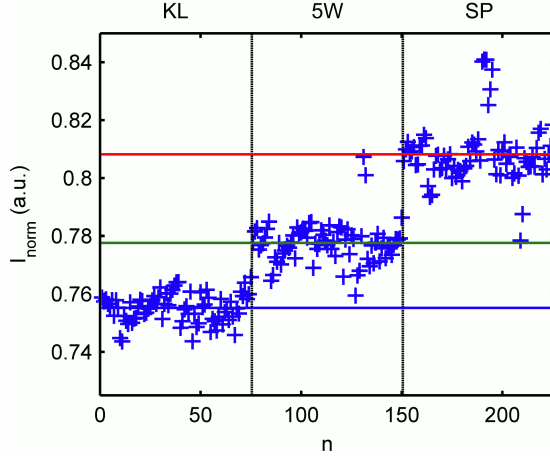


Abbildung 4.28: Räumlicher und zeitlicher Mittelwert der normierten Messfilme für jede Messung. Die horizontalen Linien entsprechen den Mittelwerten der jeweiligen Probengruppen.

stellt dies nicht die einzige Möglichkeit zur Berechnung eines skalaren Kriteriums dar. So lässt sich die Datenbasis für die Mittelwertbildung räumlich und zeitlich einschränken, es könnten z.B. nur die Pixel in einem eingeschränkten räumlichen und zeitlichen Bereich ausgewertet werden:

$$\bar{I}'_{\text{norm},g,n}(a_{x,y,t}, b_{x,y,t}) = \frac{1}{N} \sum_{x_i=a_x}^{b_x} \sum_{y_i=a_y}^{b_y} \sum_{t_i=a_t}^{b_t} I_{\text{norm},g,n}(x_i, y_i, t_i). \quad (4.7)$$

Hierbei bezeichnen  $a_{x,y,t}$  und  $b_{x,y,t}$  die unteren bzw. oberen Grenzen für die räumlichen Dimensionen und die zeitliche Dimension und  $N$  die gesamte Anzahl der Einzelmessungen, die innerhalb dieser Grenzen berücksichtigt wird. Die Darstellung lässt sich sehr einfach in Software realisieren. Für eine allgemeine Darstellung ließe sich jede Einzelmessung speziell wichten. Mathematisch lässt sich das über eine Maske der gleichen Dimension des Messfilms darstellen, die aus den Wichtungsfaktoren für jede Einzelmessung besteht:

$$M(x_i, y_i, t_i) \equiv M_{x_i, y_i, t_i} \in \mathbb{R}^{N_x \times N_y \times N_t}. \quad (4.8)$$

Hier wurde sowohl Funktions- als auch die Matrixschreibweise angegeben.  $M$  wird dann vor der Mittelung elementweise mit dem Messfilm multipliziert:

$$\bar{I}''_{\text{norm},g,n}(M) = \frac{1}{\|M\|_1} \sum_{x_i, y_i, t_i} M_{x_i, y_i, t_i} \cdot I_{\text{norm},g,n}(x_i, y_i, t_i). \quad (4.9)$$

Zur Normierung wurde hier zweckmäßigerweise die Betragsnorm  $\|\cdot\|_1$ , also die Summe über die Beträge aller Elemente der Wichtungs-Matrix herangezogen. Für eine allgemeine Definition kann man nun auch negative Werte für die Elemente von  $M$  zulassen, sodass sich z.B. eine Differenzbildung zwischen zwei Referenzgebieten vor der Mittelwertbildung abbilden ließe.

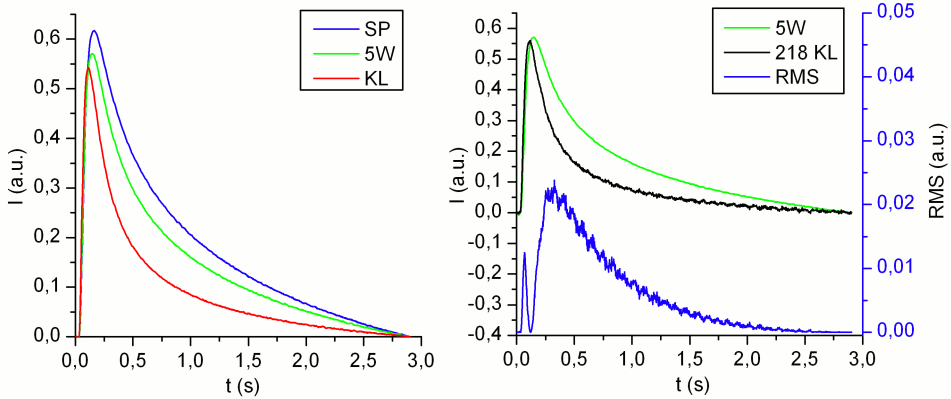


Abbildung 4.29: Das Linke Diagramm zeigt  $\bar{I}_{\text{dif},g}(t)$ , den mittleren zeitlicher Verlauf der Differenz zwischen der normierten Intensität im Bereich des Punktes und des Referenzgebietes, für die drei Gruppen von Proben. Rechts ist die quadratische Abweichung (blau, rechte Skala, als RMS bezeichnet) der Messung an einer Klebschweiß-Probe (schwarz, linke Skala) von dem mittleren Verhalten der Proben aus der Vergleichsgruppe mit optimalen Schweißparametern (grün) dargestellt. Die größten Abweichungen treten bei Zeiten um  $t = 0,5$  s auf, während für  $t = 0$  s und  $t = 3$  s wegen der Normierung keine Abweichungen vorliegen können. Bei  $t = 0,06$  s kreuzen die Kurven einander, weshalb auch zu diesem Zeitpunkt keine Abweichung vorliegt.

Einen physikalisch motivierten Ansatz stellt der Vergleich jeder Einzelmessung mit dem Mittelwert des Verhaltens einer Gruppe dar. Nimmt man als Arbeitshypothese eine symmetrische Verteilung der Abweichung in der Probenpräparation und den Messungen an, würde dieser Mittelwert dem tatsächlichen Verhalten einer perfekten Probe mit den gegebenen Parametern entsprechen. Proben, die aus der jeweiligen Gruppe stammen, sollten demzufolge die geringsten Abweichungen zum jeweiligen Mittelwert zeigen. Hierfür sollen die Differenzen zwischen einem Gebiet über der Schweißlinse und einem Referenzgebiet  $I_{\text{Dif}}$  (siehe Abbildung 4.23) zugrunde gelegt werden, da sie die augenscheinlich beste Unterscheidbarkeit gewährleisten haben. Der genannte Mittelwert berechnet sich zu

$$\bar{I}_{\text{Dif},g}(t) = \frac{1}{N_t} \sum_{n=1}^N I_{\text{Dif},g,n}(t). \quad (4.10)$$

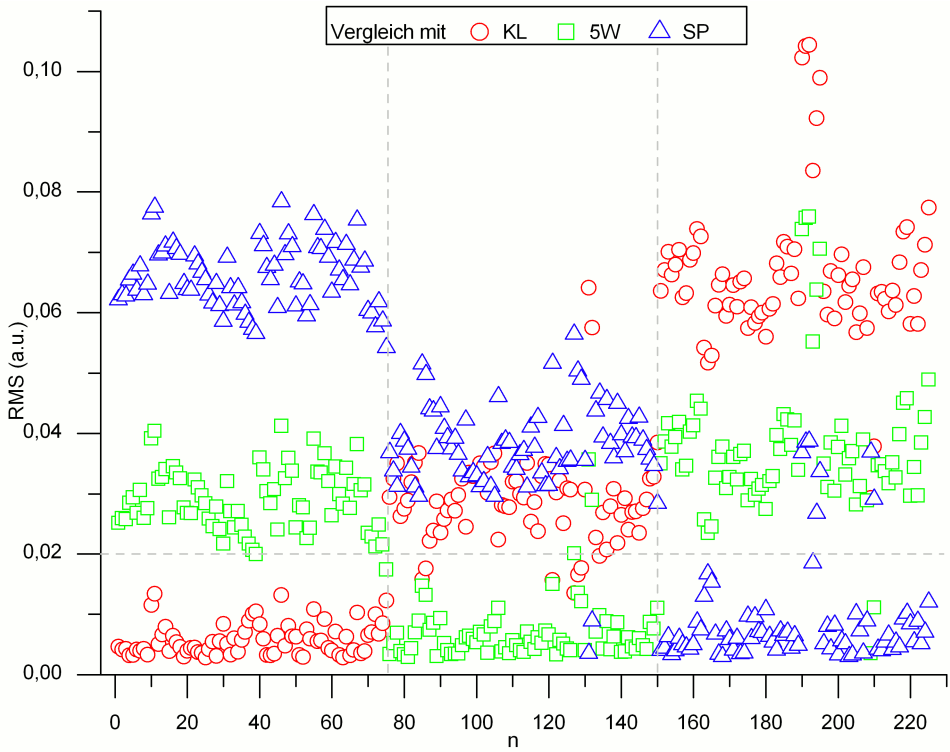


Abbildung 4.30: RMS-Werte für den Vergleich von jeder Einzelmessung aus jeder Gruppe (Abszisse,  $n = 1..75$  Klebverbindungen,  $n = 76..150$  optimale Parameter,  $n = 151..225$  Spritzergrenze) mit den Mittelwerten jeder Gruppe (unterschiedliche Symbole). Abgesehen von einigen Ausreißern zeigen die jeweiligen Gruppen ein recht einheitliches Verhalten. Es lässt sich ein klarer Trend ablesen, dass die Unterschiede zwischen Proben aus der Klebschweiß-Gruppe und der Spritzergrenze am größten sind, was den erwarteten Unterschieden der Linsengrößen entspricht. Setzt man einen Schwellwert von 0,02 an, ist es außerdem möglich, die Zugehörigkeit zu den einzelnen Gruppen festzustellen.

Die resultierenden Kurven sind in Abbildung 4.29 im linken Diagramm dargestellt. Um nun zu einem skalaren Parameter  $p_{g,i}$  für die Abweichung zwischen der  $i$ -ten Einzelmessung  $I_{\text{dif},i}(t)$  und dem durchschnittlichen Verhalten  $\bar{I}_{\text{dif},g}(t)$  der Gruppe  $g$  zu gelangen, wird das

quadratische Mittel (RMS<sup>9</sup>) der Abweichung berechnet:

$$p_{g,n} = \frac{1}{N_t} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_t} (\bar{I}_{\text{dif},g}(t_i) - I_{\text{dif},g,n}(t_i))^2} . \quad (4.11)$$

Die Anzahl der zeitlichen Messpunkte ist wieder mit  $N_t$  bezeichnet. Die Verwendung des RMS-Wertes stellt im Gegensatz zu einer einfachen Differenzbildung sicher, dass große Abweichungen in einem kurzen Zeitbereich stärker gewichtet werden als geringe Abweichungen über einem langen Zeitbereich.

In Abbildung 4.30 findet sich eine Darstellung des resultierenden Datensatzes für den Vergleich mit sämtlichen Gruppen in einem gemeinsamen Diagramm. Es ist  $p_{g,i}$  gegen  $i$  aufgetragen. Die unterschiedlichen Symbole zeigen an, mit dem Mittelwert welcher Gruppe die einzelne Messung jeweils verglichen wurde. Die fortlaufende Nummer der Einzelmessung ist auf der Abszisse aufgetragen, sodass sich die Einzelmessungen horizontal in die jeweiligen Gruppen aufgliedern, was durch gestrichelte Linien eingezeichnet ist. Aus dieser Darstellung sind zwei weitere wichtige Punkte ersichtlich:

- Es lässt sich ein klarer Trend ablesen, dass die Abweichungen zwischen Proben aus der Klebschweiß- und der Spritzergrenzen-Gruppe am größten sind, was den Unterschieden in der Schweißlinsengröße entspricht.
- Wird für den RMS-Wert eine Schwelle von 0,02 angesetzt, ist es möglich, die Zugehörigkeit zu den einzelnen Gruppen festzustellen. Insbesondere ist die Erkennbarkeit von Klebschweißverbindungen mit einem Punktdurchmesser von  $d \leq 2$  mm gewährleistet.

In Abbildung 4.31 findet sich eine andere Art der Darstellung. Jeder Einzelmessung werden die 3 RMS-Werte aus den Vergleichen mit unterschiedlichen Gruppen zugeordnet. Diese werden nun als Koordinaten interpretiert, und die einzelnen Datenpunkte in einem dreidimensionalen Diagramm aufgetragen. Die unterschiedlichen Symbole dienen dabei der Zuordnung der Einzelmessungen zu den Probengruppen. Da alle Punkte näherungsweise auf einem Polygonzug liegen, wäre es möglich, die Position eines Datenpunktes durch nur einen Parameter, nämlich der Position auf eben diesem Polygonzug, zu beschreiben. Das bedeutet, dass diese Parameter nicht unabhängig sind. Trotzdem bieten sie die Möglichkeit zu einer physikalisch motivierten Klassifizierung der Proben – es ist aber anzunehmen, dass ein noch aussagekräftigeres Klassifikationskriterium existiert. Im nächsten Unterabschnitt sollen mögliche Kriterien systematisch untersucht werden.

### 4.8.2 Varianzanalyse

Im vorherigen Unterabschnitt wurden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, aus den vorliegenden Messdaten ein skalares Gütekriterium abzuleiten. Um diese verschiedenen Berech-

<sup>9</sup>von engl. *Root Mean Square*.

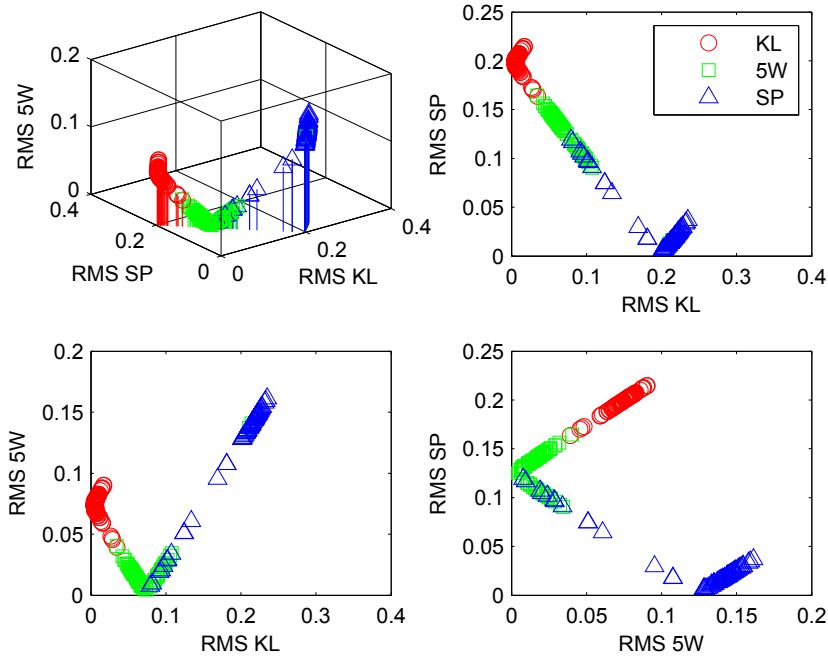


Abbildung 4.31: In diesem Diagramm ist für jede durchgeführte Messung ein Datenpunkt entsprechend ihren 3 RMS-Werten aus den Vergleichen mit den einzelnen Gruppen aufgetragen. Gezeigt ist ein 3D Diagramm (o.l.) und die drei 2D-Projektionen. Es wird deutlich, dass alle Datenpunkte näherungsweise auf einem Polygonzug liegen, die Parameter also nicht unabhängig sind. Die unterschiedlichen Symbole zeigen die Zugehörigkeit der Einzelmessungen zu den jeweiligen Gruppen an.

nungsvorschriften systematisch zu vergleichen, wird hier auf die Varianzanalyse zur Bewertung der Einflussgrößen zurückgegriffen. Zur Beurteilung der Trennschärfe kommt dann der Tukey-Cramer-Test zum Einsatz, mit dem Aussagen über die Abstände der Mittelwerte der einzelnen Gruppen getroffen werden können [11].

### Darstellung als *box plot*

Für eine bessere Visualisierung des Datensatzes soll an dieser Stelle zunächst der sogenannte *box plot* als geeignete Darstellungsform eingeführt werden. Abbildung 4.32 zeigt die Daten aus Abbildung 4.28 in dieser Form. Auf der Abszisse sind die einzelnen Gruppen aufgetragen. Die roten horizontalen Linien zeigen jeweils den Median der Werteverteilung in der jeweiligen



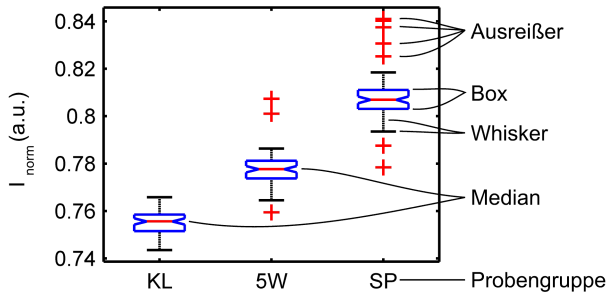


Abbildung 4.32: Darstellung der Daten aus Abbildung 4.28 als *box plot*. Im Text findet sich eine genaue Erläuterung dieser Darstellungsform.

Quelle der Varianz	Quadratsumme	Freiheitsgrade
Gruppen	$QS_{ZW} = 0,11$	$k - 1 = 2$
Fehler	$QS_{inn} = 0,010$	$n - k = 222$
Gesamt	$QS_{geq} = 0,11$	$n - 1 = 244$
F-Test: $QS_{ZW}/QS_{inn} = 880$		$WK_{H_0} = 0,00\%$

Tabelle 4.2: Ergebnisse einer Varianzanalyse der Daten aus Abbildung 4.32. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese gilt, die Zugehörigkeit zu den Gruppen also keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat, liegt bei 0,00%.

Gruppe an. Die blauen Kästen, üblicherweise als *box* bezeichnet, markieren das untere bzw. obere Quartil. Innerhalb dieser liegen also die Hälfte der Werte. Hier soll die Definition von J. W. Tukey verwendet werden, nach der Datenpunkte als Ausreißer gelten, die mehr als den 1,5-fachen interquartilen Abstand zur *box* haben. Diese sind als rote Kreuze eingezeichnet. Die schwarzen Linien werden als *whisker* oder Antennen bezeichnet. Sie umfassen sämtliche Werte, die keine Ausreißer sind. So lässt sich auf einen Blick die statistische Verteilung der dargestellten Daten erfassen.

### Univariate Varianzanalyse

Durch eine Varianzanalyse lassen sich systematische Einflüsse erkennen. Um eine solche durchführen zu können, müssen zuerst die unterschiedlichen Einflussgrößen, die sogenannten Faktoren, identifiziert werden. Am offensichtlichsten ist der Einfluss der Probenpräparation. Dieser Faktor hat drei Stufen, die den einzelnen Gruppen entsprechen. Fasst man alle anderen Einflüsse als zufällig auf, erhält man als Ergebnis einer einfaktoriellen Varianzanalyse der in Abbildung 4.32 dargestellten Daten die in Tabelle 4.2 gezeigten Werte. Wie erwartet hat die Zugehörigkeit zu den einzelnen Gruppen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ( $> 99,99\%$ ) einen Einfluss auf die Messergebnisse.

**Einfluss der Messwiederholung**

Eine weitere systematische Einflussgröße könnte in Form der Messwiederholung vorliegen. Diese wurde für alle Proben in gleicher Weise realisiert, um die Überprüfung ihres Einflusses zu ermöglichen. Zerlegt man die Gesamtzahl der Messungen in die einzelnen Gruppen und stellt diese jeweils nach Messwiederholungen aufgetrennt dar, so lässt sich schon in der grafischen Darstellung ein Einfluss der Messwiederholungen erkennen (siehe Abbildung 4.33). Ein Trend dafür, dass mit der Messwiederholung höhere Werte erreicht werden, wird vermutet, kann aber nicht sicher nachgewiesen werden. Mittels Varianzanalyse wurden nun die Wahrscheinlichkeiten berechnet, mit denen ein systematischer Einfluss für die jeweiligen Gruppen vorliegt. Für KL ergab sich eine Wahrscheinlichkeit von 99,5%, für 5W mit 99,6% und für SP mit 43%. Da alle Messungen unter gleichen Umgebungsbedingungen und die Messwiederholungen nicht für alle Proben auf einmal zeitlich getrennt durchgeführt wurden, verbleibt als einzige mögliche Ursache eine Beeinflussung der Proben durch die vorangegangenen Messungen. Am wahrscheinlichsten ist eine Erwärmung der Proben, da außer der Anfangstemperatur keine Eigenschaften der Proben verändert wurden. Außerdem nimmt die Streuung der Werte für die zweite und dritte Wiederholung zu. Unter der Annahme, dass die systematischen Abweichungen von einer Erwärmung der Probe herrühren, lässt sich dieses Verhalten dadurch erklären, dass der Zeitraum zwischen den einzelnen Messungen unterschiedlich lang war. Dadurch ergaben sich bei den zweiten und dritten Messwiederholungen stärkere Streuungen in den Anfangsbedingungen als bei der ersten Wiederholung.

Der Einfluss der Anfangstemperatur wurde auch anhand von FEM-Simulationen untersucht. Werden Anfangs- und Umgebungstemperatur gleichartig verändert, so ergibt sich kein Einfluss auf die normierten Ergebnisse. Dieses Ergebnis konnte wegen der temperaturunabhängig angesetzten Materialparameter erwartet werden. Wird die Anfangstemperatur der Probe hingegen im Vergleich zur Umgebungstemperatur geändert, so beeinflusst dies das Verhalten der Probe erst zu Zeiten  $t \gg 3$  s maßgeblich. Der Grund hierfür ist, dass

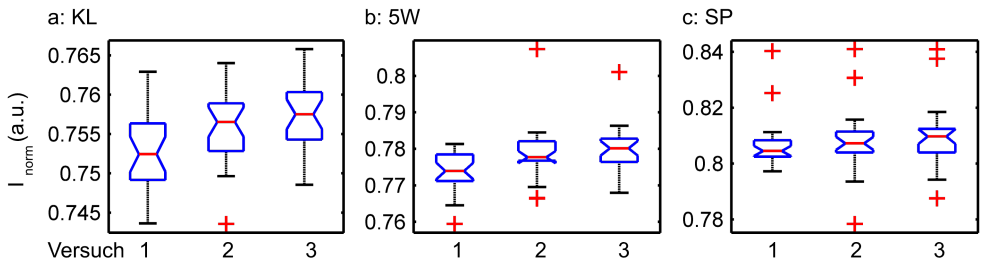


Abbildung 4.33: Darstellung der räumlich und zeitlich gemittelten normierten Intensitäten für die einzelnen Messwiederholungen. Diagramm a zeigt die Werte für die Gruppe KL (Klebverbindungen), b für 5W (Optimale Parameter) und c für SP (Spritzergrenze). Es ist jeweils ein systematischer Einfluss der Messwiederholung erkennbar. Eine systematische Abhängigkeit besteht für KL mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,5%, für 5W mit 99,6% und für SP mit 43%.

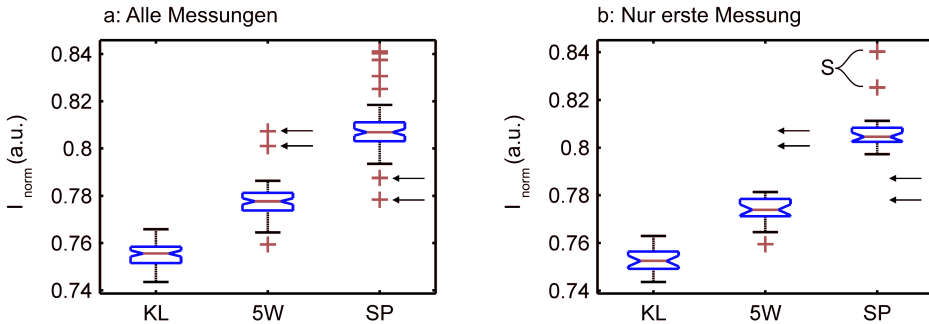


Abbildung 4.34: Boxplot der räumlich und zeitlich gemittelten normierten Intensitäten. Diagramm a: Für alle Messungen (3 je Probe, insgesamt 225 Datenpunkte), b: nur für die jeweils erste Messung (eine je Probe, insgesamt 75 Datenpunkte). Wird nur die erste Messung berücksichtigt ergibt sich eine deutlich geringere Streuung der Werte innerhalb der jeweiligen Gruppen. Die Pfeile kennzeichnen die Positionen der Ausreißer, die nur in a vorkommen. Mit S sind in b die Werte von Proben gekennzeichnet, bei denen es zur Spritzerbildung kam.

allein die Abkühlung beeinflusst wird. Deren Effekt ist aber zu den betrachteten Zeiten sehr viel kleiner als die Temperaturänderungen, die durch die Leitung im Material ausgelöst werden (vergleiche Abbildungen 4.3 und 4.4). Somit ist es am wahrscheinlichsten, dass der Einfluss der Messwiederholung von einer inhomogenen Temperaturverteilung zu Beginn der Messung verursacht wurde. Da die vorliegende inhomogene Temperaturverteilung hauptsächlich von der Abkühlung der Probe abhängt, wurde nicht versucht, dieses Verhalten anhand von FEM-Simulationen nachzubilden. Denn das genaue Abkühlverhalten lässt sich nur sehr grob abschätzen, da es von vielen schlecht zugänglichen Faktoren abhängig ist, wie z.B. auch der durch den Probenwechsel verursachten Luftströmung, der Erwärmung des Probenhalters und Temperaturschwankungen im Labor.

Für die weitere Auswertung soll daher nur die erste Wiederholung berücksichtigt werden. In Abbildung 4.34 sind zum Vergleich in Diagramm a die Ergebnisse aller Messungen als *box plot* aufgetragen, in Diagramm b nur für die erste Wiederholung. Auch hier erkennt man, dass es zu deutlich weniger Ausreißern kommt, wenn nur die erste Wiederholung aufgetragen wird. Es muss also festgehalten werden, dass die Ergebnisse trotz der Normierung auf gleichartige Ausgangsbedingungen angewiesen sind.

Zum Vergleich zeigt Abbildung 4.35 eine ähnliche Darstellung der Ergebnisse aus den FEM-Simulationen in Unterabschnitt 4.1. Für die mit KL, 5W und SP bezeichneten Fälle wurde lediglich der Linsendurchmesser auf Werte von  $d = 2$  mm,  $d = 5$  mm und  $d = 7$  mm bei einem festen Elektrodeindruck von  $e = 0,15$  mm verändert. Für die mit SP\* bezeichneten Modelle für Proben, bei denen es zur Spritzerbildung kam, wurde jeweils  $d = 5$  mm und ein Elektrodeindruck von  $e = 0,25$  mm (SP\*/1) bzw.  $e = 0,5$  mm (SP\*/2) angesetzt. Grundlage der Darstellung sind hier Temperaturwerte. Auch diese werden zuerst pixelweise auf 0 und 1 für  $t = 0$  s bzw.  $t = 3$  s normiert. Danach wird der räumliche und zeitliche

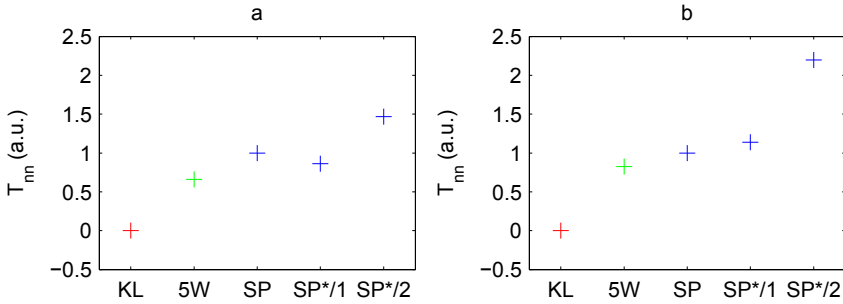


Abbildung 4.35: Darstellung von Ergebnisse der in Unterabschnitt 4.1 präsentierte FEM-Simulationen. Grundlage sind normierte Temperaturwerte. Für Diagramm a räumliche Mittelwertbildung in einem Bereich mit dem Durchmesser  $d_m = 10$  mm, zeitliche von 0 bis  $t_2 = 3$  s und für Diagramm b:  $d_m = 6$  mm,  $t_2 = 1,5$  s. Geometrieparameter: KL:  $d = 2$  mm,  $e = 0,15$  mm; 5W:  $d = 5$  mm,  $e = 0,15$  mm; SP:  $d = 7$  mm,  $e = 0,15$  mm; SP\*/1:  $d = 5$  mm,  $e = 0,25$  mm; SP\*/2:  $d = 5$  mm,  $e = 0,5$  mm. Die Gruppen KL, 5W, SP können in beiden Fällen unterschieden werden. Abhängig vom den Annahmen für die Geometrie der Proben, bei denen es zur Spritzerbildung kam, und dem Bereich, in dem die Mittelwertbildung stattfindet, können diese erkannt werden.

Mittelwert  $T_{norm}$  gebildet. Zur besseren Vergleichbarkeit werden diese Werte ein zweites mal normiert, sodass für KL  $T_{nn} = 0$  und für SP  $T_{nn} = 1$  gilt (der Index nn soll dabei die doppelte Normierung andeuten). Für Diagramm a wurde ein Zeitintervall von 0 bis 3 s, entsprechend der kompletten Messdauer in den Experimenten und ein räumlichen Bereich mit dem Durchmesser  $d_m = 10$  mm gewählt (wegen der rotationssymmetrischen Definition des FEM-Modells wird hier der Einfachheit halber ein kreisförmiger Bereich gewählt). Zum Vergleich wurde für Diagramm b die Mittelwertbildung auf einen kleinen Ausschnitt eingeschränkt. Hier wurde ein Zeitintervall von 0 bis 1,5 s und ein Durchmesser von  $d_m = 6$  mm angesetzt.

Es lässt sich festhalten, dass hier der gleiche Trend deutlich wird:  $T_{nn}$  korreliert bei  $e = const$  mit  $d$ ; KL, 5W und SP lassen sich unterscheiden. Die Erkennbarkeit der Spritzerbildung hängt offensichtlich von der gewählten Geometrie ab. SP\*/2 führt in beiden Fällen zu Werten  $T_{nn} > 1$ . Eine Probe mit den Parametern von SP\*/1 ließe sich aber nur mit der eingeschränkten Mittelwertbildung erkennen. Die Art der Auswertung beeinflusst also auch die Erkennbarkeit von Proben, bei denen es zur Spritzerbildung kam. An dieser Stelle sei aber nochmal darauf hingewiesen, dass den FEM-Simulationen ein stark vereinfachtes Modell zugrunde liegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Spritzerbildung in der Realität zu weiteren Beeinflussungen als nur einer Änderung von Linsengröße und Elektrodeneindruck führt. Z.B. könnte es zu einer Veränderung der Wärmeleitung durch die Haftzone oder deren Ausdehnung kommen.

## Optimierung

Es soll nun ein Kriterium gefunden werden, welches eine möglichst gute Trennung zwischen den einzelnen Gruppen ermöglicht. Für den Vergleich unterschiedlicher Kriterien wird auf den Tukey-Cramer-Test zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um einen statistischen Standardtest zum Vergleich von Mittelwerten. Dieser gibt auf Grundlage einer Varianzanalyse Auskunft darüber, wie weit die einzelnen Mittelwerte mit einem gewissen Konfidenzniveau auseinander liegen. Da die verschiedenen Auswertungsverfahren zu unterschiedlichen Zahlenwerten führen, soll hier folgendermaßen vorgegangen werden:

- Zuerst werden die sich für die einzelnen Gruppen ergebenden Mittelwerte auf 0 (KL) und 1 (SP) normiert (analog Abbildung 4.35).
- Nun wird berechnet, wie weit die Mittelwerte von KL und 5W bzw. 5W und SP mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% mindestens auseinanderliegen.
- Als Gütekriterium für die Trennschärfe des Verfahrens wird nun der kleinste Abstand zwischen zwei Mittelwerten  $d_{min}$  – hier ist die Unterscheidung schließlich am anspruchsvollsten – herangezogen.

Optimal wäre also ein Wert von  $d_{min} = 0,5$  für gleichmäßig verteilte Werte ohne Streuung. Wenn sich zumindest zwei der Gruppen nicht unterscheiden würden, diese Werte also statistisch verteilt wären, ergäbe sich als anderes Extrem ein Wert von  $d_{min} = 0$ .

Um das Auswertungsverfahren zu parametrisieren, wird auf eine räumliche und zeitliche Mittelwertbildung nach elementweiser Multiplikation des Messfilms mit einer Wichtungsfunktion zurückgegriffen, wie sie in Gleichung 4.9 beschrieben ist. Die Wichtungsfunktion wird nun als dreidimensionale gaussförmige Verteilung definiert:

$$M(\mu, \sigma) = c \cdot \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \left( \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 + \left( \frac{t - \mu_t}{\sigma_t} \right)^2 \right) \right). \quad (4.12)$$

Dabei bezeichnet  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_t)$  die Mittelwerte und  $\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_t)$  die Standardabweichung der als Wichtungsfunktion genutzten Normalverteilung. Als Zahlenwerte werden diese Größen im Folgenden immer als auf die Größe des Messbereichs bzw. der Wichtungsmatrix normierte Werte zwischen 0 und 1 angegeben, um die Darstellung unabhängig von der gewählten Orts- und Zeitaufösung zu machen. Die Normierung der Normalverteilung muss an dieser Stelle nicht beachtet werden, da nach Gleichung 4.9 ohnehin auf die Betragsnorm von  $M$  normiert wird.

Für die räumlich über den gesamten Messbereich gemittelten Werte konnte die beste Unterscheidbarkeit in der Anfangsphase der Erwärmung festgestellt werden (siehe Abbildung 4.22). Außerdem scheint es vorteilhaft, den mittleren Bereich stärker zu wichten. Als Startwert soll daher ein Parametersatz mit  $\mu = (0,5; 0,5; -0,5)$  und  $\sigma = (0,1; 0,1; 0,1)$  für die Wichtungsfunktion genutzt werden, da so kleine Zeiten und der mittige Bereich stärker gewichtet werden. Abbildung 4.36 a zeigt einen *box plot* für die resultierenden Werte einer solchen Auswertung. Hier wurden die Werte analog zu Abbildung 4.35 auf  $I_{nn} = 0$  für den

Mittelwert der Proben aus KL und  $I_{nn} = 1$  für den Mittelwert der Proben aus SP normiert. Der minimale Abstand liegt hier mit  $d_{min} = 0,33$  zwischen KL und 5W vor. Im Vergleich zu Abbildung 4.34 b, in der das Ergebnis einer ungewichteten Mittlung (entsprechend  $\sigma \rightarrow \infty$ ) dargestellt ist, fällt die deutlich geringe Streuung auf. Zudem tritt in der Gruppe 5W kein Ausreißer mehr auf.

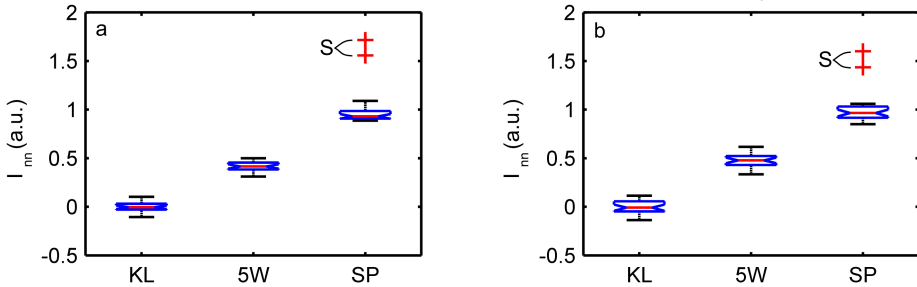


Abbildung 4.36: *Box plot* der Ergebnisse einer Auswertung nach Gleichung 4.9 mit einer über Gleichung 4.12 definierten Wichtungsfunktion. Für Diagramm a wurden  $\mu = (0,5; 0,5; -0,5)$  und  $\sigma = \{0,1; 0,1; 0,1\}$  eingesetzt, für Diagramm b die optimierten Werten  $\mu = (0,40; 0,56; 0,38)$  und  $\sigma = \{0,41; 0,39; 0,001\}$ . Die mit S gekennzeichneten Werte wurden an Proben ermittelt, bei denen es zu Spritzern kam. Im Gegensatz zur in Abbildung 4.34 gezeigten Auswertung mit direkter Mittelwertbildung – also gleichmäßigen Wichtung des gesamten Messfilm – treten hier neben den Spritzern keine weiteren Ausreißer auf.

Fasst man dieses Vorgehen nun zusammen, kann man die gesamte Auswertungsvorschrift als eine Funktion darstellen, die von sechs skalaren Parametern ( $\mu$  und  $\sigma$ ) abhängt und auf ein Gütekriterium  $d_{min}$  abbildet:

$$F : (\mu_x, \mu_y, \mu_t, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_t) \mapsto d_{min} ; d_{min} \in [0; 0,5] \quad (4.13)$$

Das Finden eines unter diesen Einschränkungen optimalen Auswertungsverfahrens stellt sich nun mathematisch als Optimierungsproblem dar: Es muss ein Parametersatz gefunden werden, der  $d_{min}$  maximiert. Zur Optimierung wird der in der *optimization toolbox* der Software *matlab* enthaltene *active set* Algorithmus verwendet. Dieser Algorithmus ist geeignet, das Minimum einer beschränkten Funktion zu finden [198]. Da die ursprüngliche Funktion  $F$  maximiert werden sollte, wurde als Kriterium  $0,5 - d_{min}$  eingesetzt. Um die Rechnungen zu beschleunigen ist es vorteilhaft, sämtliche Messdaten gleichzeitig im Arbeitsspeicher des verwendeten Rechners vorhalten zu können. Daher wurde der Datensatz von ursprünglich  $1000 \times 320 \times 248$  Messpunkten à 8 byte (Datentyp *double*) pro Messfilm, also 44 GB, zuerst auf einen quadratischen Bildausschnitt von  $160 \times 160$  Pixel beschnitten und dann auf  $50 \times 50 \times 75$  Datenpunkte mittels kubischer Interpolation reduziert, sodass sich insgesamt 107 MB ergeben, die sich problemlos im Arbeitsspeicher eines handelsüblichen PCs halten lassen.

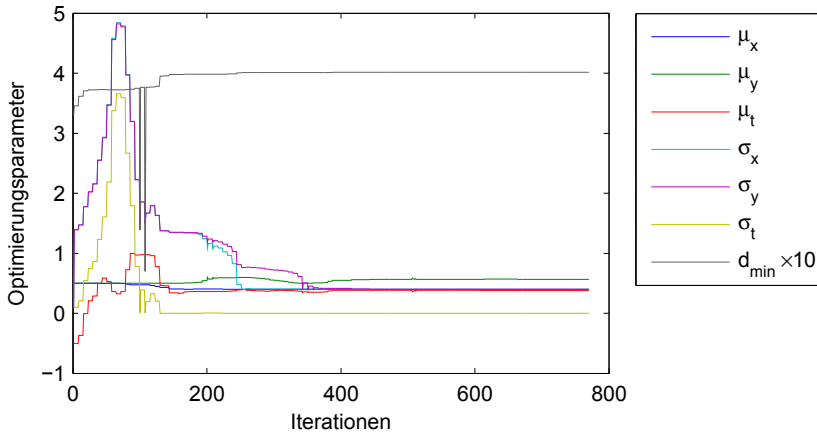


Abbildung 4.37: Konvergenz des Optimierungsprozesses. In Abbildung 4.36 findet sich *box plots* für Auswertungen mit den Start- und Endwerten.

In Abbildung 4.37 ist die Konvergenz der Optimierung für die Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  sowie die Zielvariable  $d_{\min}$  dargestellt. Als Startwerte wurden die auch für Abbildung 4.36 verwendeten Parameter herangezogen. Abbildung 4.36 zeigt links einen *box plot* der Werte, die aus einer optimierten Auswertung erhalten werden. Der größte Teil der Steigerung von  $d_{\min}$  erfolgte bereits während der ersten 180 Iterationen. Trotz großer Änderungen in  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  kann danach nur noch eine Steigerung im Prozent-Bereich erreicht werden. Insgesamt konnte  $d_{\min}$  von 0,33 auf 0,40, also um über 20% gesteigert werden.

