

# ROBOTERGESTÜTZTE LECKAGEDETEKTION AN VAKUUMAUFBAUTEN MITTELS THERMOGRAFIE

H. Uçan, J. Bölke, C. Krombholz, H. Gobbi, Dr.-Ing. M. Meyer  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie  
Ottenbecker Damm 12, 21684 Stade, Deutschland

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Manuskript werden Ergebnisse einer Untersuchung zu einem Verfahren zur Leckagesuche bei Vakuumaufbauten in der Fertigung von Strukturbauteilen aus CFK vorgestellt. Sie basieren auf der Analyse von Informationen aus Thermografie-Bildern, mit denen typische Leckagestellen großflächig detektiert werden können. Der Grundgedanke der Untersuchungen ist die Entstehung eines robusten Systems, welches in der Prozesssicherung Verwendung finden kann. Anhand von Vakuumaufbauten bei der Fertigung von ebenen CFK-Bauteilen soll exemplarisch die Detektierung von Leckagestellen behandelt und die Eignung der Thermografie untersucht werden.

## 1. EINLEITUNG

Der ständig wachsende Markt der Luftfahrtindustrie erfordert permanente Innovationen, um den gesellschaftlichen Forderungen nach gesteigerter Ökologie als auch Ökonomie Rechnung zu tragen. Neben effizienteren Antrieben ist die Anwendung von Werkstoffen mit erhöhten spezifischen Materialeigenschaften wie bei den Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen von Interesse. Dabei steht allerdings nicht nur die Betriebsphase der Luftfahrzeuge im Fokus der Bemühungen, sondern der gesamte Produktlebenszyklus. Insbesondere bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen ist gegenwärtig ein hoher manueller Arbeitsanteil vorhanden, welcher in Anbetracht künftiger Flugzeugmodelle mit einem hohen Anteil an Kohlenstofffaserverbundbauteilen nicht dem Serienfertigungsgedanken entspricht und sich somit in der Wirtschaftlichkeit niederschlägt. Aus diesem Grund beschäftigen sich die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit innovativen Technologien zur qualitätsgesicherten Faserverbundbauteilserienfertigung. Dabei steht ein Höchstmaß an Produktivität bei gleichzeitig höchster Reproduzierbarkeit im Vordergrund.

Die meisten Verfahren bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen basieren während des Aushärtprozesses auf einer Kompaktierung mittels Druckbeaufschlagung. Zu diesem Zweck werden Vakuumaufbauten verwendet. Ein hierbei häufig auftretendes Problem sind Leckagen, die oftmals während der Aushärtung eines Bauteils zu Fehlern oder gar dem Verlust des Bauteils (Ausschuss) führen. Besonders kritisch ist dies im Falle sehr großer Bauteile, wie beispielsweise Flügelschalen.

Zur Steigerung der Prozesssicherheit sind Verfahren notwendig, die zuverlässig vor der Prozessierung eine Aussage über die Vakuumdichtheit des Aufbaus und eine punktgenaue Detektierung von Leckagen zulassen. Hierzu wird eine Thermografieanwendung untersucht, mit der Fehler am Vakuumaufbau schnell, eindeutig und automatisiert lokalisiert und gegebenenfalls korrigierende Maßnahmen abgeleitet werden können.

## 2. STAND DER TECHNIK

Für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen werden im Regelfall Vakuumaufbauten verwendet. Durch das Anlegen eines Vakuums wird das Fasermaterial kompaktiert, wodurch Lufteinschlüsse im Laminat verhindert werden sollen und eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften des erzeugten Laminats erzielt werden kann. Dieser Effekt kann durch eine zusätzliche Druckbeaufschlagung in einem Autoklaven erhöht werden.

Das Prinzip eines typischen Vakuumaufbaus für die Harzinfusion ist in BILD 1 zu erkennen. Dabei wird das Fasermaterial, trocken oder vorimprägniert, auf ein mit Trennmittel beschichtetes Werkzeug abgelegt und mit diversen Funktionslagen, wie beispielweise Abreißgewebe, versehen. Im Anschluss wird eine Vakuumfolie aufgebracht, deren Ränder mit einem Siegelband versehen sind, um eine Dichtheit zwischen Werkzeug und Folie herzustellen. Über einen am Werkzeug oder in der Folie integrierten Anschluss kann das Vakuum erzeugt werden. [1][2]

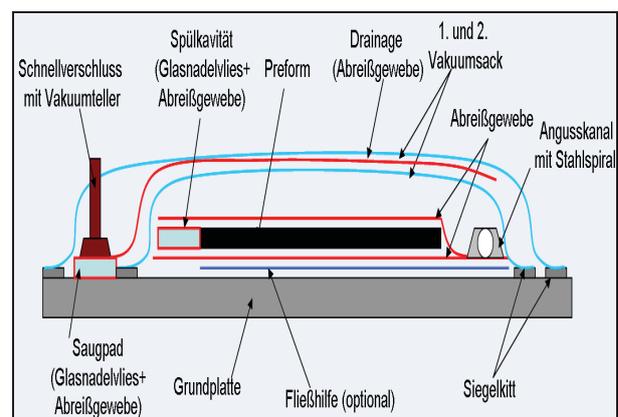


BILD 1. schematische Darstellung eines typischen Vakuumaufbaus

Ein häufig auftretendes Problem bei Vakuumaufbauten ist die Undichtheit infolge kleiner Löcher sowie Risse in der Folie oder durch ein nicht korrekt angebrachtes Siegel-

band. Die Suche nach derartigen Leckagen ohne geeignete Hilfsmittel ist allerdings sehr kompliziert und zeitaufwändig, vor allem bei großen Bauteilabmessungen. Eine Möglichkeit bietet hierbei die Messung von Sekundäreffekten, beispielweise durch das Abklemmen der Vakuumleitung über einen definierten Zeitraum und ein erneutes Öffnen. Allerdings kann dadurch anhand der Messung des Druckverlusts nur das Vorhandensein einer Leckage erkannt werden, jedoch nicht der Ort der Leckage. Darüber hinaus bietet die Erfassung von Schallemissionen im Ultraschallbereich, die dem Anwender durch eine akustische Umwandlung die manuelle Leckagesuche ermöglichen, wie es in BILD 2 zu erkennen ist. Ein großer Nachteil dieser Methode ist die sehr geringe Nachweisgrenze sowie der hohe manuelle Suchaufwand. [3][4]