In Abbildung 4.38 sind zum Vergleich die Ergebnisse des RMS-Verfahrens nach Gleichung 4.11 als *box plots* dargestellt. Auch für diese Daten wurde der minimale Abstand zwischen zwei Mittelwerten  $d_{\min}$  mit dem Tukey-Test berechnet. Da nur für den Vergleich mit KL und SP ein mit der Gruppennummer monotonen Verhalten der Werte vorliegt, beim Vergleich mit 5W hingegen die Werte für SP und KL fast gleich sind, wird für diesen Fall zu einer anderen Normierung gegriffen: Der größte auftretende Abstand zwischen zwei Mittelwerten wird auf 0,5 gesetzt, sodass sich die gleichen Verhältnisse wie für die anderen Fälle ergeben. Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass auf diese Weise prinzipiell nur eine Erkennung der optimal geschweißten Proben möglich ist, nicht aber eine Einordnung nach den vorliegenden Fehlerklassen.

Die beste Trennschärfe von  $d_{\min} = 0,38$  ergab sich für den Vergleich mit SP. Zu beachten ist hierbei, dass die Proben aus der Gruppe SP, bei denen es zur Spritzerbildung gekommen ist, sich nicht detektieren lassen. Bei diesen würde es zu einer Falschzuordnung zur Gruppe 5W kommen. Eine Auswertung über gewichtete Mittelwertbildung führt also zu einer besseren statistischen Trennschärfe und ermöglicht zudem eine sichere Erkennung

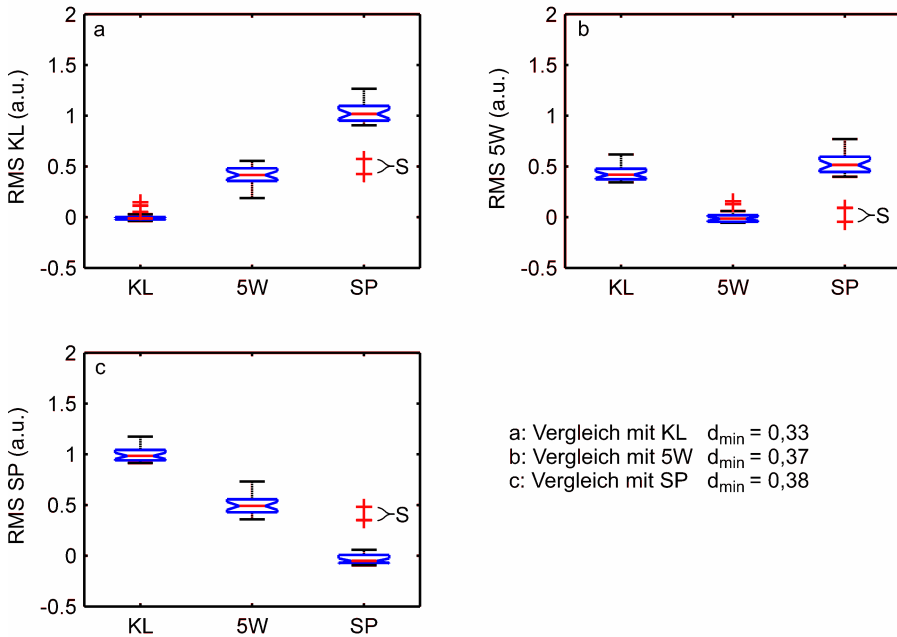


Abbildung 4.38: Ergebnisse der Auswertung über den Vergleich mit dem Mittelwert der Gruppen, nur für die erste Messwiederholung, analog zu den in Abbildung 4.30 dargestellten Ergebnissen. Mit S sind Proben gekennzeichnet, bei denen es zur Spritzerbildung kam. Die beste Trennschärfe wird beim Vergleich mit dem Mittelwert der Gruppe SP erzielt.

der Spritzerbildung und ist daher vorzuziehen.

#### 4.9 Vergleich mit zerstörender Prüfung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Ergebnisse der thermografischen Prüfung stets auf Grundlage der Einteilung in die einzelnen Probengruppen diskutiert, was wegen der geringen Streuung der mechanischen Parameter innerhalb der einzelnen Probengruppen zulässig ist (vergleiche Abschnitt 4.6). Anhand dieser Klassifizierung wurde nun ein optimiertes Prüfkriterium ermittelt (siehe Unterabschnitt 4.8.2). Für eine abschließende Validierung der Ergebnisse sollen nun die mit dem optimierten Prüfkriterium berechneten gemittelten und normierten Intensitätswerte  $I_{nn}$  mit den Ergebnissen der instrumentierten Torsionsversuche verglichen werden.

In Abbildung 4.39 sind die Werte der Torsionsprüfung aus Abbildung 4.27 gegen die



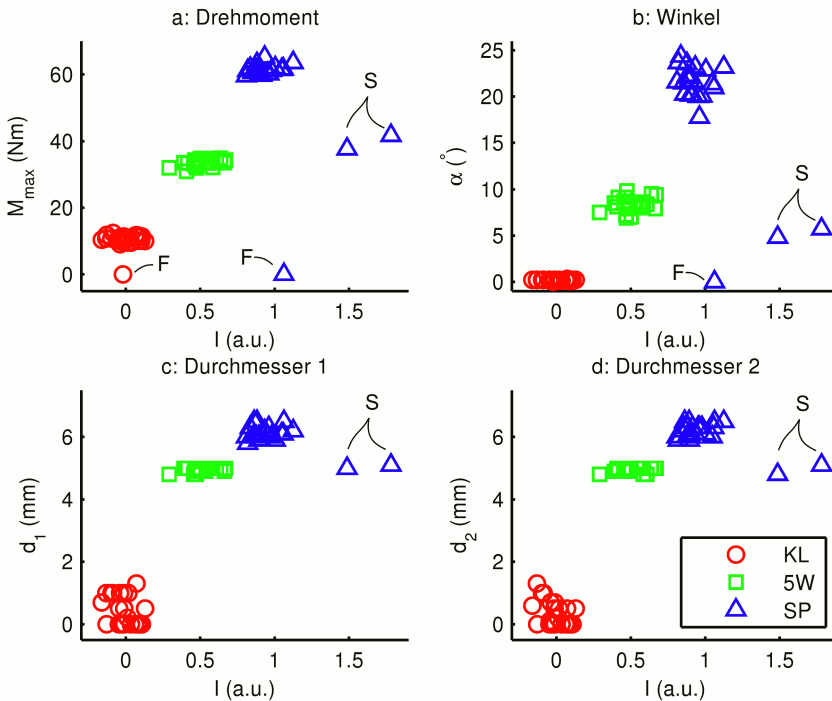


Abbildung 4.39: Vergleich von zerstörender und zerstörungsfreier Prüfung. Es wurden jeweils die Werte der Torsionsprüfung aus Abbildung 4.27 gegen die Ergebnisse der thermografischen Prüfung mit dem optimierten Prüfkriterium  $I$  aus Abbildung 4.36 aufgetragen. Diagramm a zeigt das maximale Drehmoment  $M_{\max}$ , b den maximalen Torsionswinkel  $\alpha$ , c und d den optisch vermessenen Durchmesser der Schweißlinse in horizontaler  $d_1$  bzw. vertikaler Richtung  $d_2$ . Mit S sind Proben gekennzeichnet, bei denen es zu Spritzern kam. Bei denen mit F gekennzeichneten Werten konnte der jeweilige Wert der Torsionsprüfung nicht ermittelt werden.

Ergebnisse der thermografischen Prüfung mit dem optimierten Prüfkriterium  $I$  aus Abbildung 4.36 aufgetragen. Mit F sind Werte markiert, bei denen der Torsionsversuch nicht ordnungsgemäß durchgeführt werden konnte, mit S solche, die an Proben gemessen wurden, bei denen es zu Spritzern kam. Eine Diskussion der Streuung der Werte aus dem Torsionsversuchen findet sich in Unterabschnitt 4.6. Folgende Punkte können an dieser Stelle festgehalten werden:

- Das thermografische Prüfkriterium  $I_{nn}$  und die Werte aus der zerstörenden Prüfung hängen voneinander ab.

- Bei Proben, bei denen es nicht zu Spritzern gekommen ist, stehen die Zahlenwerte von  $I_{nn}$  mit den Gütekriterien für die Belastbarkeit ( $M_{\max}$ ,  $\alpha$ ,  $d_{1,2}$ ) in monotonem Zusammenhang.
- Proben, bei denen es zu Spritzern kam, lassen durch die größeren Werte von  $I_{nn}$  – bei der hier verwendeten Normierung  $I_{nn} > 1$  – sicher von anderen Proben unterscheiden.

Somit ist die thermografische Prüfung nach der in diesem Kapitel entwickelten Methode zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Punktschweißverbindungen geeignet.

#### 4.10 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine experimentelle Methode und eine Datenanalyseprozedur zur thermografischen Prüfung von Widerstandsschweißpunkten entwickelt. Als Ergebnis soll eine mit der Festigkeit korrelierte Größe wie z.B. der Linsendurchmesser ermittelt werden.

Zuerst wurden für die thermografische Prüfung die Haupteinflussgrößen und Grenzen mittels FEM-Simulationen in Abschnitt 4.1 diskutiert. Dabei erwies sich eine Transmissionsanordnung als vorteilhaft und eine Messzeit von 3 s als ausreichend. Die Möglichkeit des direkten Nachweises des Linsendurchmessers über die thermische Signatur der Linse erscheint als experimentell schwer realisierbar. Zudem wurde festgestellt, dass die Wärmeleitung in der Haftzone nicht zu hoch sein darf. Die minimale Materialtrennung sollte hier über  $0,5 \mu\text{m}$  liegen.

Auf dieser Grundlage wurde dann die prinzipielle Durchführbarkeit untersucht (siehe Abschnitt 4.3). Hierzu wurden Proben durch die Schweißlinse hinweg zerteilt. So konnte bei einseitiger Anregung mittels Laser die Temperaturverteilung über die Schweißlinse hinweg direkt gemessen und so nach dem Fourierschen Gesetz auf den thermischen Widerstand geschlossen werden. Unterschiedlich präparierte Proben unterscheiden sich in ihren thermischen Widerständen, woraus sich die prinzipielle Möglichkeit einer thermografischen Prüfung ergibt.

Für die konkrete Prüfung wurde entsprechend der Voruntersuchungen eine Blitzanregung in Transmissionsanordnung bei einer Messdauer von 3 s gewählt. Das räumliche Auflösungsvermögen in der Prüfanordnung wurde bestimmt (siehe Unterabschnitt 4.4.2). Es entspricht etwa der Materialüberdeckung. Dieses Ergebnis bestätigt, dass eine direkte, bildgebende Bestimmung des Linsendurchmessers praktisch nicht oder nur unter großen Einschränkungen möglich ist.

Als Datenbasis für die Entwicklung eines geeigneten integralen Prüfkriteriums wurde eine Serienuntersuchung an 75 Proben durchgeführt (siehe Unterabschnitt 4.4.3). Diese wurden mit drei Parametersätzen – für Klebverbindungen, optimalen Parametern und für Schweißungen an der Spritzergrenze – geschweißt. Zur einfacheren Messung wurden die Proben beidseitig mit Graphit beschichtet. Nach den thermografischen Untersuchungen wurden die mechanischen Kennwerte der Proben als Referenzwerte über instrumentierte Torsionsversuche bestimmt (siehe Abschnitt 4.6).

Pro Probe wurden drei thermografische Messungen durchgeführt, was einen Datensatz von ca. 36 GB ergibt. Zur Datenaufbereitung wurden zunächst geometrische und zeitliche Bezugspunkte ermittelt. Dann wurden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, die resultierenden räumlich und zeitlich aufgelösten Intensitätswerte pixelweise auf Werte zwischen 0 und 1 für  $t = 0$  s bzw.  $t = 3$  s normiert (siehe Abschnitt 4.5). Auf Grundlage einer statistischen Varianzanalyse und Optimierung ergab sich als optimales thermografisches Gütekriterium eine zeitliche und räumliche Mittelwertbildung der normierten Intensitätswerte bei stärkerer Wichtung der räumlich direkt über dem Schweißpunkt liegenden Pixel sowie der Werte zu Zeiten um 1 s (siehe Abschnitt 4.8.2).

Abschließend können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Mit der hier vorgestellten Methode können Schweißungen mit verminderter Tragfähigkeit, also Klebverbindungen und Schweißungen, bei denen es zu Spritzern gekommen ist, sicher erkannt werden.
- Das mit der in diesem Kapitel vorgestellten Methode ermittelte Thermografische Gütekriterium steht für Proben, bei denen es nicht zu Spritzern gekommen ist, in monotonen Zusammenhang zu den mechanischen Kennwerten.
- Entgegen der üblichen defektoskopisch-bildgebenden Ausrichtung der aktiven Thermografie ist für eine Erkennung der typischen Fehlerbilder weder eine explizite zeitliche noch räumliche Auflösung notwendig. Die Messung muss lediglich zeitlich und räumlich begrenzt erfolgen.

## 4.11 Diskussion

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen statistisch abgesichert eine Möglichkeit auf, wie sich eine thermografische Prüfung an Punktschweißverbindungen durchführen lässt.

Auf dem Gebiet der thermografischen Prüfung von Punktschweißverbindungen finden sich nur in den Arbeiten von Türler *et al.* Messungen an einer größeren Anzahl von Proben und Vergleiche mit zerstörender Prüfung [123, 124]. Die dort vorgestellte Methode, die auf einer kontinuierlichen Anregung und der räumlichen Auswertung der gemessenen Temperaturverteilung basiert, ist dazu geeignet, Schweißpunkte mit zu kleiner Schweißlinse zu erkennen (siehe auch Unterabschnitt 2.2.6, Abbildung 2.7). Über die Erkennung von Spritzern mit dieser Methode finden sich keine Angaben. In anderen Arbeiten zu diesem Prüfproblem wurden stets nur kleine Gruppen von Proben untersucht, sodass höchstens eine prinzipielle Machbarkeit abgeleitet werden könnte [17, 128, 129]. Bei allen genannten Untersuchungen wurde mit emissivitätssteigernden Beschichtungen gearbeitet. Eine umfassende Literaturrecherche erbrachte keine Hinweise darauf, dass auf Basis der zahlreichen Patente auf diesem Gebiet einsatzfähige Prüfeinrichtungen im industriellen Bereich entstanden sind.

Im Vergleich zu anderen Prüfverfahren, wie z.B. der Ultraschallprüfung, sei an dieser Stelle noch mal auf die generischen Vorteile der Blitzlichtthermografie verwiesen: Das Verfahren ist schnell und berührungslos und somit gut automatisierbar. Zwar gibt es auch für

vielfältige Anwendungszwecke vollautomatische Ultraschallprüfanlagen, aber sämtliche bisher kommerziell verfügbaren Geräte zur Prüfung von Punktschweißverbindungen sind für die Handprüfung ausgelegt [164, 163]. Für weitere Verfahren, wie z.B. den Einsatz von luftgekoppelten Ultraschall in Form von Array-Systemen [165] oder EMATs<sup>10</sup>, finden sich bisher keine Untersuchungen, die abgesicherte Aussagen über deren Eignung erlauben würden.

Nachteilig an der in dieser Arbeit entwickelten Methode ist, dass auch hier nur die Machbarkeit der Prüfung von mit Graphit beschichteten Proben gezeigt wurde. Eine Erweiterung der Methode auf die Anwendung an unbeschichteten Proben erscheint aber möglich (vergleiche Unterabschnitt 4.2.2). Jedoch muss diese Frage für jeden Anwendungsfall individuell untersucht werden. Außerdem könnte der Einsatz von Blitzlampen aus Gründen des Arbeitsschutzes eine Einhausung notwendig machen.

Die hier vorstellte Methode geht also sowohl was die Erkennbarkeit unterschiedlicher Fehlerbilder als auch die statistische Absicherung betrifft, deutlich über die bisherigen in der Literatur beschriebenen Arbeiten zur Thermografie hinaus. Außerdem ist sie im Hinblick auf den experimentellen Teil und auf die Messdatenauswertung gut für einen automatisierten Einsatz geeignet, da sie berührungslos ist und sich eine Probenklassifikation über den Vergleich mit Schwellwerten, also ohne manuelle Eingriffe, realisieren lässt. Würde man diese Methode in einen industriellen Fertigungsprozess integrieren, könnte einerseits auf einen Teil der routinemäßig durchgeführten zerstörenden Prüfungen verzichtet werden, was durch die Vermeidung von Prüfausschuss zu einer großen Kostenersparnis führen würde. Andererseits könnte der Prüftakt deutlich erhöht werden, was eine schnellere Nachregelung des Schweißprozesses erlauben würde.

Aus physikalischer Sicht ist an der in dieser Arbeit entwickelten Auswertungsmethode bemerkenswert, dass eine räumlich und zeitlich integrale Größe als Gütekriterium geeignet ist. Dies steht im Gegensatz zur klassischen bildgebenden, defektoskopischen Ausrichtung der aktiven Thermografie. Jedoch ist die hier im Experiment erreichbare räumliche Auflösung ohnehin zu gering, um die Größe der Schweißlinse mit ausreichender Genauigkeit direkt vermessen zu können (siehe Unterabschnitte 4.1.4 und 4.4.2). Als Hilfsgröße wird daher eine vom integralen thermischen Widerstand der Probe abhängige Größe ermittelt: Bei einem kleinen Widerstand erfolgt der Temperatúrausgleich zwischen beiden Seiten der Probe schneller. Dieses Verhalten bleibt auch nach der bei der hier vorgestellten Methode vorgenommenen Normierung erhalten. In erster Näherung ist der thermische Widerstand umgekehrt proportional zur Kontaktfläche, also zum Quadrat des Schweißlinsendurchmessers. Über dieses Verhalten lassen sich die unzulässig kleinen Schweißlinsen der Klebschweißungen sicher erkennen. Es konnten aber auch Proben, bei denen es zu Spritzern gekommen ist, von anderen Proben gleichen Punktdurchmessers unterschieden werden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass es durch die Spritzerbildung zu einem Materialverlust kommt, der sich in einer geringeren Probendicke im Bereich der Schweißlinse auswirkt. Da sich der thermische Widerstand nun umgekehrt proportional zur Materialdicke verhält, zeigen solche Proben die geringsten thermischen Widerstände. Dieses Verhalten ist z.B. bei den in Abbildung 4.36 mit S gekennzeichneten Werten deutlich erkennbar. Die Überlegungen decken

---

<sup>10</sup>Von engl. *Electromagnetic Acoustic Transducer*.

sich mit den Ergebnissen von an FEM-Simulationen durchgeführten Parametervariationen. So ist es möglich, über einen einzigen integralen Parameter die Größe der Schweißlinse zu bestimmen, und gleichzeitig über einen Schwellwert festzustellen, ob es zur Spritzerbildung gekommen ist.

## 4.12 Ausblick

An dieser Stelle soll auf die Möglichkeiten eingegangen werden, die sich aus der räumlich integralen Datenauswertung ergeben. Es wurde in diesem Kapitel gezeigt, dass es bei der hier verwendeten Versuchsanordnung für eine thermografische Prüfung von Punktschweißverbindungen ausreichend ist, räumlich gemittelte Intensitätswerte zu betrachten.

Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, auf eine orts aufgelöste Messung zu verzichten. Insbesondere lässt sich eine integrale Temperaturmessung leicht kontaktierend umsetzen, z.B. über Thermoelemente oder Heiß- bzw. Kaltleiter. Diese Realisierungsform der Messung des thermischen Widerstandes hat zudem den großen Vorteil, dass sie im Gegensatz zur radiometrischen Messung unabhängig von den optischen Eigenschaften der Oberfläche des untersuchten Werkstückes ist. Die genaue Formgebung des Messbereichs, also der Kontaktfläche des kontaktierenden Thermometers, lässt sich auf Grundlage einer orts aufgelösten Messung mit dem im Unterabschnitt 4.8.2 diskutierten Verfahren bestimmen. Hierbei muss jedoch als Wichtungsfunktion statt einer Normalverteilung eine Stufenfunktion gewählt werden, um den physikalischen Gegebenheiten eines kontaktierenden Temperatursensors gerecht zu werden. Auch die Anregung ließe sich prinzipiell kontaktierend realisieren. Hierbei muss dann statt einer kurzzeitigen Anregung zu einer langsameren Erwärmung über die gesamte Messdauer hinweg gegriffen werden. Dies wurde in den Arbeiten von Türler *et al.* erfolgreich mittels Heizstrahler realisiert [123, 124]. Für ein auf diesen Überlegungen basierendes Messgerät wurde ein Patentantrag beim deutschen Patent- und Markenamt eingereicht [199].

# Kapitel 5

## Vertikale Fehler: Risse

In diesem Kapitel sollen die Möglichkeiten untersucht werden, die die optisch angeregte Thermografie bei der Erkennung und geometrischen Charakterisierung von hauptsächlich vertikal ausgedehnten Fehlstellen bietet, wie sie als offene Oberflächenrisse häufig auftreten. Dazu werden im Folgenden zwei Punkte bearbeitet:

- Es soll ein schnelles thermografisches Verfahren zur Rissdetektion entwickelt werden, das rein auf kommerziellen Geräten basiert.
- Es soll die Frage geklärt werden, ob sich dieses Verfahren auf eine geometrische Charakterisierung erweitern lässt.

Im Abschnitt 5.1 werden zwei Verfahren zur Detektion von Rissen vorgestellt. Da es sich hierbei um bildgebende Verfahren handelt, enthalten die Ergebnisse immer auch Informationen über die Risslänge. Mit dem Ziel, weitere geometrische Parameter zu ermitteln, werden im Abschnitt 5.2 systematische Untersuchungen an artifiziellen Probekörpern gezeigt. Für eine quantitative Bewertung der gewonnenen Ergebnisse werden im Abschnitt 5.3 FEM-Simulationen herangezogen, die weiterreichende Aussagen ermöglichen.

### 5.1 Rissdetektion

In diesem Abschnitt sollen verschiedene Verfahren zur Rissdetektion mittels aktiver Thermografie vorgestellt werden. Im Abschnitt 5.1.1 wird gezeigt, wie sich Risse bei ausreichender Klaffung über ihre optischen Eigenschaften erkennen lassen. Ein die thermischen Eigenschaften ausnutzendes Verfahren, welches auf den Ideen zur *Flying Spot Camera* basiert, folgt im Abschnitt 5.1.2. Bei diesem wird der Wärmeeintrag analog zur *Flying Spot Camera* über einem Laser mit optischem Scanner realisiert. Die Temperaturmessung erfolgt aber nicht über einen Einzelsensor, der ebenfalls mit einem Scannersystem ausgerüstet ist, sondern über eine ortsfeste IR-Kamera.

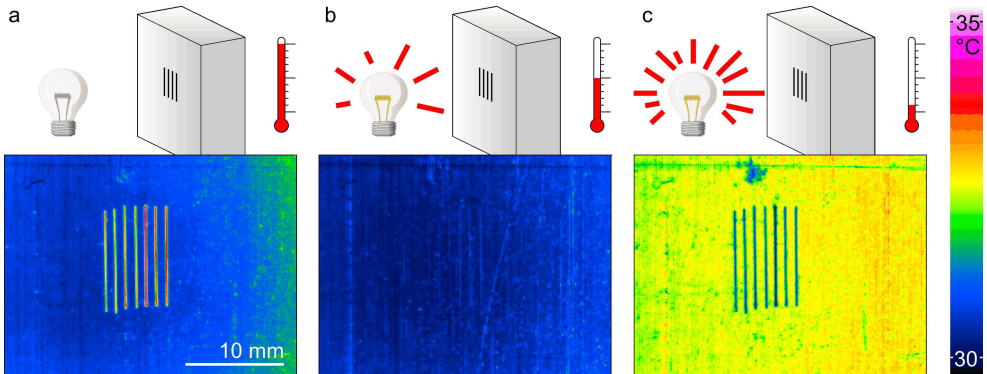


Abbildung 5.1: Prinzip der Rissdetektion über Emissivitätsunterschiede. Die Thermogramme (unten) enthalten reale Messdaten eines metallischen Probekörpers mit einem funkenerodierten Rissfeld. Zwischen den einzelnen Aufnahmen wurden jeweils die Hintergrundtemperatur  $T_{\text{amb}}$  und die Objekttemperatur  $T_{\text{obj}}$  variiert. a:  $T_{\text{amb}} < T_{\text{obj}}$ ; b:  $T_{\text{amb}} \approx T_{\text{obj}}$ ; c:  $T_{\text{amb}} > T_{\text{obj}}$ .

### 5.1.1 Oberflächeneigenschaften

Eine thermografische Rissdetektion lässt sich auch über die hauptsächlich geometrisch bestimmten optischen Eigenschaften von Rissen realisieren (siehe Abschnitt 2.2.5). Hier soll ein Experiment gezeigt werden, für das ein Probekörper aus Baustahl (S235JR) verwendet wurde. Die gefräste Oberfläche weist eine riefenartige Feinstruktur auf. Dadurch ergibt sich eine Emissivität von  $\epsilon \approx 0,4$ . Als artifizielle Fehler enthält er sieben funkenerodierte Nuten mit einer Länge von jeweils 10 mm, einer Breite von 120  $\mu\text{m}$  und Tiefen von 1 mm und 2 mm. Zur Temperaturmessung kam das Mikrobolometersystem der BAM zum Einsatz (siehe Abschnitt 3.1.2).

Der Probekörper wurde mit einem dimmbaren Halogenstrahler beleuchtet, der einen Großteil seiner Energie im Infraroten abstrahlt. Dessen Strahlung wurde nun wegen der geringen Emissivität teilweise in die verwendete IR-Kamera reflektiert. So ließ sich eine variable Hintergrundtemperatur realisieren. Bei einer Zimmertemperatur von 21°C und einer Probentemperatur zwischen 30°C und 33°C wurden Thermogramme mit variierender Hintergrundstrahlung aufgenommen. Während der Messung wurde die Probe durch die einfallende Strahlung um etwa 3°C erwärmt.

Die Ergebnisse dieser Messung werden in Abbildung 5.1 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Thermogramme nicht die tatsächliche Probentemperatur zeigen, sondern die Kamera für eine Emissivität von  $\epsilon = 0,95$  bei der im Labor herrschenden Hintergrundtemperatur  $T_{\text{amb}} \approx 21^\circ\text{C}$  eingestellt war. Die dargestellten Temperaturwerte sind also qualitativ zu verstehen, insbesondere entspricht die tatsächliche Temperatur der Risse der Temperatur des sie umgebenden Materials. Die Ergebnisse lassen sich gut interpretieren, wenn man beachtet, dass sich die von jedem Punkt der Probe ausgehende IR-Strahlung nach Gleichung

2.4 als Summe aus der emittierten und der reflektierten Strahlung ergibt. Bei der Aufnahme von Thermogramm a lag die Probentemperatur  $T_{\text{obj}}$  oberhalb der scheinbaren Hintergrundtemperatur  $T_{\text{amb}}$ . Da die Risse eine höhere Emissivität als die umgebende Probe haben, scheinen sie wärmer. Für b gilt  $T_{\text{amb}} = T_{\text{obj}}$ , es treten also keine Emissivitätsunterschiede mehr im Thermogramm hervor. Bei Thermogramm c gilt  $T_{\text{amb}} > T_{\text{obj}}$ , es überwiegt also der Anteil der reflektierten Strahlung. Daher erscheinen die Risse wegen ihres geringen Reflexionsgrades kälter.

### 5.1.2 Laser

Im folgenden Abschnitt werden eine Messprozedur und ein Algorithmus zur Rissdetektion mittels lokal angeregter Thermografie vorgestellt. Bei artifiziellen Probekörpern mit funkenrodierten Nuten als Rissmodell ist eine direkte Erkennung anhand des Emissivitätsunterschieds wegen der vergleichsweise großen Klaffungen von typischerweise  $> 100 \mu\text{m}$  leicht möglich (siehe Abschnitt 5.1.1). Werden solche Proben mittels *Flying Spot* Thermografie vermessen, kommt es, wenn der Laser direkt den Riss beleuchtet, zu einem großen undefinierten Energieeintrag an den Rissflanken, da die Klaffung in der Größenordnung des Laserspotradius liegt. Da diese Effekte eine Detektion mittels anderer Prinzipien immer überlagern würden, wurde für die Experimente in diesem Abschnitt auf eine Probe mit realen Rissen geringerer Klaffung zurückgegriffen, auch wenn das Verfahren an artifiziellen Rissen wie Nuten erfolgreich demonstriert werden konnte.

### Experiment

Als Probe wurde ein 70 mm langer Ausschnitt aus einer Eisenbahnschiene mit dem Profil S54 verwendet, die eine große Anzahl an Rollkontaktermüdungsrissen<sup>1</sup> aufweist (siehe Abbildung 5.2). Der Vorteil dieser Probe ist, dass sie ein sehr homogenes Fehlerbild aufweist. Außerdem ist sie ferromagnetisch, was eine Magnetpulverprüfung (MT) als Referenzverfahren zur besseren Einordnung der thermografischen Methode möglich macht. Die Magnetpulverprüfung wurde nach DIN EN ISO 9934 an der in Abbildung 5.2 b gezeigten Magnetisierungsbank durchgeführt (vergleiche auch Abschnitt 2.3.6). Dazu wurde die Probe in Längsrichtung (entspricht in allen gezeigten Abbildungen der vertikalen Achse) aufmagnetisiert. Das Tagentialfeld betrug in der Probenmitte 6,6 kA/m, direkt über den Rissen 7,5 kA/m. Die Ergebnisse der MT werden als Referenz zur Beurteilung der Ergebnisse der thermografischen Prüfung genutzt. Da es sich um eine Schiene handelt, die zur Präparation der Probe im Einsatz war, weist diese eine sehr glatte Oberflächenstruktur auf und ist somit stark reflektierend. Um eine thermografische Messung zu ermöglichen, wurde sie mit Graphit beschichtet.

Der Versuchsaufbau für die gezeigten Experimente bestand aus dem Lasersystem LAT und der InSb-IR-Kamera (siehe Abbildung 5.3). Die Versuche wurden bei folgenden Parametern durchgeführt:

---

<sup>1</sup>Oft als *Head Checks* bezeichnet.



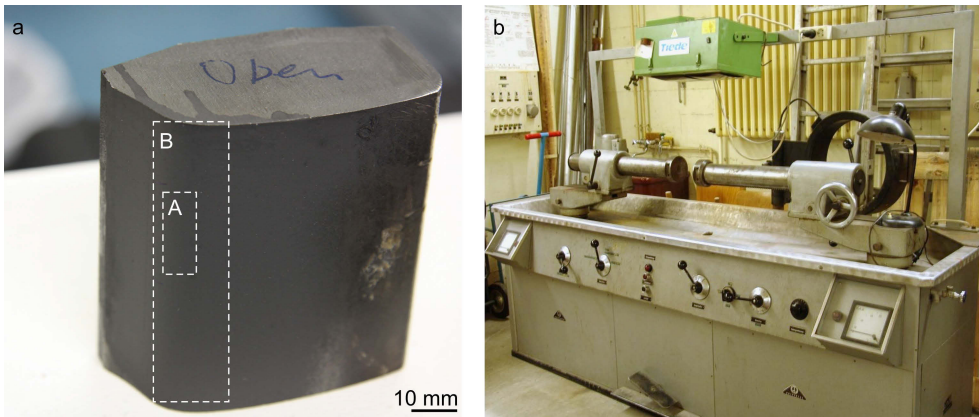


Abbildung 5.2: a: Foto des Probekörpers für die Rissdetektion mittels lokal angeregter Thermografie: Ausschnitt aus einer Eisenbahnschiene mit dem Profil S54, zur Emissivitätssteigerung mit Graphit beschichtet. Mit A und B sind die im Text beschriebenen Messbereiche bezeichnet. b: Foto der zur Magnetpulverprüfung verwendeten Magnetisierungsbank.

- Kameraeinstellungen:
  - 100mm MWIR Objektiv.
  - Integrationszeit: 625  $\mu$ s.
  - Auflösung: 640  $\times$  512 Pixel.
  - Bildwiederholfrequenz: 93 Hz.
- Umgebungsparameter:
  - Umgebungstemperatur: ca. 23°C.
  - Relative Luftfeuchtigkeit: ca. 60%.

Zur thermischen Anregung wurde der untersuchte Bereich sukzessive geradlinig in einheitlicher Richtung mit dem Laser abgefahren. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Linien wurde auf 1 mm eingestellt. Bei einem Laserspotdurchmesser von ca. 1,3 mm ist es so gewährleistet, dass der gesamte Messbereich überstrichen wird.

Im Folgenden werden Ergebnisse von zwei Messungen gezeigt. Die Messbereiche sind in Abbildung 5.2 mit A und B gekennzeichnet. Die beiden Bereiche haben folgende Abmessungen und resultierende Vergrößerungen im Infrarotbild:

**A:** Größe: 20,5  $\times$  8 mm<sup>2</sup>; Vergrößerung: 25 Pixel/mm.

**B:** Größe: 70  $\times$  18 mm<sup>2</sup>; Vergrößerung: 4,4 Pixel/mm.

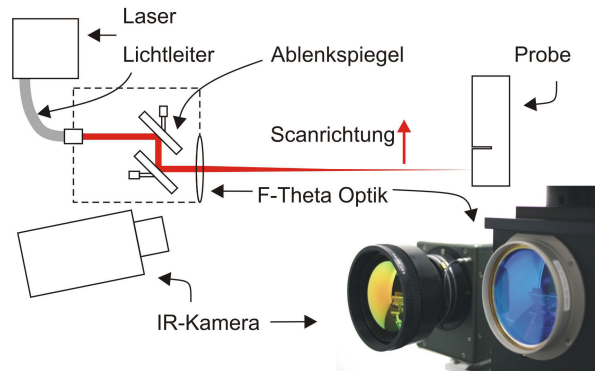


Abbildung 5.3: Skizze und Foto des Versuchsaufbaus. Der Laserspot wird über Ablenkspiegel auf die Probe projiziert, die er in einer geraden Linie überstreicht. Die resultierende Temperatur bzw. Infrarotstrahlungsverteilung wird mit einer IR-Kamera aufgenommen.

Bei der Messung in Bereich A wurde nur der mittlere Ausschnitt angeregt, der in Abbildung 5.4 durch vertikale gestrichelte Linien angezeigt ist. Hierzu wurden mit dem Laser 5 Linien von oben nach unten mit einer Geschwindigkeit von  $v_L = 30 \text{ mm/s}$  abgefahren, wofür ca. 4,5 s benötigt wurden. Bei der Messung im Bereich B wurde der gesamte Bereich bei gleicher Scanrichtung mit  $v_L = 50 \text{ mm/s}$  angeregt, was zu einer Messdauer von ca. 30 s führte. Die Leistung betrug jeweils  $P_{L,e} = 5 \text{ W}$ . Die Messesequenz wird im Folgenden als dreidimensionale Funktion  $I(x,y,t)$  notiert, wobei  $x,y,t$  diskrete Orts- bzw. Zeitvariablen bezeichnen. Der Datensatz besteht also aus  $N_x \times N_y \times N_t$  Einzelmessungen.

In Abbildung 5.4 sind die Ergebnisse der thermografischen Messung im Bereich A zusammen mit dem Ergebnis der Magnetpulverprüfung dargestellt. Die Thermogramme a und b zeigen jeweils dasselbe Einzelbild  $I(x,y,t = t_1)$  zum Zeitpunkt  $t_1 = 2,2 \text{ s}$  in zwei unterschiedlichen Skalierungen. Schon hier lassen sich Störungen der lateralen Wärmeleitung an der asymmetrischen thermischen Signatur des Laser erkennen. Die Intensitätssprünge entsprechen den Anzeigen der Magnetpulverprüfung. Da die durch die Risse ausgelösten Intensitätsgradienten aber von der thermischen Spur des Laser überlagert werden, hängt die Erkennbarkeit von Rissen oder anderen Fehlstellen in einer solchen Darstellung stark von der gewählten Helligkeits- bzw. Kontrastskalierung ab. Die Darstellung c zeigt den zeitlichen Mittelwert der gesamten Messesequenz

$$\bar{I}(x,y) = \frac{1}{N_t} \sum_t I(x,y,t). \quad (5.1)$$

Hier treten die Risse an allen Positionen deutlicher hervor. Der Grund dafür liegt in dem thermischen Widerstand der Risse, der die Abkühlung behindert und so zu höheren Durchschnittstemperaturen im Bereich derselben führt. In Bild d wurde jedem Pixel der maximale

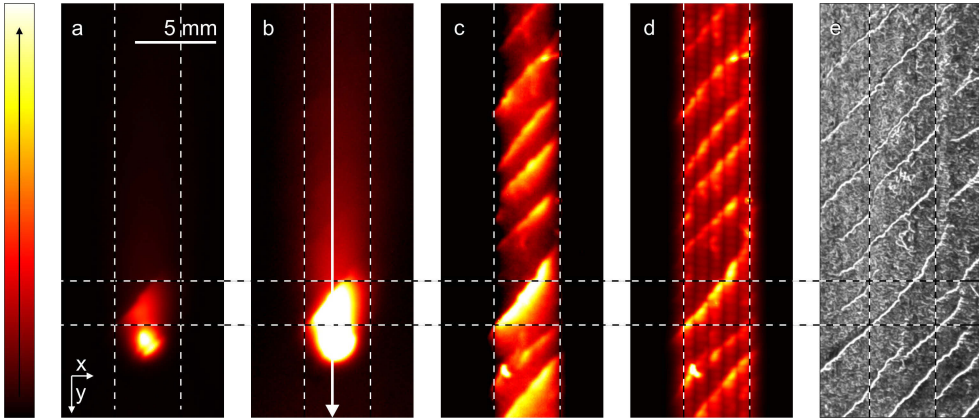


Abbildung 5.4: Ergebnisse der Prüfung des Bereichs A (siehe Abbildung 5.2). a und b: Einzelthermogramm für  $t = 2,2$  s in unterschiedlichen Farbskalierungen. In b ist zusätzlich der Weg für die im Folgenden gezeigten Linienprofile als Pfeil dargestellt. c: Zeitlicher Mittelwert der gesamten Messsequenz. d: Jedem Pixel wurde der maximale Wert zugeordnet, den er während der Messdauer erreicht hat. e: Foto des Ergebnisses einer Magnetpulverprüfung des gleichen Bereichs. Jedes der gezeigten Thermogramme hat eine Auflösung von  $201 \times 512$  Pixel. Gemäß den Konventionen der computergestützten Bildverarbeitung wurde ein linkshändisches Koordinatensystem gewählt.

Wert, der an dieser Stelle über die gesamte Messdauer hinweg erreicht wurde, zugeordnet:

$$I_{\max}(x,y) = \max_t I(x,y,t). \quad (5.2)$$

Da ein Pixel den maximalen Intensitätswert erreicht, wenn der Laserspot genau auf diese Position gerichtet ist, bzw. dieser am nächsten gekommen ist, wird so für jeden Pixel immer der Messwert zum Zeitpunkt der direkten Beleuchtung gewählt. In dieser Darstellungsform treten die Rissanzeigen deutlicher und weniger aufgeweitet hervor. Dieses Ergebnis entspricht also im Wesentlichen dem einer einfachen *Flying Spot Camera* (siehe Abschnitt 2.2.5, [90]). Der Laserweg zeigt sich anhand der fünf vertikalen Linien. Diese weisen eine innere Struktur auf. Der Grund hierfür ist, dass die Kamera nur über einen im Vergleich zur Bildwiederholfrequenz von  $f = 93$  Hz, entsprechend  $1/f = 10,8$  ms, kurzen Zeitraum von  $625 \mu\text{s}$  pro Einzelbild integriert. Dies bedeutet, dass nur jeder sechste Pixel während der Aufnahme direkt vom Laserspot getroffen wird. So wird in jedem Einzelbild eine Momentaufnahme der Laserposition festgehalten, was zu der erkennbaren Rasterung führt.

In Abbildung 5.5 sind Linienprofile dieser Daten, jeweils mittig in  $y$ -Richtung (in Abbildung 5.4 b als Pfeil gekennzeichnet), dargestellt. Der Laserweg verläuft in positiver  $y$ -Richtung. Das Signal  $S(y)$  entspricht hier Intensitäten aus den bildlichen Darstellungen, die zur besseren Vergleichbarkeit zunächst auf Werte zwischen 0 und 1 normiert und danach um einen konstanten Wert verschoben wurden, der jeweils als gestrichelte Linie im Diagramm

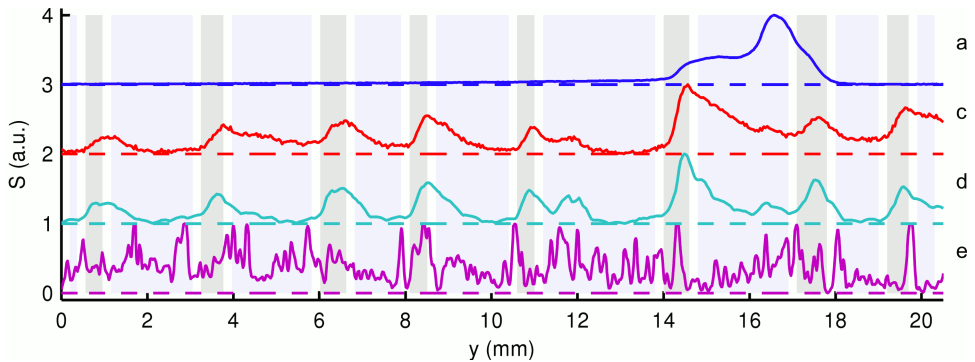


Abbildung 5.5: Vertikale ( $y$ -Richtung) Linienprofile der in Abbildung 5.4 gezeigten Daten, jeweils in der Mitte des Messbereichs. Das Signal  $S$ , welches in den bildlichen Abbildungen farbkodiert dargestellt wird, ist auf einen Signallhub von 1 normiert und zur besseren Darstellung um einen konstanten Wert versetzt (gestrichelte Linien) gegen den Ort aufgetragen. R1 bis R9 bezeichnen Bereiche, in denen keine Risse liegen, also nur Rauschen erwartet wird. S1 bis S8 entsprechen den Rissanzeigen. a: Einzelthermogramm für  $t_1 = 2,2$  s. c: Zeitlicher Mittelwert. d: Maximaler in der Zeit erreichter Wert. e: Grauwerte aus dem Foto des Ergebnisses der Magnetpulverprüfung. (Die Benennungen a, c, d und e entsprechen Abbildung 5.4. In Abbildung 5.4 b ist der Weg für die Linienprofile eingezeichnet.)

ingezeichnet ist. Die farblich hervorgehobenen Bereiche R1 bis R9 kennzeichnen Abschnitte des Linienprofils, in denen keine Risse liegen. In S1 bis S8 werden hingegen die Rissanzeigen erwartet. Dazwischen wurde jeweils ein Abstand von 0,2 mm gelegt, um eventuelle Fehler in der geometrischen Zuordnung bei der später gezeigten quantitativen Auswertung der dargestellten Daten zu unterdrücken.

In dieser Darstellungsform zeigt sich für die thermografische Prüfung im Wesentlichen das gleiche Bild wie in Abbildung 5.4: In a wirken sich Risse als Sprünge in der thermischen Signatur des Lasers aus. Sie sind jedoch stark vom Maximum der Intensität an der Laserposition (hier bei ca.  $y = 16,5$  mm) überlagert. In b und c treten in S1 bis S8 jeweils lokale Maxima auf, die den Rissanzeigen entsprechen. Diesen sind jeweils in positiver  $y$ -Richtung Bereiche erhöhter Werte vorgelagert, da hier die thermische Spur des Lasers wegen der durch die Risse behinderten Wärmeleitung zu höheren Temperaturen – und somit auch IR-Intensitäten – führt. Diese Bereiche fallen bei b höher als bei c aus, was in der bildlichen Darstellung als Verbreiterung der Anzeigen erkennbar ist.

Bei dem in d dargestellten Linienprofil aus dem Ergebnisfoto der Magnetpulverprüfung treten die Rissanzeigen hingegen nicht deutlich hervor. Hier zeigt sich, dass die visuelle Wahrnehmung von Rissanzeigen in bildlichen, also zweidimensionalen, Darstellungen von mehr Faktoren als nur der Intensitätsverteilung in einer Raumrichtung abhängt. Das menschliche Sehvermögen extrahiert auch aus stark verrauschten Bildern höchst effektiv regelmäßige Muster, wodurch sich die augenscheinlich gute Qualität der Ergebnisse der MT in der bildlichen Darstellung erklärt. Für den Vergleich verschiedener Auswertungsverfahren

ren für die thermografische Prüfung ist die Darstellung als Linienprofil hingegen wegen der Gleichartigkeit der Daten geeignet und soll daher weiter verwendet werden.

Für einen systematischen quantitativen Vergleich verschiedener Berechnungsvorschriften, die zu Abbildungen führen, die alle Fehleranzeigen enthalten, soll an dieser Stelle ein geeignetes Maß für das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR<sup>2</sup>) definiert werden. Die übliche Definition als Verhältnis der Leistung von Nutz- und Störsignal ist hier nicht anwendbar, da das tatsächliche Signal unbekannt ist. Hier soll daher zum einem das Verhältnis der Mittelwerte des Signals in den Gebieten mit Fehlern, also dem Nutzsignal, und denen ohne Fehler, also dem Störsignal, herangezogen werden:

$$\text{SNR}_{\text{mit}} = \frac{\int_S \text{Sig}_{\text{norm}}(y) dy / L_S}{\int_R \text{Sig}_{\text{norm}}(y) dy / L_R} = \frac{\sum_{y \in S} A(x_m, y) / N_S}{\sum_{y \in R} A(x_m, y) / N_R} \quad (5.3)$$

Dabei bezeichnet  $S = S1 \cup S2 \dots \cup S8$  das Gebiet, in dem Fehleranzeigen, also Signale, erwartet werden (bestehend aus 8 Teilgebieten) und  $R = R1 \cup R2 \dots \cup R9$  das Gebiet, in dem nur Rauschen bzw. Falschanzeigen erwartet werden.  $\text{Sig}_{\text{norm}}(y)$  ist das im Linienprofil dargestellte Signal, normiert auf Werte zwischen 0 und 1.  $L_S$  und  $L_R$  bezeichnen die Längen,  $N_S$  und  $N_R$  die Anzahl der Messpunkte von  $S$  bzw.  $R$ . In der Summendarstellung sei  $A(x, y)$  der zugrunde liegende zweidimensionalen Datensatz, also z.B.  $I_{\text{max}}$ , und  $x_m$  der der Mitte der Darstellung entsprechenden x-Wert.

Zum anderen soll noch der Quotient aus den Maxima von Stör- und Nutzsignal gebildet werden:

$$\text{SNR}_{\text{max}} = \frac{\max_{y \in S} \text{Sig}_{\text{norm}}(y)}{\max_{y \in R} \text{Sig}_{\text{norm}}(y)} = \frac{\max_{y \in S} A(x_m, y)}{\max_{y \in R} A(x_m, y)} \quad (5.4)$$

Dieser Wert ist eher darauf sensitiv, ob Rauschen als Anzeige gewertet wird. Zudem kann betrachtet werden, ob Anzeigen in  $R$  über dem niedrigsten lokalen Maximum in  $S1$  bis  $S8$  liegen, um Quellen für Falschanzeigen zu identifizieren. Für c und d aus Abbildung 5.4 bzw. 5.5 ergeben sich für  $\text{SNR}_{\text{mit}}$  Werte von 1,63 bzw. 2,63 und für  $\text{SNR}_{\text{max}}$  von 1,19 bzw. 1,58. Für das Ergebnis der Magnetpulverprüfung können – wie bereits zu den Linienprofilen ausgeführt – auf diese Weise keine sinnvollen Aussagen über die Erkennbarkeit der Fehler getroffen werden. Die Zahlenwerte sollen hier aber trotzdem angegeben werden:  $\text{SNR}_{\text{mit}} = 1,08$  und  $\text{SNR}_{\text{max}} = 1,00$ .

## Datenaufbereitung zur Rissdetektion

Das Ziel der Datenauswertung besteht darin, aus der gesamten Messesequenz ein einzelnes Bild, also einen zweidimensionalen Datensatz, zu berechnen, das sämtliche relevante Fehleranzeigen enthält. Dieses soll dann analog zu den Ergebnissen der Magnetpulverprüfung bewertet werden können.

Ein Algorithmus sollte im Wesentlichen aus zwei Schritten bestehen:

---

<sup>2</sup>Von engl. *signal-to-noise ratio*.

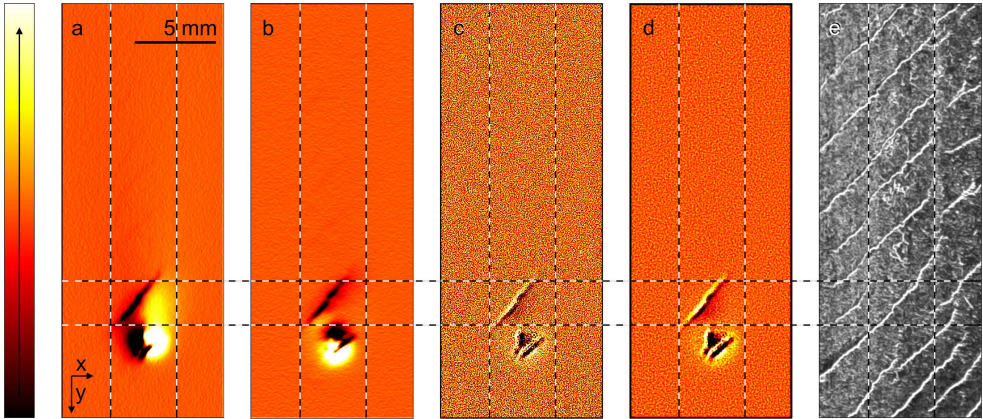


Abbildung 5.6: Räumliche Ableitungen des Thermogramms aus Abbildung 5.4. a und b: Erste räumliche Ableitungen (Prewitt-Filter), Richtung bei a von rechts nach links, bei b von unten nach oben. c: Zweite räumliche Ableitung (Laplace-Filter). d: Auf c wurde zusätzlich ein Gauss-Filter als räumlicher Tiefpass angewendet. e: Zum Vergleich ein Foto des Ergebnisses einer Magnetpulverprüfung des gleichen Bereichs. Jedes der gezeigten Thermogramme hat eine Auflösung von  $201 \times 512$  Pixel. Die gestrichelten Linien dienen der besseren Vergleichbarkeit. Nur der Bereich zwischen den horizontalen Linien wurde angeregt.

1. Durch bildweise Filterung der Messsequenz  $I(x,y,t)$  werden die Kontrastsprünge hervorgehoben:

$$A(x,y,t = t') = f(I(x,y,t = t')), \quad (5.5)$$

wobei  $A$  den gefilterten Datensatz und  $f: R^{N_x \times N_y} \rightarrow R^{N_x \times N_y}$  eine beliebige zweidimensionale Filterfunktion bezeichnet.

2. Aus dem gefilterten Datensatz wird nun ein einzelnes Ergebnisbild  $E(x,y)$  berechnet. Dabei wird über eine Rechenvorschrift  $g: R^{N_t} \rightarrow R$  sukzessive jedem Pixel ein Wert zugewiesen, der von den während des Messzeitraums durchlaufenden Werten abhängt:

$$E(x = x', y = y') = g(A(x = x', y = y', t)). \quad (5.6)$$

Natürlich ließe sich auch eine allgemeine Abhängigkeit definieren. Aber eine Beschränkung der Betrachtung auf in orts- und zeitabhängige Schritte separierbare Verfahren erlaubt die Verwendung bestehender zweidimensionaler Bildbearbeitungsalgorithmen. Die in Abbildung 5.4 c und d gezeigten Darstellungen entsprechen einer Auswertung nach dem genannten Schema, bei der Schritt 1 nicht ausgeführt wurde (bzw.  $f$  die Identität bezeichnet).

Da sich die Risse in den Einzelbildern anhand von Kontrastsprüngen erkennen lassen, bietet sich für Schritt 1 die Anwendung von räumlichen Ableitungen als Kantenfilter an.

Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse der Anwendung unterschiedlicher Filteroperatoren auf das auch in Abbildung 5.4 a und b gezeigte Einzelbild (in Abschnitt 2.2.7 ist die Rechenvorschrift zur Anwendung der Filter angegeben). Für die Darstellungen a und b wurden vertikale bzw. horizontale Prewitt-Filter<sup>3</sup> verwendet, die einer ersten Ableitung entsprechen. Eine Rissanzeige (zwischen den horizontalen Linien) tritt jeweils deutlich hervor, am Laserpunkt (unterhalb des Risses) lässt sich gut die vertikale bzw. horizontale Ableitungsrichtung erkennen. Die Bilder zeigen nur einen geringen Grad an Rauschen. Für c und d wurde ein Laplace-Filter verwendet. Auch hier lässt sich die gleiche Rissanzeige wieder deutlich erkennen, zudem tritt eine weitere im Bereich des Laserpunkts hervor. Bild c zeigt ein stark erhöhtes Rauschen. Daher wurde Bild d zur Rauschunterdrückung mit einem  $5 \times 5$  Gaussoperator mit  $\sigma = 0,6$  gefiltert. Die geometrischen Positionen aller Anzeigen decken sich mit dem in Bild e gezeigten Ergebnis der MT.

Um nun zu einem einzelnen Bild mit allen relevanten Fehleranzeigen zu kommen, sollte eine ähnliche Herangehensweise wie die in Abbildung 5.4 gezeigte Mittelwert- bzw. Maximumsbildung zielführend sein, da wieder an den Stellen mit Rissanzeigen Extremwerte auftreten. In Abbildung 5.7 ist das Schema eines Algorithmus zur Datenaufbereitung gezeigt. Zuerst wird jedes Einzelbild der Rohdaten (a) mit einem Prewitt-Faltungskern gefiltert um so eine Sequenz der horizontalen ( $I_x$ ) bzw. vertikalen räumliche Ableitung ( $I_y$ ) zu erhalten (siehe a und c):

$$I_x(x,y,t) = \frac{\partial}{\partial x} I(x,y,t) = (I * k_{Pr,x})(x,y,t) \quad (5.7)$$

und

$$I_y(x,y,t) = \frac{\partial}{\partial y} I(x,y,t) = (I * k_{Pr,y})(x,y,t). \quad (5.8)$$

Betrachtet man nun das zeitliche Verhalten von Einzelpixeln der abgeleiteten Messsequenz (siehe Abbildung 5.7 d und e), so lassen sich deutliche Extremwerte ausmachen. Diese entsprechen einem Durchgang des Laserspots über den betrachteten Pixel bzw. in dessen Nähe. Um diese Werte in einer gemeinsamen Darstellung zusammenzufassen, werden nun die beiden räumlich abgeleiteten Sequenzen gemeinsam sortiert:

$$I'_{\text{sort}}(x,y,n) \in \{I_x, I_y\} \quad \text{so dass} \quad \forall n : I'_{\text{sort}}(x,y,n) \leq I'_{\text{sort}}(x,y,n+1). \quad (5.9)$$

Der resultierende Datensatz enthält das gemeinsame Minimum  $I'_{\text{sort}}(x,y,n=1)$  und das gemeinsame Maximum  $I'_{\text{sort}}(x,y,n=N_n)$ . Das Ergebnis für einen Einzelpixel ist in Abbildung 5.7 f aufgetragen, in g findet sich ein Einzelbild dieser Sequenz für  $p=4$ .

Ein Nachteil der einfachen Extremalwertbildung liegt darin, dass die extremalen Bilder auch einmalige Ausreißer enthalten. Diese können z.B. durch Rauschen oder extreme Temperaturen beim Verbrennen von Schmutz auf der Oberfläche ausgelöst werden. Zieht man

<sup>3</sup>Die Faltungskerne der hier verwendeten Filter sind auf Seite 31 f in dieser Arbeit angeben.

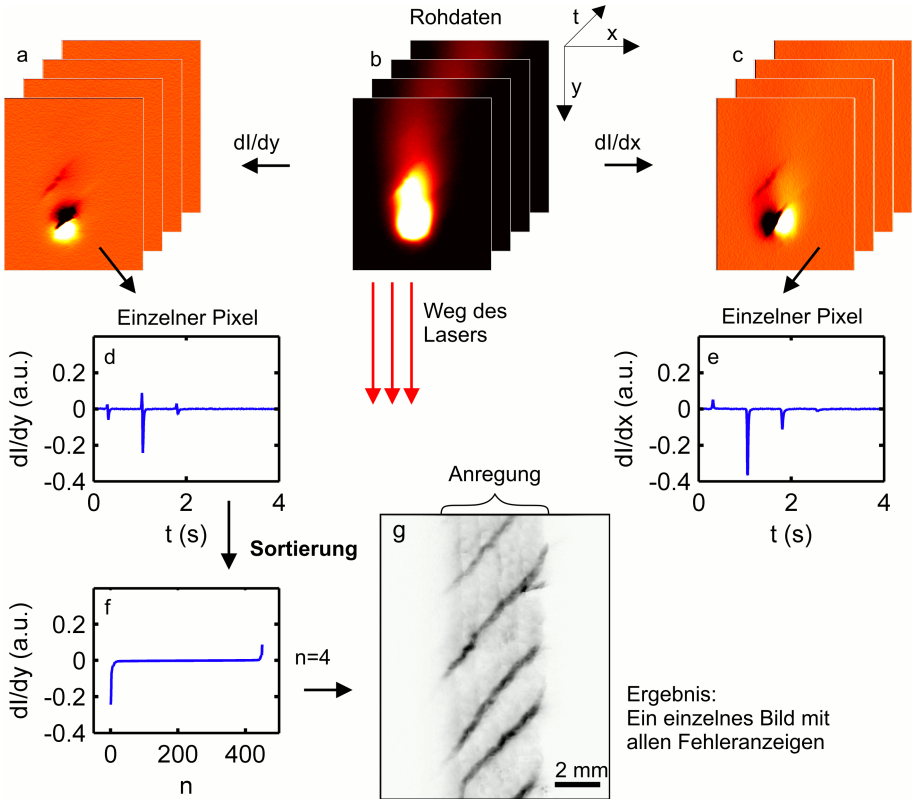


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Risserkennung. Die Probe wird mit dem Laser abgescannt. Im so erhaltenen Messfilm können Risse anhand von Intensitätssprüngen in der thermischen Signatur des Lasers erkannt werden (b). Diese Anzeigen lassen sich durch die Anwendung von räumlichen Ableitungen verstärken (a, c). Für jeden Pixel treten die höchsten Werte beim direkten Durchlauf des Lasers auf, beim Durchlauf des Lasers in der direkten Nähe kommt es zu kleineren Ausschlägen (d, e). Um diese extremen Werte für jeden Pixel in einem einzigen Bild zusammenzufassen, wird der abgeleitete Messfilm für jeden Pixel entlang der Zeitachse in Reihenfolge der erreichten Werte sortiert (f). Ein geeignetes Einzelbild aus diesem Datensatz enthält dann alle relevanten Fehleranzeigen (g).



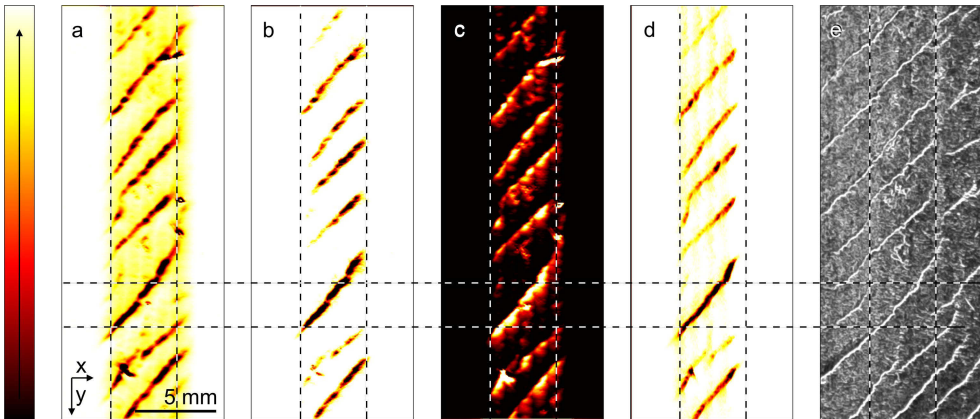


Abbildung 5.8: Sortierte Ableitungen. a-c: Vertikale erste Ableitungen; a: Minimum (relative Lage  $p = 0$ ); b:  $p = 0,02$ ; c: Maximum ( $p = 1$ ); d: Minimum der horizontalen Ableitung; e: Zum Vergleich ein Foto des Ergebnisses einer Magnetpulverprüfung des gleichen Bereichs. Die gestrichelten Linien dienen der besseren Vergleichbarkeit. Nur der Bereich zwischen den horizontalen Linien wurde angeregt.

als Datenbasis den sortierten Datensatz heran, lassen sich solche Effekte durch eine geeignete Wahl des Einzelbildes zumindest teilweise ausblenden, was in Bezug auf den visuellen Schärfeeindruck und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu besseren Ergebnissen führt. Das Einzelbild aus dem sortierten Datensatz soll zur besseren Vergleichbarkeit bei Datensätzen unterschiedlicher Länge  $N_n$  entsprechend dem  $p$ -Quantil in der Statistik mit seiner relativen Lage

$$p = (n - 1)/(N_n - 1) \in [0,1] \quad (5.10)$$

bezeichnet werden, wobei  $n = 1, 2 \dots N_n$  die absolute Lage angibt.

Es können aber auch andere Datensätze als Ausgangsbasis für das Sortieren herangezogen werden. Sortiert man die ersten räumlichen Ableitungen, ergeben sich die in Abbildung 5.8 gezeigten Bilder und die in Abbildung 5.8 gezeigten Linienprofile. In Abbildung 5.10 und 5.11 sind Bilder bzw. Linienprofile aus der sortierten Laplace-gefilterten Messsequenz gezeigt. Die nach den Gleichungen 5.3 und 5.4 berechneten SNR-Werte finden sich weiter hinten in Tabelle 5.1. Wird das Minimum der ersten Ableitung herangezogen, ergeben sich – wie auch aus den Linienprofilen erkennbar ist – tendenziell die besten Werte. Das Maximum der ersten Ableitung führt zu den am wenigsten aussagekräftigen Werten. Obwohl der Einsatz eines Gaußschen Weichzeichners in den Ergebnisbildern zu einem wesentlich ruhigeren Eindruck führt, sind die Auswirkungen auf die Linienprofile wegen der tendenziell niedrigen Änderungsraten äußerst gering (erkennbar z.B. in S5).

Ein direkter Vergleich von mit unterschiedlichen Datenbasen erzielten Ergebnissen findet sich in Abbildung 5.12. Interessant ist hierbei besonders das Verhalten einer mittels Pfeil

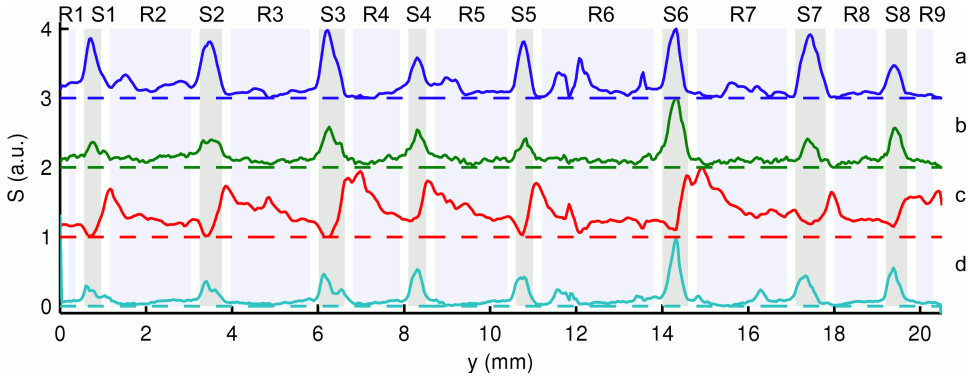


Abbildung 5.9: Liniensprofile der in Abbildung 5.8 gezeigten Daten, a-d sind gleich bezeichnet, analog Abbildung 5.5. Bei c wurde das Vorzeichen invertiert, sodass den Rissanzeigen positive Werte entsprechen. Hervorzuheben ist die Abnahme des Signals in den Bereichen R5 und R6 von a zu b, d.h. wenn statt des minimalen Wertes für jeden Pixel ein Wert mit  $p = 0,02$ , d.h. kurz vor dem Minimum, herangezogen wird. In Abbildung 5.4 b findet sich der für die Liniensprofile verwendete Weg.

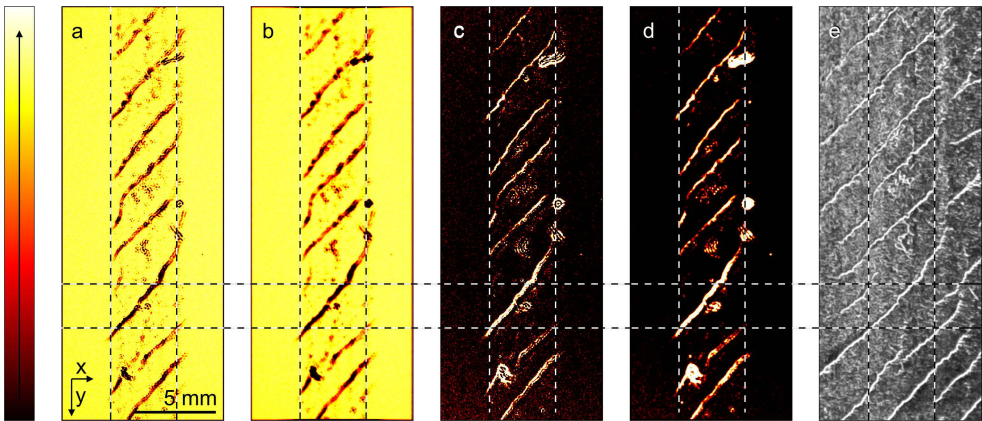


Abbildung 5.10: Sortierte zweite räumliche Ableitungen (Laplace-Filter). a und b: Minimum ( $p = 0$ ), wobei auf b zusätzlich ein Gauss-Filter angewandt wurde; c und d: Maximum ( $p = 1$ ), wobei auf d zusätzlich ein Gauss-Filter angewandt wurde; e: Zum Vergleich ein Foto des Ergebnisses einer Magnetpulverprüfung des gleichen Bereichs. Die gestrichelten Linien dienen der besseren Vergleichbarkeit. Nur der Bereich zwischen den horizontalen Linien wurde angeregt.

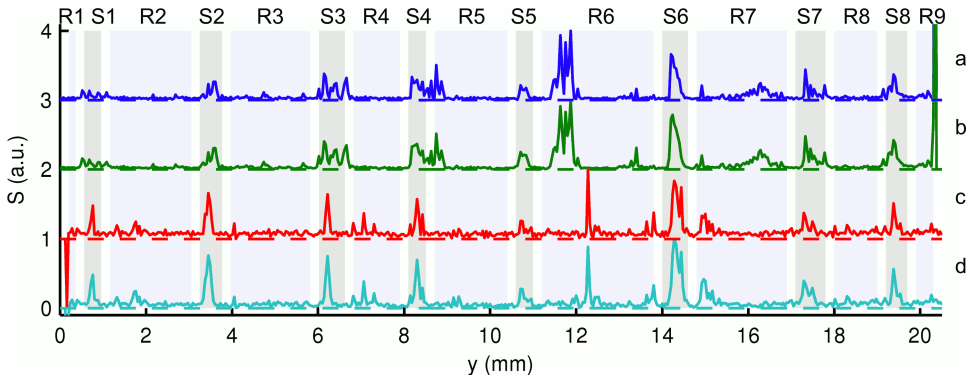


Abbildung 5.11: Linienprofile der in Abbildung 5.10 dargestellten Daten, a-d sind gleich bezeichnet, Darstellung analog Abbildung 5.5. a und b wurden um  $\Delta y = -150 \mu\text{m}$ , c und d um  $\Delta y = 150 \mu\text{m}$  verschoben, damit die Rissanzeigen an den gleichen Orten wie in Abbildung 5.9 liegen. Bei c und d wurde zudem das Vorzeichen invertiert. Bei diesen Darstellungen treten insbesondere in R6 Fehleranzeigen auf. In Abbildung 5.4 b findet sich der für die Linienprofile verwendete Weg.

markierten Stelle, bei der ein Riss nahezu vertikal verläuft. Bei Anwendung der vertikalen ersten Ableitung und der Laplace-Filterung tritt an dieser Stelle keine Fehleranzeige auf. Wird von beiden ersten Ableitungen ausgegangen, erscheint an dieser Stelle eine Anzeige (a und b). Die Laplace-Filterung führt zu vielen starken Anzeigen, für die die MT keine Entsprechung zeigt. Vor allem im unteren Bereich der Abbildung ist dies gut zu erkennen. Der Effekt tritt in Bild d stark auf und in a schwach. Hingegen kann für b, wo aus der sortierten Sequenz die Abbildung mit  $p = 0,02$  gewählt wurde, eine sehr gute Übereinstimmung der Anzeigen mit dem Ergebnis der MT festgestellt werden.

Auf Grundlage der in Abbildung 5.11 dargestellten Linienprofile soll auf zwei wichtige Punkte hingewiesen werden: Der Einsatz eines Laplace-Filters führt tendenziell zu schmaleren Fehleranzeigen. Für den Defekt in S3 ergibt sich z.B. für Laplace-gefilterten Datensatz mit  $p = 1$  eine Halbwertsbreite von  $\text{FWHM} = 0,08 \text{ mm}$  (Abbildungen 5.10 und 5.11 c), für die erste Ableitung  $\text{FWHM} = 0,34 \text{ mm}$  für  $p = 0$  und  $\text{FWHM} = 0,52 \text{ mm}$  für  $p = 0,02$  (Abbildungen 5.8 und 5.9 a). Jedoch zeigen sich hierbei auch vermehrt Artefakte, wie z.B. in R4 und R6. Diese treten in den Bildern deutlich als rundliche Artefakte zutage. Zudem ist die Rissanzeige in S3, wenn das Minimum des Laplace-Filter herangezogen wird (Abbildungen 5.10 und 5.11 a), in drei lokale Maxima aufgespalten. Berücksichtigt man alle, so ergibt sich mit  $\text{FWHM} = 0,60 \text{ mm}$  eine deutlich höhere Halbwertsbreite.

In Abbildung 5.14 ist das Ergebnis einer Messung im Bereich B (siehe Abbildung 5.2) gezeigt. Die Anzeigen entsprechen der Magnetpulverprüfung. In der Ausschnittsvergrößerung c tritt die Pixelstruktur deutlich zutage.

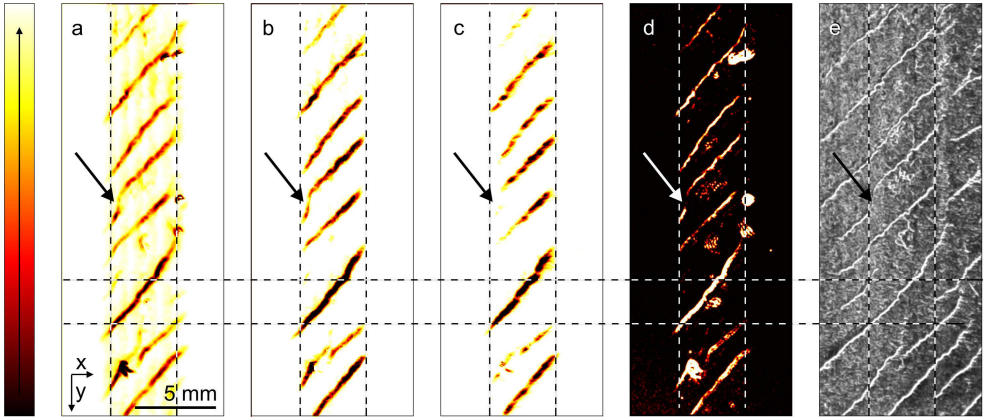


Abbildung 5.12: Sortierte räumliche Ableitungen. a und b: Horizontale und vertikale erste Ableitung wurden zusammen sortiert: a: Minimum ( $p=0$ ); b: 0,02; c: Vertikale Ableitung 0,02; d: Maximum der zweiten räumlichen Ableitung; e: Zum Vergleich ein Foto des Ergebnisses einer Magnetpulverprüfung des gleichen Bereichs. Die gestrichelten Linien und die Pfeile dienen der besseren Vergleichbarkeit. Nur der Bereich zwischen den horizontalen Linien wurde angeregt.

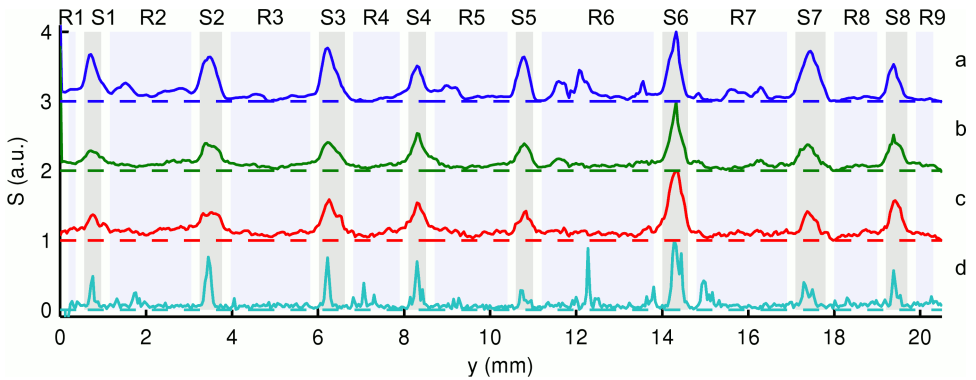


Abbildung 5.13: Linienprofile aus den Daten aus Abbildung 5.12, a-d sind gleich bezeichnet, Darstellung analog Abbildung 5.5. d wurde um  $\Delta y = 150 \mu\text{m}$  verschoben. Interessant ist, dass b im Vergleich zu c ruhiger verläuft, was den besseren optischen Eindruck in der bildlichen Darstellung erklärt. In Abbildung 5.4 b findet sich der für die Linienprofile verwendete Weg.

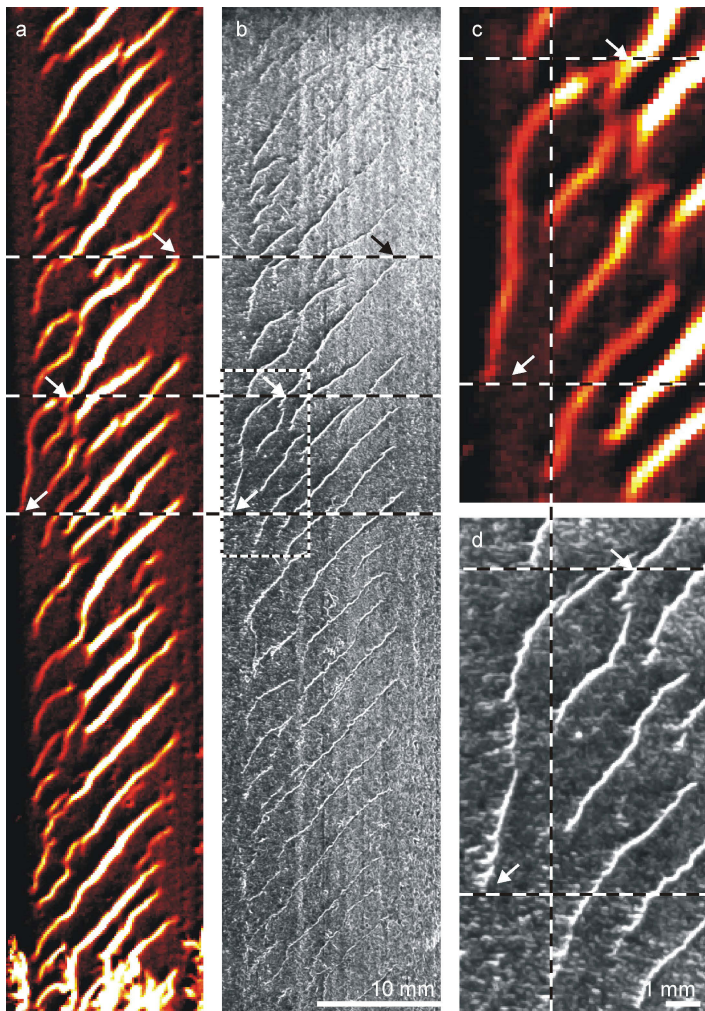


Abbildung 5.14: Vergleich der Ergebnisse der thermografischen Prüfung mit denen einer Magnetpulverprüfung im gesamten Probenbereich (siehe Abbildung 5.2 a, Bereich B). a: Gemeinsam sortierte erste Ableitungen; b: Foto des Ergebnisses der Magnetpulverprüfung. c und d: Ausschnittsvergrößerungen des in b eingezeichneten Bereichs. In c ist die auflösungsbegrenzende Pixelstruktur deutlich zu erkennen.

	Abb. 5.5			Abb. 5.9				Abb. 5.11				Abb. 5.13			
	c	d	e	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
BerVor.	Ø	M	MT	v	v	v	h	l	lg	l	lg	v+h		v	lg
$p$	·	·	·	0	0,02	1	0	0	0	1	1	0	0,02	0,02	1
SNR <sub>max</sub>	1,2	1,6	1,0	1,7	4,8	0,9	4,2	0,7	0,8	0,8	1,1	2,2	<b>5,8</b>	4,8	1,1
SNR <sub>mit</sub>	1,6	2,6	1,1	4,3	3,4	0,7	<b>4,8</b>	2,2	2,6	2,0	2,7	4,5	3,9	3,4	2,7

**Abkürzungen:** BerVor: Berechnungsvorschrift; Ø: Durchschnitt; M: Maximum; v: vertikale erste Ableitung; h: horizontale erste Ableitung; v+h: vertikale und horizontale erste Ableitung gemeinsam betrachtet; l: Laplace-Filter; lg: Laplace-Filter, danach Gaußscher Weichzeichner.

Tabelle 5.1: Signal-zu-Rausch-Verhältnisse der in den Abbildungen 5.5, 5.9, 5.11 und 5.13 dargestellten Linienprofile.  $p$  gibt, soweit benötigt, die relative Lage des zugrunde liegenden Einzelbildes im sortierten Datensatz an. Die SNR-Werte wurden auf zwei Weisen berechnet: Für SNR<sub>max</sub> wurden nach Gleichung 5.4 die Maxima, für SNR<sub>mit</sub> wurden nach Gleichung 5.3 die Mittelwerte der jeweiligen Signale in den Bereichen S1 bis S8 bzw. R1 bis R9 durcheinander geteilt. Die jeweils höchsten Werte sind fett gesetzt.

### Zusammenfassung und physikalische Interpretation

Es wurde eine Messprozedur und ein Auswertungsalgorithmus zur Detektion von Oberflächenrissen mittels Laserthermografie entwickelt. Die Messprozedur lehnt sich dabei an die *Flying Spot Camera* an [81]. Die zu untersuchende Fläche wird sukzessive kontinuierlich mit einem Laser abgescannt. Die Messung der Infrarotstrahlung (die direkt von der Temperatur der Probe abhängt) erfolgt aber nicht über einen ebenfalls scannenden Einzeldetektor, sondern über eine ortsfest montierte zweidimensional auflösende Kamera. Die Auswertung basiert auf dem einzelbildweisen Bilden der räumlichen Ableitung zur Kontrastverstärkung und anschließendem Sortieren der Daten entlang der Zeitachse. Um zu einem einzelnen Bild zu gelangen, das alle Fehleranzeigen enthält, wird nun eines der Bilder am Anfang dieser Sequenz ausgewählt.

Um die Tauglichkeit dieser Prozedur zu zeigen, wurde ein Ausschnitt aus einer Eisenbahnschiene mit Rollkontaktermüdungsrissen untersucht. Als Referenzverfahren wurde eine Magnetpulverprüfung durchgeführt.

Zuerst wurde ein ca.  $5 \times 20 \text{ mm}^2$  großer Ausschnitt angeregt, wobei die Messgeschwindigkeit ca.  $30 \text{ mm}^2/\text{s}$  betrug. An dem resultierenden Datensatz wurden verschiedene Möglichkeiten zur Aufbereitung der Messdaten vor der Sortierung getestet. Dabei konnten die besten Ergebnisse mit einem durch gemeinsame Sortierung der horizontalen und vertikalen ersten räumlichen Ableitung gewonnenen Ergebnisbild erzielt werden. Hierdurch wird eine Sensitivität in alle Richtungen erreicht. Durch das Sortieren wird sichergestellt, dass der jeweils größte Gradient gewählt wird.