BILD 2. händische Leckagesuche mittels Ultraschallsensoren [2]

Eine weitere Möglichkeit bieten Verfahren, die mit Gasdetektoren arbeiten. Hierbei wird ein Gas, häufig Helium, auf verschiedene Bauteilpositionen gesprüht, wobei an Leckagen geringe Gasmengen angesaugt werden, die vom Detektor im Absaugschlauch erkannt werden. Allerdings erweist sich diese Methode insbesondere bei großen Bauteildimensionen als schwierig realisierbar und arbeitet in der Regel nur in Druckbereichen unterhalb von 15mbar [3], was für industrielle Anwendungen oftmals zu gering ist.

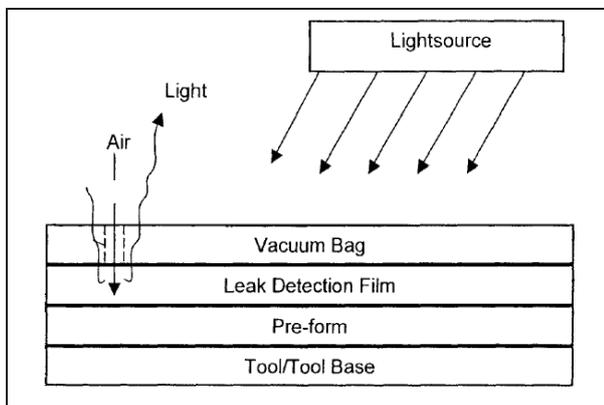


BILD 3. prinzipieller Vakuumaufbau mit eingebettetem Leckage-Detektierungsfilm (Leak Detection Film) [5]

Neben den erwähnten Methoden kann die Leckagedetektion über einen in den Vakuumaufbau eingelegten, sauerstoffsensitiven Film erfolgen, der durch die Beleuchtung mit einer bestimmten Wellenlänge an Leckagen ein verändertes Erscheinungsbild aufweist (siehe BILD 3). Dies ist insbesondere für eine genaue Detektierung interessant, da eine direkte visuelle Lokalisierung der Leckage möglich ist. Als Nachteil ist hierbei zu nennen, dass nur Leckagen an der Vakuumfolie erkannt werden und nicht an fehlerhaften Siegelflächen. Des Weiteren geht bei

jedem Prozess die Folie verloren, da Sie unmittelbar mit dem Harz in Kontakt tritt. [5]

Das in dieser Veröffentlichung untersuchte Konzept basiert auf der Anwendung eines aktiven Thermografieverfahrens. Die Thermografie beruht auf dem Prinzip der optischen Wärmestahlungsmessung. Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes emittiert Wärmestrahlung, welche für das menschliche Auge bei Umgebungstemperatur nicht sichtbar sind, da die Strahlung im infraroten Wellenlängenbereich liegt. Durch den Einsatz von Thermografieanlagen, die mit optoelektronischen Sensoren arbeiten, kann diese Strahlung sichtbar gemacht und in einem Thermogramm, elektronische Bildwiedergabe der Temperaturverteilung, dargestellt werden. [6]



BILD 4. Aufnahme der Temperaturverteilung an einem Flugzeugumpf [7]

Im industriellen Umfeld werden Thermografieanlagen für verschiedenste berührungslose Messungen eingesetzt (siehe BILD 4). Der große Vorteil besteht darin, dass vor allem Temperaturverteilungen nicht spiegelnder Oberflächen schnell aufgenommen werden können. Neben den passiven Thermografieverfahren, bei denen ohne eine zusätzliche thermische Anregung gearbeitet wird, kommen aktive Verfahren zum Einsatz. Hierbei erfährt das Messobjekt durch eine Wärmequelle einen zusätzlichen Energieeintrag, wodurch Abkühlvorgänge an der Oberfläche sichtbar gemacht werden können. Auch Strömungsverhältnisse können auf diese Art sichtbar gemacht werden. [8] Die Nutzung dieses Effektes erlaubt die Erkennung von Leckagen an Vakuumaufbauten, da die erwärmte Oberfläche durch die einströmende Luft und die Expansionskälte abgekühlt wird. Durch eine geeignete Bildverarbeitung der aufgenommenen Thermogramme kann die Leckageerkennung automatisiert werden.

### 3. EXPERIMENTELLER VERSUCHSAUFBAU

Dieses Kapitel befasst sich mit der experimentellen Versuchsdurchführung. Das Ziel der Untersuchung ist zum Einen eine Erfolgsabschätzung über das grundlegende Messprinzip und zum Anderen Aussagen über einen optimalen und reproduzierbaren Versuchsaufbau zu erhalten, der eine zuverlässige Leckageortung ermöglicht.

Der prinzipielle Versuchsaufbau besteht aus folgenden Komponenten:

- Wärmestrahler zur Einbringung gerichteter Wärmestrahlung auf den Messbereich

- Thermografie-Kamera zur Detektion vom Messobjekt abgestrahlter Wärme
- Auswerterechner zur Umwandlung und Weiterverarbeitung der aufgenommenen Bilddaten

Hierfür wird der Wärmestrahler derart über dem Bauteil positioniert, dass eine nach Möglichkeit annähernd gleichmäßige, sprich homogene Bestrahlung des Messbereichs garantiert ist.

Die vom Bauteil emittierten Wärmestrahlen werden anschließend mittels einer Thermografie-Kamera aufgezeichnet.