Als quantitative Kriterien wurden zwei Signal-Rausch-Verhältnisse herangezogen: das Verhältnis der Mittelwerte SNR<sub>mit</sub> und das Verhältnis der Maxima SNR<sub>max</sub> des Signals in Bereichen, die Fehler enthalten und solchen, in denen keine erwartet werden. Die Werte sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Hier liefert in Bezug auf SNR<sub>max</sub> die gemeinsame Sortierung der vertikalen und horizontalen Ableitung mit SNR<sub>max</sub> = 5,8 das beste Ergebnis, wenn aus dem

sortierten Datensatz das Ergebnisbild mit der relativen Lage  $P = 0,02$  herangezogen wird. In Bezug auf  $\text{SNR}_{\text{mit}}$  liefert die horizontale Ableitung mit  $p = 0$  mit  $\text{SNR}_{\text{mit}} = 4,8$  den besten Wert. Ein größeres Gewicht soll hier auf den Vergleich der Maxima gelegt werden, da in diesem Wert die Wahrscheinlichkeit von Falschanzeigen stärker zum Ausdruck kommt, wie sie beim Einsatz von Laplace-Filtern aufgetreten sind.

Jedoch greift diese Bewertung allein zu kurz. Da es sich um ein bildgebendes Verfahren handelt, ist letztlich entscheidend, wie gut sich die Rissanzeigen vom menschlichen Betrachter im Ergebnisbild erkennen lassen. So lassen sich die Risse im Ergebnisfoto der Magnetpulverprüfung leicht erkennen, obwohl hier  $\text{SNR}_{\text{max}} = 1$  gilt. Jedoch deckt sich der subjektive visuelle Eindruck für die thermografische Prüfung mit den Überlegungen zum Signal-Rausch-Verhältnis: Die besten Ergebnisse konnten bei Verwendung eines gemeinsamen Datensatzes aus horizontaler und vertikaler Ableitung und dem Heranziehen des Einzelbildes aus dem sortierten Datensatz mit der relativen Lage  $p = 0,02$  erzielt werden. Die Ergebnisse sind sowohl im Bezug auf den visuellen Schärfeeindruck als auch auf das SNR dem Sobel- oder dem Laplace-Filter (siehe Tabelle 5.1), wie sie z.B. in [96] vorgeschlagen wurden, überlegen. Zwar waren die Fehleranzeigen bei Verwendung des Laplace-Filter zum Teil deutlich schmäler, dafür traten aber zusätzliche Artefakte auf, die leicht zu Fehlinterpretationen führen können. Was an dieser Stelle zusätzlich festgehalten werden soll, ist, dass sich das hier präsentierte thermografische Verfahren deutlich besser als die Magnetpulverprüfung für eine automatisierte Bewertung der Ergebnisse eignet. Aufgrund der auch in den Linienprofilen enthaltenen signifikanten Fehleranzeigen würde hierfür ein einfaches Schwellwertverfahren ausreichen.

Zudem wurde der gesamte Ausschnitt mit einer Messgeschwindigkeit von ca.  $50 \text{ mm}^2/\text{s}$  untersucht und nach der soeben beschriebenen Methode ausgewertet. Die Ergebnisse der thermografischen Prüfung stimmen mit denen der Magnetpulverprüfung überein. Alle Fehleranzeigen der Magnetpulverprüfung finden sich auch im Ergebnis der thermografischen Prüfung. Das Verfahren ist also an der gezeigten Probe zur Rissdetektion geeignet. Die benötigte geometrische Auflösung der IR-Kamera lag weit unter der lateralen Ausdehnung der zu detektierenden Fehlstellen. Bei einer praxisnahen Vergrößerung von  $4,4 \text{ Pixel/mm}$  konnten Risse mit einer typischen Klaffung im  $\mu\text{m}$ -Bereich im Abstand von  $1 \text{ mm}$  sicher erkannt werden. Dieses Verhalten lässt sich durch das zugrunde liegende physikalische Prinzip erklären. Risse wirken sich in einer Erhöhung des lateralen thermischen Widerstands  $R_{th}$  aus. Für einen konstanten Wärmefluss  $\vec{q}$  gilt nach dem Fourierschen Gesetz  $R_{th} \cdot \vec{q} = -\vec{\nabla} T$ . Ein thermischer Widerstand wirkt sich also bei vorhandenem Wärmefluss in einem Temperaturgradienten in seiner Umgebung aus. Näherungsweise lässt sich der sphärische Wärmefluss durch die lokale Anregung in einem fehlerfreien Bereich als konstant annehmen. Führt man nun durch einen Riss einen lateralen thermischen Widerstand ein, kommt es an dieser Stelle zu einem Temperatursprung. Durch die Berechnung der ersten räumlichen Ableitung der Oberflächentemperatur erhält man eine direkt vom Wärmewiderstand abhängige Größe. Außerdem reicht es hierzu aus, die Temperaturen in der Nähe des Risses zu kennen. Die Temperatur direkt an der Position des Risses ist dabei unerheblich. So ließen sich prinzipiell auch Risse ohne Klaffung nachweisen, wenn sie einen ausreichend hohen thermischen

Widerstand aufweisen würden.

Auf ähnlichen Überlegungen basieren auch die Auswertungsalgorithmen für die *Flying Spot Camera* [84], die bereits mit Erfolg in der praktischen Prüfung eingesetzt wurde. Jedoch wird hierbei ein fester Abstand zwischen dem Ort der Temperaturmessung und der Anregung vorausgesetzt. Soll ein bestehendes Thermografiesystem mit einem Laser nachgerüstet werden, würde dies eine aufwendige Synchronisation zwischen Kamera und Laserscanner erfordern. Der hier vorgestellten Algorithmus benötigt keine Information über den genauen Verlauf der Anregung. Dies ist außerdem bei der Untersuchung von Proben mit gekrümmten Oberflächen vorteilhaft.

Ein anderer Ansatz ist es, die Anregung ortsfest zur Kamera zu montieren und die Probe relativ dazu zu bewegen. Ein solcher Ansatz wurde von Li *et al.* erfolgreich an realen Rissen demonstriert [98, 96, 99]. Hier wird die Probe schrittweise mit einer motorisierten Verfahreinheit bewegt und dann mit einem Laserpuls kurzzeitig angeregt. Die Auswertung basiert auch hier auf räumlichen Ableitungen. Jedoch ergeben sich hierbei deutlich höhere Messzeiten. Außerdem ließe sich das Bewegen von Probe bzw. Kamera und Anregungsquelle bei großen Proben mit gekrümmten Oberflächen nur sehr aufwendig realisieren, da der Abstand zwischen Probe und Kamera konstant gehalten werden müsste.

Ein wichtiger Schritt bei dem hier vorgestellten Algorithmus ist die Wahl des besten Bildes aus der sortierten Sequenz  $I_{\text{sort}}(x,y,n)$ . Die besten Ergebnisse wurden mit Bildern kurz vor dem Minimum mit der relativen Lage  $p = 0,02$  erzielt. Um dieses Verhalten erklären zu können, ist es wichtig, genauer zu betrachten, zu welchem Zeitpunkt die einzelnen Datenpunkte der sortierten Sequenz  $I_{\text{sort}}(x,y,n)$  aufgenommen wurden. Die höchsten Intensitätswerte (also Temperaturen), als auch die größten Beträge der Gradienten, werden dann erreicht, wenn die Laserposition der Pixelposition am nächsten ist. Mit abnehmenden Absolutbeträgen nimmt die Entfernung des Laserspots vom betrachteten Pixel zu und ab einem gewissen Wert kommt es zu keiner nennenswerten direkten Beleuchtung mehr<sup>4</sup>. Da der Laser eine Wellenlänge von  $\lambda = 910$  nm hat, bei der die IR-Kamera nicht empfindlich ist, können prinzipiell keine direkten Reflexionen des Laser aufgenommen werden. Es handelt sich also um ein rein thermisches Signal. Durch die hohe Leistungsdichte des Lasers von ca.  $2 \text{ MW/m}^2$  kann es zu einem anderen Störeffekt kommen. Voraussetzung hierfür ist, dass sich auf der Oberfläche Partikel befinden, die nur einen schlechten thermischen Kontakt zur Probe haben, wie z.B. Staub oder Anteile der Graphitbeschichtung. Durch ihre geringe thermische Masse erwärmen sie sich schlagartig oder verbrennen sogar, wenn sie direkt vom Laser beleuchtet werden und kühlen nach dem Laserdurchgang eben so schnell wieder ab. Dabei kommt es zu einen kurzzeitigen starken Anstieg der detektierten Infrarotstrahlung. Solche Effekte haben wegen ihrer hohen zeitlichen Dynamik bei der hier vorgeschlagenen Auswertung den größten Einfluss auf die zweidimensionalen Extremaldatensätzen mit  $n = 1$  und  $n = N_n$ . Zudem treten bei diesen Datensätzen die durch das Rauschen der Kamera hervorgerufenen statistischen Ausreißer am stärksten zutage.

Für den hier vorgestellten Spezialfall einer ferromagnetischen Schiene stehen besser er-

---

<sup>4</sup>Da der Laser ein gaussförmiges Strahlprofil aufweist, wird immer eine gewisse Restintensität eingestrahlt, die aber exponentiell mit der Entfernung abfällt und ab einer gewissen Entfernung vernachlässigbar klein wird.



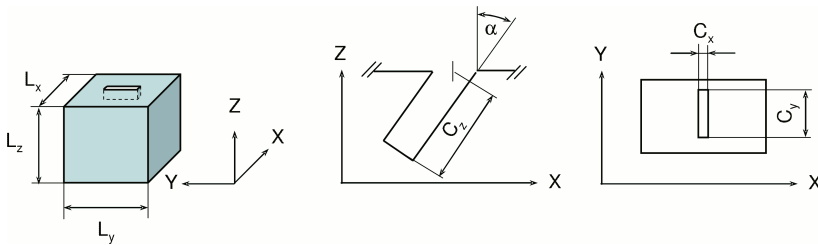


Abbildung 5.15: Parametrisierung von quaderförmigen Rissen.

probe und vor allem weitgehend normierte Verfahren wie die Magnetspulver- oder Wirbelstromprüfung zur Verfügung, die mit großem Erfolg regelmäßig eingesetzt werden. Die hier gezeigte Methode liefert aber gleichwertige Ergebnisse und ist nicht auf eine Klasse von Materialien beschränkt, da sie allein auf den thermischen Eigenschaften der untersuchten Probe basiert. Außerdem ist sie berührunglos und lässt sich prinzipiell mit geeigneten Optiken für Laser und IR-Kamera auch aus großen Entfernungen einsetzen.

## 5.2 Risscharakterisierung

In diesem Abschnitt wird eine Methode vorgestellt, mit der sich zusätzlich zur Länge und Lage von Rissen, die mit der Methode aus dem vorangegangenen Abschnitt ermittelt werden können, auch die Tiefe und der Winkel quantitativ mittels laserangeregter aktiver Thermografie bestimmen lassen. Hierzu wird die Probe in der Nähe eines Risses ortsfest lokal erwärmt und aus der durch den Riss verursachten unsymmetrischen Temperaturverteilung die geometrischen Parameter bestimmt. Der Algorithmus zur Datenauswertung basiert darauf, die mittlere Temperatur in zwei ausgedehnten Referenzgebieten im gleichen Abstand zum Laserspot zu betrachten. Liegt ein Riss zwischen dem Laserspot und einem der Referenzgebiete, wird die Wärmeleitung durch den thermischen Widerstand des Risses behindert und die Temperaturen in beiden Referenzgebieten unterscheiden sich. Darüber lässt sich der untersuchte Riss charakterisieren, da der thermische Widerstand in erster Linie von den geometrischen Parametern abhängt. Ein großer Vorteil dieser Methode liegt darin, dass sich die zugrunde liegenden Effekte gut mathematisch fassen lassen. Da die Wärmeleitung ein diffusiver Prozess ist, haben kleine Änderungen in den Anfangsbedingungen immer auch nur kleine Änderungen im weiteren Verlauf zur Folge. Simulationen sollten sich also als robust und zuverlässig erweisen, was durch den Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit FEM-Simulationen gezeigt wird. Die Simulationen werden zudem zur Extrapolation des Verhaltens der gezeigten Experimente auf weitere Geometrien genutzt.

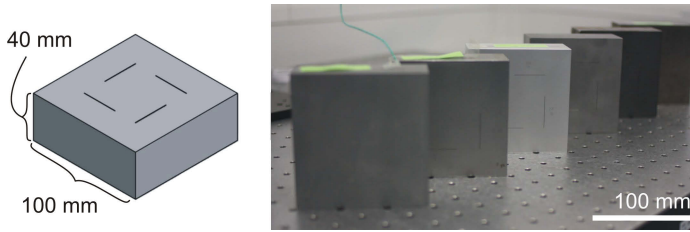


Abbildung 5.16: Skizze und Foto des Typs Probekörper, der für die Messungen in diesem Abschnitt verwendet wurde. Die Abmaße betragen  $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$ . Jeder Probekörper enthält als Rissmodelle vier funkenerodierte Nuten, die jeweils eine Länge von  $C_y = 40 \text{ mm}$  und eine Klaffung von ca.  $C_x = 0,2 \text{ mm}$  haben.

### 5.2.1 Probekörper

Als vereinfachendes Modell für die oft sehr komplexe Geometrie realer Risse wird in diesem Abschnitt eine quaderförmige Form angenommen. Die Parametrisierung folgt dabei der in Abbildung 5.15 skizzierten Nomenklatur. Für die experimentellen Untersuchungen wurden eine Reihe von quaderförmigen Probekörpern mit quadratischer Grundfläche hergestellt, die jeweils eine Größe von  $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$  haben (siehe Abbildung 5.16). Als Rissmodelle wurden in jeden Probekörper vier 40 mm lange Nuten mittels Funkenerodieren eingebracht, die jeweils die gleichen Abstände zu den Randflächen aufweisen. Etwaige Randeffekte wirken sich so auf alle Risse - bei Vernachlässigung der Einflüsse der Risse selbst - gleich stark aus. Die Nuten sind um 15 mm aus der Mittelachse heraus versetzt, damit sie nicht die gleichen Symmetrieachsen wie der Probekörper aufweisen. Hierdurch soll die Wahrscheinlichkeit der Überlagerung von Randeffekten weiter herabgesetzt werden. Die für diese Arbeit verwendeten Probekörper bestehen aus Baustahl S235 (St37) und weisen folgende Charakteristika auf:

**RP01** Senkrechte Risse ( $\alpha = 0^\circ$ ), Tiefe  $C_z = 1 \text{ mm}$ ;  $2 \text{ mm}$ ;  $3 \text{ mm}$ ;  $4 \text{ mm}$ .

Oberfläche durch Fräsen feingeschliffet, graphitbeschichtet.  
Rückseitige Bohrung zur Temperaturkalibrierung.

**RP02** Senkrechte Risse, Tiefe  $C_z = 1 \text{ mm}$ ;  $2 \text{ mm}$ ;  $3 \text{ mm}$ ;  $4 \text{ mm}$ .

Oberfläche durch Fräsen feingeschliffet, mit NEXTEL<sup>5</sup> beschichtet.

**RP04** Schräge Risse,  $(C_z, \alpha) = (1 \text{ mm}, 30^\circ)$ ;  $(3 \text{ mm}, 15^\circ)$ ;  $(3 \text{ mm}, 30^\circ)$ ;  $(3 \text{ mm}, 45^\circ)$ .

Oberfläche durch Fräsen feingeschliffet, sandgestrahlt.

<sup>5</sup>Die Beschichtung NEXTEL-Velvet-Coating 811-21 (RAL 900 15 tiefschwarz matt) hat eine hohe Emissivität von  $\epsilon = 0,97$ . NEXTEL ist genau charakterisiert worden und wird standardmäßig für die Radioimetrie eingesetzt [200, 201].

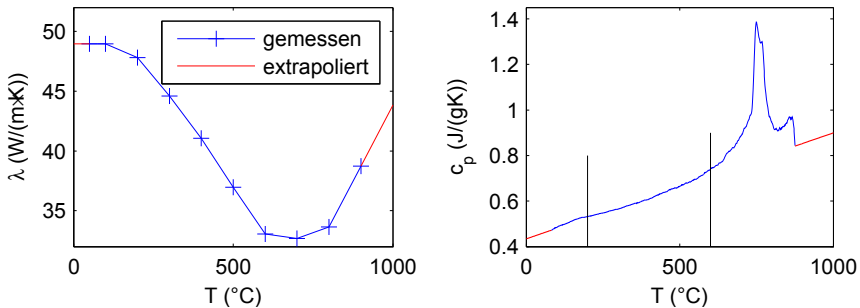


Abbildung 5.17: Thermische Eigenschaften des für die Probekörper verwendeten Stahls S235 (St37). Links ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , rechts die Wärmekapazität  $c_p$  gegen die Temperatur  $T$  aufgetragen. Die gestrichelten Linien zeigen den Temperaturbereich an, auf dem die lineare Extrapolation von  $c_p$  außerhalb dieses Intervalls basiert.

### Thermische Materialeigenschaften

Die thermischen Eigenschaften des für die Probekörper verwendeten Stahls S235 (St37) wurden am Fraunhofer IKTS<sup>6</sup> experimentell nach den relevanten Standards bestimmt [202, 203, 204], um verlässliche Eingangsdaten für FEM Simulationen zu erhalten. Die Dichte beträgt  $\rho = 7841 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Sie wird nicht temperaturabhängig betrachtet. Der Stahl dehnt sich zwar mit steigender Temperatur aus, da bei den hier gezeigten Experimenten aber große lokale Temperaturgradienten induziert werden, die zu inneren Spannungen führen, würde eine detaillierte Berechnung der tatsächlichen lokalen Dichte in keinem vertretbaren Aufwand zu den erzielten Steigerungen der Simulationsgenauigkeiten stehen. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die Wärmekapazität  $c_p$  werden hingegen temperaturabhängig betrachtet. Darstellungen dieser Größen finden sich in Abbildung 5.17.

Da durch experimentelle Einschränkungen nur verlässliche Ergebnisse für Temperaturen zwischen 100 °C und 900 °C erzielt werden konnten, mussten die Werte für Temperaturen außerhalb dieses Intervalls extrapoliert werden. Für die Wärmekapazität wurden die Daten im Bereich von 200 °C bis 600 °C (gestrichelte Linien) linear approximiert und stetig an den vorhandenen Datensatz angefügt. Die Werte der Wärmeleitfähigkeit wurden über eine lineare Erweiterung basierend auf den jeweils äußeren beiden Datenpunkten ergänzt.

### Emissivität und konvektive Abkühlung

Zur Charakterisierung der Probekörper wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, mit dem sich der Emissionsgrad im Wellenlängenbereich der Kamera  $\epsilon_{\text{IR}}$  und der Wärmeübergangskoeffizient  $h$  bestimmen lassen. Die Kenntnis über den Emissionsgrad ist für eine

<sup>6</sup>Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme, Dresden.

radiometrische Temperaturmessung zwingend erforderlich. Mit dem Wärmeübergangskoeffizienten lässt sich die Abkühlung in FEM-Simulationen in linearer Näherung berücksichtigen.

Zur Messung beider Größen wird die Probe in einem Ofen über einen hinreichend langen Zeitraum erwärmt, sodass sie eine homogene Temperaturverteilung aufweist. Danach lässt man die Probe abkühlen und vermisst in regelmäßigen Abständen deren Oberflächentemperatur sowohl radiometrisch als auch kontaktierend. Wichtig ist es hierbei, dass die Hintergrundtemperatur möglichst homogen ist.

Nach VDI/VDE 3511, Blatt 4, ermittelt man nun den Emissionsgrad  $\epsilon_{\text{IR}}$ , in dem man diesen so wählt, dass sich die Ergebnisse von kontaktierender und radiometrischer Temperaturmessung gleichen [30].

Für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten ist es zweckmäßig ein *lumped-capacitance*-Modell anzuwenden, bei welchem man einen instantanen Temperaturengleich innerhalb der Probe annimmt [195]. Damit vereinfacht sich die zeitabhängige Beschreibung des Abkühlungsprozesses auf das Newtonsche Abkühlungsgesetz:

$$T(t) = T_U + (T_U - T(t=0)) \cdot e^{-h \cdot A / (\rho V c) t} \quad (5.11)$$

Hierbei bezeichnet  $T$  die Proben-,  $T_U$  die Umgebungstemperatur,  $A$  die Probenoberfläche und der Term  $\rho V c$  die Wärmekapazität der Probe, berechnet aus Dichte  $\rho$ , Volumen  $V$  und spezifischer Wärmekapazität  $c$ . Da  $h$  hochgradig von den Umgebungsbedingungen, wie z.B. Luftverwirbelungen oder der Ausrichtung der Probe, abhängig ist, sollte die Probe bei einem solchen Experiment möglichst unter den gleichen Bedingungen wie in weiteren Experimenten vermessen werden.

In Abbildung 5.18 sind die Ergebnisse eines solchen Experimentes für den Probekörper RP04 zusammen mit der Anpassung von Gleichung 5.11 dargestellt. Für die Messung stand der Probekörper so wie bei den später in diesem Abschnitt gezeigten Messungen aufrecht auf einer PVC-Platte. Aus dem Fit ergibt sich folgender Wert:

$$(hA)/(\rho V c) = (2,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \quad (5.12)$$

Um hieraus  $h$  zu berechnen, müssen nun die Parameter eingesetzt werden. Wichtig ist hierbei, wie die Oberfläche betrachtet wird. Die Abkühlung findet hauptsächlich über die senkrecht stehenden Oberflächen des Probekörpers statt, da sich an diesen eine konvektive Strömung leichter ausbilden kann. Daher wird für die zur Berechnung von  $h$  zu Grunde gelegten Oberfläche  $A$  ein Intervall zwischen den Grenzfällen angenommen, dass die horizontal stehenden Oberflächen voll oder gar nicht berücksichtigt werden.

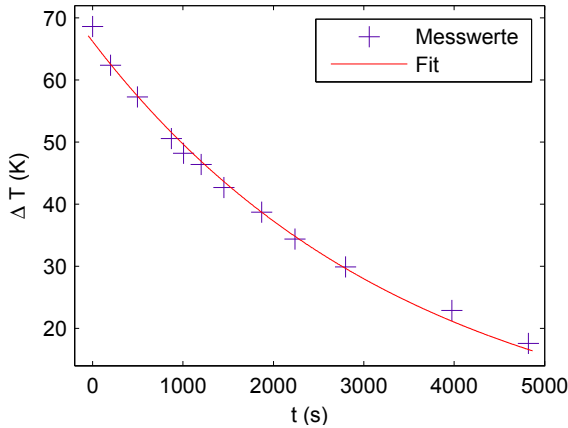


Abbildung 5.18: Verlauf der Oberflächentemperatur bei der Abkühlung von RP04. Dargestellt ist die Differenz der Oberflächen- zur Umgebungstemperatur  $\Delta T$  gegen die Zeit  $t$ . Die durchgehende Linie entspricht dem Ergebnis einer exponentiellen Regression nach Gleichung 5.11.

$$\rho = 7841 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 400 \text{ cm}^3$$

$$c = 500 \text{ J/(kg K)}$$

$$A = 280 \text{ bis } 360 \text{ cm}^2$$

Damit ergibt sich  $h = (19 \pm 2) \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ . Der Emissionsgrad der sandgestrahlten Oberfläche von RP04 konnte unter Berücksichtigung des absoluten Messfehlers von  $\Delta T = 2 \text{ K}$  der eingesetzten Thermografiekamera zu  $\epsilon = 0,60 \pm 0,05$  ermittelt werden.

### 5.2.2 Risstiefe

In diesem Unterabschnitt wird der Einfluss der Risstiefe untersucht und es werden die experimentellen Parameter optimiert.

#### Algorithmus: Risstiefe

Risse wirken sich als thermische Widerstände  $R_\lambda$  aus. Nach Gleichung 2.7 ergibt sich dadurch ein bei gegebenem Wärmefluss - hier durch eine ortsfeste Anregung mittels Laser induziert - ein Temperaturgradient. Um diesen zu quantifizieren, wird die gemittelte Temperatur in

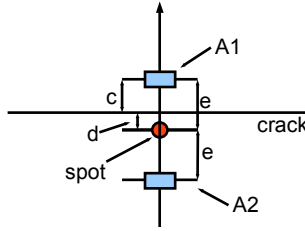


Abbildung 5.19: Skizze der Referenzgebiete, in denen die mittlere Temperatur betrachtet wird.

zwei Referenzgebieten  $A1$  und  $A2$  betrachtet, die im gleichen Abstand  $e$  zum Laserspot auf gegenüberliegenden Seiten von diesem liegen (siehe Abbildung 5.19).

Bezeichnet  $I_{A1,A2}(t)$  die räumliche mittlere Intensität in den jeweiligen Referenzgebieten, so steht mit

$$\Delta I_d(t) = I_{A1}(t) - I_{A2}(t) \quad (5.13)$$

ein Maß für die Abweichung zwischen beiden Gebieten zur Verfügung. Um einen skalaren Parameter zu erhalten, soll nun der zeitliche Mittelwert von  $\Delta I_d$  für einen Zeitraum zwischen  $t_1$  und  $t_2$  gebildet werden:

$$c_d = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Delta I_d(t) dt \doteq \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{n=n_1}^{n_2} \Delta I_d(n \cdot \Delta t). \quad (5.14)$$

Hierbei bezeichnet  $\Delta t = 1/f$  den Kehrwert der Abtastfrequenz und  $n_{1,2}$  die  $t_{1,2}$  entsprechenden Nummern der Einzelbilder. Der nach dieser Vorschrift berechnete Parameter  $c_d$  ist von dem thermischen Widerstand und damit der Risstiefe abhängig. Über eine geeignete Kalibrierung kann der Zusammenhang zwischen  $c_d$  und der Risstiefe  $C_z$  hergestellt werden.

## Experiment

Die in diesem Unterabschnitt gezeigten Experimente wurden an der Thermoschockanlage der BAM (TSA, siehe Abschnitt 3.2.2) durchgeführt. Da die TSA mit einer IR-Kamera ausgestattet ist, die nicht über eine vorgegebene Temperaturkalibrierung verfügt, musste diese direkt am Objekt durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde der verwendete Probekörper in der Mitte mit einer rückseitigen Bohrung versehen (Durchmesser 2,5 mm, Restwanddicke 0,2 mm), in die ein Thermoelement zur Temperaturmessung eingebracht wurde. Über dieses lässt sich die ungefähre Oberflächentemperatur bestimmen und so bei gleichzeitiger Messung mit der IR-Kamera eine direkte Kalibrierung durchführen. Da es sich hierbei letztendlich

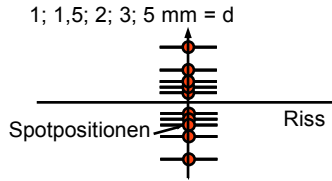


Abbildung 5.20: Skizze der Positionen des Laserspots in Bezug auf den Riss, die für Experimente an RP01 mit der TSA gewählt wurden.

aber auch nur um eine grobe Schätzung handelt, wird zur weiteren Darstellung der Ergebnisse auf die gemessenen Intensitätswerte zurückgegriffen. Die Experimente wurden mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Auflösung:  $128 \times 128$  Pixel, Binning-Modus<sup>7</sup>.
- Vergrößerung: 0,3 mm/Pixel.
- Bildwiederholfrequenz: 500 Hz.
- Integrationszeit: 0,5 ms.
- Umgebungstemperatur:  $21,3^\circ\text{C}$ .

Für die Experimente wurde auf den Probekörper RP01 zurückgegriffen. Dieser enthält als Rissmodelle vier senkrechte funkenenerodierte Nuten mit einer Weite von  $C_x = 0,2$  mm und einer Länge von  $C_y = 40$  mm bei Tiefen zwischen 1 mm und 4 mm. Zur Erhöhung der Emissivität wurde eine Graphitbeschichtung aufgebracht.

Die Anregung erfolgte ortsfest mit einer Laserleistung von 20 W über eine Dauer von 2 s. Dabei wurden Abstände zwischen Laserspot und Riss  $d$  von 0,5 mm; 1 mm; 1,5 mm; 2 mm; 3 mm; und 5 mm für Anregungen auf beiden Seiten des Risses gewählt (siehe Abbildung 5.20). Da die Experimente, bei denen die Anregung im jeweils gleichen Abstand auf den gegenüberliegenden Seiten des Risses erfolgt, sich aus Symmetriegründen für die senkrechten Nuten gleichen müssen, konnte dieses Verhalten für eine genaue Positionierung des Laserspots ausgenutzt werden. Für  $e = 0,5$  mm kam es wegen des Spotdurchmessers von ca. 1,5 mm immer auch zu einer direkten Anregung des Risses selbst, die zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führte. Daher wurden die Werte aus diesen Experimenten verworfen.

Die TSA bietet die Möglichkeit zur Evakuierung der Probenkammer bis hin zu einem Feinvakuum. So konnte der Einfluss der Wärmeleitung durch die Luft innerhalb der Nut untersucht werden, indem die gleichen Experimente einmal unter Umgebungsdruck und einmal unter einem Restdruck von  $p = 0,1$  mbar durchgeführt wurden.

<sup>7</sup>Mit Binning wird das Zusammenfassen von Einzelpixeln zu Pixelblöcken bezeichnet, die dann gemeinsam angesprochen werden um so Empfindlichkeit und Bildwiederholrate zu erhöhen.

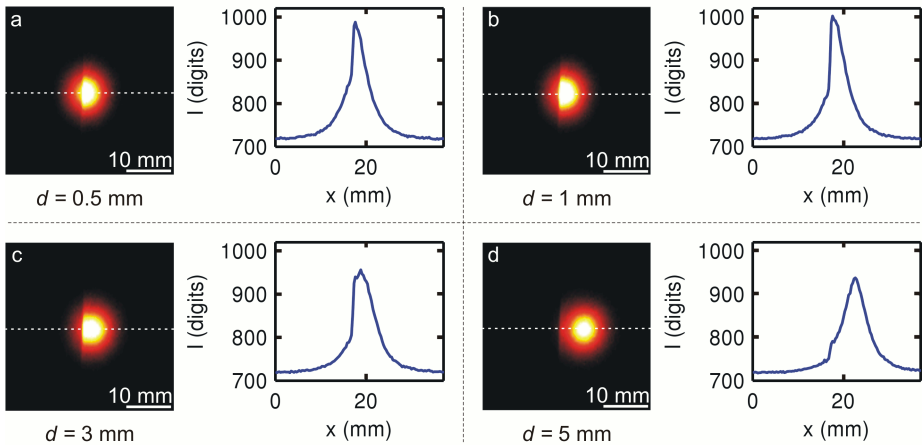


Abbildung 5.21: Thermogramme und Linienscans entlang der gestrichelten Linie für unterschiedliche Abstände zwischen Laserspot und Riss für eine Risstiefe von  $C_z = 2 \text{ mm}$ ,  $0,07 \text{ s}$  nach Ende der Erwärmung. Der Riss verläuft vertikal in der Mitte der Abbildungen. Die Thermogramme stellen die Intensitäten mit jeweils der gleichen Farbskalierung dar.

## Ergebnisse

Zur ersten Beurteilung der Ergebnisse sind in Abbildung 5.21 einzelne Thermogramme und Linienscans aus einem Experiment an einem Riss mit  $C_z = 2 \text{ mm}$  und unterschiedlichen Abständen  $d$  zwischen Riss und Laserspot dargestellt. In den Thermogrammen ist ein deutlicher Intensitätssprung an der vertikal verlaufenden Rissposition zu erkennen. Dieses Verhalten entspricht dem im Abschnitt 5.1.2 beschriebenen und zur Rissdetektion ausgenutzten Effekt. In den Linienscans ist die Rissposition jeweils an einer Schulter zu erkennen. Bei a und b liegt diese so nah am Maximum, dass die Intensitätsverteilung schief wirkt. Bei c und d lässt sie sich deutlich erkennen. Zwischen Versuchen unter Umgebungsdruck und im Vakuum konnten keine signifikanten Abweichungen beobachtet werden, was wegen der großen Klaffung von  $C_x = 200 \mu\text{m}$  zu erwarten war.

Um das Ergebnis eines Experiments nun mit einem einzelnen skalaren Parameter auszudrücken, wird auf die in Abschnitt 5.2.2 beschriebene Auswertungsprozedur zurückgegriffen. Für die Wahl der Größe der Referenzgebiete muss eine Abwägung zwischen zwei gegenläufigen Effekten bezüglich des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) getroffen werden. Je größer das Gebiet ist, um so weniger wirkt sich das statistische Rauschen der IR-Kamera aus. Allerdings werden mit zunehmender Größe auch mehr Pixel mit nur geringen Temperaturänderungen herangezogen, was das SNR wiederum verringert. Bei den hier gezeigten Experimenten wurden die Abstände zwischen Laserspot und Riss  $d$  variiert. Die Auswertung erfolgte jeweils mit dem gleichen Abstand  $c$  zwischen Riss und Referenzgebiet. Hierdurch



verringert sich der Abstand zwischen den Referenzgebieten  $2e$  mit abnehmendem Abstand zwischen Laserspot und Riss gemäß  $2e = 2(c + d)$ . Dies ist vorteilhaft, da so kleinere  $e$  gewählt werden können. Denn je kleiner  $e$  ist, um so höher ist der durch den Laser induzierte Temperaturhub in den Referenzgebieten. Für die gegebenen experimentellen Umstände erwiesen sich folgende Parameter für den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Auswertungsalgorithmus als vorteilhaft:

- Größe der Referenzgebiete  $A_1$  und  $A_2$ :  $2 \times 3,3 \text{ mm}^2$ .
- Zeitliche Mittelwertbildung während der Anregung zwischen  $t_1 = 0,1 \text{ s}$  und  $t_2 = 1,9 \text{ s}$ .
- Abstand zwischen Referenzgebiet und Riss  $c = 3 \text{ mm}$ .

In Abbildung 5.22 ist der Parameter  $c_d$  für eine Versuchsreihe am Probekörper RP01 gegen den Abstand zwischen Laserspot und Riss  $d$  aufgetragen. Für eine Risstiefe  $C_z = 1 \text{ mm}$  sind zusätzlich die Fehler angegeben, die sich aus einer Abweichung der Rissposition um  $0,1 \text{ mm}$  ergeben. Bei einer Wiederholung der Experimente ohne Veränderung der geometrischen Justage ergaben sich Streuungen von  $1\%$  in  $c_d$ . Die Abweichungen zwischen Experimenten unter Umgebungsdruck und bei  $0,01 \text{ mbar}$  – wieder ohne die geometrische Justage zu verändern – lagen bei  $\leq 1\%$ . Folgende Ergebnisse lassen sich festhalten:

- Die Risstiefe lässt sich im Millimeter-Bereich auflösen.
- Der Laserspot sollte für ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis so nah wie möglich am Riss positioniert werden.
- Der Riss darf nicht direkt beleuchtet werden, da dies zu einem undefinierten Energieeintrag führt, was nicht reproduzierbare Ergebnisse zur Folge hat.
- Der Einfluss der Wärmeleitung über die Luft innerhalb des Risses ist für Rissweiten im Bereich von  $0,1 \text{ mm}$  vernachlässigbar gering.
- Eine Unsicherheit von  $0,1 \text{ mm}$  in der Rissposition - entsprechend der Rissweite - führt bei einem Abstand zwischen Riss und Laserspot von  $d = 1 \text{ mm}$  zu Abweichungen von ca.  $10\%$ .

### 5.2.3 Risswinkel

In diesem Unterabschnitt wird das Verfahren aus dem vorherigen Unterabschnitt auf die gleichzeitige Bestimmung von Risstiefe und -winkel erweitert.

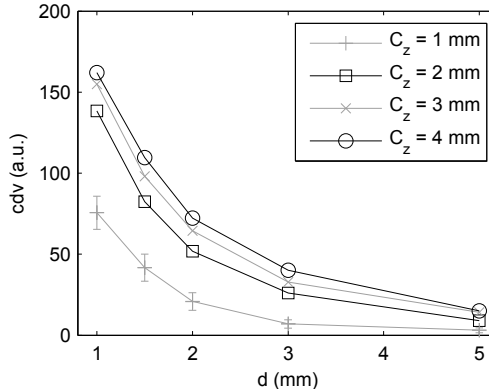


Abbildung 5.22: Bestimmung der Risstiefe: Aufgetragen ist der Parameter  $c_d$  gegen den Abstand zwischen Laserspot und Riss  $d$  für unterschiedliche Risstiefen  $C_z$ . Für  $C_z = 1$  mm sind zusätzlich die Fehler für eine Unsicherheit der Rissposition von 0,1 mm angegeben.

### Algorithmus

Wendet man den in Abschnitt 5.2.2 vorgeschlagenen Algorithmus zur Bestimmung der Risstiefe bei einem Riss an, der nicht senkrecht zur Oberfläche verläuft, so werden sich in Abhängigkeit davon, auf welcher Seite vom Riss die Anregung erfolgt, unterschiedliche Ergebnisse für  $c_d$  ergeben. Der Grund hierfür ist, dass die Probe nun in der durch den Riss definierten Ebene nicht mehr spiegelsymmetrisch ist.

Genau dieser Effekt lässt sich aber zur Charakterisierung des Risswinkels ausnutzen. In Abbildung 5.23 findet sich eine Skizze des erweiterten Algorithmus. Es werden nun zwei Experimente mit Anregungen auf beiden Seiten des Risses durchgeführt (Abbildung 5.23 1,2). Für jedes Experiment wird nun nach Gleichung 5.13 die Differenz der räumlich gemittelten Intensitäten in den beiden Referenzgebieten  $A_1$  und  $A_2$  berechnet. Hierbei ist zu beachten, dass  $A_2$  jeweils so definiert ist, dass zwischen diesem Gebiet und dem Laserspot der Riss liegt. Die so gewonnenen Intensitätsdifferenzen seien mit  $\Delta T_{d,1}$  und  $\Delta T_{d,2}$  bezeichnet. Aus diesen beiden Größen werden nun wiederum der Durchschnitt  $\Delta T_d$  und die Differenz  $\Delta T_a$  gebildet:

$$\Delta T_d(t) = (\Delta T_{d,1}(t) + \Delta T_{d,2}(t)) / 2 \quad (5.15)$$

$$\Delta T_a(t) = (\Delta T_{d,1}(t) - \Delta T_{d,2}(t)) / 2 \quad (5.16)$$

Für senkrechte Risse entspricht  $\Delta T_d$  der in Abschnitt 5.2.2 berechneten Größe. Außerdem gilt für diesen Fall aus Symmetriegründen  $\Delta T_a = 0$ . Bei angewinkelten Rissen weichen  $\Delta T_{d,1}$  und  $\Delta T_{d,2}$  voneinander ab. Der Durchschnitt  $\Delta T_d$  stellt weiterhin ein Maß für die

Risstiefe  $C_z$  dar, wohingegen  $\Delta T_a$  hochgradig vom Risswinkel  $\alpha$  abhängt. Durch zeitliche Mittlung erhält man analog zu Gleichung 5.14 zwei skalare Parameter:

$$c_d = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Delta I_d(t) \hat{=} \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{n=n_1}^{n_2} \Delta I_d(n \cdot \Delta t) \quad (5.17)$$

$$c_a = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Delta I_a(t) \hat{=} \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{n=n_1}^{n_2} \Delta I_a(n \cdot \Delta t) \quad (5.18)$$

Das Verhalten dieser beiden Parameter wird im Folgenden sowohl auf der Basis von Experimenten (siehe Abschnitt 5.2.3) als auch von FEM-Simulationen (siehe Abschnitt 5.3) eingehend untersucht.

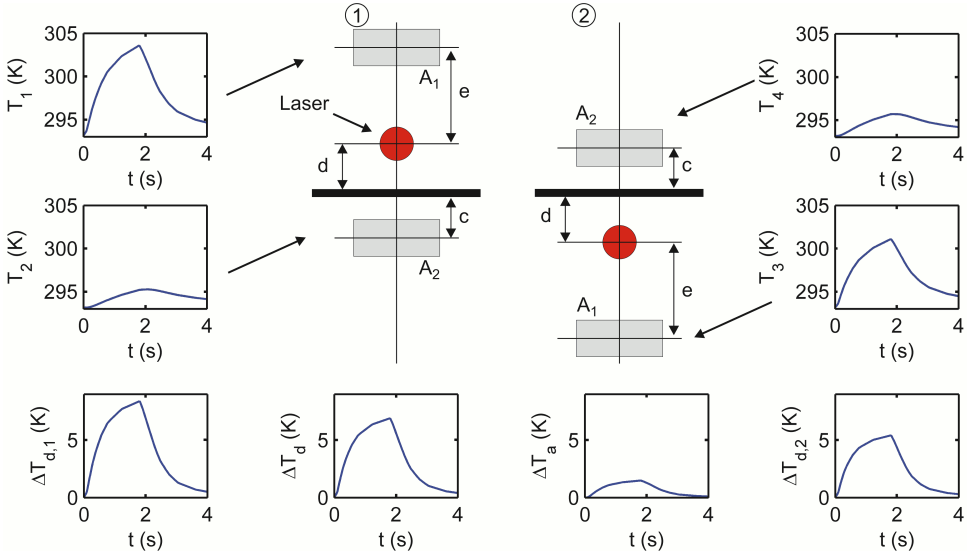


Abbildung 5.23: Algorithmus zur gleichzeitigen Bestimmung von Risswinkel und -tiefe: Es werden zwei Experimente (1,2) durchgeführt, bei denen der Laserspot auf beiden Seiten vom Riss positioniert wird. Dabei werden jeweils zwei Referenzgebiete  $A_1$  und  $A_2$  einander gegenüberliegend im gleichen Abstand zur Laserposition definiert. Der räumlich gemittelte Temperaturverlauf in diesen Gebieten ist als  $T_1$  bis  $T_4$  gegen die Zeit in den kleinen Diagrammen aufgetragen. Die Differenzen zwischen diesen Temperaturen für jeweils ein Experiment,  $\Delta T_{d,1} = T_1 - T_2$  und  $\Delta T_{d,2} = T_3 - T_4$ , sind ein Maß für die durch den Wärmewiderstand des Risses ausgelöste Asymmetrie der thermischen Antwort der Probe auf die Erwärmung. Der Durchschnitt  $\Delta T_d = (\Delta T_{d,1} + \Delta T_{d,2})/2$  kann als Maß für die Tiefe genutzt werden, während die Differenz  $\Delta T_a = (\Delta T_{d,1} - \Delta T_{d,2})/2$  stark vom Risswinkel abhängt. Die einzelnen Auftragungen zeigen Daten aus FEM-Simulationen mit der Rissgeometrie  $C_d = 2$  mm,  $\alpha = 30^\circ$  und einer Laserleistung von  $P_{L,a} = 10$  W. Zur Auswertung wurden  $d = 1$  mm und  $e = 4$  mm gewählt, die Referenzgebiete haben eine Größe von  $A = 2 \times 3,3$  mm<sup>2</sup>. Siehe Abschnitt 5.3 für weitere Details.

## Experimente

In diesem Abschnitt werden Experimente an den Probekörpern RP02 (rechtwinklige Risse) und RP04 (schräge Risse) gezeigt. Es wurde hier RP02 anstatt RP01 verwendet, da dessen Oberfläche eine NEXTEL-Beschichtung mit definierten Emissions- und Absorptionskoeffizienten von  $\epsilon_{\text{IR}} = \alpha_{\text{L}} = 0,97$  aufweist [200, 201]. So ist eine genaue Temperaturmessung möglich. Die Oberfläche von RP04 ist sandgestrahlt. Dies machte eine experimentelle Bestimmung von  $\epsilon_{\text{IR}}$  und  $\alpha_{\text{L}}$  nötig.

Für die hier gezeigten Experimente wurde das Lasersystem für die aktive Thermografie (LAT, siehe Abschnitt 3.2.2) und die InSb-basierte IR-Kamera mit dem 100 mm Objektiv (siehe Abschnitt 3.1.1) genutzt. Das LAT wurde dabei mit einem Fokus von  $f = 434$  mm und einem resultierenden Spotradius von  $r = 0,3$  mm bei senkrechter Inzidenz des Laserlichtes betrieben. An dieser Stelle ist es wichtig, sich die erreichte Leistungsdichte zu vergegenwärtigen. Eine Leistung von 10 W auf einer Fläche von  $A = \pi \cdot 0,3^2 \text{ mm}^2$  entspricht einer Flächenleistungsdichte von  $\rho = 3,5 \text{ kW/cm}^2$ . Da hier aber ein gaussförmiges Strahlprofil vorliegt, ist die maximale Leistungsdichte in der Mitte des Spots nochmal um etwa einen Faktor zwei höher. Sie liegt also bei  $\rho_{\text{max}} \approx P_{\text{L,e}} \cdot 700 \text{ cm}^{-2} = 7 \text{ kW/cm}^2$ . Die Anregung erfolgte wieder ortsfest über einen Zeitraum von 2 s. Ohne irreversible Veränderung der Oberfläche konnte für den sandgestrahlten Probekörper eine Laserleistung von maximal  $P_{\text{L,e}} = 10$  W genutzt werden, was auch für die gezeigten Experimente verwendet wurde. Die NEXTEL-Beschichtung war bis etwa  $P_{\text{L,e}} = 3,5$  W völlig stabil. Bei Leistungen um  $P_{\text{L,e}} = 5$  W zeigten sich anfangs leichte Degradationserscheinung, die Oberfläche erreichte aber nach einigen Anregungszyklen einen stabilen Zustand mit geringfügig niedrigerem Absorptionskoeffizienten im sichtbaren Spektralbereich. Bei Leistungen ab ca.  $P_{\text{L,e}} = 8$  W verbrannte die NEXTEL-Beschichtung unter starker Rußentwicklung. Daher wurden für die beschichteten Probekörper Leistungen von 0,9 W und 5,2 W gewählt, bei der sandgestrahlten Oberfläche konnten 10 W genutzt werden. Die Positionierung des Probekörpers erfolgte über eine Linear-Verfahreinheit mit einer Genauigkeit von 1  $\mu\text{m}$ . Die Versuche wurden mit folgenden sonstigen Parametern durchgeführt:

- Auflösung:  $640 \times 512$  Pixel (volle Sensorgröße).
- Vergrößerung:  $83 \mu\text{m}/\text{Pixel}$ .
- Bildwiederholfrequenz: 93 Hz.
- Integrationszeit: 0,615 ms.
- Filter: LP-3750 (Transmissionsbereich von 3788 nm bis 6998 nm).
- Temperaturkalibrierung: Von  $0^\circ\text{C}$  bis  $50^\circ\text{C}$ .
- Umgebungstemperatur: ca.  $22^\circ\text{C}$ .
- Relative Luftfeuchtigkeit: ca. 65%.

Als experimentell schwer beherrschbar erwiesen sich die Vibrationen des Stirlingkühlers der verwendeten Kamera. Da hierdurch Vibrationen auch in der Kamera selbst auftreten, ließen sich die Auswirkungen auch durch eine sehr feste Einspannung von Kamera und Objektiv nicht vollständig unterdrücken. Die Auswirkungen davon zeigen sich im Bild wie bei den im vorherigen Kapitel gezeigten Experimenten als laterale Schwankungen um ca. 2 Pixel.

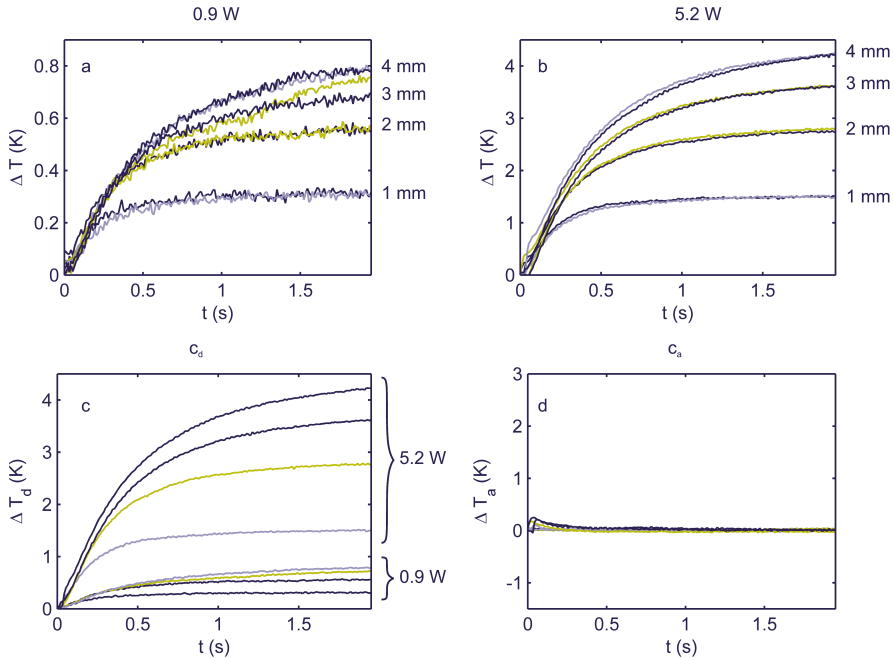


Abbildung 5.24: Experimentelle Ergebnisse für senkrechte ( $\alpha = 0^\circ$ ) Risse mit Tiefen von 1 bis 4 mm, gemessen am Probekörper RP02 mit NEXTEL-Beschichtung. Die Diagramme a und b zeigen die Temperaturdifferenzen  $\Delta T_{d,i}$  für Laserspotpositionen auf jeweils beiden Seiten des Risses mit einer Leistung von  $P_{L,e} = 0,9$  W und  $P_{L,e} = 5,2$  W. Im Diagramm c ist  $\Delta T_d(t)$  als ein Maß für die Risttiefe gezeigt, d zeigt die Differenz  $\Delta T_a(t)$ , welche hauptsächlich vom Risswinkel abhängt. Bei c und d weisen die Ordinaten zur besseren Vergleichbarkeit jeweils die gleiche Spreizung auf. (siehe Abbildung 5.23 und Text für die Berechnung der Größen.)

## Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den zuvor beschriebenen Experimenten werden in den Abbildungen 5.24 und 5.25 als zeitliche Verläufe der gemittelten Temperaturen in den Referenzgebieten bzw.

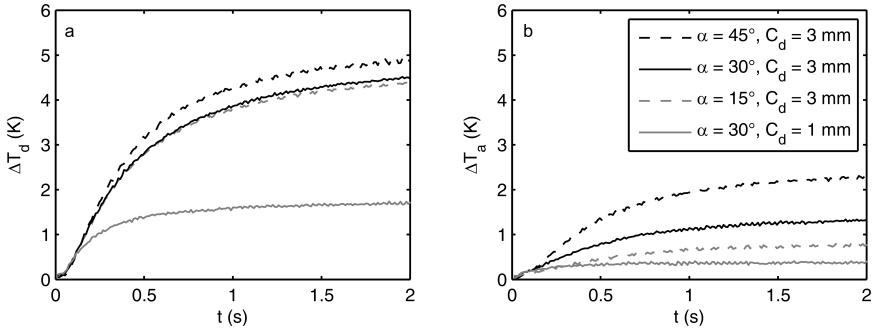


Abbildung 5.25: Experimentelle Ergebnisse für angewinkelte Risse. Die Diagramme zeigen  $\Delta T_d$  (a) und  $\Delta T_a$  (b), berechnet nach dem in Abbildung 5.23 gezeigten Algorithmus. (RP04 mit sandgestrahlter Oberfläche, Leistung des Lasers:  $P_{L,e} = 10$  W.)

daraus abgeleiteter Größen gemäß dem in Abbildung 5.23 gezeigten Algorithmus dargestellt, wobei folgende Parameter verwendet wurden:

- Größe der Referenzgebiete  $A_1$  und  $A_2$ :  $2 \times 3,3$  mm<sup>2</sup>.
- Abstand zwischen Laserspot und Riss  $d = 1$  mm.
- Abstand zwischen Referenzgebiet und Riss  $c = 3$  mm.

Abbildung 5.24 zeigt die Ergebnisse aus Messungen an dem Probekörper RP02 mit senkrechten Rissen. Die Temperaturverläufe für die einzelnen Referenzgebiete auf jeweils beiden Seiten der Risse sind für eine Laserleistung von  $P_{L,e} = 0,9$  W in Diagramm a und für  $P_{L,e} = 5,2$  W in Diagramm b dargestellt. Die Ergebnisse für die einzelnen Risstiefen unterscheiden sich signifikant. Die Paare von Kurven für Anregungen auf beiden Seiten eines Risses bei sonst gleichen Parametern entsprechen sich, wie aus Symmetrieüberlegungen zu erwarten war. Das Rauschen der gezeigten Kurven setzt sich dabei aus zwei Anteilen zusammen. Zum einen führt das intrinsische Rauschen der Kamera zu stärkeren Schwankungen in den Kurven für  $P_{L,e} = 0,9$  W als bei denen für  $P_{L,e} = 5,2$  W. Dazu kommen noch die nicht vollständig unterdrückbaren Vibrationen der Kamera, die im Bereich von etwa 2 Pixel im aufgenommenen Bild lagen. Hierdurch waren die Positionen der Referenzgebiete zeitlich nicht fix, was zu weiteren Schwankungen im Signal führt. In Diagramm c sind die Mittelwerte für beide Experimente  $\Delta T_d$  dargestellt. Die erreichten Temperaturdifferenzen der Experimente mit  $P_{L,e} = 5,2$  W sind etwa fünf mal so hoch wie die der Experimente mit  $P_{L,e} = 0,9$  W. Die Differenzen zwischen beiden Referenzgebieten  $\Delta T_a$  sind im Diagramm d aufgetragen. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde die gleiche Spreizung der Ordinate wie im Diagramm c gewählt. Außer zu kleinen Zeiten von  $t < 0,3$  s zeigen sich keine Ausschläge. Die systematische Abweichung zu Beginn der Messung liegt in der Funktionsweise des verwendeten Laserscanners begründet. Vor Beginn der Messung befindet sich der Laser im

sog. *threshold mode*, wird also knapp oberhalb der Laserschwelle betrieben. Dann wird der Strahlunterbrecher geöffnet und danach der Laserspot positioniert. Die Ausgangsposition war bei allen Experimenten gleich. Sie lag rechtwinklig über dem untersuchten Riss. Daher wurde bei jeweils einem Experiment die gegenüberliegende Seite und der Riss selbst kurzzeitig mit geringer Leistung angeregt, was zu den systematischen Abweichungen führt. Da die hierbei eingebrachte thermische Energie gering im Vergleich zur eigentlichen Anregung ist, sind nur bei kleinen Zeiten Auswirkungen dieses Effektes erkennbar.

Abbildung 5.25 zeigt die Ergebnisse von Experimenten mit dem Probekörper RP04, der schräge Risse enthält. Wegen der Oberflächenbeschaffenheit konnte auf eine höhere Anregungsleistung von  $P_{L,e} = 10$  W zurückgegriffen werden, was ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis zur Folge hat. In Diagramm a sind die Mittelwerte der Intensitäten in den beiden Referenzgebieten  $\Delta T_d$  und in Diagramm b deren Differenz  $\Delta T_a$  dargestellt.  $\Delta T_d$  ist hauptsächlich von der Risstiefe  $C_z$  abhängig. Für die Risse mit  $C_z = 3$  mm, aber unterschiedlichen Winkeln, liegen die Ergebnisse recht nah beieinander, es ist jedoch ein systematischer Einfluss des Risswinkels  $\alpha$  zu erkennen. Je stärker der Riss von der Senkrechten abweicht, umso höher werden die Werte für  $\Delta T_d$ . Bei den Differenzen  $\Delta T_a$  zeigt sich sowohl eine Abhängigkeit von  $C_z$  als auch von  $\alpha$ . Für Risse der gleichen Tiefe steigen die Werte mit dem Winkel. Für Risse, die im gleichen Winkel ins Material eingebracht wurden, steigen sie mit zunehmender Tiefe.

Eine systematische Bewertung der hier dargestellten Ergebnisse findet sich in Abschnitt 5.3.5, wo sie in Bezug zu den im nächsten Abschnitt gezeigten FEM-Simulationen diskutiert werden.

## 5.3 FEM

In diesem Abschnitt werden numerische Simulationen von Experimenten des in den vorherigen Abschnitten gezeigten Typs behandelt. Hierzu kommt – wie im Abschnitt 4.1 – die Finite-Elemente-Methode (FEM) zum Einsatz. Für eine detaillierte Einführung in die zugrunde liegende Mathematik sei an dieser Stelle nochmal auf das Lehrbuch von Merkel und Öchsner verwiesen [193]. Die hier gezeigten Simulationen wurden mit dem kommerziellen Softwarepaket Comsol Multiphysics 3.5a durchgeführt [194].

Sowohl die Steuerung der Simulationsparameter als auch die Aufbereitung (*post processing*) der Simulationsergebnisse erfolgten genau wie die im vorherigen Abschnitt gezeigte Auswertung der experimentellen Daten mittels der Software matlab. Da es sich bei der Wärmeleitung um einen diffusiven Prozess handelt, verhalten sich numerische Lösungen der zu Grunde liegenden Wärmeleitungsgleichung im Allgemeinen gutmütig im Bezug auf kleine Variationen der angesetzten Parameter.

Es soll zunächst überprüft werden, ob sich die experimentellen Ergebnisse in FEM-Simulationen reproduzieren lassen. Darauf aufbauend soll die Messbarkeit von Risstiefe und -winkel systematisch untersucht werden. Als weitere Einflussgrößen werden die Rissklaffung sowie die Anregungsleistung diskutiert. Die gezeigten Untersuchungen beschränken sich auf den Fall langer Risse, d.h.  $C_y \gg C_z$ , wie sie häufig z.B. als Ermüdungsrisse vorkommen. Für

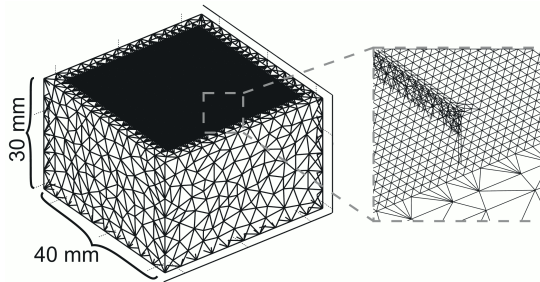


Abbildung 5.26: Darstellung eines für die FEM-Simulationen verwendeten Gitters. Es umfasst ca. 40.000 Elemente, was zu einer zufriedenstellenden Genauigkeit führt. An der Oberfläche ist das Gitter feiner definiert (siehe Ausschnittsvergrößerung rechts), um Thermogrammsequenzen mit der nötigen räumlichen Auflösung generieren zu können.

$C_y \approx C_z$  müsste auch der Einfluss der Länge untersucht werden. Jedoch wäre in diesem Fall eine genaue Analyse der tatsächlichen, nicht quaderförmigen Rissgeometrie nötig, sodass dieser Fall hier nicht behandelt werden soll.

### 5.3.1 Simulationsdetails

Ein Riss kann auf zwei Arten modelliert werden. Einmal ist es möglich, den Riss direkt über seine Geometrie zu definieren. Es kann aber auch eine zusätzliche Grenzfläche modelliert werden, der ein bestimmter thermischer Widerstand - im Grenzfall eine perfekte Isolation - zugewiesen wird. Diese Herangehensweise ist insbesondere für Risse oder auch Beschichtungen und Einschlüsse mit einem sehr hohen Aspektverhältnis vorteilhaft, da es so nicht zu Problemen beim Generieren des Gitters für die feinen Elemente kommt. Zur Modellierung der Risse wird auf die tatsächliche Geometrie der funkenrodierten Nuten in den verwendeten Probekörpern zurückgegriffen, da dies wegen des verhältnismäßig geringen Aspektverhältnisses problemlos möglich ist und der Realität besser entspricht.

Für die gezeigten dreidimensionalen FEM-Simulationen wurde jeweils ein Grundkörper der Größe  $30 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  mit einem mittig liegenden Riss modelliert (siehe Abbildung 5.26). Falls nicht anders angegeben betragen für alle hier gezeigten Simulationen Risslänge und Rissweite jeweils  $C_y = 30 \text{ mm}$  bzw.  $C_x = 0,2 \text{ mm}$ . Die Anregung wurde für 2 s auf einer kreisförmigen Fläche mit einem Durchmesser von  $d = 1 \text{ mm}$  und homogener Leistungsdichte modelliert. Es wurde auch eine gaussförmige Verteilung der Leistungsdichte mit einer dem Strahlprofil des Lasersystems LAT entsprechenden Halbwertsbreite<sup>8</sup> von 0,6 mm getestet, die ebenfalls auf eine kreisförmige Fläche mit  $d = 1 \text{ mm}$  beschränkt wurde. Die Auswirkungen dieser Änderung auf die gesuchten Parameter lag dabei im Bereich des numerischen Rauschens.

<sup>8</sup>Volle Breite bei halben Maximum.



Für jeden Parametersatz wurde ein adaptives Gitter mit rund 40.000 Elementen generiert. An den Rissflächen und der Laserposition weist das Gitter dabei kleinere Elemente auf. Zusätzlich wurde an der Oberfläche ein quadratisches Gitter von  $64 \times 64$  Knoten in einem Abstand von 0,67 mm fest vorgegeben (siehe Abbildung 5.26). Werden nach der Simulation im *post processing* nun Thermogramm-Sequenzen mit dieser Auflösung generiert, hat dieses Vorgehen einen wesentlichen Vorteil. Angenommen ein Datenpunkt liegt bei einem zu einer gegebenen Geometrie adaptiv generierten Gitter direkt auf der Grenze zwischen zwei Gitterelementen. Wird nun zu einer infinitesimal abweichenden Geometrie ein neues Gitter berechnet, kann es dazu kommen, dass der betrachtete Datenpunkt im neuen Gitter der angrenzenden Zelle zugeordnet wird. Obwohl bei der Berechnung der Simulationsergebnisse eine Glättung zum Einsatz kommt, kann der beschriebene Effekt zu unstetigem Verhalten führen, was sich bei der Berechnung von kleinen Parametervariation und insbesondere bei der Berechnung von Sensitivitäten stark nachteilig auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse auswirkt. Die Vorgabe eines festen Netzes an Knoten verhindert dieses Effekt. Allgemein lassen sich so Effekte mit großen Auswirkungen auf die untersuchten Größen, die kleinere Effekte überlagern, besser durch Subtraktion unterdrücken. Eine zeitliche Auflösung von 100 ms erwies sich als ausreichend genau.

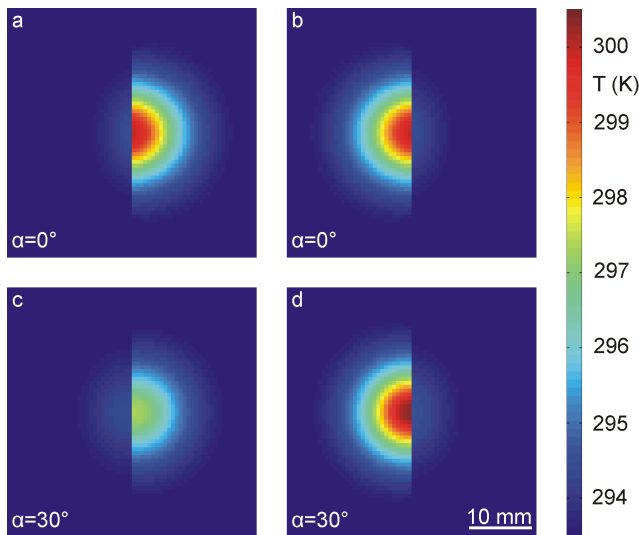


Abbildung 5.27: Einfluss des Risswinkels: Dargestellt sind Temperaturverteilungen aus FEM-Simulationen mit einer Anregungsleistung von  $P_{L,e} = 10$  W zum Zeitpunkt  $t = 1$  s. Die Risstiefe beträgt jeweils  $C_z = 3$  mm. Die Thermogramme a und b zeigen das Ergebnis für einen senkrechten Riss ( $\alpha = 0^\circ$ ) und Anregungen auf beiden Seiten. Die Thermogramme c und d wurden für einen Riss berechnet, der um  $\alpha = 30^\circ$  nach links geneigt ist. Hier ist die Asymmetrie der beiden Experimente deutlich erkennbar. Erfolgt die Anregung über dem Riss (d) werden deutlich höhere Temperaturen erreicht.

Auf dem für die Simulationen eingesetzten 8-Kern Rechner<sup>9</sup> benötigt die Simulation für eine Geometrie mit Anregungen auf jeweils beiden Seiten des Risses eine Rechenzeit von ca. 1h. Als Ergebnis der Simulation jedes einzelnen Experiments wurden Messfilme mit  $64 \times 64$  Datenpunkten erzeugt. Dadurch lässt sich die gleiche Routine zur Datenauswertung auf simulierte und experimentelle Daten anwenden. Dies macht die Auswertung effizienter und trägt durch eine einheitliche Basis an Auswertungsfunktionen zur Vermeidung von Fehlinterpretationen durch Programmfehler bei.

In Abbildung 5.27 finden sich als beispielhafte Darstellungen der Simulationsergebnisse Thermogramme für jeweils zwei Experimente an zwei verschiedenen Geometrien zum Zeitpunkt  $t = 1$  s bei einer Laserleistung  $P_{L,e} = 10$  W. Die Risstiefe beträgt jeweils  $C_z = 3$  mm. Die oberen beiden Thermogramme zeigen die Ergebnisse für einen senkrechten Riss mit Anregungen auf beiden Seiten des Risses. Die Temperaturverteilungen sind zueinander genau spiegelsymmetrisch. Die unteren Thermogramme zeigen die gleichen Ergebnisse für einen um  $\alpha = 30^\circ$  nach links geneigten Riss. Hier ist die Asymmetrie der Temperaturverteilungen deutlich zu erkennen. Bei der Anregung auf der linken Seite (d), also über dem Riss, ist die Wärmeableitung stärker behindert als bei der Anregung auf der rechten Seite (c). Um Simulationsdaten diesen Typs mit experimentellen Ergebnissen vergleichen zu können, kommt im nächsten Abschnitt wieder der in Abschnitt 5.2.3 beschriebene Algorithmus zur Anwendung.

### 5.3.2 Vergleich mit experimentellen Daten

Für den Vergleich von simulierten und experimentellen Daten werden wieder die Größen  $c_d$  und  $c_a$  (siehe Gleichung 5.18) herangezogen. Dabei werden folgende Parameter verwendet:

- Größe der Referenzgebiete  $A_1$  und  $A_2$ :  $2 \times 3,3$  mm<sup>2</sup>.
- Zeitliche Mittelwertbildung während der Anregung zwischen  $t_1 = 1$  s und  $t_2 = 2$  s.
- Abstand zwischen Referenzgebiet und Riss:  $c = 3$  mm.

Bevor die Ergebnisse verglichen werden, sollen noch die größten Unsicherheiten für die experimentellen Messungen identifiziert werden. Ein wichtiger Aspekt ist, wie bereits in Abschnitt 5.2.2 angesprochen, eine genaue geometrische Justage des Lasers. Für rechtwinklige Risse ( $\alpha = 0^\circ$ ) kann dies mittels des Parameters  $c_a$  überprüft werden, für den im optimalen Fall  $c_a = 0$  gelten sollte. Wichtig ist zudem die Berücksichtigung der Emissivität der untersuchten Proben im Wellenlängenregime der IR-Kamera  $\epsilon_{IR}$  und der Absorptionskoeffizient  $\alpha_L$  im Bereich der Wellenlänge des Lasers. Die komplette Vernachlässigung der konvektiven Wärmeübertragung zwischen den Rissflanken hat hingegen im hier vorliegenden Fall einer großen Klaffung nur vernachlässigbar geringe Auswirkungen auf die Ergebnisse (siehe Abschnitt 5.2.2).

---

<sup>9</sup>Zwei Intel Xeon 5410 Prozessoren, insgesamt acht Kerne mit jeweils 4700 *bogomips*, 32 GB Arbeitsspeicher, 64 bit Linux-Betriebssystem.

Tabelle 5.2 zeigt die Ergebnisse aus Experimenten und FEM-Simulationen für Probekörper RP02 mit NEXTEL-beschichteter Oberfläche, der senkrechte Risse enthält. Als Laserleistungen sind hierin bei den experimentellen Werten die emittierten Leistungen angegeben. Die tatsächlich in das Material eingebrachte Leistung ist also geringer, da für den Absorptionskoeffizienten  $\alpha_L \leq 1$  gilt. Zuerst soll festgehalten werden, dass  $c_d$  wie erwartet mit der Risstiefe  $C_z$  ansteigt. Die Übereinstimmung von Experiment und Simulation ist für  $P_{L,e} = 0,9$  W sehr gut. Der Parameter  $c_a$ , der für rechtwinklige Risse unter idealen Bedingungen zu Null verschwindet, ist jeweils um rund zwei Größenordnungen kleiner als  $c_d$ . Dies spricht für eine gute geometrische Justage. Bei den Experimenten mit  $P_{L,e} = 5,2$  W konnte bereits eine leichte Degradation der NEXTEL-Beschichtung festgestellt werden. Hierdurch nahm  $\alpha_L$  ab. Die Auswirkungen auf  $\epsilon_{IR}$  sind dagegen nicht von Bedeutung, da sich die Bereiche, in denen die Temperaturmessung zur Auswertung und die Anregung erfolgen, nicht überschneiden. Um diese experimentelle Gegebenheit in der Simulation zu modellieren, wurde die absorbierte Laserleistung niedriger angesetzt. Bei einer Leistung von  $P_{L,a} = 4,9$  W kann eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Dies entspricht einem um 6% verringerten Absorptionskoeffizienten. Die angegebenen Fehler wurden unter Berücksichtigung der Wiederholgenauigkeiten der Einzelmessungen sowie der Übereinstimmung von Experiment und Simulation abgeschätzt.

$C_z$	Experiment $P_L = 0,9$ W		Simulation $P_L = 0,9$ W	Experiment $P_L = 5,2$ W		Simulation $P_L = 4,9$ W
	$c_d$ (K)	$c_a$ (K)	$c_d$ (K)	$c_d$ (K)	$c_a$ (K)	$c_d$ (K)
1 mm	$0,30 \pm 0,06$	0,003	0,244	$1,5 \pm 0,3$	0,001	1,35
2 mm	$0,54 \pm 0,11$	0,004	0,502	$2,7 \pm 0,5$	0,02	2,79
3 mm	$0,66 \pm 0,13$	0,01	0,642	$3,5 \pm 0,7$	0,008	3,55
4 mm	$0,74 \pm 0,15$	0,003	0,706	$4,0 \pm 0,8$	0,02	3,83

Tabelle 5.2: Experimentell und aus FEM-Simulation ermittelte Werte des Parameters  $c_d$  für rechtwinklige Risse ( $\alpha = 0$ ) unterschiedlicher Tiefen  $C_z$  für zwei Laserleistungen  $P_L$ . Als Maß für experimentelle Justagefehler wurde auch  $c_a$  berechnet. Dieser Wert ist signifikant kleiner als die für  $c_d$  geschätzten absoluten Fehler.  $P_L$  entspricht für die experimentellen Werte der emittierten Leistung. Die direkten Ergebnisse der zugrunde liegenden Messung an RP02 werden in Abbildung 5.24 gezeigt.

Für die Untersuchung von schrägen Rissen wurden Experimente am Probekörper RP04 durchgeführt, dessen Oberfläche sandgestrahlt ist. Die Emissivität im Wellenlängenbereich der eingesetzten Kamera wurde zu  $\epsilon_{IR} = 0,6$  ermittelt (siehe Unterabschnitt 5.2.1). Da dieser Wert hauptsächlich durch die Geometrie der Oberfläche bestimmt wird, kann auch für den Absorptionskoeffizienten im Wellenlängenbereich des Laser  $\alpha_L = 0,6$  angesetzt werden. Für die Simulationen entspricht dies einer effektiven Laserleistung von  $P_{L,a} = \alpha_L \cdot P_{L,e} = 6$  W. Das zeitliche Verhalten der experimentellen Größen wird in Abbildung 5.25 dargestellt. Tabelle 5.3 zeigt die daraus abgeleiteten Größen  $c_d$  und  $c_a$  im Vergleich zu Ergebnissen aus den Simulationen. Es zeigt sich deutlich, dass  $c_d$  in erster Linie von der Risstiefe  $C_z$  abhängt und nur geringfügig mit dem Winkel  $\alpha$  ansteigt. Der Parameter  $c_a$  steigt hingegen

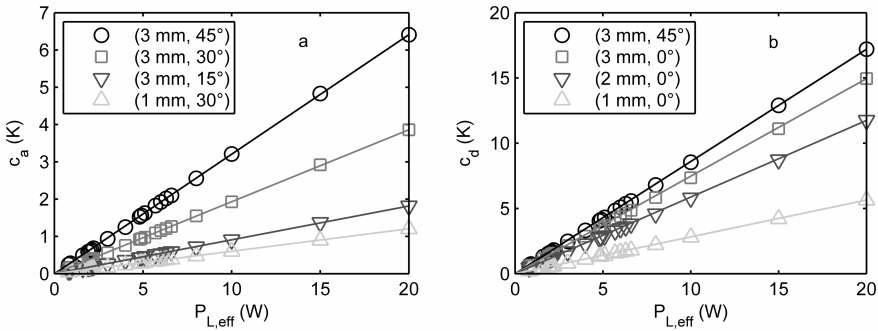


Abbildung 5.28: Einfluss der Anregungsleistung  $P_L$  auf die Parameter  $c_a$  (Diagramm a) und  $c_d$  (Diagramm b). In den Legenden sind die Rissparameter als Wertepaare  $(C_z, \alpha)$  angegeben. Die betrachteten Parameter skalieren linear mit der Laserleistung.

sowohl mit  $C_z$  als auch mit  $\alpha$ . Es kann eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation festgestellt werden. Dabei kommt es aber bei der Simulation für  $c_a$  zu einer systematischen Abweichung hin zu kleineren Werten, wobei aber die relativen Abweichungen wieder sämtlich kleiner als 20% sind.

### 5.3.3 Einfluss der Anregungsleistung

Anhand der Simulationen soll der Einfluss der Leistung der Anregung  $P_L$  auf die Parameter  $c_a$  und  $c_d$  untersucht werden. Die Wärmeleitung folgt Gleichung 2.10, die hier nochmal genannt werden soll:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q.$$

Hierbei bezeichnet  $q$  den Wärmefluss pro Volumen, es gilt also  $q \propto P_L$ . Bei den Ableitungen handelt es sich um lineare Abbildungen, sie sorgen also für eine lineare Abhängigkeit der Temperatur und somit  $c_d$  und  $c_a$  von  $P_L$ . Für die Simulationen wurden für die Materialparameter  $c_p = c_p(T)$  und  $\lambda = \lambda(T)$  tatsächliche Messwerte verwendet, die hochgradig nichtlinear von der Temperatur abhängen (siehe Abbildung 5.17).

In Abbildung 5.28 sind Werte für die Parameter  $c_d$  und  $c_a$  für jeweils vier unterschiedliche Geometrien gegen die Anregungsleistung  $P_L$  in einem Bereich von 0,5 W bis 20 W aufgetragen. Dabei wurde eine besonders enge Abstufung in den Bereichen um 1 W und 6 W gewählt, in dem Experimente durchgeführt wurden. Es zeigt sich jeweils eine lineare Abhängigkeit von  $P_L$ . Daher können die Parameter als reduzierte Größen

$$c_d^* = c_d / P_L \quad \text{und} \quad (5.19)$$

$$c_a^* = c_a / P_L \quad (5.20)$$

geschrieben werden. So wird eine Darstellung der Ergebnisse unabhängig von der eingesetzten Anregungsleistung möglich. Die Einheit der reduzierten Größen  $[a_d^*] = [c_a^*] = 1 \text{ K/W}$  entspricht nun gerade der eines thermischen Widerstands (siehe Gleichung 2.7).

$C_z$	$\alpha$	$c_d$ (K)		$c_a$ (K)	
		Experiment	Simulation	Experiment	Simulation
1 mm	30°	1,7 ± 0,3	1,47	0,37 ± 0,07	0,335
3 mm	15°	4,2 ± 0,8	4,23	0,73 ± 0,15	0,511
3 mm	30°	4,3 ± 0,9	4,46	1,2 ± 0,3	1,09
3 mm	45°	4,6 ± 0,9	4,84	2,2 ± 0,4	1,83

Tabelle 5.3: Experimentell und aus numerischer Simulation ermittelte Werte der Parameter  $c_d$  und  $c_a$  für Risse mit variierenden Werten für Tiefe  $C_z$  und Winkel  $\alpha$ . Im Experiment wurde eine emittierte Laserleistung von  $P_{L,e} = 10 \text{ W}$  verwendet, in den Simulationen ein Energieeintrag von  $P_{L,a} = 6 \text{ W}$ . Die direkten Ergebnisse der zugrunde liegenden Messung werden in Abbildung 5.25 gezeigt.

Da für den Probekörper RP02 experimentelle Ergebnisse von Messungen mit zwei unterschiedlichen Anregungsleistungen vorliegen (siehe Tabelle 5.2), sollen auch diese zur Überprüfung des hier gefundenen linearen Zusammenhanges herangezogen werden. In Tabelle 5.4 ist der reduzierte Parameter  $C_z/P_{L,a}$  für die Daten aus Tabelle 5.2 dargestellt. Die Werte für eine Risstiefe  $C_z$  sind jeweils gleich, was die aus Abbildung 5.28 abgeleitete Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen  $c_a$  und  $P_{L,a}$  auch für experimentelle Daten bestätigt. Außerdem zeigt sich an den gleichen experimentellen Ergebnissen für unterschiedliche Anregungsleistungen die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Experimente im Rahmen der angegebenen Fehlergrenzen.

$C_z$	Experiment		Simulation
	$P_{L,a} = 0,9 \text{ W}$ $c_d/P_{L,a}$	$P_{L,a} = 4,9 \text{ W}$ $c_d/P_{L,a}$	$c_d/P_{L,a}$
1 mm	0,33 ± 0,07	0,31 ± 0,06	0,276
2 mm	0,60 ± 0,12	0,55 ± 0,10	0,570
3 mm	0,73 ± 0,14	0,71 ± 0,14	0,724
4 mm	0,82 ± 0,17	0,82 ± 0,16	0,781

Tabelle 5.4: Reduzierter Parameter  $c_d/P_{L,a}$  für an RP02 gemessene experimentelle und simulierte Daten (siehe Tabelle 5.2 für Rohdaten). Die Werte für eine Risstiefe  $C_z$  sind jeweils gleich, was die aus Abbildung 5.28 abgeleitete Annahme eines linearen Zusammenhanges zwischen  $c_d$  und  $P_{L,a}$  bestätigt.

### 5.3.4 Einfluss der Rissklaffung

Der Einfluss der Rissklaffung wurde mit zweidimensionalen Simulationen untersucht, um mit vertretbarem Rechenaufwand auch die Geometrie von Rissen mit Klaffungen im Mikro-

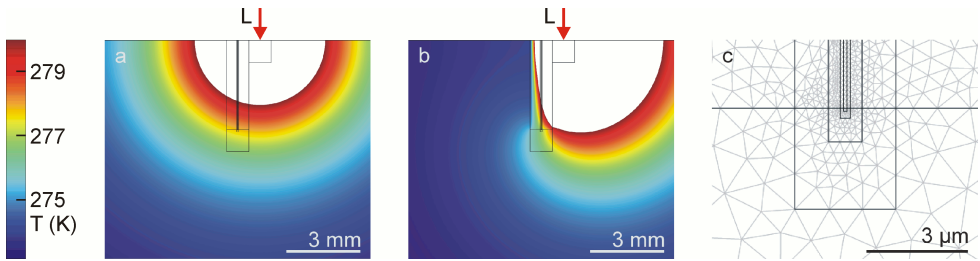


Abbildung 5.29: Ergebnisse von zweidimensionalen FEM-Simulationen zum Einfluss der Rissklaffung. Die Abbildungen a und b zeigen beispielhaft die sich ergebende Temperaturverteilung bei  $t = 2$  s (am Ende der Anregung), für den Fall ohne Riss (a) und für eine Klaffung von  $C_x = 3 \mu\text{m}$ . Der Ort der Anregung ist mit L gekennzeichnet, weiße Gebiete haben Temperaturen  $> 280$  K. In Abbildung c sind das Gitter und die einzelnen Domänen gezeigt, die definiert werden mussten, damit der *meshing*-Algorithmus konvergiert.

meterbereich modellieren zu können. Die hier verwendete Geometrie entspräche im Dreidimensionalen der Anregung mit einer Linie. Es wurden Simulationen für quaderförmige Risse mit einer Tiefe von  $C_z = 4$  mm und Klaffungen von  $C_x = 1$  mm; 0,1 mm; 30  $\mu\text{m}$ ; 10  $\mu\text{m}$ ; 3  $\mu\text{m}$ ; 1  $\mu\text{m}$ ; 0,5  $\mu\text{m}$ ; 0,25  $\mu\text{m}$  durchgeführt. Die Anregung wurde entsprechend den dreidimensionalen Simulationen auf einer Länge von 1 mm mit einem Abstand ihres Mittelpunktes zum Riss von 1 mm modelliert (siehe Abbildung 5.29, mit L bezeichnet). Dabei wurde eine Leistungsdichte entsprechend  $1 \text{ MW/m}^2$  für eine Dauer von 2 s angesetzt.