Aufgrund der homogenen Wärmeeinstrahlung sollten die gemessenen emittierten Wärmestrahlen von der Bauteiloberfläche ebenfalls relativ homogen sein. Temperaturgradienten sind jedoch ersichtlich, wenn

- im Messbereich unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichem Emissionsgrad beobachtet wurden
- die Wärmeeinstrahlung nicht homogen, sondern durch geometrische Besonderheiten nicht gleich verteilt ist
- Temperaturdifferenzen an der Bauteiloberfläche bspw. hervorgerufen durch Leckagen vorherrschen.

Diese aufgenommenen Daten werden letztendlich mittels geeigneter Bildverarbeitungsalgorithmen weiterverarbeitet und ausgewertet.

### 3.1. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau umfasst, wie bereits eingangs erwähnt, lediglich die Komponenten Werkzeug mit Vakuumaufbau, Thermografiekamera und Wärmestrahler.

Auf einem ebenen Aluminium-Werkzeug wurde ein Vakuumaufbau mit Vakuumfolie und Siegelkitt in den drei Größen 50x50cm<sup>2</sup>, 50x100cm<sup>2</sup> und 50x150cm<sup>2</sup> errichtet. Eine Vakuumpumpe mit einer Leistung von 370W diente der Evakuierung des Vakuumaufbaus.

Zur Bestimmung der Detektionsgenauigkeit des Mess equipments wurden definierte Leckagen in der Vakuumfolie verursacht. Unter Zuhilfenahme von Injektionsnadeln unterschiedlicher Dicke konnten Lochgrößen mit Durchmessern von 0,55mm, 0,7mm, 0,9mm und 1,2mm erstellt werden. Diese wurden derart verteilt, dass stets mindestens eine Leckage im Messfeld des optischen Systems detektierbar war. Neben der Erfassung punktförmiger Leckagen wurden ebenfalls Risse im Versuchsaufbau verursacht und anschließend detektiert.

Als Thermografie-Kamera diente die A320 der Fa. FLIR mit einer Auflösung von 320x240Px, einer thermischen Sensitivität von 0,05K und einem Temperaturmessbereich von -20°C bis 120°C. Für die Messungen wurde das Standardobjektiv mit einem Öffnungswinkel von 25° und einem integrierten Autofokus verwendet. Die Thermografie-Kamera wurde über eine GigE-Schnittstelle mit einem Auswerterechner verbunden und über diesen getriggert.

Die Tabelle TAB 1 zeigt die gemessenen Messfelddimensionen in Abhängigkeit von der Entfernung zwischen Kamera und Messobjekt.

Entfernung [mm]	Messbreite [mm]	Messhöhe [mm]	Messfläche [mm <sup>2</sup> ]
400	165	115	18.975
450	185	125	23.125
500	205	135	27.675
550	230	150	34.500
600	255	170	43.350

TAB 1. Darstellung der Abhängigkeit des gemessenen Messbereichs der Thermografie-Kamera mit dem Standardobjektiv bei Variation der objektseitigen Entfernung

Eine grundlegende Leckagedetektion ist prinzipiell auch nur mit Einsatz der Thermografie-Kamera möglich. Eine messbare Temperaturdifferenz stellt sich durch die Expansionskälte an der Leckage und der Raumtemperatur ein. Voruntersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Temperaturdifferenz zeitweise zu gering war und eine sichere Detektion verhinderte. Zur Erhöhung der Temperaturdifferenz erwies es sich als zweckmäßig, eine Wärmestrahlung in den Prozess zu integrieren. Diese Wärmestrahlung dient der homogenen Erwärmung der Bauteiloberfläche relativ zur Umgebungstemperatur. Somit ergibt sich eine größere Temperaturdifferenz zwischen erwärmter Bauteiloberfläche und expansionsgekühlter Umgebungstemperatur an Leckageorten.

Die Einstrahldauer betrug bei Messungen an der kleineren Platte 10s und bei Messungen an der größeren Platte 20s.

Hierbei wurden drei Wärmestrahler auf deren Zweckmäßigkeit getestet:

- Halogenstrahler mit 500W Maximalleistung
- Heißluftpistole mit Maximalleistung von 2000W, einstellbarem Temperaturbereich von 20°C bis 600°C und einem Volumenstrom von 300l/min
- Infrarotlampe mit 100W Maximalleistung

Die Wärmeeinstrahlung erfolgte stets unter einem Winkel von 45° bezogen auf die Bauteiloberfläche und einem Abstand von 300mm bzw. 400mm für Halogenstrahler und Heißluftpistole und 220mm bzw. 350mm für Messungen mit der Infrarotlampe. Ausgehend von diesem Setup erfolgte eine Variation der Kamerahöhe und des Sichtwinkels bezogen auf die Bauteiloberfläche. Die eingestellte Temperatur der Heißluftpistole betrug 150°C.

## 4. SOFTWARE

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung und Implementierung eines Bildverarbeitungsprogrammes zur Leckageerkennung mittels aktiver Thermographie. Hierzu wurde eine grafische Benutzeroberfläche mit dem Programmpaket MATLAB – verwendet wurde u.a. das Image Processing Toolbox – design, um die Ein- und Ausgangsdaten einerseits einfacher zu manipulieren und andererseits bestmöglich zu visualisieren.

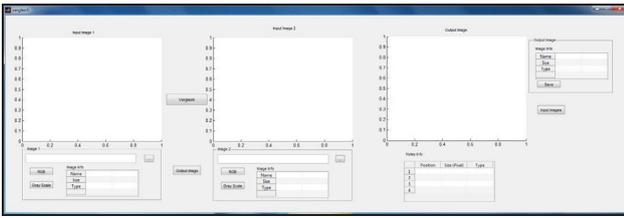


BILD 5. Bildverarbeitungssoftware (Layout)

Das Layout (siehe BILD 5) der Bildverarbeitungssoftware hat als Grundlage die Subtraktionsmethode. Zu sehen sind drei Bilder:

- das Standardbild vor der thermischen Aktivierung der Bauteiloberfläche – in diesem Fall sind Leckagestellen nicht erkennbar (*input image 1*)
- das Bild nach der thermischen Aktivierung mit potentiellen Leckagestellen (*input image 2*)
- im dritten Bild schließlich wird die Subtraktion der ersten beiden dargestellt (*output image*)

Vor der Subtraktion müssen die Eingangsdateien (*input image 1* und *input image 2*) die beiden ersten Bilder aufgrund ihrer unterschiedlichen Temperaturskalen mit der MATLAB-Funktion *rgb2gray* in ihre Graustufen konvertiert werden.

```
in_img1_gray = rgb2gray(in_img1);
in_img2_gray = rgb2gray(in_img2);
out_img = in_img1_gray - in_img2_gray;
```

Das Bildverarbeitungsprogramm ist in der Lage, die durch die Subtraktion entstandenen möglichen Leckagestellen zu filtern. Die Ausgangsdatei *out\_img* wird in eine binäre Pixelmatrix (schwarz oder weiß) transformiert. Das ist notwendig, um anschließend die MATLAB-Funktion *bwconncomp* nutzen zu können, die für das Finden von miteinander verbundenen Bereichen in binären Bilddaten zuständig ist. Das Ergebnis dieser Funktion ist eine Struktur, die alle Bereiche enthält, die miteinander verbunden sind. Abschließend können die Eigenschaften der detektierten Bereiche mit der Funktion *regionprops* analysiert werden. Aus diesen Eigenschaften der einzelnen Bereiche lassen sich die beiden folgenden Kriterien zur Klassifizierung ableiten:

- Typ der Leckagestelle
  - Loch
  - Riss
- Größe der Leckagestelle
  - 50 bis 100 Pixel
  - 100 bis 200 Pixel
  - 200 bis 400 Pixel
  - 400 bis 800 Pixel
  - größer als 800 Pixel

Die Klassifizierung nach Typ wird durch die Eigenschaft *Exzentrizität* charakterisiert. Sie ist in der Lage eine Aussage darüber zu machen, ob es sich bei dem detektierten Bereich um einen Kreis oder um eine Ellipse handelt. Der Wert der Exzentrizität *e* lässt sich durch die folgende Formel (1) berechnen:

$$(1) \quad e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$$

e	a, b	Geometrie
0	$a = b$	Kreis
$0 < e < 1$	$a < b$	Ellipse
1	$b = 0$	Linie

TAB 2. Die Definition der Eigenschaft *Exzentrizität*

In der Tabelle TAB 2 steht *a* für die große und *b* für die kleine Halbachse der Ellipse. Ist *e* größer als 0,7 wird die Leckagestelle als Riss, ansonsten als Kreis definiert.

Für das zweite Kriterium ist die Eigenschaft *Größe (Fläche)* von Wichtigkeit. Sie beschreibt den detektierten Bereich in Pixeln. Zur Bestimmung der genauen Leckagestelle wird ihr *Schwerpunkt C* bestimmt. Sie spezifiziert die horizontale und vertikale Koordinate des Massenmittelpunktes und kann mit der folgenden Formel (2) berechnet werden:

$$(2) \quad \bar{C} = \frac{\overline{X_1} + \overline{X_2} + \dots + \overline{X_k}}{k}$$

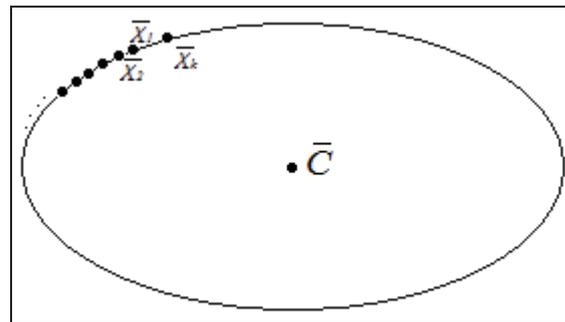


BILD 6. Schwerpunkt C einer Ellipse

In BILD 6 sind die Koordinaten  $X_1, X_2 \dots X_k$  der Pixel am Randbereich, während *k* ihre Anzahl darstellt.

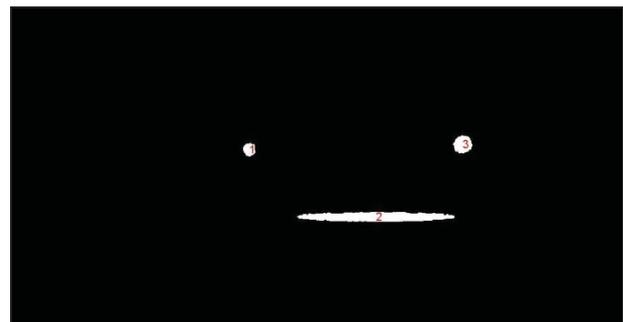


BILD 7. Das Ergebnis einer möglichen Binärdatei mit nummerierten Leckagen

Das endgültige Ergebnis ist in BILD 7 zu sehen. Das Binärbild wird mit den durchnummerierten Leckagestellen dargestellt. Nach einer abschließenden Speicherung des Bildes wird ein Report in Form einer Textdatei erstellt, das alle notwendigen Informationen bezüglich jeder detektierten Leckagestelle enthält.

## 5. AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

Die Thermografie als Verfahren zur Leckagedetektion bedient sich einer thermischen Anregungsquelle, um Wärmeflüsse gezielt auf die Oberfläche von Vakuumaufbauten einzubringen und die nachfolgende Wärmeausbreitung zu beobachten. Mit diesem Aufbau ist das Messsystem in der Lage, die von der Oberfläche emittierte und in der Atmosphäre geschwächte Wärmestrahlung – diese ist nach Stefan Boltzmann direkt proportional zur vierten Potenz der Temperatur – zu detektieren.