Als *meshing*-Algorithmus<sup>10</sup> ist in der verwendeten FEM-Software comsol ein *advanced-front-mesher* implementiert [194, 205]. Bei Geometrien mit einem Aspektverhältnis ab etwa 100:1 konvergiert dieser Algorithmus nicht mehr. Um das hier gewünschte Aspektverhältnis von über 1000:1 trotzdem mit der vorhandenen Software handhaben zu können, musste die Geometrie, genauer die Subdomänen, zur Unterstützung des Algorithmus geeignet gewählt werden. Es wurden für alle Rissweiten ineinander geschachtelte Domänen definiert, die jeweils am unteren Ende zusätzlich um ein Quadrat mit einer der Rissweite entsprechenden Kantenlänge ergänzt wurden (siehe Abbildung 5.29 c). Auf den Randflächen wurden nun die Größe der Gitterelemente entsprechend der Rissweite als Startwert für den *meshing*-Algorithmus fest vorgegeben, der auf diese Weise sicher konvergierte. Die jeweiligen Rissweiten werden nun durch die Definition der Materialeigenschaften für die einzelnen Subdomänen (Stahl oder Luft) über ein gemeinsames Gitter realisiert. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass keine Gittereffekte die Vergleichbarkeit der Simulationen beeinflussen können.

Bei engen geometrischen Begrenzungen bildet sich keine Konvektion aus. Daher kann bei solchen Geometrien die Wärmeleitung durch die Luft wie Wärmeleitung in einem Festkörper behandelt werden. Für die in diesem Unterabschnitt gezeigten FEM-Simulationen wurden für die Probekörper die temperaturabhängigen Werte aus Abschnitt 5.2.1 eingesetzt. Für die Luft innerhalb des Risses wurden folgende Werte verwendet [194]:

<sup>10</sup>Algorithmus zum Generieren der Gitter.

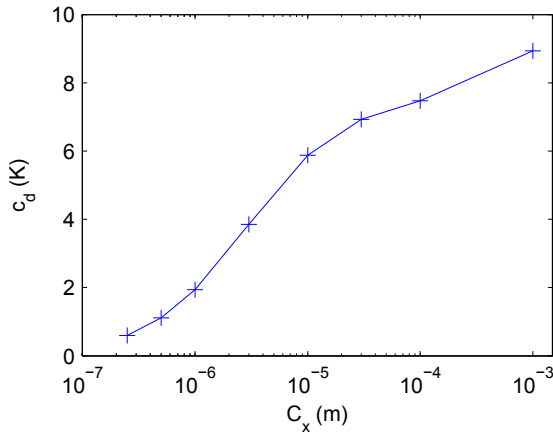


Abbildung 5.30: Vergleich der Ergebnisse der zweidimensionalen FEM-Simulationen. Aufgetragen ist der tiefensensitive Parameter  $c_d$  gegen die Rissklaffung  $C_x$  in einem einfachlogarithmischem Diagramm.

- Dichte:  $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$ .
- Wärmekapazität:  $c_p = 1005 \text{ J/(kg K)}$ .
- Wärmeleitfähigkeit:  $\lambda = 0,0261 \text{ W/(m K)}$ .

In Abbildung 5.29 finden sich in den Darstellungen a und b die berechneten Temperaturverteilungen für  $t = 2 \text{ s}$ , also direkt zum Ende der Anregung. In a ist der ungestörte Fall, als Grenzfall für eine Klaffung von  $C_x = 0 \text{ mm}$ , dargestellt. In b findet sich das Ergebnis für einen Riss mit  $C_x = 3 \text{ }\mu\text{m}$  bei sonst identischen Parametern und insbesondere auch identischem Gitter. Hier lässt sich deutlich die durch den thermischen Widerstand des Risses verursachte Asymmetrie der Wärmeverteilung erkennen.

Um die Asymmetrie zu quantifizieren wurde der Parameter  $c_d$  mittels des in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Algorithmus berechnet, der hier auf den zweidimensionalen Fall angepasst wurde. Die so erhaltenen Ergebnisse lassen sich zwar nur qualitativ mit denen aus dem dreidimensionalen Fall vergleichen. Ein quantitativer Vergleich der Simulationsergebnisse für die unterschiedlichen Rissklaffung untereinander ist aber zulässig und kann auf den dreidimensionalen Fall für die hier untersuchten Geometrien direkt übertragen werden [206].

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse zeigt Abbildung 5.30 ein einfach logarithmisches Diagramm, in dem  $c_d$  gegen die Klaffung  $C_x$  aufgetragen ist. Für Klaffungen über  $10 \text{ }\mu\text{m}$  ergeben sich nur geringe Abweichungen. So ergibt sich für  $C_x = 10 \text{ }\mu\text{m}$  nur ein um 20% kleinerer Wert für  $c_d$  als für  $C_x = 100 \text{ }\mu\text{m}$ , also einen um den Faktor 10 weiteren Riss. Der

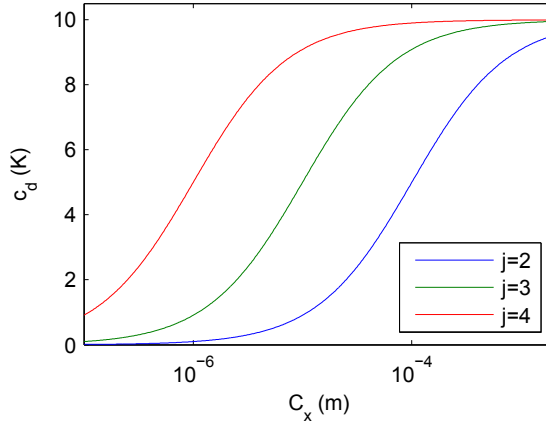


Abbildung 5.31: Einfaches Modell für  $c_d(C_x)$ . Die Kurven wurden nach Gleichung 5.22 mit  $p_1 = 10^j \cdot 10 \text{ K}$ ,  $p_2 = 0,01 \text{ m}$  und  $p_3 = 10^j$  und Werten für  $j$  zwischen 2 und 4 berechnet. Das qualitative Verhalten entspricht in etwa dem anhand der FEM-Simulationen erwarteten (siehe Abbildung 5.30).

Unterschied von  $C_x = 1 \text{ mm}$  zu  $C_x = 0,1 \text{ mm}$  fällt sogar noch geringer aus, er beträgt nur 16%. Bei kleineren Rissweiten hingegen stößt dieses Verfahren an seine Grenzen. Zwischen  $10 \text{ }\mu\text{m}$  und  $1 \text{ }\mu\text{m}$  Klaffung ändert sich  $c_d$  um den Faktor 3.

Dieses Verhalten lässt sich am besten verstehen, wenn man den thermischen Widerstand  $R_{\text{th,g}}$ , der die Erwärmung der dem Laserspot gegenüberliegenden Seite behindert, als Näherung in zwei Anteile zerlegt:

$$R_{\text{th,g}} = \frac{1}{1/R_{\text{th,Riss}} + 1/R_{\text{th,Um}}} . \quad (5.21)$$

Dabei bezeichnet  $R_{\text{th,Riss}}$  den thermischen Widerstand des Risses und  $R_{\text{th,Um}}$  den der Umgebung. Der Parameter  $c_d$  lässt sich nun als Maß für die Differenz aus zwei thermischen Widerständen verstehen. Nämlich dem des Materials zwischen Referenzgebiet und Laserposition auf der ungestörten, also der dem Riss abgewandten, Seite  $R_{\text{th,ref}}$  und dem der gestörten, also dem Riss zugewandten, Seite  $T_{\text{th,g}}$ . Der Wert von  $R_{\text{th,ref}}$  ist konstant, während  $T_{\text{th,g}}$  von der Geometrie des Risses abhängig ist. Betrachtet man nun nur die Klaffung  $C_x$  als variabel, so wird der thermische Widerstand des Risses hauptsächlich durch die Wärmeleitung der Luft im Riss bestimmt. Es gilt also  $R_{\text{th,Riss}} \approx \text{const} \cdot C_x$ . Das gesamte Verhalten lässt sich demnach durch eine Gleichung der folgenden Form beschreiben:

$$c_d(C_x) \approx \frac{p_1}{p_2/C_x + p_3} . \quad (5.22)$$



Für Risse ab einer gewissen Klaffung  $C_{x,\text{krit}}$  gilt nun  $R_{\text{th,Riss}}(C_x > C_{x,\text{krit}}) \gg R_{\text{th,Um}}$ , der Beitrag der Wärmeleitung durch den Riss lässt sich also vernachlässigen. Für Risse sehr geringer Klaffung gilt dann  $R_{\text{th,Riss}}(C_x \ll C_{x,\text{krit}}) \approx R_{\text{th,Um}}$  oder sogar  $R_{\text{th,Riss}} \ll R_{\text{th,Um}}$ . Diese kritische Klaffung  $C_{x,\text{krit}}$ , ab der die Leitung über den Riss einen maßgeblichen Einfluss hat, wurde hier bestimmt. Da die tatsächliche Wärmeleitung sehr viel komplizierter ist, wurden FEM-Simulationen verwendet. Aber auch dieses einfache Modell führt zum richtigen qualitativen Verhalten, wie Abbildung 5.31 veranschaulicht. Das qualitative Verhalten entspricht in etwa der durch die FEM-Simulationen erwarteten (siehe Abbildung 5.31).

### 5.3.5 Parametervariation und Extrapolation

Ein großer Vorteil der FEM Simulation liegt darin, dass sich Variationen von geometrischen Parametern sehr viel leichter als im Experiment untersuchen lassen. Für ein besseres Verständnis vom Einfluss des Risswinkels  $\alpha$  und der Risstiefe  $C_z$  auf die Größen  $c_d$  und  $c_a$  wurden rund 80 Simulationsdurchgänge im Wertebereich  $\alpha \in [0^\circ, 70^\circ]$  und  $C_z \in (0 \text{ mm}, 4 \text{ mm}]$  gerechnet. Der Zeitaufwand für die Berechnung lag bei etwas über 3 Tagen auf dem verwendeten 8-Kern Rechner.

Als Ergebnis dieser Rechnungen sind in Abbildung 5.32 die Größen  $c_d^* = c_d/P_{L,a}$  (a) und  $c_a^* = c_a/P_{L,a}$  (b) gegen  $\alpha$  und  $C_z$  als Oberflächen in dreidimensionalen Diagrammen aufgetragen. Die Kreuzungspunkte der eingezeichneten Linien entsprechen den Stützpunkten, also jeweils einem Simulationsdurchlauf. Hier zeigen sich deutlich die schon zuvor festgestellten Abhängigkeiten, wobei diese jetzt genauer beschrieben werden können:

$c_d$ : Der Parameter  $c_d$  hängt hauptsächlich von der Risstiefe ab. Ein maßgeblicher Einfluss des Winkels kann erst für  $C_z > 40^\circ$  festgestellt werden. Hier kommt es bei kleinen Risstiefen  $C_z < 2 \text{ mm}$  zu einer leichten Abnahme von  $c_d$  mit wachsendem  $\alpha$ , bei großen Tiefen von  $C_z > 3 \text{ mm}$  zu einer starken Zunahme. Dieses Verhalten lässt sich durch die Lage der Laserposition erklären: Bei großen Winkeln und Tiefen liegt der Riss komplett unterhalb des Laser, die Wärmeleitung erfolgt also über eine längere Strecke. Bei kleinen Tiefen  $C_z < 1 \text{ mm}$  nimmt die Strecke, über die die Wärme geleitet werden muss, hingegen ab.

$c_a$ : Der Parameter  $c_a$  nimmt wie erwartet nur für nicht senkrechte Risse Werte ungleich Null an. Er steigt für jede feste Risstiefe  $C_z$  mit dem Risswinkel  $\alpha$  und für jedes feste  $\alpha \neq 0$  mit  $C_z$ . Dabei zeigt sich ein streng monotonen Verhalten. Bei der hier verwendeten Definition gibt das Vorzeichen von  $c_a$  die Neigungsrichtung des Risses an. Für  $\alpha < 0$  ergeben sind also Werte  $C_z < 0$ . Es gilt hierbei aus Symmetriegründen  $c_a(\alpha) = -c_a(-\alpha)$ .

Zusätzlich sind in den Diagrammen a und b in Abbildung 5.32 die aus den experimentellen Daten in den Tabellen 5.2 und 5.3 berechneten reduzierten Parameter  $c_d^*$  bzw.  $c_a^*$  als stecknadelförmige Datenpunkte eingetragen. Zu beachten ist hierbei, dass im Diagramm a die Datenpunkte für  $\alpha = 0^\circ$  doppelt vorhanden sind, da Messungen mit zwei

Anregungsleistungen zugrunde liegen. Die Daten für Messungen mit unterschiedlichen Anregungsleistungen entsprechen sich (siehe auch Tabelle 5.4). Zudem lässt sich wieder eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation feststellen.

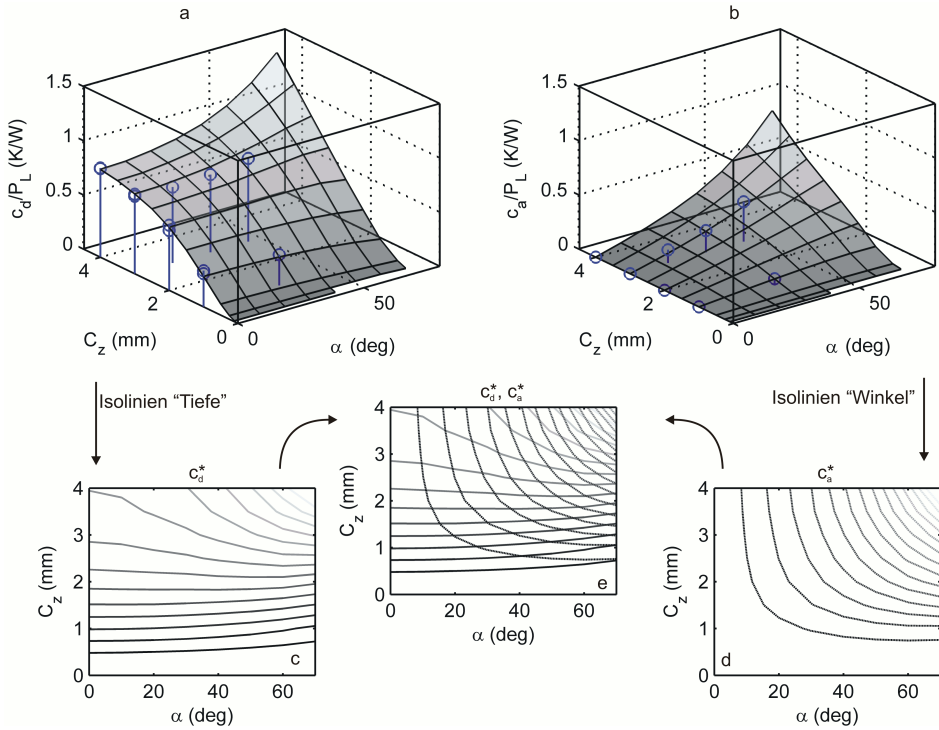


Abbildung 5.32: Ergebnisse der FEM-Simulationen:  $c_d^* = c_d/P_L$  (a) und  $c_a^* = c_a/P_L$  (b) sind als Funktionen von  $C_z$  und  $\alpha$  aufgetragen. Die Fläche zeigt die simulierten Daten, wobei die Kreuzungspunkte der eingezeichneten Linien jeweils einem Simulationsdurchlauf entsprechen. Die stecknadelförmigen Datenpunkte entsprechen den Experimenten. Aus den Oberflächen wurden zusätzlich Isolinien generiert (c und d). An der Darstellung von  $c_d^*$  und  $c_a^*$  in einem gemeinsamen Diagramm e lässt sich ablesen, dass jedes Paar von je einer Linie für  $c_d^*$  und einer für  $c_a^*$  nur einen Schnittpunkt hat. Aus  $c_a^*$  und  $c_d^*$  lassen sich also  $C_z$  und  $\alpha$  gleichzeitig eindeutig bestimmen.

Um das Verhalten von  $c_d^*$  und  $c_a^*$  noch besser einordnen zu können, findet sich in Abbildung 5.32 c und e eine Darstellung der auch in a und b gezeigten Daten aus der Simulation als Isolinien. Eine Linie entspricht also jeweils einem festen Wert von  $c_d^*$  bzw.  $c_a^*$ . Da kein kontinuierlicher Datensatz für diese Parameter vorliegt, wurden die Werte zwischen den Stützpunkten wie auch für die Darstellung der Oberflächen in den Diagrammen a und b linear interpoliert.

Interessant ist nun die Fragestellung, ob sich zu einem gegebenen Wertepaar von  $c_d^*$  und  $c_a^*$  aus einer Messung eindeutig die Risstiefe  $C_z$  und der Risswinkel  $\alpha$  zuordnen lassen. Um hierauf eine Antwort geben zu können, sind in Diagramm d die Isolinien für  $c_d^*$  und  $c_a^*$  gemeinsam aufgetragen. Jedes Paar von jeweils einer Linie aus jeder der beiden Gruppen hat genau einen Schnittpunkt. Das Ergebnis einer einzelnen Messung entspricht in dieser Darstellungsform nun genau jeweils einer Isolinie für  $c_d^*$  und einer für  $c_a^*$ . Da es nur einen Schnittpunkt gibt, lassen sich aus diesen Parametern Risswinkel und Risstiefe eindeutig ermitteln.

Es lässt sich noch eine weitere, für den praktischen Einsatz wichtige Folgerung aus der gezeigten Parametervariation ziehen. Bei konkreten Prüfproblemen soll nur selten die genaue Geometrie einer Fehlstelle ermittelt werden. Entscheidend ist meist, ob ein bestimmter, in Normen oder anderen relevanten Regularien definierter, Schwellwert erreicht wird, also ob Risse z.B. eine gewisse Eindringtiefe übersteigen. Ab diesem Schwellwert ist die Anzeige dann erst als Fehler zu werten. Soll nun das hier vorstellte Verfahren für eine solche Fehlerbewertung genutzt werden, kann man sich das über weite Winkel- und Tiefenbereiche monotone Verhalten von  $c_d^*$  und  $c_a^*$  zu Nutze machen. Es würde ausreichen, einen Testfehler mit genau der kritischen Tiefe herzustellen. Bei allen weiteren Messungen ließen sich nun die vermessenen Fehleranzeigen im Vergleich zu dem Referenzfehler einordnen, es könnte also die Aussage getroffen werden, ob sie als Fehler zu werten sind.

## 5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Eignung der optisch angeregten Thermografie zur Detektion und Charakterisierung von vertikalen Fehlstellen untersucht, wie sie häufig in der Form von offenen Oberflächenrissen vorkommen.

Im Abschnitt 5.1 wurden zwei Verfahren zur Risserkennung vorgestellt. Die Ergebnisse aus Unterabschnitt 5.1.1 zeigen, dass sich die geometriebedingten optischen Eigenschaften von Rissen zu deren Erkennung ausnutzen lassen, wenn das Auflösungsvermögen der verwendeten IR-Kamera in der Größenordnung der Risssklaffung liegt. Da die Risse eine Emissivität von nahezu 1 zeigen, lässt sich dieses Verfahren prinzipiell nur an Prüfobjekten mit einer Emissivität von deutlich unter 1 anwenden.

Ein Verfahren, welches den thermischen Widerstand von Rissen ausnutzt - also nur indirekt von der Risssklaffung an der Oberfläche abhängt, wurde im Unterabschnitt 5.1.2 entwickelt. Hierzu wird die Probe mittels eines Lasers lokal angeregt, wobei die gesamte Probe sukzessive gradlinig mit dem Laserspot abgescannt wird. Befindet sich ein Riss in der Nähe des Laserspots, so wird die thermische Signatur des Lasers durch den anisotropen Wärmewiderstand beeinflusst. Am Ort des Risses selbst bildet sich ein Temperatursprung aus. Die Auswertung basiert auf Bildung der ersten räumlichen Ableitung und der Sortierung der resultierenden zeitaufgelösten Daten entlang der Zeitachse (siehe Abbildung 5.7). Es wurden Testmessungen an einem Schienenstück mit Rollkontaktermüdungsrissen durchgeführt und mit den Ergebnissen einer Magnetpulverprüfung verglichen (siehe Abbildung 5.14). Folgende Ergebnisse können dabei festgehalten werden:

- Mit der thermografischen Prüfung konnten alle Fehler nachgewiesen werden, die bei dem Referenzverfahren, der Magnetpulverprüfung, zu Anzeigen führten.
- Es konnten Risse
  - in einem Abstand von unter 1 mm,
  - mit einer Klaffung im 10  $\mu\text{m}$ -Bereich,
  - mit einer Länge ab 1 mm,
  - bei einer Prüfgeschwindigkeit von 50  $\text{mm}^2/\text{s}$  und
  - bei einer Anregungsleistung von 5 W
 sicher detektiert werden.
- Die Ortsauflösung – ob also zwei Anzeigen getrennt registriert werden – ist durch die geometrische Auflösung der verwendeten IR-Kamera begrenzt.

Im Abschnitt 5.2 wurde ein Verfahren zur geometrischen Charakterisierung von Rissen vorgestellt. Es basiert auf einer quantitativen Vermessung des Einflusses des untersuchten Risses auf die thermischen Eigenschaften der Probe. Hierzu muss die Position des untersuchten Risses bereits bekannt sein. Dann wird die Probe ortsfest mittels Laser in einem definierten Abstand zum Riss erwärmt. Gleichzeitig wird die Temperatur bzw. Intensität in zwei Referenzgebieten betrachtet, die symmetrisch zum Laserspot liegen (siehe Abbildung 5.19). Aus der geeignet gemittelten Differenz zwischen den beiden Referenzgebieten lässt sich ein Parameter  $c_{d,i}$  gewinnen, der hauptsächlich auf die Risstiefe sensitiv ist (siehe Abschnitt 5.2.2). Wendet man dieses Verfahren auf beiden Seiten eines Risses an, lassen sich aus den so gewonnen Parametern zwei abgeleitete Größen berechnen. Der Mittelwert  $c_d$  der Ergebnisse beider Experimente hängt hauptsächlich von der Tiefe ab, die Differenz  $c_a$  hauptsächlich von Winkel, siehe Unterabschnitt 5.2.3.

Zur Überprüfung dieses Algorithmus wurden Experimente an metallischen Probekörpern mit funkenerodierten Nuten durchgeführt. So konnte die prinzipielle Eignung gezeigt werden. Folgende Punkte sind außerdem festzuhalten:

- Je näher der Laserspot am Riss positioniert wird, desto höher wird das Signal-Rausch-Verhältnis. Dabei muss jedoch eine direkte Beleuchtung des Risses vermieden werden.
- Da das vorgestellte Verfahren auf zeitlich und räumlich gemittelten Werten basiert, ist der Einfluss des intrinsischen Fehlers der Kamera sehr gering.
- Die Lage der Referenzgebiete muss genau justiert werden. Sie müssen symmetrisch zum Laserspot liegen.
- Bei einer Tiefe von 1 mm und einer Klaffung von 0,1 mm wirken sich Unsicherheiten in der angenommenen Rissposition von 0,1 mm in einem Fehler bei der Bestimmung der Risstiefe von ca. 10% aus.

Eine detailliertere Untersuchung des Einflusses von Risswinkel, -tiefe und -klaffung sowie der eingebrachten Energie wurde anhand von FEM-Simulationen durchgeführt. Die hierzu nötigen thermischen Materialparameter wurden experimentell ermittelt. Es konnte eine gute Übereinstimmung von Experimenten und FEM-Simulationen festgestellt werden, sodass weitere Aussagen anhand der Simulationen getroffen werden können:

- Die Parameter  $c_a$  und  $c_d$  zeigen eine lineare Abhängigkeit von der absorbierten Anregungsleistung  $P_{L,e}$ . Mit  $c_a^* = c_a/P_{L,e}$  und  $c_d^* = c_d/P_{L,e}$  lassen von  $P_{L,e}$  unabhängige Größen mit der Dimension eines thermischen Widerstands definieren.
- Der Parameter  $c_d^*$  hängt hauptsächlich von der Risstiefe  $C_z$  ab.
- Der Parameter  $c_a^*$  hängt von  $C_z$  und dem Risswinkel  $\alpha$  ab.
- Sowohl  $c_d^*$  als auch  $c_a^*$  verhalten sich nahezu monoton in Abhängigkeit von  $C_z$  und  $\alpha$ .
- Beide Parameter lassen sich gleichzeitig eindeutig bestimmen.
- Bei Klaffungen ab 10  $\mu\text{m}$  bewirkt eine Verzehnfachung der Klaffung eine Änderung von  $c_a^*$  bzw.  $c_d^*$  um lediglich rund 20%.

Bis auf den letzten Punkt basieren alle Aussagen auf experimentellen sowie numerischen Ergebnissen, der letzte Punkt wurde wegen technischer Einschränkung bei der Herstellung der Probekörper allein anhand von FEM-Simulationen ermittelt. Die durchgeführten Experimente zeigten bei einer Klaffung von 0,2 mm keinen Einfluss der Wärmeleitung über die Luft im Riss. Daraus lässt sich schließen, dass es sich bei den hier festgestellten Auswirkungen von Veränderung der Rissklaffung bei hohen Klaffungen von bis zu 1 mm um einen geometrischen Effekt handelt.

## 5.5 Diskussion

Es gibt diverse etablierte ZfP-Verfahren zur Risserkennung und -charakterisierung.

Die Magnetpulver- und Farbeindringprüfung werden im großen Maßstab zur Risserkennung eingesetzt. Hier können allerdings prinzipbedingt neben der Risslänge keine weiteren Geometrieinformationen gewonnen werden. Mit Ultraschall oder magnetischen Streufeldmessungen ist sowohl eine Rissdetektion als auch eine quantitative Charakterisierung der Geometrie möglich, allerdings unterliegen diese Einschränkungen bezüglich der prüfbareren Materialien. Die Ultraschallprüfung stößt im Fall von Materialien mit stark anisotropen elastischen Konstanten oder stark schallstreuenden Gefügestrukturen an ihre Grenzen. Für die magnetischen Verfahren bedarf es ferromagnetischer Materialien.

Die höchsten örtlichen Auflösungen bieten computerthomografische Röntgen-Verfahren. Mit einer Anlage der BAM Fachgruppe 8.3 können Risse ab einer Rissklaffung von 1 nm mit einer Ortsauflösung von 200 nm vermessen werden. Allerdings ist diese Technik wegen

der hohen Ansprüche an die Röntgenquelle auf Synchrotronstrahlung angewiesen, was sich nachteilig auf Kosten und Verfügbarkeit auswirkt<sup>11</sup>.

Um die in diesem Kapitel vorgestellten Resultate besser einordnen zu können, sei zunächst noch einmal auf die prinzipiellen Vor- und Nachteile der optisch angeregten Thermografie hingewiesen (eine ausführlichere Darstellung findet sich im Kapitel 2):

- Optisch angeregte Thermografie ist berührungslos. Da MWIR-Strahlung durch die Luft nur schwach gedämpft wird [8], ist der maximale Abstand nahezu ausschließlich durch die benötigten Optiken begrenzt.
- Der Grundlegende Mechanismus für den Fehlernachweis ist die Wärmeleitung. Daher erlauben die Volumeneigenschaften sämtlicher Festkörper eine Prüfung mittels Thermografie.
- Da sowohl für die Messung, als auch für die Anregung Strahlung genutzt wird, die nur mit der Oberfläche der Probe wechselwirkt, haben die Oberflächeneigenschaften einen großen Einfluss. Speziell zur geringe Emissions- bzw. Absorptionsgrade wirken sich äußerst nachteilig aus. Dieses Problem kann jedoch durch den Einsatz geeigneter, rückstandsfrei entfernbarer Beschichtungen umgangen werden, wobei dann aber der Vorteil der Berührungslosigkeit verloren geht.

Die Auswahl des optimalen Verfahrens für ein konkretes Prüfproblem hängt von vielen Faktoren ab, die nicht zwangsläufig rein technischer Natur sein müssen. Eine große Rolle können z.B. die Qualifikationen und Erfahrungen des Personals, bereits vorhandene Prüfeinrichtungen oder konkrete Forderungen aus der Normung spielen. Daher sollen die Ergebnisse dieses Kapitels im Weiteren in Bezug zu anderen thermografischen Verfahren diskutiert werden.

Bei der im Unterabschnitt 5.1.1 vorgestellten Möglichkeit, Risse über ihre optischen Eigenschaften zu erkennen, sind starke Einschränkungen zu beachten. Es ist auf Oberflächen niedriger Emissivität angewiesen. Außerdem muss das Auflösungsvermögen der IR-Kamera ausreichen, um die zu detektierenden Risse direkt abzubilden. Diese Einschränkung ergibt sich auch bei in der Literatur beschriebenen Abwandlungen dieses Verfahrens [79]. Im Idealfall lassen sich zur Prüfung auf andere Fehler aufgenommene Daten entsprechend auswerten, sodass zusätzlich Oberflächenrisse detektiert werden können. Thermografisch lassen sich Risse z.B. mittels *Flying Spot Camera* (FSC) ohne diese Einschränkungen nachweisen [81]. Bei diesem Verfahren lassen sich auch z.B. Kratzer und Risse klar unterscheiden [89]. Der Vorteil der hier vorgestellten Methode, Risse über ihre optischen Eigenschaften nachzuweisen, liegt nicht in der Nachweisfähigkeit, sondern in ihrer Einfachheit, da neben der IR-Kamera nur ein Infrarotstrahler benötigt wird. Daher liegt ein mögliches Einsatzszenario dieses Verfahrens in einer kombinierten Anwendung. Wenn z.B. für die Prüfung auf Delaminationen die optisch angeregte Lock-In oder Puls-Phasen-Thermografie eingesetzt wird [4], ließe sich eine Prüfung auf offene Oberflächendefekte leicht in den Messablauf integrieren. Dazu kann aus

---

<sup>11</sup>Homepage der BAM: [http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen\\_medien/unikale\\_pruef/upe\\_807\\_de\\_8-5.pdf](http://www.bam.de/de/service/publikationen/publikationen_medien/unikale_pruef/upe_807_de_8-5.pdf).

einem Thermogramm, das zu Beginn der Anregung aufgenommen wird, auf Emissivitätsunterschiede geschlossen werden. Aus deren Verteilung können eventuell vorhandene Fehler erkannt werden, jedoch ohne eine Aussage über deren Tiefe treffen zu können.

Ein auf den thermischen Eigenschaften basierendes Verfahren wurde im Unterabschnitt 5.1.2 gezeigt. Die Prüfergebnisse an einem Schienenstück mit Rollkontaktermüdungsrissen sind mit denen der Magnetpulverprüfung vom Bildeindruck her zumindest vergleichbar. Jedoch liefert das hier vorgestellte Verfahren ein deutlich höheres Signal-Rausch-Verhältnis und führt im Gegensatz zur Magnetpulverprüfung auch bei der Betrachtung von Linienprofilen noch zu signifikanten Fehleranzeigen, wodurch eine automatisierte Bewertung leicht über ein Schwellwertverfahren zu implementieren wäre. Der größte Vorteil gegenüber anderen Prüfmethoden liegt hier aber vor allem in dem prinzipiellen Vorteil der Thermografie, dass nahezu alle für sicherheitsrelevante Maschinenteile verwendete Materialien prüfbar sind. Die einzige für die Praxis bedeutsame Einschränkung ergibt sich hier durch zu geringe Emissivitäten im IR-Bereich, die sich jedoch durch vollständig wieder entfernbare Beschichtungen hoher Emissivität umgehen lässt. Weitere Einschränkungen könnten sich durch stark anisotrope Wärmeleitfähigkeiten ergeben, jedoch werden solche Materialien nur für sehr spezielle Einsatzfälle, wie z.B. Peltierelemente, verwendet. Auf den gleichen physikalischen Effekten beruht die bereits genannte *Flying Spot Camera* [81]. Auch mit dieser können Risse im mm-Abstand getrennt detektiert werden [89]. Die dabei erreichte Prüfgeschwindigkeit liegt mit einer Abtastgeschwindigkeit des Laser von 50 cm/s rund zehn mal so hoch wie bei dem hier vorgestellten Verfahren [84]. Der große Vorteil im Vergleich zur *Flying Spot Camera* liegt in der Verfügbarkeit der Prüfeinrichtungen. Bei den in der Literatur beschriebenen Aufbauten vom Typ der *Flying Spot Camera* handelt es sich um Prototypen, die auf eine genaue Synchronisation und Justage von Anregung und Messung angewiesen sind [81, 88]. Für das hier beschriebene Verfahren wird eine Infrarotkamera um einen Laserscanner ergänzt. Dabei ist keine Synchronisation erforderlich. Außerdem werden für die Auswertung der Daten keine zusätzlichen Informationen zur Positionierung des Laserspots benötigt. Der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus lässt sich leicht implementieren und er wird nachträglich auf einen Thermografie-Film angewendet. So kann auf kommerziell verfügbare IR-Kameras und Lasersysteme zurückgegriffen werden, ohne dass diese speziell angepasst werden müssten. Insbesondere, wenn bereits eine IR-Kamera zur thermografischen Prüfung vorhanden ist, ergibt sich hierdurch eine große Kostenersparnis. Beide Verfahren eignen sich zur Prüfung gekrümmter Oberflächen.

Von Li *et al.* wurde ebenfalls eine Methode vorgeschlagen, die eine IR-Kamera nutzt [98, 96, 99, 100, 101]. Die Machbarkeit wurde an metallenen Referenzprobekörpern mit Schwingungsrissen gezeigt. Hier erfolgt die Anregung pulsweise, Laser und Kamera sind fest positioniert und die Probe wird im Bezug hierzu schrittweise verfahren. Dazu ist eine genaue Synchronisation von Laser, Kamera und Verfahreinheit notwendig. Die Prüfgeschwindigkeit ist mit rund 0,7 cm/s deutlich geringer als die mit der in dieser Arbeit beschriebenen Methode erreichbaren 50 mm<sup>2</sup>/s (siehe Unterabschnitt 2.2.5 für eine genaue Bewertung der Ergebnisse bei Li *et al.* ). Außerdem wird in den genannten Arbeiten die Eignung zur Prüfung gekrümmter Oberflächen nicht gezeigt. Vermutlich würde hierzu eine aufwändige

Positioniereinheit benötigt, um den Abstand zwischen Probe und Kamera konstant halten zu können. Li *et al.* erweiterten ihre Methode auf eine linienförmige Anregung, wodurch die Prüfgeschwindigkeit deutlich erhöht werden konnte [101]. Dafür sind aber zwei zueinander rechtwinklige Scanvorgänge nötig, was die Zuordnung der geometrischen Positionen erschwert. So lässt sich die erreichbare Geschwindigkeit auf etwa  $10 \text{ mm}^2/\text{s}$  abschätzen, wozu aber bei dem gezeigten Aufbau noch der Zeitaufwand für ein Umspannen der Probe hinzuzurechnen wäre.

Zu der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Bestimmung von geometrischen Parametern von offenen Oberflächenrissen findet sich in der Literatur keine direkte Entsprechung. Der hier gezeigten Herangehensweise am ähnlichsten ist die von Li *et al.* vorgestellte Methode der Risserkennung mit gepulster Laserthermografie, wobei die Anregung mit 50 ms deutlich kürzer ausfällt. Dafür erfolgt die Auswertung über eine Gradientenbildung, es werden also nur die Temperaturen direkt neben dem Riss zu dessen Charakterisierung herangezogen. Interessant ist hier vor allem der Einfluss der Rissklaffung. Zwar wurde bei Li *et al.* zuerst vermutet, dass Aussagen über die Rissklaffung getroffen werden könnten [98], die sich in einer Arbeit auch auf experimentelle Befunde stützen [108]. Allerdings kann hier eine gleichzeitige Veränderung der Risstiefe nicht ausgeschlossen werden. In weiteren Veröffentlichungen über die gleiche Methode wurde dieser Ansatz jedoch nicht weiter verfolgt [96, 99, 100]. Dafür finden sich in diesen Arbeiten systematische Untersuchungen mittels FEM-Simulationen, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führten. Betrachtet wird jeweils die Temperaturdifferenz zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten auf beiden Seiten des Risses. Dabei wurden, entsprechend den Angaben in den verschiedenen Veröffentlichungen, nur bis zu einer Klaffung zwischen  $C_x = 1 \text{ }\mu\text{m}$  [96] bzw.  $C_x = 20 \text{ }\mu\text{m}$  [96] Einflüsse auf die Ergebnisse festgestellt. Dies deckt sich weitgehend mit den hier gezeigten Ergebnissen, dass der Einfluss der Klaffung ab  $C_x \geq 10 \text{ }\mu\text{m}$  vernachlässigt werden kann.

Außerdem wurde bei Li *et al.* der Einfluss der Risstiefe untersucht. Hier wurden bei Tiefen über  $C_z = 1 \text{ mm}$  keine merklichen Einflüsse mehr festgestellt. In dieser Arbeit hingegen konnten Änderungen in der Tiefe von 3 mm auf 4 mm sicher detektiert werden. Als Begründung hierfür kommen die kleineren Abstände zum Riss sowie die deutlich kürzere Anregungszeit in Betracht. Für den eindimensionalen Fall nimmt die Zeit, nach der eine gegebene Temperaturänderung erreicht wird, quadratisch mit dem Abstand zu [18]. Es konnte dort zudem ein gewisser Einfluss der Risslänge bei Längen in der Größenordnung der Tiefe festgestellt werden. In sämtlichen genannten Arbeiten wurden nur senkrechte Risse betrachtet.

Für die Thermografie mit Induktionsanregung existiert eine Arbeit, in der die Abhängigkeit des thermischen Signals von der Risstiefe untersucht wurde [115]. Die Messung erfolgte an einem Probekörper mit Sägeschnitten in Tiefen von 0,2 mm bis 2 mm. Bis zu einer Tiefe von 0,8 mm wurde bei sonst identischen Parametern ein fast linearer Zusammenhang gefunden, sodass eine Auflösung der Tiefe mit einem Fehler kleiner 0,2 mm möglich erscheint. Tiefen von 1,6 mm und 2 mm konnten nicht mehr getrennt werden, die Abhängigkeit zeigt hier ein Sättigungsverhalten. Es fand jedoch keine Untersuchung weiterer Einflussgrößen statt, sodass die Ergebnisse sich nur schwerlich übertragen lassen. So bleibt festzuhalten, dass die



dort gezeigte Methode, vor allem unter Berücksichtigung der prinzipiellen Einschränkungen der Induktionsanregung, keine Vorteile gegenüber dem in dieser Arbeit verfolgten Ansatz zu haben scheint. Winkel- aber keine Tiefenabhängigkeiten wurden von Abidin *et al.* untersucht [117]. Hier konnten anhand der Form der thermischen Signatur drei unterschiedliche Winkel mittels induktionsangeregter Thermografie unterschieden werden, auf Grundlage von FEM-Simulation scheint ein Auflösungsvermögen im  $1^\circ$ -Bereich erreichbar – bei konstanter Risstiefe.

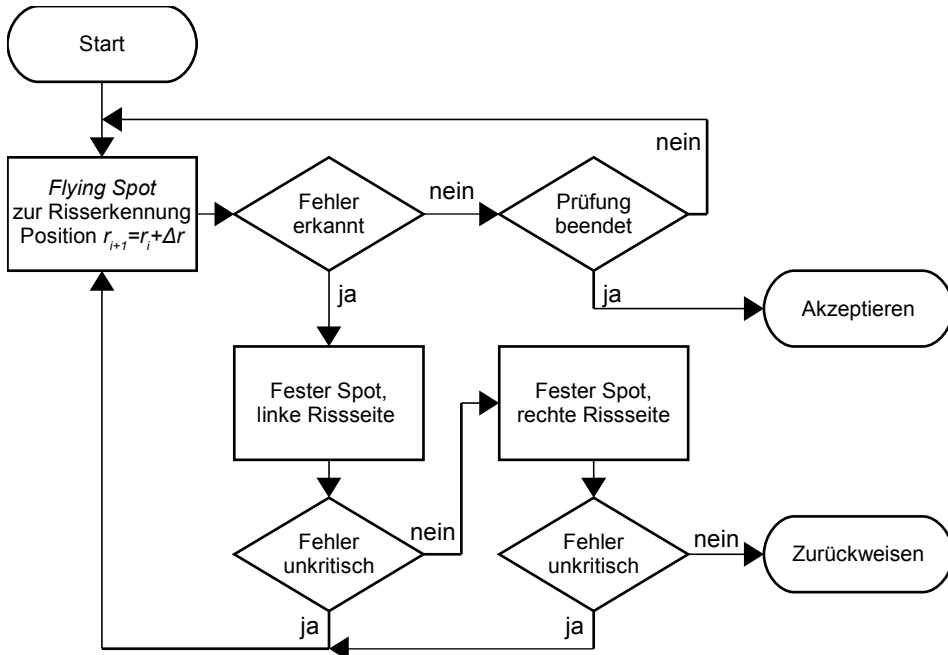


Abbildung 5.33: Flussdiagramm einer möglichen Integration der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren zur Risserkennung und -charakterisierung.