Für die Untersuchungen sind Vakuumaufbauten verwendet worden, die einen wesentlichen Bestandteil in der Herstellung von Faserverbundteilen darstellen. Durch gezielte Vorschädigungen der Vakuumfolie, die mithilfe unterschiedlicher Injektionsnadeln verursacht wurden, beinhaltet der Versuchsaufbau Leckagestellen definierter Größe. Diese Leckagestellen wurden mittels einer Wärmebildkamera sowohl in der Aufheiz- als auch in der Abkühlphase aufgezeichnet und die so ermittelten Bildsequenzen in einem nachgeschalteten Bildverarbeitungsalgorithmus ausgewertet. Somit konnten die Leckagestellen eindeutig detektiert und klassifiziert werden.

Die experimentellen Untersuchungen von Vakuumaufbauten zur Leckagedetektion sind mithilfe einer Versuchsmatrix gefahren worden, mit dem die wesentlichsten Einflussgrößen bestimmt werden konnten. Vorgesehene Wiederholungen der Versuchsmatrix mit der Auswahl geeigneter Kombinationen von Einflussgrößen dienen einer effizienten und aussagekräftigen Erfassung möglicher Detektionsgrenzen. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen enthalten die Beobachtung folgender Einflussgrößen:

### Temperatur

Einfluss der Temperatur durch den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher thermischer Anregungsarten (Infrarotlicht, Heißluftpistole, Halogenstrahler)

### Fehlergrößen

Einfluss der Fehlergröße durch den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Fehlergrößen

### Fehlerart

Einfluss der Fehlerart durch den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Fehlerarten (Löcher, Risse)

### Bauteilgröße

Einfluss der Bauteilgröße durch den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Bauteilgrößen. Zusätzlich wurde bei diesen Versuchen die Anzahl der Vakuumpumpen variiert.

### 5.1. Vorversuche

Die ersten Untersuchungen mit dem kleinen Vakuumaufbau ( $50 \times 50 \text{ cm}^2$ ) dienen zur Definition der optimalen Energiequelle für die gesamte Versuchsreihe.

Hierzu wird der Oberfläche der Vakuumaufbauten mit den bereits genannten Anregungsarten Energie zugeführt. Mittels der Heißluftpistole – hierzu wurde diese gleichmäßig manuell über die Probenoberfläche bewegt – konnten keine ausreichend homogenen Temperaturverteilungen erreicht werden.

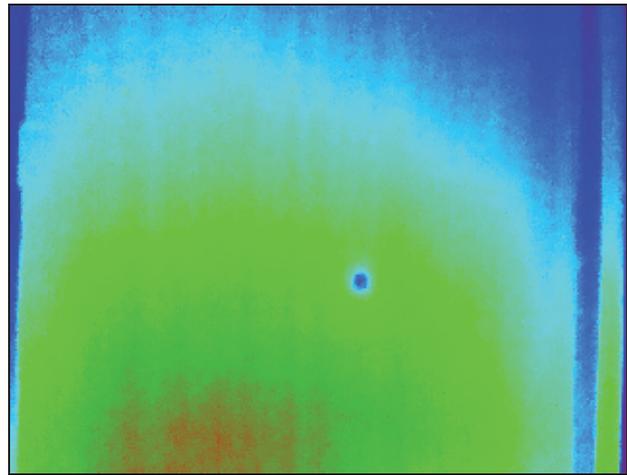


BILD 8. Thermografische Detektion einer Leckagestelle im Vakuumaufbau mittels Heizstrahler; Leckagegröße 1,2mm; Entfernung Halogenstrahler 550mm

Annähernd homogene Temperaturverteilungen konnten mittels des Halogenstrahlers und der Infrarotlampe erreicht und Leckagestellen thermografisch detektiert werden. Eine sichere Erfassung dieser Leckagestelle zeigt BILD 8. Ein Halogenstrahler, der sich in 550mm Entfernung befindet, strahlt auf die Bauteiloberfläche und erwärmt diesen relativ zur Umgebungstemperatur. Die Leckagestelle – definiert herbeigeführt durch eine Injektionsnadel der Größe 1,2mm – saugt infolge der Druckdifferenz Umgebungsluft an. Diese Umgebungsluft kühlt die Umgebung der Leckage ab und führt zu einer Temperaturdifferenz, die thermografisch sicher detektiert werden kann.

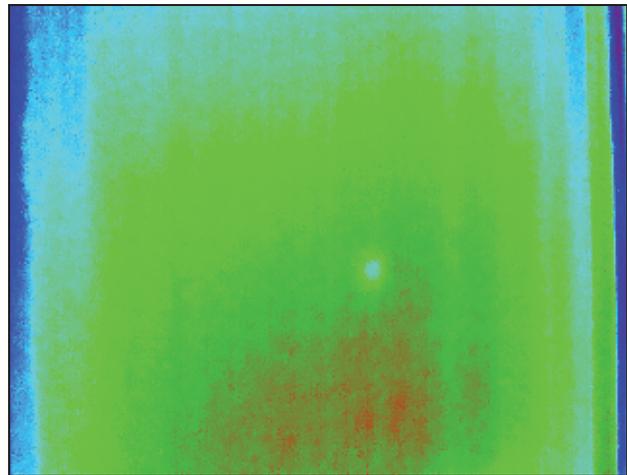


BILD 9. Thermografische Detektion einer Leckagestelle im Vakuumaufbau mittels Infrarotlampe; Leckagegröße 1,2mm; Entfernung Infrarotlampe 550mm

In BILD 9 ist derselbe Versuchsaufbau wie in BILD 8 mit der Infrarotlampe als Wärmequelle zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die von der Infrarotlampe abgegebene Wärmemenge aus einer Entfernung von 550mm nicht ausreicht, um eine Temperaturdifferenz zu erzeugen, die thermografisch sicher detektiert werden kann.