Mit den in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren ist also eine nahezu materialunabhängige berührungslose Detektion und Charakterisierung von Rissen möglich. Dabei stellen insbesondere die erreichbaren Auflösungen bei der Charakterisierung und die einfache experimentelle Realisierungsmöglichkeit der Rissdetektion eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen thermografischen Verfahren dar. Wie bei allen auf radiometrischer Temperaturmessungen basierten Verfahren kann es bei Prüfobjekten mit zu geringer oder zu inhomogener Emissivität notwendig sein, diese mit einer emissivitätssteigernden Beschichtung zu versehen. Die beiden laserbasierten Verfahren zur

Risserkennung und -charakterisierung verwenden die gleichen Geräte. Ein Flussdiagramm für einen möglichen Ablauf der Integration dieser Verfahren in eine gemeinsame Prüfprozedur ist in Abbildung 5.33 gegeben. Hier wird die Flying-Spot-Thermografie zur Detektion vom Rissen genutzt. Wird ein Riss gefunden, wird sukzessive auf beiden Seiten des Risses ortsfest angeregt, um zu überprüfen, ob es sich um einen kritischen Fehler handelt. So wäre eine automatisierte schnelle Prüfung bei gleichzeitiger quantitativer Charakterisierung der gefundenen Fehlstellen möglich.

## Kapitel 6

# Zusammenfassung und Diskussion

In dieser Arbeit wurden thermografische Prüfverfahren für zwei gänzlich unterschiedliche Klassen von Prüfproblemen – Schweißpunkte und Oberflächenrisse – entwickelt. Im Folgenden soll nach kurzer Zusammenfassung der Methoden die gemeinsame physikalische Grundlage aufgezeigt werden. Nachfolgend werden beide Methoden kurz im Bezug auf den Stand der Technik eingeordnet und im Ausblick mögliche Einsatzszenarien diskutiert. Für eine detailliertere Diskussion der Verfahren sei jeweils auf die letzten Abschnitte in den Kapiteln 4 und 5 verwiesen.

### 6.1 Zusammenfassung

Zum einen wurde im Kapitel 4 eine Methode entwickelt, mit der sich die Tragfähigkeit von Punktschweißverbindungen, die in erster Linie vom Linsendurchmesser abhängt, zerstörungsfrei bestimmen lässt. Es wird also die Ausdehnung einer thermischen Verbindung parallel zur Oberfläche vermessen. Dazu kommt eine flächige Anregung mittels Blitzlampe in Transmissionsanordnung zur Anwendung. Die Messdatenanalyse umfasst im Wesentlichen zwei Schritte. Zuerst werden die Thermografiesequenzen pixelweise auf Werte zwischen 0 und 1 für Messbeginn bzw. -ende normiert. Aus dem resultierenden Datensatz wird über eine gewichtete zeitliche und räumliche Mittelwertbildung ein skalares Gütekriterium gewonnen. Um eine geeignete Wichtungsfunktion zu ermitteln, kam ein numerisches Optimierungsverfahren zum Einsatz, wodurch die Aussagekraft des Verfahrens signifikant gesteigert werden konnte. An einer Serienmessung an 75 Proben konnte durch Vergleich mit instrumentierten Torsionsversuchen statistisch abgesichert gezeigt werden, dass sich mit dieser Methode bei einer Messdauer von 3 s typische Fehlerklassen wie Klebverbindungen oder Spritzer sicher erkennen lassen.

Zum anderen wurden im Kapitel 5 offene Oberflächenrisse untersucht. Hierbei handelt es sich um Fehlstellen, die hauptsächlich normal zur Oberfläche ausgedehnt sind. Dies macht eine lokale Anregung erforderlich, die hier über einen Diodenlaser realisiert wurde. Zur Detektion und Ermittlung der Länge von Rissen wird die Probe mittels Laser sukzessive

geradlinig abgerastert. Die Messdatenanalyse basiert auf dem einzelbildweisen Bilden der ersten räumlichen Ableitungen und anschließender gemeinsamer pixelweiser Sortierung entlang der Zeitachse. Für einen Schienen-Testkörper mit Rollkontaktermüdungsrissen lieferte ein geeignet ausgewähltes Einzelbild aus der resultierenden Sequenz mit der Magnetpulverprüfung vergleichbare Ergebnisse. Um die Möglichkeit einer geometrischen Charakterisierung von Rissen aufzuzeigen, wurden Experimente an artifiziellen Probekörpern durchgeführt. Zur Messung wird im definierten Abstand zum untersuchten Riss ortsfest mittels Laser angeregt. Aus der Differenz des zeitlichen und räumlichen Mittelwerts der gemessenen Temperaturen in zwei Referenzgebieten, die den gleichen Abstand zur Laserposition haben, kann auf die Tiefe des Risses geschlossen werden. Aus zwei Experimenten diesen Typs mit Anregungen auf beiden Seiten des Risses lässt sich auch der Winkel ermitteln, unter dem der Riss ins Material ragt. Anhand von FEM-Simulationen, die in guter Übereinstimmung mit den gemachten Experimenten stehen, konnte gezeigt werden, dass Winkel und Tiefe prinzipiell gleichzeitig und unabhängig voneinander zugänglich sind.

## 6.2 Physikalische Herangehensweise

Die Temperaturmessung erfolgt bei der Thermografie orts aufgelöst, also bildgebend. Daher ist es naheliegend, dass das Ergebnis der zerstörungsfreien Prüfung mittels aktiver Thermografie üblicherweise ein Bild mit Fehleranzeigen ist [3, 4, 18]. Dies ist von Vorteil, wenn das Ergebnis durch einen menschlichen Prüfer beurteilt werden soll, da sich das Bild leicht archivieren und somit die Bewertung wiederholen lässt. Durch sowohl im infraroten als auch im sichtbaren Spektralbereich auftretenden Eigenschaften des Prüfobjekts fällt außerdem die nachträglich räumliche Zuordnung leicht, was zur Vermeidung von Verwechslungen beiträgt. Soll hingegen eine automatisierte, quantitative Bewertung durchgeführt werden, fällt es oft schwer, die dem menschlichen Prüfer intuitiv zugänglichen Kriterien in einer mathematischen Berechnungsvorschrift zu formalisieren.

Das mathematische Problem, das sich hier stellt, ist die Lösung des sog. inversen Problems, also der Invertierung der Wärmeleitungsgleichung, um aus den zugänglichen Oberflächentemperaturen den Wärmefluss im Inneren des untersuchten Bauteils und somit dessen Geometrie und die Verteilungen der thermischen Materialeigenschaften berechnen zu können. Obwohl diese direkte Herangehensweise in einschlägigen Lehrbüchern beschrieben wird [4, 64, 65] und auch Gegenstand aktueller Publikationen ist [66, 67], findet sie bisher keine Anwendung in der Praxis. Als Grund hierfür können aus der Schlechtgestellttheit des Problems resultierende Uneindeutigkeiten und somit Instabilitäten der Lösungen vermutet werden (vergleiche auch Unterabschnitt 2.2.3).

Daher wird in dieser Arbeit bei der quantitativen Charakterisierung sowohl der Tragfähigkeit von Punktschweißverbindungen als auch der Geometrie von Oberflächenrissen – zweier gänzlich unterschiedlicher Prüfprobleme – eine andere, auf jeweils der gleichen Überlegung basierende, Herangehensweise genutzt. In beiden Fällen sollen die Grenzen einer Verbindung – bei der Risscharakterisierung die des ungestörten Materials, bei der Schweißpunktprüfung die der Schweißlinse – erkannt werden. Physikalisch unterscheiden sich getrennte Bereiche

durch einen höheren thermischen Widerstand im Vergleich zu verbundenen Bereichen. In beiden Fällen kann der thermische Widerstand durch Messung der Temperaturverteilung an der Oberfläche nicht direkt ortsaufgelöst bestimmt werden. Verantwortlich hierfür sind die Lage der Fehlstelle bzw. ein nicht ausreichendes geometrisches Auflösungsvermögen. Zugänglich ist aber jeweils der integrale thermische Widerstand in einem bestimmten Bereich und einer durch die Anregungsart vorgegebenen Richtung. In beiden Verfahren wird zu dessen Messung nun ein räumlich und zeitlich gemittelter Temperatur-Parameter genutzt.

Der Hauptvorteil einer solchen Herangehensweise liegt zum einen in dem durch die Mittelwertbildung stark verbesserten Signal-Rausch-Verhältnis und zum anderen darin, dass so prinzipiell ein skalarer Parameter berechnet wird, der weitere quantitative Aussagen ermöglicht. Außerdem stellen Auswertungsverfahren dieser Art nur sehr geringe Anforderungen an die zeitliche und räumliche Auflösung der verwendeten IR-Kameras – prinzipiell wären hier auch Einzeldetektoren ausreichend.

Im Kontext der Lösung des inversen Problems lässt sich diese Vorgehensweise als strenge Regularisierung verstehen. Das ursprünglich unterbestimmte Problem wird durch die aufgrund von *a-priori*-Wissen vorgenommene Parametrisierung – Lage und Vorhandensein der Schweißlinie ist bekannt, bei der Risscharakterisierung wurde stets eine quaderförmige Geometrie angenommen – dahingehend korrigiert, dass eine eindeutige Lösung existiert, die stetig von den Eingangsparametern abhängt. Da sowohl die Parametrisierung als auch die Reduzierung der Messdaten auf Grundlage physikalischer Überlegungen erfolgt ist, lassen sich Fehlinterpretation leichter als bei einer rein mathematisch motivierten Herangehensweise erkennen und vermeiden. So ist zu hoffen, dass die Ergebnisse dieser Arbeit einen Beitrag zur systematischen Untersuchung der Lösbarkeit der sich auf dem Gebiet der aktiven Thermografie stellenden inversen Probleme leisten können. Beispielsweise könnten die hier gezeigten Parametrisierungen eine Grundlage für die systematische Untersuchung von geeigneteren Regularisierungen bilden, mit denen eine größere Anzahl von Parametern zugänglich wäre als mit den hier gezeigten Verfahren.

### 6.3 Vergleich mit bestehenden Methoden

Für jedes Problem, das sich in der ZfP stellt, gibt es eine Vielzahl an Verfahren, welche sich prinzipiell erfolgreich zu dessen Lösung einsetzen ließen. Die Entscheidung darüber, welches Verfahren seinen Weg in die Praxis findet – insbesondere gilt dies für die Serienproduktion – wird nicht allein unter technischen Gesichtspunkten gefällt. Hier werden in erster Linie die entstehenden Kosten für den zusätzlichen Zeitbedarf in der Produktion, die Geräte, die Verbrauchsmaterialien, die erforderlichen Qualifikationsmaßnahmen für Mitarbeiter usw., gegen die erwarteten Umsatzsteigerungen bzw. Einsparungen durch die Erhöhung des Qualitätsniveaus abgewogen. Um die einzelnen Punkte richtig abschätzen zu können, sind Erfahrungswerte zwingend notwendig. Stehen nun erprobte Verfahren für ein Prüfproblem zur Verfügung, wird diesen daher meist der Vorzug gegeben, auch wenn mit einem neuen Verfahren erhebliche Verbesserungen verbunden wären.

Unter diesen Gesichtspunkten seien an dieser Stelle zunächst noch einmal die prinzipi-

ellen Vorteile der aktiven Thermografie genannt. Es handelt sich um ein berührungsloses Verfahren, welches sich daher gut automatisieren lässt und weder mechanischen Verschleiß unterliegt noch Verbrauchsmaterialien benötigt. Es können alle Materialien geprüft werden, die eine ausreichende Emissivität aufweisen, oder sich mit einer geeigneten Beschichtung versehen lassen. Auch größere Entfernungen stellen insbesondere für die optisch angeregten Verfahren kein Problem dar. Außerdem ist die Prüfung in der Regel schnell durchzuführen.

### **Prüfung von Punktschweißverbindungen**

Die Prüfung von Punktschweißverbindungen findet standardmäßig zerstörend statt. Hiergegen ist jede zerstörungsfreie Methode bei vergleichbaren Ergebnissen wegen des vermiedenen Prüfausschusses zu bevorzugen. Regelmäßig zur Anwendung kommt die Prozessüberwachung [150, 151, 152, 141, 153]. Bei Methoden diesen Typs macht jedoch jede Änderung am Schweißprozess eine neue Kalibrierung und Bewertung der Nachweismöglichkeiten nötig – dieses Problem besteht bei unabhängigen zerstörungsfreien Prüfverfahren nicht. Eine weitere Möglichkeit ist die Integration von Ultraschall-Prüfköpfen in die Schweißelektroden [156, 157, 158, 159]. Doch auch diese Verfahren sind stark von den eingesetzten Schweißgeräten abhängig und erfordern zudem Änderungen an diesen. Zur nachträglichen zerstörungsfreien Prüfung sind nur Ultraschall-Prüfeinrichtungen kommerziell erhältlich, die jedoch lediglich zur Handprüfung vorgesehen sind, was zu hohen Prüfzeiten und Personalbedarf führt [161, 162, 163, 164].

Somit stellt die thermografische Prüfung derzeit die aussichtsreichste Methode für den automatisierten Einsatz dar. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode basiert, anders als die bisher in der Literatur vorgestellten Verfahren [17, 123, 124, 128, 129], auf einer räumlich integralen Datenauswertung. Bisher wurde einzig bei Türler *et al.* ein Vergleich mit zerstörend ermittelten Kennwerten durchgeführt [123], jedoch wurde keine statistische Bewertung vorgenommen. Das dort vorgestellte Verfahren basiert auf einer kontinuierlichen Erwärmung. Die in den genannten Publikationen diskutierten Untersuchungen basieren – genau wie die in dieser Arbeit gezeigten – auf Messungen an Proben, die mit einer emissivitätssteigernden Beschichtung versehen wurden. Um die Ergebnisse auf nicht vorbehandelte Proben übernehmen zu können, sind so noch einige messtechnische Hürden zu nehmen, die machbar erscheinen. Allerdings kann die prinzipielle Möglichkeit auf diese Weise gezeigt werden.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode geht über die genannten Arbeiten hinaus und liefert mit zerstörend ermittelten Kennwerten übereinstimmende Ergebnisse. Außerdem benötigt das Verfahren keine explizite räumliche und zeitliche Auflösung und stellt somit lediglich geringe Anforderungen an die verwendeten Prüfgeräte. Dadurch, dass es berührungslos und schnell ist, eignet es sich prinzipiell gut zur Integration in automatisierte Fertigungsabläufe. Da als Ergebnis der in dieser Arbeit entwickelten Messdatenauswertung ein einzelnes skalares Gütekriterium steht, ist eine automatisierte Klassifikation der geprüften Proben ohne weiteren Entwicklungsaufwand möglich.

### Risserkennung und Charakterisierung

Für die Detektion von Oberflächenrissen gibt es drei Standardverfahren der ZfP: die Farbeindring- (PT), die Magnetpulver- (MT) und die Wirbelstromprüfung (ET). Zudem werden auch die Röntgen- (RT) und Ultraschallprüfung (UT) eingesetzt. Die beiden erstgenannten Verfahren sind auf umweltschädliche Verbrauchsmaterialien angewiesen. Die MT lässt sich nur bei ferromagnetischen Werkstoffen durchführen und ET ist nur zur Prüfung elektrisch leitfähiger Materialien geeignet. Die UT ist auf Materialien angewiesen, die in ihren elastischen Eigenschaften ausreichen homogen sind. Die RT stößt bei nur schwach absorbierenden Materialien, also solchen, mit niedrigen Atommassen wie z.B. Faserverbundwerkstoffen, schnell an ihre Grenzen, außerdem muss stets der Strahlenschutz beachtet werden. Der Vorteil rein auf thermischen Effekten basierender Methoden liegt demgegenüber darin, dass sie weitgehend werkstoffunabhängig sind und – eine ausreichende Emissivität der Oberfläche vorausgesetzt – keine Verbrauchsmaterialien benötigen. In der Literatur werden zum einen scannende Systeme seit den späten 1960ern diskutiert [81, 83, 84, 86, 97]. Zum anderen wurden von Li *et al.* Methoden vorgeschlagen, die auf IR-Kameras basieren [98, 96, 99, 100, 101], welche jedoch deutlich höhere Prüfzeiten als die hier beschriebene Methode benötigen. Im Vergleich zu den in der Literatur beschriebenen Herangehensweisen hat die in dieser Arbeit entwickelte Methode den großen Vorteil, dass aufgrund des zur Datenanalyse genutzten Algorithmus' weder spezielle Messaufbauten noch eine Synchronisation zwischen Laser und IR-Kamera notwendig sind. Somit lässt sie sich mit kommerziell erhältlichen Komponenten ohne weitere Anpassungen realisieren. Die Leistung in der Risserkennung ist dabei zumindest vergleichbar mit den in der Literatur beschriebenen Systemen.

Zur geometrischen Charakterisierung von Rissen können prinzipiell alle Volumenverfahren der ZfP genutzt werden. Hervorzuheben sind hier besonders Mikro-CT-Anlagen, mit denen sich die höchsten Auflösungen, bei allerdings auch hohem Zeit- und Kostenaufwand realisieren lassen [170]. Auch mit der UT sind Geometrieinformationen zugänglich [171]. Mit diesen Verfahren lassen sich höhere geometrische Auflösungen als mit der hier vorgestellten thermografischen Methode realisieren. Zudem sollte beachtet werden, dass die Thermografie den Oberflächenverfahren zuzuordnen ist. Typischerweise muss hier die Ausdehnung einer Fehlstelle mindestens ihrer Überdeckung entsprechen, um detektierbar zu sein. Im Gegensatz dazu können mit echten Volumenverfahren wie z.B. UT-SAFT<sup>1</sup> in gut durchschallbaren Materialien Reflektoren mit einem Durchmesser von einem Millimeter in einem Meter Tiefe nachgewiesen werden [174]. Wird im Kontext der thermografischen Rissprüfung die Rissgeometrie diskutiert, steht meist die Abschätzung von Detektionsgrenzen im Vordergrund [18, 98, 108]. Für die induktionsangeregte Thermografie existieren Arbeiten, die den Einfluss der Tiefe [115] bzw. des Winkels [117] getrennt von anderen Einflussgrößen untersuchen und jeweils deutliche Abhängigkeiten feststellen.

Auch die Ergebnisse dieser Arbeit zur geometrischen Charakterisierung von Rissen sollen mehr als grundlegende Untersuchung der prinzipiellen Möglichkeiten der aktiven Thermografie denn als konkrete Empfehlung für den praktischen Einsatz gesehen werden. Wichtig

<sup>1</sup>Von engl. *synthetic aperture focusing technique*, ein hochentwickeltes Auswertungsverfahren für Messdaten aus der Ultraschallprüfung.

ist hier insbesondere, dass detailliert untersucht wurde, in welcher Weise sich die berechneten Parameter bei einer Variation der Geometrie verändern. Zudem konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist, Tiefe und Winkel gleichzeitig zu bestimmen.

## 6.4 Ausblick

Besonders scheint die hier entwickelte Methode zur Prüfung von Schweißpunkten gut für die Überführung in die Praxis geeignet zu sein. Hierzu muss die Methode jedoch zuerst auf Prüfobjekte ohne vorbehandelte Oberflächen überführt werden, was aber machbar erscheint. Im Hinblick hierauf ist es ein wichtiges Ergebnis, dass keine explizite räumliche Auflösung der Temperaturmessung notwendig ist. Mit diesem Wissen lässt sich die Messung auch kontaktierend realisieren, womit ein thermisches ZFP-Verfahren zur Verfügung stünde, welches unabhängig von optischen Eigenschaften ist, sondern rein auf Wärmeleitung basiert. Dieses ließe sich auf eine weite Klasse von Prüfproblemen an Fügeverbindungen anwenden.

Auch die Methode zur Risserkennung birgt einiges Potential, da sie vollständig auf kommerziell erhältlichen Komponenten aufbaut. Ein ökonomisch rechtfertigbarer Einsatz scheint hier vor allem dann gegeben, wenn schon eine IR-Kamera zur Verfügung steht, also nur noch ein Laser nachgerüstet werden muss. Außerdem ist es mit ihr prinzipiell möglich, Risse auch aus großer Entfernung zu detektieren.

So können die Ergebnisse dieser Arbeit helfen, ganz im Sinne der Leitlinie der Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung, die Sicherheit in der Technik zu stärken.



# Literaturverzeichnis

- [1] KRINGS, S. u. a. (Hrsg.): *Statistisches Jahrbuch*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2011. – 435 S. – ISBN 9783824609130
- [2] SCHUSTER, N. ; KOLOBRODOV, V. G.: *Infrarotthermographie*. Wiley-VCH, 2004. – ISBN 9783527405091
- [3] MALDAGUE, X.: *Infrared methodology and technology*. Gordon and Breach Science Publishers, 1994. – ISBN 9782881245909
- [4] MALDAGUE, X.: *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley, 2001. – ISBN 9780471181903
- [5] BAEHR, H. D. ; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. 4., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin : Springer, 2004. – ISBN 3-540-40130-X
- [6] BOLTZMANN, L.: Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. In: *Annalen der Physik* 258 (1884), Nr. 6, S. 291–294. <http://dx.doi.org/DOI:10.1002/andp.18842580616>. – DOI DOI: 10.1002/andp.18842580616
- [7] PLANCK, M.: Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum. In: *Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 2*. Berlin : 17, 1900, S. 245
- [8] MINKINA, W. ; DUDZIK, S.: *Errors of Measurements in Infrared Thermography*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK., 2009
- [9] CHAPMAN, A.: *Heat Transfer*. 4. Prentice Hall, 1984. – ISBN 0023214708
- [10] CARSLAW, H. S. ; JAEGER, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*. Second. Oxford Univ Pr, 1986. – ISBN 0198533683
- [11] BOX, G. E. P. ; HUNTER, W. G. ; HUNTER, J. S.: *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. John Wiley & Sons, 1978. – ISBN 0471093157

- [12] NAVIDI, W.: *Statistics for Engineers and Scientists*. 2. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2007. – ISBN 0073309494
- [13] DIN EN 473: *Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung - Allgemeine Grundlagen*. 08 2008
- [14] DIN EN ISO 9712, NORMENTWURF: *Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung - Allgemeine Grundlagen*. 03 2011
- [15] DECKER, C. A. ; MACKIN, T. J.: Measuring film thickness using infrared imaging. In: *Thin Solid Films* 473 (2005), Februar, Nr. 2, 196–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2004.04.058>. – DOI 10.1016/j.tsf.2004.04.058. – ISSN 0040–6090
- [16] MAIERHOFER, Ch. ; ARNDT, R. ; RÖLLIG, M. ; RIECK, C. ; WALTHER, A. ; SCHEEL, H. ; HILLEMEIER, B.: Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. In: *Cement and Concrete Composites* 28 (2006), April, Nr. 4, S. 393–401. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.011>. – DOI 10.1016/j.cemconcomp.2006.02.011
- [17] SHEPARD, S. M. ; CHAUDHRY, B. B. ; PREDMESKY, R. L. ; ZALUZEC, M. J.: Pulsed thermographic inspection of spot welds. In: SNELL, J. R. (Hrsg.) ; WURZBACH, R. N. (Hrsg.): *Thermosense XX* Bd. 3361. Orlando, FL, USA : SPIE, März 1998, 320–324
- [18] ALMOND, D. P. ; PATEL, P.: *Photothermal science and techniques*. Springer, 1996. – ISBN 9780412578809
- [19] DIN 54162: *Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal für die thermografische Prüfung - Allgemeine und spezielle Grundlagen für Stufe 1, 2 und 3*. 09 2006
- [20] DIN 54190-1: *Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen*. 08 2004
- [21] DIN 54190-2: *Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 2: Geräte*. 08 2005
- [22] DIN 54190-3: *Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 3: Begriffe*. 08 2010
- [23] DIN 54191: *Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung elektrischer Anlagen*. 03 2009
- [24] DIN 54192: *Zerstörungsfreie Prüfung - Aktive Thermografie*. 11 2010
- [25] DIN EN 13187: *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen - Infrarot-Verfahren (ISO 6781:1983, modifiziert)*. 05 1999

- [26] ISO 6781: *Thermal insulation - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method*. 12 1983
- [27] ISO 18434-1: *Condition monitoring and diagnostics of machines - Thermography - Part 1: General procedures*. 02 2008
- [28] ISO 18436-7: *Condition monitoring and diagnostics of machines - Thermography - Part 7: Thermography*. 10 2008
- [29] VDI-RICHTLINIE: VDI 2878 BLATT 1: *Richtlinien-Entwurf: Anwendung der Thermografie zur Diagnose in der Instandhaltung - Allgemeine Anforderungen sowie Hinweise für Entscheidungsträger und Verantwortliche*. 07 2010
- [30] VDI-RICHTLINIE: VDI/VDE 3511 BLATT 4: *Technische Temperaturmessungen - Strahlungsthermometrie*. 07 2010
- [31] REICHEL, J. ; MÜLLER, G. ; MANDELARTZ, J.: *Betriebliche Instandhaltung*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009 <http://www.springerlink.com/content/h720815n680m2637/>. – ISBN 978–3–642–00501–5
- [32] DANESI, S. ; SALERNO, A. ; WU, D. ; BUSSE, G: Cooling down thermography: principle and results for NDE. In: *Proceedings of SPIE*. Orlando, FL, USA, 1998, 266–274
- [33] MALDAGUE, X. ; MARINETTI, S.: Pulse phase infrared thermography. In: *Journal of Applied Physics* 79 (1996), März, Nr. 5, 2694–2698. <http://link.aip.org/link/?JAP/79/2694/1>
- [34] BATES, D. ; SMITH, G. ; LU, D. ; HEWITT, J.: Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components. In: *Composites Part B: Engineering* 31 (2000), April, Nr. 3, S. 175–185. [http://dx.doi.org/10.1016/S1359-8368\(00\)00005-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-8368(00)00005-6). – DOI 10.1016/S1359-8368(00)00005-6
- [35] OMAR, M. A. ; ZHOU, Y.: A quantitative review of three flash thermography processing routines. In: *Infrared Physics & Technology* 51 (2008), März, Nr. 4, 300–306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2007.09.006>. – DOI 10.1016/j.infrared.2007.09.006. – ISSN 1350–4495
- [36] BREITENSTEIN, O. ; RAKOTONIAINA, J. P. ; RIFAI, M. . ; WERNER, M.: Shunt types in crystalline silicon solar cells. In: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 12 (2004), Nr. 7, S. 529–538. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.544>. – DOI 10.1002/pip.544
- [37] GAZARIK, M. ; JOHNSON, D. ; KIST, F. N ; ANTILL, C. ; HAAKENSEN, D. ; HOWELL, P. ; JENKINS, R. ; YATES, R. ; STEPHAN, R. ; HAWK, D.: Infrared On-orbit RCC Inspection with the EVA IR Camera: Development of Flight Hardware from a COTS System. In: *InfraMation Proceedings*, 2005

- [38] HOWELL, P. A. ; WINFREE, W. P. ; CRAMER, K. E.: On-orbit passive thermography. In: *Nondestructive Testing and Evaluation* 23 (2008), Nr. 3, 195. <http://www.informaworld.com/10.1080/10589750701855171>. – ISSN 1058–9759
- [39] GOLDAMMER, M.: Active Thermography for Dimensional Measurements on Gas Turbine Components. In: *Proceedings of European Conference of non-destructive Testing ECNDT*. Berlin, 2006
- [40] MEOLA, C. ; CARLOMAGNO, G. M.: Recent advances in the use of infrared thermography. In: *Measurement Science and Technology* 15 (2004), September, Nr. 9, R27–R58. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/R01>. – DOI 10.1088/0957-0233/15/9/R01. – ISSN 0957–0233
- [41] PATIL, V. A. ; NARAYANAN, V.: Application of heated-thin-foil thermography technique to external convective microscale flows. In: *Measurement Science and Technology* 16 (2005), Februar, Nr. 2, 472–476. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/2/020>. – DOI 10.1088/0957-0233/16/2/020. – ISSN 0957–0233
- [42] BREITENSTEIN, O. ; LANGENKAMP, M. ; ALTMANN, F. ; KATZER, D. ; LINDNER, A. ; EGGERS, H.: Microscopic lock-in thermography investigation of leakage sites in integrated circuits. In: *Review of Scientific Instruments* 71 (2000), Nr. 11, S. 4155. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1310345>. – DOI 10.1063/1.1310345
- [43] BREITENSTEIN, O. ; LANGENKAMP, M.: *Lock-in thermography: basics and use for functional diagnostics of electronic components*. Springer, 2003. – ISBN 9783540434399
- [44] ZIEGLER, M.: *Thermography of semiconductor lasers from thermal emission of semiconductors towards a novel analytical tool for optoelectronic devices*, Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I, Diss., Juni 2009. <https://edoccluster.cms.hu-berlin.de/docviews/abstract.php?lang=&id=29940>
- [45] VRANA, J. ; GOLDAMMER, M. ; BAUMANN, J. ; ROTHENFUSSER, M. ; ARNOLD, W. ; THOMPSON, Donald O. ; CHIMENTI, Dale E.: Mechanisms and models for crack detection with induction thermography. In: *34th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation* Bd. 975. Golden (Colorado) : AIP, Februar 2008, 475–482
- [46] WILSON, J. ; TIAN, G. Y. ; ABIDIN, I. Z. ; YANG, S. ; ALMOND, D. P.: Pulsed eddy current thermography: system development and evaluation. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 52 (2010), Februar, Nr. 2, 87–90. <http://dx.doi.org/10.1784/insi.2010.52.2.87>. – DOI 10.1784/insi.2010.52.2.87. – ISSN 1354–2575
- [47] GOLDAMMER, M. ; MOOSHOFER, H. ; ROTHENFUSSER, M. ; BASS, J. ; VRANA, J.: Automated induction thermography of generator components. In: *AIP Conference*

- Proceedings* 1211 (2010), Februar, Nr. 1, 451–457. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3362428>. – DOI 10.1063/1.3362428
- [48] HOMMA, C.: *Induktions-Lockin-Thermografie: ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung*, Universität Stuttgart, Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Diss., April 2007. <http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2007/3095/>
- [49] DILLENZ, A. ; BUSSE, G. ; WU, D.: Ultrasound lockin thermography: feasibilities and limitations. In: *Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications, SPIE* 3827 (1999), S. 10–15
- [50] DILLENZ, A. ; ZWESCHPER, T. ; BUSSE, G.: Progress in ultrasound phase thermography. In: *Proceedings of SPIE*. Orlando, FL, USA, 2001, 574–579
- [51] STÖCKER, H.: *Taschenbuch der Physik: Formeln, Tabellen, Übersichten*. 5. A. Harri Deutsch GmbH, 2004. – ISBN 3817117205
- [52] HOMMA, C.: *Untersuchungen zu Mechanismus und technischer Umsetzung der akustischen Thermographie*, Universität des Saarlandes, Fakultät III, Diss., Juli 2007. <http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2007/1257/>
- [53] AVDELIDIS, N. P. ; HAWTIN, B. C. ; ALMOND, D. P.: Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. In: *NDT & E International* 36 (2003), September, Nr. 6, S. 433–439. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(03\)00052-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(03)00052-5). – DOI 10.1016/S0963-8695(03)00052-5
- [54] AVDELIDIS, N. P. ; ALMOND, D. P.: Transient thermography as a through skin imaging technique for aircraft assembly: modelling and experimental results. In: *Infrared Physics & Technology* 45 (2004), März, Nr. 2, S. 103–114
- [55] MORBIDINI, M. ; CAWLEY, P. ; BARDEN, T. ; ALMOND, D. P. ; DUFFOUR, P.: Prediction of the thermosonic signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements. In: *Journal of Applied Physics* 100 (2006), Nr. 10, 104905. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2361091>. – DOI 10.1063/1.2361091. – ISSN 00218979
- [56] WU, D. ; BUSSE, G.: Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials. In: *Revue Générale de Thermique* 37 (1998), September, Nr. 8, 693–703. [http://dx.doi.org/10.1016/S0035-3159\(98\)80047-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0035-3159(98)80047-0). – DOI 10.1016/S0035-3159(98)80047-0. – ISSN 0035-3159
- [57] MEOLA, C. ; CARLOMAGNO, G. M. ; SQUILLACE, A. ; GIORLEO, G.: Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography. In: *Measurement Science and Technology* 13 (2002), Oktober, Nr. 10, 1583–1590. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/13/10/311>. – DOI 10.1088/0957-0233/13/10/311. – ISSN 0957-0233

- [58] MONTANINI, R.: Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography. In: *Infrared Physics & Technology* 53 (2010), September, Nr. 5, 363–371. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2010.07.002>. – DOI 10.1016/j.infrared.2010.07.002. – ISSN 1350–4495
- [59] WU, D.: *Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung*, Universität Stuttgart, Fakultät 13, Diss., 1996
- [60] LAU, S. K. ; ALMOND, D. P. ; MILNE, J. M.: A quantitative analysis of pulsed video thermography. In: *NDT & E International* 24 (1991), August, Nr. 4, 195–202. [http://dx.doi.org/10.1016/0963-8695\(91\)90267-7](http://dx.doi.org/10.1016/0963-8695(91)90267-7). – DOI 10.1016/0963–8695(91)90267–7. – ISSN 0963–8695
- [61] ARNDT, R. W.: Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering. In: *Infrared Physics & Technology* 53 (2010), Juli, Nr. 4, S. 246–253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2010.03.002>. – DOI 10.1016/j.infrared.2010.03.002
- [62] MULAVEESALA, R. ; TULI, S.: Implementation of frequency-modulated thermal wave imaging for non-destructive sub-surface defect detection. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 47 (2005), April, Nr. 4, 206–208. <http://dx.doi.org/10.1784/insi.47.4.206.63156>. – DOI 10.1784/insi.47.4.206.63156. – ISSN 1354–2575
- [63] MULAVEESALA, R. ; TULI, S.: Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection. In: *Applied Physics Letters* 89 (2006), November, Nr. 19, S. 191913–191913–3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2382738>. – DOI 10.1063/1.2382738. – ISSN 0003–6951
- [64] RIEDER, A.: *Keine Probleme mit inversen Problemen: Eine Einführung in ihre stabile Lösung*. Vieweg +Teubner, 2003. – ISBN 9783528031985
- [65] HOWELL, R. ; SIEGEL, R. ; MENGUC, M. P.: *Thermal Radiation Heat Transfer, 5th Edition*. 5. CRC Press, 2010. – ISBN 1439805334
- [66] MARCUZZI, F ; MARINETTI, S: Efficient reconstruction of corrosion profiles by infrared thermography. In: *Journal of Physics: Conference Series* 124 (2008), Juli, 012033. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/124/1/012033>. – DOI 10.1088/1742–6596/124/1/012033. – ISSN 1742–6596
- [67] RICHTER, R. ; KREUTZBRUCK, M. ; MAIERHOFER, C.: Numerische Verfahren für die aktive Thermografie zur Untersuchung von Rückwandgeometrien. In: *Berichtsband zur DGZfP-Jarrestagung 2010, Erfurt*, 2011

- [68] FOURIER, J. B. J.: *Théorie analytique de la chaleur*. Didot, 1822
- [69] SHEPARD, S. M.: *Method of interpreting thermographic data for non-destructive evaluation*. – US Patent 5631465, Inhaber: Thermal Wave Imaging, Inc, Anmeldedatum: 29. 2. 1996
- [70] SHEPARD, S. M.: *Temporal noise reduction, compression and analysis of thermographic image data sequences*. – US Patent 6516084, Inhaber: Thermal Wave Imaging, Inc, Anmeldedatum: 4. 12. 2000
- [71] QUEK, S. ; ALMOND, D. ; NELSON, L. ; BARDEN, T.: A novel and robust thermal wave signal reconstruction technique for defect detection in lock-in thermography. In: *Measurement Science and Technology* 16 (2005), Mai, Nr. 5, 1223–1233. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/5/024>. – DOI 10.1088/0957-0233/16/5/024. – ISSN 0957-0233
- [72] MARINETTI, S. ; GRINZATO, E. ; BISON, P. G. ; BOZZI, E. ; CHIMENTI, M. ; PIERI, G. ; SALVETTI, O.: Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA. In: *Infrared Physics & Technology* 46 (2004), Nr. 1-2, 85 - 91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.012>. – DOI 10.1016/j.infrared.2004.03.012. – ISSN 1350-4495. – Workshop on Advanced Infrared Technology and Application
- [73] CRAMER, K. E. ; WINFREE, W. P.: The Application of Principal Component Analysis Using Fixed Eigenvectors to the Infrared Thermographic Inspection of the Space Shuttle Thermal Protection System. In: *QIRT Conference 2006*, 2006
- [74] GIORLEO, G. ; MEOLA, C.: Comparison between pulsed and modulated thermography in glass-epoxy laminates. In: *NDT & E International* 35 (2002), Juli, Nr. 5, 287–292. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00062-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00062-7). – DOI 10.1016/S0963-8695(01)00062-7. – ISSN 0963-8695
- [75] MALDAGUE, X. ; ZIADI, A. ; KLEIN, M.: Double pulse infrared thermography. In: *NDT & E International* 37 (2004), Oktober, Nr. 7, 559–564. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.03.003>. – DOI 10.1016/j.ndteint.2004.03.003. – ISSN 0963-8695
- [76] RINGERMACHER, H. I. ; HOWARD, D. R. ; FILKINS, R. J.: Flash-quenching for high resolution thermal depth imaging. In: *AIP Conference Proceedings* Bd. 700, 2004, S. 477
- [77] RINGERMACHER, H. I. ; FILKINS, R. J. ; ZHANG, R. S.: *Infrared thermography imaging system with actively quenched lamp and method for actively controlling the flash duration*. – Europäisches Patent EP1500923, Inhaber: General Electric Company, Anmeldedatum: 22. 7. 2004

- [78] KNIGHT, B. ; HOWARD, D. R. ; RINGERMACHER, H. I.: Advances in Thermal Time-of-Flight Imaging with Flash Quenching. In: *AIP Conference Proceedings* Bd. 820, 2006, S. 529
- [79] SHAM, F. C. ; CHEN, N. ; LONG, L.: Surface crack detection by flash thermography on concrete surface. In: *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 50 (2008), Mai, Nr. 5, 240–243. <http://dx.doi.org/10.1784/insi.2008.50.5.240>. – DOI 10.1784/insi.2008.50.5.240. – ISSN 1354–2575
- [80] HARTIKAINEN, J.: A fast infrared scanning technique for nondestructive testing. In: *Review of Scientific Instruments* 60 (1989), Nr. 4, 670. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1140381>. – DOI 10.1063/1.1140381. – ISSN 00346748
- [81] KUBIAK, E. J.: Infrared Detection of Fatigue Cracks and Other Near-Surface Defects. In: *Applied Optics* 7 (1968), September, Nr. 9, S. 1743. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.7.001743>. – DOI 10.1364/AO.7.001743. – ISSN 0003–6935
- [82] HARTIKAINEN, J. ; JAARINEN, J. ; LUUKKALA, M.: Delamination and crack detection by the synchronous heating method. Theoretical aspects. In: *15th Annual Review of Progress in QNDE*. New York (US) : Plenum Press, 1989. – ISBN 0–306–43209–9, S. 1321–1328
- [83] GRUSS, C. ; BALAGEAS, D.: Theoretical and experimental applications of the flying spot camera. In: *Proc. QIRT 92 (Seminar Eurotherm No. 27)*, 1992, S. 19–24
- [84] GRUSS, C. ; LEPOUTRE, F. ; BALAGEAS, D.: Non destructive evaluation using a flying-spot camera. In: *6th European Conference on Non-Destructive Testing, 6 ECNDT, Nice*, 1994, S. 657–661
- [85] GROSSEL, P. ; DEPASSE, F. ; GOMÈS, S.: Plane-wave spectrum approach for the AC thermal analysis of vertical thermal resistance on sample surface. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 32 (1999), August, Nr. 16, 2100–2107. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/32/16/320>. – DOI 10.1088/0022-3727/32/16/320. – ISSN 0022–3727
- [86] JOUBERT, P.-Y. ; HERMOSILLA-LARA, S. ; PLACKO, D. ; LEPOUTRE, F. ; PIRIOU, M.: Enhancement of opencrack detection in flying-spot photothermal non-destructive testing using physical effect identification. In: *QIRT Journal* 3 (2006), Nr. 1, S. 53–70
- [87] WANG, Y. Q. ; KUO, P. K. ; FAVRO, L. D. ; THOMAS, R. L.: A novel flying-spot infrared camera for imaging very fast thermal-wave phenomena. In: *Springer series in optical sciences* 62 (1990), S. 24–26. – ISSN 0342–4111
- [88] HERMOSILLA-LARA, S. ; JOUBERT, P.-Y. ; PLACKO, D.: Identification of physical effects in flying spot photothermal non-destructive testing. In: *The European Physical Journal Applied Physics* 24 (2003), Nr. 3, S. 7. <http://dx.doi.org/10.1051/epjap:2003081>. – DOI 10.1051/epjap:2003081