#### 5.1.1. Einfluss der Fehlergrößen

Zur Feststellung der Erkennbarkeit von Fehlstellen wurde in der ersten Versuchsreihe zunächst eine definierte Le-

ckagestelle mit einem Durchmesser von 1,2mm (siehe BILD 9) ausgewählt. In weiteren Versuchen wurden Leckagestellen mit den Durchmessern 0,9mm, 0,7mm und 0,5mm eingebracht.

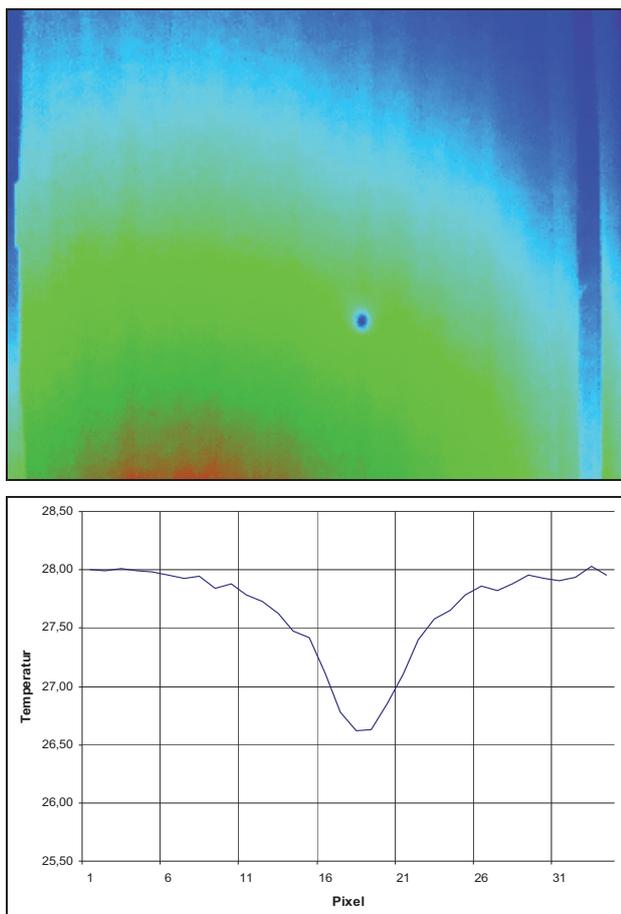


BILD 10. Thermografische Detektierung einer Leckagestelle im Vakuumaufbau mittels Halogenstrahler; Leckagegröße 0,9mm; oben: Wärmebild; unten: Thermogramm

Die Vakuumaufbauten wurden 10 Sekunden lang aus einem Abstand von 550mm beleuchtet und die Aufheizphase und die Abkühlphase mit der Wärmebildkamera aufgezeichnet. Zwei dieser Versuche sind in BILD 10 und BILD 11 zu sehen. Die Leckagestellen sind als kühleren Stellen – sogenannte *cold spots* – deutlich zu sehen.

Eine weitere Möglichkeit etwaige Leckagestellen zu erkennen, ist das Thermogramm. Im BILD 10 und BILD 11 stellen Thermogramme eines solchen Falls dar. Anhand des Verlaufs der Grafen – Leckagestellen sind kälter als die umgebenden Bereiche, wodurch eine charakteristische *thermische Signatur* entsteht – sind mögliche Leckagestellen nicht nur lokalisierbar, sondern auch bezüglich ihrer Größe in Pixel einstuftbar.

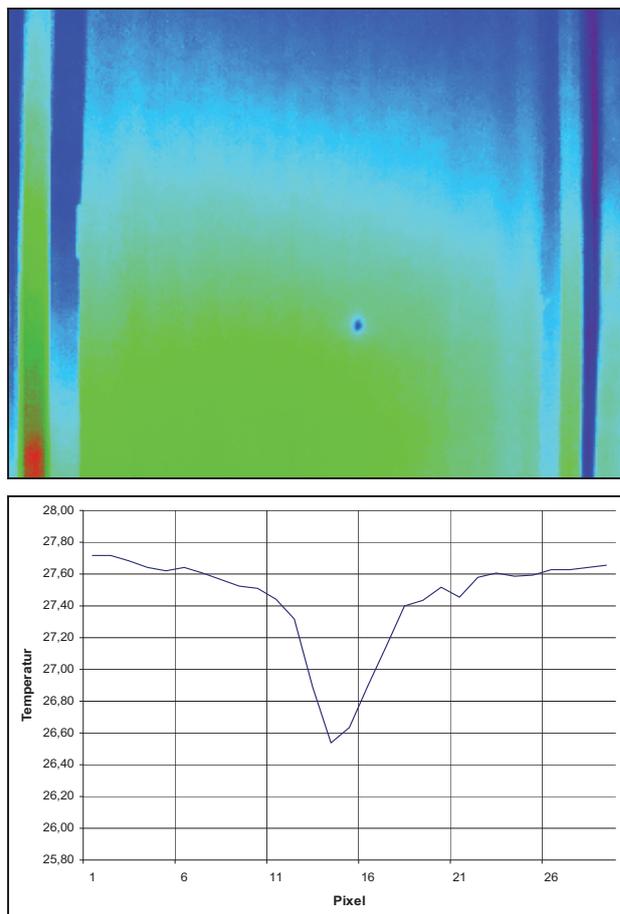


BILD 11. Thermografische Detektierung einer Leckagestelle im Vakuumaufbau mittels Halogenstrahler; Leckagegröße 0,55mm; oben: Wärmebild; unten: Thermogramm

Ein Vergleich zum Nachweisvermögen für die künstlich erzeugten Leckagestellen ist in der TAB 3 dargestellt. Hierin ist zu sehen, dass die Leckagegrößen mit einem Durchmesser von 0,7mm, 0,9mm und 1,2mm in den sieben Versuchen mit einer Zuverlässigkeit von 100% detektiert werden konnten. Eine Ausnahme stellt hierbei die Leckagegröße 0,55mm dar. Sie konnte in einem der sieben Fälle nicht detektiert werden.