- [89] LEGRANDJACQUES, L. ; PIRIOU, M. ; GROS, J. ; GENTE, D.: On site Tubes to Plate welds Inspection by Photothermal Camera. In: *2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*. New Orleans, USA, Mai 2000
- [90] KRAPEZ, J.-C. ; GRUSS, C. ; LEPOUTRE, F. ; LEGRANDJACQUES, L.: La caméra photothermique. In: *Instrumentation, Mesure, Métrologie* 1/1-2 (2001), S. 9–68
- [91] VARIS, J. ; RANTALA, J. ; HARTIKAINEN, J.: An infrared line scanning technique for detecting delaminations in carbon fibre tubes. In: *NDT & E International* 29 (1996), Dezember, Nr. 6, 371–377. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(96\)00043-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(96)00043-6). – DOI 10.1016/S0963-8695(96)00043-6. – ISSN 0963-8695
- [92] TOLEV, J. ; MANDELIS, A.: Laser photothermal non-destructive metrology of cracks in un-sintered powder metallurgy manufactured automotive transmission sprockets. In: *Journal of Physics: Conference Series* 214 (2010), März, 012076. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/214/1/012076>. – DOI 10.1088/1742-6596/214/1/012076. – ISSN 1742-6596
- [93] OCARIZ, A. ; SANCHEZ-LAVEGA, A. ; SALAZAR, A.: Photothermal study of subsurface cylindrical structures. I. Theory. In: *Journal of Applied Physics* 81 (1997), Nr. 11, 7552. <http://dx.doi.org/10.1063/1.365298>. – DOI 10.1063/1.365298. – ISSN 00218979
- [94] OCARIZ, A. ; SANCHEZ-LAVEGA, A. ; SALAZAR, A.: Photothermal study of subsurface cylindrical structures. II. Experimental results. In: *Journal of Applied Physics* 81 (1997), Nr. 11, 7561. <http://dx.doi.org/10.1063/1.365299>. – DOI 10.1063/1.365299. – ISSN 00218979
- [95] OCARIZ, A. ; SANCHEZ-LAVEGA, A. ; SALAZAR, A. ; FOURNIER, D. ; BOCCARA, A. C.: Photothermal characterization of vertical and slanted thermal barriers: A quantitative comparison of mirage, thermorefectance, and infrared radiometry. In: *Journal of Applied Physics* 80 (1996), Nr. 5, 2968. <http://dx.doi.org/10.1063/1.363154>. – DOI 10.1063/1.363154. – ISSN 00218979
- [96] LI, T. ; ALMOND, D. P. ; REES, D. A. S.: Crack imaging by scanning pulsed laser spot thermography. In: *NDT & E International* 44 (2011), Nr. 2, 216 - 225. <http://dx.doi.org/DOI:10.1016/j.ndteint.2010.08.006>. – DOI DOI: 10.1016/j.ndteint.2010.08.006. – ISSN 0963-8695
- [97] RASHED, A. ; ALMOND, D. P. ; REES, D. A. S. ; BURROWS, S. E. ; DIXON, S.: Crack Detection by Laser Spot Imaging Thermography. In: THOMPSON, Donald O. (Hrsg.) ; CHIMENTI, Dale E. (Hrsg.): *Review of Progress in QNDE* Bd. 894, AIP, 2007, 500-506

- [98] LI, T. ; REES, D. A. S. ; ALMOND, D. P.: Crack detection by the scanning pulsed laser spot imaging thermography. In: *15th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena*, 2009
- [99] LI, T. ; ALMOND, D. P. ; REES, D. A. S. ; WEEKES, B.: Crack imaging by pulsed laser spot thermography. In: *Journal of Physics: Conference Series* 214 (2010), März, 012072. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/214/1/012072>. – DOI 10.1088/1742-6596/214/1/012072. – ISSN 1742-6596
- [100] LI, T. ; PICKERING, S. G. ; REES, D. A. S. ; ALMOND, D. P.: Pulsed laser spot imaging thermography and experimental data. Version:2010. <http://opus.bath.ac.uk/15235/>. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation vols 29A and 29B* Bd. 1211. American Institute of Physics, 2010, 435-442. – 36th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 26-31 July 2009. Rhode Island, Kingston.
- [101] LI, T. ; ALMOND, D. P. ; REES, D. A. S.: Crack imaging by scanning laser-line thermography and laser-spot thermography. In: *Measurement Science and Technology* 22 (2011), März, Nr. 3, 035701. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/3/035701>. – DOI 10.1088/0957-0233/22/3/035701. – ISSN 0957-0233
- [102] BURROWS, S. E. ; RASHED, A. ; ALMOND, D. P. ; DIXON, S.: Combined laser spot imaging thermography and ultrasonic measurements for crack detection. In: *Nondestructive Testing and Evaluation* 22 (2007), Juni, Nr. 2, 217-227. <http://dx.doi.org/10.1080/10589750701448605>. – DOI 10.1080/10589750701448605
- [103] BURROWS, S. ; DIXON, S. ; ALMOND, D. P.: Combined thermography and noncontact ultrasonic inspection techniques using pulsed laser excitation. In: *Review of Progress in QNDE* 29 (2009), Juli, S. 510-517
- [104] WOOLARD, D. F. ; CRAMER, K. E.: Line scan versus flash thermography: comparative study on reinforced carbon-carbon. In: *Proceedings of SPIE* Bd. 5782, 2005, S. 315
- [105] MEINLSCHMIDT, P.: Thermographic detection of defects in wood and wood-based materials. In: *14th International Symposium of Nondestructive Testing of Wood, Hannover, Germany*, 2005
- [106] ZWESCHPER, T. ; DILLENZ, A. ; BUSSE, G.: Ultrasound lock-in thermography- a defect-selective NDT method for the inspection of aerospace components. In: *Insight* (2001). – ISSN 1354-2575
- [107] HAN, X. ; ISLAM, M. S ; NEWAZ, G. ; FAVRO, L. D. ; THOMAS, R. L.: Finite-element modeling of acoustic chaos to sonic infrared imaging. In: *Journal of applied physics* 98 (2005), S. 014907

- [108] WEEKES, B. ; CAWLEY, P. ; ALMOND, D. P. ; LI, T.: THE EFFECT OF CRACK OPENING ON THERMOSONICS AND LASER-SPOT THERMOGRAPHY. In: *AIP Conference Proceedings* 1211 (2010), Februar, Nr. 1, 490–497. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3362434>. – DOI 10.1063/1.3362434
- [109] HAN, X. ; ISLAM, M. S. ; NEWAZ, G. ; FAVRO, L. D. ; THOMAS, R. L.: Finite element modeling of the heating of cracks during sonic infrared imaging. In: *Journal of applied physics* 99 (2006), S. 074905
- [110] HAN, X.: Sonic Infrared Imaging: A Novel NDE Technology for Detection of Cracks/Delaminations/Disbonds in Materials and Structures. In: *Ultrasonic and advanced methods for nondestructive testing and material characterization* (2007), S. 369
- [111] HOLLAND, S. D. ; RENSHAW, J.: Physics-based image enhancement for infrared thermography. In: *NDT & E International* 43 (2010), Nr. 5, S. 440–445. – ISSN 0963–8695
- [112] RENSHAW, J. ; HOLLAND, S. D. ; THOMPSON, R. B.: Measurement of crack opening stresses and crack closure stress profiles from heat generation in vibrating cracks. In: *Applied Physics Letters* 93 (2008), S. 081914
- [113] VRANA, J.: *Grundlagen und Anwendungen der aktiven Thermographie mit elektromagnetischer Anregung*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Dissertation, 2008
- [114] WALLE, G. ; ABUHAMAD, M. ; TOMA, E. ; NETZELMANN, U.: Defect indications in sono-thermography in relation to defect location and structure. In: *Proc. Quantitative Infrared Thermography Conf. (Rhode Saint Genese, Belgium)*, 2004
- [115] WALLE, G. ; NETZELMANN, U.: Thermographic crack detection in ferritic steel components using inductive heating. In: *Proc. 9th ECNDT Berlin 25* (2006), Nr. 29.9
- [116] NETZELMANN, U. ; WALLE, G.: Induction Thermography as a Tool for Reliable Detection of Surface Defects in Forged Components. In: *17th World Conference on Nondestructive Testing*. Shanghai, China, Oktober 2008
- [117] ABIDIN, I. Z. ; TIAN, G. Y. ; WILSON, J. ; YANG, S. ; ALMOND, D. P.: Quantitative evaluation of angular defects by pulsed eddy current thermography. In: *NDT & E International* 43 (2010), Oktober, Nr. 7, S. 537–546. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.05.010>. – DOI 10.1016/j.ndteint.2010.05.010
- [118] ROGALSKI, A.: Infrared detectors: an overview. In: *Infrared Physics & Technology* 43 (2002), Juni, Nr. 3-5, 187-210. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TJ9-45MWS4M-7/2/4d75e43939588bdc29670b8996db0af0>
- [119] ROGALSKI, A.: Infrared detectors: status and trends. In: *Progress in Quantum Electronics* 27 (2003), Nr. 2-3, 59-210. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TJD-48NJG7T-1/1/73db035b28d0b58a296382beafbf0a63>

- [120] MASARU, H. ; MASAYA, O.: *Nondestructive inspection method for spot-welded joints.* – US Patent 4083223, Inhaber: Nissan Motor Company, Anmeldedatum: 10. 11. 1976
- [121] ADAMS, M. J. ; CRISMAN, E. M.: *Method of and apparatus for detecting corrosion utilizing infrared analysis.* – US Patent 4647220, Inhaber: Lockheed Corporation, Anmeldedatum: 9. 7. 1984
- [122] ADAMS, M. J. ; CRISMAN, E. M.: *Method of and apparatus for thermographic evaluation of spot welds.* – US Patent 4854724, Inhaber: Lockheed Corporation, Anmeldedatum: 5. 3. 1986
- [123] TÜRRLER, D ; DEBORAH, H ; NAKAGAWA, S. ; VALENTE, A. ; NIHEI, K.: Thermographic and acoustic imaging of spot-welded and weld-bonded joints. In: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 18*, 1999, S. 1543–1550
- [124] TÜRRLER, D. ; HOPKINS, D. ; REVERDY, F.: Nondestructive evaluation of spot welds using acoustic and thermographic imaging techniques. In: *SAE transactions* 112 (2003), Nr. 5, S. 572–591. – ISSN 0096–736X
- [125] HIERL, T.: *Verfahren und Vorrichtung zur berührungslosen, zerstörungsfreien automatischen Prüfung von Materialverbindungen, insbesondere der Qualitätskontrolle von Schweißverbindungen.* – Deutsches Patent DE10150633, Inhaber: Thermosensorik GmbH, Anmeldedatum 6.12.2006
- [126]
- [127] N., N.: *Vorrichtung zum Prüfen von Fügeverbindungen auf innere Fehler und/oder Oberflächenfehler mittels Thermografie.* – Deutsches Patent DE202006016452, Inhaber: Inpro GmbH, Anmeldedatum 22.10.2006
- [128] SIEMER, U.: Simulation and Evaluation of New Thermographic Techniques for the Deployment in the Automotive Industry. In: *ECNDT 2006*, 2006
- [129] SIEMER, U.: *Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie : Entwicklung einer Ingenieurplattform*, Universität des Saarlandes, Fakultät 8, Diss., Oktober 2010. <http://scidok.sulb.uni-saarland.de/volltexte/2010/3062/>
- [130] CANNY, J.: A computational approach to edge detection. In: *Readings in computer vision: issues, problems, principles, and paradigms* 184 (1987), S. 87–116
- [131] NIXON, M. S. ; AGUADO, A. S.: *Feature Extraction & Image Processing*. 0002. Academic Press, 2007. – ISBN 9780123725387
- [132] MATTHES, K.-J.: *Schweißtechnik : Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*. 3., verb. Aufl. München [u.a.] : Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2006. – ISBN 9783446405684

- [133] RUGE, J.: *Handbuch der Schweißtechnik, Bd.2, Verfahren und Fertigung*. Springer, Berlin, 1993. – ISBN 9783540554073
- [134] DVS 2902-1: *Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke - Übersicht Prüfung*. 09 2001
- [135] DVS 2902-2: *Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke - Punktschweißprüfung*. 09 2001
- [136] DVS 2902-3: *Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke - Konstruktion und Berechnung*. 02 1991
- [137] DVS 2902-4: *Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3 mm Einzeldicke - Grundlagen, Vorbereitung und Durchführung*. 10 2001
- [138] AICHELE, G.: *Leistungskennwerte für Schweißen und Schneiden*. 2. überarb. u. erw. A. DVS - Verlag, 1994. – ISBN 3871551406
- [139] BEHNISCH, H.: *Kompodium der Schweißtechnik 1-4: Verfahren der Schweißtechnik. Schweißmetallurgie. Eignung metallischer Werkstoffe zum Schweißen. Berechnung und Gestaltung von Schweißkonstruktionen: 4 Bde.* 2. Dvs Media, 2002. – ISBN 3871552046
- [140] SCHRADER, G. F. ; ELSHENAWY, A. K. ; DOYLE, L. E.: *Manufacturing processes and materials*. SME, 2000. – ISBN 9780872635173
- [141] MESSLER JR, R. ; JOU, M.: Review of control systems for resistance spot welding: past and current practices and emerging trends. In: *Science and Technology of Welding & Joining* 1 (1996), 1–9(9). <http://www.ingentaconnect.com/content/maney/stwj/1996/00000001/00000001/art00001>
- [142] EISAZADEH, H. ; HAMED, M. ; HALVAEE, A.: New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method. In: *Materials & Design* 31 (2010), Januar, Nr. 1, 149–157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.042>. – DOI 10.1016/j.matdes.2009.06.042. – ISSN 0261–3069
- [143] POURANVARI, M. ; ABEDI, A. ; MARASHI, P. ; GOODARZI, M.: Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon steel resistance spot welds. In: *Science and Technology of Welding & Joining* 13 (2008), Nr. 1, S. 39–43. – ISSN 1362–1718
- [144] ALENIS, M. ; POHJANNE, P. ; SOMERUORI, M. ; HÄNNINEN, H.: Exploring the mechanical properties of spot welded dissimilar joints for stainless and galvanized steels. In: *Welding Journal - New York* 85 (2006), Nr. 12, S. 305

- [145] BROOMHEAD, J. H. W. ; DONY, P. H.: Resistance spot welding quality assurance. In: *Welding and Metal Fabrication* 58 (1990), Juli, 309–314. <http://mdl.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=9011235AN&q=broomhead++welding&uid=789952900&setcookie=yes>
- [146] SCHUMANN, H. ; OETTEL, H.: *Metallografie*. 14. überarb. u. erw. Auflage. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004. – ISBN 352730679X
- [147] DVS 2916-4: *Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen - Metallografische Prüfung*. 12 2006
- [148] DVS 2916-1: *Prüfen von Widerstandspressschweißverbindungen - Zerstörende Prüfung, quasistatisch*. 01 2009
- [149] ISO 14329: *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen - Brucharten und geometrische Messgrößen für Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen*. 12 2003
- [150] DICKINSON, D. W. ; FRANKLIN, J. E. ; STANYA, A.: Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring. In: *Welding Journal* 59 (1980), Nr. 6. – ISSN 0043-2296
- [151] FARSON, D. F. ; CHEN, J. Z. ; ELY, K. ; FRECH, T.: Monitoring Resistance Spot Nugget Size by Electrode Displacement. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126 (2004), Mai, Nr. 2, 391–394. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1644550>. – DOI 10.1115/1.1644550
- [152] LEE, S. R. ; CHOO, Y. J. ; LEE, T. Y. ; KIM, M. H. ; CHOI, S. K.: A quality assurance technique for resistance spot welding using a neuro-fuzzy algorithm. In: *Journal of Manufacturing Systems* 20 (2001), Nr. 5, 320–328. [http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6125\(01\)80051-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6125(01)80051-0). – DOI 10.1016/S0278-6125(01)80051-0. – ISSN 0278-6125
- [153] ERCIL, A. ; DENIZHAN, Y. ; OKULAR, A. ; ZORA, G.: Classification trees prove useful in nondestructive testing of spot weld quality. In: *Welding Journal - New York* 72 (1993), Nr. 9
- [154] GAYER, A. ; SAYA, A. ; SHILOH, A.: Automatic recognition of welding defects in real-time radiography. In: *NDT International* 23 (1990), Juni, Nr. 3, 131–136. [http://dx.doi.org/10.1016/0308-9126\(90\)90109-2](http://dx.doi.org/10.1016/0308-9126(90)90109-2). – DOI 10.1016/0308-9126(90)90109-2. – ISSN 0308-9126
- [155] ANASTASSIOU, M. ; BABBIT, M. ; LEBRUN, J.L.: Residual stresses and microstructure distribution in spot-welded steel sheets: Relation with fatigue behaviour. In: *Materials Science and Engineering: A* 125 (1990), Juni, Nr. 2, S. 141–156. [http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093\(90\)90166-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0921-5093(90)90166-Z). – DOI 10.1016/0921-5093(90)90166-Z

- [156] BILGE, U. ; SCARPELLI, A. F. ; SCHWARTZ, R. E. ; ROSS, J. J.: *Ultrasonic method and apparatus for spot weld control*. – US Patent 4711984, Inhaber: General Motors Corporation, Anmeldedatum: 9. 3. 1987
- [157] KARLOFF, A. C. ; CHERTOV, A. M. ; MAEV, R. G.: Real-time ultrasonic expulsion detection and indentation measurement in resistance spot welds. In: *AIP Conference Proceedings* Bd. 1211, 2010, S. 1609
- [158] AMBROZIAK, A. ; MAEV, R. G. ; KORZENIOWSKI, M. ; KUSTRON, P. ; CHERTOV, A. M.: Real-time ultrasonic control of spot-welded steel joints. In: *Welding International* 25 (2011), Nr. 6, 419-423. <http://dx.doi.org/10.1080/09507111003655234>. – DOI 10.1080/09507111003655234
- [159] KUSTRON, P. ; KOCIMSKI, J. ; CHERTOV, A. M. ; TITOV, S. ; KORZENIOWSKI, M. ; AMBROZIAK, A. ; MAEV, R. G.: In-line ultrasonic investigation of spot weld quality using multi-transducer set-up. In: *Review of Progress in QNDE* Bd. 29, 2009, S. 1615–1622
- [160] TRAUB, A. C. ; VANZETTI, R.: *Control of spot weld quality by infrared thermal sensing*. – US Patent 4214164, Inhaber: Vanzetti Infrared & Computer System Incorporated, Anmeldedatum: 19. 7. 1978
- [161] Sächsischer Automobilbauer setzt auf Schweißpunktprüfung mit Ultraschall. In: *STAHL* 2 (2000), S. 65–66
- [162] WERKSTOFFPRÜFSYSTEME, VOGT: Sonderdruck Quality Engineering: Auf dem Punkt. In: *Konradin*. – ISSN 1436–2457
- [163] POLROLNICZAK, H.: Ultraschallprüfung als Mittel zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen. In: *Krautkrämer - Sonderdruck* SD 297 (1999)
- [164] ROYE, W.: Ultraschallprüfung von Schweißpunkten im Automobilbau. In: *Krautkrämer - Sonderdruck* (1999), Nr. SD298
- [165] DENISOV, A. A. ; SHAKARJI, C. M. ; MAEV, R. G. ; PAILLE, J. M. ; LAWFORDE, B. B.: Spot Weld Analysis with Two-Dimensional Ultrasonic Arrays. In: *NIST Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology* (2004)
- [166] MACLAUCHLAN, D. T. ; LATHAM, W. M.: *EMATS for spot weld examination*. – US Patent 6250163, Inhaber: McDermott Technology Inc., Anmeldedatum: 9. 3. 1999
- [167] RIZHSKY POLITEKHNIČESKY INSTITUT (RIGA, SU) ; FASTERITSKY, V. S. ; VINGRIS, L. T. ; ARDENTOV, V. V. ; FLORINSKY, J. B. ; PLOTNIKOV, V. I. ; RODNEVSKY, L. A. ; ALEXEEV, G. N.: *Apparatus for non-destructive testing of spot welds using an electromagnetic field*. – US Patent 4503392, Anmeldedatum: 21. 7. 1981

- [168] GAUL, H. ; BRAUSER, S. ; PEPKE, L.-A. ; WEBER, G. ; RETHMEIER, M.: Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Widerstandspunktschweißverbindungen aus hochfesten Mehrphasenstählen unter Berücksichtigung fertigungsspezifischer Einflüsse / Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben P802 der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. - FOSTA. 2011. – Forschungsbericht
- [169] CARTZ, L.: *Nondestructive testing: radiography, ultrasonics, liquid penetrant, magnetic particle, eddy current*. ASM International, 1995. – ISBN 9780871705174
- [170] STOCK, S. R.: X-ray microtomography of materials. In: *International Materials Reviews* 44 (1999), 141–164(24). <http://dx.doi.org/doi:10.1179/095066099101528261>. – DOI doi:10.1179/095066099101528261
- [171] DOYLE, P. A. ; SCALA, C. M.: Crack depth measurement by ultrasonics: a review. In: *Ultrasonics* 16 (1978), Juli, Nr. 4, 164–170. [http://dx.doi.org/10.1016/0041-624X\(78\)90072-0](http://dx.doi.org/10.1016/0041-624X(78)90072-0). – DOI 10.1016/0041-624X(78)90072-0. – ISSN 0041-624X
- [172] AULD, B. A. ; MOULDER, J. C.: Review of Advances in Quantitative Eddy Current Nondestructive Evaluation. In: *Journal of Nondestructive Evaluation* 18 (1999), März, Nr. 1, S. 3–36. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1021898520626>. – DOI 10.1023/A:1021898520626
- [173] GUEUDRE, C. ; LE MARREC, L. ; MOYSAN, J. ; CHASSIGNOLE, B.: Direct model optimisation for data inversion. Application to ultrasonic characterisation of heterogeneous welds. In: *NDT & E International* 42 (2009), Januar, Nr. 1, 47–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.07.003>. – DOI 10.1016/j.ndteint.2008.07.003. – ISSN 0963-8695
- [174] KREUTZBRUCK, M.: Ultraschallverfahren – Bewährte Lösungen und neue Technologien in Forschung und Produktion. In: *Berichtsband zur DGZfP-Jarrestagung 2010, Erfurt*, 2010
- [175] DIN EN 1330-7: *Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie - Teil 7: Begriffe der Magnetpulverprüfung*. 05 2005
- [176] DIN EN ISO 3059: *Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung und Magnetpulverprüfung - Betrachtungsbedingungen*. 04 2011
- [177] DIN EN ISO 9934-1: *Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen*. 03 2002
- [178] DIN EN ISO 9934-2: *Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung - Teil 2: Prüfmittel*. 03 2003
- [179] DIN EN ISO 9934-3: *Zerstörungsfreie Prüfung - Magnetpulverprüfung - Teil 3: Geräte*. 10 2002



- [180] DIN EN 1369: *Gießereiwesen - Magnetpulverprüfung*. 02 1997
- [181] DIN EN 10228-1: *Zerstörungsfreie Prüfung von Schmiedestücken aus Stahl - Teil 1: Magnetpulverprüfung*. 07 1999
- [182] DIN EN 10228-1: *Zerstörungsfreie Prüfung von Stahlrohren - Teil 12: Magnetpulverprüfung nahtloser und geschweißter ferromagnetischer Stahlrohre zum Nachweis von Oberflächenfehlern*. 07 2000
- [183] DIN EN 10228-1: *Zerstörungsfreie Prüfung von Stahlrohren - Teil 18: Magnetpulverprüfung der Rohrenden nahtloser und geschweißter ferromagnetischer Stahlrohre zum Nachweis von Dopplungen*. 07 2000
- [184] DIN EN ISO 17638: *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Magnetpulverprüfung*. 10 2002
- [185] VETTERLEIN, T. ; GEORGI, S.: Application of Magnetic Particle Inspection in the Field of the Automotive Industry. In: *19th European Conference on NDT - September 2006 - Berlin*, 2006
- [186] VETTERLEIN, T.: Application of Magnetic Particle Inspection in the Field of the Automotive Industry. In: *17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 25-28 Oct 2008*, 2008
- [187] STARMAN, S. ; MATZ, V.: Automated System for Magnetic Particle Inspection of Railway Wheels. In: *10th European Conference on Non-Destructive Testing, Moscow 2010, June 7-11*, 2010
- [188] KATAOKA, Y. ; MURAYAMA, S. ; WAKIWAKA, H. ; SHINOURA, O.: Application of GMR line sensor to detect the magnetic flux distribution for nondestructive testing. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 15 (2002), Nr. 1, S. 47–52
- [189] CHEN, L. ; QUE, P. W. ; JIN, T.: A giant-magnetoresistance sensor for magnetic-flux-leakage nondestructive testing of a pipeline. In: *Russian Journal of Nondestructive Testing* 41 (2005), Nr. 7, S. 462–465
- [190] PELKNER, M. ; NEUBAUER, A. ; BLOME, M. ; THOMAS, H.-M. ; KREUTZBRUCK, M.: Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics. In: *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIV)*, IOS Press, 2011. – ISBN 978–1–60750–749–9, S. 217–224
- [191] FOERSTER, F.: New findings in the field of non-destructive magnetic leakage field inspection. In: *NDT international* 19 (1986), Nr. 1, S. 3–14

- [192] PULZ, R. ; REHMER, B. ; SKROTZKI, B.: Pyrometric temperature measurement of ceramic thermal shock samples. In: *Measurement* 44 (2011), Nr. 1, 259 - 266. <http://dx.doi.org/DOI:10.1016/j.measurement.2010.09.050>. – DOI DOI: 10.1016/j.measurement.2010.09.050. – ISSN 0263–2241
- [193] MERKEL, M. ; ÖCHSNER, A.: *Eindimensionale Finite Elemente: Ein Einstieg in die Methode*. 1., st Edition. Springer, Berlin, 2010. – ISBN 9783642049910
- [194] *Handbuch zu Comsol Multiphysics 3.5a*. 2009
- [195] INCROPERA, F. P. ; DEWITT, D. P. ; BERGMAN, T. L. ; LAVINE, A. S.: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. Auflage. John Wiley & Sons, 2006. – ISBN 9780471457282
- [196] SCHRÖDER, T.: Ausgekochter Stahl für das Auto von morgen. In: *Max Planck Forschung* (2004), Nr. 3, 36–41. <http://dx.doi.org/10.1784/insi.47.4.206.63156>. – DOI 10.1784/insi.47.4.206.63156
- [197] DIN EN ISO 17653 : *Widerstandsschweißen - Zerstörende Prüfung von Schweißpunkten an metallischen Werkstoffen - Torsionsversuch an Widerstandspunktschweißungen*. 01 2011
- [198] NOCEDAL, J. ; WRIGHT, S.: *Numerical Optimization*. 2nd ed. Springer, Berlin, 2006. – ISBN 0387303030
- [199] SCHLICHTING, J. ; KRANKENHAGEN, R.: *Verfahren und Vorrichtung zum zerstörungsfreien Prüfen einer Fügeverbindung zwischen wenigstens zwei Fügepartnern an einem Werkstück*. – Patentantrag beim DPMA, Nr. 10 2011 050 347.1, Inhaber: BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Anmeldedatum 13.05.2011
- [200] LOHRENGEL, J. ; TODTENHAUPT, R.: Wärmeleitfähigkeit, Gesamtemissionsgrade und spektrale Emissionsgrade der Beschichtung Nextel-Velvet-Coating 811-21 (RAL 900 15 tiefschwarz matt). In: *PTB-Mitteilungen* 106 (1996), S. 259–265
- [201] DURY, M. R. ; THEOCHAROUS, T. ; HARRISON, N. ; FOX, N. ; HILTON, M.: Common black coatings - reflectance and ageing characteristics in the 0.32–14.3  $\mu\text{m}$  wavelength range. In: *Optics Communications* 270 (2007), Februar, Nr. 2, 262–272. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2006.08.038>. – DOI 10.1016/j.optcom.2006.08.038. – ISSN 0030–4018
- [202] DIN 51007: *Thermische Analyse (TA); Differenzthermoanalyse (DTA); Grundlagen*. 06 1994
- [203] DIN EN 821-3: *Hochleistungskeramik - Monolithische Keramik - Thermophysikalische Eigenschaften - Teil 3: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität; Deutsche Fassung EN 821-3:2005*. 04 2005

- [204] ISO 11357-4: *Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) - Teil 4: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität*. 09 2005
- [205] GEORGE, P. L. ; SEVENO, E.: The advancing-front mesh generation method revisited. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 37 (1994), Nr. 21, 3605-3619. <http://dx.doi.org/10.1002/nme.1620372103>. – DOI 10.1002/nme.1620372103. – ISSN 1097-0207
- [206] KERVALISHVILI, G. N. ; SCHLICHTING, J. ; MAIERHOFER, Ch. ; KREUTZBRUCK, M.: FEM modelling of heat transfer in the vicinity of vertical surface cracks using the local thermal excitation. In: *Thermografie-Kolloquium 2009, BB 119-CD der DGZfP, Berlin*, 2009

## A.1 Lebenslauf

### Persönliche Daten:

Name: Joachim Schlichting  
Geburtsdatum: 5.6.1980  
Geburtsort: Bremen

### Schulausbildung:

08/1992 – 07/1999 Altes Gymnasium Bremen, abgeschlossen mit dem Abitur

### Zivildienst:

08/1999 – 06/2000 Zentralkrankenhaus Bremen Ost

### Studium:

10/2000 – 09/2001 Studium der Chemie, FU-Berlin  
10/2001 – 02/2008 Studium der Physik, FU-Berlin  
10/2004 – 03/2005 Erasmusstipendium, Universidad Autonoma de Madrid, Spanien  
12/2006 – 12/2007 Diplomarbeit am BESSY, Berlin  
Titel: „Magnetische Schaltprozesse in Exchange Bias Systemen:  
eine Photoelektronen-Mikroskopie-Studie“

### Berufstätigkeit:

08/2008 – 09/2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abt. 8, Berlin  
seit 10/2011 Projektleiter Technologieentwicklung  
Linde AG Engineering Division, Research & Development, Pullach

## A.2 Eigene Veröffentlichungen

### Referierte Zeitschriften- und Buchartikel

1. FLORIAN KRONAST, JOACHIM SCHLICHTING, FLORIN RADU, SHRAWAN K. MISHRA, TINO NOLL, HERMANN A. DÜRR: *Spin-resolved photoemission microscopy and magnetic imaging in applied magnetic fields*. Surface and Interface Analysis, 42, Seiten 1532-1536, 2010, DOI: 10.1002/sia.3561  
Zeitschriftenartikel
2. CHRISTIANE MAIERHOFER, MATHIAS RÖLLIG, JOACHIM SCHLICHTING: *Active thermography for evaluation of reinforced concrete structures*. Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures, Woodhead Publishing Ltd, 2010, ISBN: 978-1-84569-950-5  
Buchkapitel
3. JOACHIM SCHLICHTING, CHRISTIANE MAIERHOFER, MARC KREUTZBRUCK: *Defect sizing by local excitation thermography*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, Vol. 8/1, Seiten 51-63, 2011, doi:10.3166/qirt.8.51-63  
Zeitschriftenartikel
4. JOACHIM SCHLICHTING, MATHIAS ZIEGLER, ANIKA DEY, CHRISTIANE MAIERHOFER, MARC KREUTZBRUCK: *Efficient data evaluation for thermographic crack detection*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, Vol. 8/1, Seiten 119-123, 2011, doi:10.3166/qirt.8.119-123  
Zeitschriftenartikel
5. CHRISTIANE MAIERHOFER, RAINER KRANKENHAGEN, MATHIAS RÖLLIG, JOACHIM SCHLICHTING, MICHAEL SCHILLER, THOMAS SEIDEL, RÜDIGER MECKE, UWE KALLISCH, CHRISTIANE HENNEN, JEANNINE MEINHARD: *Investigating historic masonry structures with a combination of active thermography and 3D laser scanner*. Quantitative InfraRed Thermography Journal, Vol. 8/1, Seiten 115-118, 2011, doi:10.3166/qirt.8.115-118  
Zeitschriftenartikel
6. JOACHIM SCHLICHTING, CHRISTIANE MAIERHOFER, MARC KREUTZBRUCK: *Crack Sizing by Laser Excited Thermography*. NDT&E international, 45 (1), Seiten 133-140, 2011, doi:10.1016/j.ndteint.2011.09.014  
Zeitschriftenartikel

7. JOACHIM SCHLICHTING, STEPHAN BRAUSER, LUTZ-ALEXANDER PEPKE, CHRISTIANE MAIERHOFER, MICHAEL RETHMEIER, MARC KREUTZBRUCK: *Thermographic testing of spot welds*. NDT&E international, 48, Seiten 23-29, 2012, doi:10.1016/j.ndteint.2012.02.003

Zeitschriftenartikel

### Patente

1. Patentantrag **DE 10 2010 047 713.3**, Anmeldedatum: 12.10.09, Veröffentlichungsdatum: 21.04.2011, „*Messeinrichtung und Messverfahren zur quantitativen Erfassung der räumlichen Verteilung von Gasströmungen*“.
2. Patentantrag **DE 10 2011 050 347.1**, Anmeldedatum: 12.10.09. „*Verfahren und Vorrichtung zum zerstörungsfreien Prüfen einer Fügeverbindung zwischen wenigstens zwei Fügepartnern an einem Werkstück*“.
3. Patentantrag **DE 10 2012 101 467.1**, Anmeldedatum: 23.02.2012. „*Vorrichtung zur thermografischen Prüfung auf Defekte insbesondere auf Risse in Oberflächen und Hohlräumen*“.

### Poster und Vorträge

1. J. SCHLICHTING, F. KRONAST, R. OVSYANNIKOV, T. NOLL, H. A. DÜRR: *Imaging Exchange Bias*. 25th Bessy User Meeting, Berlin 2006  
Poster
2. F. KRONAST, R. OVSYANNIKOV, J. SCHLICHTING, H. A. DUERR: *A new photoemission microscope at BESSY - spin-resolved spectroscopy on the nanoscale*. The 15th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics 2007  
Poster
3. F. KRONAST, J. SCHLICHTING, F. RADU, M. SHRAWAN, H. A. DUERR: *Microscopic investigation of exchange bias in Ni/FeMn bilayers*. DPG Frühjahrstagung 2008  
Vortrag, Vortragender F. Kronast
4. F. KRONAST, J. SCHLICHTING, F. RADU, M. SHRAWAN, H. A. DUERR: *Imaging of exchange bias in Co/FeMn bilayers on the nm length scale*. DPG Frühjahrstagung 2009  
Vortrag, Vortragender F. Kronast
5. J. SCHLICHTING, G. N. KERALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Imaging Cracks by Laser Excited Thermography*. 36th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Kingston, RI, 2009  
Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender J. Schlichting

6. J. SCHLICHTING, G. N. KERVALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Charakterisierung von Rissen mittels Laser angeregter aktiver Thermografie*. Thermographie-Kolloquium der DGZfP, 2009  
Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender M. Kreutzbruck
7. G. N. KERVALISHVILI, J. SCHLICHTING, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *FEM modeling of heat transfer in the vicinity of vertical surface cracks using the local thermal excitation*. Thermographie-Kolloquium der DGZfP, 2009  
Poster, Kurzvortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragende Ch. Maierhofer
8. J. SCHLICHTING, G. N. KERVALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Defect Sizing by Local Excitation Thermography*. 5th International workshop of NDT experts - NDT in progress 2009 (Proceedings), Prag, BB der DGZfP, 2009  
Poster, Kurzvortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender J. Schlichting
9. J. SCHLICHTING, G. N. KERVALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Defect Sizing by Local Excitation Thermography*. 15th Building Services, Mechanical and Building Industry Days, Debrecen, Hungary, 2009  
Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender J. Schlichting
10. J. SCHLICHTING, G. N. KERVALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Geometrische Charakterisierung von Fehlstellen mittels lokal angeregter aktiver Thermografie*. DGZfP-Jahrestagung 2010, Erfurt 2010  
Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender J. Schlichting
11. J. SCHLICHTING, G. N. KERVALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Geometrische Charakterisierung von Fehlstellen mittels lokal angeregter aktiver Thermografie*. 15. ITG-/GMA-Fachtagung „Sensoren und Messsysteme 2010“ Seiten 682-687 2010  
Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragende Ch. Maierhofer
12. J. SCHLICHTING, G. N. KERVALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Characterizing cracks with active thermography*. 10th European Conference on non-destructive testing, Moskau ISBN: 978-5-904270-26-1 2010  
Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender M. Kreutzbruck
13. G. N. KERVALISHVILI, J. SCHLICHTING, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Heat Transfer Modeling of Local Thermal Excitation for Surface Crack Detection and Characterization*. 10th European Conference on non-destructive testing, Moskau ISBN: 978-5-904270-26-1 2010  
Poster und Beitrag im Tagungsband

14. J. SCHLICHTING, G. N. KERVALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Characterization of Cracks by Laser Excited Thermography*. 18th European Conference on Fracture 2010  
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender M. Kreutzbruck
15. J. SCHLICHTING, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Laser Thermography for Quantitative Crack Characterization*. 37th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), San Diego, CA 2010  
 Vortrag, Vortragender J. Schlichting
16. J. SCHLICHTING, G. N. KERVALISHVILI, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Defect sizing by local excitation thermography*. QIRT 10 - 10th International conference on Quantitative InfraRed Thermography Seiten 773-780 ISBN: 978-2-9809199-1-6 2010  
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender J. Schlichting
17. J. SCHLICHTING, M. KREUTZBRUCK, CH. MAIERHOFER, H. STEINFURTH: *Thermografische Prüfung von Schweißpunkten*. DGZfP-Jahrestagung 2011, Erfurt 2011  
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender J. Schlichting
18. J. SCHLICHTING, H. STEINFURTH, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK, S. BRAUSER, L.-A. PEPKE, M. RETHMEIER: *Thermografic Testing of Spot Welds*. 38th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Burlington, VT 2011  
 Vortrag, Vortragender J. Schlichting
19. J. SCHLICHTING, M. PELKNER, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Kameragestütztes flying-spot-Verfahren zur Risserkennung*. Thermographie-Kolloquium 2011, Stuttgart 2011  
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender M. Ziegler
20. J. SCHLICHTING, M. ZIEGLER, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Flying laser spot thermography for the fast detection of surface breaking cracks*. 18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, South Africa 2012  
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender M. Kreutzbruck
21. M. ZIEGLER, J. SCHLICHTING, P. MYRACH, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK: *Fast Detection of Surface Cracks Using Flying Laser Spot Thermography*. 39th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), Denver, CO 2012  
 Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender M. Ziegler



22. M. ZIEGLER, CH. MAIERHOFER, M. KREUTZBRUCK, P. MYRACH, J. SCHLICHTING:  
*Risserkennung an metallischen Oberflächen mit Flying-spot Laser-Thermografie*. DACH  
Jahrestagung der DGZfP 2012  
Vortrag und Beitrag im Tagungsband, Vortragender M. Ziegler