Durchmesser Leckagestelle [mm]	0,55	0,7	0,9	1,2
Anzahl entdeckter Leckagestellen	6 (7)	7 (7)	7 (7)	7 (7)

TAB 3. Nachweisvermögen für künstlich erzeugte Leckagestellen unterschiedlicher Durchmesser

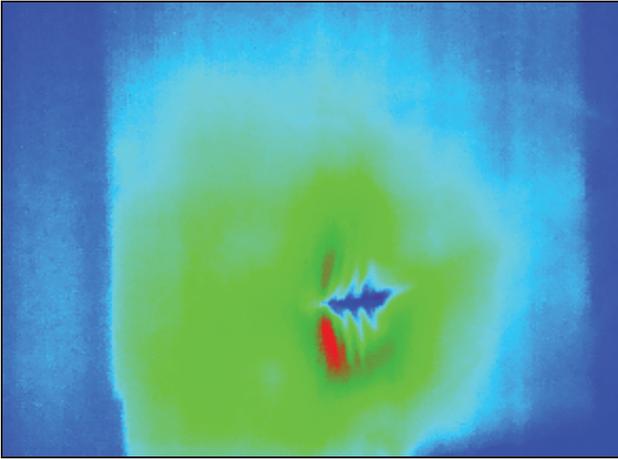


BILD 12. Thermografische Detektion einer Leckagestelle im Vakuumaufbau mittels Halogenstrahler; Risslänge 2cm;

Weitere Versuche dienten zur Erkennbarkeit von Rissen mit Fehlerlängen von 1cm bis 3cm. In BILD 12 ist einer dieser Versuche mit einer Risslänge von 2cm zu sehen. Auch hierbei ergaben sich ähnliche Ergebnisse wie bei den Versuchen zuvor. Die Leckagestelle ist als cold spots eindeutig detektierbar.

### 5.1.2. Einfluss der Bauteilgröße

Um den Einfluss der Bauteilgröße auf die thermografische Detektion von Leckagestellen zu untersuchen, wurden ebene Aluminium-Werkzeuge mit Vakuumaufbauten unterschiedlicher Dimensionen – mit  $50 \times 50 \text{cm}^2$ ,  $50 \times 100 \text{cm}^2$  und  $50 \times 150 \text{cm}^2$  – errichtet. Es zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Beleuchtungszeit des Halogenstrahlers und der Bauteilgrößen. Je größer das Bauteil wird, desto mehr Beleuchtungszeit wird benötigt, um Leckagestellen thermografisch sicher zu detektieren. Das ist damit zu erklären, dass das Leistungsvermögen der Vakuumpumpe nicht ausreichte, um die benötigte Ansaugleistung zu gewährleisten.

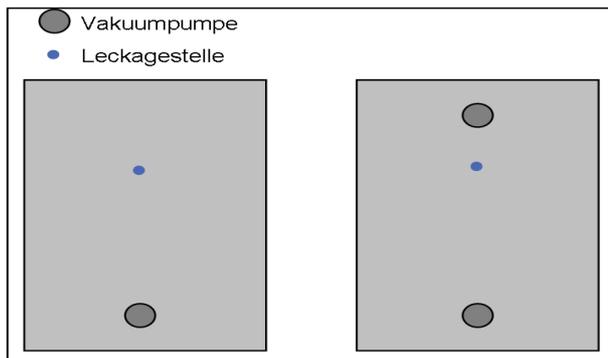


BILD 13. Vakuumaufbau der Dimension  $50 \times 150 \text{cm}^2$ ; links: Aufbau mit einer Vakuumpumpe; rechts: Aufbau mit zwei Vakuumpumpen

BILD 13 zeigt ein Vakuumaufbau der Größe  $50 \times 150 \text{cm}^2$ . Während der linke Aufbau mit einer Vakuumpumpe eine Aufheizzeit von 20 Sekunden benötigt, ist mit dem rechten Vakuumaufbau und einer zweiten Vakuumpumpe diese Zeit deutlich zu reduzieren.

## 6. AUTOMATISIERUNGSPOTENTIAL

Ausgehend von den Erkenntnissen, die in den vorange-

henden Kapiteln gewonnen wurden, erfolgten ebenfalls Untersuchungen, inwieweit sich die Leckagedetektion vereinfachen und der Prozess automatisieren lässt.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. setzt seit längerer Zeit erfolgreich die CAx-Software CATIA V5 für den Designprozess faserverstärkter Strukturkomponenten ein. In diesem System sind bereits CAD-Daten zum Tooling, dem abgelegten Fasermaterial und der Versuchsumgebung gespeichert. Durch die Eröffnung des Zentrums für Leichtbauproduktionstechnologie in Stade sind darüber hinaus Forschungs- und Entwicklungsarbeiten robotergestützter Fertigungsverfahren möglich. Die Kinematik der Roboter bzw. die CAD-Daten der Forschungsanlage sind ebenfalls bekannt, so dass bereits im CAx-System eine Planung der Leckagedetektion erfolgen kann. Darüber hinaus besitzt CATIA eine NC-Workbench, mittels derer Mehrachsmaschinen definiert und simuliert werden können. Des Weiteren ist eine NC-Codeerstellung möglich, die direkt von der Forschungsanlage weiterverarbeitet werden kann. Auf dieser Grundlage kann der Prozess bereits im CAD abgebildet werden.

Derzeit werden im ZLP Algorithmen entwickelt, die bereits innerhalb der CAx-Umgebung einen definierten Messbereich eines Toolings abscannen. Als Eingangsgrößen dienen dabei:

- CAD-Daten des Toolings
- Definition eines Messmittelpunktes im Messfeld zur Festlegung der Startposition
- gewünschter Abstand des Kamerasystems zum Messfeld
- Festlegung des Kamerasystems aus verknüpfter Datenbank
- Auswahl des gewünschten Objektivs aus verknüpfter Datenbank
- Mindestüberlappung der einzelnen Messfelder
- Winkel zwischen Kamerasystem und Messfeldnormalen

Mittels dieser Parameter wird das Messfeld abgescannt und jeder Messpunkt dokumentiert. Des Weiteren wird an jedem Messpunkt ein Simulationsbild der Kamerasicht erstellt und abgespeichert.

Die Bilder sind aufgrund der definierten extrinsischen und intrinsischen Parameter eine maßstabgetreue Abbildung der Realität und zeigen Bereiche unterschiedlichen Materials. Dieser Ansatz wird genutzt, um auf den Thermografieaufnahmen Bereiche mit unterschiedlichen Materialien zu erkennen und diesen Bereichen im Zuge einer automatisierten Auswertung die jeweiligen Emissionsgrade zuzuordnen, um eine absolute Temperaturmessung zu erhalten. Dabei ist darauf zu achten, dass nicht die Emissionsgrade der im CAx definierten Materialien, sondern die der definierten Materialien unter den im Vakuumaufbau eingesetzten Hilfsstoffen, wie beispielsweise Vakuumfolie, Trennfolie, Abreißgewebe, etc., berücksichtigt wird. Die jeweiligen Emissionsgrade werden in einer Prozessdatenbank einmalig gespeichert und können während der Auswertung der Thermografieaufnahmen abgerufen werden. [9]

Parallel dazu erfolgen Kollisionsuntersuchungen zwischen Roboter und Tooling bzw. weitere Optimierungsschritte die gleichzeitig eine anlagenseitige Machbarkeitsuntersuchung darstellen.

Ist die Machbarkeitsuntersuchung positiv abgeschlossen werden ein NC-File und ein Report erstellt. Das NC-File kann direkt in die Forschungsanlage eingespeist werden und bedarf keiner weiteren Übersetzung.

Darüber hinaus kann der Kamerasetup für jede Messposition kalibriert werden. Hierfür dienen die Anlagenkenndaten jedes Messpunktes, wie Position und Orientierung der Kamera bzw. definierter Abstand und Geometrie des Vakuumaufbaus zur Bestimmung der extrinsischen und intrinsischen Modellparameter. Somit führt eine automatisierte Bildauswertung zu einer Leckageortung im Bildkoordinatensystem, welche durch die hinreichende Anlagen Genauigkeit in das globale bzw. das Werkzeug-Koordinatensystem transformiert werden kann. Diese Ortung erlaubt das Mappen detektierter Fehlstellen auf die Werkzeuggeometrie und im Zuge dessen separate und automatisierte Reparaturprozesse.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Die prinzipielle Anwendbarkeit der Thermografie zur Leckagedetektion konnte mit dem vorgestellten Verfahren an ebenen Vakuumaufbauten gezeigt werden. Hierbei wurden neben Löchern der Größe 0,55mm, 0,7mm, 0,9mm und 1,2mm auch Risse der Größe 1cm bis 3cm sicher detektiert.

Für weitere Untersuchungen sollte nicht nur nach weiteren Einflussgrößen gesucht, sondern auch die bereits untersuchten Einflüsse, eventuell mit noch größeren Stichproben, konkretisiert werden.

Beim Einfluss der Fehlerarten sollte neben den bereits untersuchten Löchern und Rissen ebenfalls weitere Effekte wie Falten, Undichtigkeiten am Siegelkit und den sogenannten Folienkanälen untersucht werden.

Darüber hinaus wird die Kopplung der ausgewerteten Bilddaten mit der Fertigungsanlage untersucht. Hier zeigt sich insbesondere die Projektion der detektierten Leckagen auf die Bauteilgeometrie für automatisierte Korrekturmaßnahmen als vielversprechend. Des Weiteren wird die automatisierte Bahnplanung zum Abscannen eines Bauteils weiter optimiert.

Um einer absoluten Temperaturmessung gerecht zu werden, steht die Entwicklung neuer Algorithmen im Vordergrund. Diese Algorithmen sollen die jeweiligen Einzelbilder mit den dazugehörigen CAD-Bildern und den hinterlegten Emissionsgraden vergleichen und eine automatisierte Bildauswertung ermöglichen. Hierfür wird außerdem eine Prozessdatenbank mit den Emissionsgraden eingesetzter Materialpaarungen entwickelt.

## 8. LITERATURANGABEN

- [1] Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, H. Schürmann, Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York, 2004
- [2] Cost effective resin infusion, P. Lunn, Elsevier Ltd., Reinforced plastics, Jan/Feb 2009
- [3] Helium-Lecksuche in Kraftwerken, A. Schöpphof, Pfeiffer Vacuum, DGZfP-Jahrestagung, 2003
- [4] Möglichkeiten der Lecksuche mit Ultraschall, Santer zur Horst Meyer, Sonotec Ultraschallsensorik Halle GmbH, DGZfP-Jahrestagung, 2009
- [5] Leak detection in vacuum bags, F. B. Miller, M. E. Benne, The Boeing Company, Patent Application Publication US 2011/0079174 A1, Chicago (US), 2011

- [6] Leitfaden zur Wärmeflussthermografie, Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung, J. Aderhold, G. Dobmann, M. Goldhammer, T. Hierl, Erlangen Fraunhofer Allianz Vision, Fraunhofer IRB Verlag, 2005
- [7] IRNDT – Lösungen für die Zerstörungsfreie Prüfung, Automation Technology, 2010
- [8] Strömungsmesstechnik, W. Nitsche, A. Brunn, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, 2006
- [9] Density Effects in Model Deformation Measurements on a NACA 0010 Profile in a Transonic Flow.; T. Kirmse, A. D. Gardner und C. Kromholz (2010)